

***EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL ENTRE
SISTEMAS DE MADERA Y SISTEMAS MIXTOS
MADERA-HORMIGÓN.***

Carlos Romero Gómez

Curso 2024-2025

Índice

1. INTRODUCCIÓN

- 1.1. CONTEXTO Y MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO.
- 1.2. ESTADO ACTUAL DE LAS ESTRUCTURAS DE MADERA Y SISTEMAS MIXTOS.
- 1.3. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.

1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO.

- 1.4.1 Objetivo general.
- 1.4.2 Objetivos específicos.

1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.

- 1.5.1 Alcance del estudio.
- 1.5.2 Limitaciones del estudio.

2. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS MIXTOS MADERA–HORMIGÓN

- 2.1. INTRODUCCIÓN AL ESTADO DEL ARTE.
- 2.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS SISTEMAS MIXTOS MADERA–HORMIGÓN.
- 2.3. SISTEMAS ESTRUCTURALES MIXTOS EN EDIFICACIÓN CONTEMPORÁNEA.
- 2.4. PRINCIPIO MECÁNICO DE LA ACCIÓN COMPUESTA.
- 2.5. MÉTODOS DE CÁLCULO PARA SISTEMAS MIXTOS MADERA–HORMIGÓN
- 2.5.1. MÉTODO Γ (GAMMA)
- 2.5.2. MODELOS DE BIELAS Y TIRANTES (STRUT-AND-TIE)
- 2.5.3. MODELOS NUMÉRICOS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS
- 2.6. TIPOLOGÍAS DE CONEXIÓN EN SISTEMAS TCC
- 2.6.1. CONECTORES TIPO CLAVIJA Y TORNILLOS.
- 2.6.2. CONEXIONES MEDIANTE ENTALLADURAS (NOTCHED CONNECTIONS).
- 2.6.3. OTROS SISTEMAS DE CONEXIÓN.
- 2.7. SÍNTESIS DEL ESTADO DEL ARTE Y POSICIONAMIENTO DEL TFM.

3 – MARCO TEÓRICO APLICABLE.

- 3.1 NORMATIVA APLICABLE.
- 3.2 ESTADOS LÍMITE: HIPÓTESIS Y CRITERIOS DE DISEÑO.
- 3.2.1 ESTADO LÍMITE ÚLTIMO (ELU).
- 3.2.2 ESTADO LÍMITE DE SERVICIO (ELS).
- 3.3 COMPROBACIÓN DE DEFORMACIONES, VIBRACIONES Y FLECHAS.
- 3.3.1 FLECHAS (DEFORMACIONES VERTICALES).
- DEFINICIÓN Y TIPOLOGÍA DE FLECHAS.
- 3.3.2 VIBRACIONES.
- 3.3.2.1 MODOS VIBRACIÓN.
- 3.4 COMPROBACIÓN FRENTE AL FUEGO.
- 3.4.1 MÉTODO DE SECCIÓN REDUCIDA (UNE-EN 1995-1-2:2016).

4 – MODELOS ESTRUCTURALES.

- 4.1 INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS COMPARATIVOS.
- 4.2 GEOMETRÍA BASE DE LOS MODELOS.
- 4.2.1 MODELO 1 – EDIFICIO RESIDENCIAL.
- 4.2.2 MODELO 2 – ESPACIO COMERCIAL.
- 4.3 PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL.
- 4.4 CONDICIONES DE CONTORNO Y CARGA.
- 4.4.1 OBSERVACIONES ESPECÍFICAS SOBRE LAS CONDICIONES DE CARGA EN EL MODELO.
- 4.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL.
- 4.6 MODELIZACIÓN DE LA CONEXIÓN CLT–HORMIGÓN.
- 4.6.1. ENFOQUE BASADO EN EL MODELO BIELAS Y TIRANTES (STRUT-AND-TIE).
- 4.6.2. DISEÑO DE LA CONEXIÓN.
- 4.6.2.1 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS Y DE MATERIAL CONSIDERADOS.
- 4.6.2.2 DEFINICIÓN DE LA RIGIDEZ DE LA CONEXIÓN.
- 4.6.2.3 PARÁMETROS RESISTENTES Y MODOS DE FALLO CONSIDERADOS.
- 4.6.2.4 GEOMETRÍA Y VALORES DE LA UNIÓN.
- 4.6.2.5 DISEÑO DE LA ENTALLADURA.

5 – ANÁLISIS DE RESULTADOS.

- 5.1 ANÁLISIS DE AGOTAMIENTO DE LA MADERA.
- 5.2 ANÁLISIS ESTÁTICO GLOBAL.
- 5.3 ANÁLISIS MODAL (VIBRACIONES).
- 5.4 REACCIONES EN APOYOS (CIMENTACIONES).
- 5.5 VALORACIÓN ECONÓMICA.

6 – DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- 6.1. INTERPRETACIÓN GENERAL DE LOS RESULTADOS.
- 6.2. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE CADA SISTEMA.
- 6.3. REFLEXIONES FINALES.

7. ANEXOS:

8. BIBLIOGRAFÍA

9. NORMATIVA Y DOCUMENTOS TÉCNICOS

1.INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO Y MOTIVACIÓN DEL ESTUDIO.

En los últimos años, el sector de la edificación ha experimentado un creciente interés por sistemas constructivos más sostenibles, capaces de reducir el impacto ambiental asociado a la construcción sin comprometer la seguridad estructural ni el confort del usuario. En este contexto, la madera estructural, y en particular la madera contralaminada (CLT), se ha consolidado como una alternativa viable a los sistemas tradicionales de hormigón armado y acero, especialmente en edificios de mediana altura.

El CLT presenta numerosas ventajas, entre las que destacan su bajo peso propio, su capacidad portante elevada, su rapidez de ejecución y su baja huella de carbono. No obstante, su ligereza y menor rigidez en comparación con sistemas masivos puede generar limitaciones en el control de deformaciones, vibraciones y comportamiento dinámico, especialmente en forjados de grandes luces o edificios de varias plantas.

Una de las múltiples respuestas a estas limitaciones, son los conocidos como sistemas estructurales mixtos madera-hormigón, en los que ambos materiales trabajan conjuntamente aprovechando sus propiedades más favorables: la resistencia a tracción de la madera y la resistencia a compresión y rigidez del hormigón. Estos sistemas permiten mejorar significativamente el comportamiento estructural, manteniendo un uso eficiente de los materiales.

1.2 ESTADO ACTUAL DE LAS ESTRUCTURAS DE MADERA Y SISTEMAS MIXTOS.

El desarrollo normativo y tecnológico ha permitido que la madera estructural alcance un elevado grado de fiabilidad. El Eurocódigo 5, junto con documentos complementarios como el CTE DB SE-M y el CEN/TS 19103, proporciona actualmente un marco sólido para el diseño de estructuras de madera y CLT.

Paralelamente, numerosos estudios experimentales y analíticos han demostrado el potencial de los sistemas mixtos madera-hormigón, especialmente en forjados, donde la acción compuesta permite aumentar la rigidez a flexión, reducir flechas y mejorar el comportamiento acústico y frente al fuego.

Sin embargo, el diseño de estos sistemas mixtos depende de forma crítica del tipo de conexión entre la madera y el hormigón, así como del método de cálculo empleado, existiendo todavía incertidumbres en la aplicación directa de métodos simplificados como el método γ en determinadas configuraciones estructurales.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.

Este trabajo aborda una cuestión de interés en el mercado: la eficiencia estructural, ambiental y económica de la edificación con madera en comparación con soluciones mixtas. La investigación se justifica desde tres ejes fundamentales de la sostenibilidad: medioambiental, social y económica.

Desde el enfoque medioambiental, la madera técnica se considera uno de los materiales más eficientes en términos de emisiones, energía incorporada y capacidad de almacenamiento de carbono.

En lo social, la industrialización en madera responde a un entorno laboral en transformación. La pérdida del oficio artesanal tradicional, como el del carpintero de armar, se compensa con la necesidad de nuevos perfiles técnicos vinculados al modelado digital, prefabricación, automatización y ensamblaje. Este cambio abre oportunidades para la formación de nuevos profesionales y mejora las condiciones laborales al reducir trabajos peligrosos o ineficientes in situ.

Desde la dimensión económica, los costes son una variable crítica. La comparación entre sistemas estructurales debe considerar no solo el precio de los materiales, sino también la logística, los tiempos de ejecución, la necesidad de cimentaciones y la capacidad de adaptación del sistema a distintos usos.

Este estudio pretende analizar mediante herramientas gráficas y técnicas los diferentes comportamientos de cada sistema para facilitar decisiones informadas.

1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO.

El objetivo general de este Trabajo Final de Máster es realizar un análisis comparativo técnico, estructural y económico entre dos sistemas constructivos aplicados a dos tipologías edificatorias, valorando cuál de ellos ofrece un mejor equilibrio entre eficiencia técnica y comportamiento estructural.

1.4.1 Objetivo general.

Comparar el comportamiento estructural, la eficiencia técnica y el coste estimado de los sistemas estructurales siguientes:

- Madera técnica, madera laminada (GLT) + CLT.
- Sistema mixto GLT+(CLT + hormigón)

Mediante el modelado y análisis con el software Dlubal RFEM 6, utilizando como normativa base el **Eurocódigo 5**.

1.4.2 Objetivos específicos.

1. Modelar y calcular ambos sistemas estructurales mediante un entorno paramétrico con el software Dlubal RFEM 6, aplicando criterios del Eurocódigo y condiciones de carga normativas.
2. Definir y analizar las soluciones estructurales para dos tipologías edificatorias diferenciadas:
 - Edificio residencial (luces 5x5 m) .
 - Edificio de uso comercial (luces 7.5x7.5 m).
3. Comparar parámetros clave, como:
 - Espesores y dimensiones de los elementos estructurales.
 - Deformaciones y esfuerzos internos.
 - Peso propio total de la estructura
 - Reacción al fuego según Eurocódigo 5 Parte 1-2.
4. Estimar los costes estructurales asociados a cada sistema, considerando materiales, montaje y logística.
5. Extraer conclusiones que permitan orientar decisiones estructurales coherentes con los objetivos de sostenibilidad del proyecto.
6. Adquirir y aplicar conocimientos en el uso del software de cálculo estructural Dlubal para la modelización y análisis mediante elementos finitos.

1.5 ALCANCE Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.

El estudio se centra en el análisis estructural de dos edificaciones diferentes en cuanto a uso y geometría, aplicando dos soluciones estructurales diferenciadas: madera técnica y madera técnica que trabaja conjuntamente con el hormigón generando una estructura mixta madera-hormigón. Se persigue identificar ventajas y limitaciones desde un punto de vista técnico y económico.

1.5.1 Alcance del estudio.

- Modelado de dos edificaciones:
 - Edificio de uso residencial (luces 5x5 m),
 - Edificio de uso comercial (luces 7.5x7.5 m).
- Análisis comparativo de:
 - Sistema estructural en madera técnica (GLT + CLT).
 - Sistema estructural mixto GLT+(CLT + hormigón).
- Cálculo estructural mediante **Dlubal RFEM 6**, utilizando:
 - **Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1 y EN 1995-1-2)** para la madera.
 - **Eurocódigo 2 (EN 1992)** para elementos de hormigón.
- El modelado se lleva a cabo mediante un entorno **paramétrico en RFEM 6**, lo cual permite evaluar de forma flexible el efecto de distintos parámetros estructurales.

1.5.2 Limitaciones del estudio.

- El estudio se centra exclusivamente en el cálculo estructural. No se desarrollan soluciones arquitectónicas ni planos de fabricación.
- No se estudia el comportamiento térmico, higrotérmico ni acústico de las soluciones.
- El análisis económico se realiza a nivel comparativo entre sistemas, sin incluir costes indirectos ni de obra completa.
- Las uniones estructurales se diseñan y verifican a nivel técnico, pero no se desarrollan detalles constructivos o soluciones específicas de fabricación.
- Se excluyen la envolvente, instalaciones y acabados interiores.
- Los costes estructurales se estiman de forma orientativa, sin análisis de ciclo completo.
- No se contemplan cargas sísmicas ni efectos térmicos o dinámicos complejos.

2. ESTADO DEL ARTE DE LOS SISTEMAS MIXTOS MADERA–HORMIGÓN

2.1. Introducción al estado del arte.

Los sistemas estructurales mixtos madera–hormigón (Timber-Concrete Composite, TCC) constituyen una tipología constructiva consolidada que combina dos materiales con comportamientos mecánicos complementarios: la madera, eficiente a tracción y ligera, y el hormigón, resistente a compresión y con elevada rigidez. El principio fundamental de estos sistemas se basa en la acción compuesta parcial o total entre ambos materiales, activada mediante una conexión mecánica adecuada.

El interés por los sistemas TCC no es reciente. Desde principios del siglo XX se han desarrollado soluciones híbridas con el objetivo inicial de reemplazar o complementar la armadura de acero en losas de hormigón, así como de reforzar forjados de madera existentes. Con el avance de la ingeniería de la madera y la aparición de productos industriales como la madera laminada y el CLT, estos sistemas han adquirido un nuevo impulso, especialmente en el ámbito de la edificación sostenible.

Este capítulo presenta una revisión crítica del estado del arte, abordando la evolución histórica, los sistemas estructurales mixtos más relevantes, los métodos de cálculo existentes y, de manera específica, las tipologías de conexión, con especial atención a las conexiones mediante entalladuras (notches), que constituyen el foco principal del presente Trabajo Fin de Máster.

2.2. Evolución histórica de los sistemas mixtos madera–hormigón.

Los primeros desarrollos documentados de sistemas mixtos madera–hormigón se remontan a la década de 1920. En 1922, Paul Müller patentó un sistema de losa compuesta por tabloncillos de madera colocados de canto y una capa superior de hormigón, con el objetivo de mejorar la capacidad portante y la rigidez del conjunto. Posteriormente, en 1939, Otto Schaub desarrolló un sistema de losa mixta de nervios de madera y losa de hormigón conectados mediante perfiles metálicos en forma de Z o H.

Durante las décadas siguientes, el desarrollo de estos sistemas estuvo fuertemente condicionado por la escasez de acero, especialmente en el contexto de las guerras mundiales. En ese periodo, la madera se utilizó como sustituto parcial de la armadura, sentando las bases conceptuales de los sistemas TCC actuales.

A partir de la segunda mitad del siglo XX, el interés por los sistemas mixtos se desplazó progresivamente hacia el refuerzo de estructuras existentes, especialmente en Europa Central, donde una gran parte del parque edificado histórico está constituido por forjados de madera. En este contexto, el hormigón colaborante permitió aumentar la capacidad portante y cumplir con las exigencias normativas modernas sin alterar significativamente la arquitectura original.

2.3. Sistemas estructurales mixtos en edificación contemporánea.

En la edificación actual, los sistemas mixtos madera–hormigón se emplean principalmente en forjados, aunque también existen aplicaciones en vigas y, en menor medida, en sistemas de puente. En el caso de los forjados, la configuración más habitual consiste en un elemento de madera trabajando a tracción (vigas, tableros o paneles CLT) y una losa de hormigón en compresión.

La introducción del CLT ha supuesto un punto de inflexión en el desarrollo de estos sistemas. A diferencia de las soluciones tradicionales basadas en vigas y tableros, los paneles de CLT permiten:

- Una mayor rigidez en el plano del forjado.
- Un mejor comportamiento frente a acciones horizontales.
- Una mayor industrialización del proceso constructivo.

Los forjados mixtos CLT–hormigón se han mostrado especialmente eficaces en edificios de varias plantas, donde la mejora en rigidez y masa del forjado contribuye de forma significativa al comportamiento global del edificio frente a viento y sismo.

2.4. Principio mecánico de la acción compuesta.

El comportamiento estructural de los sistemas mixtos (TCC) depende de la capacidad de la conexión para transferir esfuerzos rasantes entre la madera y el hormigón. En ausencia de conexión, ambos materiales trabajan de forma independiente, mientras que una conexión rígida permitiría una acción compuesta total.

En la práctica, la mayoría de los sistemas presentan una acción compuesta parcial, caracterizada por un deslizamiento relativo entre materiales. Este deslizamiento afecta directamente a:

- La rigidez efectiva a flexión.
- La distribución de tensiones.
- Las deformaciones del sistema.

Por este motivo, el diseño de sistemas mixtos (TCC) no puede abordarse mediante métodos clásicos de sección transformada, siendo necesario recurrir a modelos específicos que tengan en cuenta la deformabilidad de la conexión.

2.5. Métodos de cálculo para sistemas mixtos madera-hormigón

2.5.1. Método γ (gamma)

El método γ (gamma) constituye el procedimiento analítico simplificado más extendido para el cálculo de vigas y forjados mixtos madera-hormigón. Su formulación original fue desarrollada por Möhler en la década de 1950 y posteriormente incorporada en el Anexo B del Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1) como método de referencia para la evaluación de tensiones y deformaciones en elementos compuestos con conexión mecánica.

Este método permite estimar la rigidez efectiva a flexión del sistema compuesto mediante un coeficiente reductor, γ , que tiene en cuenta la deformabilidad de la conexión entre los materiales. La expresión del coeficiente γ depende fundamentalmente de la rigidez de la conexión, de la separación entre conectores y de la luz del elemento, estableciendo así una relación directa entre la capacidad de transmisión de esfuerzos rasantes y el grado de acción compuesta alcanzado (EN 1995-1-1, Anexo B). La principal ventaja del método γ radica en su simplicidad y facilidad de aplicación, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para el predimensionado y para configuraciones estructurales sencillas. No obstante, la propia bibliografía pone de manifiesto que el método se basa en una serie de hipótesis simplificadoras, entre las que destacan el comportamiento elástico lineal de los materiales y la representación de la conexión como una rigidez distribuida de forma continua a lo largo del elemento (Dias, 2005).

Diversos estudios han demostrado que estas hipótesis pueden dar lugar a desviaciones significativas cuando se aplican a determinadas configuraciones estructurales. En particular, cuando la conexión está formada por conectores puntuales y relativamente rígidos, la suposición de una rigidez distribuida continua puede conducir a una sobreestimación de la rigidez efectiva del sistema y, en consecuencia, a una subestimación de los esfuerzos internos en los elementos de madera (Dias, 2005; COST FP1402).

Asimismo, la precisión del método γ disminuye de forma notable cuando existen grandes separaciones entre conectores, ya que el comportamiento real del sistema se aproxima más a una transmisión localizada de esfuerzos que a una acción compuesta uniformemente repartida. En estos casos, se ha observado que el método γ tiende a infraestimar los momentos flectores en la madera y a sobrevalorar la contribución del hormigón (Niederer, 2008). Otra limitación relevante del método γ se manifiesta en sistemas que emplean conexiones rígidas mediante entalladuras (notched connections). La bibliografía experimental y numérica coincide en señalar que, para este tipo de conexiones, el método γ puede proporcionar valores de rigidez superiores a los obtenidos mediante modelos de elementos finitos, lo que evidencia que el método no resulta directamente aplicable sin modificaciones o restricciones adicionales (Schänzlin, 2003; Michelfelder, 2006). Por último, el método γ ha sido concebido fundamentalmente para elementos simplemente apoyados, siendo su aplicación menos precisa en estructuras continuas o en sistemas con redistribución de momentos, donde los efectos de continuidad y la variación de rigidez a lo largo del elemento no quedan adecuadamente representados (Ceccotti, 2002).

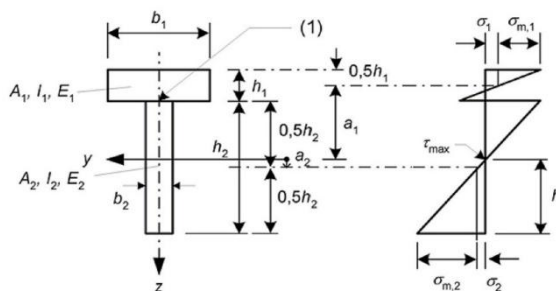


Imagen 01: Parámetros método γ . Eurocódigo 5

2.5.2. Modelos de bielas y tirantes (strut-and-tie)

Los modelos de bielas y tirantes (*strut-and-tie models*) constituyen una alternativa al método γ para el análisis de sistemas mixtos madera-hormigón, especialmente adecuada en aquellos casos en los que la conexión presenta una rigidez elevada y un comportamiento claramente localizado, como ocurre en las conexiones mediante entalladuras.

En este enfoque, el sistema estructural se idealiza mediante un conjunto de cordones principales que representan los elementos que trabajan predominantemente a tracción y compresión, conectados entre sí por elementos intermedios que simulan la transmisión de esfuerzos rasantes. En el caso de los sistemas mixtos madera-hormigón, el cordón inferior representa el elemento de madera, mientras que el cordón superior corresponde a la losa de hormigón, siendo la conexión entre ambos modelizada mediante elementos verticales que transmiten el esfuerzo cortante (Rautenstrauch, 2004).

A diferencia del método γ , los modelos *strut-and-tie* permiten representar de forma explícita la disposición discreta de la conexión, así como la variación local de rigidez a lo largo del elemento, lo que resulta especialmente relevante en sistemas con separaciones variables entre conectores o con conexiones rígidas puntuales. Este tipo de modelización ha sido ampliamente desarrollado y aplicado en el ámbito suizo y alemán, donde se ha demostrado su buena correlación con resultados experimentales y numéricos avanzados (Schänzlin, 2003; Niederer, 2008).

Diversos autores han señalado que los modelos *strut-and-tie* resultan particularmente adecuados para el análisis de vigas y forjados mixtos con entalladuras, ya que permiten reproducir el flujo real de esfuerzos entre la madera y el hormigón, capturando de forma más realista los mecanismos de compresión y tracción que se desarrollan en la zona de la conexión (Michelfelder, 2006). En este tipo de configuraciones, el uso del método γ sin modificaciones puede conducir a una sobreestimación de la rigidez, mientras que el modelo *strut-and-tie* ofrece una representación más ajustada del comportamiento estructural.

No obstante, a pesar de sus ventajas conceptuales, los modelos de bielas y tirantes presentan ciertas limitaciones prácticas. Su formulación requiere una definición cuidadosa de la geometría del modelo, así como una adecuada calibración de la rigidez de los elementos que representan la conexión. Además, su aplicación directa en estructuras complejas o tridimensionales puede resultar laboriosa, lo que ha limitado su uso generalizado en el ámbito del diseño corriente (Dias, 2005).

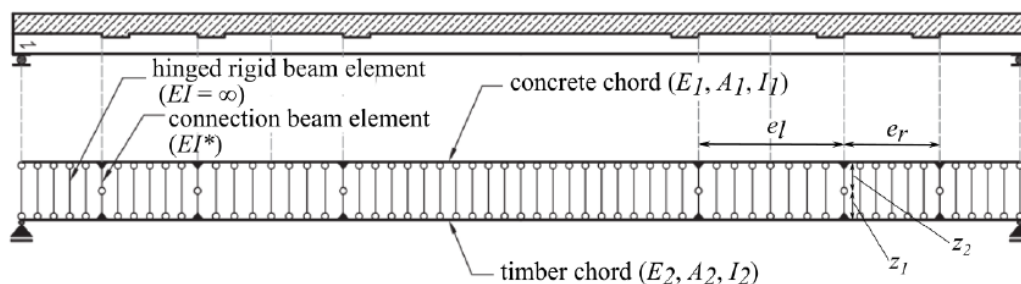


Imagen 02: Esquema Strut-and-tie. Schänzlin, 2003; Niederer, 2008

2.5.3. Modelos numéricos mediante elementos finitos

Los modelos numéricos basados en el Método de los Elementos Finitos (FEM) constituyen actualmente la herramienta más avanzada para el análisis del comportamiento estructural de los sistemas mixtos madera–hormigón. Su uso se ha generalizado como respuesta a las limitaciones inherentes a los métodos analíticos simplificados y a la necesidad de representar de forma más realista la interacción entre materiales con comportamientos mecánicos diferentes.

A diferencia del método y, los modelos FEM permiten representar de forma explícita la geometría real del sistema, incorporando conectores puntuales, disposición no uniforme de la conexión y variaciones locales de rigidez a lo largo del elemento. Esta capacidad resulta especialmente relevante en sistemas mixtos con conexiones rígidas, como las entalladuras, donde la transmisión de esfuerzos se produce de forma localizada y no puede ser adecuadamente representada mediante una rigidez distribuida continua (Dias, 2005; COST FP1402).

Asimismo, los modelos FEM permiten considerar el comportamiento no lineal de los materiales, incluyendo la plastificación del hormigón, la no linealidad del contacto en la interfaz madera–hormigón y la respuesta no lineal de los conectores mecánicos. Esta característica resulta fundamental para el análisis detallado de los mecanismos resistentes y para la evaluación del comportamiento del sistema más allá del rango estrictamente elástico, especialmente en configuraciones próximas al Estado Límite Último (Schänzlin, 2003).

Otra ventaja significativa de los modelos FEM es la posibilidad de incorporar efectos dependientes del tiempo, como la fluencia de la madera, la fluencia y retracción del hormigón, así como la influencia del proceso constructivo y de la secuencia de puesta en carga. Diversos estudios han demostrado que estos efectos pueden tener una influencia notable en la deformación a largo plazo de los sistemas mixtos, especialmente en forjados de grandes luces (Ceccotti, 2002; Dias, 2005).

No obstante, la bibliografía también señala que el uso de modelos FEM requiere una validación cuidadosa, ya que la precisión de los resultados depende en gran medida de la correcta definición de las propiedades mecánicas, de los modelos constitutivos adoptados y de la calibración de la rigidez de la conexión (COST FP1402).

En consecuencia, los modelos FEM no deben considerarse como una sustitución directa de los métodos analíticos, sino como una herramienta complementaria que permite profundizar en el conocimiento del comportamiento estructural de los sistemas mixtos madera–hormigón.

2.6. Tipologías de conexión en sistemas TCC

La literatura especializada identifica diversas tipologías de conexión en sistemas mixtos madera-hormigón, entre las que destacan los conectores tipo clavija y tornillo, las entalladuras, los perfiles metálicos embebidos, así como sistemas adhesivos o patentados. Estas soluciones han sido ampliamente estudiadas en trabajos de referencia como los de Ceccotti (2002) y Dias et al. (2018), que analizan su influencia en la rigidez, ductilidad y comportamiento global del sistema estructural.

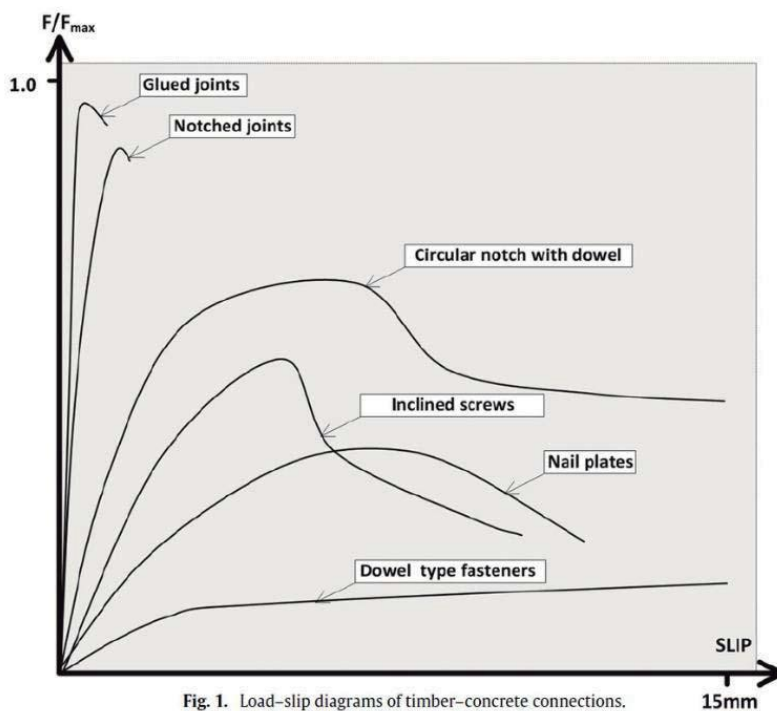
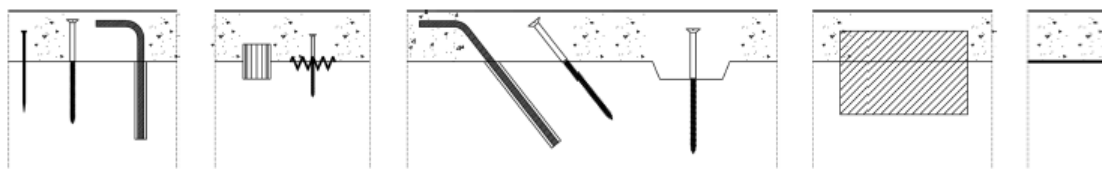


Fig. 1. Load-slip diagrams of timber-concrete connections.

