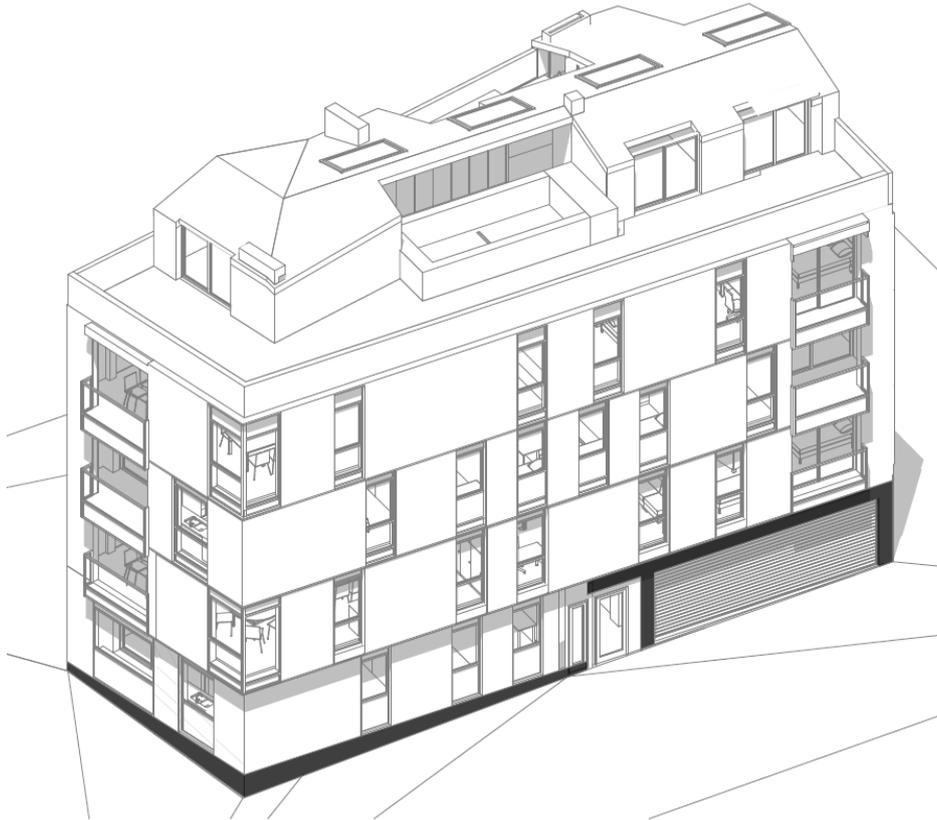


TRABAJO FIN DE MASTER

ESTUDIO DE ALTERNATIVA ESTRUCTURAL EN MADERA A UN EDIFICIO EJECUTADO CON SISTEMAS TRADICIONALES



Reseña: A través de este trabajo se analiza el proceso de diseño estructural y sus posibles repercusiones utilizando sistemas basados en madera sobre un proyecto real de un edificio residencial ejecutado con sistemas tradicionales (estructura porticada de hormigón armado con forjados reticulares y cerramientos de fábrica cerámica).

Abstrac: *Through this work, the structural design process and its possible repercussions are analyzed using wood-based systems on a real project of a residential building executed with traditional systems (reinforced concrete arcaded structure with reticular floors and ceramic factory closings).*

Autor: Oscar Sigüenza Sabater

Tutor: Iñaki del Prim

Julio de 2020



ÍNDICE

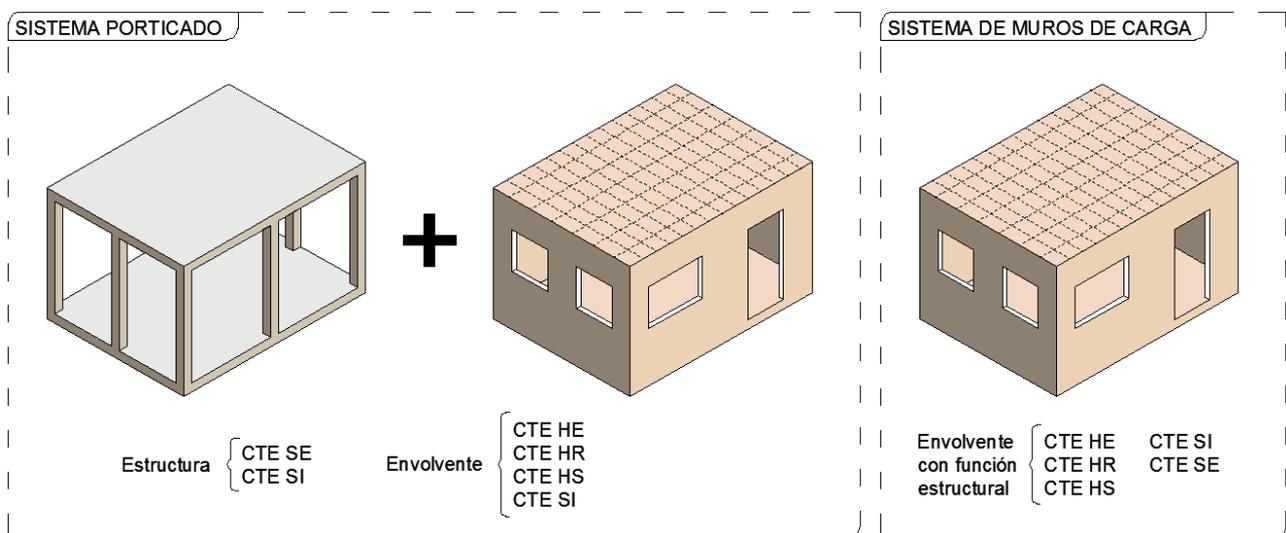
1	INTRODUCCIÓN.....	2
2	PALABRAS CLAVE	2
3	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO ORIGINAL.....	3
3.1	ARQUITECTURA.....	4
3.2	ESTRUCTURA.....	9
3.3	CONSTRUCCIÓN	20
4	REDEFINICIÓN DEL EDIFICIO CON SISTEMAS DE MADERA.....	23
5	MATERIALIDAD	30
5.1	PANELES DE CLT	30
5.2	MADERA LAMINADA.....	30
5.3	CLASE DE USO PARA MADERA	30
5.4	ACERO	31
6	APLICACIÓN DE NORMATIVA	32
6.1	CTE DB-HE	32
6.2	CTE DB-HR.....	32
6.3	CTE DB-HS	34
6.4	CTE DB-SI.....	34
6.5	CTE DB-SE.....	40
7	DIMENSIONADO ESTRUCTURAL.....	42
7.1	DESCENSO DE CARGAS	43
7.2	CONSIDERACIONES PREVIAS.....	52
7.3	PREDIMENSIONADO MEDIANTE PRONTUARIOS DE FABRICANTES; PROTECCIÓN AL FUEGO.....	56
7.4	DIMENSIONADO DE ELEMENTOS SENCILLOS	58
7.5	DIMENSIONADO DEL EDIFICIO COMPLETO	62
7.8	OTRAS COMPROBACIONES: PROTECCIÓN AL FUEGO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	69
8	DIMENSIONADO TERMOACÚSTICO DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.....	72
8.1	DIMENSIONADO SEGÚN PROTECCIÓN ACÚSTICA.....	72
8.2	DIMENSIONADO SEGÚN TRANSMITANCIA.....	74
8.3	COMPROBACIÓN DE LAS CONDICIONES HIGROTÉRMICAS DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.....	80
9	CONCLUSIONES.....	81
10	BIBLIOGRAFÍA.....	82
11	ANEXOS.....	82

1 INTRODUCCIÓN

Mediante este trabajo se busca proponer una alternativa basada en madera a un proyecto real de un edificio ejecutado con sistemas tradicionales de estructuras y envolvente, para entender, por el camino trazado, cómo puede influir al proceso de diseño en un caso real.

El sistema estructural, al igual que otros sistemas, puede tener un peso muy importante en las decisiones de un proyecto arquitectónico. Un cambio de forjado unidireccional a uno reticular puede suponer una distribución más libre al permitir mayores luces, pero al mismo tiempo puede hacer que el proyecto se vuelva inviable económicamente. Del mismo modo, al plantear una posible alternativa en sistemas estructurales basados en madera, se espera conocer que cambios puede ocasionar al proyecto.

Dado que algunos de estos nuevos sistemas basados en madera pueden ejercer a la vez la función de sistema estructural y envolvente o divisoria, las repercusiones pueden ser mucho mayores que en otros casos ya que implica un cambio de concepto estructural y constructivo radical frente a la opción usada en el proyecto real.



Una vez se haya planteado y resuelto la solución estructural basada en madera que mejor encaje con las circunstancias del proyecto arquitectónico (intentando modificarlo lo menos posible) se podrá analizar cómo repercute en otros sistemas del edificio.

Por su desarrollo, este trabajo comprende, en mayor o menor grado y al mismo tiempo, las siguientes tipologías de ejercicio propuestas para el TFM:

- A) Ejercicio de diseño y proyecto
- B) Ejercicios de investigación
 - a. Edificios en altura en madera
 - b. Combinación de sistemas estructurales de madera.
 - c. Madera versus hormigón y/o acero
 - d. Criterios de sostenibilidad en el diseño de elementos constructivos o estructurales en madera.

Se trata, por tanto, de un trabajo híbrido entre ejercicios de investigación y de diseño y proyecto.

2 PALABRAS CLAVE

Estructuras mixtas, CLT, madera laminada, acero, método de elementos finitos.

Mixed structures, cross laminated timber, glulam, steel, finite elements method.

3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO ORIGINAL

Como idea inicial, se propone estudiar un edificio plurifamiliar en altura de tipo medio (2 o 3 viviendas por plantas de aprox. 80m², de PB+2 a PB+5). Para ello se presenta como posible caso de estudio un edificio ejecutado en 2017 en la localidad de Terrassa, Barcelona, sobre una parcela trapezoidal que hace esquina entre las calles Emili Badiella y Mossen Pursals.



Este edificio dispone de PB+4, con garaje robotizado y vivienda en planta baja, y dos viviendas en las demás. La vivienda de planta 3 es de tipo dúplex, ocupando también la cuarta planta, que se encuentra retranqueada respecto de las fachadas.

Dado que se trata de un edificio con garaje robotizado en planta baja y que esto implica situar un forjado de techo para dicha planta con REI180, como se explicará más adelante, por simplificación, el alcance de este trabajo será el

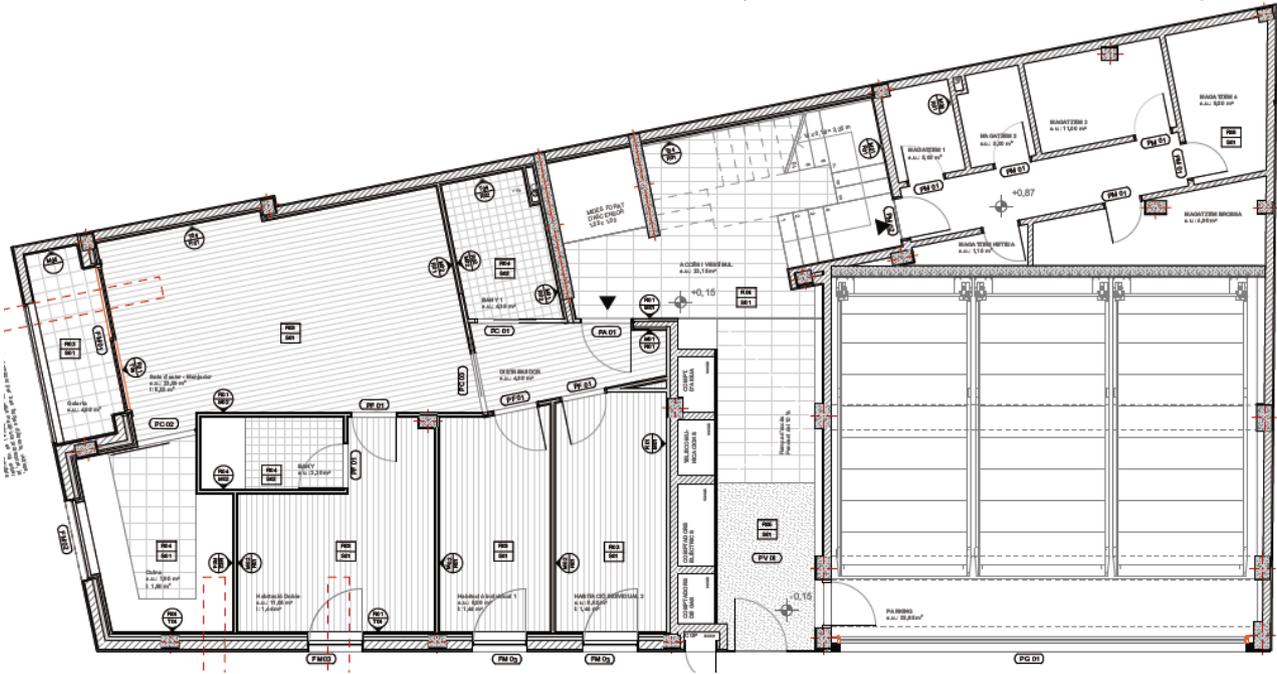
estudio de la estructura de planta primera a planta ático, si bien resulta conveniente conocer que sucede debajo para poder tomar decisiones lo menos traumáticas posibles para el proyecto arquitectónico.

3.1 ARQUITECTURA.

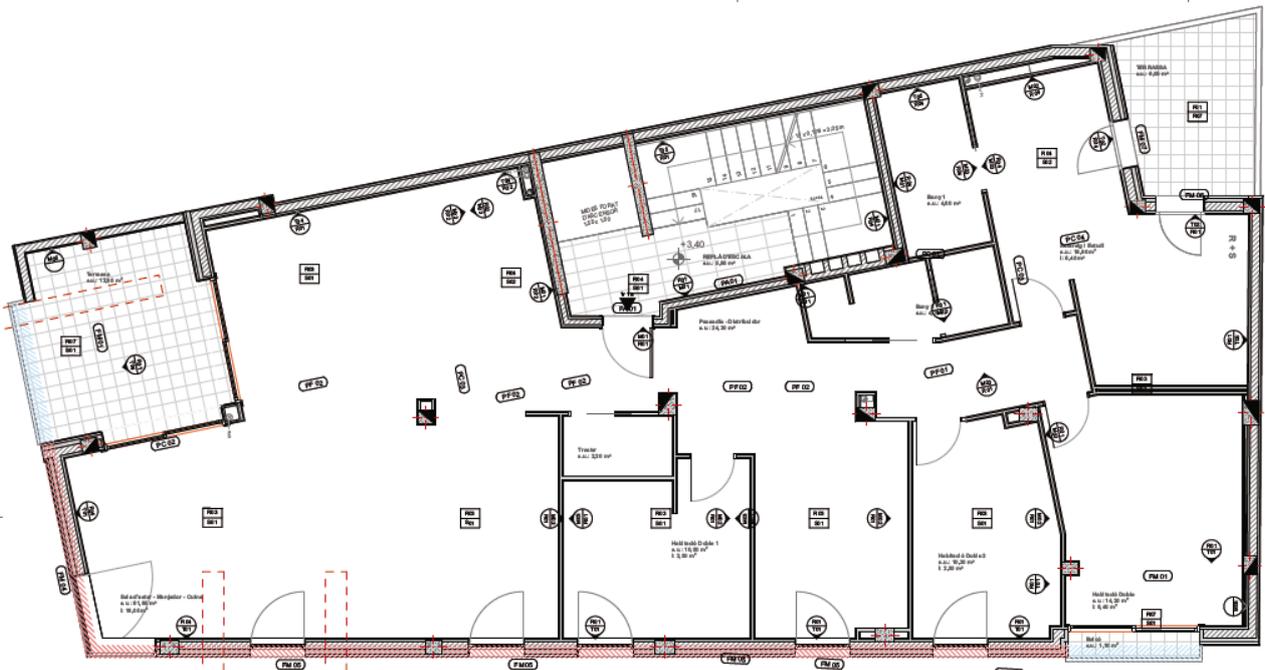
Los planos arquitectónicos originales se encuentran en el Anexo I de este trabajo.

A nivel arquitectónico se dispone de las siguientes distribuciones de planta, alzados y secciones:

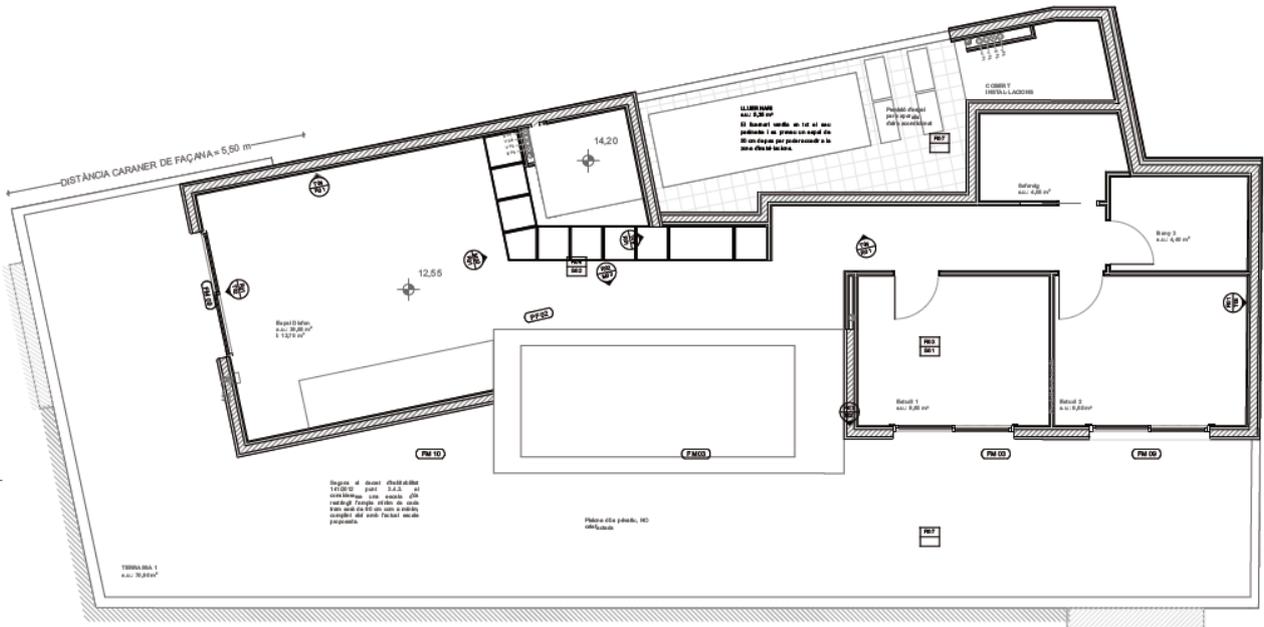
Planta baja:



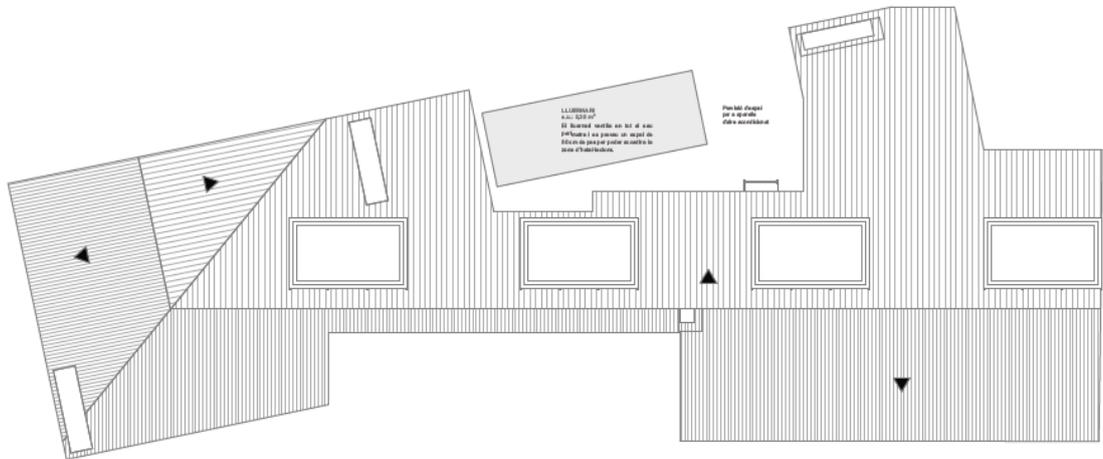
Planta primera:



Planta ático:



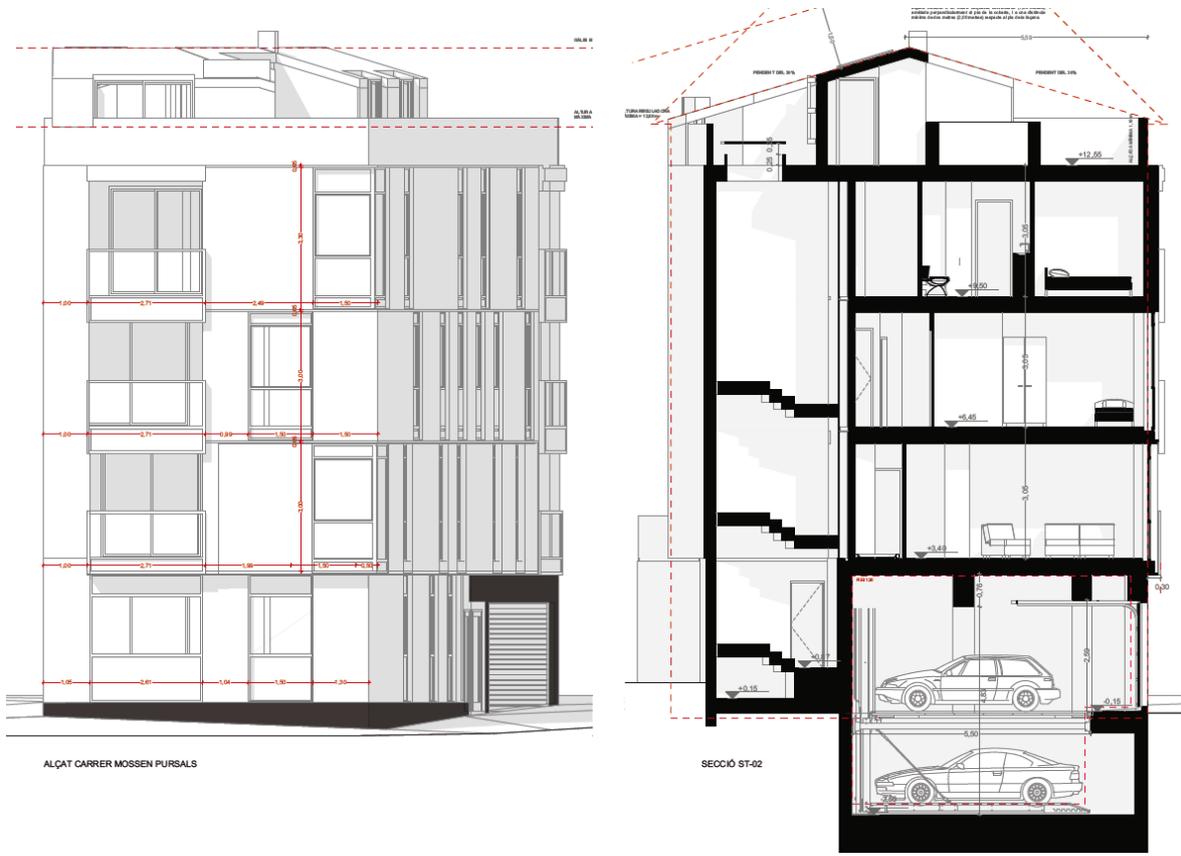
Cubierta:



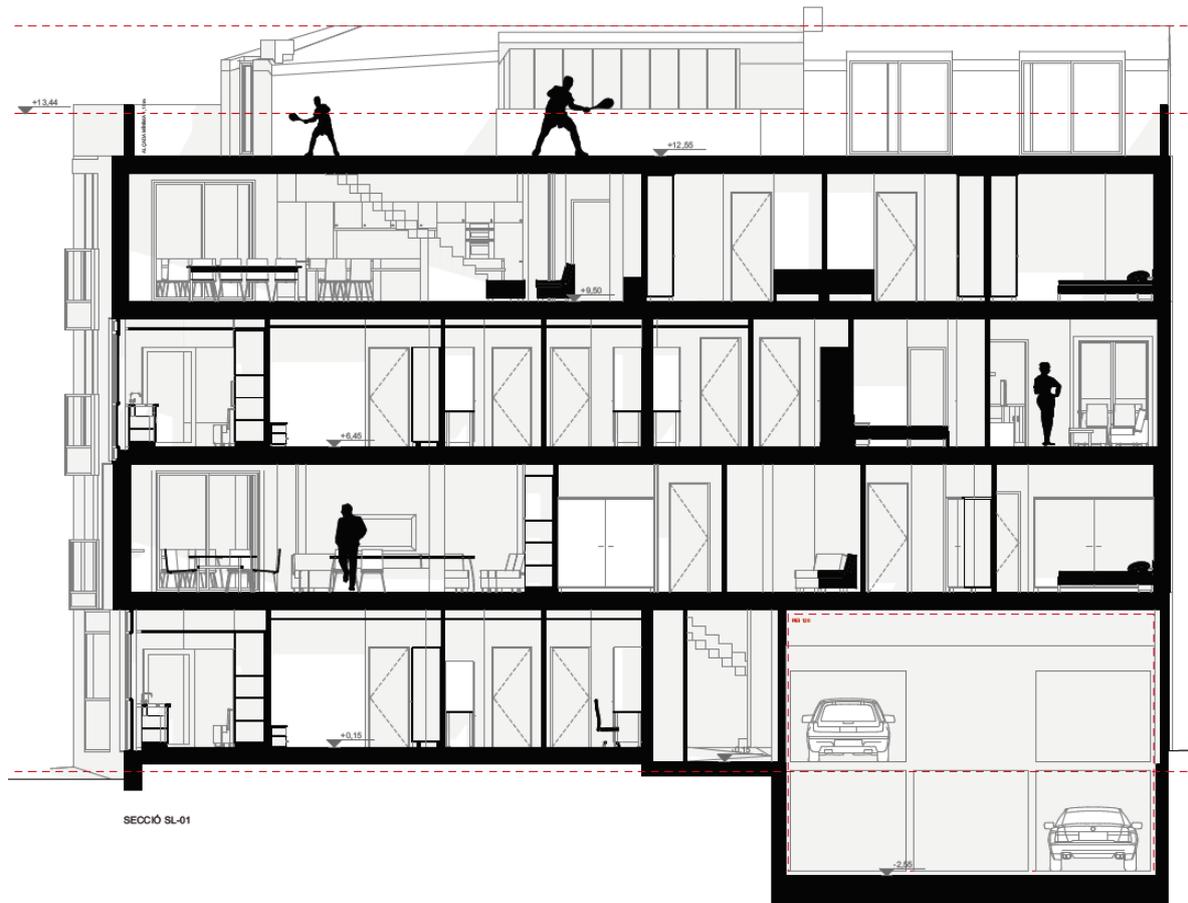
Alzado principal:



Alzado secundario/sección transversal:



Sección longitudinal:



Como se puede observar en estos planos, se tiene un edificio con los siguientes condicionantes arquitectónicos:

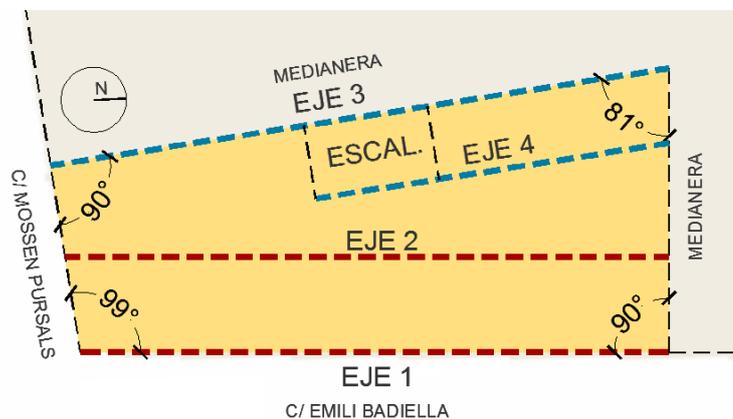
- La distribución no es coincidente entre plantas.
- Existen elementos puntuales en algunas viviendas que no se replican en otras.
- Los huecos en fachada no siguen un orden lineal, con lo que puntualmente hay zonas donde se rompe la verticalidad de la misma.
- Los planos de fachada de planta primera a tercera sobresalen respecto a la planta baja. En planta ático se retranquean.
- La distribución de la planta ático no sigue los mismos ejes directores que en plantas inferiores.
- La verticalidad total solo se encuentra en algunos patinillos de instalaciones, en el núcleo de comunicaciones del edificio, en los balcones y en las medianeras.
- Algunas de las aguas de la cubierta no se alinean a las fachadas del ático, sino que siguen la alineación de las fachadas principales pero se cortan con las otras.
- La estructura horizontal está encajada apurando al límite los condicionantes urbanísticos (altura suelo-suelo, altura libre de planta y volumetría) hasta llegar a permitir un ático (retranqueado) habitable. Se llega al punto de tener que modificar ligeramente el corte del forjado en los encuentros con balconeras para permitir que estas tengan una altura de paso (cabezada) aceptable. Por la parte inferior del edificio, la altura de los forjados viene condicionada por el garaje (el sistema robotizado requiere una altura libre muy concreta), por el nivel de calle para acceder a este y por la estructura en techo del mismo que sirve para apeaar los niveles superiores.

3.2 ESTRUCTURA

Los planos estructurales originales se encuentran en el Anexo II de este trabajo.

El edificio se proyectó con sistema porticado ejecutado con hormigón armado con forjados reticulares, a excepción de la planta ático, donde, dada la distribución retranqueada respecto de fachada y con planos oblicuos a esta, se disponen una serie de muros de carga ejecutados con ladrillo perforado. Como puntos singulares a destacar del proyecto original se destacan los siguientes:

La dirección principal de la estructura es paralela a la fachada a c/ Emili Badiella; la medianera transversal es perpendicular a esta fachada. La dirección secundaria es la paralela a la fachada a c/Mossen Pursals; la medianera longitudinal es perpendicular a esta fachada. Entre fachadas existe un ángulo de aproximadamente 100°. Los pilares se distribuyen en pórticos alineados con la fachada principal (ejes 1 y 2) o con la medianera longitudinal (ejes 3 y 4).

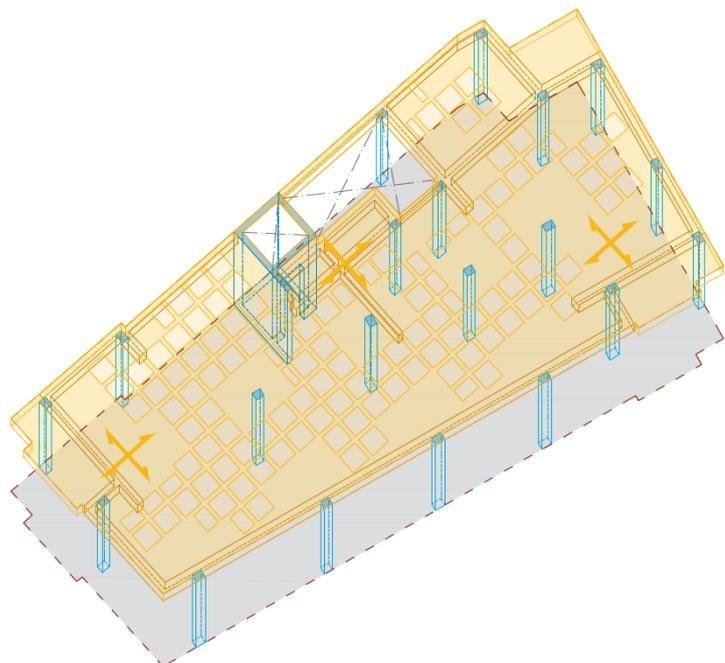


Estructuralmente, las plantas 1 a 3 siguen un mismo orden que es independiente de las distribuciones; esto se ve reflejado en que en algunos casos se encuentran pilares “ocultos” en armarios o zonas secundarias de las viviendas. La planta baja intenta continuar la estructura de las plantas superiores si bien se hacen algunas modificaciones, como se verá más adelante. Haciendo una abstracción de una de las plantas, se obtiene el siguiente esquema:

El núcleo de comunicaciones del edificio sirve como núcleo rigidizador mediante pantallas continuas.

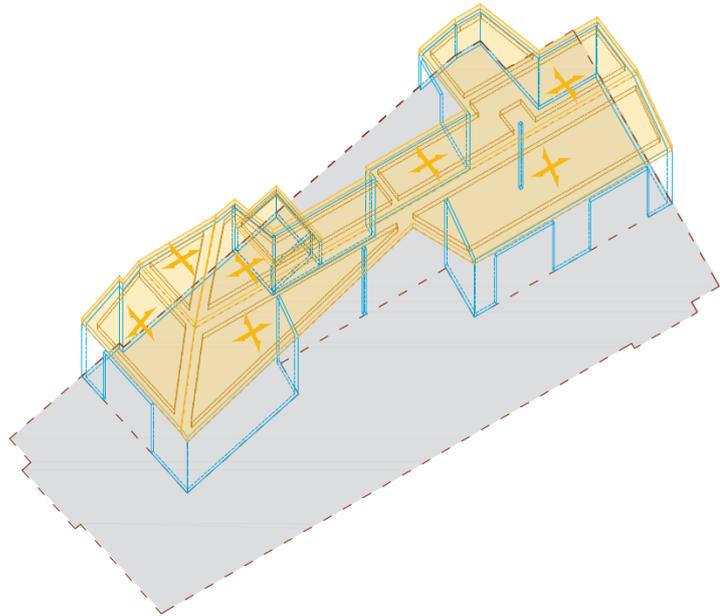
Los pilares siguen los ejes mencionados en el esquema anterior.

El forjado se resuelve como reticular en la mayor parte de la superficie, con ábacos contra el punzonamiento sobre pilares que en algunas zonas, por dimensiones, se unen para formar losas armadas. En algunas zonas el forjado se refuerza mediante zunchos o jácenas descolgadas.



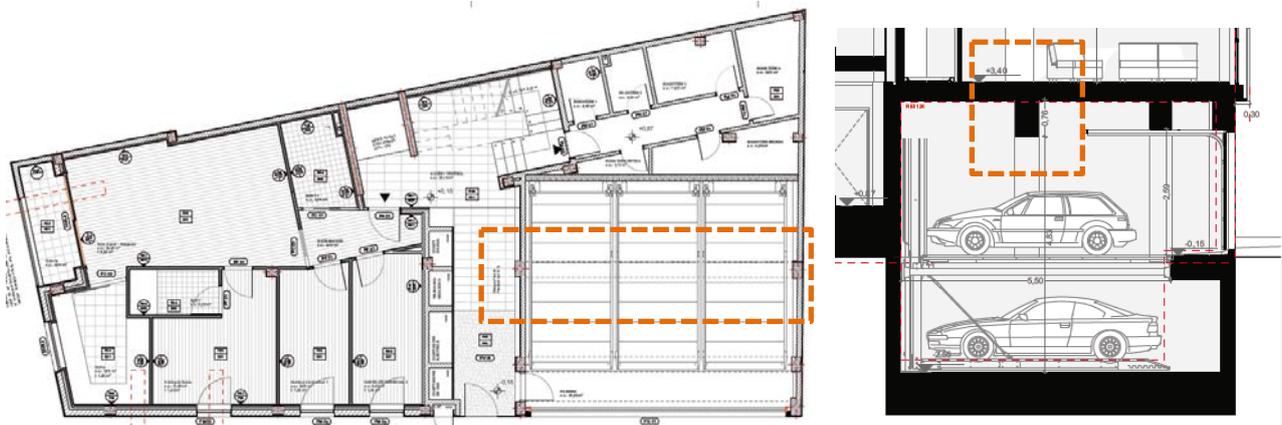
La estructura vertical del ático está formada por muros de carga, que también hacen las veces de fachada o medianera, y por dos pilares que se encuentran desplazados (y apeados) respecto de la planta inferior. Las pantallas de hormigón que cierran el ascensor continúan hasta media altura en esta planta, excepto una que llega a cubierta.

Los forados de la cubierta se resuelven con losas armadas de 22cm, reforzadas con zunchos y un ábaco contra punzonamiento en la zona norte.

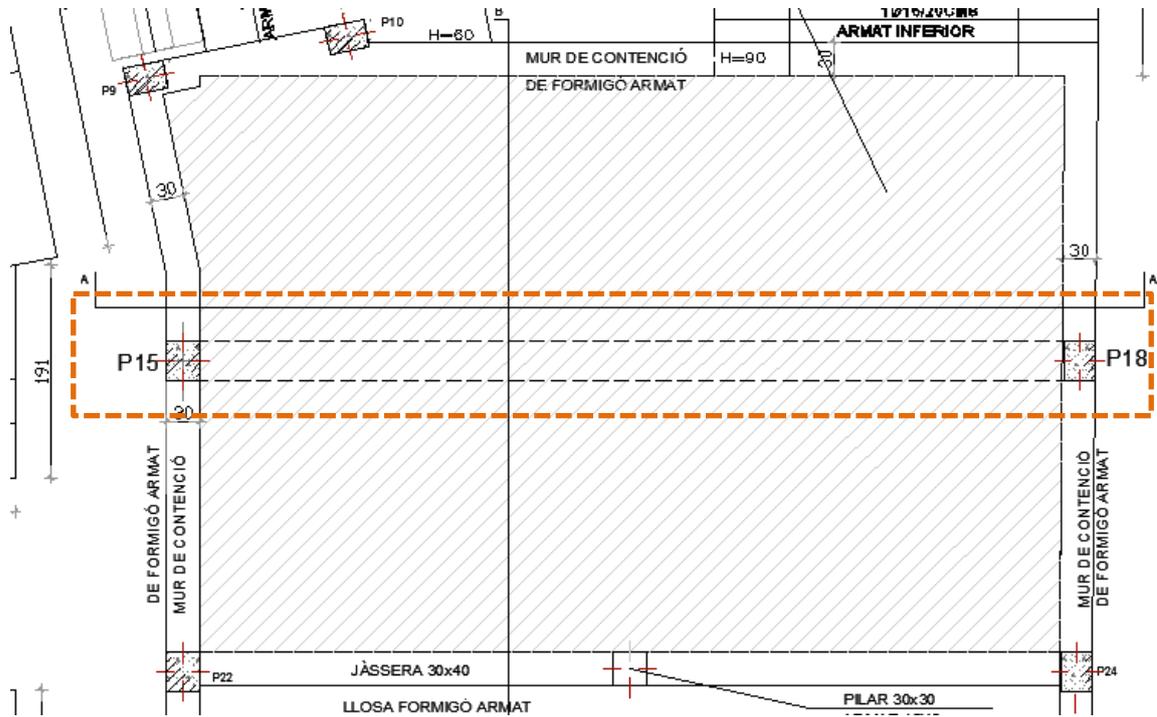


A continuación se indican los puntos más determinantes que se observan en el proyecto original y que pueden condicionar las soluciones en madera e, incluso, provocar que se deba modificar la distribución de forma puntual.

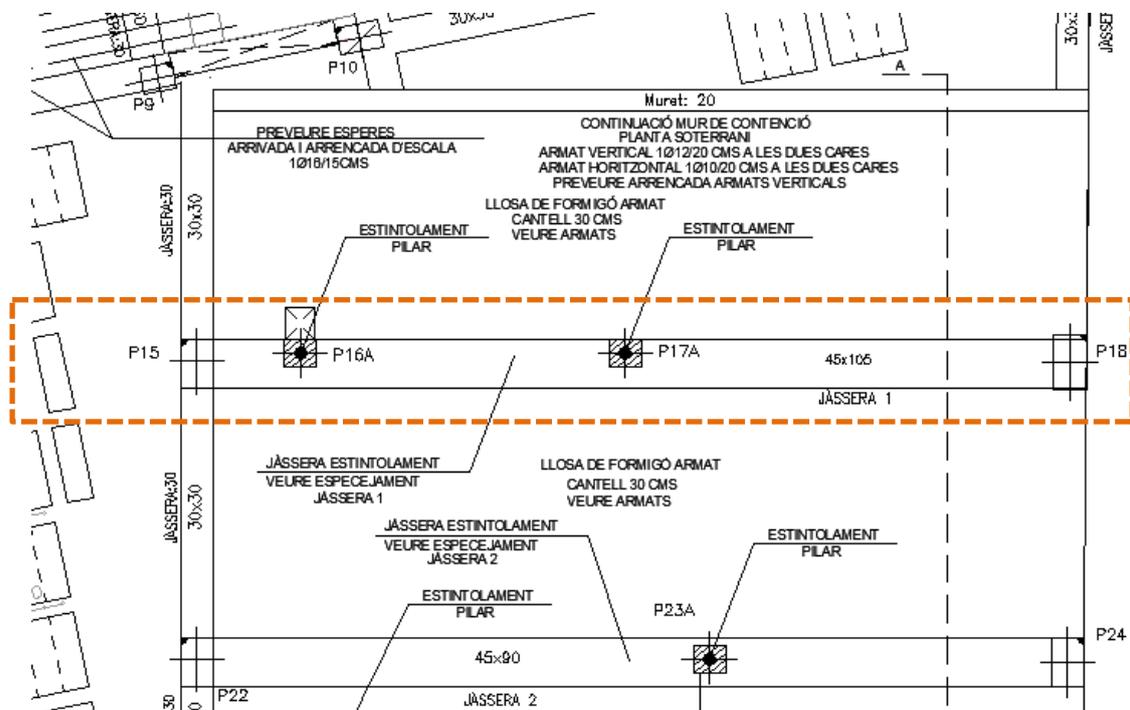
- En planta baja, para facilitar la disposición del aparcamiento robotizado, se dispone una viga de canto en techo, de forma que cargue con el pilar que recibe de las plantas superiores.



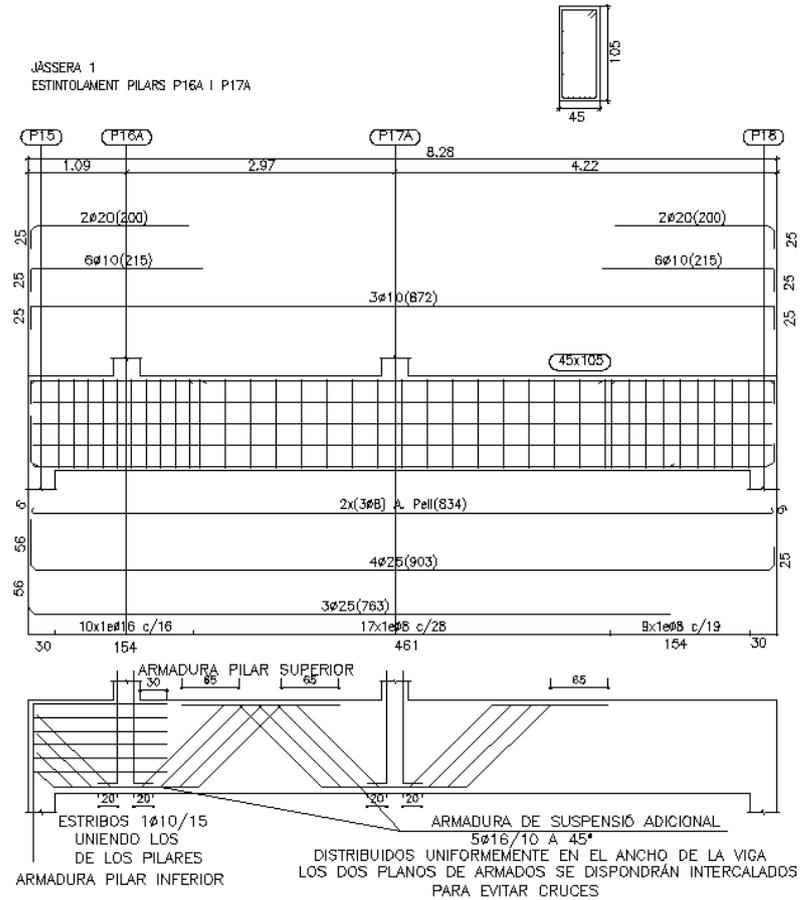
Planta baja, pòrtico P15-P18



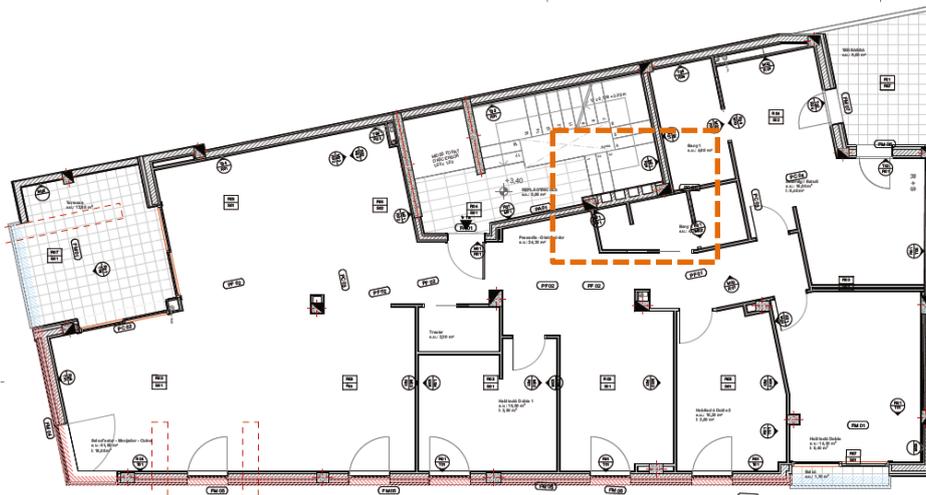
Planta primera, pòrtico P16A-P17A-P18



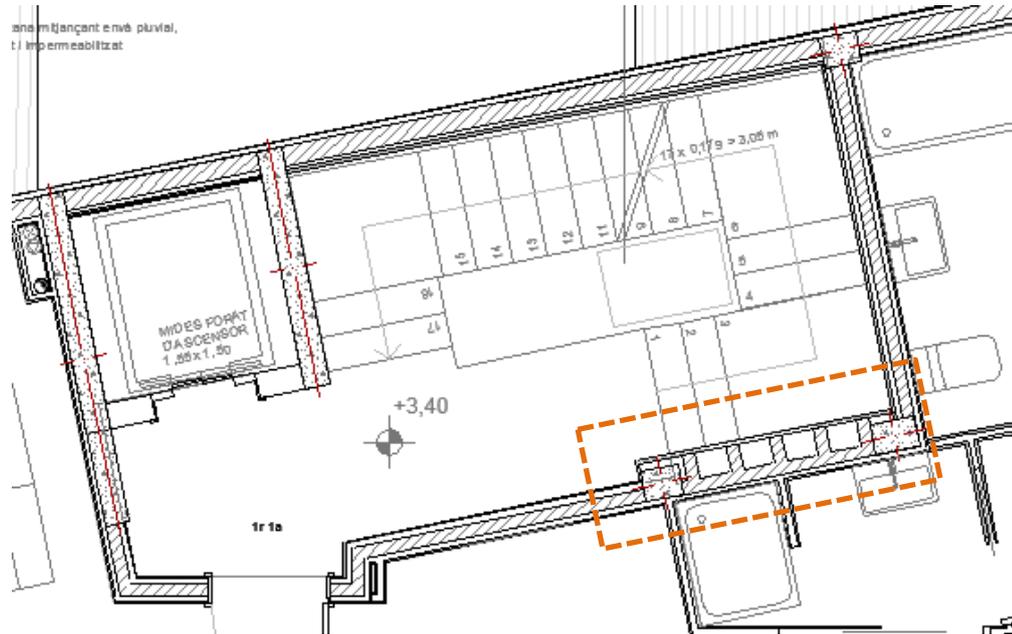
Forjado techo planta primera, jácena P15-P18, geometría y armados.



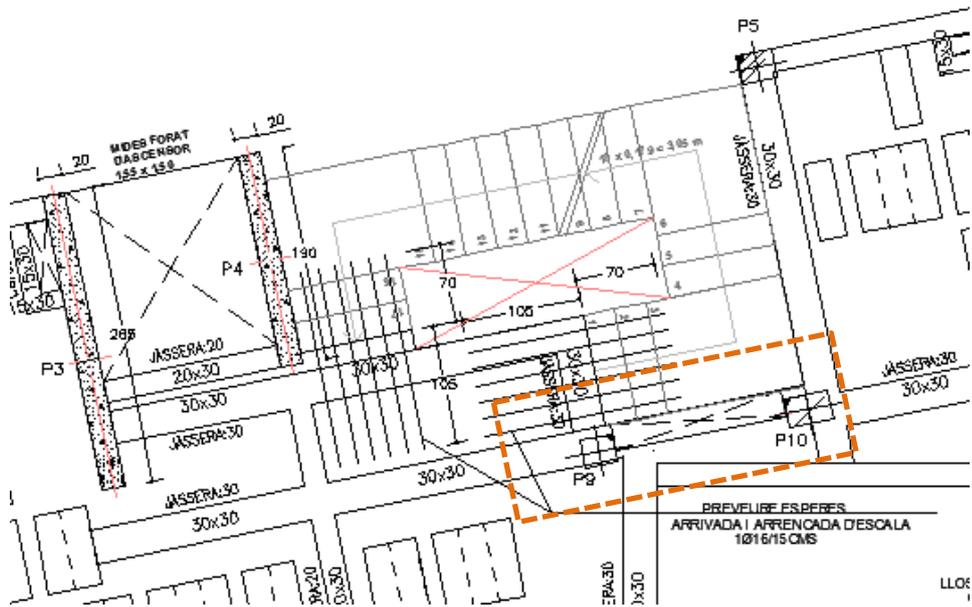
- Junto al núcleo de la escalera se disponen dos pilares que permiten liberar espacio entre ellos para realizar huecos de paso de instalaciones.



Planta primera, caja de escalera, arquitectura



Planta primera, caja de escalera, estructura

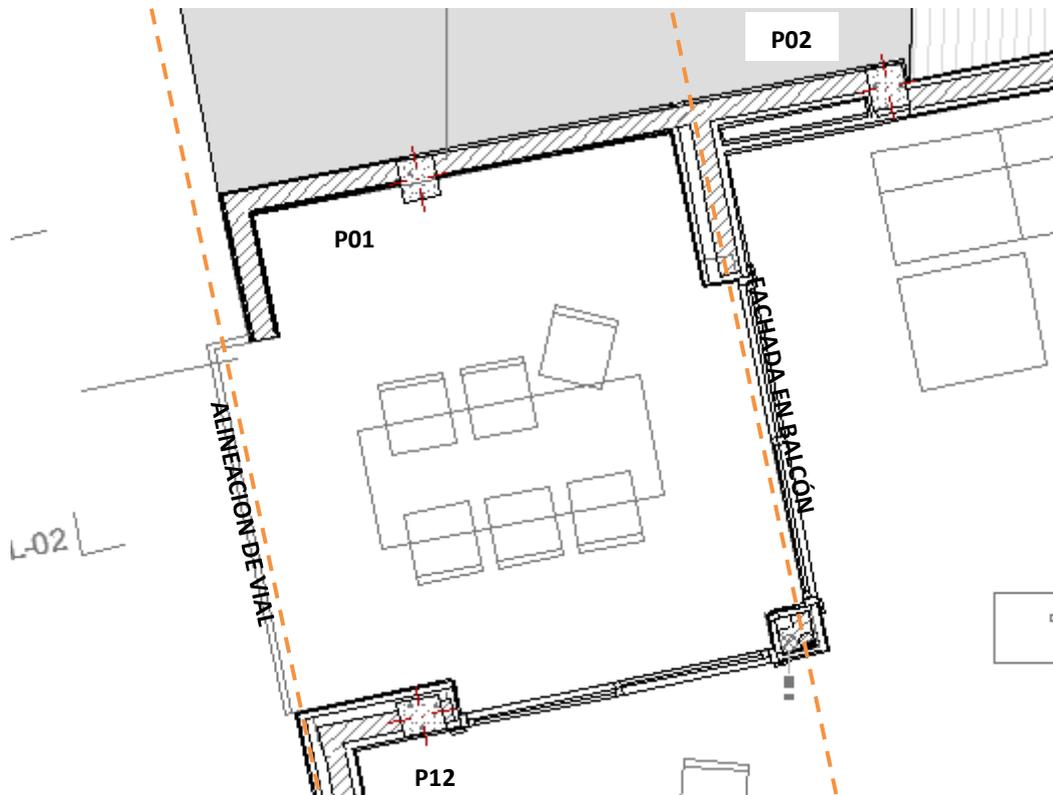


En fachada principal existen balcones con volumetría variable entre plantas.