Imagen 03: Efecto de los conectores dúctiles en el comportamiento de vigas compuestas de madera y hormigón. Dias-Jorge 2011

2.6.1. Conectores tipo clavija y tornillos.

Los conectores tipo clavija (tornillos, pernos, clavos) son los más estudiados y utilizados históricamente. Su comportamiento se caracteriza por una rigidez moderada y una elevada ductilidad. Sin embargo, su menor rigidez limita la acción compuesta, especialmente en luces grandes.



Imagen 04: Forjado de CLT con conectores tipo clavija

2.6.2. Conexiones mediante entalladuras (notched connections).

Las conexiones mediante entalladuras consisten en la realización de muescas o rebajes en el elemento de madera, que permiten la transmisión directa de esfuerzos de cortante mediante contacto mecánico con el hormigón. Estas conexiones presentan:

- Una rigidez elevada.
- Un comportamiento casi constante hasta la rotura.
- Una notable mejora de la acción compuesta.

El principal inconveniente de las entalladuras es su comportamiento frágil, por lo que habitualmente se combinan con tornillos o barras metálicas que aportan ductilidad y capacidad de tracción perpendicular.

La bibliografía coincide en señalar que este tipo de conexión ofrece uno de los mejores compromisos entre rigidez estructural y viabilidad constructiva, especialmente cuando se emplea mecanizado CNC.



Imagen 05: Mecanizado de entalladura circular en taller.

2.6.3. Otros sistemas de conexión.

Existen otros sistemas como conexiones por fricción, sistemas adhesivos o conectores patentados. Aunque algunos de ellos presentan prestaciones mecánicas muy elevadas, su uso en la práctica está limitado por:

- La dificultad de control de calidad.
- El comportamiento a largo plazo.
- La falta de normalización.

2.7. Síntesis del estado del arte y posicionamiento del TFM.

La revisión del estado del arte pone de manifiesto que los sistemas mixtos madera-hormigón, y en particular los forjados CLT-hormigón, constituyen una solución estructural madura y con un elevado potencial. No obstante, persisten incertidumbres en relación con:

- la validez de los métodos simplificados de cálculo,
- la modelización adecuada de conexiones rígidas,
- y la comparación objetiva entre sistemas estructurales alternativos.

En este contexto, el presente Trabajo Fin de Máster se orienta a comparar de forma sistemática un sistema estructural de madera con un sistema mixto CLT-hormigón, utilizando conexiones por entalladura combinadas con tornillos, y apoyándose en modelos numéricos avanzados que permitan evaluar con el comportamiento estructural global.

3 – MARCO TEÓRICO APLICABLE.

3.1 Normativa aplicable:

Eurocódigo 5 y documentos complementarios.

El diseño estructural en madera técnica debe regirse por normativas europeas armonizadas que garanticen la seguridad, funcionalidad y durabilidad de las estructuras. En este trabajo se adopta como base normativa el Eurocódigo 5, en sus distintas partes, que regula el cálculo de estructuras de madera dentro del contexto europeo:

- **UNE-EN 1995-1-1:2016 – Eurocódigo 5 Parte 1-1:** *Diseño de estructuras de madera – Reglas generales y reglas para edificación.*
- **UNE-EN 1995-1-2:2016 – Parte 1-2:** *Diseño estructural frente al fuego.*
- **UNE-EN 1995-2:2016 – Parte 2:** *Puentes en estructuras de madera* (aplicable puntualmente en cuestiones de cargas móviles o disposiciones constructivas).

A estas normas se suman las **Especificaciones Técnicas Armonizadas** para productos estructurales:

- **UNE-EN 14080:** Madera laminada encolada (GLT).
- **UNE-EN 16351:** CLT – Madera contralaminada.

En lo que respecta al software utilizado, RFEM 6 de Dlubal Software cumple con los requisitos para la aplicación del Eurocódigo 5.

El modelado considerará hipótesis normativas, incluyendo cargas permanentes, variables y accidentales, así como combinaciones de acciones definidas en EN 1990: Eurocódigo - Bases del cálculo estructural.

3.2 Estados límite: Hipótesis y criterios de diseño.

El dimensionado estructural se realiza en función de estados límite, definidos en la norma UNE-EN 1990: Eurocódigo – Bases del Proyecto Estructural y desarrollados específicamente para estructuras de madera en el Eurocódigo 5.

3.2.1 Estado límite último (ELU).

El Estado Límite Último se refiere a la seguridad estructural de los elementos frente a fallos. Implica la comprobación de que las solicitaciones de diseño no superen la resistencia de cálculo de los materiales, considerando:

- Flexión
- Cortante
- Tracción y compresión paralela o perpendicular a la fibra
- Estabilidad (pandeo, pandeo lateral torsional, pandeo compuesto)
- Resistencia de uniones (arrancamiento, aplastamiento, cortante)

Las cargas para considerar para ELU se establecen a través de la EN 1990 | Madera | UNE | 2019-04:

ELU - Permanente y transitoria

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Donde:

$\gamma_{G,j}$: Coeficiente parcial para acciones permanentes γ_P : Coeficiente parcial para acciones de pretensado

$G_{k,j}$: Acciones permanentes P : Acción de pretensado predominante $Q_{k,1}$: Acción variable predominante

$\gamma_{Q,1}$: Coeficiente parcial para acción variable $\gamma_{Q,i}$: Coeficiente parcial para acciones variables no predominantes

$\psi_{0,i}$: Coeficiente para valor de combinación $Q_{k,i}$: Otras acciones variables

Según UNE-EN 1995-1-1 (Art. 6.1), la resistencia de cálculo se obtiene dividiendo la resistencia característica por el coeficiente parcial de seguridad (γ_M) y aplicando factores de modificación por duración de carga (K_{mod}) y condiciones ambientales (clases de servicio):

$$F_d = \frac{K_{mod} \cdot F_k}{\gamma_M}$$

En este trabajo se adoptará:

- $\gamma_M = 1,25$ para madera laminada (según tabla 2.3 del EC5)
- K_{mod} variable según tipo de acción y clase de servicio.

3.2.2 Estado límite de servicio (ELS).

El Estado Límite de Servicio verifica que la estructura mantiene un comportamiento funcional y de confort aceptable, sin daños estéticos ni deformaciones excesivas.

En estructuras de madera, esto adquiere especial relevancia debido a su bajo módulo de elasticidad, lo cual puede traducirse en deformaciones significativas.

Las comprobaciones principales incluyen:

- Flechas instantáneas y totales.
- Vibraciones (frecuencia natural y aceleraciones).
- Desalineaciones en uniones o deformaciones relativas.

Límites recomendados por Eurocódigo:

Elemento	Tipo de flecha	Límite habitual
Forjados	Instantánea	$L/300 - L/400$
Forjados	Total (larga duración)	$L/250 - L/300$
Vigas	Instantánea	$L/300$
Muros CLT	Desplazamiento lateral	$\leq H/250$

Fuente: UNE-EN 1995-1-1:2016, sección 7.2

En este trabajo se han definido los siguientes límites.

Tipo de flecha	Límite
Integridad	$L/350$
Confort	$L/350$
Apariencia	$L/300$
Desplazamiento lateral	$\leq H_p/250; \leq H_t/500$

3.3 COMPROBACIÓN DE DEFORMACIONES, VIBRACIONES Y FLECHAS.

3.3.1 Flechas (deformaciones verticales).

Las deformaciones admisibles se calculan sumando la deformación instantánea y la diferida por fluencia. Según UNE-EN 1995-1-1, se emplea la siguiente fórmula:

$$\omega_{total} = \omega_{inst} + K_{def} \cdot \omega_{long}$$

Donde:

- ω_{inst} : deformación instantánea
- ω_{long} : deformación bajo cargas de larga duración
- K_{def} : coeficiente de fluencia

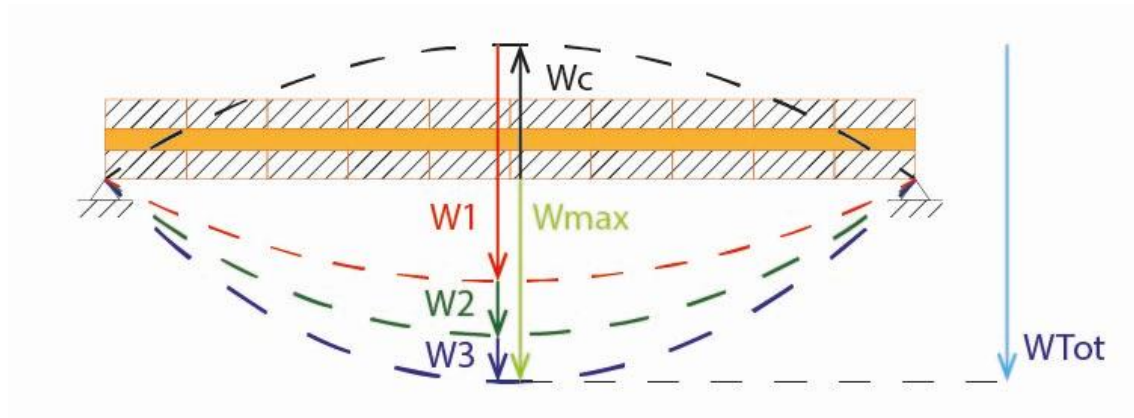


Imagen 06: Esquema de las diferentes flechas en una viga.

Donde:

- | | |
|--|--|
| W1 = Flecha inicial de cargas permanentes | W3 = Flecha inicial y diferida de cargas variables |
| W2 = Componente diferida de cargas permanentes | Wc = Contraflecha |

3.3.1.1 Definición y tipología de flechas.

A efectos de la verificación del Estado Límite de Servicio, se distinguen los siguientes tipos de flecha, cuya correcta evaluación resulta fundamental para garantizar la funcionalidad, durabilidad y correcto comportamiento de la estructura y de los elementos asociados:

- Flecha instantánea:

Es la deformación que se produce al aplicar la totalidad de las cargas actuantes en un instante determinado. Se obtiene mediante la doble integración de las curvaturas, en función del momento flector y de la rigidez a flexión (EI) del elemento.

ELS - Características – confort

$$Q_{k,1} + \sum_{i>1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Donde:

Q_{k,1}: Acción variable predominante **Q_{k,i}**: Otras acciones variables
ψ_{0,i}: Coeficiente para valor de combinación

- Flecha diferida:

Es la deformación que aparece con el transcurso del tiempo como consecuencia de la acción de cargas de larga duración, teniendo en cuenta los efectos de fluencia de los materiales. Su evaluación resulta compleja, ya que depende de numerosos parámetros difíciles de cuantificar con precisión, tales como la temperatura, la humedad, la edad de puesta en carga o la evolución temporal de las acciones.

ELS - Característica – integridad

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} k_{def} + P_k + Q_{k,1} + Q_{k,1} \psi_{2,1} k_{def} + \sum_{i \geq 1} Q_{k,i} \psi_{0,i} + \sum_{i \geq 1} Q_{k,i} \psi_{0,i} \psi_{2,i} k_{def}$$

Donde:

G_{k,j}: Acciones permanentes **P**: Acción de pretensado **Q_{k,i}**: Otras acciones variables
ψ_{0,i}: Coeficiente para valor de combinación **k_{def}**: Coeficiente de deformación
Q_{k,1}: Acción variable predominante **ψ_{2,i}**: Coeficiente para valor cuasipermanente

- Flecha total a tiempo infinito:

Corresponde a la suma de la flecha instantánea y la flecha diferida, y representa la deformación total debida al conjunto de las cargas actuantes a largo plazo. Esta magnitud resulta especialmente relevante para la compatibilidad con elementos no estructurales y para la evaluación del comportamiento global del edificio en servicio.

ELS – Cuasipermanente

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} (1 + k_{def}) + P_k + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i} (1 + k_{def})$$

Donde:

G_{k,j}: Acciones permanentes **ψ_{2,i}**: Coeficiente para valor cuasipermanente
k_{def}: Coeficiente de deformación **P**: Acción de pretensado **Q_{k,i}**: Acciones variables

- Flecha relativa:

Se define como:

- El descenso máximo en el centro del vano respecto al extremo de la pieza que presente menor desplazamiento, dividido por la luz del tramo.
- El desplazamiento relativo entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz de referencia el doble de la distancia entre dichos puntos.

Este criterio permite evaluar deformaciones diferenciales que pueden resultar críticas para acabados, particiones interiores o cerramientos.

En el análisis estructural se considera asimismo la acumulación de flechas, teniendo en cuenta tanto las deformaciones de los forjados como las de los elementos principales, tales como vigas y cerchas, dado que las deformaciones de estos elementos se transmiten y se suman. Para una mejor comprensión de este fenómeno, se incluye el esquema correspondiente que ilustra la acumulación de deformaciones en los distintos elementos estructurales.

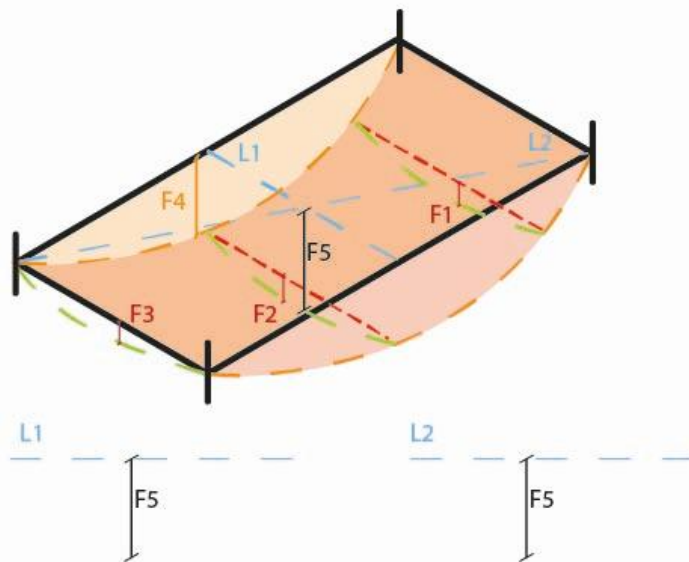


Imagen 07: Esquema de las diferentes flechas en forjado.

$$F5 = \frac{L2}{u} ; y = u ; F5 = \frac{L1}{y}$$

3.3.2 Vibraciones.

El Eurocódigo 5 (UNE-EN 1995) establece que debe evaluarse la frecuencia natural para garantizar el confort del usuario, especialmente en estructuras ligeras. Para evitar incomodidad, se sugiere mantener $fn \geq 8\text{Hz}$.

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

Donde:

fn : frecuencia natural (Hz) $(EI)_l$: rigidez de la flexión del forjado (Nm^2/m) m : masa por unidad de superficie (kg/m^2)

3.3.2.1 Modos vibración.

Modo 1 – Primer modo de flexión vertical global

El primer modo de vibración corresponde al modo fundamental de flexión vertical global del forjado. En este modo, el forjado vibra de forma análoga a una viga simplemente apoyada, presentando un desplazamiento máximo en el centro del vano y sin nodos interiores, de modo que toda la superficie oscila prácticamente en la misma fase.

Este modo está directamente relacionado con la rigidez global a flexión y la masa del sistema, y es el principal responsable de las vibraciones perceptibles por los usuarios. Por este motivo, el Eurocódigo 5 establece criterios de verificación del confort vibratorio basados en la frecuencia fundamental, recomendando valores mínimos de frecuencia natural para limitar la aparición de vibraciones molestas en forjados de edificación.

En forjados de madera ligera, el primer modo suele presentar frecuencias relativamente bajas, mientras que en sistemas mixtos CLT–hormigón la mayor rigidez y masa desplazan este modo hacia frecuencias superiores, reduciendo la amplitud de vibración y mejorando el confort.

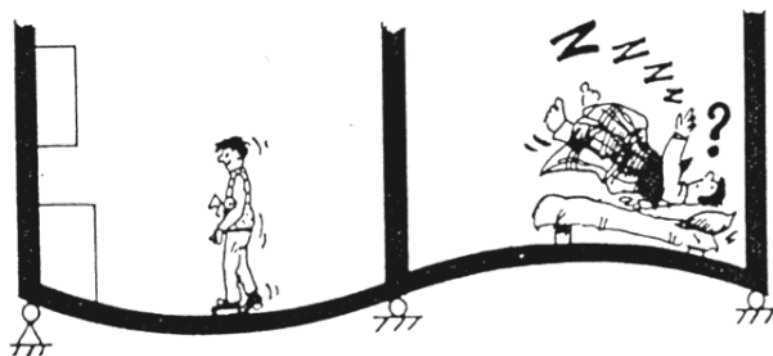


Imagen 08: Ilustración de vibraciones de un forjado. Floor vibrations – new results. Hamm;Richter. 2010

3.4 COMPROBACIÓN FRENTE AL FUEGO.

3.4.1 Método de sección reducida (UNE-EN 1995-1-2:2016).

Se evalúa la resistencia portante de elementos estructurales afectados por el fuego mediante la estimación de la **sección remanente efectiva**:

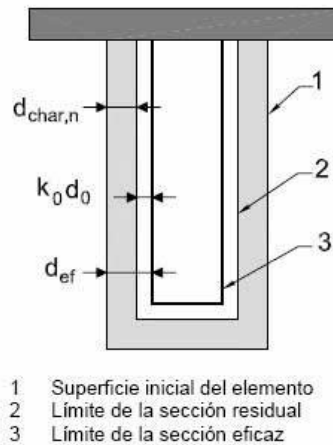


Imagen 09: Esquema de las partes de la sección remanente efectiva.

$$d_{eff} = k_0 d_0 + \beta_0 \cdot t$$

Donde:

$k_0 = 1$ si $t \geq 20$ min $d_0 = 7$ mm: capa carbonizada inicial β_0 : velocidad de carbonización t : tiempo de exposición (min)

En este documento se adoptará $\beta_0 = 0,65$, mm/min para CLT y GLT, de coníferas conforme a su tipología habitual en construcción.

A partir de la sección remanente, se aplican las fórmulas del ELU adaptadas al nuevo perfil reducido por la carbonización.

Las cargas para considerar para *ELU Accidental Fuego* se establecen a través de la EN 1990 | Madera | UNE | 2019-04:

ELU - Accidental - Fuego -

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P_k + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

Donde:

$G_{k,j}$: Acciones permanentes $\psi_{1,1}$: Coeficiente para valor frecuente $\psi_{2,i}$: Coeficiente para valor cuasipermanente

P : Acción de pretensado $Q_{k,1}$: Acción variable predominante $Q_{k,i}$: Otras acciones variables

4 – MODELOS ESTRUCTURALES.

4.1 Introducción a los modelos comparativos.

Tal y como se ha puesto de manifiesto en el estado del arte, los métodos analíticos simplificados —en particular el método γ — presentan limitaciones cuando se aplican a sistemas con conectores rígidos y puntuales, como es el caso de las entalladuras.

En estos casos, la hipótesis de rigidez distribuida uniforme puede conducir a sobreestimaciones de la rigidez efectiva y a una representación poco realista del flujo de esfuerzos.

Los modelos FEM permiten superar estas limitaciones al posibilitar:

- La representación explícita de conectores puntuales.
- La consideración de una disposición no uniforme de la conexión.
- La incorporación del comportamiento no lineal de los materiales y de la conexión.
- El análisis detallado de la interacción madera–hormigón.

Estas capacidades han sido ampliamente documentadas en la bibliografía especializada, particularmente en el marco del proyecto *COST FP1402*, así como en los trabajos de Schänzlin, Dias y Niederer, que recomiendan el uso de modelos numéricos avanzados como complemento indispensable a los métodos analíticos.

4.2 Geometría base de los modelos.

Se han definido dos tipologías de modelos estructurales, con distinta finalidad de uso, para observar el comportamiento de cada sistema bajo diferentes exigencias.

4.2.1 Modelo 1 – Edificio residencial.

MODELO 01

Edificio residencial
5x5m

Nº DE PLANTAS: PB+2

ALTURA LIBRE:

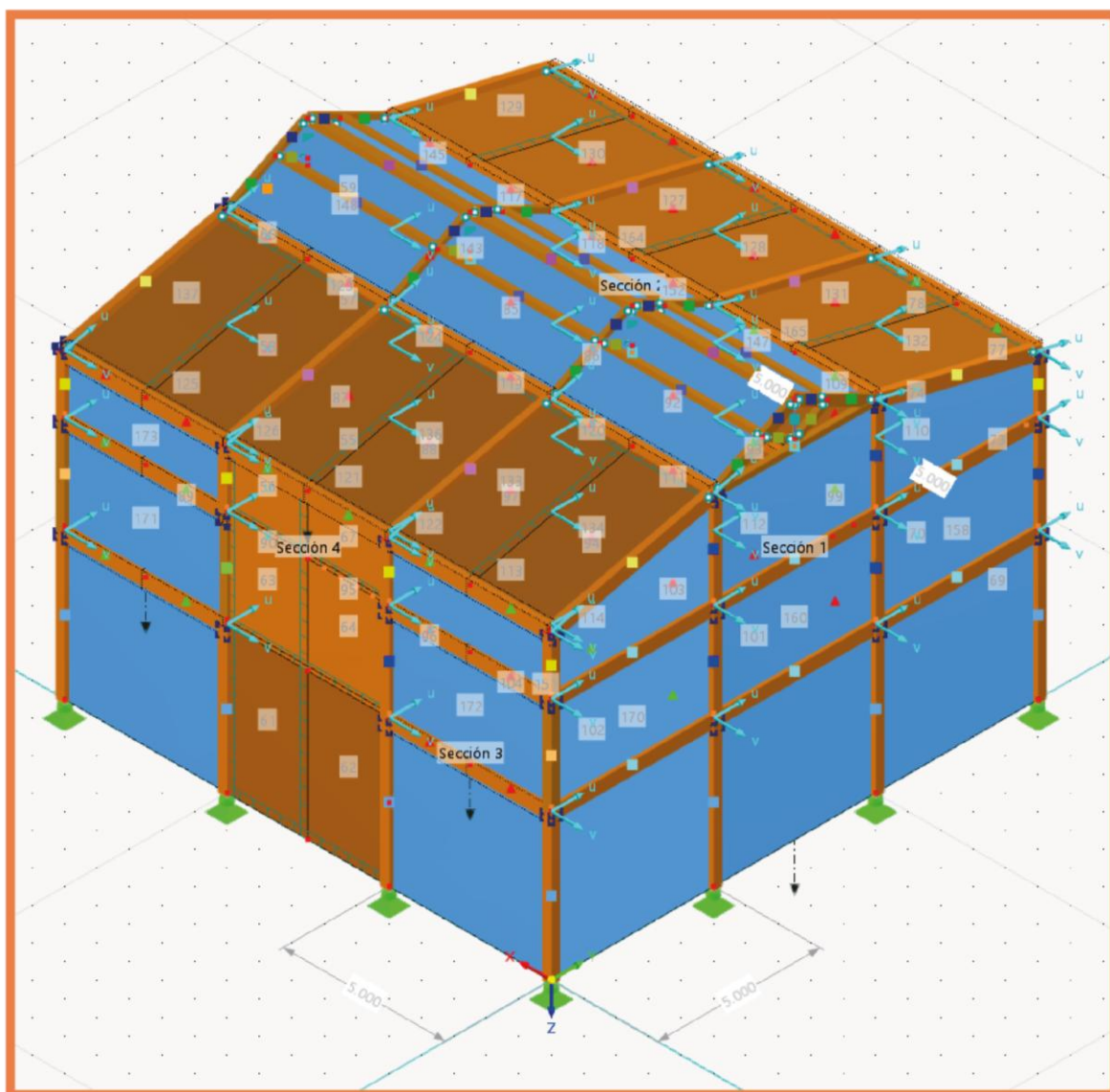
Planta baja: 4.5m

Planta 1: 3m

Planta Bajo cubierta: 1.8 a 3m

USO PREVISTO: Vivienda colectiva

CARGA DE USO: 2kN/m²



4.2.2 Modelo 2 – Espacio comercial.

MODELO 02

Edificio comercial
7.5x7.5m

Nº DE PLANTAS: PB+2

ALTURA LIBRE:

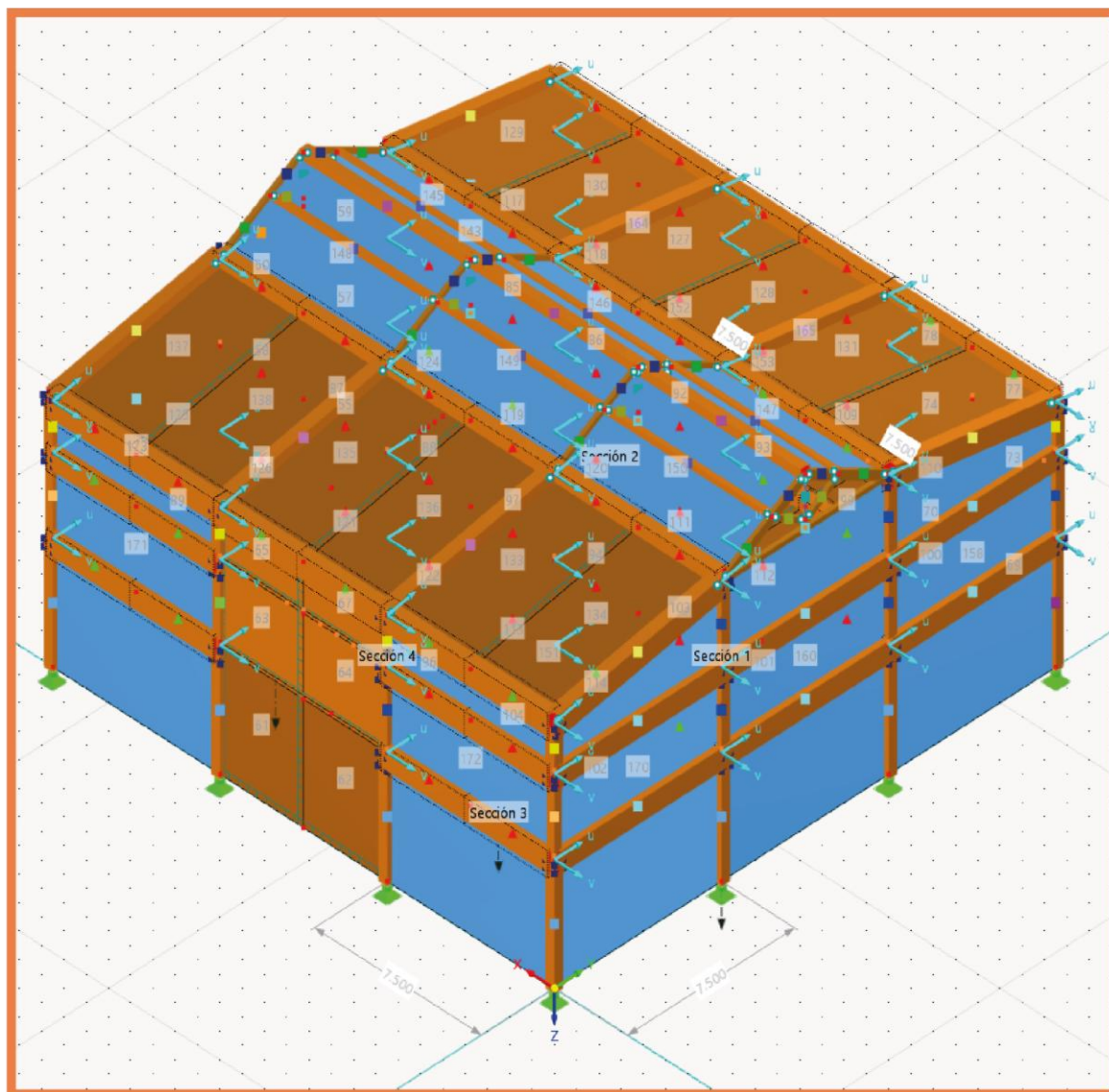
Planta baja: 4.5m

Planta 1: 3m

Planta Bajo cubierta: 1.8 a 3m

USO PREVISTO: Zona comercial

CARGA DE USO: 5kN/m²



Ambos modelos comparten criterios estructurales de análisis, siendo la luz y la carga de uso los únicos parámetros variables de partida.