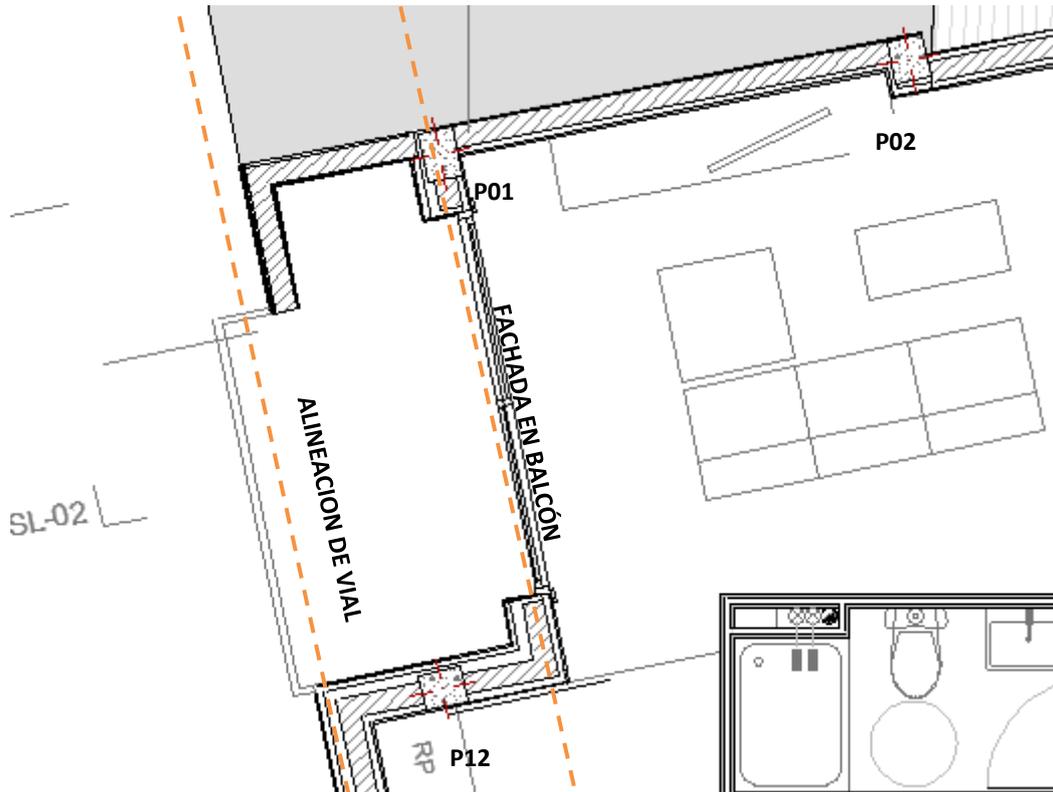
Planta primera y tercera:



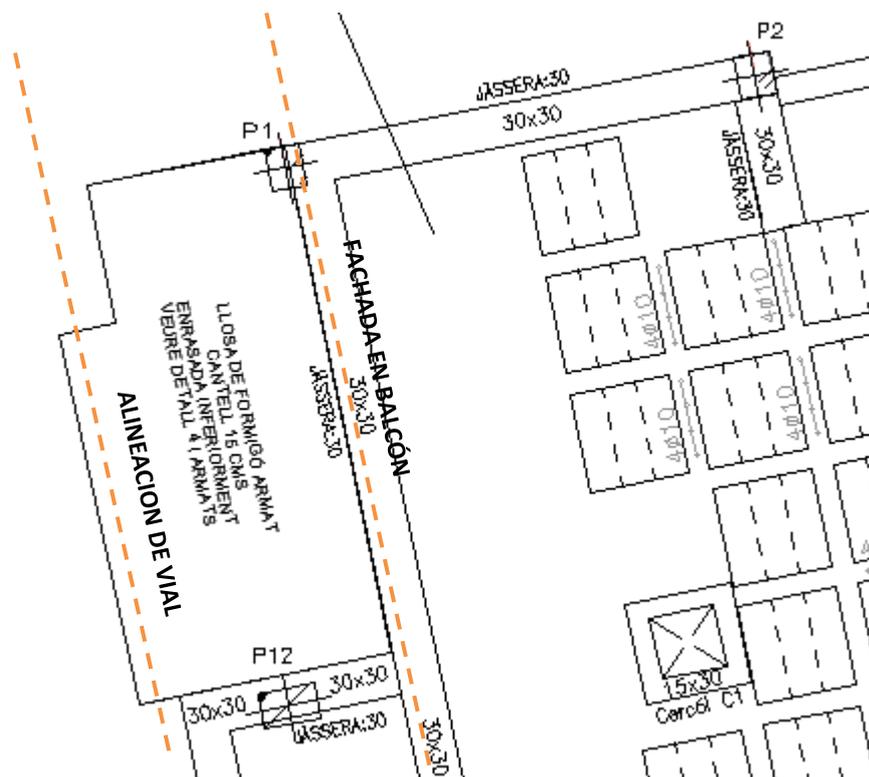
Planta primera y tercera, balcón a c/Mosen Pursals, arquitectura



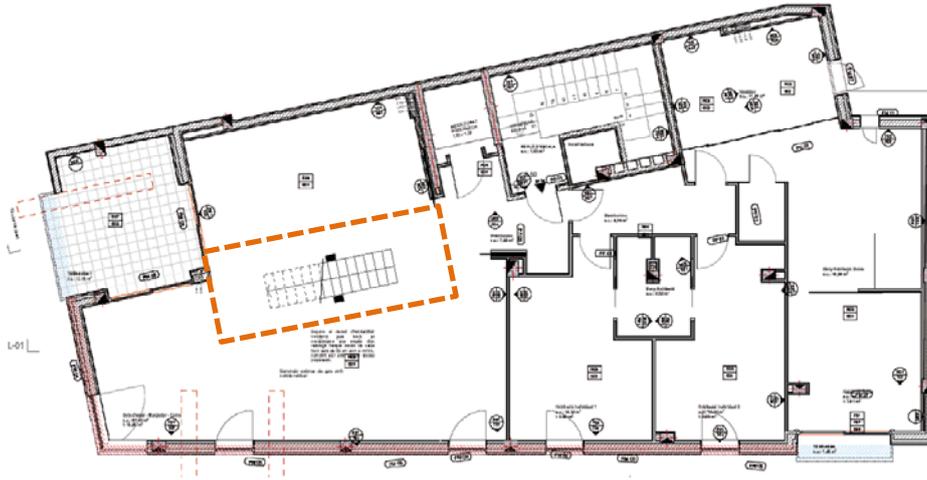
Planta segunda, balcón a c/Mossen Pursals, arquitectura



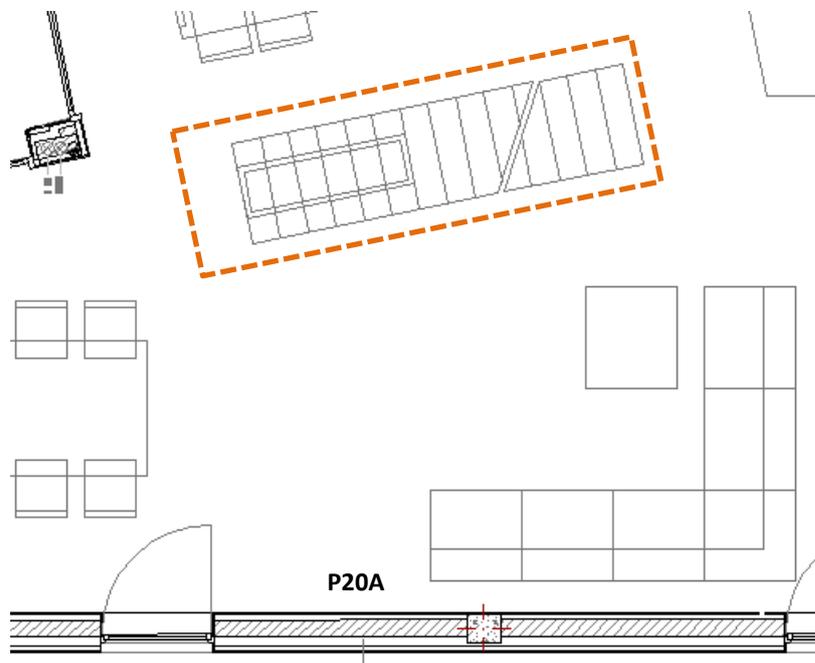
Estructura, techo planta primera, balcón a c/Mossen Pursals



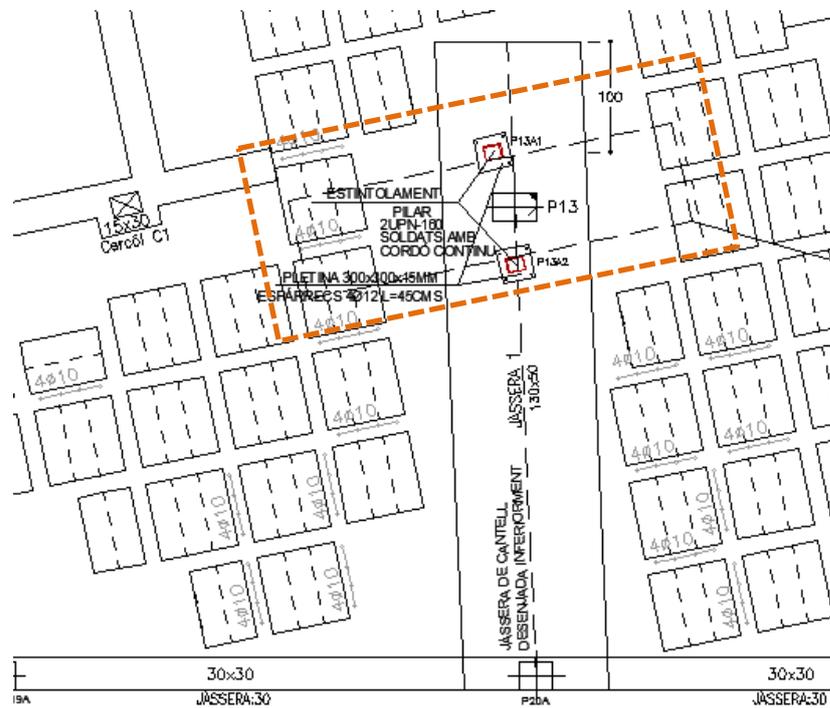
- En planta primera se sitúa una vivienda que ocupa la totalidad de la planta. En planta segunda se sitúan dos viviendas. Entre planta tercera y cuarta (ático) se sitúa una vivienda que ocupa la totalidad de la plantas; la comunicación interna se resuelve mediante una escalera de tramo único alineada con la medianera y que rompe el pórtico central. Además, en el proyecto original, esta escalera ha requerido dividir el pilar 13 en dos y desplazados a cada lado de la escalera para sostener las cargas de la planta superior y situar en techo de planta segunda, una jácena de refuerzo entre los pilares P13 y P20A.



Arquitectura, planta tercera, escalera de comunicación con ático.



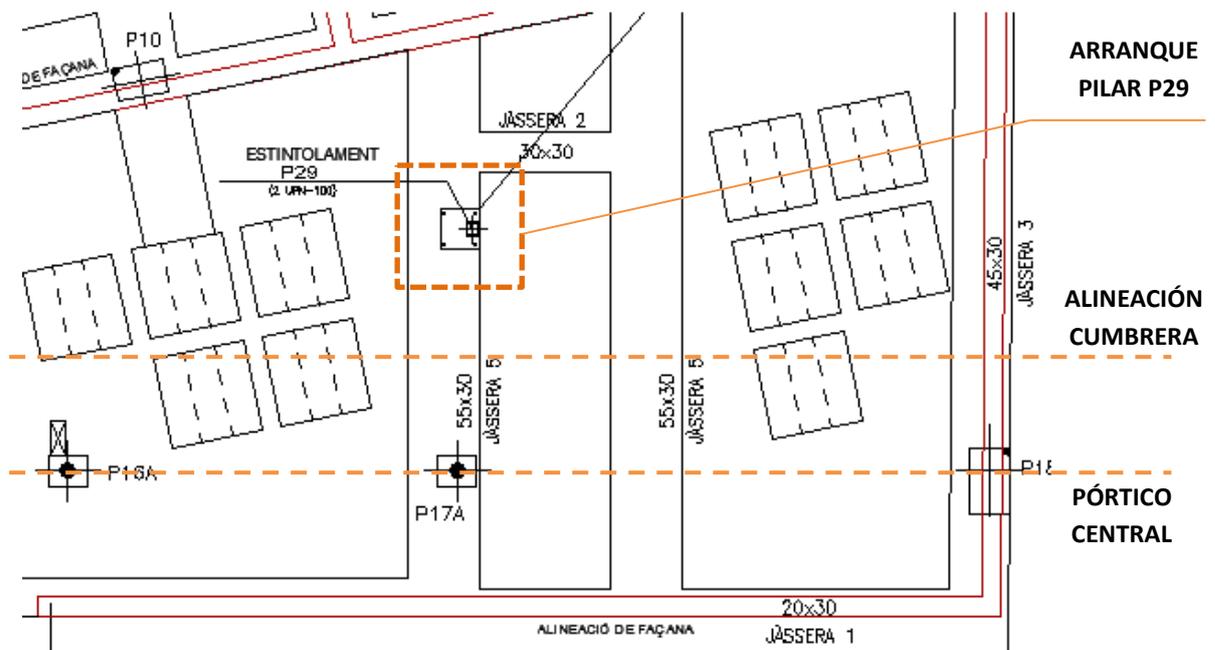
Estructura, techo planta segunda, refuerzo y arranque de escalera de comunicación con ático.



P20A

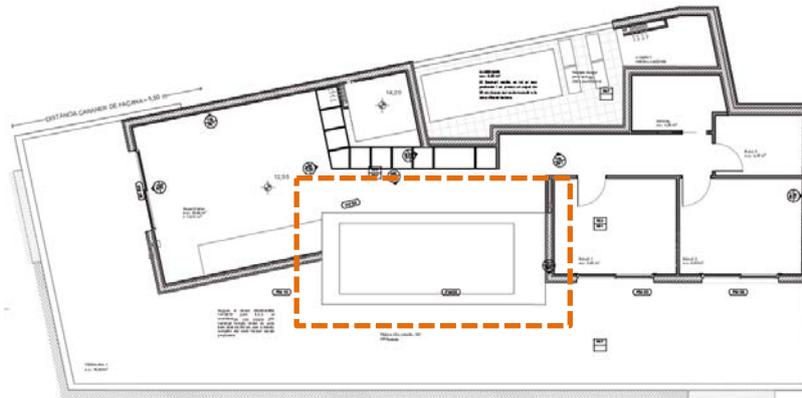
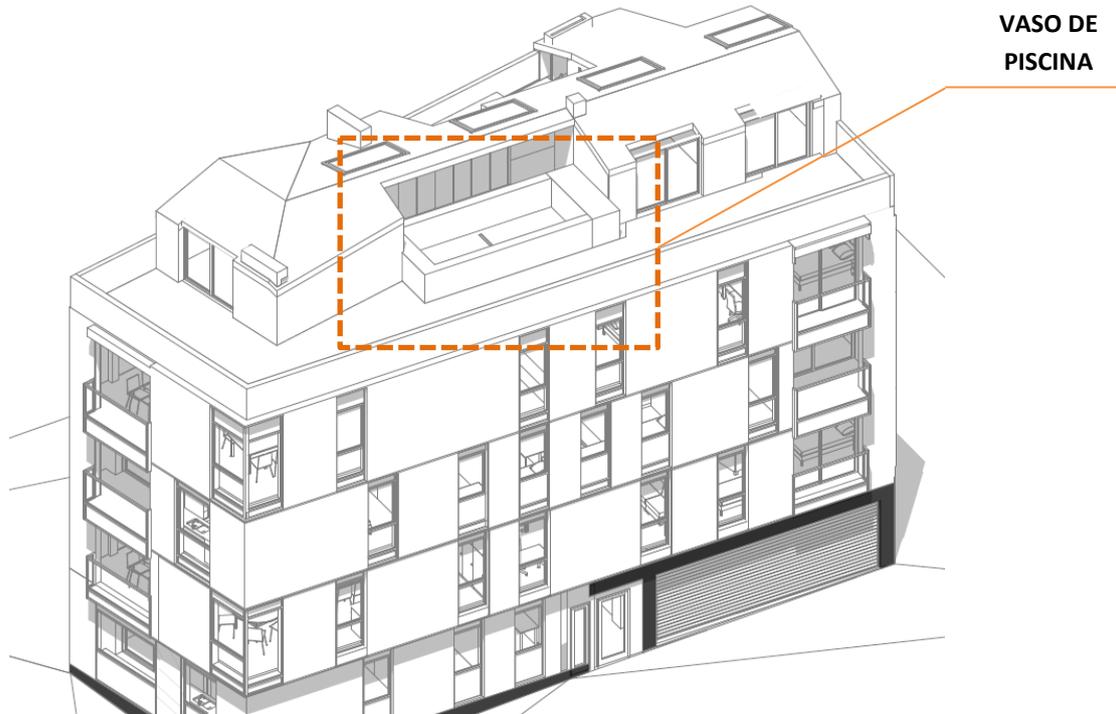
- En planta ático se desplaza el pilar P17A al nuevo pilar P29 para absorber las cargas de cubierta y facilitar la distribución.

Estructura, techo planta tercera.

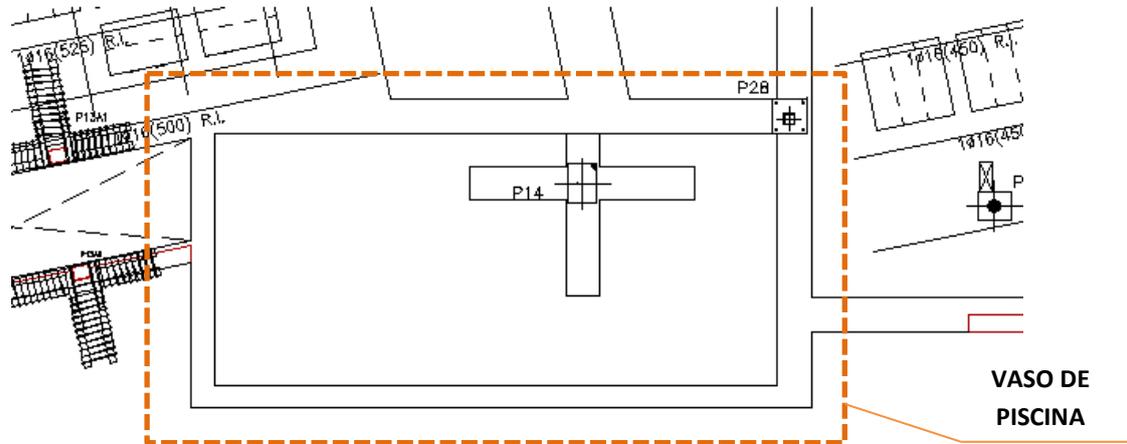


- En planta cubierta se sitúa una piscina. Dada la naturaleza de la madera, que requeriría un estudio muy detallado de impermeabilización, y a fin de simplificar el proceso de cálculo estructural, no se tendrá en consideración en este trabajo.

Vista 3D.



Estructura, techo planta tercera.



- En las fachadas existe una serie de huecos colocados al tresbolillo (no alineados) y que, en su mayor parte, ocupan toda la vertical del tramo de fachada de la planta. Esto puede ocasionar puntos conflictivos en el entorno de los huecos al utilizar la fachada como elemento estructural.

Alzado principal a c/Emili Badiella

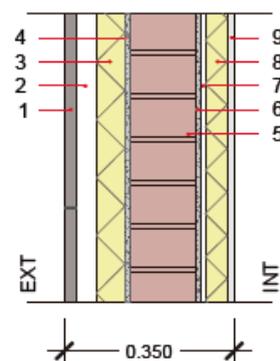


3.3 CONSTRUCCIÓN

Los sistemas constructivos existentes, a modo de secciones tipo, son los que se indican a continuación para la mayoría de casos (no se incluyen algunos sistemas que no afectan a la envolvente, divisorias o estructura).

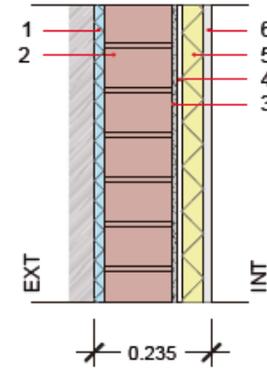
FACHADA VENTILADA CON GERO 135mm

- 1- Fachada ventilada de piedra 25mm
- 2- Cámara de aire ventilada 40mm
- 3- Aislamiento lana mineral 60mm
- 4- Enfoscado de mortero de cemento 10mm
- 5- Fábrica de ladrillo perforado gero 135mm
- 6- Enfoscado de mortero de cemento 10mm
- 7- Cámara de aire sin ventilado 10mm
- 8- Aislamiento lana mineral 45mm
- 9- Trasdosado autoportante PYL15mm



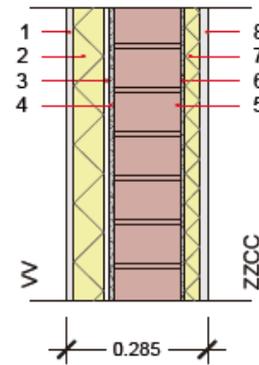
MEDIANERA CON GERO 135mm

- 1- Panel EPS 20mm
- 2- Fábrica de ladrillo perforado gero 135mm
- 3- Enfoscado de mortero de cemento 10mm
- 4- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 5- Aislamiento lana mineral 45mm
- 6- Trasdosado autoportante PYL 15mm



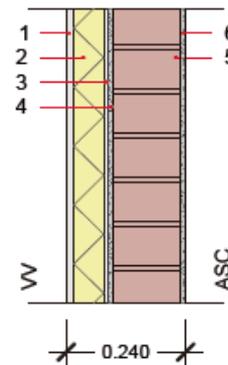
DIVISORIA INTERIOR VV/ZZCC CON GERO 135mm

- 1- Trasdosado autoportante PYL15mm
- 2- Aislamiento lana mineral 45mm
- 3- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 4- Enfoscado de mortero de cemento 10mm
- 5- Fábrica de ladrillo perforado gero 135mm
- 6- Enfoscado de mortero de cemento 10mm
- 7- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 8- Aislamiento lana mineral 30mm
- 9- Trasdosado PYL15mm + omega 30mm



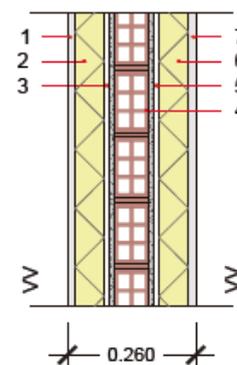
DIVISORIA INTERIOR VV/ASC CON GERO 135mm

- 1- Trasdosado autoportante PYL 15mm
- 2- Aislamiento lana mineral 45mm
- 3- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 4- Enfoscado de mortero de cemento 10mm
- 5- Fábrica de ladrillo perforado gero 135mm
- 6- Enfoscado de mortero de cemento 10mm



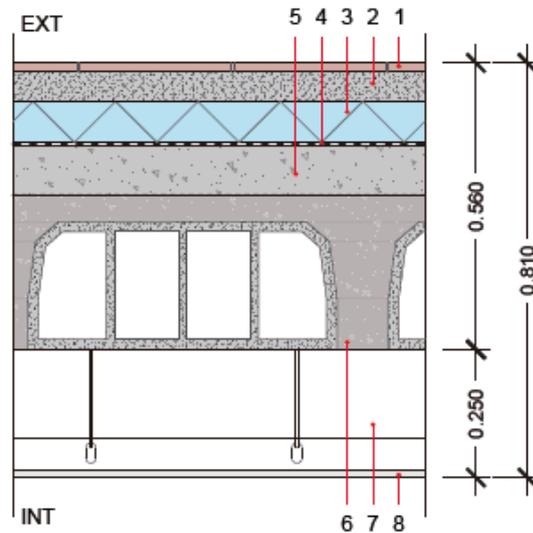
DIVISORIA INTERIOR VV/VV CON LHD 70mm

- 1- Trasdosado autoportante PYL
- 2- Aislamiento lana mineral 45mm
- 3- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 4- Enfoscado de mortero de cemento 10mm
- 5- Tabicón LHD 70mm
- 6- Enfoscado de mortero de cemento 10mm
- 7- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 8- Aislamiento lana mineral 30mm
- 9- Trasdosado PYL15mm + omega 30mm



CUBIERTA PLANA TRANSITABLE FORJADO RETICULAR 25+5

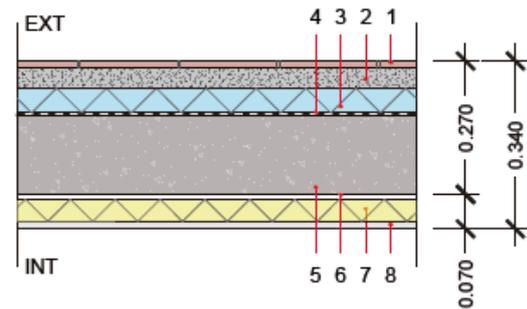
- 1- Pavimento cerámico
- 2- Rececido de mortero de Cemento 60mm
- 3- Panel XPS 80mm
- 4- Impermeabilización
- 5- Formación de pendientes con hormigón aligerado 100mm
- 6- Forjado reticular 25+5 HA
- 7- Cámara de aire no ventilada 10mm
- 8- Falso techo PYL 19mm suspendido



CUBIERTA INCLINADA CON TEJA LOSA ARMADA 160mm

- 1- Teja cerámica plana
- 2- Rececido de mortero de Cemento 40mm
- 3- Panel XPS 40mm
- 4- Impermeabilización
- 5- Losa armada 160mm
- 6- Cámara de aire no ventilada 10mm
- 7- Aislamiento lana mineral 45mm
- 8- Falso techo PYL 19mm suspendido

CUBIERTA INCL. TEJA PLANA Losa HA 160mm



4 REDEFINICIÓN DEL EDIFICIO CON SISTEMAS DE MADERA

Los planos de la propuesta estructural se encuentran en el Anexo III de este trabajo.

4.1 POSIBILIDADES

Para este trabajo, de inicio se plantean tres posibles sistemas para substituir la estructura de hormigón armado por otra de madera:

- Entramado ligero
- Porticado con forjados basados en madera (entramado, CLT o cajones alveolares)
- Muros de carga (CLT) con forjados basados en madera (entramado, CLT o cajones alveolares)

Son tres sistemas que requieren un proceso de diseño diferenciado y que presentan difentes ventajas y desventajas frente al sistema que se pretende substituir. Además, los tres sistemas son combinables entre ellos, multiplicando las posibilidades que ofrecen.

En un primer momento, para el desarrollo de la alternativa estructural se eligió como sistema principal uno basado en CLT por los siguientes motivos:

- Tiempo de montaje, industrialización: permite un montaje rápido en obra, al igual que lo harían muros premontados de entramado, y se reducen los errores y las imprecisiones.
- Consistencia del sistema: al ser paneles, la necesidad de “tareas” o “manipulación” para obtener un sistema estructural rígido, consistente y acabado, así como la necesidad de otros materiales para completar el sistema, son mucho menores que utilizando un sistema de entramado ligero, por lo que se puede considerar como más sencillo o simple. En el caso de un sistema porticado se mantendría la necesidad actual de otro sistema de cerramiento junto a la estructura.
- Propiedades físicas: el CLT, por la forma en que se crea como elemento, es un producto que reduce la anisotropía y la heterogeneidad de la madera, mejorando las prestaciones estructurales de ésta.
- Acústica: El CLT, al aportar una masa casi uniforme en todo el panel, puede ayudar a mejorar la acústica sin requerir de otros materiales secundarios al nivel que se requeriría con sistemas de entramado, lo cual es muy valorable en entornos urbanos con tráfico rodado.
- Sostenibilidad: los tres sistemas estructurales basados en madera resultan mucho más ecológicos que si se utilizara acero, hormigón o cerámica. Además, si la madera elegida procede de bosques cercanos a la obra, la huella ecológica se reduce aún más.
- Sociología: Cuando se está trabajando un proyecto arquitectónico con un cliente, la materialidad suele ser un punto crítico. Es parte del trabajo de un arquitecto presentar posibles materiales a un cliente y hacerle entender los beneficios y desventajas de cada uno, pero en muchos casos, ese cliente ya tiene una idea preconcebida de algunas de estas posibilidades. La madera suele verse en este país como un sistema barato para edificios de baja calidad, para viviendas con estilos no contemporáneos o como un elemento exclusivo de la decoración y el mobiliario; esto ha hecho que el uso de la madera estructural haya tenido pocas opciones de uso frente a sistemas basados en hormigón, acero e, incluso, ladrillo. El CLT ha supuesto una revolución en este sentido, quizás ayudado por una época en la que, poco a poco, la sociedad tiende a la ecología y al uso de productos más sostenibles, o quizás por poder ser una alternativa real a otros materiales en aquellos aspectos indicados con anterioridad. Desde el inicio de este trabajo se ha procurado plantear posibilidades realistas como alternativa al hormigón armado propuesto en el proyecto original y el material seleccionado debe poder aportar conceptos asimilables para el cliente. Como autor de este trabajo y habiendo formado parte del equipo redactor del proyecto original, creo que el sistema basado en madera que más posibilidades tiene como alternativa al hormigón armado, en este caso, es el CLT.

Faltaría conocer el coste de hacer un mismo edificio en diferentes sistemas para tener otro criterio más a valorar a la hora de elegir uno de los sistemas, si bien, a priori, por lo visto en algunos bancos de precios, parece que los sistemas basados en entramado ligero resultan más económicos. Otro criterio que podría ir en contra del CLT, en caso de ser determinante, es que aporta un mayor peso a la estructura frente a los entramados ligeros, si bien, en comparación con los sistemas dispuestos en el proyecto estructural el peso se reduce considerablemente con ambos sistemas.

Como se ha indicado anteriormente, una posibilidad podría ser combinar diferentes sistemas de los descritos, aunque priorizando el uso de CLT como sistema principal. Las posibilidades planteadas a lo largo del proyecto para cada parte han sido:

- Sistemas en cerramientos verticales y particiones V-V o V-ZC: CLT, entramado ligero de madera
- Sistemas en eje central: porticado (pilares en madera laminada; vigas en madera laminada o acero)
- Forjados: CLT, cajones alveolares (EGO CLT mix, Lignatur) o entramado ligero de madera.
- Tabiquería: entramado ligero en acero o madera

La mayoría de estas posibilidades no han pasado de un estudio preliminar de sus propiedades, pero, al final, en todos los proyectos suele ser una virtud la simplificación y en este caso ya se trabaja con un proyecto lo suficientemente complejo.

Se excluyen de este trabajo el diseño y dimensionado de las escaleras del edificio.

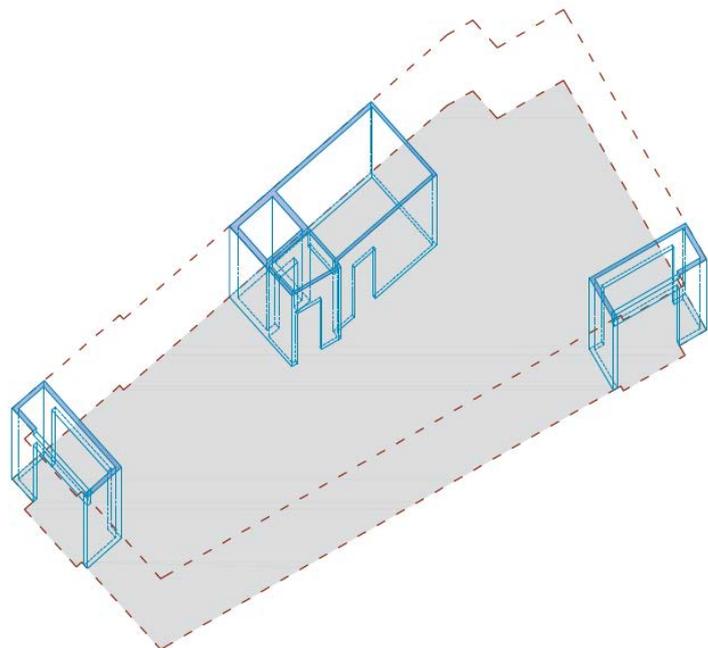
4.2 DEFINICIÓN DE LA ESTRUCTURA EN MADERA

Como punto de partida para el esquema estructural, se intenta una aproximación al sistema existente y, según se van haciendo cálculos estos esquemas se corrigen. Los esquemas seguidos son los siguientes:

Plantas 1 a 3

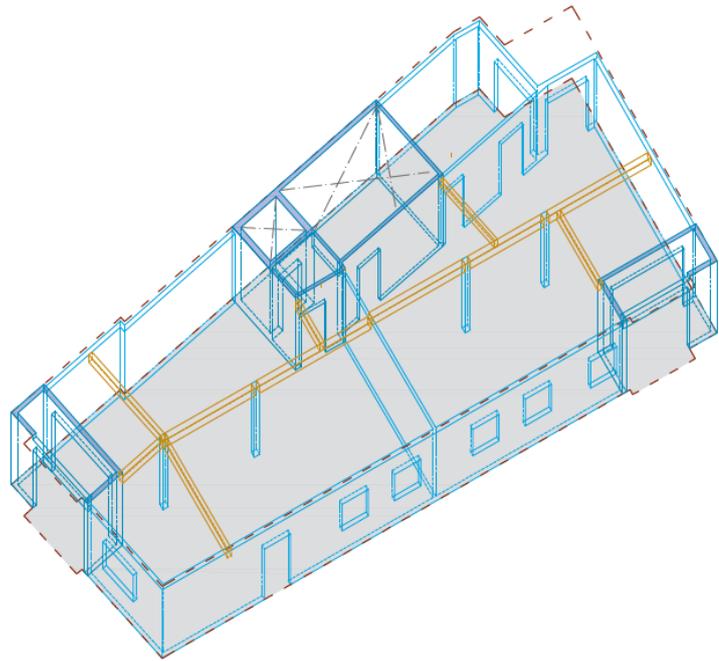
A) Esquema inicial:

Se aprovecha la verticalidad del núcleo de comunicaciones del edificio así como los núcleos de balcones situados en los encuentros entre fachadas y medianeras, para disponer elementos verticales (continuos en las 3 plantas) de CLT que aporten rigidez. La dirección principal de los paneles será vertical.

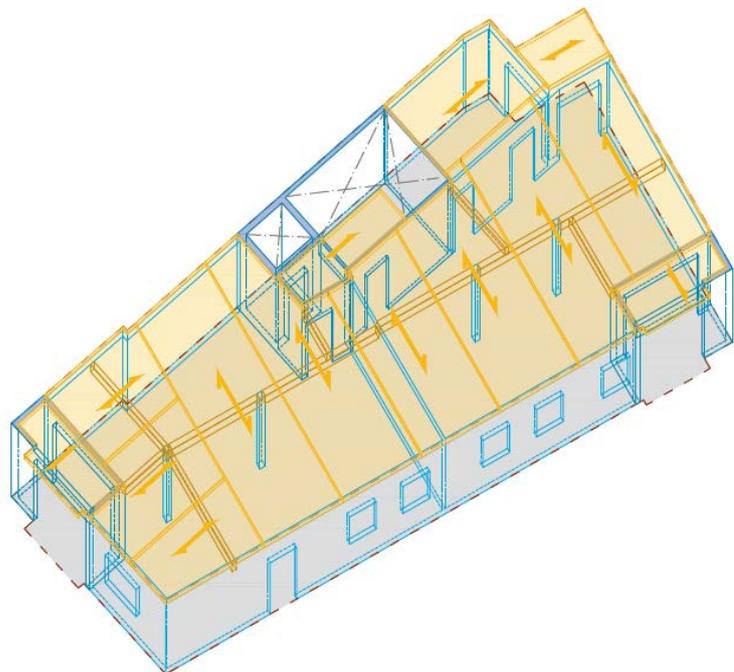


Se aprovechan los cerramientos para disponer muros de carga basados en CLT (paneles horizontales). En planta segunda la divisoria entre viviendas también se proyecta con un panel CLT que, además, servirá para comunicar estructuralmente la fachada principal con el núcleo de comunicaciones del edificio. La dirección principal de los paneles será vertical.

En la zona central, dada la diferencia de distribuciones y para respetarla lo máximo posible, se dedice dejar el esquema original de pilares.



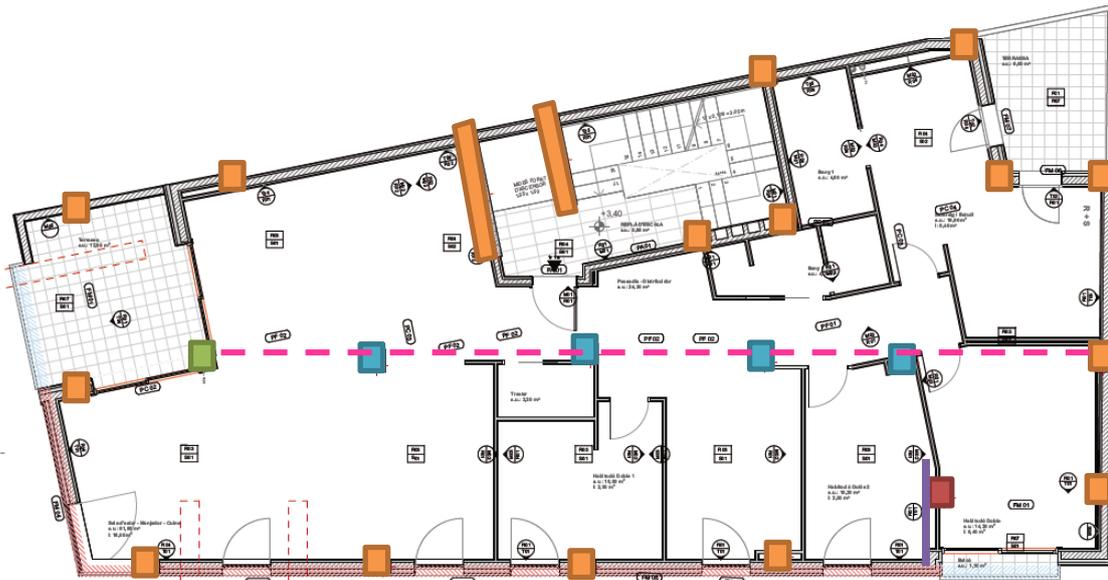
La distribución de los paneles de CLT de forjado se pretende que sea perpendicular a la fachada principal (a c/ Emili Badiella) y con la dirección principal de los paneles también perpendicular a esta. Inicialmente se contempla que estos paneles apoyen directamente sobre los muros de fachada o medianera y sobre vigas de madera laminada en el pórtico central. En la primera crujía a fachada a c/ Mossen Pursals se deja los paneles con la dirección perpendicular a esta con la intención de que la contradirección al resto del forjado aporte algo más de rigidez en esta zona.



Las principales incidencias de estas decisiones sobre la arquitectura proyectada son las siguientes:

- Surge un nuevo pilar (en verde) que se integra en un cajón de bajantes (esto ocasionaría reestudiar las instalaciones que discurren por el patinillo; aunque queda fuera del alcance de este trabajo quedan espacios en zonas proximas donde alojar estas instalaciones).
- Se desplazan los pilares (en azul) del eje central (en rosa) para alinearlos. Esto ocasiona leves movimientos de la tabiquería en torno a este eje para integrar los pilares indicados.
- La mayoría de pilares, así como las pantallas que forman el hueco del ascensor, quedan integrados en la nueva estructura y desaparecen (en naranja), liberando espacio en planta al eliminar salientes y retranqueos
- Se sustituye parte de un tabique (en morado) y un pilar (en rojo) por un muro de carga; se corrige el eje de este muro para alinearlo con la hoja principal de la fachada en el quiebro.

Planta primera:



Estos cambios son asimilables en plantas dos y tres.

Del calculo con este esquema se extraen las siguientes conclusiones:

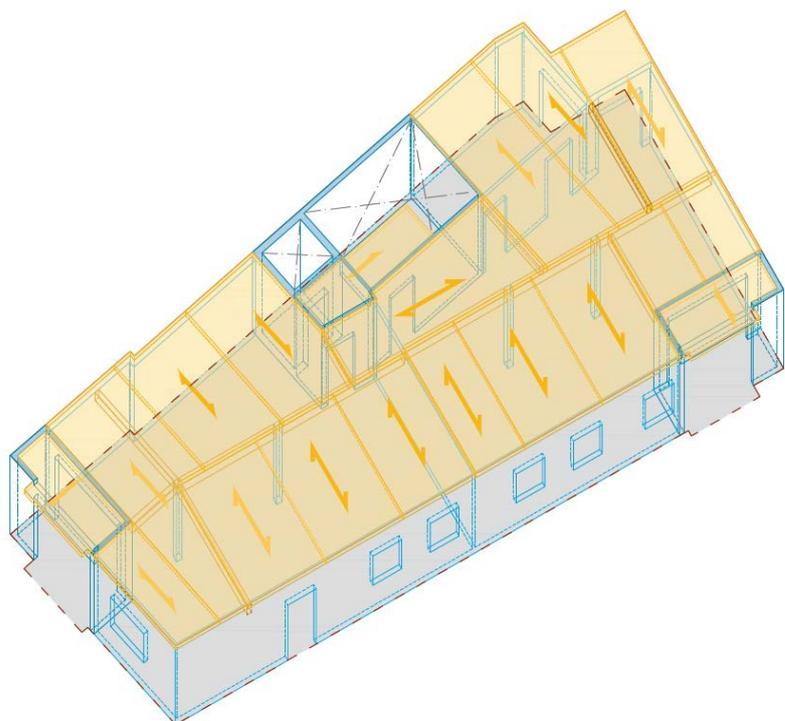
- Situando vigas en el eje central por debajo de los paneles para dejar a estos que sean pasantes (triapoyados), las vigas descuelgan demasiado, hasta el punto de no respetar la altura libre que impone la normativa local, por lo que mantenerlas harían irreal e irrealizable el proyecto. Por tanto, no es una alternativa válida.

B) Esquema resultante:

Se modifica unicamente la distribución de paneles en forjado para que estén enrasados con las vigas del eje central.

Como resultado se tienen paneles perpendiculares a la fachada principal en la primera crujía respecto de esta, y paneles perpendiculares a la medianera longitudinal en la segunda crujía.

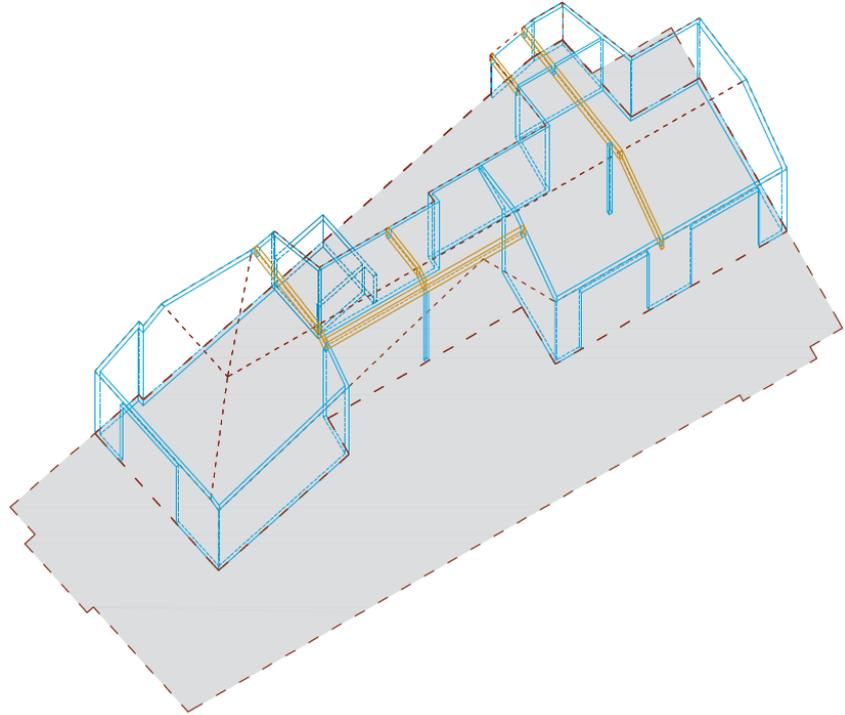
El primer panel paralelo a la fachada a c/ Mossen Pursals es continuo (triapoyado) uniendo la fachada principal con la medianera longitudinal. Esta situación debe favorecer la rigidez del forjado.



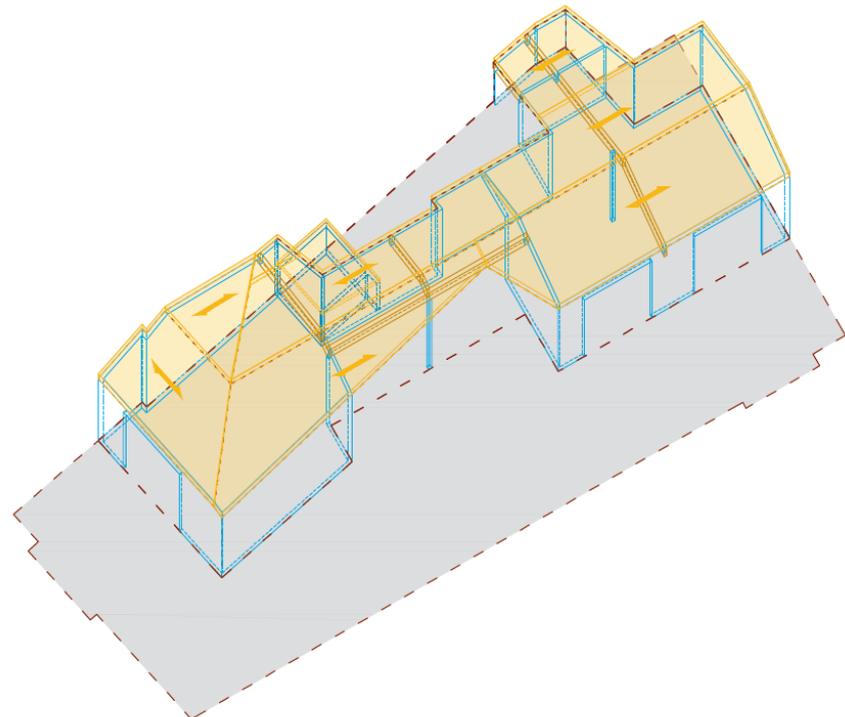
Planta ático.

A) Esquema inicial

Para las fachadas simplemente se substituyen los muros de carga en ladrillo por muros de carga con paneles de CLT y, de la misma forma que en el proyecto original, se continúan en vertical los elementos que definen el hueco del ascensor. Los pilares se arriostran con el resto de la estructura mediante unas vigas que, al situarse como caballetes, sirven de apoyo para los paneles de cubierta.

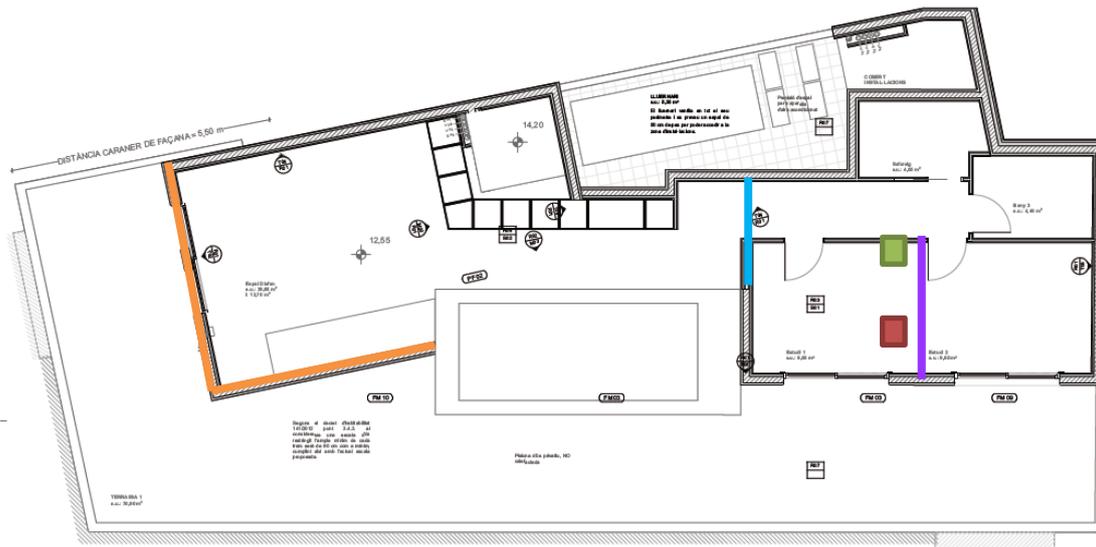


Los forjados de cubierta se resuelven mediante paneles de CLT de 150mm. Dado que existen huecos en fachada de gran amplitud se decide, en un primer momento, situar la dirección principal paralela a los aleros para cargar sobre elementos perpendiculares a las fachadas (medianeras, muros intermedios y jácenas), de forma que los paneles trabajen, al menos, como elementos triapoyados, pero, tras los primeros cálculos, se comprueban que existen zonas que no trabajan de forma adecuada, por lo que se replantea el sistema.



En el caso del ático, se observan los siguientes cambios en la arquitectura:

- Se desplazan ligeramente los muros de fachada para hacerlos coincidir con los ejes estructurales del forjado inferior.
- Se prolonga la hoja resistente del tramo de fachada indicado (en azul) para dar continuidad y que el mismo elemento sirva para cargar los paneles del forjado y rigidizar transversalmente. En la zona de pasillo se deja un hueco de paso en el panel.
- Se valora la posibilidad de eliminar el pilar(verde) desplazado respecto de la planta inferior y que sirve de apoyo para la cubierta, y prolongar el pilar P05 (en rojo) desde planta inferior, pero esto implicaría disponer un pilar exento del tabique (en morado) o desplazar este para integrarlo.



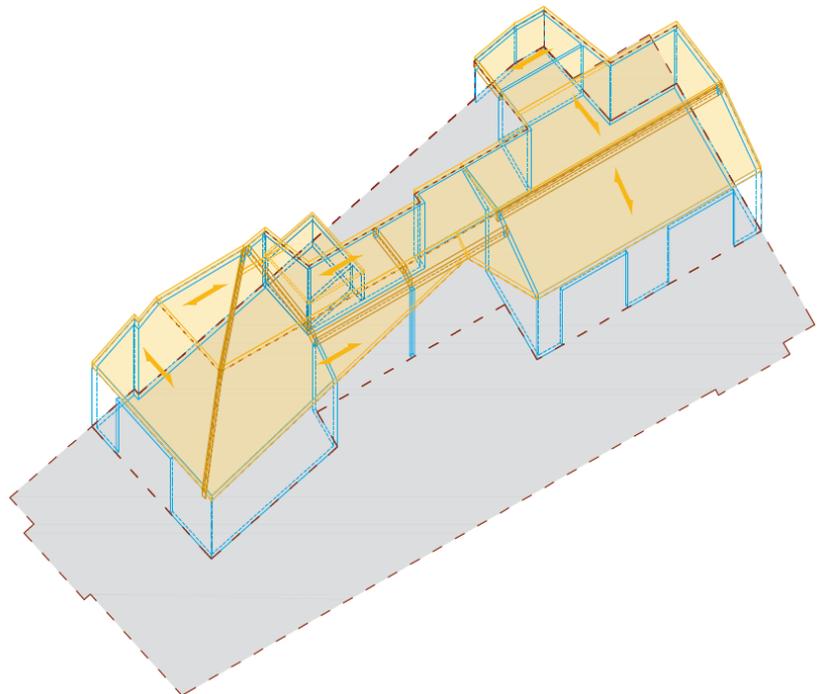
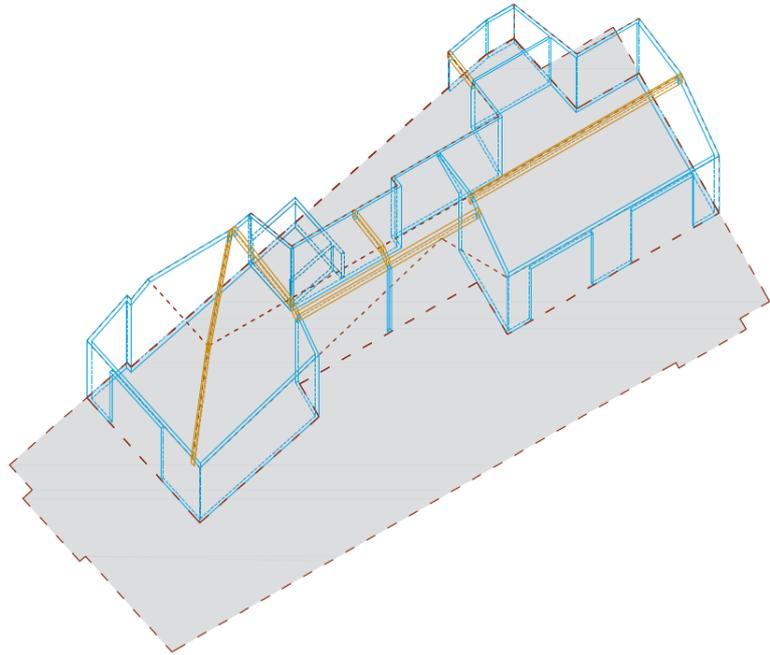
Al calcular la estructura con este esquema se detectan los siguientes problemas:

- En la parte donde se unen los 4 faldones la estructura se deforma hasta abrirse.
- Para poder situar el caballete y el pilar que sustenta la parte norte de la estructura, se requiere una subestructura en techo de planta 3 muy compleja, y que, por acumulación de deformaciones, requiere que las secciones sean grandes.