4.3 Parametrización del modelo estructural.

Para facilitar la adaptabilidad de los modelos y permitir la comparación directa entre sistemas estructurales, se han definido parámetros clave, implementados como variables internas en el entorno de modelado.

Nombre	Símbolo (HTML)	Valor	Unidad	Fórmula
altura_pb	alturapb	-4,500	m	
altura_pt	alturapt	-3,000	m	
luz_x	luzx	5,000	m	
luz_y	luzy	5,000	m	
espesor_clt	espesorclt	120,0	mm	
Peso_acabados	Pesoacabados	0,00	kN/m2	
pilar_sec_b	pilarsec,b	250,0	mm	
pilar_sec_h	pilarsec,h	250,0	mm	
long_pilar_pb	longpilar,pb	-4500,0	mm	altura_pb
viga_sec_b	vigasec,b	200,0	mm	
viga_sec_h	vigasec,h	400,0	mm	
altura_cercha	alturacercha	-1,250	m	$luz_y/4*1$
Nodo_c	Nodoc	60,00	%	
Carga_cubierta_int	Cargacubierta,int	1,500	t/m	$luz_x*CC1_detalle_cubierta$
CC1_detalle_cubierta	CC1detalle,cubierta	0,300	t/m2	
CC1_Seccion_forjado	CC1Seccion,forjado	0,150	t/m2	
Carga_forjado_int	Cargaforjado,int	0,750	t/m	$luz_x*CC1_Seccion_forjado$
Carga_forjado_ext	Cargaforjado,ext	0,375	t/m	$CC1_Seccion_forjado*luz_x*0.5$
Carga_cubierta_ext	Cargacubierta,ext	0,750	t/m2	$luz_x*CC1_detalle_cubierta*0.5$
Carga_nieve	Carganieve	0,100	t/m2	
Carga_fachada	Cargafachada	7,000	kN/m	
Long_ref_Flecha	Longref,Flecha	7,071	m	$\sqrt{luz_x*luz_x+luz_y*luz_y}$

4.4 Condiciones de contorno y carga.

Se han definido hipótesis de carga según Eurocódigo 1 y el CTE (Código técnico de la edificación) condiciones de contorno típicas para edificación.

- **Cargas permanentes:** Peso propio+ Acabados

- **Modelos de CLT:**

Casos de Carga		
Peso Propio	Peso CLT	kN/ m ²
Cargas Muertas forjados		
Mortero (6cm)	108	Kg/m ²
Tarima+Rasteles	15	Kg/m ²
Particiones Interiores	20	Kg/m ²
Fachada	7.00	kN/ m
Cargas Muertas Cubierta		
	2.00	Kg/m ²

- **Modelos mixtos CLT-HORMIGÓN:**

Casos de Carga		
CC1. Peso Propio	Peso CLT	kN/ m ²
Cargas Muertas		
Hormigón (6cm)	1.50	kN/ m ²
Tarima+Rasteles	0.15	kN/ m ²
Particiones Interiores	0.20	kN/ m ²
Fachada	7.00	kN/ m
Cargas Muertas Cubierta		
	2.00	kN/ m ²

- **Cargas variables:** Se aplican los valores recogidos en la tabla 3.1 del DB-AE:

- **Modelo 1 | 5x5m:**

Casos de Carga		
Sobrecarga de uso – Categoría A:	2.00	kN/ m ²
Zonas residenciales		

- **Modelo 2 | 7,5x7,5m:**

Casos de Carga		
Sobrecarga de uso – Categoría D:	5.00	kN/ m ²
Zonas comerciales		

- **Viento:** Se aplican los valores recogidos en las tablas del apartado 3.3 del DB-AE:

$$q_e = q_b + C_e \cdot C_p; q_e = 0.5 + 1.8 \cdot 0.8 = 0,72 \text{ kN/ m}^2 \text{ Presión}$$

$$q_e = q_b + C_e \cdot C_s; q_e = 0.5 + 1.8 \cdot 0.5 = 0,45 \text{ kN/ m}^2 \text{ Succión}$$

Donde:

q_e = Acción del viento; q_b = Presión dinámica; C_e = Coeficiente de exposición.

C_p = Coeficiente eólico de presión; C_s = Coeficiente eólico de succión.

- **Resistencia a Fuego:** Se aplican los valores recogidos en tabla 3.1 del DB-SI6:

- **Modelo 5x5m:**

Resistencia al Fuego

Residencial Vivienda **R60**

- **Modelo 7,5x7,5m:**

Resistencia al Fuego

Comercial **R90**

- **Nieve:**

Carga de nieve

1 **kN/ m²** $\geq 1000 \text{ m.s.n.m}$

4.4.1 Observaciones específicas sobre las condiciones de carga en el modelo.

- En los modelos mixtos, se ha tenido en cuenta que la capa de compresión de hormigón forma parte del sistema estructural y su peso se ha incorporado como parte del forjado.
- En modelos CLT y GLT, se ha sumado el peso de acabados a la carga permanente.
- La altura libre en planta baja se ha fijado en 4,5 m para simular situaciones exigentes en términos de fuego y deformaciones.

4.5. Descripción del modelo estructural.

El modelo estructural desarrollado en Dlubal reproduce la geometría completa del edificio tipo, manteniendo las mismas condiciones de contorno, acciones y combinaciones de carga para ambos sistemas estructurales analizados.

Los principales elementos del modelo son:

- Paneles de CLT, modelizados como elementos de placa ortótropa, con propiedades mecánicas definidas conforme a EC5 y CEN/TS 19103.
- Vigas de madera laminada, modelizadas como elementos de barra.
- Losa de hormigón, modelizada como placa isótropa en el caso del sistema mixto.
- Conexión madera-hormigón, representada mediante resortes tangenciales situados en la interfaz entre el CLT y el hormigón.

4.6 Modelización de la conexión CLT–hormigón.

4.6.1. Enfoque basado en el modelo bielas y tirantes (*strut-and-tie*).

La modelización de la conexión mediante entalladuras se ha inspirado conceptualmente en el modelo de bielas y tirantes (*strut-and-tie*), ampliamente descrito en la literatura especializada para sistemas mixtos madera–hormigón.

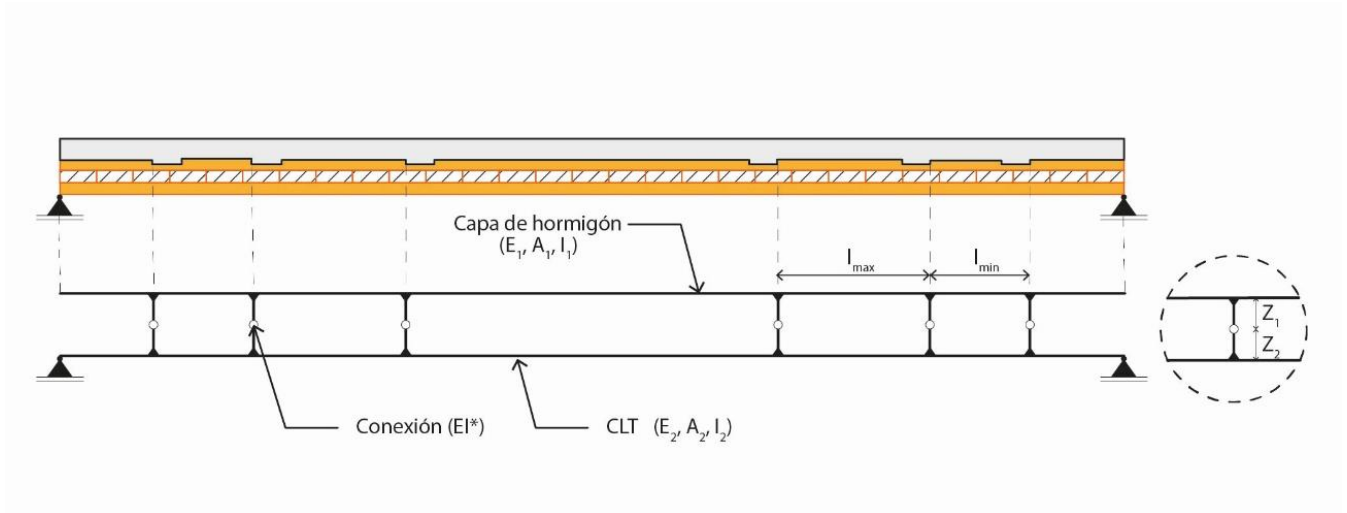


Imagen 10: Modelo Bielas y Tirantes

En este enfoque:

- El CLT y el hormigón se interpretan como cordones principales que trabajan predominantemente a tracción y compresión, respectivamente.
- Las entalladuras actúan como mecanismos de transmisión de cortante mediante compresión directa.
- Los tornillos de refuerzo aportan capacidad a tracción perpendicular y ductilidad al sistema.

Este modelo conceptual permite interpretar el flujo de esfuerzos obtenido en el modelo FEM y justifica la elevada rigidez observada en sistemas con entalladuras, en comparación con conexiones basadas exclusivamente en conectores tipo clavija.

4.6.2. Diseño de la conexión.

4.6.2.1 Parámetros geométricos y de material considerados.

La CEN/TS 19103:2021 es la especificación técnica europea que proporciona reglas generales de diseño para estructuras mixtas de madera y hormigón. En el caso de las uniones mediante entalladuras, define los siguientes parámetros:

Materiales:

- Hormigón
 - Clase resistente mínima: **C25/30**
 - Tamaño máximo de árido: **≤ 16 mm**
- Madera:
 - Madera laminada: **GL24h o superior**
 - Madera aserrada: **C24 o superior**
 - LVL conforme a EN 14374

Geometría de la entalladura:

- Diámetro del tirafondo: **$d \geq 6 \text{ mm}$**
- Ángulo del notch (α) Típicamente próximo a 90°
 - Intervalo admisible: $80^\circ \leq \alpha \leq \min \{115^\circ; 90^\circ \cdot \theta\}$
- Profundidad de la entalladura (h_n)
 - Aplicación cargas “normales”: **$h_n \geq 20 \text{ mm}$**
 - Aplicación cargas “altas”: **$h_n \geq 30 \text{ mm}$**

- Longitud mínima de la entalladura (l_n)

$$l_n \geq 150 \text{ mm}$$

- Longitud de madera frente al notch

$$l_{min} \geq 8 \cdot h_n$$

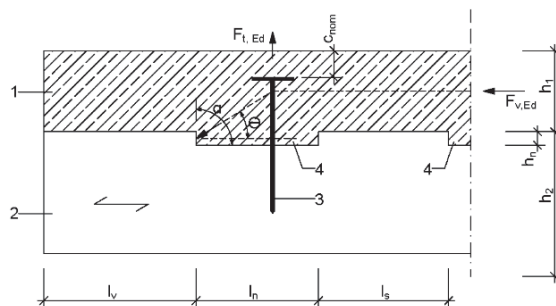


Imagen 11: Parámetros de las entalladuras. CEN/TS 19103:2021

4.6.2.2 Definición de la rigidez de la conexión.

Según la CEN/TS 19103:2021, la rigidez de la conexión entallada puede considerarse lineal dentro del rango de diseño, permitiéndose una interpolación lineal.

Se proponen los siguientes valores característicos de módulo de deslizamiento por metro de ancho:

- Para entalladuras de profundidad entre 20 y 30 mm:

$$K_{ser} = 1000 \frac{kN/mm}{mm}$$

- Para entalladuras de profundidad mayor o igual a 30 mm:

$$K_{ser} = 1500 \frac{kN/mm}{mm}$$

Además, autores como *COST FP1402 / Dias 2018* establecen que la evidencia experimental indica que:

$$K_{ser} = K_u$$

ya que las curvas carga-desplazamiento muestran una rigidez prácticamente constante hasta la rotura, lo que justifica no distinguir entre ELS y ELU en este tipo de conexión.

4.6.2.3 Parámetros resistentes y modos de fallo considerados.

La resistencia de la conexión se determina como el **mínimo** de los siguientes modos de fallo (*CEN/TS 19103:2021*):

1. **Cortante en el hormigón**

$$F_{R,d1} = f_{vcd} \cdot b_n \cdot l_n$$

2. **Compresión del hormigón**

$$F_{R,d2} = f_{cd} \cdot b_n \cdot h_n$$

3. **Cortante en la madera**

$$F_{R,d3} = k_{cr} \cdot f_{v,t,d} \cdot b_n \cdot l_{min}$$

4. **Aplastamiento de la madera**

$$F_{R,d4} = f_{c,0,d} \cdot b_n \cdot h_n$$

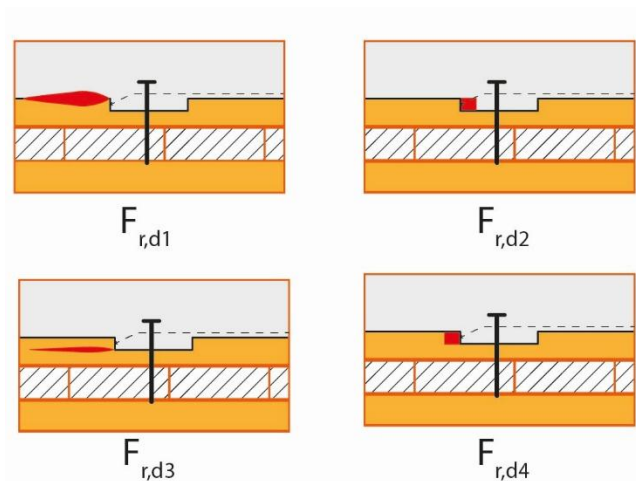


Imagen 12: Modos de las entalladuras. CEN/TS 19103:2021

donde:

- $l_{min} \geq 8 \cdot h_n$
- $f_{vcd} = \frac{v \cdot f_{cd}}{(\tan \theta + \cot \theta)}$
- "v" es un factor reductor de la resistencia cortante de valor :

$$f_{vcd} = 0.6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right)$$

- θ es el ángulo de la biela de compresión de valor:

$$\theta = \max \left\{ \arctan \frac{0.5(h_c + h_n)}{(l_n + l_s)} ; \arctan \frac{h_n}{l_n} \right\}$$

Además, debe verificarse una fuerza mínima de tracción vertical entre madera y hormigón:

$$F_{t,Ed} = \max (F_{v,Ed} \tan \theta ; 0.1 F_{v,Ed})$$

donde:

$F_{t,Ed}$ Resistencia mínima a tracción vertical entre la madera y el hormigón

$F_{v,Ed}$ Fuerza de cortante de cálculo sobre el conector

4.6.2.4 Geometría y valores de la unión.

Resistencia Entalladura Madera-hormigón

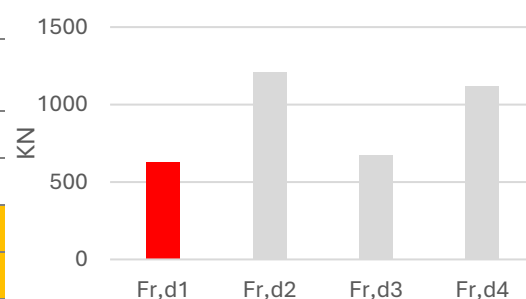
Geometría y valores de la unión

Espesor de la losa de hormigón	hc	60	mm	
Profundidad rebaje	hn	30	mm	≥ 20mm
Ancho rebaje	bn	2424	mm	
longitud rebaje	ln	150	mm	≥ 150mm
longitud de madera frente a rebaje	lv	380	mm	≥ 12,5xhn
longitud entre entalladuras	ls	380	mm	≥ 12,5xhn
Resistencia a compresión madera k	F _{c,0,k}	24	N/mm ²	
Resistencia a compresión madera d	F _{c,0,d}	15,36	N/mm ²	
Cortante madera k	F _{v,t,k}	2,7	N/mm ²	
Cortante madera d	F _{v,t,d}	1,728	N/mm ²	
Resistencia compresión hormigón K	F _{c,k}	25	N/mm ²	
Resistencia compresión hormigón d	F _{c,d}	16,7	N/mm ²	
Inclinación de la biela comprimida	θ	11,3	°	≥ 8,5°

v	0,54	
F _{v,c,d}	1,73	N/mm ²
Y _{M,t}	1,25	
Y _{M,c}	1,50	
F _{t,ed}	8,40	kn
F _{ved}	42,00	kn
F _{ved} · tanθ	8,40	kn
0,1 · F _{ved}	4,20	kn

K _{cr}	0,67
cotθ+tanθ	5,2
cotθ	5
tanθ	0,2
K _{mod}	0,8
θ	11,31

Cortante en el hormigón	l	629	kN
Aplastamiento en el hormigón	F _{r,d2}	1212	kN
Cortante en la madera	F _{r,d3}	673,5	kN
Aplastamiento en la madera	F _{r,d4}	1117	kN
	F _{r,d}	649	Kn
Rigidez longitudinal	K _{ser} = Ku	15000	N/mm ²



La resistencia de cada una de nuestras entalladuras vendrá determinada por el modo de fallo (F_{r,d1}) Cortante en el hormigón.

4.6.2.5 Diseño de la entalladura.

El diseño de la entalladura se ha planteado a partir de la estandarización de sus dimensiones, con el objetivo de optimizar su producción mediante sistemas CNC y favorecer la repetitividad del proceso. Esta estrategia permite cumplir los parámetros normativos y facilita el control visual de la ejecución. Las entalladuras se disponen con una separación uniforme, siendo los tirafondos los elementos que se ajustan a las variaciones del esfuerzo cortante, asegurando un modo de fallo dúctil del sistema de conexión.

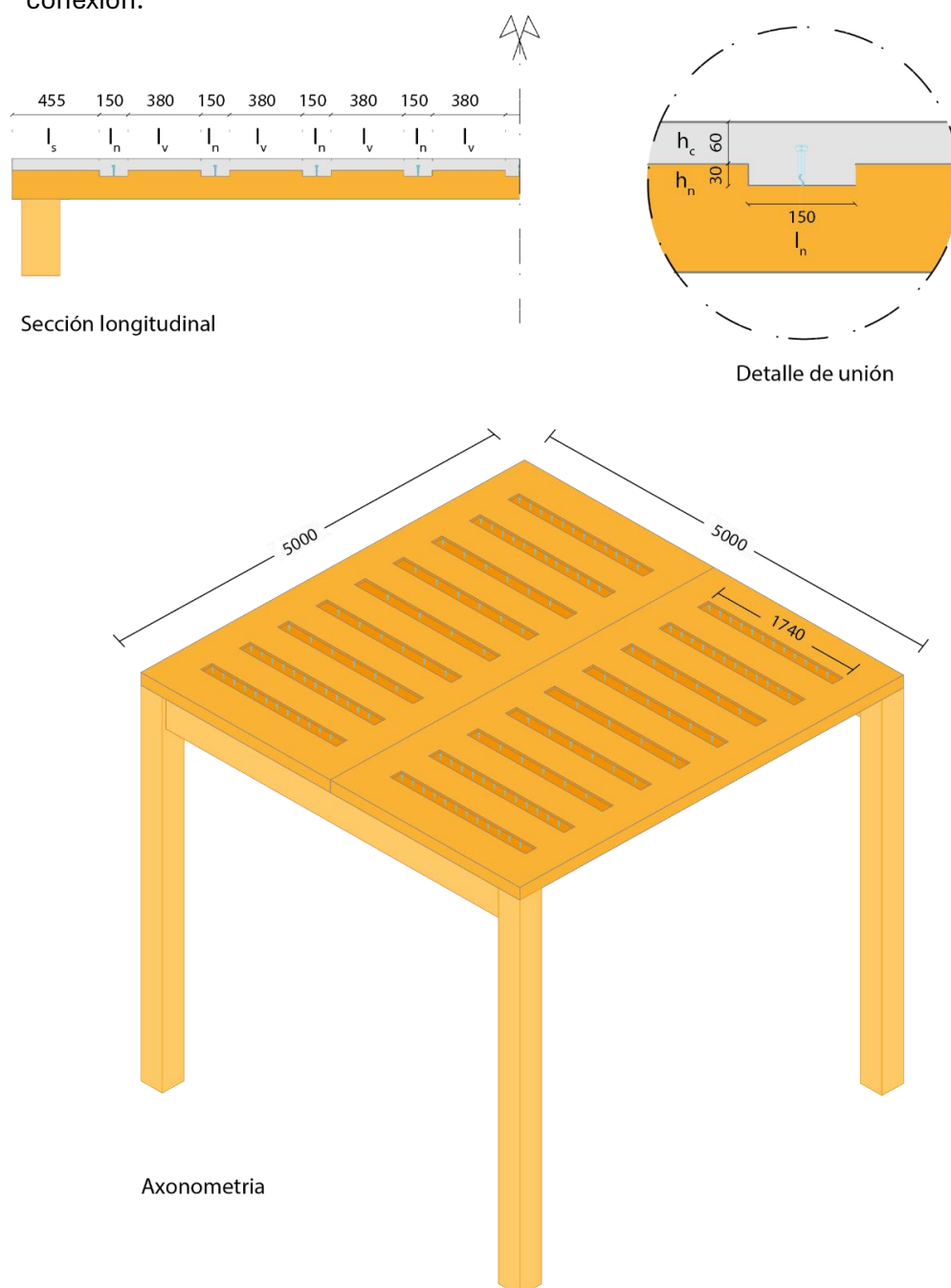


Imagen 13: Dimensiones de las entalladuras en los paneles de CLT.

5 – ANÁLISIS DE RESULTADOS.

5.1 Análisis de agotamiento de la madera.

En las páginas siguientes se presentan una serie de fichas de resultados obtenidas mediante el modelo de elementos finitos desarrollado en Dlubal RFEM, en las que se analiza el grado de utilización de las diferentes secciones de forjado de CLT para las situaciones de proyecto y combinaciones de acciones definidas conforme a la normativa vigente. Dado que el trabajo se centra en la comparación de la eficiencia estructural de los sistemas de CLT frente a los sistemas mixtos CLT–hormigón, el sistema portante de pórticos de vigas y pilares sobre el que se apoyan los forjados, así como la cercha central de la cubierta, se ha mantenido idéntico en todos los modelos analizados. Únicamente se han adaptado las geometrías y secciones de los elementos directamente afectados por el cambio de sistema estructural en el paso del Modelo 1 al Modelo 2, garantizando así la coherencia de la comparación.

Tal y como reflejan los resultados obtenidos en RFEM, los forjados de CLT encuentran sus condiciones de verificación más restrictivas en los Estados Límite de Servicio, especialmente en las comprobaciones de deformación y vibración. En el caso de la deformación, la combinación cuasi permanente de acciones resulta la más desfavorable en todos los casos analizados. Por este motivo, las fichas incluyen la representación de los desplazamientos verticales u_z correspondientes a dicha combinación. Asimismo, las gráficas asociadas muestran los ratios de utilización de la madera obtenidos en las verificaciones normativas, tanto para los Estados Límite Últimos (ELU) como para los Estados Límite de Servicio (ELS) más representativos, permitiendo una lectura global y comparativa del comportamiento estructural del sistema.

Finalmente, las fichas se organizan de forma secuencial para reflejar la evolución del sistema estructural: en primer lugar, se presenta el modelo correspondiente a una sección de CLT que cumple con los requisitos normativos; a continuación, se analiza esa misma sección de CLT trabajando conjuntamente con una capa de compresión de hormigón de 6 cm de espesor; y, por último, se muestra un modelo en el que se optimiza la sección de CLT en el sistema mixto, con el objetivo de cuantificar el ahorro de volumen de madera (m^3) que permite la colaboración estructural con el hormigón.