B) Esquema resultante

Dada la distribución de las fachadas, con planos no alineados, y la existencia de un quiebro entre faldones de la cubierta en la zona sur, surgen dos zonas diferenciadas:

- En la zona de cubierta mas al sur (izquierda en el esquema anterior) se disponen paneles de CLT, con la dirección principal en paralelo a las fachadas sobre las que cargan, y, a su vez se refuerza el encuentro entre faldones con un caballete de sección curva y canto variable.
- En la zona de cubierta al norte, con una planta más regular que la anterior y una mayor coincidencia en la verticalidad de la estructura, se dedice colocar un par de cumbrera y paneles de CLT con la dirección principal perpendicular tanto al par como a las fachadas sobre las que cargan. El apoyo sobre los huecos de ventana se deben reforzar con dinteles.



El predimensionado de los sistemas dispuestos, y por tanto el espesor de los diferentes paneles o elementos lineales, se realizará utilizando prontuarios de fabricantes, para, posteriormente, ajustarlos al realizar un cálculo pormenorizado mediante el programa informático Dlubal

5 MATERIALIDAD

5.1 PANELES DE CLT

Para la estructura planteada en este trabajo, se propone utilizar paneles de CLT de pino radiata, por disponibilidad del material y dada la facilidad de acceso a la información técnica necesaria.

Las propiedades físicas y mecánicas del pino radiata son las correspondientes a una clase resistente C24, señaladas en el CTE DB SE-M anejo E, apartado E.1 Madera aserrada, tabla E.1 Coníferas y chopos. Para esta madera, con calidad visual ME-1 y la clase resistente señalada, el suminsitrador Grupo Gamiz indica una densidad media de 504 kg/m³ y una densidad característica de 426 kg/m³, con lo que se modifican los valores del CTE.

Resistencia (N/mm ²)						Rigidez (KN/mm ²)				Densidad (kg/m ³)		Coef.
Flexión	Tracción		Compresión		Cortante	Elasticidad			Transv	Media	Caract.	Seguridad
f _(m,k)	f _(t,0,k)	f _(t,90,k)	f _(c,0,k)	f _(c,90,k)	f _(v,k)	E _(0,medio)	E _(0,k)	E _(90,medio)	G _(medio)	P _(medio)	P _(k)	Y
24	14	0,4	20	2,5	4	11	7,4	0,37	0,69	426	504	1,3

5.2 MADERA LAMINADA

Se propone utilizar vigas laminadas GL24h, de madera de pino radiata por concordancia del tipo de material con los paneles de CLT.

Las características físicas y mecánicas de la madera GL24h están recogidas en el CTE DB SE-M anejo E, apartado E.2 Madera aserrada, tabla E.3 Madera laminada encolada homogénea. Las densidades indicadas en el CTE se deben modificar de la misma forma que con la madera aserrada de la misma especie arbórea.

Resistencia (N/mm ²)						Rigidez (KN/mm ²)				Densidad (kg/m ³)		Coef.
Flexión	Tracción		Compresión		Cortante	Elasticidad			Transv	Media	Caract.	Seguridad
f _(m,k)	f _(t,0,k)	f _(t,90,k)	f _(c,0,k)	f _(c,90,k)	f _(v,k)	E _(0,medio)	E _(0,k)	E _(90,medio)	G _(medio)	P _(medio)	P _(k)	Y
24	16,5	0,4	24	2,7	2,7	11,6	9,4	0,39	0,72	426	504	1,25

5.3 CLASE DE USO PARA MADERA

Tal como define el CTE DB SE-M en el apartado dedicado a la durabilidad, la clase de uso relaciona la probabilidad de que la madera sufra ataques bióticos con la exposición a la humedad. De las cinco posibles clases que se contemplan en la normativa, por la disposición constructiva de la madera en el proyecto, solo serían aplicables los dos primeros tipos:

a) **clase de uso 1:** el elemento estructural está a cubierto, protegido de la intemperie y no expuesto a la humedad. En estas condiciones la madera maciza tiene un contenido de humedad menor que el 20%. Ejemplos: vigas o pilares en el interior de edificios;

b) **clase de uso 2:** el elemento estructural está a cubierto y protegido de la intemperie pero, debido a las condiciones ambientales, se puede dar ocasionalmente un contenido de humedad de la madera mayor que el 20 % en parte o en la totalidad del elemento estructural. Ejemplos: estructura de una piscina cubierta en la que se mantiene una humedad ambiental elevada con condensaciones ocasionales y elementos estructurales próximos a conductos de agua;

Se considera que algunos elementos en las zonas de balcones así como algunos elementos interiores situados en zonas próximas a instalaciones de agua podrían llegar a estar expuestos a clase 2. Dado que muchos elementos estructurales forman parte de varias zonas del edificio y pueden llegar a estar expuestas a varias clases al mismo tiempo, se debe considerar la más desfavorable y también, por simplificación y prevención, tiene sentido que se use esta misma clase al resto de elementos. Aún así, leyendo más adelante en la norma, en la tabla 3.1 Elección del tipo de protección se añaden notas que afectan a la clase de uso:

Tabla 3.1 Elección del tipo de protección

Clase de uso		Nivel de penetración NP (UNE-EN 351-1:2008)
1	NP1 ⁽¹⁾	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
2	NP1 ^{(2) (3)}	Sin exigencias específicas. Todas las caras tratadas
3.1	NP2 ⁽³⁾	Al menos 3 mm en la albura de todas las caras de la pieza.
3.2	NP3 ⁽⁴⁾	Al menos 6 mm en la albura de todas las caras de la pieza. Todas las caras tratadas.
4	NP4 ⁽⁵⁾	Al menos 25 mm en todas las caras
	NP5	Penetración total en la albura. Todas las caras tratadas
5	NP6 ⁽⁴⁾	Penetración total en la albura y al menos en 6 mm en la madera de duramen expuesta.

⁽¹⁾ Se recomienda un tratamiento superficial con un producto insecticida
⁽²⁾ El elemento de madera deberá recibir un tratamiento superficial con un producto insecticida y fungicida.
⁽³⁾ Los elementos situados en cubiertas ventiladas se asignarán a la clase 2. En cubiertas no ventiladas, se asignarán a la clase 3.1, salvo que se incorpore una lámina de impermeabilización, en cuyo caso se asignarán a la clase 2. Asimismo, se considerarán de clase 3.1 aquellos casos en los que en el interior de edificaciones exista riesgo de generación de puntos de condensación no evitables mediante medidas de diseño y evacuación de vapor de agua
⁽⁴⁾ Las maderas no durables naturalmente empleadas en estas clases de uso deberán ser maderas impregnables (clase 1 de la norma UNE-EN 350:2016).
⁽⁵⁾ Sólo para el caso de madera de sección circular (rollizo).

Viendo la nota 3, aplicable a las clase de usos 2 y 3, puede considerarse que hay determinados elementos a los que sería aplicable los criterios de la clase 3.1, lo cual, si se aplica de forma generalizada y preventiva, iría desde el punto de vista de la seguridad y aportaría un cierto valor añadido al conjunto de la estructura al dotarla de un mínimo de tratamiento.

Volviendo a la explicación de la normativa, para la clase 3.1 se define lo siguiente:

c) **clase de uso 3:** el elemento estructural se encuentra al descubierto, no en contacto con el suelo. El contenido de humedad de la madera puede superar el 20% Se divide en dos clases;

Clase de uso 3.1. El elemento estructural se encuentra al exterior, por encima del suelo y protegido, es decir sujeto a medidas de diseño y constructivas destinadas a impedir una exposición excesiva a los efectos directos de la intemperie, inclemencias atmosféricas o fuentes de humedad. En estas condiciones la humedad de la madera puede superar ocasionalmente el contenido de humedad del 20%. Ejemplos: viga que vuela al exterior pero que en su zona superior y testas están protegidas por una albardilla o piezas de sacrificio.

Por esto, para este trabajo se define la clase de uso 3.1, de forma preventiva, para todos los elementos de madera, si bien podría ser valorable la consideración de clase 2.

5.4 ACERO

En caso de ser necesario, para el dimensionado de aquellos elementos estructurales que se diseñen en acero se empleará la calidad S-275-JR.

Resistencia (N/mm ²)		Elasticidad (KN/mm ²)	Rigidez (KN/mm ²)	Densidad (kg/m ³)	Coef. Seguridad	
Lim. Elást.	Tens. Rot.				ELS	ELU
f _y	f _u	E _(k)	G _(k)	P	γ _(M0)	γ _(M2)
275	430 a 580	210.000	81.000	7.850	1,05	1,25

Por sencillez constructiva se contempla que los perfiles laminados en caliente utilizados (HEA, HEB, IPE o UPE) tengan el mismo canto, variando la sección propuesta para optimizarla donde se pueda, pero condicionada por el caso de viga más desfavorable.

6 APLICACIÓN DE NORMATIVA

Para el estudio del edificio en madera se ha seleccionado una estructura basada principalmente en muros de carga (paneles CLT) que, en fachadas y medianeras, además de substituir a los pilares existentes, también substituyen la hoja principal del cerramiento, por lo que, aunque el fin principal de este trabajo es plantear una alternativa al sistema estructural, esto provoca que la misma tenga una influencia importante en otras partes del edificio y puede resultar interesante valorar el alcance de estas repercusiones. Dicha valoración debe hacerse planteando que los nuevos sistemas constructivos aporten, al menos, las mismas prestaciones que los originales, para lo cual, lo más sencillo es plantear el uso de la misma normativa de edificación como punto de partida.

En este apartado se señalan, en base al CTE como principal normativa aplicable, aquellos puntos que se tendrán en cuenta durante el desarrollo de este trabajo.

6.1 CTE DB-HE

El proyecto original se desarrolló entre 2016 y 2017, por lo que durante su redacción se utilizó la normativa energética publicada en 2013. Recientemente se ha publicado una nueva norma que indica criterios energéticos más restrictivos.

Dado que este trabajo debería servir para conocer las posibilidades de la madera en la construcción en el contexto actual, puede tener mayor valor hacer la comparativa en las circunstancias actuales. Por ello, se plantean los siguientes pasos:

- 1) Conocer las prestaciones de proyecto: cálculo de la transmitancia y espesores de aislamiento actuales.
- 2) Calcular las prestaciones de los sistemas originales con la nueva normativa.
- 3) Diseñar una nueva composición que al menos mantenga las mismas prestaciones.

Los sistemas constructivos a comparar, a través de los coeficientes de transmisión, serán:

- Fachadas
- Medianeras
- Cubierta plana
- Cubierta inclinada

Se excluyen las divisorias verticales u horizontales entre viviendas o con patinillos de instalaciones así como los posibles puentes térmicos, si bien, al eliminarse los pilares de fachada, estos se reducirían de forma considerable.

Dado que este estudio se realizará usando de base las secciones de muro obtenidas mediante el cálculo estructural, su desarrollo se realizará después de este último.

6.2 CTE DB-HR

Dada la dificultad de aplicar la ley de masas a los sistemas de madera, el dimensionado de estos se debe hacer mediante el ensayo indicado por los propios fabricantes u otros estudios de carácter científico, debiendo cumplir, en cualquier caso, con el aislamiento mínimo señalado en el CTE HR.

Para establecer los valores mínimos de aislamiento acústico, se debe acudir a la tabla 2.1 *Valores de aislamiento acústico a ruido aéreo, $D_{2m,nT,Atr}$, en dBA, entre un recinto protegido y el exterior, en función del índice de ruido día, L_d* , del CTE DB-HR, que indica lo siguiente:

L_d dBA	Uso del edificio			
	Residencial y hospitalario		Cultural, sanitario ⁽¹⁾ , docente y administrativo	
	Dormitorios	Estancias	Estancias	Aulas
$L_d \leq 60$	30	30	30	30
$60 < L_d \leq 65$	32	30	32	30
$65 < L_d \leq 70$	37	32	37	32
$70 < L_d \leq 75$	42	37	42	37
$L_d > 75$	47	42	47	42

Tal como se indica en la tabla anterior, los valores límite de aislamiento acústico entre recintos protegidos y el exterior dependen de los siguientes parámetros:

- Tipo de uso del edificio: en el caso de este proyecto es un edificio residencial
- Tipo de sala a proteger: la norma procura dotar de mejor protección a aquellas salas destinadas al descanso (dormitorios). En cualquier caso, cuando un dormitorio y otra sala comparten tipología de cerramiento, es lógico aplicar los valores más restrictivos a la hora de diseñarlo, de forma que no sea necesario hacer dos diseños diferentes, lo cual simplifica los trabajos durante el diseño y también durante la ejecución de la obra.
- Para la protección a ruido aéreo es necesario determinar el nivel de ruido existente en la zona. Según el mapa acústico de la ciudad los niveles de ruido son:
 - o Día: 65dB
 - o Noche: 55dB

En este caso, dado que en las calles que forman las fachadas del edificio no se registra exceso de ruido, no es necesario corregir los valores mínimos indicados en el primer mapa acústico mostrado.

Según los datos anteriores, se obtiene los niveles de aislamiento mínimo de la tabla 2.1 del CTE DB-HR

L _d dBA	Uso del edificio			
	Residencial y hospitalario		Cultural, sanitario ⁽¹⁾ , docente y administrativo	
	Dormitorios	Estancias	Estancias	Aulas
L _d ≤ 60	30	30	30	30
60 < L _d ≤ 65	32	30	32	30
65 < L _d ≤ 70	37	32	37	32
70 < L _d ≤ 75	42	37	42	37
L _d > 75	47	42	47	42

Por simplificación, dado que para muchos elementos se utilizan las mismas soluciones constructivas, se tomarán los valores más restrictivos, obtenidos para dormitorios. Esto puede ocasionar que, por lo que se establece en esta tabla, sea más fácil disponer un elemento de hueco con peores propiedades de aislamiento acústico (mayor tamaño, diferente solución de cierre, etc.) en otras estancias.

Estos valores corresponden al conjunto del cerramiento, lo que incluye tanto la parte opaca como los huecos del mismo. En función del porcentaje de huecos, utilizando la tabla 3.1 del CTE DB-HR se obtiene el valor necesario de aislamiento para la parte opaca:

Nivel límite exigido (Tabla 2.1) D _{2m,nT,Atr} dBA	Parte ciega 100 % R _{A,tr} dBA	Parte ciega ≠ 100 % R _{A,tr} dBA	Huecos				
			Porcentaje de huecos R _{A,tr} de los componentes del hueco ⁽²⁾ dBA				
			Hasta 15 %	De 16 a 30%	De 31 a 60%	De 61 a 80%	De 81 a 100%
D _{2m,nT,Atr} = 30	33	35	26	29	31	32	33
		40	25	28	30	31	
		45	25	28	30	31	
D _{2m,nT,Atr} = 32	35	35	30	32	34	34	35
		40	27	30	32	34	
		45	26	29	32	33	

Según lo indicado en esta tabla sobre valores de aislamiento acústico mínimo a ruido aéreo para elementos que componen la envolvente, para forjados (se considera un 0% de huecos) sería suficiente con aportar un aislamiento de 35dBA, mientras que para fachadas se indican 3 posibilidades (35, 40 o 45 dBA) para la parte opaca y, en función del nivel de aislamiento acústico aportado y del porcentaje de huecos, diversas opciones para los elementos que componen los huecos.

Para los cerramientos, además, se debe considerar lo indicado en la tabla 3.2 del CTE DB-HR en función de las propiedades de la hoja principal y del posible trasdosado. En el caso de elementos horizontales se debe aplicar lo indicado en la tabla 3.3 del CTE DB-HR en función del tipo de formación de la pavimentación, de si existe falso techo, y del tipo de tabiquería. En ambos casos, al estar estudiando en este trabajo elementos simples, y dado que las tablas 3.2 y 3.3 indican propiedades acústicas para elementos pesados, la comprobación de los forjados y cerramientos en su conjunto mediante el uso de sistemas basados en madera, se escapa del alcance. Esto también viene condicionado por la necesidad de definir los tipos de encuentro entre elementos para romper vías de transmisión (flancos) así como si es necesario desolarizarlos mediante elementos intermedios con función acústica. Con todo, sería necesario valorar si es posible la justificación de la normativa acústica mediante opción simplificada o general y esto correspondería a una parte más avanzada del proceso de redactar el proyecto que no es posible recoger en este trabajo.

Para los elementos de divisoria interiores (muros o forjados) entre espacios habitables de la misma unidad de uso, es de 33dBA, y de 45dBA si los espacios habitables pertenecen a diferentes unidades de uso (viviendas o zonas comunes); en el caso de elementos de separación verticales con zonas comunes, al haber puertas, se debe exigir un aislamiento mínimo a esta de 20dBA y de 50dBA para el muro. Para los elementos de separación entre espacios habitables y recintos de instalaciones o actividad (hueco de ascensor o garaje) el aislamiento mínimo a ruido aéreo es de 45dBA.

Para las medianeras se impone un aislamiento acústico a ruido aéreo $D_{2m,nT,At}$ mínimo de 40dBA de la composición del muro de medianera del edificio proyectado, y de 50dBA para el conjunto de los dos cerramientos (edificio proyectado y edificio contiguo). A nivel de proyecto solo se debe considerar el primer límite; el segundo se establece para medir in situ el aislamiento mínimo entre edificios.

La aplicación de los requisitos acústicos a sistemas de la envolvente o divisorios es un proceso que se debe realizar en paralelo al ajuste de estos a la normativa térmica, por lo que también se comprobará después de calcular la estructura.

6.3 CTE DB-HS

Dado que el objetivo de este trabajo no es modificar todo el proyecto con nuevas soluciones constructivas, sino adaptar lo mínimo imprescindible para hacerlo compatible con el uso estructural de la madera, se mantendrá la tipología de sistemas constructivos (excluido el elemento resistente principal) empleados de planta primera a ático (fachada ventilada con aplacado de piedra al exterior y trasdosado interior; cubierta plana transitable de tipo invertida con acabado cerámico; cubierta inclinada con aislamiento al exterior y acabado en teja cerámica). Más adelante se evaluarán las condiciones higrotérmicas de las diferentes secciones modificadas.

6.4 CTE DB-SI

Dado el alcance de este proyecto, sólo son aplicables los apartados del CTE DB-SI 1 (propagación interior), 2 (propagación exterior) y 6 (resistencia al fuego de la estructura). De los demás apartados puede ser necesario aplicar sólo algunos puntos muy concretos pero, en general, tienen más influencia durante el proceso de diseño arquitectónico.

CTE DB-SI 1 - PROPAGACIÓN INTERIOR

Dadas las dimensiones de la zona del edificio destinada a vivienda (menos de 2500m², incluyendo zonas comunes) y que el garaje tiene accesos independientes desde la vía pública, se tienen dos sectores:

- 1) Garaje (robotizado): en planta baja y con accesos desde vía pública
- 2) Vivienda: de planta baja a ático, incluyendo zonas comunes a excepción del garaje.
- 3) Espacios integrados de riesgo mínimo: salas de máquinas e instalaciones y similares.

La parte diseñada con elementos de madera corresponde a las viviendas situadas entre planta primera y ático. En planta baja se mantienen los sistemas propuestos en el proyecto original, por lo que los elementos separadores entre sectores (divisorias con garaje realizadas en ladrillo cerámico perforado y forjado de techo de tipo reticular de hormigón armado con casetones prefabricados en hormigón), por lo indicado en el proyecto original ya están diseñados para cumplir con las especificaciones de resistencia (R) y estabilidad € e integridad (I) al fuego establecidas en la norma.

Los elementos separadores entre viviendas y conductos que provengan del garaje (conductos de ventilación) deberán mantener la sectorización en toda la vertical. Por simplificación, se mantendrá la solución de proyecto utilizando sistemas especiales prefabricados (paneles con alta capacidad EI sobre estructura autoportante o como trasdosado directo).

Según se indica en la tabla 1.1 del apartado sobre compartimentación en sectores de incendios del CTE DB-SI, entre viviendas y entre viviendas y zonas comunes los elementos separadores deben ser, al menos, EI60. En el caso de este trabajo esto afecta a los forjados entre plantas, a las divisorias entre las viviendas con la caja de escalera y a las divisorias entre las viviendas de planta segunda.

Por último, dentro de este apartado queda considerar las condiciones de protección al fuego entre viviendas o zonas comunes (sector 2) con aquellos espacios integrados de riesgo especial. Dentro del sector 2 se encuentran los siguientes espacios con esta posible clasificación:

- Planta baja: contadores
- Plantas 1 a 4: patinillos
- Planta 4 - ático: sala de máquinas.

Para los elementos separadores de estos espacios con otros sectores se debe garantizar una EI120. En el proyecto original esto se conseguía mediante el uso de elementos cerámicos (fábricas de ladrillo) revestidas con placas de yeso laminado por la cara vista y enfoscado por el interior en aquellos espacios registrables. Para este trabajo, siguiendo con la utilización de elementos industrializados, se dispondrán paneles prefabricados con función de protección al fuego sobre estructura autoportante o dispuestos como trasdosados sobre otro elemento divisorio basado en panel CLT.

En cuanto a la clasificación de la reacción al fuego de los elementos constructivos, decorativos y de mobiliario, los materiales utilizados deberán cumplir, al menos, con lo establecido en la tabla 4.1 del documento básico CTE SI 1, que se muestra a continuación:

Situación del elemento	Revestimientos ⁽¹⁾	
	De techos y paredes ⁽²⁾⁽³⁾	De suelos ⁽²⁾
Zonas ocupables ⁽⁴⁾	C-s2,d0	E _{FL}
<i>Pasillos y escaleras protegidos</i>	B-s1,d0	C _{FL} -s1
Aparcamientos y recintos de riesgo especial ⁽⁵⁾	B-s1,d0	B _{FL} -s1
Espacios ocultos no estancos, tales como patinillos, falsos techos y suelos elevados (excepto los existentes dentro de las viviendas) etc. o que siendo estancos, contengan instalaciones susceptibles de iniciar o de propagar un incendio.	B-s3,d0	B _{FL} -s2 ⁽⁶⁾

La empresa Egoín, dentro de su documentación técnica, recoge en el *Anexo IV Certificados y ensayos de los paneles CLT* un ensayo de sus productos a fuego con el siguiente resultado en cuanto a reacción:

		EGO_CLT™	D-s2,d0
RB 2	Reacción al fuego	EGO_CLT™ de 60 mm de espesor con una capa de revestimiento de alerce de 10 mm de espesor.	C-s1,d0
	Resistencia al fuego	Véase el anexo D	

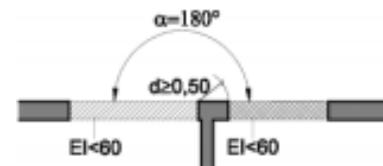
Por tanto, para el uso de CLT en elementos de separación, será necesario revestirlo de otro material que le aporte la reacción mínima exigida.

CTE DB-SI 2 – PROPAGACIÓN EXTERIOR

La primera parte de esta sección de la norma está dedicada a medianeras y fachadas. En la primera frase de este apartado se establece que todos los elementos verticales separadores de otro edificio deben ser al menos EI120.

Por otro lado, para fachadas entre edificios o para separación entre sectores en horizontal se establece una franja de seguridad de al menos EI60. El ancho de esta franja vertical depende del ángulo entre fachadas contiguas y distancia existente entre elementos (huecos o planos opacos) con EI<60.

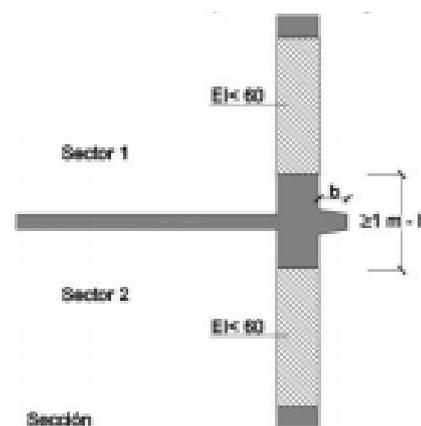
En el caso de este proyecto, las fachadas proyectadas forman un único plano con las fachadas de los edificios contiguos, por lo que el ángulo entre ellas es de 180°. Atendiendo a lo indicado en el CTE DB-SI 2, de donde se extrae la imagen siguiente, el ancho de la franja debe ser de al menos 50cm.

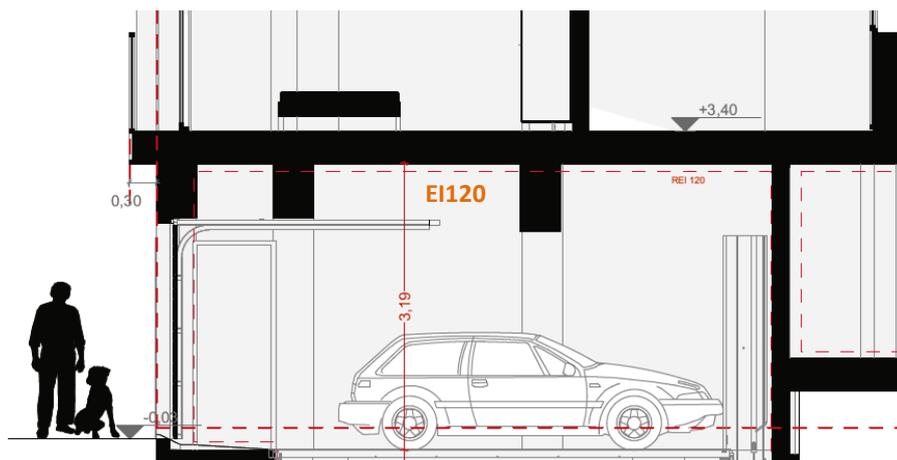


La normativa local establece una franja opaca en vertical de al menos 100cm de ancho, por lo que, estableciendo una sección constructiva que aporte como mínimo una EI60 para dicha franja, la exigencia anterior quedaría cubierta.