MODELO 01

Uso Residencial

5x5m

GLT+CLT

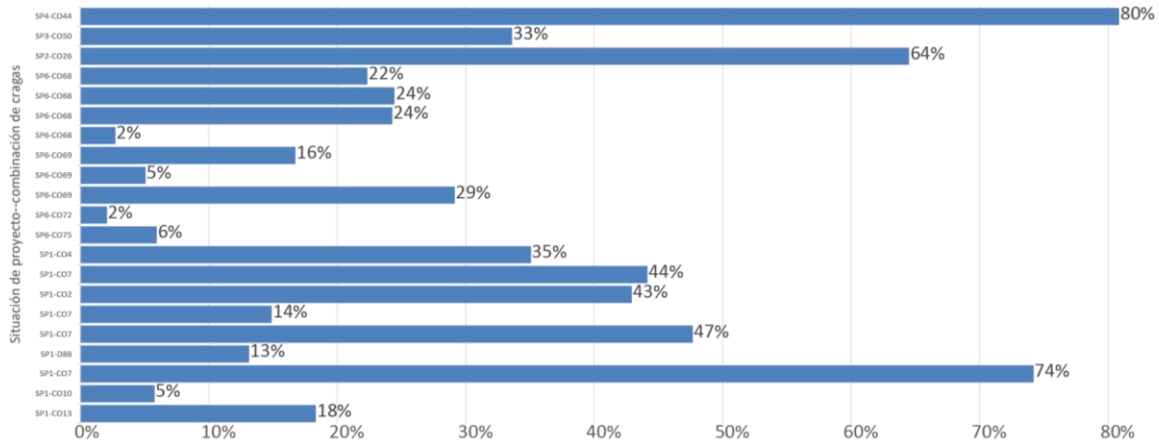
Modo de visibilidad

Cálculo de madera

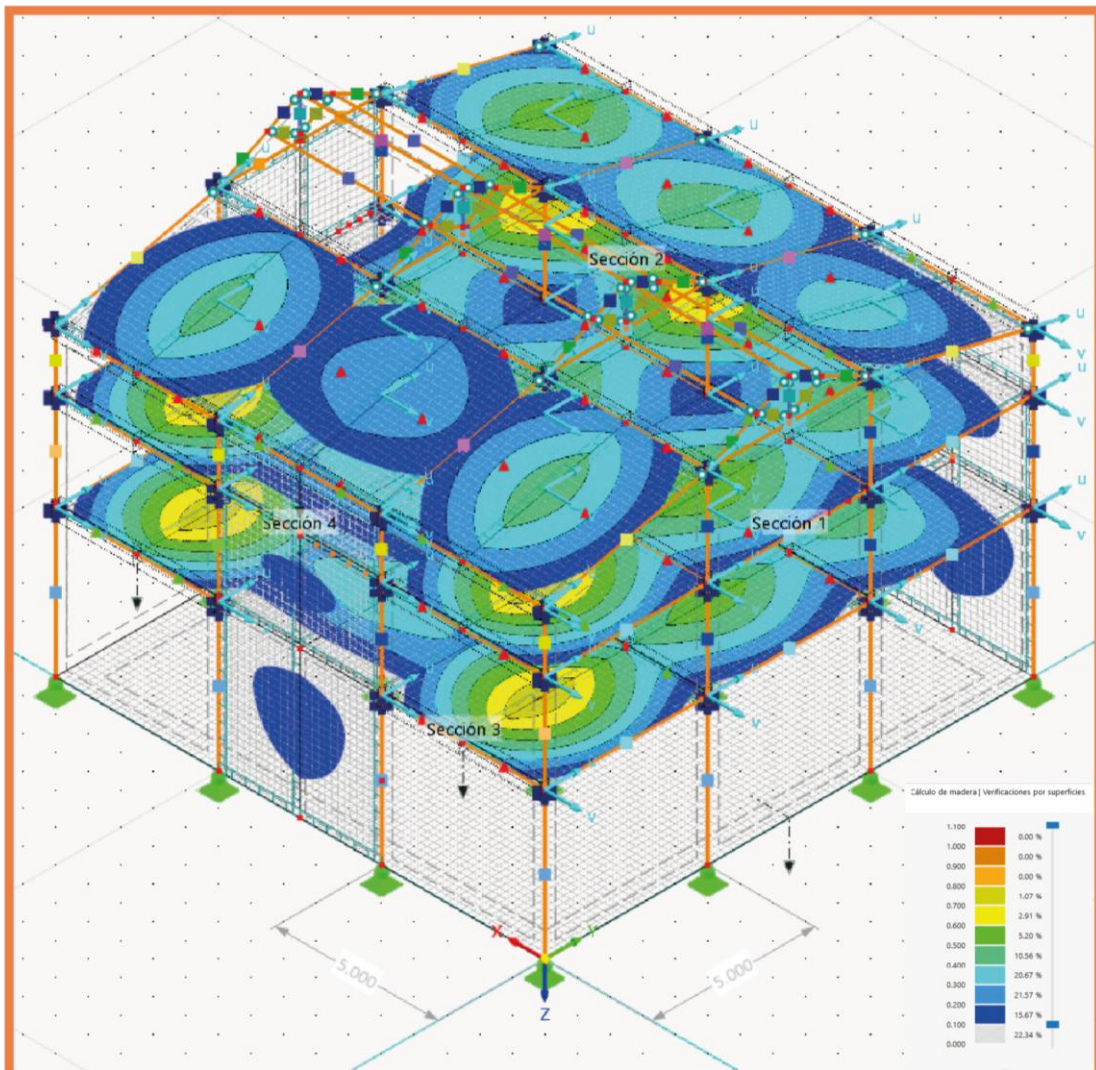
Superficies |

| ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z

Egoin C24 | d: 150 mm | capas:5



SP1-CO13	ELU Tracción a lo largo de la fibra	SP1-CO7	ELU Cortante en el plano xz y plano xy	SP6-CO72	Fuego Compresión a lo largo de la fibra	SP6-CO68	Fuego Flexión y tracción a lo largo de la fibra
SP1-CO10	ELU Compresión a lo largo de la fibra	SP1-CO2	ELU Flexión a lo largo de la fibra	SP6-CO69	Fuego Cortante en el plano yz	SP6-CO68	Fuego Flexión y compresión a lo largo de la fibra
SP1-CO7	ELU Cortante en el plano yz	SP1-CO7	ELU Flexión y tracción a lo largo de la fibra	SP6-CO69	Fuego Cortante en el plano xz	SP2-CO26	ELS Característica, integridad Flecha en z
SP1-D88	ELU Cortante en el plano xz	SP1-CO4	ELU Flexión y compresión a lo largo de la fibra	SP6-CO69	Fuego Cortante en el plano xy	SP3-CO50	ELS Característica, confort Flecha en dirección z
SP1-CO7	ELU Cortante en el plano xy	SP6-CO75	Fuego Tracción a lo largo de la fibra	SP6-CO68	Fuego Cortante en el plano xz y plano xy	SP4-CO44	ELS Cuasipermanente Flecha en dirección z
				SP6-CO68	Fuego Flexión a lo largo de la fibra		



MODELO 01

Uso Residencial

5x5m

GLT+CLT+HA

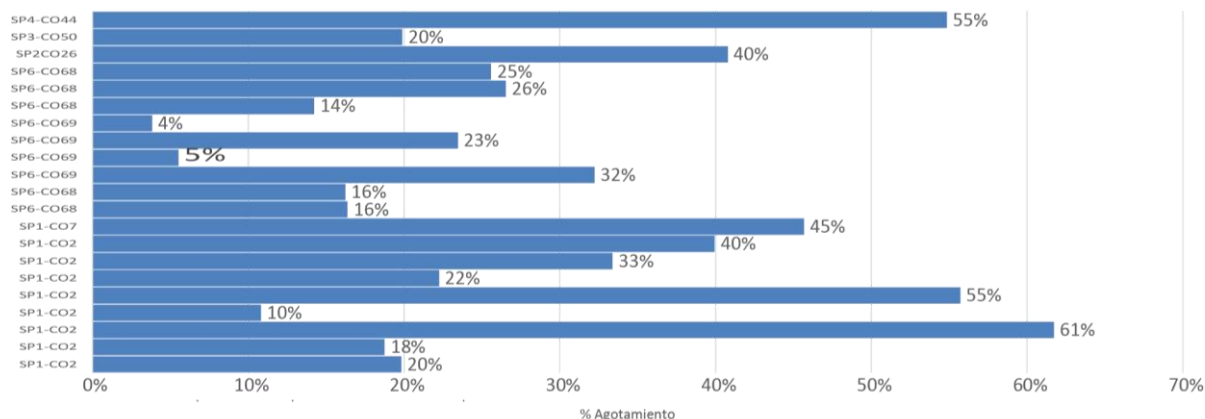
Modo de visibilidad

Cálculo de madera

Superficies |

| ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z

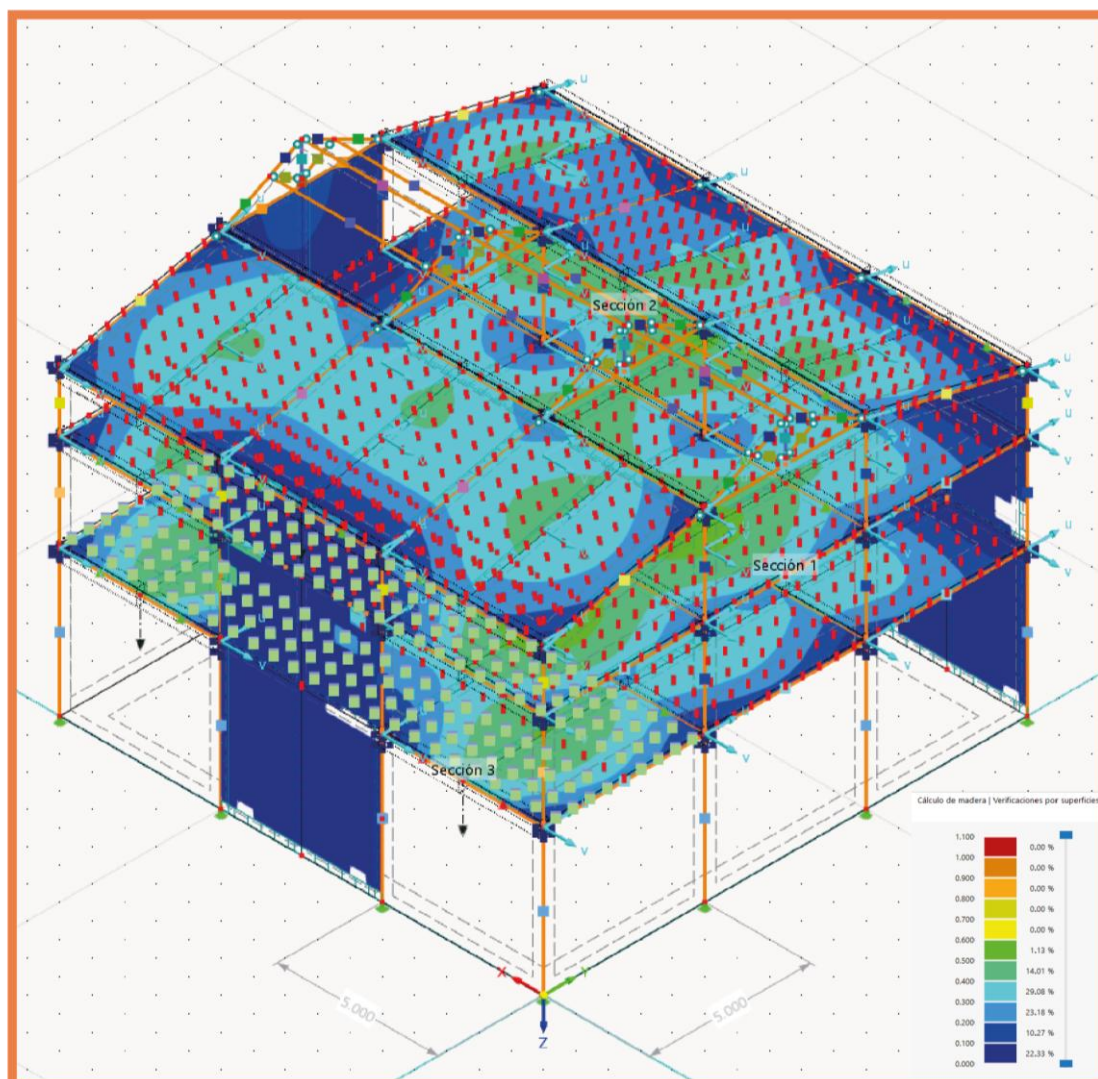
Egoin C24 | d: 150 mm | capas:5



SP1-CO2 ELU | Tracción a lo largo de la fibra
 SP1-CO2 ELU | Compresión a lo largo de la fibra
 SP1-CO2 ELU | Cortante en el plano yz
 SP1-CO2 ELU | Cortante en el plano xz
 SP1-CO2 ELU | Cortante en el plano xy | Mecanismo de fallo 1
 SP1-CO2 ELU | Cortante en el plano xz y plano xy
 SP1-CO2 ELU | Flexión a lo largo de la fibra

SP1-CO2 ELU | Flexión y tracción a lo largo de la fibra
 SP1-CO7 ELU | Flexión y compresión a lo largo de la fibra
 SP6-CO68 Fuego | Tracción a lo largo de la fibra
 SP6-CO68 Fuego | Compresión a lo largo de la fibra
 SP6-CO69 Fuego | Cortante en el plano yz
 SP6-CO69 Fuego | Cortante en el plano xz
 SP6-CO69 Fuego | Cortante en el plano xy | Mecanismo de fallo 1

SP6-CO69 Fuego | Cortante en el plano xz y plano xy
 SP6-CO68 Fuego | Flexión a lo largo de la fibra
 SP6-CO68 Fuego | Flexión y tracción a lo largo de la fibra
 SP6-CO68 Fuego | Flexión y compresión a lo largo de la fibra
 SP2-CO26 ELS | Característica, integridad | Flecha en dirección z
 SP3-CO50 ELS | Característica, cofort | Flecha en dirección z
 SP4-CO44 ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z



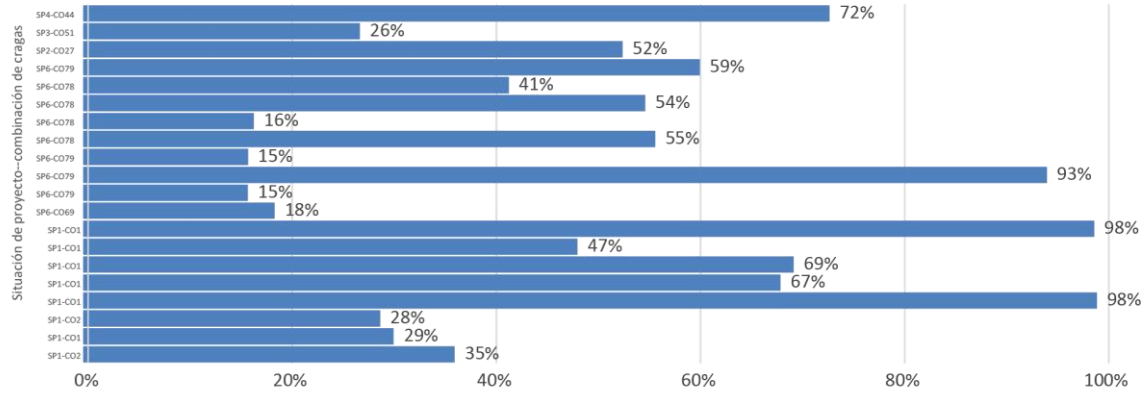
MODELO 01

Uso Residencial
5x5m OPTIMIZADO

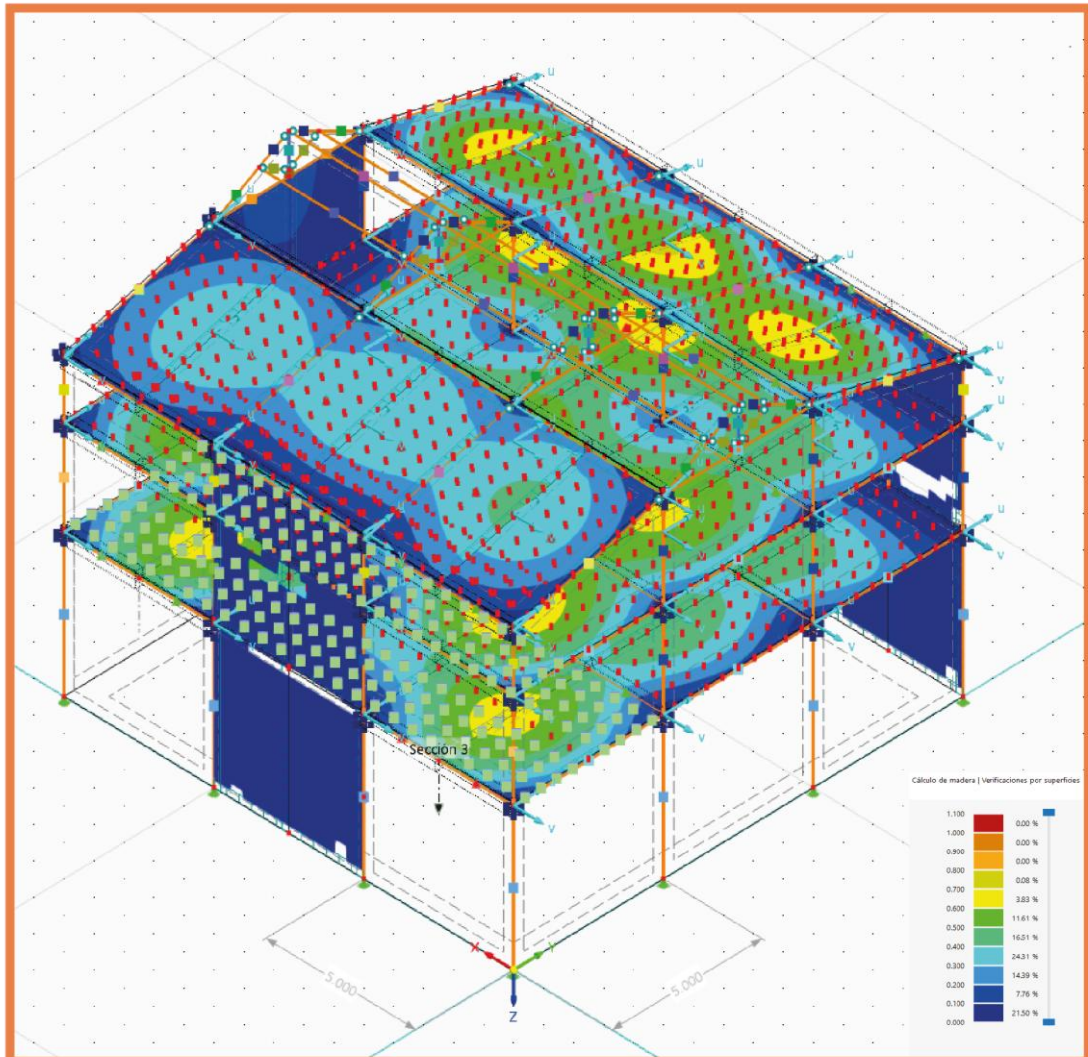
GLT+CLT+HA

Modo de visibilidad
Cálculo de madera
Superficies |
| ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z

Egoin C24 | d: 125 mm | capas:5



SP1-C02 ELU Tracción a lo largo de la fibra	SP1-C01 ELU Flexión y compresión a lo largo de la fibra	SP6-C078 Fuego Cortante en el plano xz y plano xy
SP1-C01 ELU Compresión a lo largo de la fibra	SP6-C069 Fuego Tracción a lo largo de la fibra	SP6-C078 Fuego Flexión a lo largo de la fibra
SP1-C02 ELU Cortante en el plano xz	SP6-C079 Fuego Compresión a lo largo de la fibra	SP6-C079 Fuego Flexión y tracción a lo largo de la fibra
SP1-C01 ELU Cortante en el plano xy Mecanismo de fallo 1	SP6-C079 Fuego Cortante en el plano yz	SP6-C079 Fuego Flexión y compresión a lo largo de la fibra
SP1-C01 ELU Cortante en el plano xz y plano xy	SP6-C079 Fuego Cortante en el plano xz	SP2-C027 ELS Característica, integridad Flecha en dirección z
SP1-C01 ELU Flexión a lo largo de la fibra	SP6-C078 Fuego Cortante en el plano xy	SP3-C051 ELS Característica, confort Flecha en dirección z
SP1-C01 ELU Flexión y tracción a lo largo de la fibra		SP4-C044 ELS Cuasipermanente Flecha en dirección z



MODELO 02

Uso Comercial

7.5x7.5m

GLT+CLT

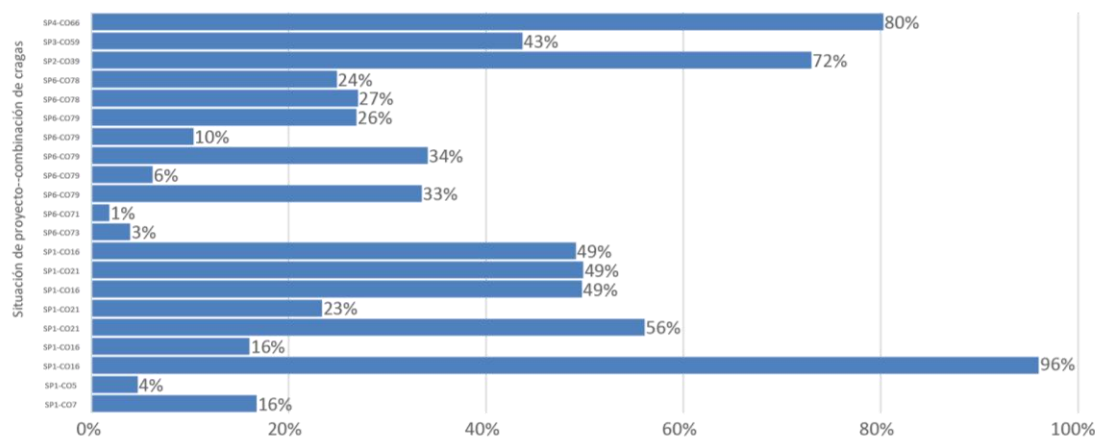
Modo de visibilidad

Cálculo de madera

Superficies |

| ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z

Egoin C24 | d : 280.0 mm | Capas : 7

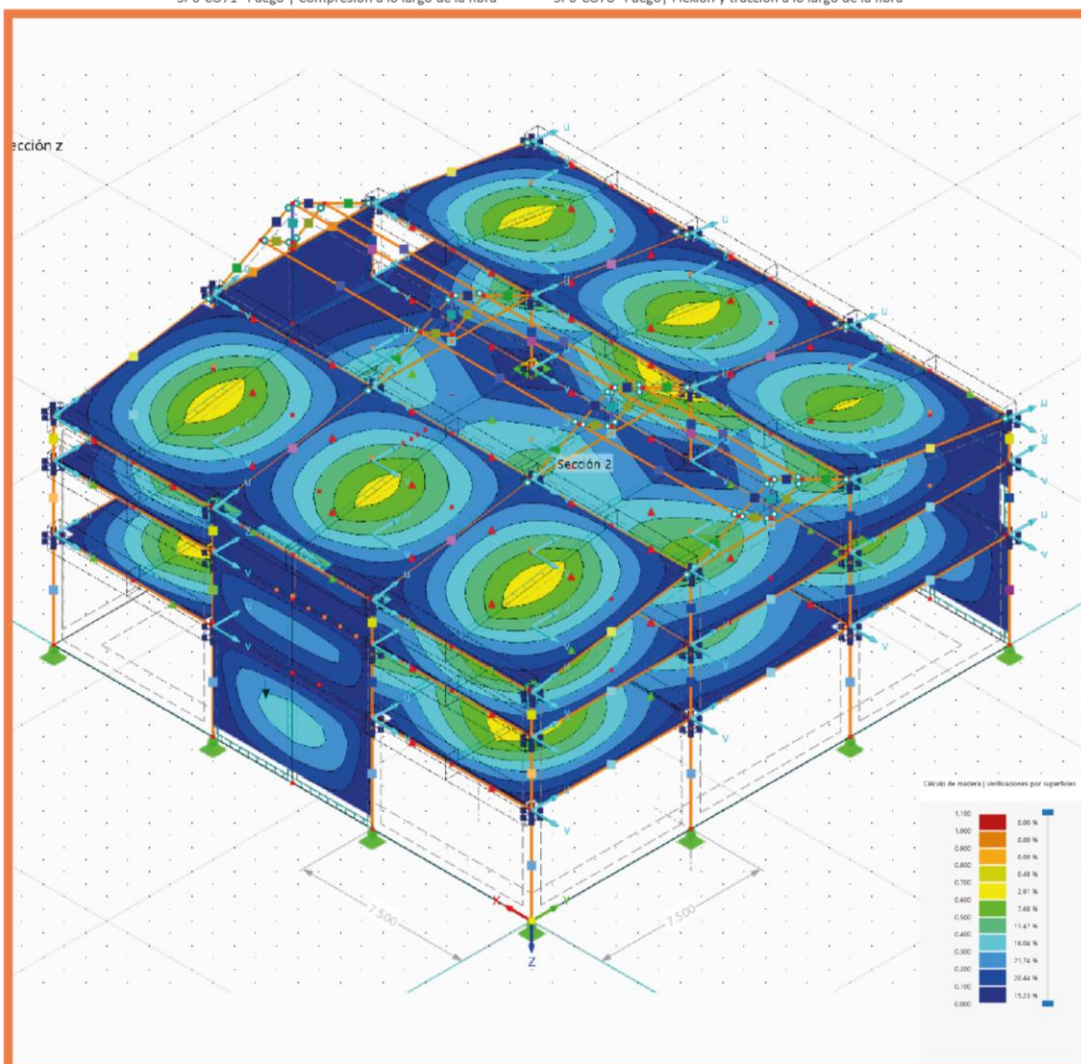


SP1-CO7 ELU | Tracción a lo largo de la fibra
SP1-CO5 ELU | Compresión a lo largo de la fibra
SP1-CO16 ELU | Cortante en el plano yz
SP1-CO16 ELU | Cortante en el plano xz
SP1-CO21 ELU | Cortante en el plano xy

SP1-CO21 ELU | Cortante en el plano xz y plano xy
SP1-CO16 ELU | Flexión a lo largo de la fibra
SP1-CO21 ELU | Flexión y tracción a lo largo de la fibra
SP1-CO16 ELU | Flexión y compresión a lo largo de la fibra
SP6-CO73 Fuego | Tracción a lo largo de la fibra
SP6-CO71 Fuego | Compresión a lo largo de la fibra

SP6-CO79 Fuego | Cortante en el plano yz
SP6-CO79 Fuego | Cortante en el plano xz
SP6-CO79 Fuego | Cortante en el plano xy
SP6-CO79 Fuego | Cortante en el plano xz y plano xy
SP6-CO79 Fuego | Flexión a lo largo de la fibra
SP6-CO78 Fuego | Flexión y tracción a lo largo de la fibra

SP6-CO78 Fuego | Flexión y compresión a lo largo de la fibra
SP2-CO39 ELS | Característica, integridad | Flecha en z
SP3-CO59 ELS | Característica, confort | Flecha en dirección z
SP4-CO66 ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z



MODELO 02

Uso Comercial

7.5x7.5m

GLT+CLT+HA

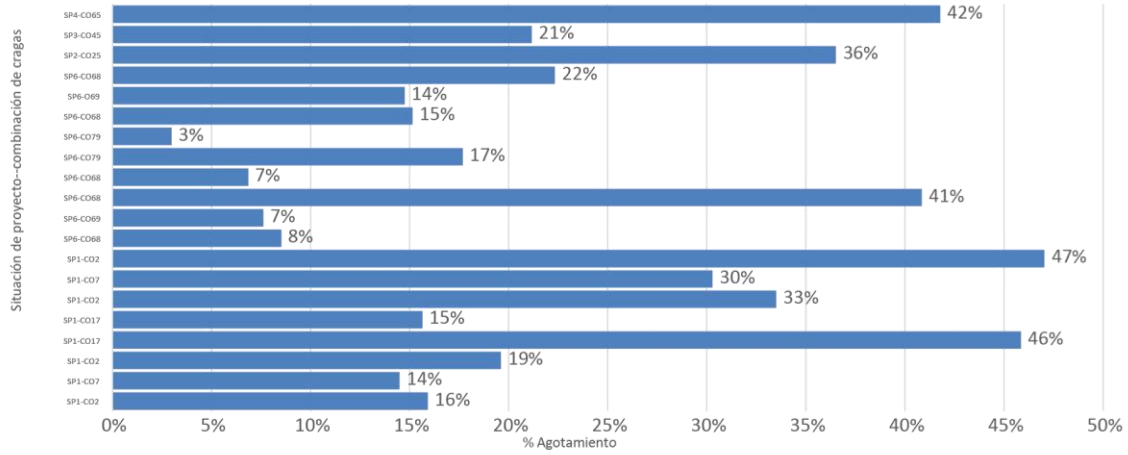
Modo de visibilidad

Cálculo de madera

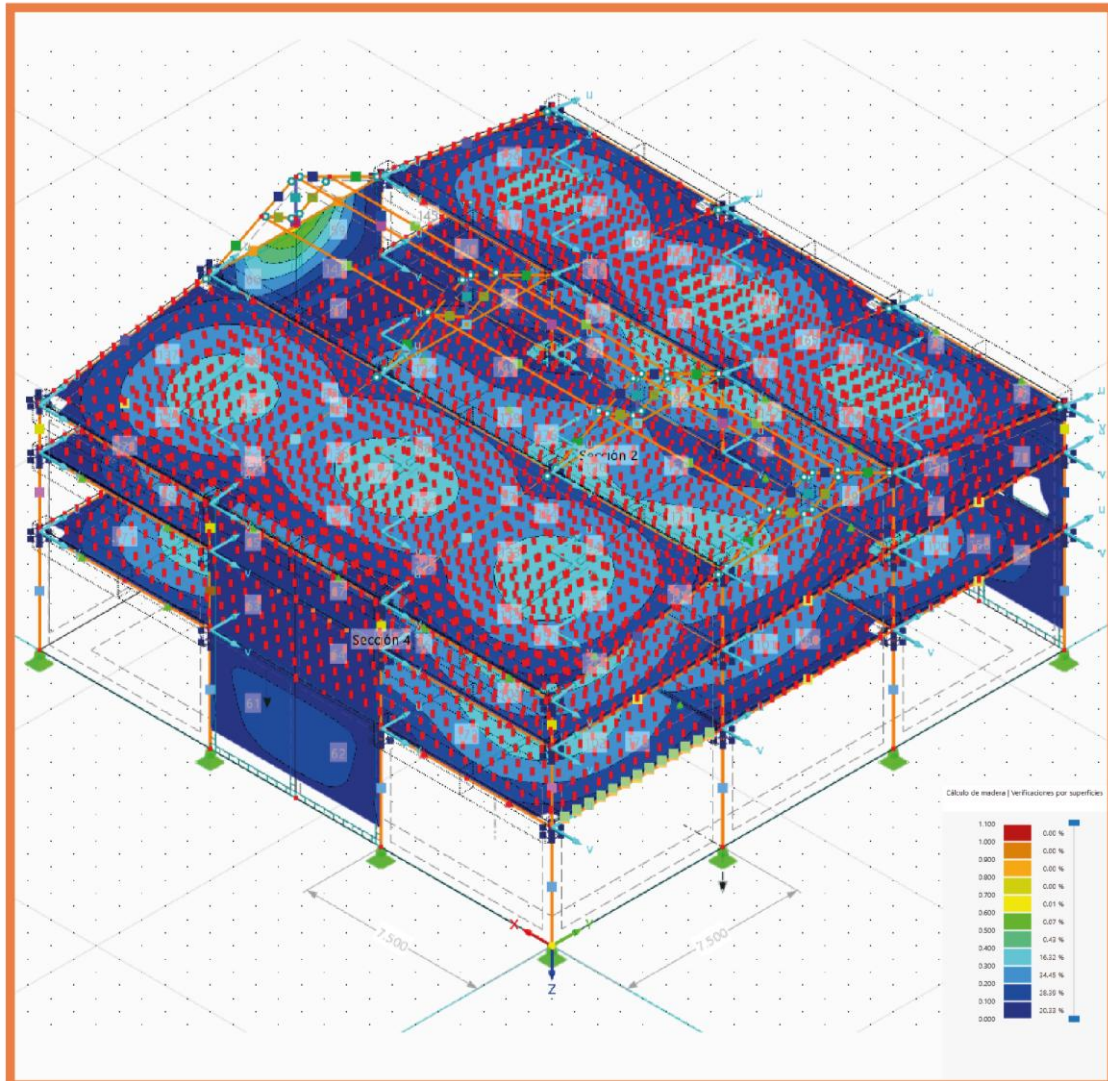
Superficies |

| ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z

Egoín C24 | d : 280.0 mm | Capas : 7



SP1-CO2 ELU | Tracción a lo largo de la fibra
 SP1-CO7 ELU | Compresión a lo largo de la fibra
 SP1-CO2 ELU | Cortante en el plano xz
 SP1-CO17 ELU | Cortante en el plano xy
 SP1-CO17 ELU | Cortante en el plano xz y plano xy
 SP1-CO2 ELU | Flexión a lo largo de la fibra
 SP1-CO7 ELU | Flexión y tracción a lo largo de la fibra
 SP1-CO2 ELU | Flexión y tracción a lo largo de la fibra
 SP1-CO2 ELU | Tracción a lo largo de la fibra
 SP6-CO68 Fuego | Compresión a lo largo de la fibra
 SP6-CO68 Fuego | Cortante en el plano yz
 SP6-CO68 Fuego | Cortante en el plano xz
 SP6-CO79 Fuego | Cortante en el plano xy
 SP6-CO79 Fuego | Cortante en el plano xz y plano xy
 SP6-CO68 Fuego | Flexión a lo largo de la fibra
 SP6-CO69 Fuego | Flexión y tracción a lo largo de la fibra
 SP6-CO68 Fuego | Flexión y compresión a lo largo de la fibra
 SP2-CO25 ELS | Característica, integridad | Flecha en z
 SP3-CO45 ELS | Característica, confort | Flecha en dirección z
 SP4-CO65 ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z



MODELO 02

Uso Comercial

7.5x7.5m OPTIMIZADO

GLT+CLT+HA

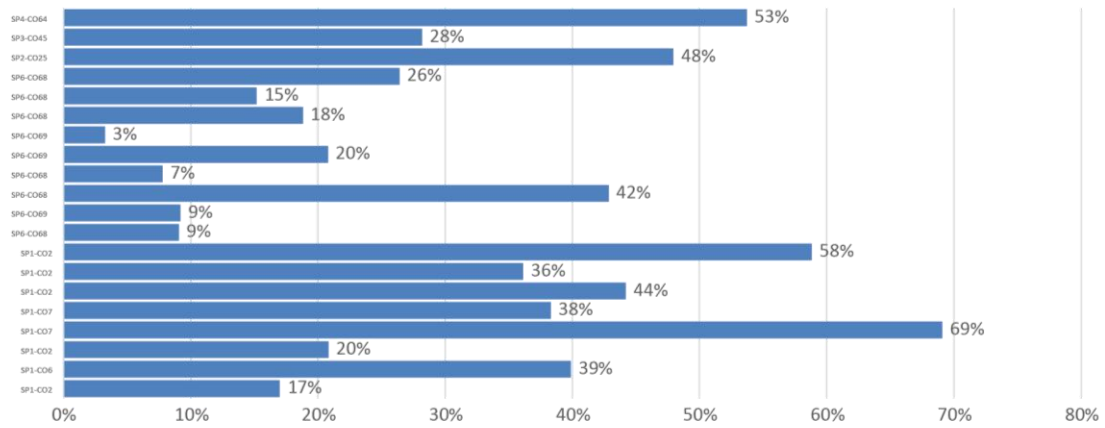
Modo de visibilidad

Cálculo de madera

Superficies |

| ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z

Egoín C24 | d : 250.0 mm | Capas : 7

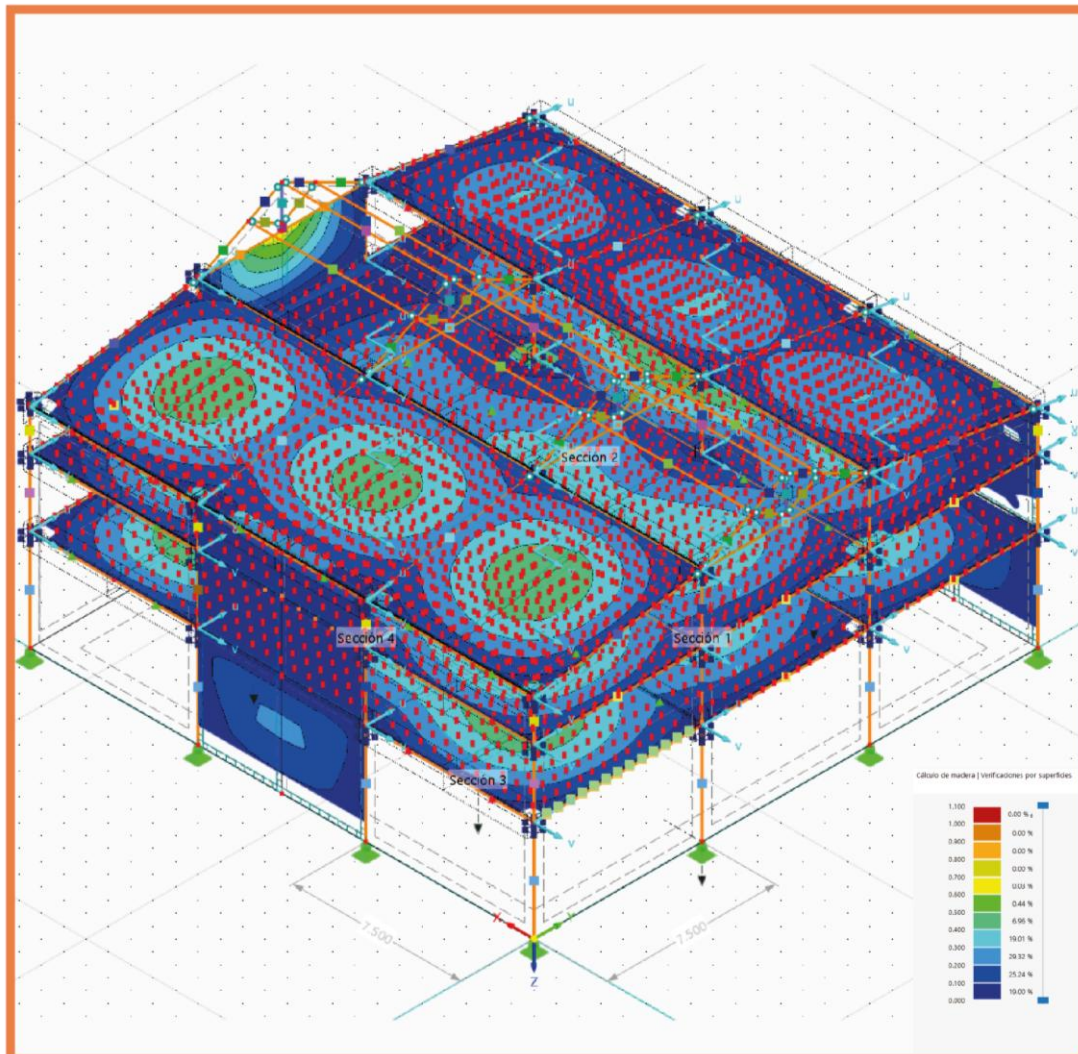


SP1-CO2 ELU | Tracción a lo largo de la fibra
SP1-CO6 ELU | Compresión a lo largo de la fibra
SP1-CO2 ELU | Cortante en el plano xz
SP1-CO7 ELU | Cortante en el plano xy
SP1-CO7 ELU | Cortante en el plano xz y plano xy

SP1-CO2 ELU | Flexión a lo largo de la fibra
SP1-CO2 ELU | Flexión y tracción a lo largo de la fibra
SP1-CO2 ELU | Flexión y compresión a lo largo de la fibra
SP6-CO68 Fuego | Tracción a lo largo de la fibra
SP6-CO69 Fuego | Compresión a lo largo de la fibra

SP6-CO68 Fuego | Cortante en el plano xz
SP6-CO69 Fuego | Cortante en el plano xy
SP6-CO69 Fuego | Cortante en el plano xz y plano xy
SP6-CO68 Fuego | Flexión a lo largo de la fibra
SP6-CO68 Fuego | Cortante en el plano yz

SP6-CO68 Fuego | Flexión y tracción a lo largo de la fibra
SP6-CO68 Fuego | Flexión y compresión a lo largo de la fibra
SP2-CO25 ELS | Característica, integridad | Flecha en dirección z
SP3-CO45 ELS | Característica, confort | Flecha en dirección z
SP4-CO64 ELS | Cuasipermanente | Flecha en dirección z



5.2 Análisis estático global.

En el siguiente análisis estático se han evaluado los desplazamientos globales de la estructura, correspondientes a las deformaciones máximas del sistema, con el objetivo de analizar si el incremento de rigidez de los forjados, al actuar como diafragmas horizontales, repercute favorablemente en el comportamiento global del edificio. En particular, se estudia la influencia del uso de forjados mixtos CLT–hormigón frente a la solución estructural resuelta únicamente con CLT.

En las fichas de resultados se representan las deformaciones horizontales correspondientes a la situación de cargas más desfavorable, que en este caso se asocia a las combinaciones de integridad estructural definidas por la normativa. Asimismo, las gráficas comparativas permiten analizar de forma directa la evolución de los desplazamientos globales en función del sistema estructural adoptado, diferenciando entre la solución de CLT, la solución mixta CLT–hormigón, y el caso optimizado de CLT dentro del sistema mixto. Esta comparación facilita la evaluación del beneficio global en términos de rigidez lateral derivado del empleo de forjados mixtos.

MODELO 01

Uso Residencial

5x5m

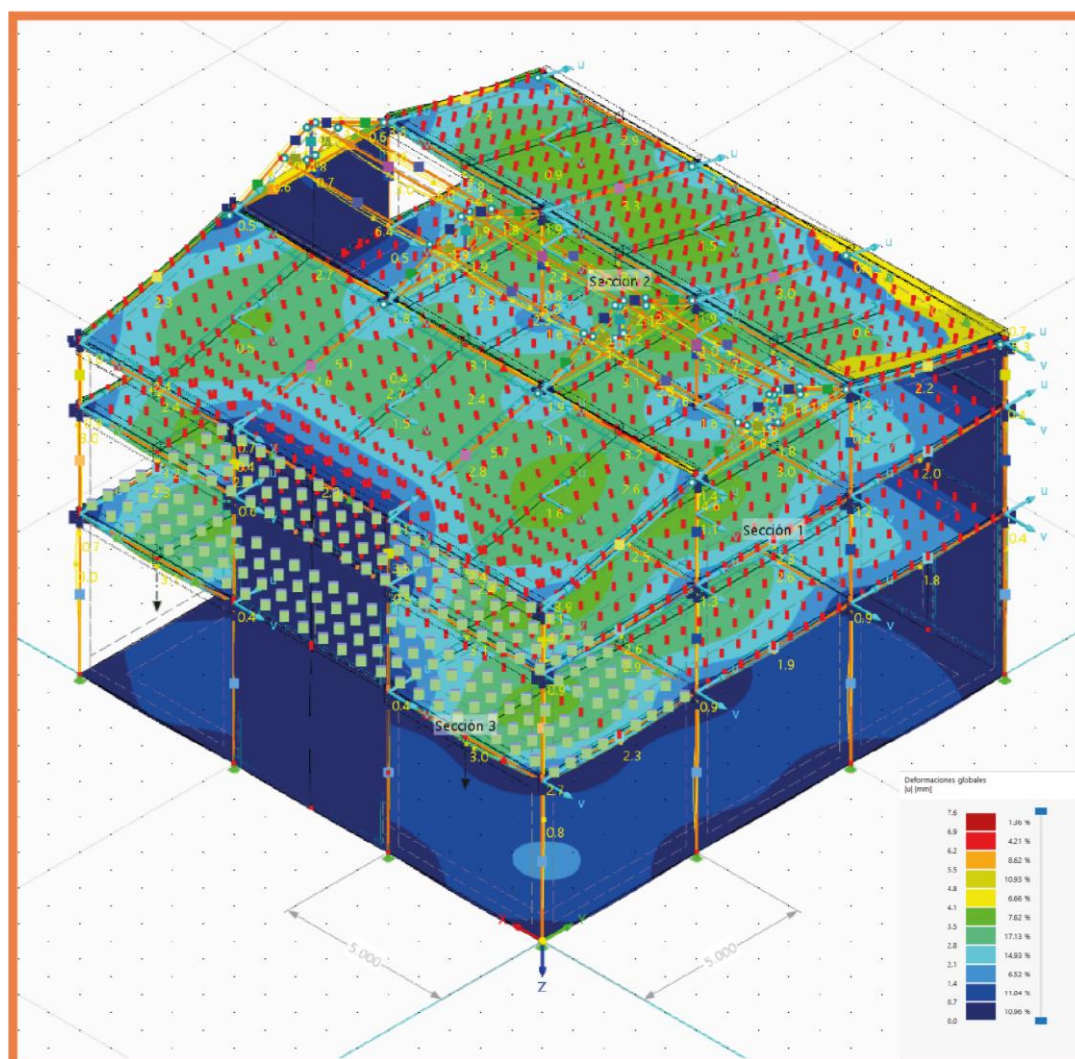
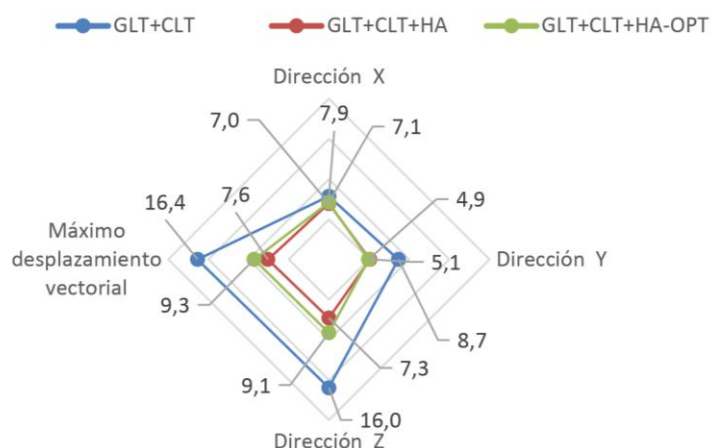
Modo de visibilidad

Análisis estático

Desplazamientos $|u|$

| ELS | Característica - Integridad

Deformaciones máximas (mm)



MODELO 02

Uso Comercial

7.5x7.5m

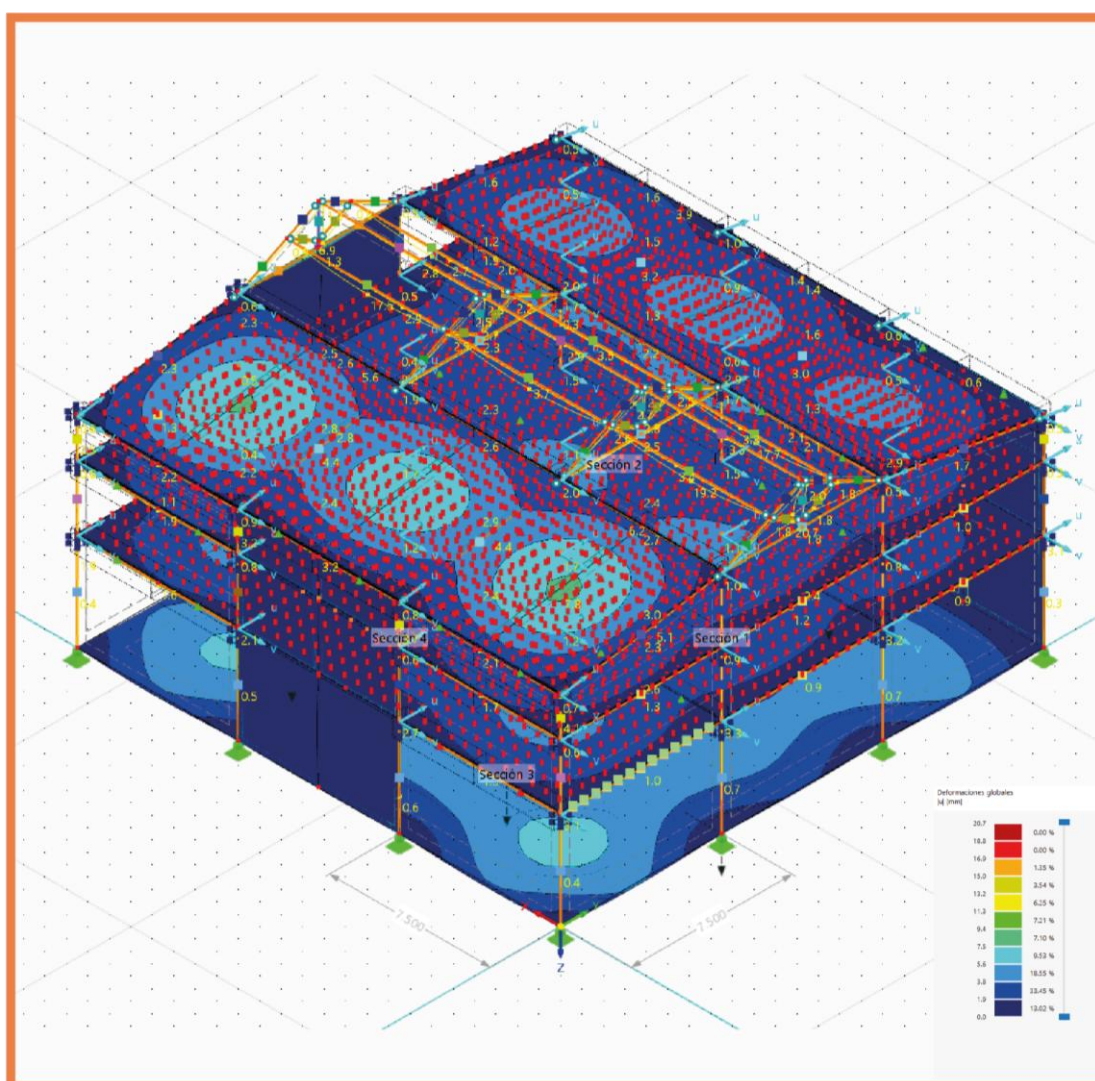
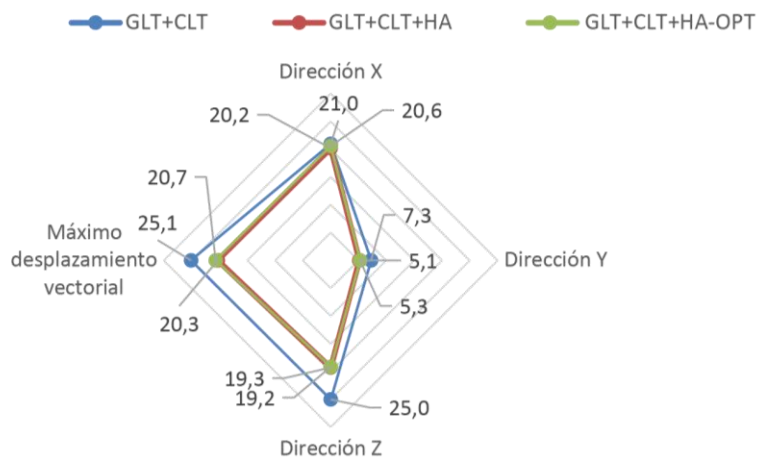
Modo de visibilidad

Análisis estático

Desplazamientos |u|

| ELS | Característica - Integridad

Deformaciones máximas (mm)



5.3 Análisis modal (Vibraciones).

De acuerdo con lo establecido en el Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico de Seguridad Estructural, apartado DB SE 4.3.4, en el caso de estructuras convencionales, no resulta necesario realizar una verificación específica del Estado Límite de Vibraciones cuando se cumplen los criterios de rigidez bajo cargas estáticas. Este criterio es igualmente aplicable a estructuras de madera conforme al DB SE-M, siempre que se satisfagan las limitaciones de deformación establecidas.

No obstante, el CTE proporciona valores orientativos de frecuencia fundamental, a partir de los cuales un forjado puede considerarse suficientemente rígido frente a las excitaciones dinámicas producidas por el tránsito rítmico de personas. Estos valores dependen del uso previsto del edificio, y se recogen en el apartado DB SE 4.3.4, tal como se resume a continuación:

Uso del edificio	Frecuencia fundamental mínima
Gimnasios y polideportivos	8 Hz
Salas de fiesta y locales de pública concurrencia	7 Hz
Locales de espectáculos con asientos fijos	3,4 Hz

$$f_{e,1} = \frac{\pi}{2 l^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}}$$

Donde:

f_n : frecuencia natural (Hz) $(EI)_l$: rigidez de la flexión del forjado (Nm²/m) m : masa por unidad de superficie (kg/m²)

MODELO 01

Uso Residencial

5x5m

GLT+CLT

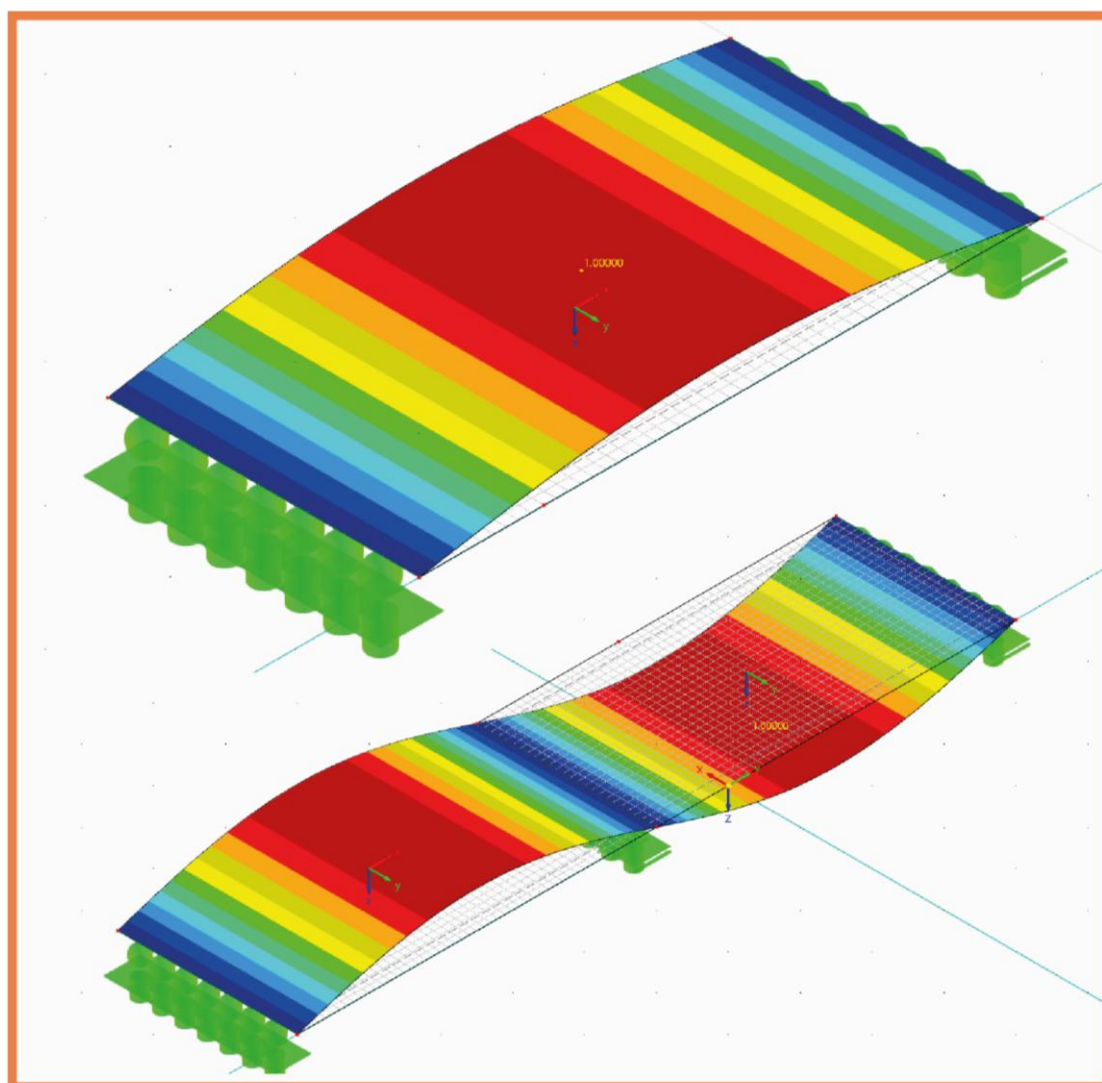
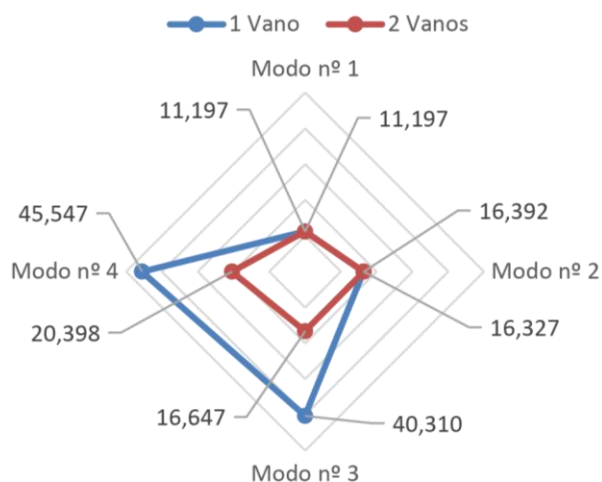
Modo de visibilidad

Análisis modal

Desplazamientos |u|

|Modos nº1 | nº2 | nº3 | [Hz]

Frecuencia natural f [Hz]