Para el caso de separación en vertical de zonas con una EI<60 entre sectores contiguos se establece, en todo caso, una franja de 100cm de, al menos, EI60. En caso de salientes se debe considerar el ancho de este en horizontal para medir la distancia de la franja de seguridad.

Para este proyecto, esto se debe aplicar entre el hueco de la puerta del garaje (sector 1) y los huecos de fachada de la vivienda de planta primera (sector 2). En este caso, como se ve en la imagen siguiente, el plano de la puerta del garaje se encuentra alineado a vial mientras que el plano de la fachada se desplaza en horizontal, apoyándose en un voladizo.





Como se puede ver en la imagen anterior, extraída de la sección transversal del proyecto original, existe una franja de seguridad de al menos 100cm. Además, el cerramiento de planta baja está formado por elementos que aportan al menos EI120, al igual que el forjado.

CTE DB-SI 6 – RESISTENCIA AL FUEGO DE LA ESTRUCTURA

La resistencia al fuego mínima de los elementos estructurales principales para comprobación mediante métodos simplificados, se establece en el apartado 3 de esta sección del CTE DB-SI 6.

Todos los elementos estructurales deben cumplir los parámetros indicados en la tabla 3.1 de dicho apartado:

Uso del sector de incendio considerado ⁽¹⁾	Plantas de sótano	Plantas sobre rasante		
		altura de evacuación del edificio		
		≤15 m	≤28 m	>28 m
Vivienda unifamiliar ⁽²⁾	R 30	R 30	-	-
Residencial Vivienda, Residencial Público, Docente, Administrativo	R 120	R 60	R 90	R 120
Comercial, Pública Concurrencia, Hospitalario	R 120 ⁽³⁾	R 90	R 120	R 180
Aparcamiento (edificio de uso exclusivo o situado sobre otro uso)		R 90		
Aparcamiento (situado bajo un uso distinto)		R 120 ⁽⁴⁾		

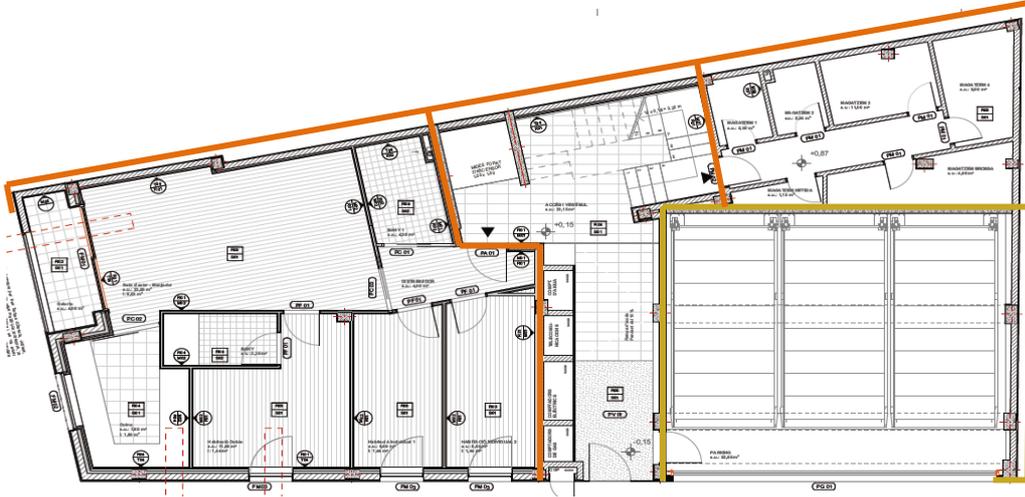
Se han señalado los requisitos aplicables para la zona residencial del edificio, considerando que la altura total de evacuación, en el caso más desfavorable y medida según lo indicado en el CTE DB-SI 4 Evacuación de ocupantes, de 12,55m.

Además, en aquellos casos que un elemento estructural forme parte de un elemento de cerramiento, de separación entre sectores o con otro edificio, o de separación entre viviendas deberá cumplir la EI más desfavorable para cada caso. En esos casos se deberá verificar las propiedades REI de la sección constructiva en la que esté integrado el elemento estructural. Los requisitos de estabilidad (E) e integridad (I) para elementos con las funciones descritas se han quedado recogidos en el apartado 5.5 CTE DB-SI 1 de esta memoria.

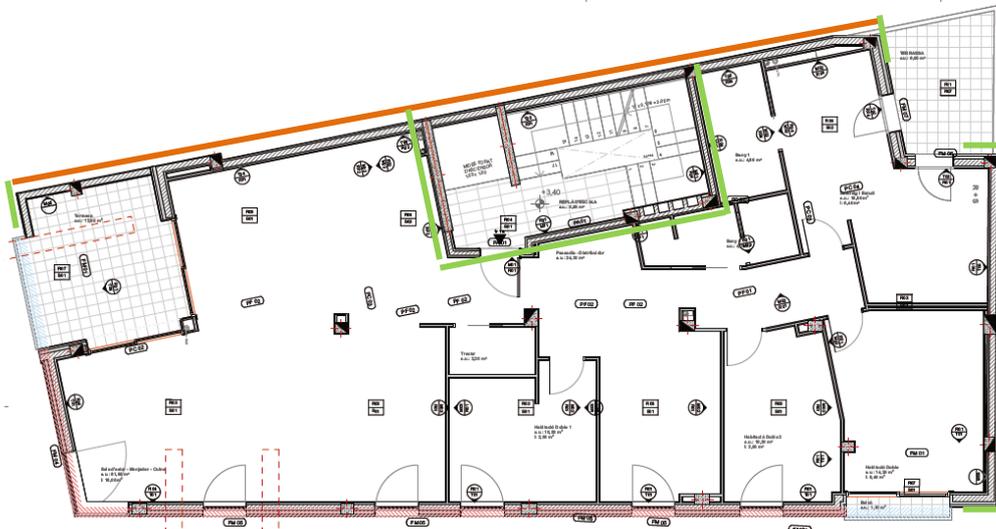
Para el caso de elementos estructurales principales que formen parte de una cubierta ligera no prevista para ser utilizada en la evacuación de ocupantes y cuya altura respecto de la rasante exterior no exceda de 28m. la normativa permite reducir la resistencia al fuego mínima de estos elementos a R30 si su fallo no compromete la estabilidad de las plantas inferiores, de otros edificios o de otros sectores. Esto podrá aplicarse siempre que la carga muerta de la cubierta no exceda de 1KN/m². Más adelante se podrá comprobar que en la cubierta del ático se da esta circunstancia.

Para el predimensionado de la estructura (y cerramiento donde corresponda) se tendrán en cuenta los valores de protección al fuego indicados en los prontuarios de los diferentes fabricantes (Egoin, KLH, Stora Enso...) siguiendo los requisitos mínimos señalados en los siguientes planos, que son resultado de aplicar lo establecido en el CTE DB-SI.

Planta baja:



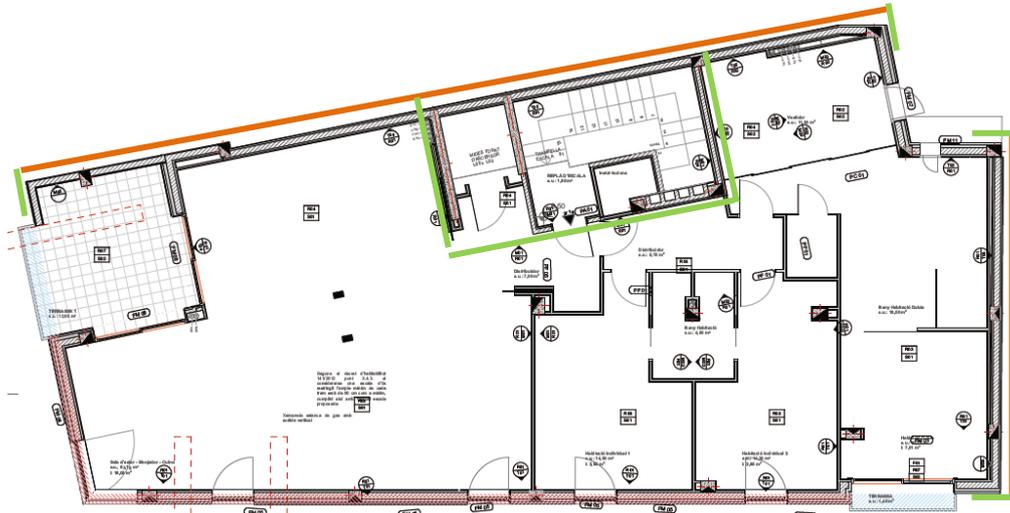
Planta primera:



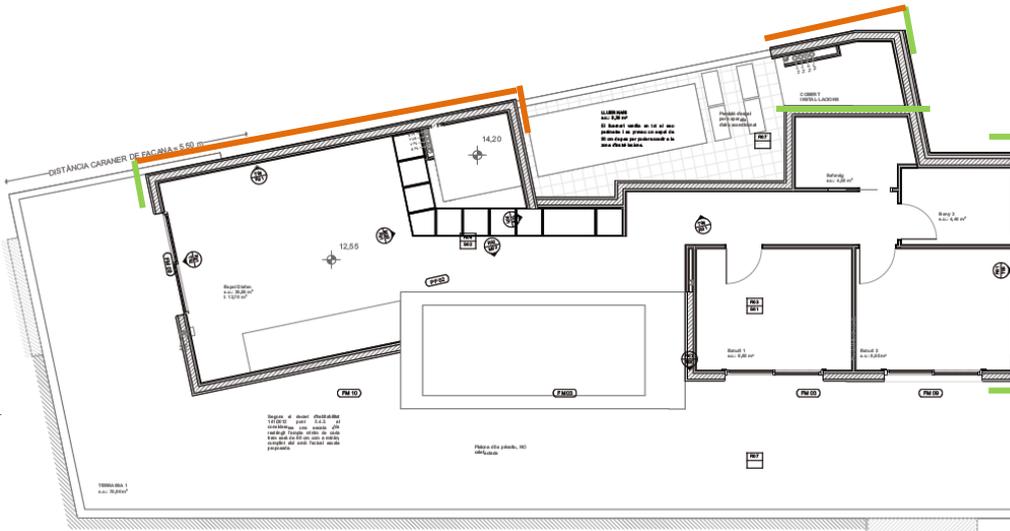
Planta segunda:



Planta tercera:



Planta ático:



Sección longitudinal:



Leyenda



DIMENSIONADO SEGÚN PROTECCIÓN A FUEGO

Durante el proceso de dimensionado de la estructura, y en paralelo, se debe tener en consideración lo indicado en la normativa de protección al fuego, la cual también puede condicionar las dimensiones de los elementos estructurales. Por tanto, a fin de disponer unas dimensiones orientativas de los elementos estructurales, como paso inicial del proceso de dimensionado de la estructura, se realizará el predimensionado según protección al fuego de los elementos de CLT ya que todos los fabricantes disponen de prontuario técnico donde se relaciona con los posibles estados de carga y luces entre apoyos.

La resistencia final al fuego se estudiará numéricamente más adelante mediante el programa informático Dlubal. Para aquellos elementos que se diseñen con acero se considerará protección mediante sistemas auxiliares con propiedades de protección al fuego (falsos techos, trasdosados, pinturas intumescentes...).

6.5 CTE DB-SE

En general, la estructura se dimensionará según lo indicado en el CTE DB-SE y los subapartados de esta que puedan ser aplicables (AE, M, A). Las acciones aplicables a considerar se pueden obtener a través de cuantificar las cargas existentes en el edificio (cargas permanentes) siguiendo el procedimiento llamado “descenso de cargas” o a través de lo señalado en el apartado Acciones de la Edificación (AE; sobrecarga de uso, nieve o viento). Para las sobrecargas de uso se identifican zonas residenciales (A1) en las plantas dedicadas a vivienda, o cubiertas accesibles para conservación (G1). En el caso de los rellanos de planta la sobrecarga de uso a utilizar es la misma que el resto de la

planta aumentada en 1KN/m². Las sobrecargas indicadas vienen tabuladas en el CTE DB-SE-AE tabla 3.1; a continuación se muestra el extracto de esta tabla:

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20° Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾	1 ⁽⁴⁾⁽⁶⁾	2
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0,4 ⁽⁴⁾	1
				0	2

En el caso de la madera puede ser necesario recurrir al Eurocódigo (EC-5) o al anexo austriaco al Eurocódigo (cálculo de los factores de corrección a cortante K33 y K88).

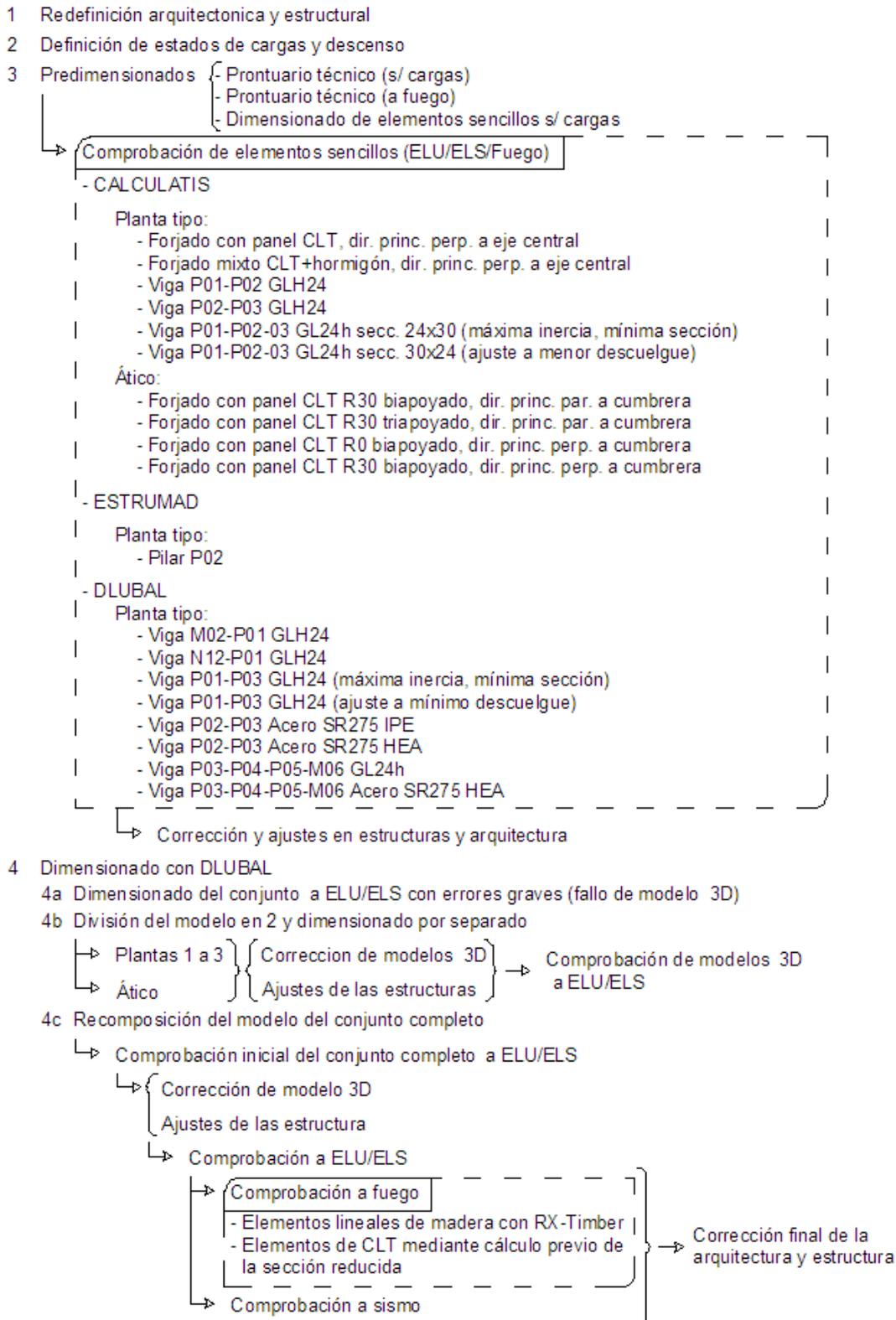
Tanto para el cálculo de las cargas de nieve y viento se tendrá en cuenta la localización del edificio en Terrassa, [provincia de Barcelona](#), a una altura de 286m y en un entorno urbano rodeado de edificios o árboles de igual altura. La acción del viento se cuantificará, en dos direcciones, siguiendo lo indicado en el Anejo D del CTE-DB-AE mientras que para la nieve se seguirá lo señalado en el Anejo E de la misma norma.

Los cálculos quedarán recogidos en el apartado correspondiente de esta memoria.

No es objeto de este trabajo diseñar o dimensionar los sistemas de unión y/o anclaje entre elementos estructurales.

7 DIMENSIONADO ESTRUCTURAL

Una vez establecidas las bases del proyecto arquitectónico (anteproyecto) utilizando sistemas basados en madera, se puede pasar al dimensionado estructural del edificio, el cual debe validar las ideas iniciales o establecer, mientras se hace dicho trabajo, posibles modificaciones que hagan viable su ejecución. El proceso de cálculo y rediseño seguido se puede resumir en el siguiente esquema de síntesis:



El punto 1 del esquema anterior ha quedado resuelto con lo señalado hasta el apartado 6 de esta memoria, que han servido de base para crear los planos del Anexo III y que han sido corregidos y modificados posteriormente al desarrollar los apartados 2 a 4 del mismo esquema. Los cálculos numéricos se recogen en los anexos IV y V.

7.1 DESCENSO DE CARGAS

A continuación, aplicando lo señalado en el CTE SE, se indican las cargas consideradas en el edificio.

Permanentes

Cargas de servicio (uso)

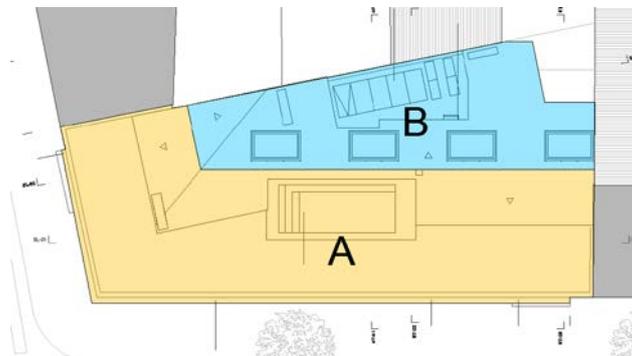
- Vivienda: 2kN/m^2
- Zonas comunes: 3kN/m^2
- Cubiertas accesibles por mantenimiento: 1kN/m^2

No se han aplicado coeficientes de reducción de sobrecargas

Nieve

Para la nieve, si se parte de lo indicado en la tabla 3.8 de dicha norma, corresponde una carga de $0,40\text{ kN/m}^2$ para la capital de provincia; si se sigue lo indicado en el Anejo E, esta carga sube hasta $0,50\text{ kN/m}^2$ aunque por lo señalado en el apartado 3.5.1 de la norma, al encontrarse el edificio protegido de la acción del viento (centro de ciudad, zona urbana, rodeado de árboles altos y de otros edificios), la carga puede reducirse en un 20%, por lo que igualmente, resulta una carga de $0,40\text{ kN/m}^2$. Aplicable tanto en cubiertas planas como inclinadas.

Teniendo en cuenta los dos planos de la cubierta, aplicando lo indicado en el CTE SE-AE, se obtienen las siguientes combinatorias de nieve:



Caso 1 (++) : faldón A= 100%; faldón B= 100%

Caso 2 (+-) : faldón A= 100%; faldón B= 50%

Caso 3 (-+) : faldón A= 50%; faldón B= 100%

Viento

Se calcula siguiendo lo indicado en el Anejo D del CTE-SE-AE. Según los parámetros indicados se obtienen los siguientes datos:

- Zona eólica C
- Grado de aspereza del entorno IV (zona urbana en general)
- $Q_b = 0,52\text{ kN/m}^2$
- Esbeltez = 0,7
- $C_e = 2,1$
- C_p (global) = 0,8 $\rightarrow Q_p = 0,84\text{ kN/m}^2$
- C_s (global) = -0,4 $\rightarrow Q_s = -0,42\text{ kN/m}^2$

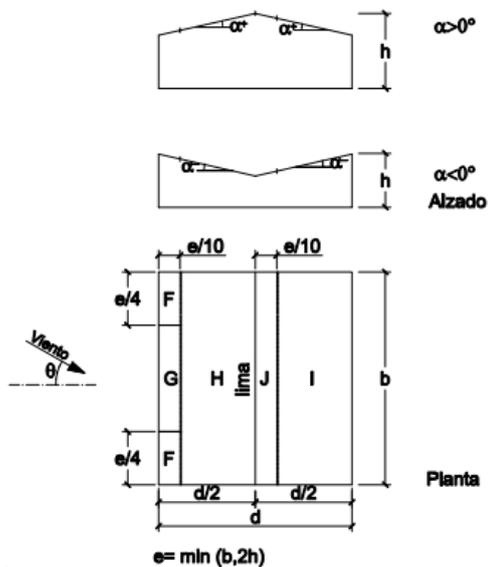
Los coeficientes C_p y C_s indicados en el apartado anterior se corresponden a coeficientes globales que podrían usarse sobre la envolvente. Estas cargas se utilizarán para realizar el predimensionado de una forma simplificada.

Sin embargo, para una mayor precisión, y ya que el dimensionado definitivo se va a realizar utilizando un programa informático, para el cálculo final se aplicarán cargas de viento obtenidas según lo indicado en el anejo D del CTE SE-AE

Para cubiertas inclinadas a dos aguas se aplica lo recogido en las tablas D.6 del citado anejo. Dado que la cubierta forma una L con dos faldones en cada lado, para el proyecto se consideran los siguientes casos de viento en función del ángulo de ataque con respecto a los faldones mencionados:

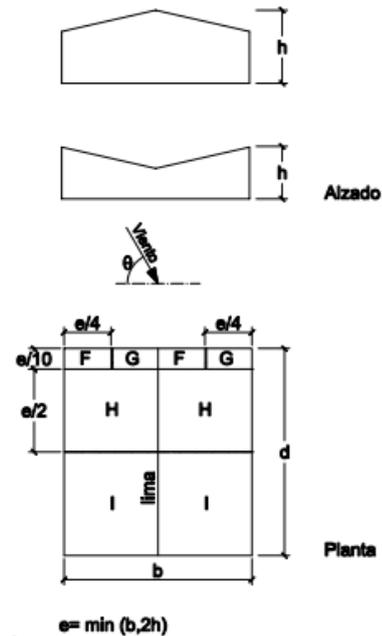
Caso 1 (++,--,+,-,+):

a) Dirección del viento $-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$



Caso 2 (++,--):

b) Dirección del viento $45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$

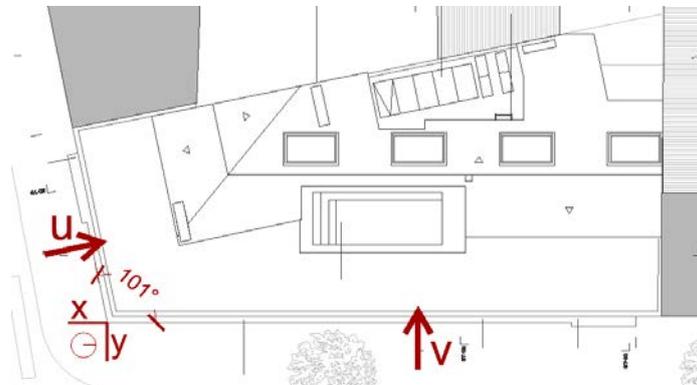


De esta forma, para cada dirección de ataque del viento, se pueden obtener los valores de carga aplicables para cada caso de la cubierta inclinada. La cuantificación de estas cargas quedan recogidas, para cada caso, en las siguientes tablas:

Caso 1 $\alpha=16,70^\circ$ $\beta=16,70^\circ$		++		--		+-		-+	
		Cpes	Q (Kn/m ²)						
FACHADAS	A	-1,2	-0,97	-1,2	-0,97	-1,2	-0,97	-1,2	-0,97
	B	-0,8	-0,64	-0,8	-0,64	-0,8	-0,64	-0,8	-0,64
	C	-0,5	-0,40	-0,5	-0,40	-0,5	-0,40	-0,5	-0,40
	D	0,8	0,640	0,8	0,640	0,8	0,640	0,8	0,640
	E	-0,583	-0,583	-0,583	-0,583	-0,583	-0,583	-0,583	-0,583
CUBIERTAS	F	0,257	0,21	-0,855	-0,855	-0,855	-0,855	0,257	0,21
	G	0,257	0,21	-0,766	-0,766	-0,766	-0,766	0,257	0,21
	H	0,223	0,18	-0,289	-0,289	-0,289	-0,289	0,223	0,18
	I	--	--	-0,40	-0,32	--	--	-0,40	-0,32
	J	--	--	-0,943	-0,76	--	--	-0,943	-0,76

Caso 2 $\alpha=0^\circ$ $\beta=0^\circ$		++		--	
		Cpes	Q (Kn/m ²)	Cpes	Q (Kn/m ²)
FACHADAS	A	-1,2	-0,97	-1,2	-0,97
	B	-0,8	-0,64	-0,8	-0,64
	C	-0,5	-0,40	-0,5	-0,40
	D	0,8	0,640	0,8	0,640
	E	-0,583	-0,583	-0,583	-0,583
CUBIERTAS	F	-1,277	-1,03	--	--
	G	-1,311	-1,06	--	--
	H	-0,623	-0,50	--	--
	I	-0,50	-0,40	--	--

Aplicando estos casos de carga de viento al proyecto, y considerando dos posibles direcciones de ataque coincidentes con la perpendicular a las fachadas principales, surgen las siguientes combinatorias de viento:



4 combinatorias en X (u): ++,-,-,+,-,+

4 combinatorias en Y (v): ++,-,-,+,-,+

Los casos básicos de carga, que surgen de lo indicado anteriormente, son los siguientes:

C1: cargas permanentes	N1: nieve 1 (++)	V1: viento X 1 (++)	V5: viento Y 1 (++)
C2: SU (A1) - viviendas	N2: nieve 2 (+-)	V2: viento X 2 (--)	V6: viento Y 2 (--)
C3: SU (G1) - mantenim.	N3: nieve 3 (-+)	V3: viento X 3 (+-)	V7: viento Y 3 (+-)
		V4: viento X 4 (-+)	V8: viento Y 4 (-+)

Llevando estas cargas al proyecto, quedan las siguientes tablas de resumen:

(Nota: para el viento se indica la carga obtenida para un coeficiente global, que se utilizará durante el predimensionamiento por prontuario).