MODELO 01

Uso Residencial

5x5m

GLT+CLT+HA

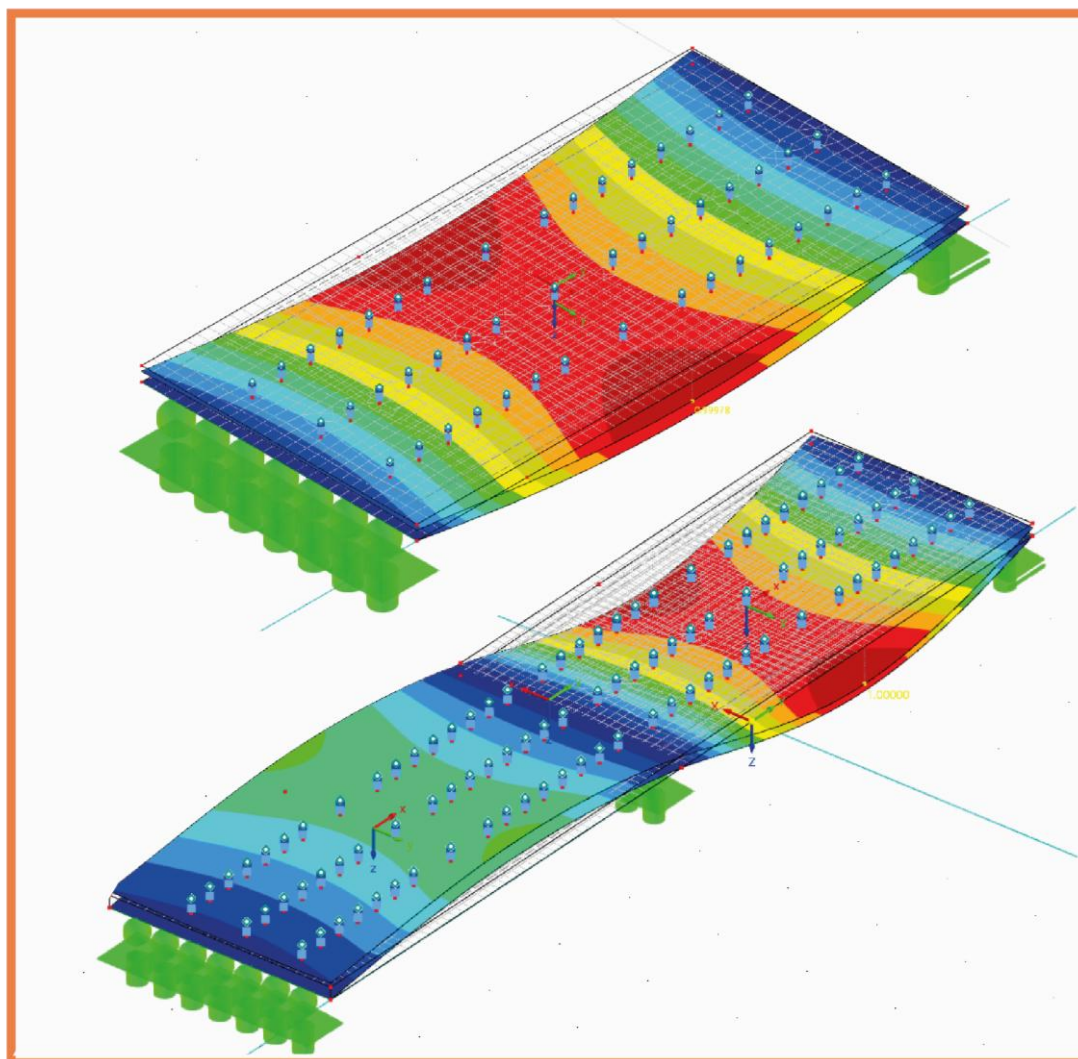
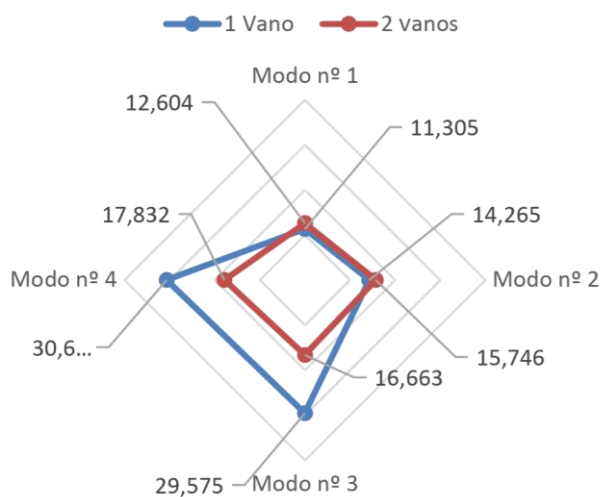
Modo de visibilidad

Análisis modal

Desplazamientos |u|

|Modos nº1 | nº2 | nº3 | nº3 | [Hz]

Frecuencia natural f [Hz]



MODELO 02

Uso Comercial

7.5x7.5m

GLT+CLT

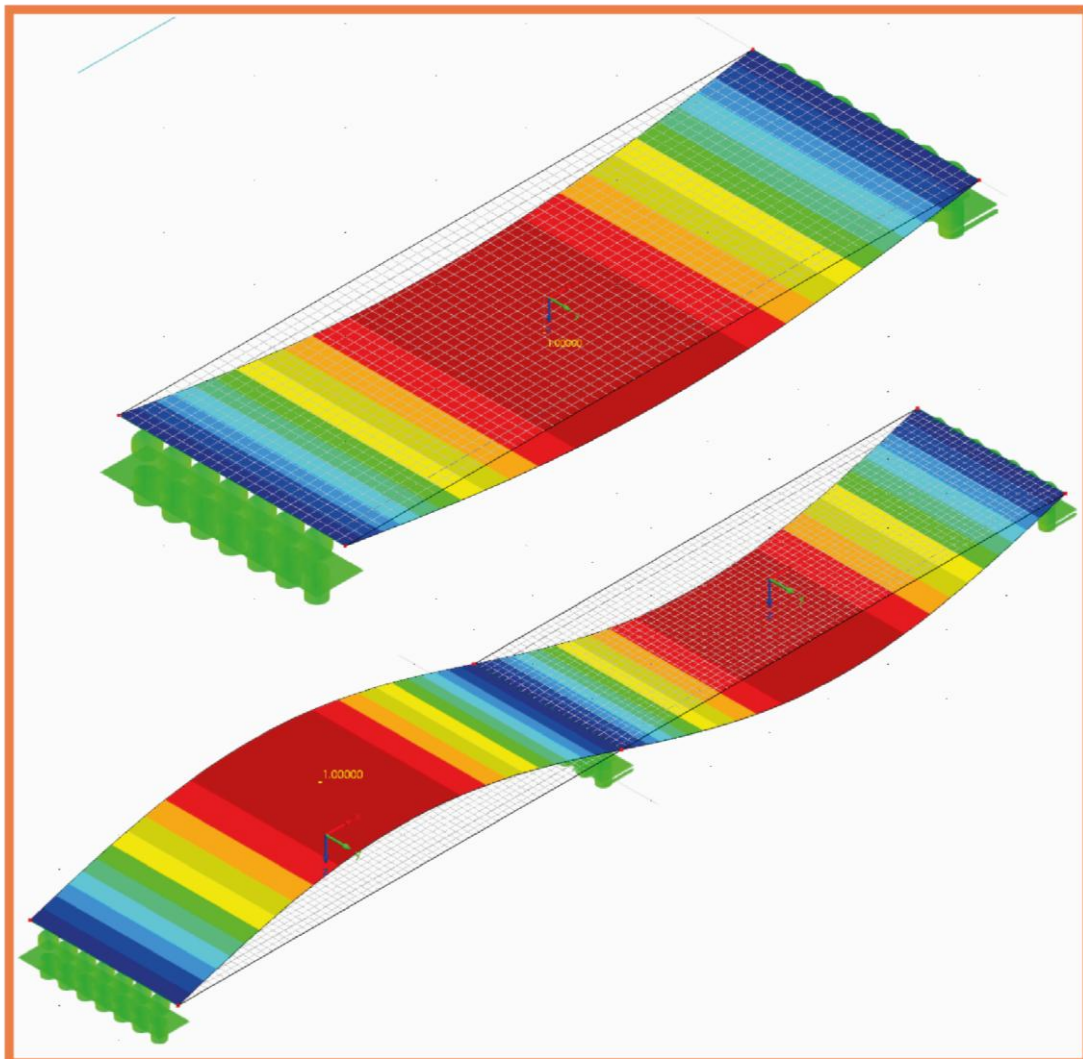
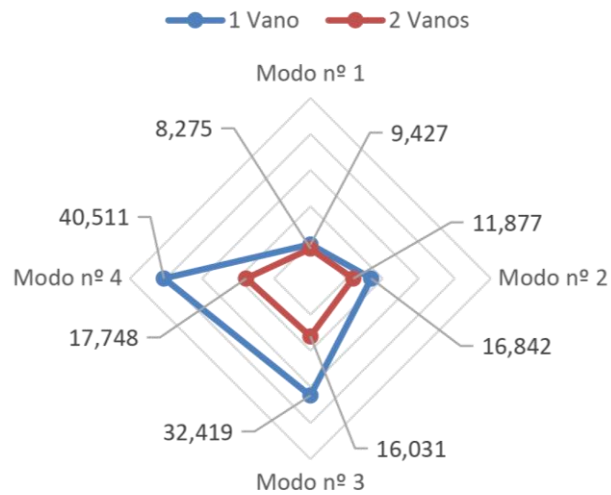
Modo de visibilidad

Análisis modal

Desplazamientos |u|

|Modos nº1 | nº2 | nº3 | nº3 | [Hz]

Frecuencia natural f [Hz]



MODELO 02

Uso Comercial

7.5x7.5m

GLT+CLT+HA

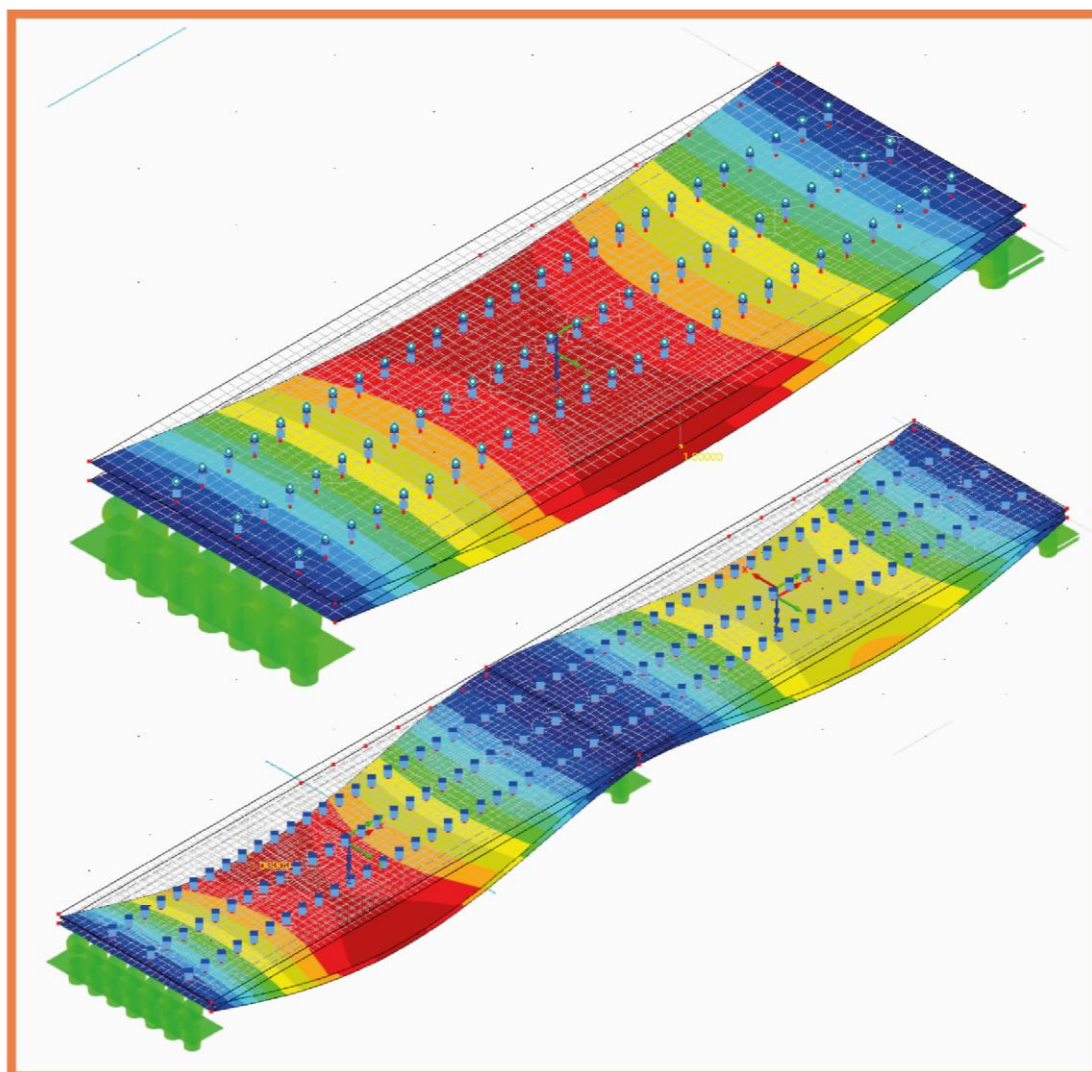
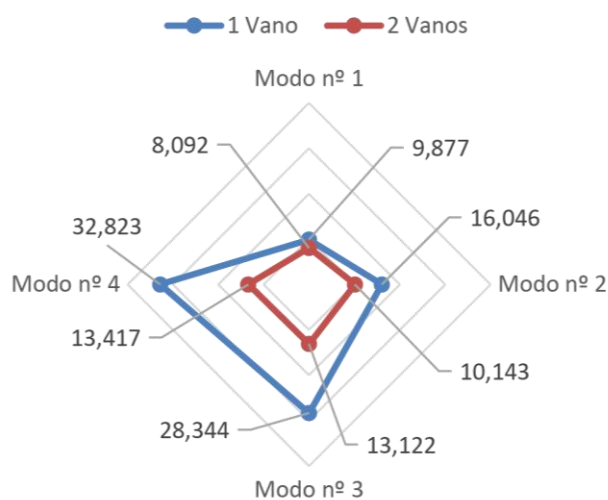
Modo de visibilidad

Análisis modal

Desplazamientos |u|

|Modos nº1 | nº2 | nº3 | nº3 | [Hz]

Frecuencia natural f [Hz]



5.4 Reacciones en apoyos (cimentaciones).

Otro de los aspectos analizados en el presente estudio es la comparación de las reacciones en los apoyos, las cuales, en un edificio real, constituyen la base para el dimensionado de la cimentación. En este apartado se comparan las reacciones transmitidas por la estructura en dos configuraciones estructurales: una solución resuelta mediante forjados de CLT y una solución correspondiente a un sistema mixto CLT-hormigón optimizado, comentados en anteriores puntos.

El objetivo de este análisis es evaluar la influencia del cambio de sistema estructural en las reacciones verticales en los apoyos, considerando que el sistema mixto incorpora una capa de compresión de hormigón armado, material de mayor densidad, y que esta modificación puede tener incidencia en las solicitaciones transmitidas a la cimentación.

En las fichas de resultados se representan las reacciones en los apoyos obtenidas a partir del modelo FEM, correspondientes a la situación de proyecto del Estado Límite Último (ELU), al tratarse de la combinación más desfavorable y aquella que conduce a los valores máximos de reacción entre todas las situaciones de proyecto consideradas. Estas fichas permiten analizar de forma comparativa el comportamiento global del edificio desde el punto de vista de las solicitaciones transmitidas a la cimentación.

MODELO 01

Uso Residencial

5x5m

GLT+CLT

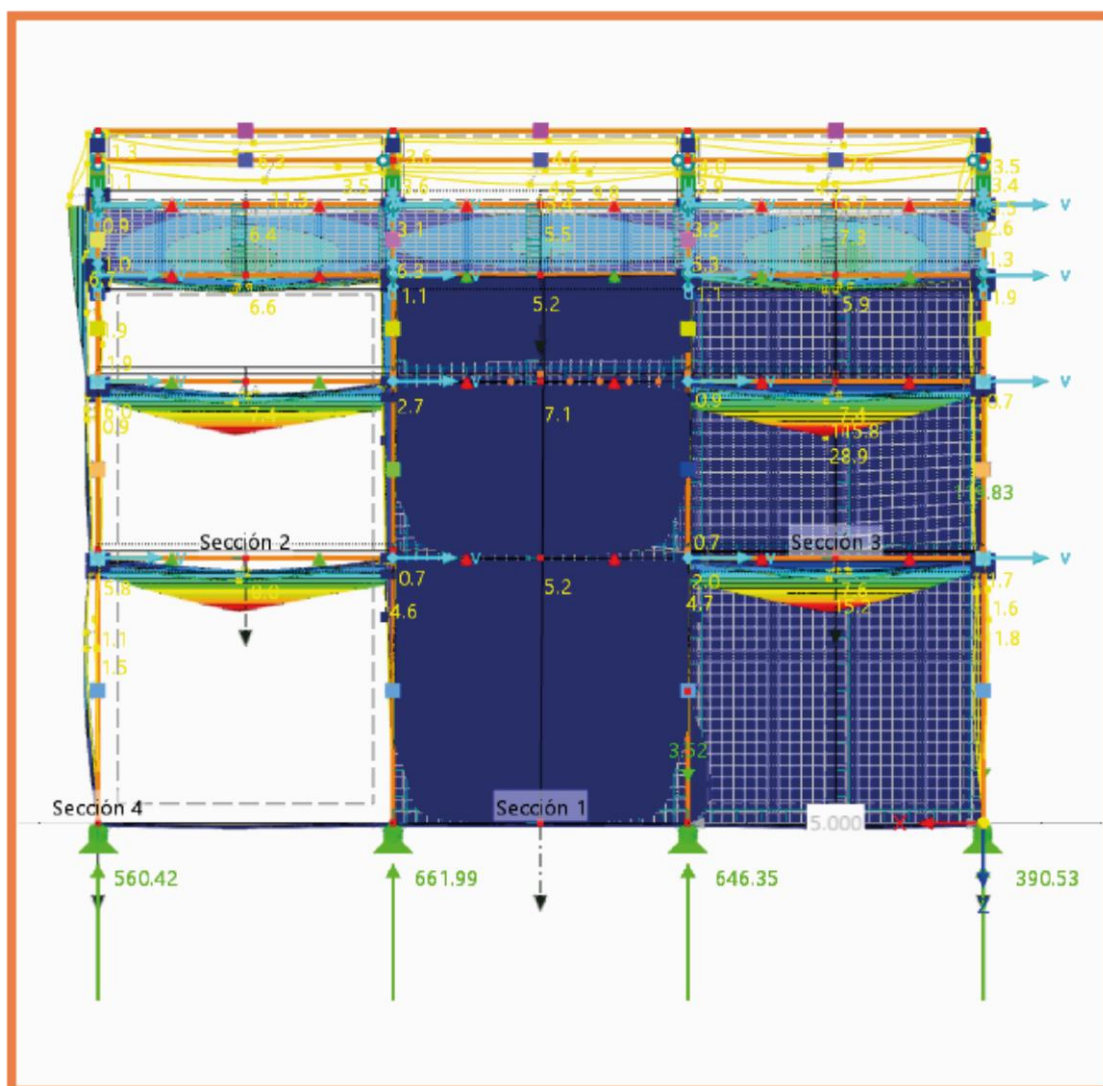
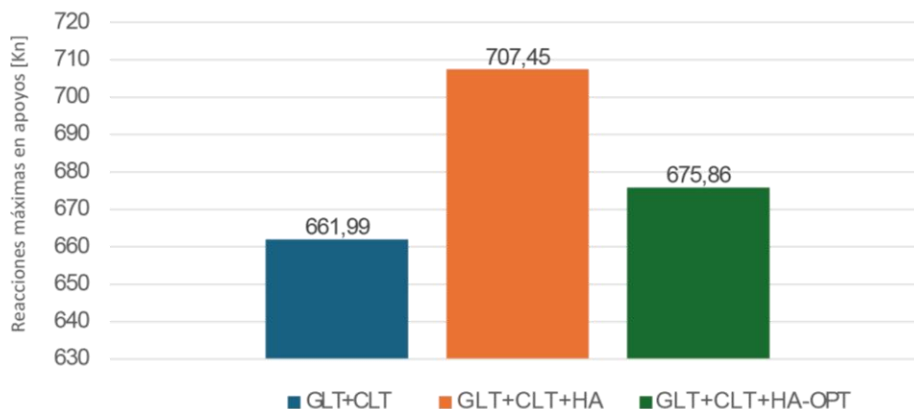
Modo de visibilidad

Análisis estático

Desplazamientos $|u|$

|Nudos | Esfuerzos de reacción globales P_z [Kn]

Reacciones en Apoyos



MODELO 02

Uso Comercial

7.5x7.5m

GLT+CLT

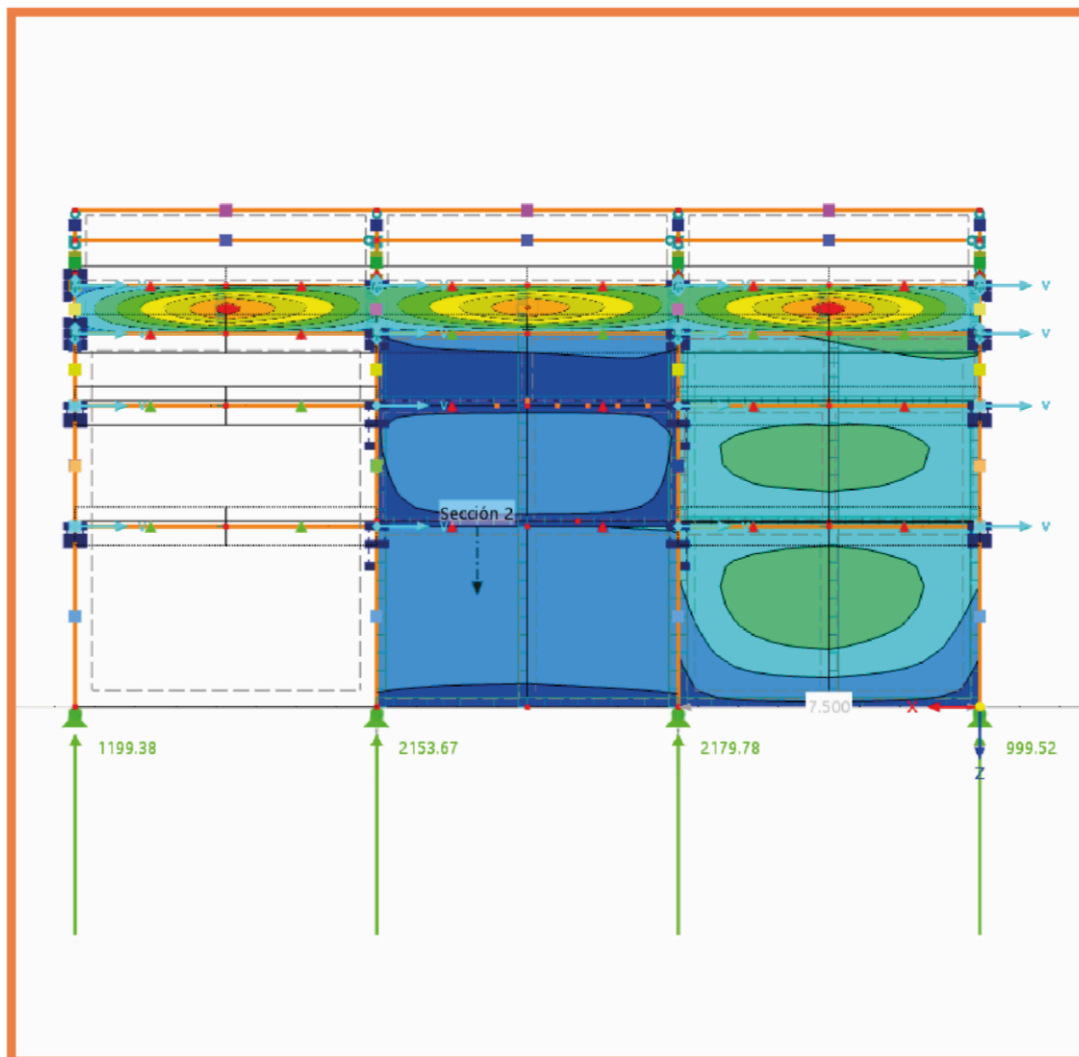
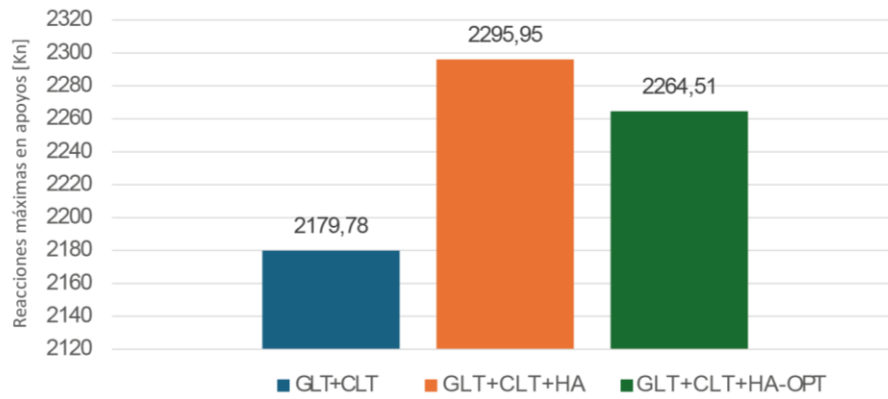
Modo de visibilidad

Análisis estático

Desplazamientos |u|

|Nudos | Esfuerzos de reacción globales Pz [Kn]

Reacciones en Apoyos



5.5 Valoración económica.

En las fichas que se presentan a continuación se analiza la repercusión económica asociada a los dos sistemas estructurales estudiados, con el objetivo de evaluar el impacto económico del cambio de una solución estructural basada en CLT a una solución mixta CLT-hormigón armado. A través de este análisis se pretende cuantificar, de manera aproximada, el coste relativo que supone cada sistema en el contexto del proyecto considerado.

Es importante destacar que este estudio se desarrolla exclusivamente en un ámbito académico, aplicado a un modelo digital de edificio y bajo unas premisas iniciales de igualdad en los costes generales. El análisis se limita únicamente a la repercusión económica de las estructuras horizontales e inclinadas —forjados y cubiertas—, con el objetivo de estimar y comparar costes de forma homogénea entre los distintos modelos estructurales. En ningún caso los resultados obtenidos deben tomarse como referencia directa para un proyecto profesional, ya que tanto el coste de los materiales, sujeto a la variabilidad del mercado, como las soluciones constructivas adoptadas, dependen de factores externos como el lugar y el momento de ejecución del proyecto.

Para la comparación se han estimado los costes unitarios del CLT, del hormigón y de la armadura, aplicados a las superficies y volúmenes resultantes de cada modelo, con el fin de analizar la repercusión económica relativa de cada sistema estructural en condiciones equivalentes.

MODELO 01

Uso Residencial

5x5m

Modo de visibilidad

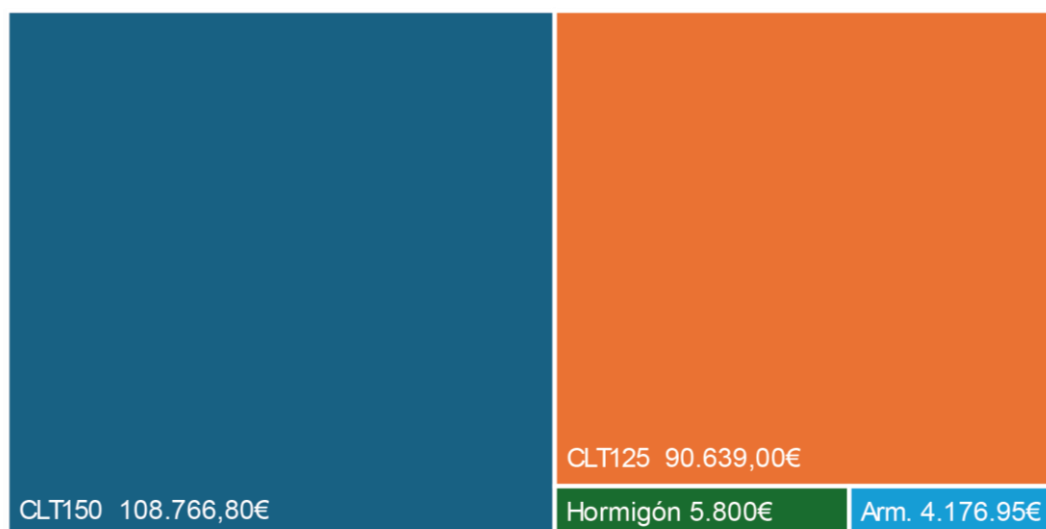
Análisis Económico

Coste aproximado |€|

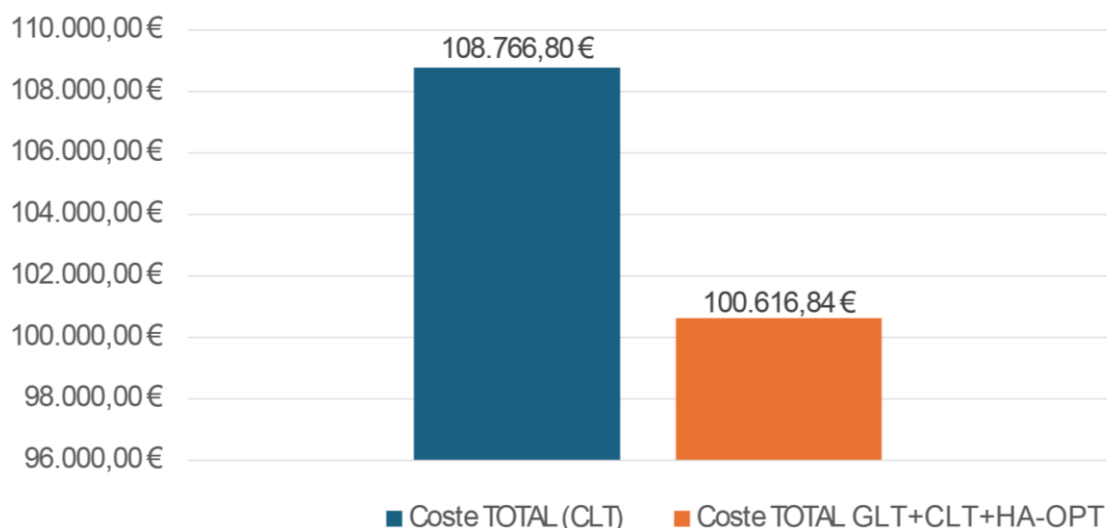
| CLT: 1200 €/m³ | Hormigón: 160 €/m³ | Armadura: 1,25 €/kg

Coste de estructura por materiales (Forjado+Cubierta)

■ CLT150 ■ CLT125 ■ Hormigón ■ Armadura



Coste de estructura (Forjado+Cubierta)



Ahorro: 7%

MODELO 02

Uso Comercial

7.5x7.5m

Modo de visibilidad

Análisis Económico

Coste aproximado |€|

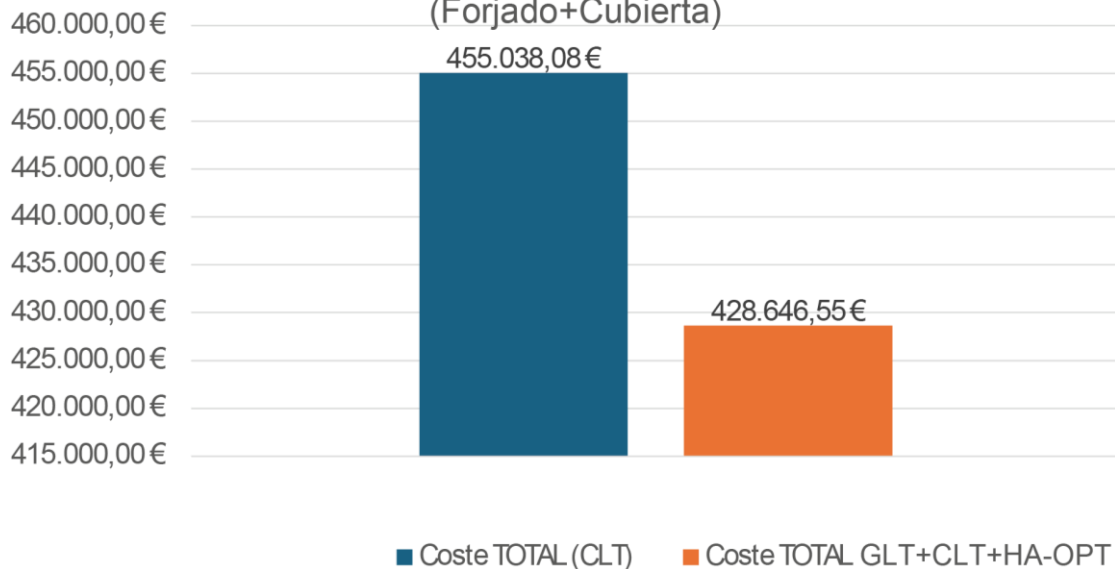
| CLT: 1200 €/m³ | Hormigón: 160 €/m³ | Armadura: 1,25 €/kg

Coste de estructura por materiales (Forjado+Cubierta)

■ CLT280 ■ CLT250 ■ Hormigón ■ Armadura



Coste de estructura (Forjado+Cubierta)



Ahorro: 6%

6 – DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

6.1. Interpretación general de los resultados.

El presente Trabajo Fin de Máster se ha desarrollado un estudio comparativo entre forjados de CLT y sistemas mixtos CLT–hormigón, aplicado a un edificio tipo y basado en una modelización coherente mediante el Método de los Elementos Finitos, apoyada en los criterios y recomendaciones de la bibliografía especializada y la normativa vigente.

A partir del análisis realizado, puede concluirse que los sistemas mixtos CLT–hormigón, correctamente diseñados y modelizados, constituyen una solución estructural eficiente, especialmente adecuada para resolver las limitaciones habituales de los forjados de CLT en términos de deformación y vibración. La incorporación de una capa de compresión de hormigón, combinada con una conexión rígida y dúctil mediante entalladuras y tirafondos, permite mejorar el comportamiento estructural global y optimizar la sección de madera. El trabajo demuestra, además, la importancia de emplear herramientas de cálculo avanzadas, como los modelos FEM, para representar de forma adecuada el comportamiento de sistemas mixtos con conexiones rígidas, complementando los métodos analíticos simplificados. Esta aproximación resulta especialmente relevante en estudios comparativos, donde la coherencia metodológica es clave para la interpretación de resultados.

Finalmente, el estudio pone de manifiesto que la elección de un sistema estructural no debe basarse únicamente en criterios resistentes, sino que debe considerar de forma integrada aspectos como la rigidez, el comportamiento dinámico, la optimización de material y la repercusión global en la estructura del edificio. En este sentido, el presente TFM aporta una base de datos, con la que puedo guiarme para futuros desarrollos en el ámbito de las estructuras mixtas madera–hormigón.

6.2. Ventajas y limitaciones de cada sistema.

Modelo 1:

Los diferentes análisis desarrollados a lo largo del TFM ponen de manifiesto las ventajas estructurales del sistema mixto CLT-hormigón frente al sistema resuelto únicamente con CLT. En primer lugar, se observa una reducción significativa de las deformaciones verticales, con descensos en el eje Z del orden del 25 %, cuando se comparan ambas soluciones utilizando las mismas secciones de CLT. Este resultado confirma el incremento de rigidez asociado a la colaboración estructural entre la madera y la capa de compresión de hormigón. El análisis global del edificio permite, además, constatar que el aumento de rigidez del forjado, y en consecuencia de su comportamiento como diafragma horizontal, tiene una repercusión directa en la reducción de los desplazamientos horizontales. En el Modelo 1 se obtiene una disminución aproximada del 43 % en una de las direcciones principales, coincidente con la dirección de trabajo de la entalladura, lo que permite intuir que, en edificios de dimensiones y cargas similares, la mayor rigidez del sistema mixto puede contribuir de forma favorable al arriostramiento global del edificio. En relación con el análisis dinámico, los resultados muestran que la continuidad del forjado tiene una influencia mayor en el comportamiento vibratorio que el hecho de que el sistema trabaje de forma aislada o como sistema mixto. Para las cargas y geometría adoptadas en este modelo, el primer modo de vibración se mantiene en todos los casos por encima del valor mínimo de 8 Hz, cumpliendo holgadamente los criterios normativos establecidos por el CTE.

Por otra parte, el incremento de masa asociado al sistema mixto conlleva, como era esperable, un aumento de las reacciones transmitidas a la cimentación, que en el caso del Modelo 1 se sitúa en torno al 2 %. Este incremento puede tener una repercusión en el coste global del edificio, si bien su relevancia dependerá de las características específicas de cada proyecto.

Finalmente, desde el punto de vista económico, y bajo las premisas adoptadas en el estudio, el sistema mixto optimizado presenta un ahorro aproximado del 7 % en el coste asociado a las estructuras de forjados y cubiertas. Conviene recordar que estos valores corresponden a estimaciones teóricas y deben interpretarse exclusivamente dentro del marco académico del presente trabajo.

Modelo 2:

En este modelo, en el que se introducen las variaciones de cargas y geometría descritas a lo largo del trabajo, se observan comportamientos diferenciados respecto al Modelo 1. Si bien las reducciones de deformación vertical siguen siendo relevantes, del orden del 40 % para la combinación ELS | cuasi permanente, se constata, que es el Estado Límite Último, gobernado por la flexión y la compresión paralela a la fibra, el que dimensiona el espesor del forjado. En esta situación de proyecto, el sistema mixto permite una reducción de las solicitaciones en torno al 40 %, lo que aporta evidencias claras de que, además de mejorar el comportamiento en servicio, las estructuras mixtas también ofrecen beneficios significativos en términos de resistencia. En el análisis global del edificio se observa igualmente una reducción de los desplazamientos horizontales, aunque en este caso el descenso se sitúa en torno al 33 %, valor inferior al obtenido en el Modelo 1. Esta diferencia sugiere que, para las cargas y geometría del Modelo 2, la esbeltez del sistema estructural adquiere un peso mayor en el comportamiento global, reduciendo la influencia relativa del incremento de rigidez aportado por el diafragma mixto. En cuanto al comportamiento vibratorio, se repite un patrón similar al observado en el Modelo 1. Desde el inicio del análisis se cumplen los requisitos normativos, si bien de forma algo más ajustada. Nuevamente, se constata que la continuidad del forjado tiene una mayor influencia que la tipología estructural adoptada, ya que las cargas muertas y los pesos propios confieren en ambos casos la masa necesaria para mantener las vibraciones dentro de los límites exigidos por la normativa. El análisis de las reacciones en los apoyos muestra, en este modelo, un incremento aproximado del 4 % al comparar el sistema simple con el sistema mixto optimizado. Cabe destacar que el Modelo 2 corresponde a superficies de mayor entidad, por lo que pequeñas variaciones en el peso propio del sistema tienen una repercusión más notable en el comportamiento global del edificio.

Por último, el análisis económico devuelve nuevamente un resultado similar al del Modelo 1, con un ahorro aproximado del 6% para el sistema mixto optimizado. Al igual que en el caso anterior, estos valores deben entenderse como datos orientativos, válidos únicamente en el contexto teórico y comparativo del presente estudio.

Parámetro analizado	MODELO 1	MODELO 2
Reducción deformación vertical (ELS)	≈ 25 %	≈ 40 %
Situación dimensionante	ELS	ELU (flexión y compresión fibra)
Reducción solicitaciones en ELU	—	≈ 40 %
Reducción desplazamientos horizontales	≈ 43 %	≈ 33 %
Cumplimiento vibraciones (Modo 1)	> 8 Hz	> 8 Hz (más ajustado)
Incremento reacciones en apoyos	≈ 2 %	≈ 4 %
Ahorro económico sistema mixto optimizado	≈ 7 %	≈ 7 %

6.3. Reflexiones finales.

A partir del análisis comparativo desarrollado en el presente Trabajo Fin de Máster, así como de la revisión del estado del arte y de los resultados obtenidos mediante la modelización numérica, he llegado a una serie de reflexiones para el diseño estructural de forjados de CLT y sistemas mixtos CLT-hormigón, especialmente en el ámbito de la edificación.

En primer lugar, los resultados ponen de manifiesto que, en forjados de CLT, las verificaciones en Estado Límite de Servicio, particularmente las relativas a deformaciones y vibraciones, suelen resultar determinantes en el dimensionado. En este contexto, la adopción de sistemas mixtos CLT-hormigón se presenta como una solución eficaz para incrementar la rigidez del sistema, reducir las deformaciones verticales y mejorar el comportamiento dinámico, especialmente en edificios con luces medias o exigencias elevadas de confort. En relación con el diseño de la conexión madera-hormigón, se recomienda prestar especial atención a la rigidez y ductilidad del sistema de unión, dado su impacto directo en el comportamiento global del forjado. Las conexiones mediante entalladuras combinadas con tirafondos, correctamente dimensionadas, permiten alcanzar elevados grados de colaboración estructural, garantizando al mismo tiempo un modo de fallo dúctil. La homogeneización geométrica de las entalladuras y su ejecución mediante mecanizado CNC no solo facilitan la calidad y precisión de la conexión, sino que abren la puerta a una producción industrializada, repetitiva y controlada.

Desde una perspectiva más amplia, los sistemas mixtos estudiados permiten plantear un nuevo paradigma en la construcción industrializada, en el que la precisión del mecanizado digital y la estandarización de los detalles constructivos reducen la dependencia de mano de obra altamente especializada en obra. En un contexto en el que el sector de la construcción afronta crecientes dificultades para incorporar personal cualificado, la combinación de diseño estructural avanzado y fabricación mediante CNC constituye una oportunidad para mejorar la productividad, la calidad de ejecución y la trazabilidad del proceso constructivo.

Desde el punto de vista del análisis estructural, los resultados confirman que los métodos analíticos simplificados, como el método y, resultan adecuados para fases iniciales de predimensionado, pero presentan limitaciones cuando se emplean conexiones rígidas y discretas. En estos casos, se recomienda complementar el cálculo con modelos numéricos mediante el Método de los Elementos Finitos, que permiten representar de forma más fiel la disposición real de la conexión, el comportamiento diafragmático del forjado y la interacción entre los distintos materiales. La aplicación de modelos FEM no solo mejora la precisión del cálculo, sino que abre nuevas posibilidades para adaptar el diseño estructural a cada proyecto concreto, incorporando de forma más realista aspectos como la secuencia constructiva, la variación de rigideces o la optimización de secciones. De este modo, la combinación de materiales en sistemas mixtos permite avanzar hacia estructuras más eficientes desde el punto de vista mecánico y coste-efectivo, ajustando los recursos estructurales a las solicitaciones reales.

El estudio pone asimismo de relieve la importancia de considerar el comportamiento global del edificio, y no únicamente el de los forjados de forma aislada. El incremento de rigidez asociado a los sistemas mixtos mejora la actuación del forjado como diafragma horizontal, reduciendo los desplazamientos laterales y contribuyendo al arriostramiento general de la estructura, especialmente en edificios de varias plantas o con geometrías esbeltas.

Finalmente, desde una perspectiva económica y de optimización de recursos, los resultados sugieren que los sistemas mixtos permiten una reducción del volumen de CLT necesario, manteniendo el cumplimiento normativo, lo que puede traducirse en una mejor eficiencia material del sistema estructural. Estas ventajas deben valorarse siempre en el contexto específico de cada proyecto, considerando tanto los condicionantes técnicos como las posibilidades que ofrecen los procesos de diseño digital y fabricación industrializada.

El presente trabajo pone de manifiesto que los sistemas mixtos CLT-hormigón no solo constituyen una solución estructural eficaz, sino que también representan una oportunidad para evolucionar hacia modelos constructivos más industrializados, precisos y adaptados a los retos actuales del sector, apoyándose en el diseño paramétrico, el cálculo avanzado y la fabricación digital.

7. ANEXOS:

En el siguiente apartado se puede encontrar algunos pantallazos que muestran las distintas configuraciones necesarias para poder llevar a cabo el modelado y cálculo desarrollado en este trabajo con la herramienta Dlubal RFEM6.

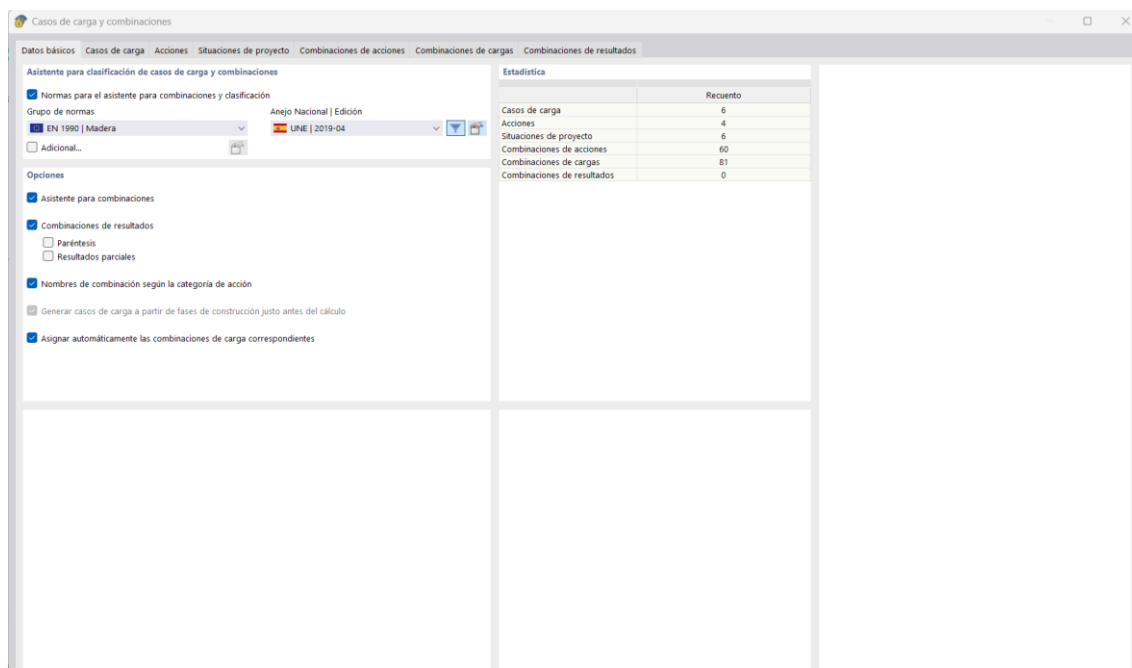


Imagen 14: Datos básicos y normativa utilizada.

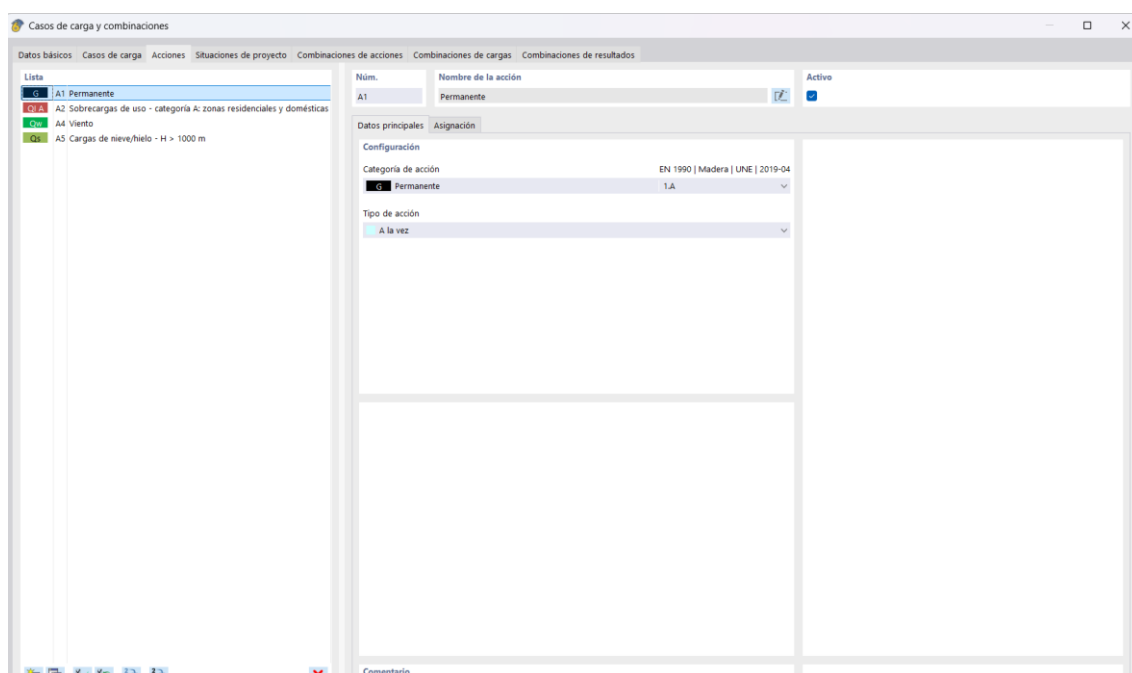


Imagen 15: Acciones.

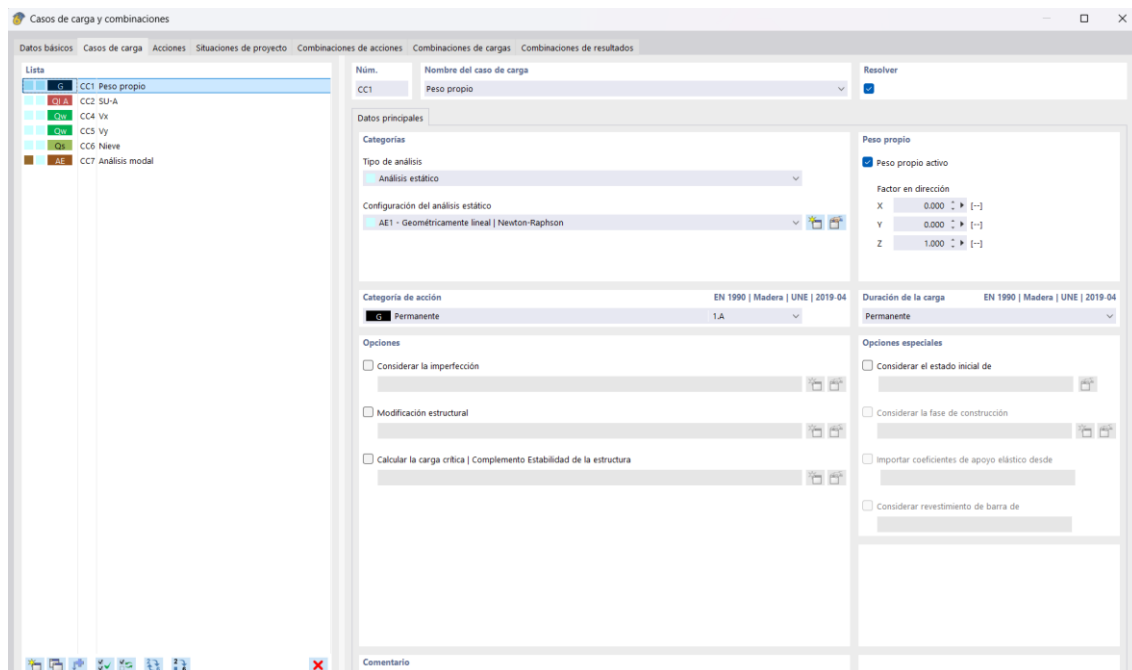


Imagen 16: Casos de carga.

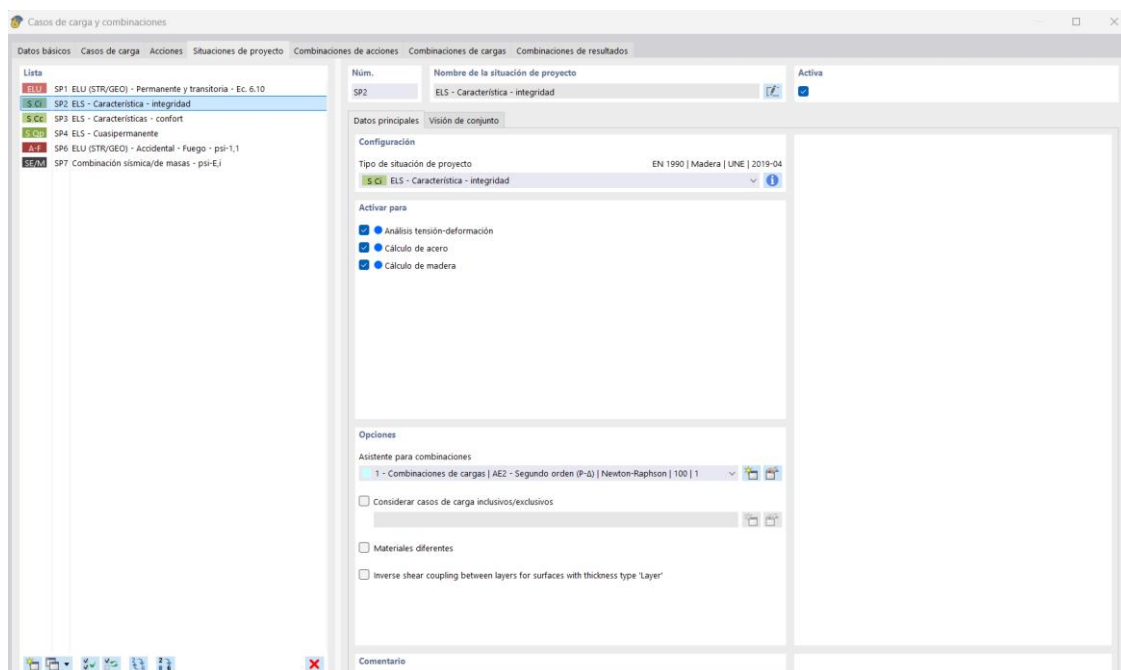


Imagen 17: Situaciones de proyecto.

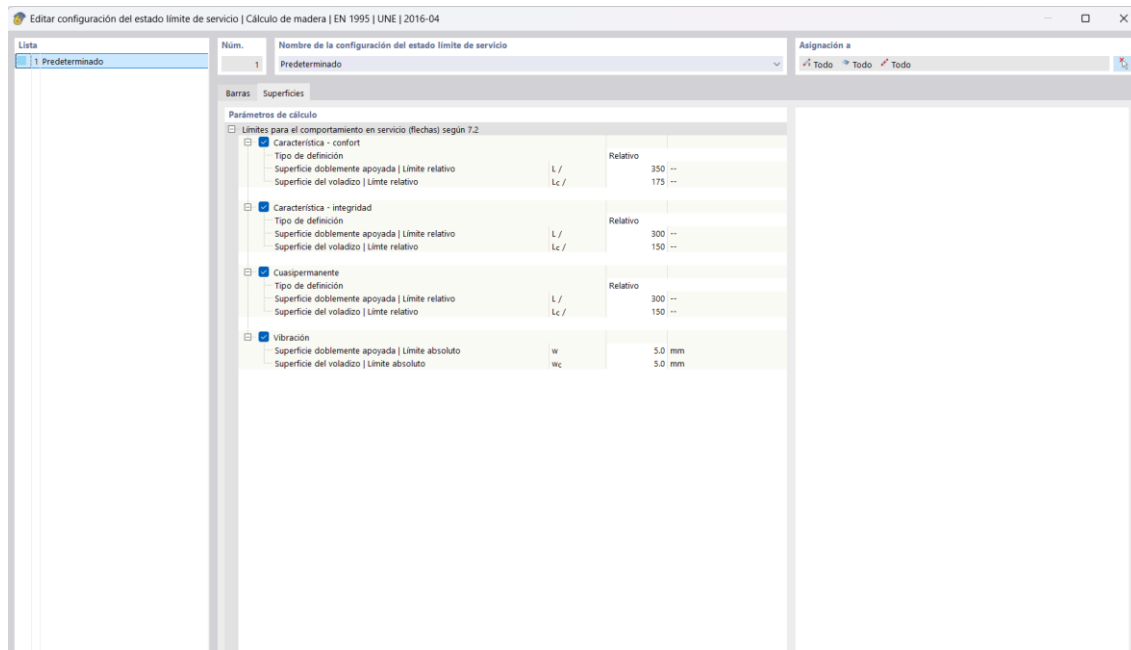


Imagen 18: Configuración del ELS.