ELEMENTOS HORIZONTALES

Estado de cargas (por m²):

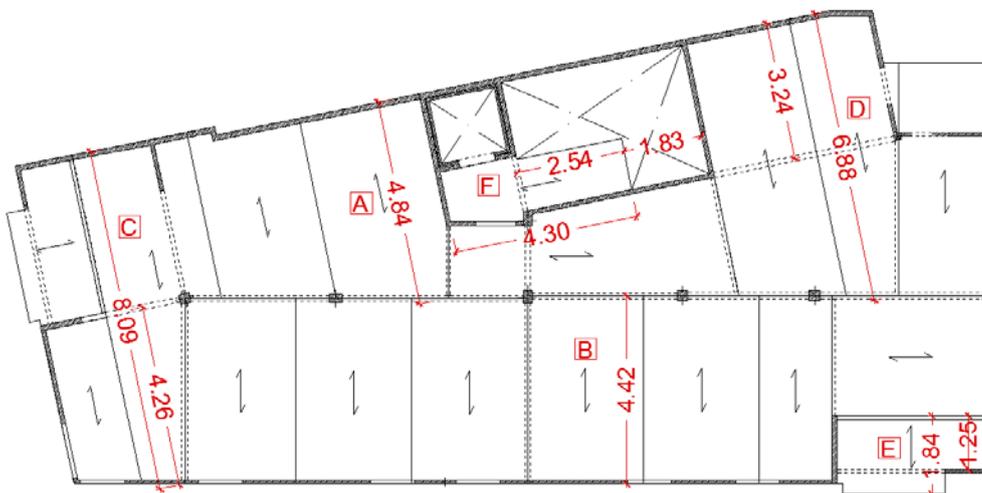
En Kn/m ²	Techo 2º/3º/4º	Cub.plana	Cub. Incl
C. compresión	0	0	1,05
Pavimento	1,08	1,08	
form. Cubierta		0,8	0,9
Tabiquería	0,75	0,3	
Total QP	1,83	2,18	1,95
Uso/Mant	2	2	1
Nieve		0,4	0,4
Viento (presión)		0,84	0,84
Total CV	2	3,24	2,24
Total	3,83	5,42	4,19

Con la distribución de paneles ajustada al sistema estructural diseñado, se identifican 5 posibles zonas como las más desfavorables en las plantas tipo:

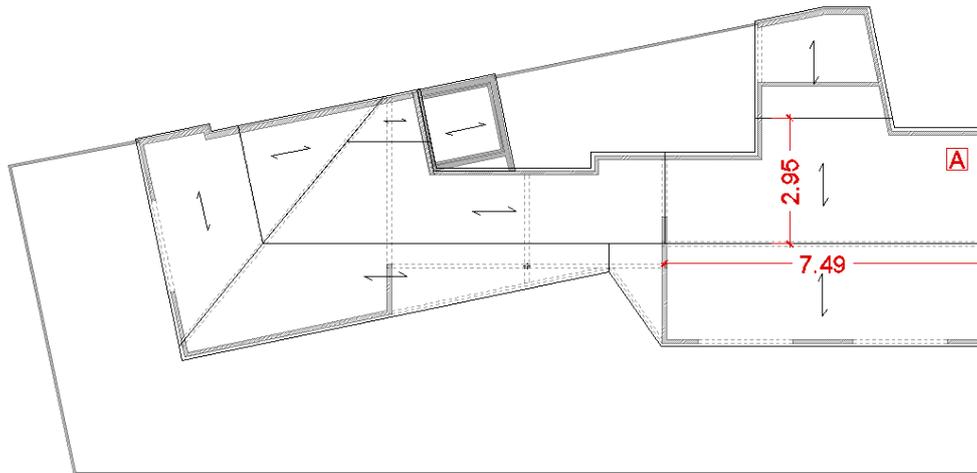
- A y B: panel biapoyado en interior (sobrecarga de uso A1)
- C y D: panel triapoyado en interior (sobrecarga de uso A1)
- E: panel biapoyado en balcón (sobrecarga de uso A1)

Además de los paneles anteriores, también se debe predimensionar el panel F, correspondiente al rellano (sobrecarga de uso A1 + 1kN/m²) que, teniendo en cuenta las zancas de la escalera, se puede considerar triapoyado.

Forjado techo planta 1 y 2:

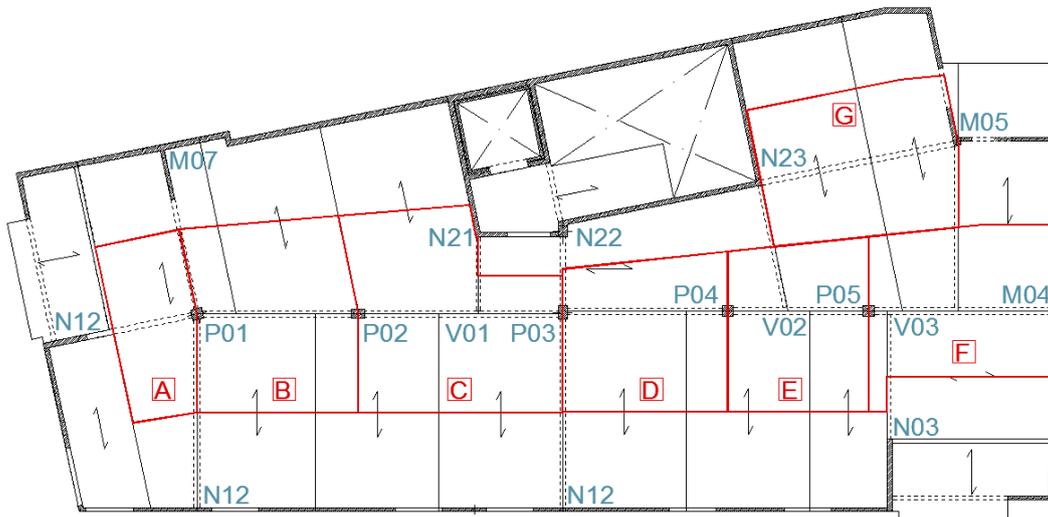


En el caso del ático, se identifica el panel A como el que tiene la situación más desfavorable:



Para las vigas, se identifican dos pórticos principales en el eje central del edificio (P01-P02-P03 y P03-P04-P05-M04), paralelos a la fachada principal (a c/ Emili Badiella), prácticamente continuos entre ellos pero con el eje ligeramente desplazado (7cm), otro portico (N12-P01) que da continuidad a los anteriores pero que se gira para acometer a la fachada a c/ Mossen Pursals y un último (N23-M05) que une el núcleo de escaleras con las fachadas al patio interior. En la imagen posterior se señalan las áreas tributarias correspondientes a cada caso. Mediante el predimensionado posterior se resolverá la viabilidad de disponer vigas continuas apoyadas sobre varios pilares (en testa) o si es más favorable disponer pilares continuos en la vertical y situar entre ellos vigas biapoyadas en sus extremos.

Forjado techo planta 1 y 2:



Los puntos indicados corresponden a:

- P: pilares
- N: núcleo vertical (paneles con desarrollo en vertical)
- M: muros de la envolvente (paneles con desarrollo en horizontal)
- V: encuentro entre vigas sin apoyo

Además de estas vigas principales, se han dispuesto otras con función de riostra entre el pórtico central y la envolvente. Las longitudes, cargas y áreas tributarias se recogen en la tabla siguiente:

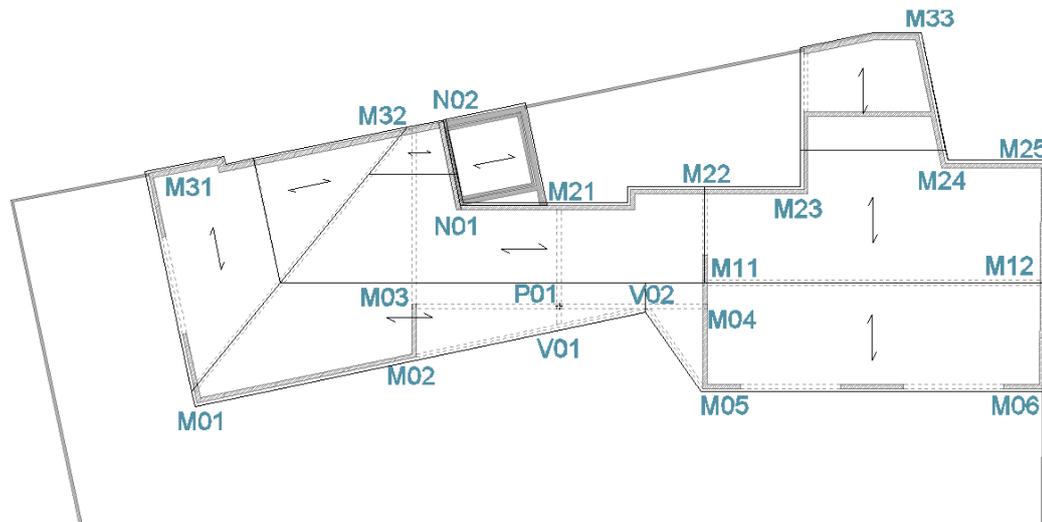
Jácena	L (m)	Strib (m ²)	QP (KN/m)	QF (KN/m)	SU (KN/m)
N12-P01	1,87	6,97	6,821	2,326	7,455
M02-P01	4,29	1,88	0,802	0,273	0,876
P01-M07	3,89	Riostra			
P01-P02	3,52	14,76	7,674	2,617	8,386
P02-P03	4,39	16,68	6,953	2,371	7,599
N21-V01	1,88	Riostra			
P03-P04	3,65	12,42	6,227	2,123	6,805
P04-P05	3,08	11,6	6,892	2,350	7,532
N23-V02	3	Riostra			
P05-M04	4,13	13,89	6,155	2,099	6,726
N03-V03	2,83	Riostra			

Las cargas señaladas en la tabla anterior son:

- QP: carga permanente (formación del pavimento y tabiquería)
- QF: peso del forjado
- SU: sobrecarga de uso A1

En el caso del forjado de techo de planta 3 la geometría difiere en algunas partes y, además, recibe cargas de nieve y viento.

En ático se disponen las siguientes vigas:



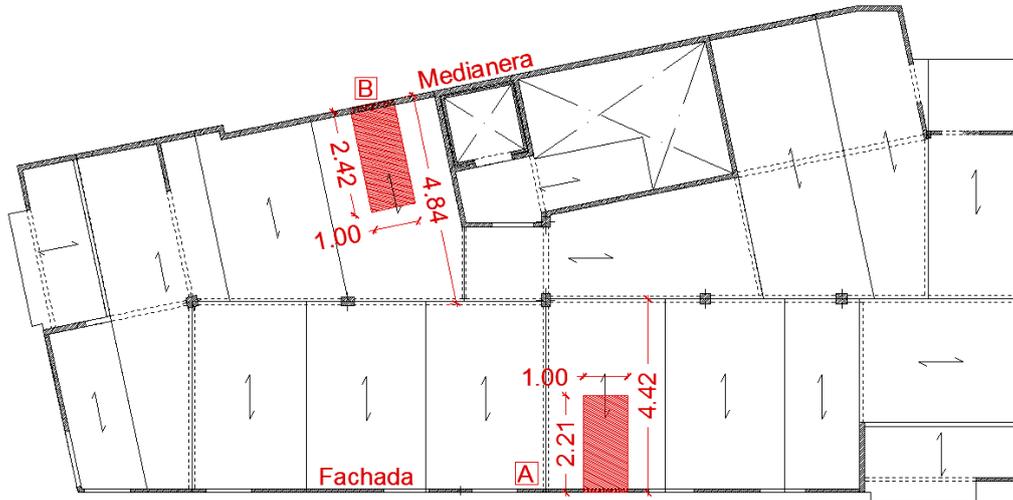
Jácena	L (m)	Tipo
M01-M32	3,09 + 4,44	Caballote, viga curva de canto variable
M03-M32	0,52 + 3,48	Caballote, viga curva de canto variable
M03-P01-M04	3,20 + 3,20	Directriz recta
M02-V02	5,19	Directriz recta
V02-M05	2,14	Directriz recta
V01-P01-M21	0,58 + 0,52 + 2,18	Caballote, viga curva de canto variable
M11-M12	7,44	Viga de cumbrera, directriz recta

ELEMENTOS VERTICALES

Para muros portantes se consideran igualmente los casos de mayor luz y carga, pero al mismo tiempo se debe considerar la función adicional de hoja resistente de fachada o medianera, aplicando los parámetros descritos en los

apartados anteriores. Al ser elementos lineales (muros de carga) se considera para el cálculo un área tributaria de un metro de ancho y largo la mitad de la luz del paño de forjado que carga directamente. Para el predimensionado se identifican las dos áreas siguientes como las más determinantes:

Forjado techo planta 1 y 2:

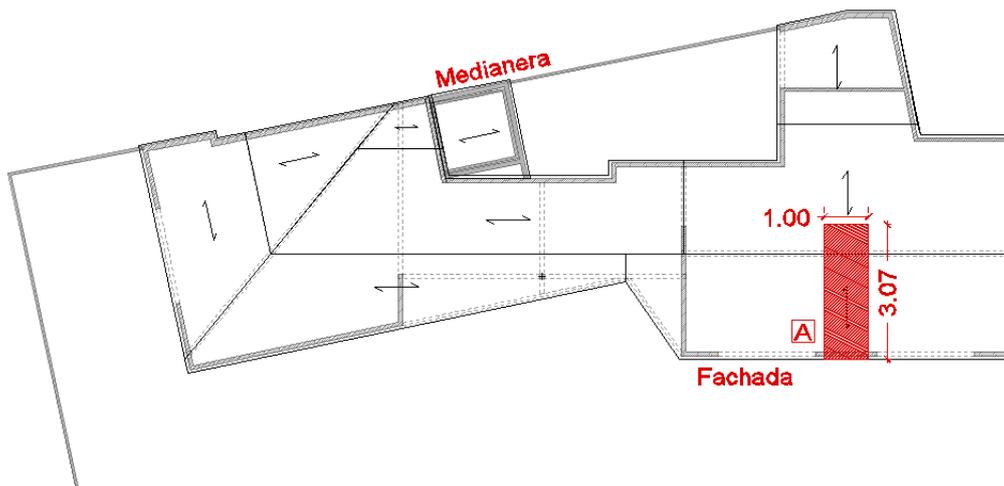


El descenso de cargas para estos dos tramos de muro es el siguiente:

Estado de cargas considerado - Tramo A														
Nota: $QP' = QP + PP$														
L vano (m)	1	CARGAS EN TESTA DE TRAMO												TOTAL
		PP		QP		QP'		SU		N		V		
		Ut	Ac	Ut	Ac	Ut	Ac	Ut	Ac	Ut	Ac	Ut	Ac	
Cubierta	(KN/m ²)	0,9		4,8				2		0,4		0,9		
PP Muro P3	(KN/m)		0,5											
QxL	(KN/m ²)		2,71		11,76		14,47		4,90		0,98		2,11	22,45
F. Suelo P3	(KN/m ²)	0,9		3,6				2						
PP Muro P2	(KN/m)		1,55											
QxL	(KN/m ²)		6,46		20,58		27,04		9,80		0,98		2,11	39,93
F. Suelo P2	(KN/m ²)	0,9		3,6				2						
PP Muro P1	(KN/m)		1,55											
QxL	(KN/m ²)		10,22		29,40		39,62		14,70		0,98		2,11	57,40
F. Suelo P1														

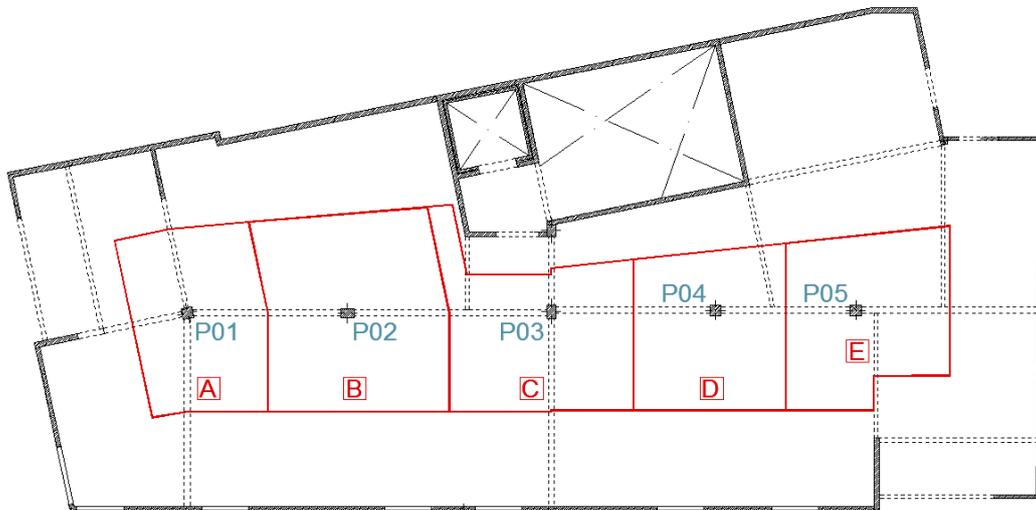
Estado de cargas considerado - Tramo B														
Nota: $QP' = QP + PP$														
L vano (m)	4,9	CARGAS EN TESTA DE TRAMO												TOTAL
		PP		QP		QP'		SU		N		V		
		Ut	Ac	Ut	Ac	Ut	Ac	Ut	Ac	Ut	Ac	Ut	Ac	
Cubierta	(KN/m ²)	0,9		4,8				2		0,4		0,9		
PP Muro P4	(KN/m)		2,45											
QxL	(KN/m ²)		2,45		11,76		14,21		4,90		0,98		2,11	22,20
F. Suelo P4	(KN/m ²)	0,9		3,6				2						
PP Muro P3	(KN/m)		2,45											
QxL	(KN/m ²)		4,66		8,82		27,69		9,80		0,98		2,11	40,57
F. Suelo P3	(KN/m ²)	0,9		3,6				2						
PP Muro P2	(KN/m)		2,45											
QxL	(KN/m ²)		9,31		8,82		45,82		14,70		0,98		2,11	63,60
F. Suelo P2	(KN/m ²)	0,9		3,6				2						
PP Muro P1	(KN/m)		2,45											
QxL	(KN/m ²)		13,97		8,82		68,60		19,60		0,98		2,11	91,29
F. Suelo P1														

En el caso del tramo de muro B se ha considerado desde planta 1 hasta ático, incluyendo consecuentemente las cargas que son aplicables a dicha planta, aunque por prevención se han tomado las de la zona más desfavorable (zona A). Para los muros de fachada del ático se puede dar por valido este mismo cuadro de cargas aplicadas en la planta correspondiente.



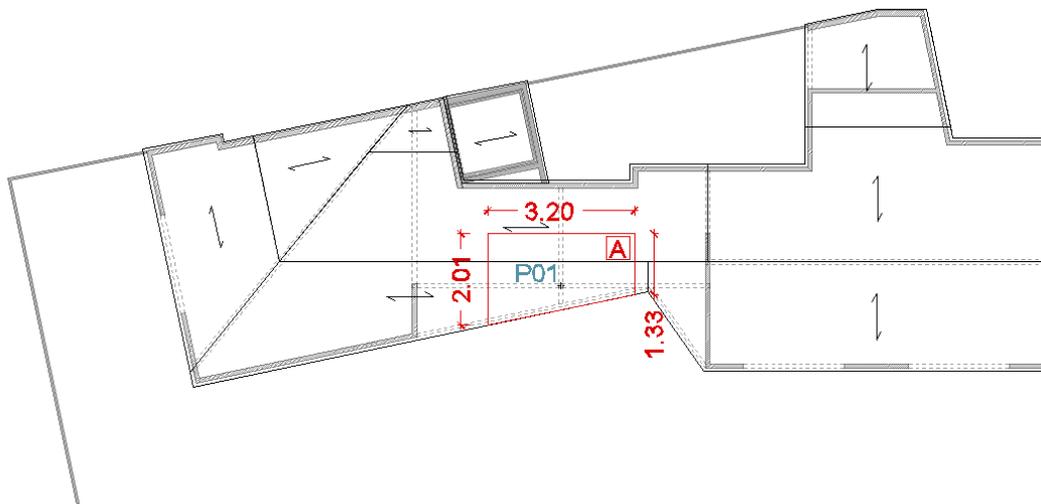
Por último, para pilares se tienen las siguientes áreas tributarias:

Planta 1 y 2:



Los pilares P01, P03, P04 y P05 son, a nivel conceptual, continuos desde techo de planta baja hasta techo de planta tercera. El pilar P02 nace también en techo de planta baja y continúa hasta techo de planta segunda, donde se bifurca en dos pilares apeados y desplazados del eje para conseguir encajar la escalera que une la planta tercera con el ático. Los 5 pilares continúan en planta baja en hormigón armado, pero su dimensionamiento, incluido en el capítulo 10 de esta memoria, no corresponde a esta parte, si bien es necesario conocer las resultantes originadas en el techo de planta baja.

En la cubierta solo se dispone un único pilar que nace apeado respecto de los pilares de la planta inferior:



Para realizar el descenso de cargas, que servirá para el predimensionado de los elementos en situación más desfavorable, las áreas tributarias irregulares se han simplificado en áreas rectangulares equivalentes, procurando en todo momento considerar la situación más crítica. Si bien este cambio de área tiene el inconveniente de eliminar la variabilidad de la carga sobre los elementos estructurales y los efectos generados por dicha situación, este hecho queda difuminado en el proceso al realizar en pasos posteriores un cálculo con elementos finitos mediante un programa informático.

7.2 CONSIDERACIONES PREVIAS

CONSIDERACIONES NORMATIVAS DEL CTE DB SE-M y Anexo Austriaco al EC5

a) Clase de servicio

La clase de servicio define la exposición de un material estructural a la humedad y su correcta determinación tiene una importante influencia en los cálculos a realizar ya que pueden variar los valores del factor K_{mod} aplicable que se definirá más adelante. Según el CTE SE-M, las posibles clases de servicio son las siguientes:

- 1 Cada elemento estructural considerado debe asignarse a una de las clases de servicio definidas a continuación, en función de las condiciones ambientales previstas:
 - a) clase de servicio 1. Se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 65% unas pocas semanas al año.
 - b) clase de servicio 2. Se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año.
 - c) clase de servicio 3. Condiciones ambientales que conduzcan a contenido de humedad superior al de la clase de servicio 2.
- 2 En la clase de servicio 1 la humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas no excede el 12%. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera expuestas a un ambiente interior.
- 3 En la clase de servicio 2 la humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas no excede el 20%. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera a cubierto, pero abiertas y expuestas al ambiente exterior, como es el caso de cobertizos y viseras. Las piscinas cubiertas, debido a su ambiente húmedo, encajan también en esta clase de servicio.
- 4 En la clase de servicio 3 la humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas excede el 20%. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera expuestas a un ambiente exterior sin cubrir.

En este proyecto podrían darse dos situaciones:

- Madera estructural en zonas de balcones: dependiendo de la solución constructiva, podría asimilarse a la situación de cobertizo o visera; correspondería a clase de servicio 2.
- Madera estructural en el interior del edificio: resto de casos; correspondería a clase de servicio 1.

Dado que en la zona de balcones se contempla revestir los elementos verticales y disponer pavimento por criterios técnicos tal como se hace en el proyecto original, solo podrían quedar expuestas algunas zonas de forjado por su parte inferior donde solo se coloca falso techo por criterios de diseño y no técnicos. Esto lleva a definir la clase de servicio de todos los elementos como CS1. Más adelante se verá como los valores del factor K_{mod} son iguales para ambos casos de clase de servicio.

b) K_{mod}

El factor K_{mod} depende de la clase de servicio, definida anteriormente, del material (para este trabajo se contempla madera en CLT/aserrada o madera laminada encolada) y de la clase de duración de la carga. Este último condicionante se resuelve para cada caso de combinatoria durante el proceso de cálculo. Por tanto, de la tabla 2.4 del CTE DB SE-M, se extrae el siguiente extracto:

Tabla 2.4 Valores del factor k_{mod} .

Material	Norma	Clase de servicio	Clase de duración de la carga				
			Permanente	Larga	Media	Corta	Instantánea
Madera maciza	UNE-EN 14081-1:2016	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90
Madera laminada encolada	UNE-EN 14080:2013	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Los valores del factor K_{mod} aplicables, tanto para madera laminada como para madera maciza (CLT) son los correspondientes en la primera fila de la tabla para cada material, pero con valores coincidentes.

c) Coeficientes para valores de cálculo de la resistencia estructural

Dentro del CTE-SE se establecen las ecuaciones a utilizar para las posibles combinatorias de acciones así como diversos coeficientes que son aplicables: coeficientes parciales de seguridad (tabla 4.1) y coeficientes de simultaneidad (tabla 4.2). Para este trabajo, al basarse en la normativa existente actualmente, se utilizarán dichos valores durante el proceso de cálculo.

d) Aptitud al servicio (ELS), deformaciones admisibles.