Núm.	Nombre	Símbolo (HTML)	Grupo de unidades	Tipo de definición	Valor	Unidad	Fórmula	Min.	Máx.	Incremento	Pasos	Comentario
1	altura_pb	alturapb	Longitudes	Valor	-4.500	m						Altura Planta baja
2	altura_pt	alturapt	Longitudes	Valor	-5.000	m						Altura plantas tipo
3	luz_x	luzx	Longitudes	Valor	5.000	m						luz entre ejes x
4	luz_y	luzy	Longitudes	Valor	5.000	m						luz entre ejes y
5	espesor_clt	espesorclt	Espesores	Valor	120.0	mm						Espesor CLT
6	Peso_pavimentos	Peso_pavimentos	Cargas superficiales	Valor	0.00	kN/m²						Cargas Muertas
7	pilar_sec_h	pilarsec_h	Dimensiones	Valor	250.0	mm						Pilar_sección_h
8	pilar_sec_b	pilarsec_b	Dimensiones	Valor	250.0	mm						Pilar_sección_b
9	long_pilar_pb	long_pilar_pb	Dimensiones	Fórmula	-4300.0	mm	altura_pb					Viga_sección_b
10	viga_sec_b	viga_sec_b	Dimensiones	Valor	200.0	mm						Viga_sección_b
11	viga_sec_h	viga_sec_h	Dimensiones	Valor	400.0	mm						Viga_sección_h
12	altura_cercha	altura_cercha	Longitudes	Fórmula	-1.250	m	luz_y/4*-1					Altura pendolón
13	Nodo_c	Nodo_c	Adimensional	Valor	60.00	%						Nodo_tornapuntas
14	Carga_cubierta_int	Carga_cubierta_int	Masas	Fórmula	1.500	t/m	luz_x*CC1_detalle_cubierta					
15	CC1_detalle_cubierta	CC1_detalle_cubierta	Masa del área	Valor	0.300	t/m²						
16	CC1_seccion_forjado	CC1_seccion_forjado	Masa del área	Valor	0.150	t/m²						
17	Carga_forjado_int	Carga_forjado_int	Masas	Fórmula	0.750	t/m	luz_x*CC1_seccion_forjado					
18	Carga_forjado_ext	Carga_forjado_ext	Masas	Fórmula	0.375	t/m	CC1_seccion_forjado*luz_x*0.5					
19	Carga_cubierta_ext	Carga_cubierta_ext	Masa del área	Fórmula	0.750	t/m²	luz_x*CC1_detalle_cubierta*0.5					
20	Carga_nieve	Carga_nieve	Masa del área	Valor	0.100	t/m²						
21	Carga_fachada	Carga_fachada	Fuerza por unidad de lo...	Valor	7.000	kN/m						
22	Long_ref_Flecha	Long_ref_Flecha	Longitudes	Fórmula	7.071	m	sqrt(luz_x*luz_y+luz_y*luz_y)					
23												

Imagen 19: Datos paramétricos del modelo.

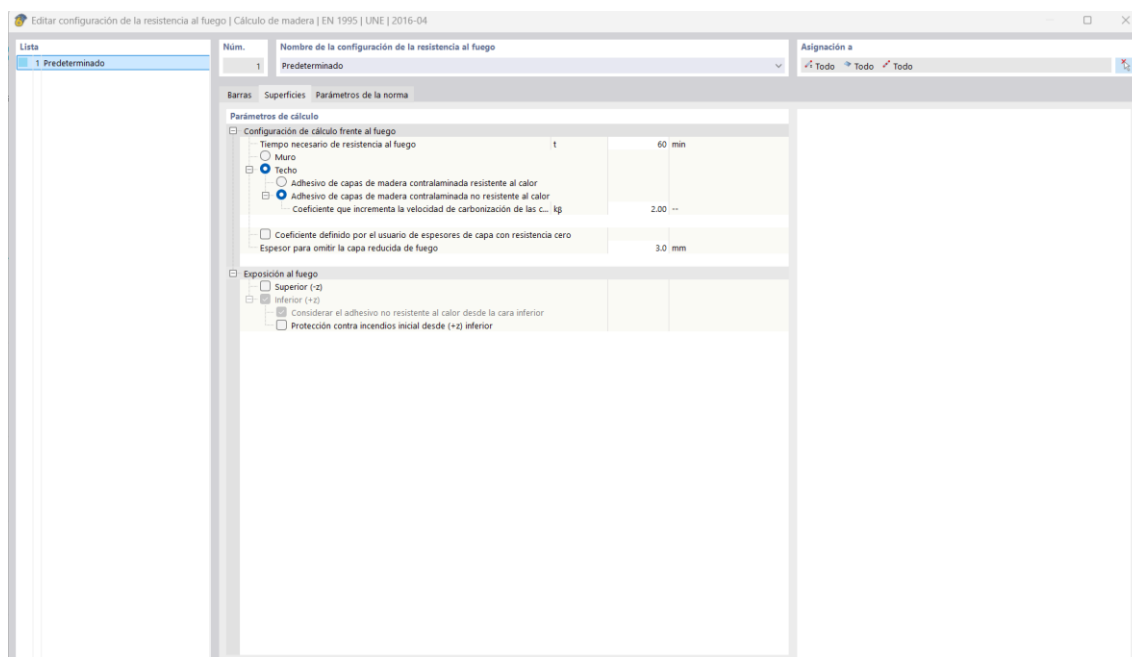


Imagen 20: Configuración de la resistencia a fuego.

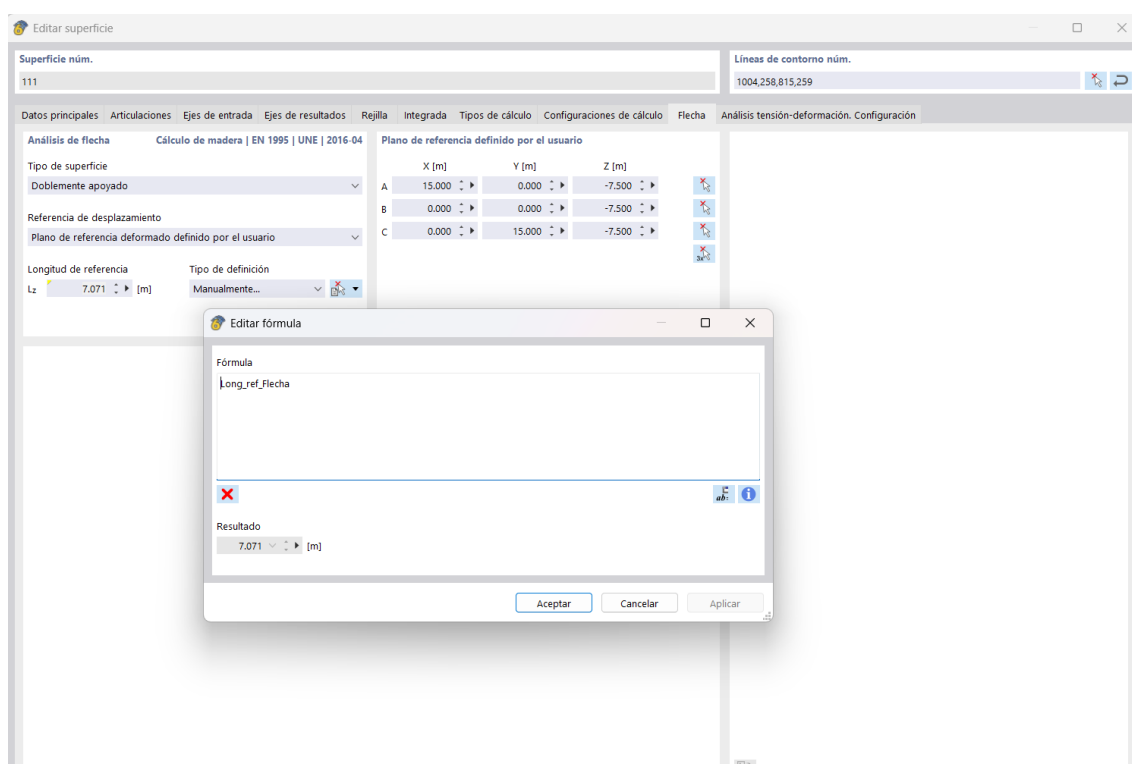


Imagen 21: Configuración de la longitud de referencia para el cálculo de flecha en ELS.

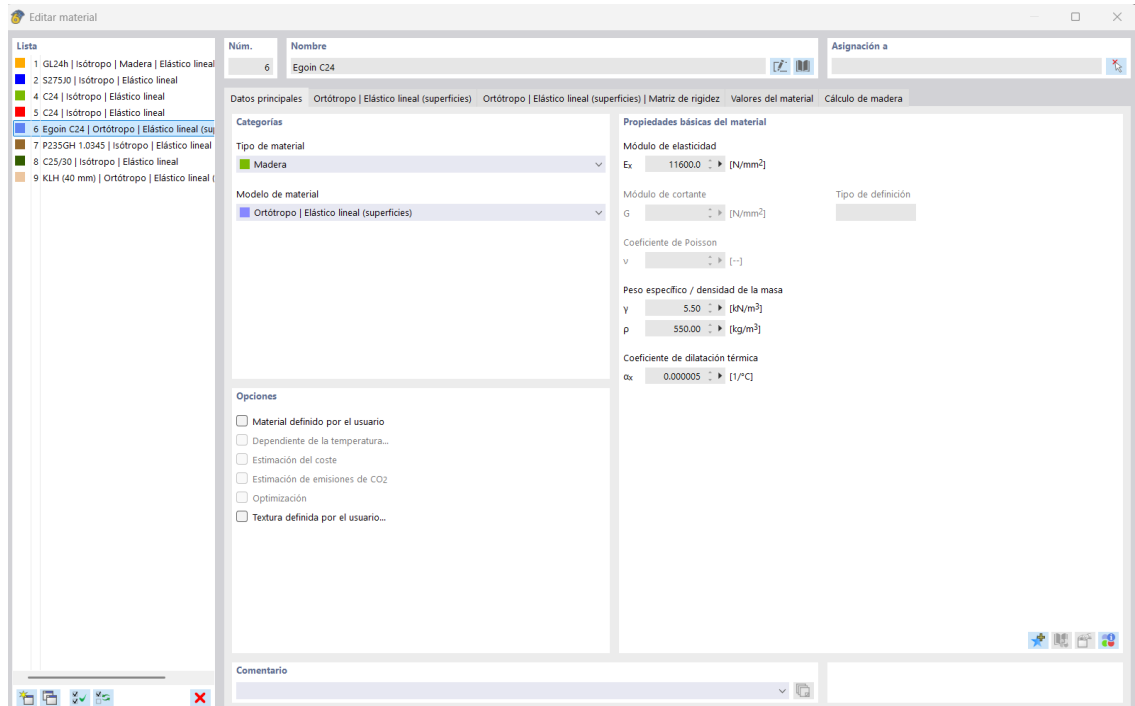


Imagen 22: Edición de materiales.

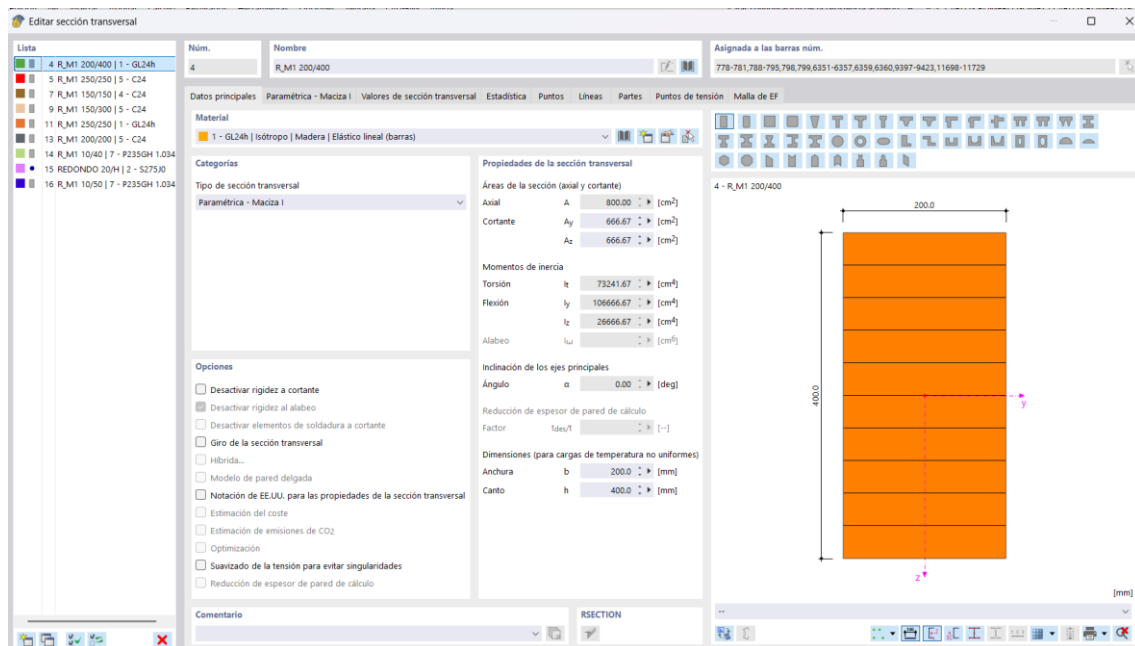


Imagen 23: Edición de secciones de barras.

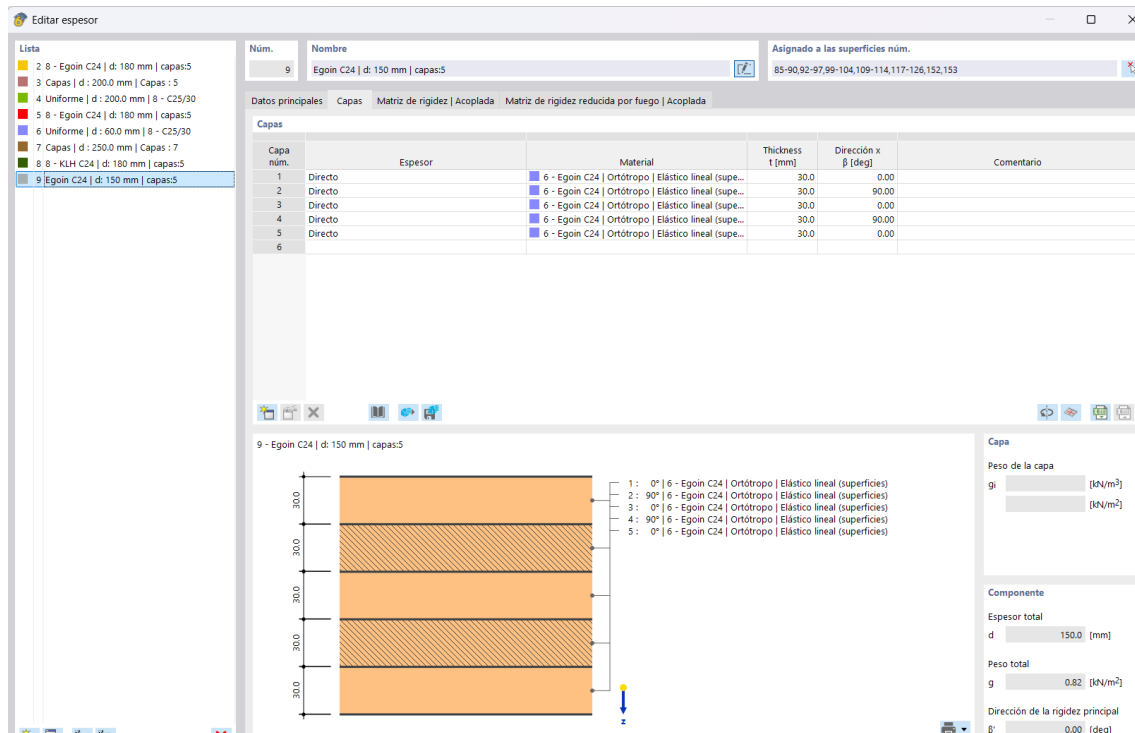


Imagen 24: Edición de espesores de paneles CLT.

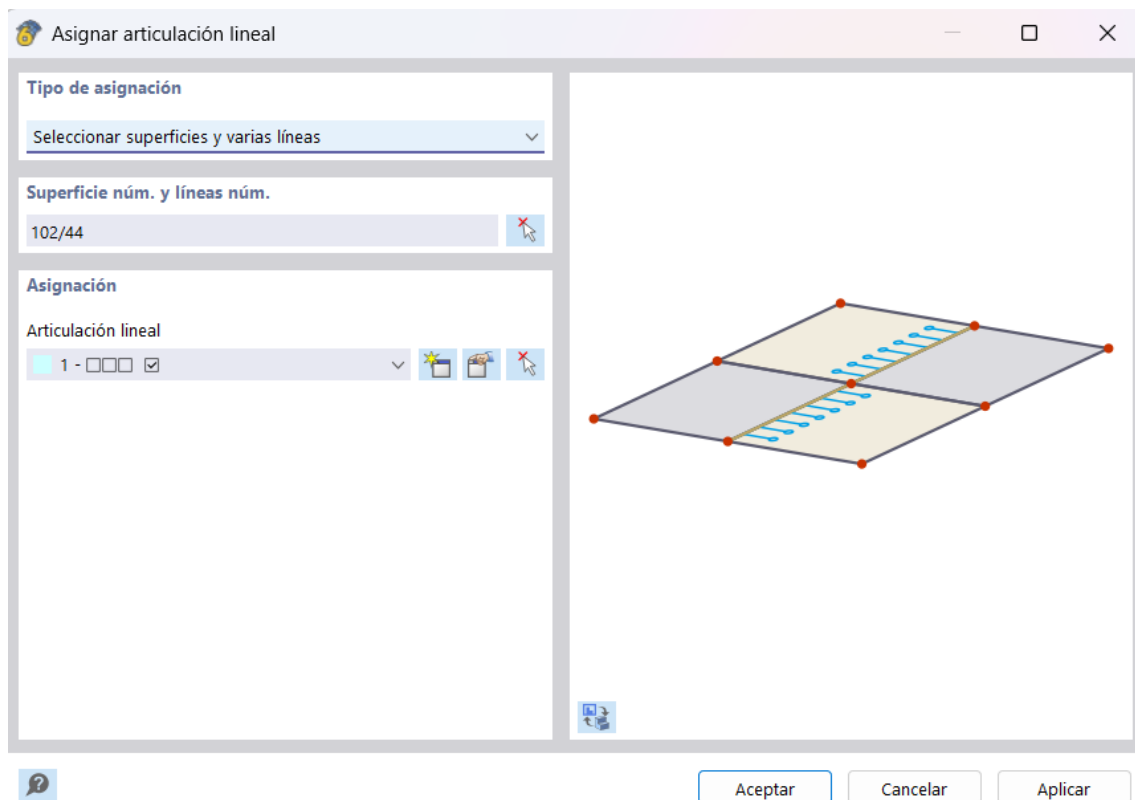


Imagen 25: Articulación lineal entre paneles de CLT.

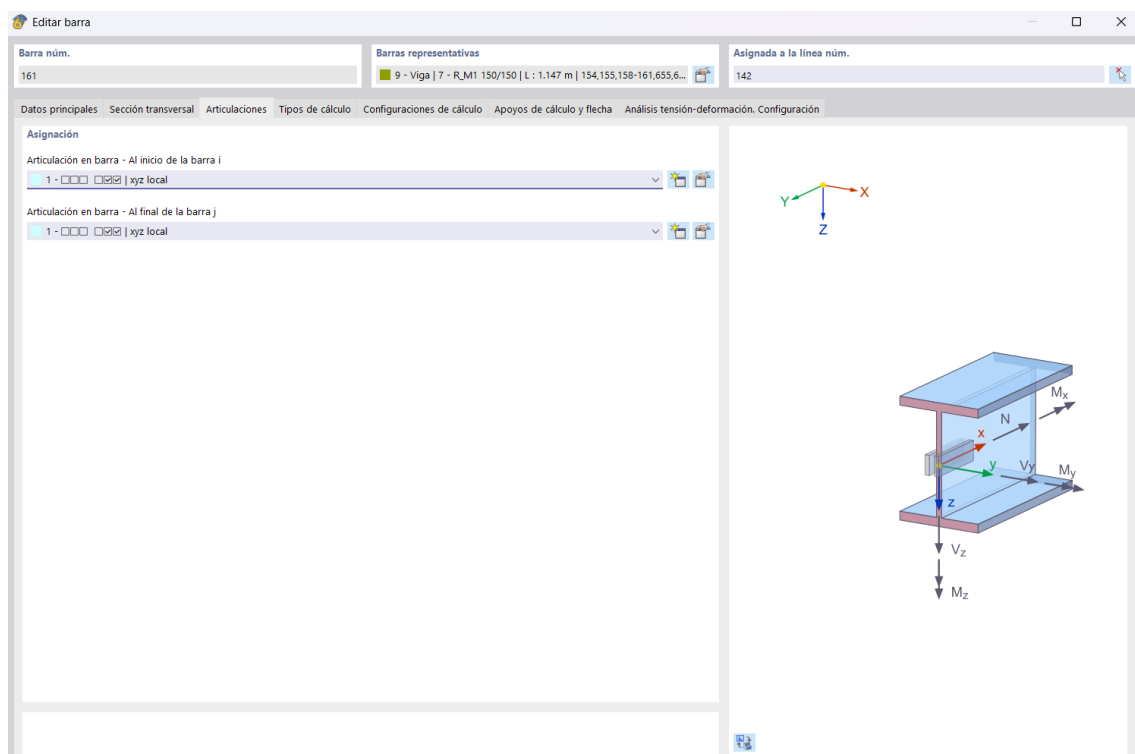


Imagen 26: Articulación entre barras para madera.

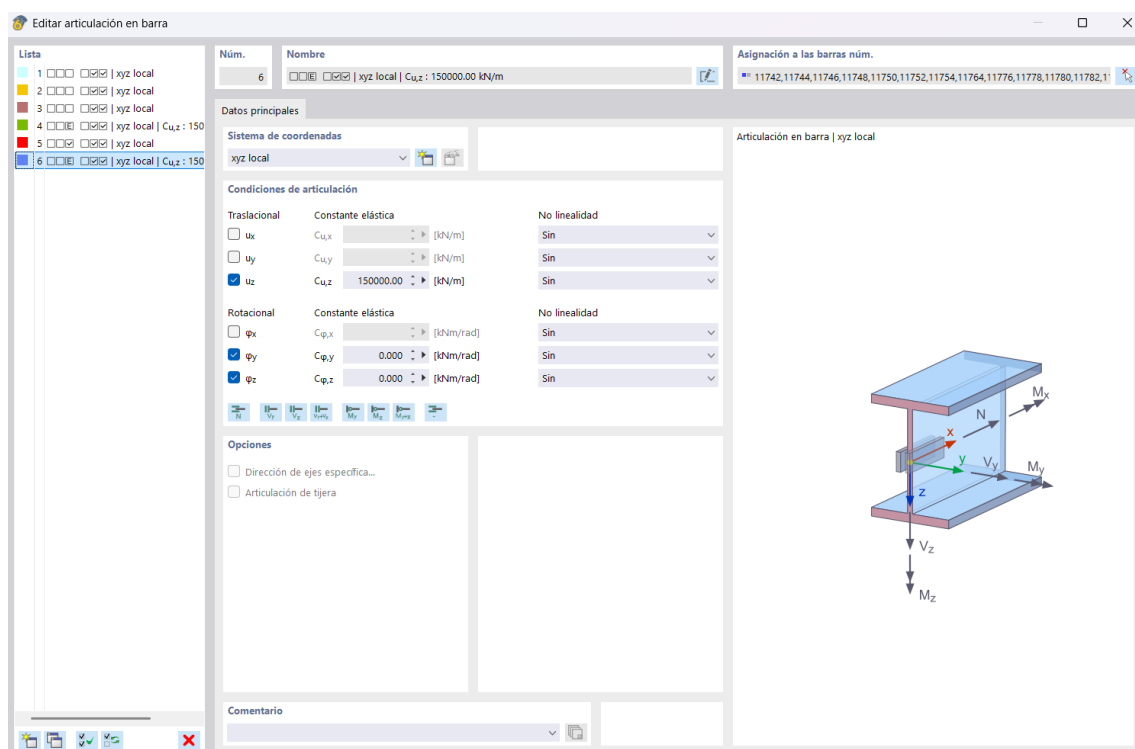


Imagen 27: Articulación de barras unión de entalladura TCC.

8. BIBLIOGRAFÍA

Ceccotti, A. (2002). Composite concrete–timber structures. *Structural Engineering International*, 12(4), 264–269.

Cuerrier-Auclair, S. (2020). Design guide for timber–concrete composite floors in Canada. FPIInnovations.

Dias, A. M. P. (2005). Mechanical behaviour of timber–concrete joints (Doctoral dissertation). University of Coimbra.

Dias, A. M. P., Schänzlin, J., & Dietsch, P. (2018). Design of timber–concrete composite structures. COST Action FP1402, European Cooperation in Science and Technology.

Fernández-Cabo, J. L., Arriaga, F., Esteban, M., & Basterra, L. A. (2011). Timber composite beams with a discrete connection system. *Construction and Building Materials*, 25(1), 145–154.

Gelfi, P., Giuriani, E., & Marini, A. (2002). Stud shear connection design for composite concrete slab and wood beams. *Journal of Structural Engineering*, 128(12), 1544–1550.

Grosse, C., & Rautenstrauch, K. (2004). Finite element modelling of timber–concrete composite structures. In *Proceedings of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction (CIB)*.

Lorenzana, J. (2025). Vigas mixtas [TCC] Timber–Concrete Composite – Concepto. PEMADE, Universidade de Santiago de Compostela. Proyecto LIFE20 CCM/ES/001656.

Lorenzana, J. (2025). Vigas mixtas 2 – Conexiones. PEMADE, Universidade de Santiago de Compostela. Proyecto LIFE20 CCM/ES/001656.

Lorenzana, J. (2025). Vigas mixtas 3. PEMADE, Universidade de Santiago de Compostela. Proyecto LIFE20 CCM/ES/001656.

Mai, C., Schänzlin, J., & Lam, F. (2007). Prediction of bending performance for a separable CLT–concrete composite floor. *Engineering Structures*, 29(11), 2986–2995.

Marchi, L., Scotta, R., & Pozza, L. (2017). Experimental and theoretical evaluation of timber–concrete composite connections with inclined self-tapping screws. *Engineering Structures*, 137, 1–13.

Michelfelder, J. (2006). Zum Tragverhalten von Holz–Beton–Verbunddecken mit gekerbten Verbindungen (Doctoral dissertation). Universität Stuttgart.

Niederer, R. (2008). Zum Tragverhalten von Holz–Beton–Verbundtragwerken mit steifen Verbundmitteln (Doctoral dissertation). ETH Zürich.

Rautenstrauch, K. (2004). Strut-and-tie models for timber–concrete composite structures. Swiss Federal Institute of Technology (ETH).

Sandhaas, C., Munch-Andersen, J., & Dietsch, P. (2018). Design of connections in timber structures. COST Action FP1402.

Schänzlin, J. (2003). Zum Tragverhalten von Holz–Beton–Verbunddecken (Doctoral dissertation). Universität Karlsruhe.

Tomasi, R., Crosatti, A., & Piazza, M. (2010). Theoretical and experimental analysis of timber-to-timber joints connected with inclined screws. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1560–1571.

9. NORMATIVA Y DOCUMENTOS TÉCNICOS

CEN. (2004). EN 1995-1-1: Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.

CEN. (2021). CEN/TS 19103:2021 – Eurocode 5: Design of timber structures – Structural design of timber-concrete composite structures – Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization.

Código Técnico de la Edificación

UNE-EN 1995-1-1:2016 – Eurocódigo 5 Parte 1-1: Diseño de estructuras de madera – Reglas generales y reglas para edificación.

UNE-EN 1995-1-2:2016 – Parte 1-2: Diseño estructural frente al fuego.

UNE-EN 1995-2:2016 – Parte 2: Puentes en estructuras de madera (aplicable puntualmente en cuestiones de cargas móviles o disposiciones constructivas).

UNE-EN 14080: Madera laminada encolada (GLT).

UNE-EN 16351: CLT – Madera contralaminada.

Mila esker zure arretagatik !

Enero 2026