Las consideraciones de flechas máximas admitidas son las siguientes:

- Integridad: se considera la situación de tabiques ordinarios y/o pavimentos rígidos con juntas ($f < L/400$)
- Confort: $f < L/350$
- Apariencia: $f < L/300$

CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS

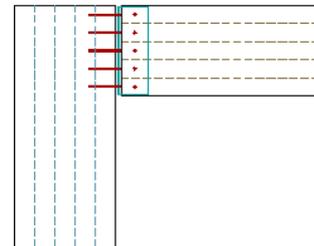
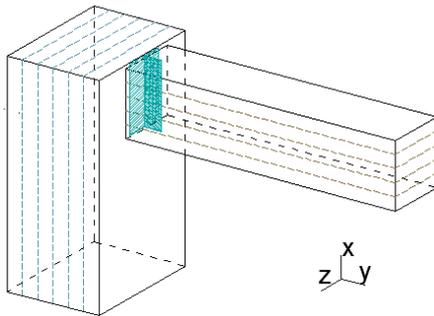
a) Encuentros y apoyos

Para el cálculo del CLT se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

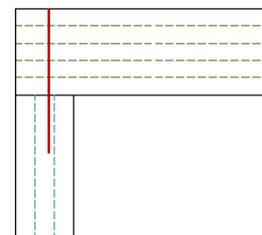
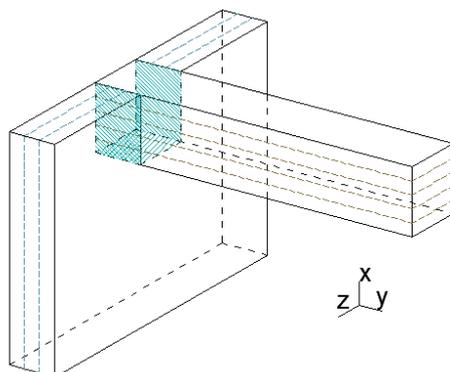
- A) Las tablas no están encoladas lateralmente, solo por cara.
- B) Los valores de reducción a cortante se han obtenido siguiendo el método señalado en la normativa austriaca:
- C) Se ha considerado una junta elástica entre paneles contiguos

Para el cálculo de los elementos de madera laminada se ha considerado lo siguiente:

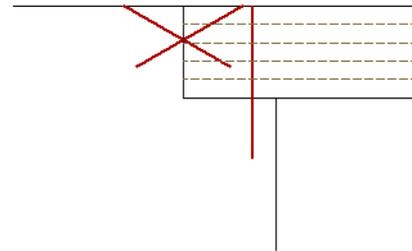
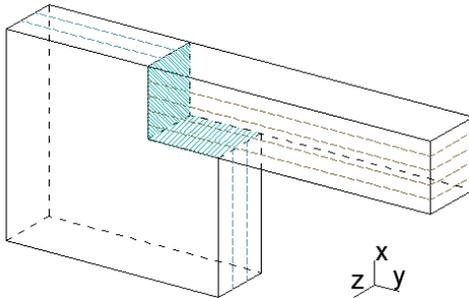
- A) Vigas biapoyadas:
 - a. Articulación en unión a pilar con placa de anclaje oculta



- b. Articulación en unión a muro de carga si se enfrenta en perpendicular; se consideran tirafondos a través del panel de CLT.



- c. Empotrado en unión a muro de carga si se entrega en paralelo (dinteles y similares); se considera un cajeadado en el panel y dos planos para las uniones:
- Apoyo continuo de entre 15 y 20cm en la parte inferior y unión mediante tirafondo en vertical.
 - Tirafondo en oblicuo para unir con el plano vertical del CLT a través de la testa de la viga.



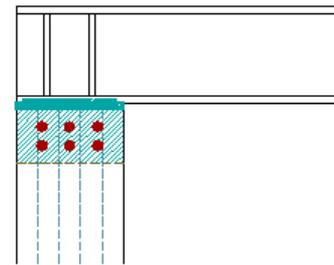
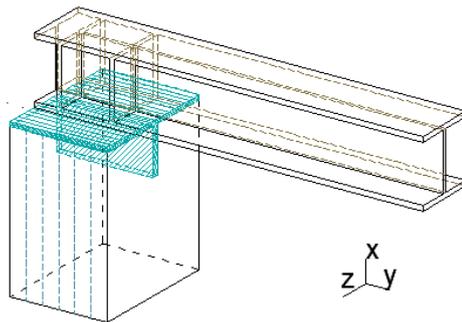
B) Pilares:

- Apoyo articulado en la base
- En la testa el tipo de nudo se introduce en función de los elementos horizontales que llegan.

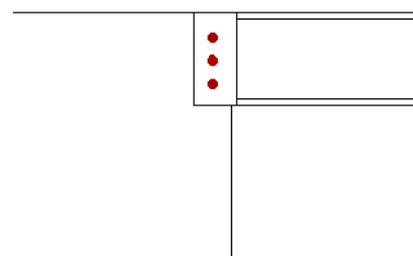
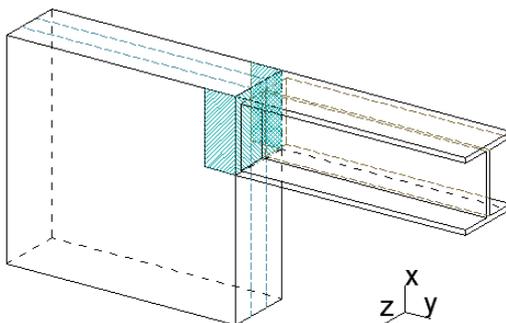
Para el cálculo de los elementos de acero se ha considerado lo siguiente:

A) Vigas:

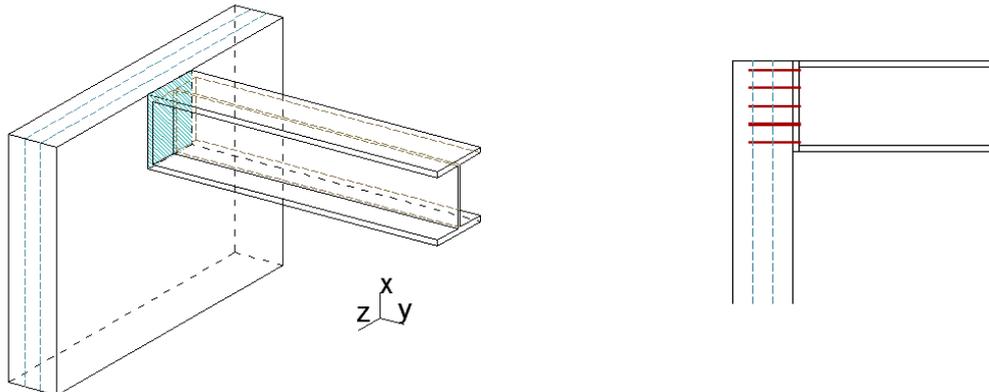
- Continuas hasta 12m, con unión soldada sobre placa atornillada (articulada) en testa de pilares.



- Existen dos vigas principales (P01-P02-P03 y P03-P04-P05-M06 en plantas 1 y 2; P01b-P02b-P03 y P03-P04-P05-M06 en plantas 1 a 3) que se unen sobre el pilar P03. Se considera esta unión mediante tornillos a capitel de acero (articulada).
- El resto de uniones entre vigas metálicas se consideran soldadas en obra (empotramiento).
- Articulación en los apoyos de vigas metálicas sobre muros de CLT en prolongación (se considera placa en U soldada a testa de viga unida a CLT con pasadores).



- e. Articulación en los apoyos de vigas metálicas sobre muros de CLT (se considera placa de anclaje en lateral de muro unida mediante tirafondos).



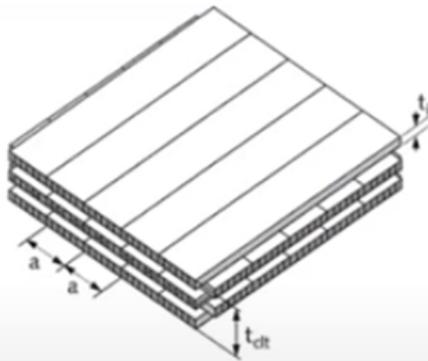
b) Factores correctores del CLT (aplicación del anexo austriaco del EC5)

Una de las peculiaridades del CLT es la posibilidad, dependiendo del fabricante, de encolar las tablas entre ellas por el canto. Esta posibilidad es importante ya que influye de forma muy significativa en el cálculo y en la realidad del material puesto en obra; cuando no se encola entre tablas, es lógico pensar que estas no trabajan de forma solidaria entre ellas en dicho plano y que por tanto no es posible transmitir tensiones de corte entre elementos. En caso de disponer un panel en el que no se ha realizado el encolado de cantos y no se realiza esta corrección, se estaría en el caso de estar sobreestimando la rigidez del panel.

La gran mayoría de fabricantes no realiza este encolado, por lo que, si no se preselecciona un fabricante que lo realice, es necesario aplicar un coeficiente de reducción de la rigidez a torsión (factor K33) y a corte (factor K88) en el sentido transversal a la junta por canto. El cálculo de estos coeficientes viene recogido en el Anexo Nacional de Austria al Eurocódigo 5, aunque algunos fabricantes ya recoge este factor corrector, obtenido mediante ensayos de laboratorio, en sus catálogos.

Se ha realizado una tabla que recoge el cálculo de los factores K33 y K88 para los paneles utilizados en el proyecto, considerando anchos de tabla de 12 o 16cm y ratios espesor (ti)/ancho (a) entre 0,20 y 0,25. Los factores aquí calculados son aproximativos ya que los valores reales de ancho de tabla dependen de cada fabricante y no ha sido posible obtener un valor medio representativo, pero si unas ratios aproximadas. Como se puede ver en las tablas anteriores, a pesar de que los paneles están compuestos por tablas de ancho diferentes y en cantidades de capas diferentes, los valores de estos factores son muy aproximados entre ellos. Una posibilidad para obtener los anchos de tabla utilizados por algunos fabricantes sería aplicar el proceso inverso al anterior si aportan los valores K33 y K88 en sus catálogos.

La tabla indicada con todos los valores de los factores K33 y K88 para los paneles utilizados en el proyecto es la siguiente:



	Número de capas		
	3	5	7
p_D	0,89	0,67	0,55
q_D	1,33	1,26	1,23
p_S	0,53	0,43	0,43
q_S	1,21	1,21	1,21

$$\kappa_{33} = \frac{1}{1 + 6 \cdot p_D \cdot \left(\frac{t_i}{a}\right)^{q_D}}$$

$$\kappa_{88} = \frac{1}{1 + 6 \cdot p_S \cdot \left(\frac{t_i}{a}\right)^{q_S}}$$

Ratio espesor/ancho tabla = 4 a 5 --> $Ti/a = 0,20$ a $0,25$

Espesor total	Tclt	9 cm	Espesor total	Tclt	12 cm
Numero de capas	N	3	Numero de capas	N	3
Ancho de la tabla	a	12 cm	Ancho de la tabla	a	16 cm
Alto de la tabla	Ti	3 cm	Alto de la tabla	Ti	4 cm
	Ti/a	0,25		Ti/a	0,25
pd =	0,89		pd =	0,89	
qd =	1,33	K33 = 0,542	qd =	1,33	K33 = 0,542
ps =	0,53		ps =	0,53	
qs =	1,21	K88 = 0,627	qs =	1,21	K88 = 0,627

Espesor total	Tclt	10 cm	Espesor total	Tclt	12 cm
Numero de capas	N	3	Numero de capas	N	5
Ancho de la tabla	a	16 cm	Ancho de la tabla	a	12 cm
Alto de la tabla	Ti	3,333 cm	Alto de la tabla	Ti	2,4 cm
	Ti/a	0,208		Ti/a	0,2
pd =	0,89		pd =	0,89	
qd =	1,33	K33 = 0,601	qd =	1,33	K33 = 0,614
ps =	0,53		ps =	0,53	
qs =	1,21	K88 = 0,677	qs =	1,21	K88 = 0,688

Espesor total	Tclt	15 cm	Espesor total	Tclt	20 cm
Numero de capas	N	5	Numero de capas	N	5
Ancho de la tabla	a	12 cm	Ancho de la tabla	a	16 cm
Alto de la tabla	Ti	3 cm	Alto de la tabla	Ti	4 cm
	Ti/a	0,25		Ti/a	0,25
pd =	0,89		pd =	0,89	
qd =	1,33	K33 = 0,542	qd =	1,33	K33 = 0,542
ps =	0,53		ps =	0,53	
qs =	1,21	K88 = 0,627	qs =	1,21	K88 = 0,627

7.3 PREDIMENSIONADO MEDIANTE PRONTUARIOS DE FABRICANTES; PROTECCIÓN AL FUEGO

Partiendo del descenso de cargas indicado en el apartado anterior, para los elementos más desfavorables, se entra en las tablas de catálogos comerciales de los diferentes fabricantes considerados (KLH, Egoin, Stora Enso). Los catálogos se pueden encontrar en las siguientes direcciones web:

- KLH: <https://www.klh.at/wp-content/uploads/2019/10/klh-tablas-de-predimensionamiento.pdf>
- Egoin: <https://egoin.com/0-PRONTUARIO-TECNICO.pdf>

Este predimensionado debe servir de base para una primera aproximación del proyecto arquitectónico así como de punto de partida para los cálculos posteriores.

ELEMENTOS HORIZONTALES

Con las cargas dadas, utilizando prontuarios de fabricantes (KLH, Egoin, Stora Enso) y considerando lo descrito en apartados anteriores sobre protección al ruido y protección al fuego, se obtiene la siguiente tabla resumen:

En Kn/m^2	Techo 2º/3º/4º	Cub.plana	Cub. Incl
Total	3,83	5,42	4,19
KLH	5s170CL	5s170CL	5s120CL
STORA ENSO			120 L3s
EGO CLT	170 5s	180 5s	100 3s
EGO MIX (*)	CLTmix 240	CLTmix 240	CLTmix 240
R30	R60	R90	R120

Estos valores resultan de aplicar el descenso de cargas en el caso de panel más desfavorable (mayor luz entre apoyos); en este caso se trata de un panel biapoyado.

Como se puede ver en la tabla anterior, hay disparidad de valores para la resistencia al fuego de elementos de CLT con función estructural según el prontuario que se utilice. Para paneles destinados a forjados horizontales, se ha seleccionado un panel mínimo de 170mm y 5 capas; la protección al fuego del elemento varía desde los 30min de los paneles de Egoín hasta los 90min de los paneles de KLH, utilizando ambos materiales muy similares (variedades de pino o abeto).

ELEMENTOS VERTICALES

Las siguientes tablas muestran el predimensionado para los tramos de muro A y B considerados en el descenso de cargas mediante prontuario de los fabricantes KLH y Egoín en diferentes casos según los requerimientos mínimos de resistencia al fuego para elementos estructurales:

TRAMO A	KLH				EGOIN			
R _{min}	R0	R30	R60	R90	R0	R30	R60	R90
Muro P3	3s60	3s80	5s100	5s120	75 3s	90 3s	120 3s	125 5s
Muro P2	3s60	3s80	5s100	5s120	75 3s	90 3s	120 3s	125 5s
Muro P1	3s60	3s80	5s100	5s120	75 3s	90 3s	120 3s	125 5s

TRAMO B	KLH				EGOIN			
R _{min}	R0	R30	R60	R90	R0	R30	R60	R90
Muro P4	3s60	3s80	5s100	5s120	75 3s	90 3s	120 3s	125 5s
Muro P3	3s60	3s80	5s100	5s120	75 3s	90 3s	120 3s	125 5s
Muro P2	3s60	3s80	5s100	5s120	75 3s	90 3s	120 3s	125 5s
Muro P1	3s60	3s80	5s100	5s130	75 3s	90 3s	120 3s	125 5s

Al ser elementos que forman parte de sistemas constructivos en los que se incorpora un trasdosado de cartón-yeso con aislamiento de lana mineral, puede ser interesante valorar la protección al fuego que puede aportar así como su coste, y que dicho análisis pueda servir como argumento a la hora de elegir una sección concreta de muro, de forma que no se sobredimensione sin necesidad.

Partiendo de los datos anteriores, se ha generado la siguiente tabla comparativa para valorar económicamente la influencia del trasdosado con funciones de protección al fuego. Los precios se han obtenido de la web de acceso libre Generador de Precios de Cype (www.generadordeprecios.info) constituida por una base estadística de precios. Dada la falta de acceso a información más veraz, se han utilizado los mismos precios para la madera en composiciones similares (número de capas del panel y espesor), independientemente del fabricante.

		Muro CLT			Trasdosado			TOTAL	
		Compos.	€/m ²	e (mm)	Compos.	€/m ²	e (mm)	€/m ²	e (mm)
klh	Fachada	3s60 ct	97,04	60	EI 60	37,78	78	134,82	138
		3s80 ct	103,39	80	EI 30	26,38	74	129,77	154
		5s100 ct	123,02	100	EI 0	16,51	63	139,53	163
		5s100 ct	123,02	100	EI 0	16,51	63	139,53	163
	Med.	5s100 ct	123,02	100	EI60	37,78	78	160,8	178
		5s120 ct	132,15	120	EI30	26,38	74	158,53	194
EGOIN	Fachada	75 3s	101,8	75	EI 60	37,78	78	139,58	153
		90 3s	106,28	90	EI 30	26,38	74	132,66	164
		120 3s	121,07	120	EI 0	16,51	63	137,58	183
		125 5s	133,6	125	EI 0	16,51	63	150,11	188
	Med.	120 3s	121,07	120	EI60	37,78	78	158,85	198
		125 5s	133,6	125	EI30	26,38	74	159,98	199

Por costes, si los precios aplicados fueran reales, resultaría muy similar elegir un fabricante u otro. La marca KLH considera unas resistencias al fuego mayores, por lo que, para casos similares, se puede dar el caso de que la prescripción de dicha marca requiere menores espesores. En el caso de los paneles de Egoin para medianera puede resultar interesante utilizar una composición de 5 capas y algo más de espesor ya que, al revisar las necesidades de protección adicional con trasdosado, los requisitos son menores al aportar el panel más resistencia a fuego. El sobre coste sería de apenas un euro más por metro cuadrado, mientras que el espesor final solo se vería incrementado en un milímetro.

Dado que para los cálculos estructurales se utilizarán paneles fabricados con pino radiata, tiene mas sentido, al menos a nivel de este trabajo, considerar la protección indicada en los catálogos de la marca Egoin. Esto lleva a tener que utilizar elementos secundarios para mejorar la resistencia, que pueden ser los propios trasdosados o falsos techos ya considerados en el proyecto original. Por otro lado esto puede favorecer el uso de elementos estructurales de acero ya que esta protección adicional de los paneles de madera también sirve para protegerlos.

7.4 DIMENSIONADO DE ELEMENTOS SENCILLOS

Las memorias de cálculo de elementos sencillos mediante los programas Calculatis, Dlubal y Estrumad se encuentra en el Anexo IV de este trabajo.

Como comprobación del predimensionado y como parte del proceso, el siguiente paso ha sido calcular algunos elementos sencillos. La selección de elementos se ha realizado intentando dimensionar el elemento más desfavorable para cada elemento constructivo y que este sirva posteriormente para los demás.

El listado de elementos es el siguiente:

Planta tipo

- Panel CLT en planta tipo (biapoyado, triapoyado, simple y en forjado mixto).
- Vigas P01-P02-P03, P03-P04-P05-M06 como elementos continuos (únicos apoyados sobre testa de pilar) o en tramos individuales (pilar pasante y entrega de viga en lateral mediante herraje)
- Vigas M02-P01 y N12-P01 en entrega lateral mediante herraje a pilar pasante
- Pilar P02

Planta ático

- Panel CLT en cubierta (biapoyado, triapoyado, con dirección principal paralela o perpendicular a cumbraera)

De estos cálculos de elementos sencillos se obtienen las siguientes conclusiones:

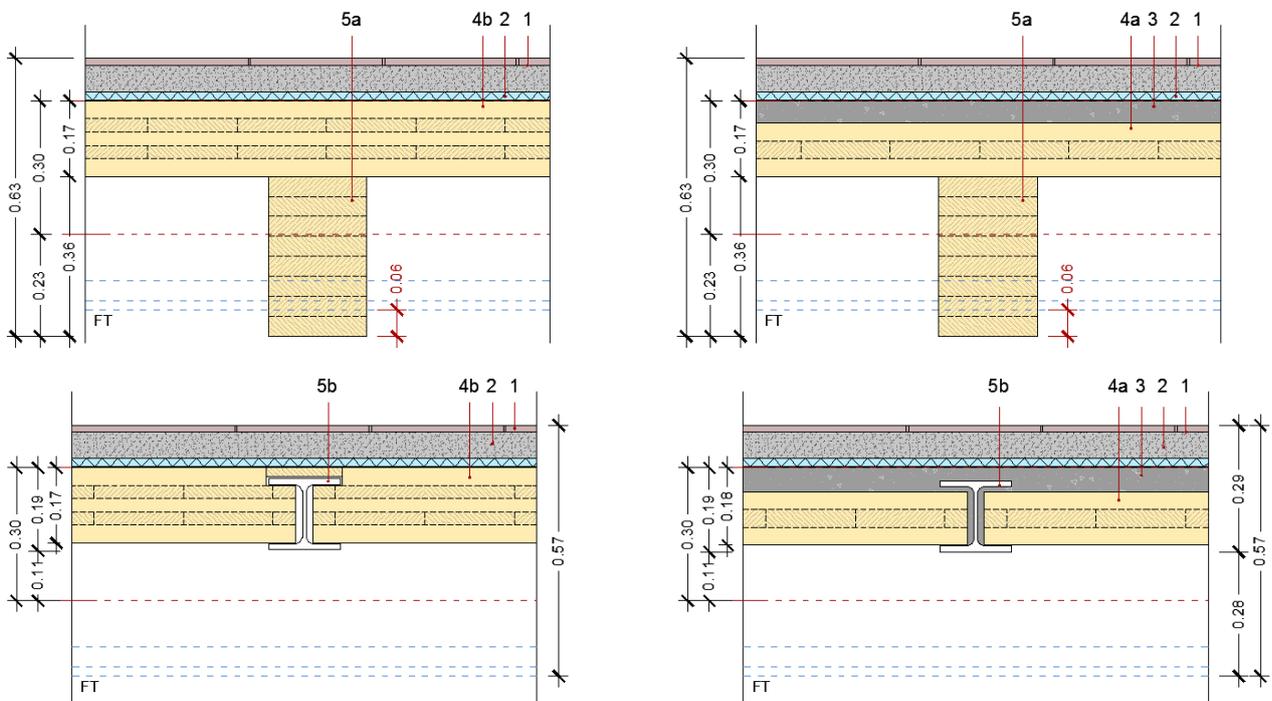
- Es técnicamente viable utilizar elementos horizontales de madera (CLT) como forjado simple o en forjado mixto (madera-hormigón), tanto como biapoyado como triapoyado. El canto de los forjados se reduce en casi todos los casos respecto a los utilizados en el proyecto original; esto puede servir para trasladar centímetros al ático y mejorar la habitabilidad.
- Es técnicamente viable utilizar jácenas de madera para apoyo de los paneles CLT, considerando estos triapoyados, pero es urbanísticamente inviable al reducir la altura libre de planta 15cm por debajo del límite y sin considerar falsos techos. La sustitución de las vigas de madera por vigas de acero con la misma disposición de paneles de CLT comportaría el mismo problema, aunque en menor cuantía. Las opciones, por tanto pasan por cambiar los paneles a biapoyados modificando el tipo de encuentro con las vigas de forma que estas queden al mismo nivel.

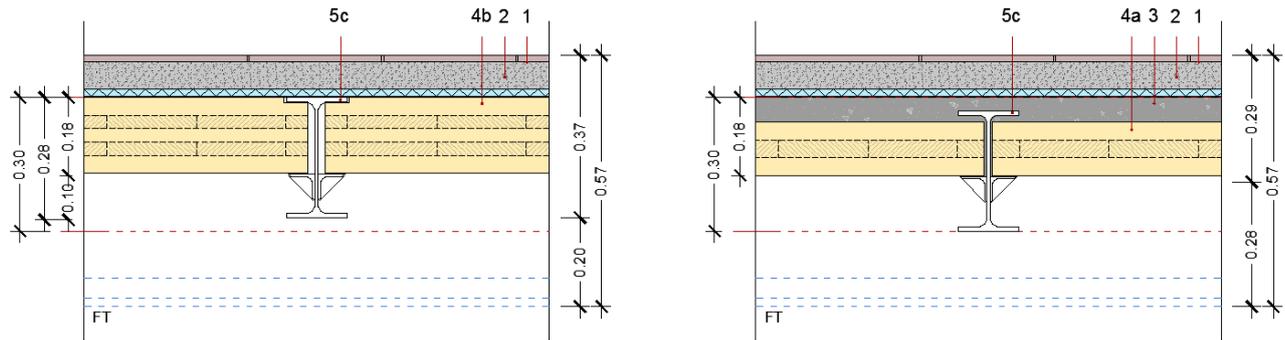
Esto, a su vez, implica modificar las posibles soluciones para las jácenas. Se valora viga de madera con sección cuadrada (implica adosar lateralmente perfiles L continuos a modo de escuadra o herrajes; la unión atornillada, al haber paneles enfrentados por ambos laterales de las vigas, se descarta), con sección en T invertida (no se encuentran en catálogo por lo que se descartan) y secciones metálicas laminadas en caliente tipo IPE, HEA o HEB

Las siguientes secciones recogen los seis posibles casos de encuentro entre forjado y viga contemplados, dimensionados para el pórtico P02-P03 en planta piso al ser el más desfavorable:

1. Formación pavimento con chapa de mortero
2. Panel EEPS 2cm y lámina separadora
3. Capa de compresión HA (con conectores)
- 4a. Panel CLT120/3
- 4b. Panel CLT170/5

- 5a. Viga de madera laminada GL24h 220x360
 - 5b. Viga de acero HEA-160
 - 5c. Viga de acero IPE-270 con perfil L de apoyo
- - Límites del forjado reticular del proy. original
 - - Línea de falso techo





Por último, se ha realizado una tabla aproximativa de los posibles costes para cada tipo de solución (madera o acero), basada en la base de precios de Cype (<http://www.generadordeprecios.info/>), con el fin de obtener otro argumento justificativo para elegir una solución u otra.

Jácena	L (m)	Strib (m ²)	QP (KN/m)	QF (KN/m)	SU (KN/m)	MADERA GL24h			Acero S275				
						Sección	i	Peso (kg)	€	Sección	i	Peso (kg)	€
N12-P01	1,87	6,97	6,821	2,326	7,455	220,5x145	0,98	31,09	53,86	IPE160	0,52	29,546	44,61
M02-P01 (*M)	4,29	1,88	0,802	0,273	0,876	220,5x145	1,51	71,32	123,55	IPE160	0,6	67,782	102,35
P01-P02 (*A)	3,52	14,76	7,674	2,617	8,386	220x306	0,91	123,22	233,94	HEA160	0,99	107,008	161,58
P02-P03 (*A)	4,39	16,68	6,953	2,371	7,599	220x360	0,99	180,80	364,72	HEA160	1,16	133,456	201,52
P03-P04	3,65	12,42	6,227	2,123	6,805	220x276	0,94	115,25	230,13	HEA160	0,58	110,96	167,55
P04-P05	3,08	11,6	6,892	2,350	7,532	220x276	0,8	97,25	194,19	HEA160	0,64	93,632	141,38
P05-M04	4,13	13,89	6,155	2,099	6,726	220x324	0,87	153,08	308,84	HEA160	0,78	125,552	189,58
TOTAL								772,01	1509,24			667,94	1008,58

Nota: se indica por separado la carga permanente QP (obtenida según tablas del CTE) de la carga del propio forjado QF (mixto CLT120+HA 50mm)
 (*M) Falta considerar CLT+hormigón misma dirección (*A) Requiere refuerzo a negativo apoyo pilar P02

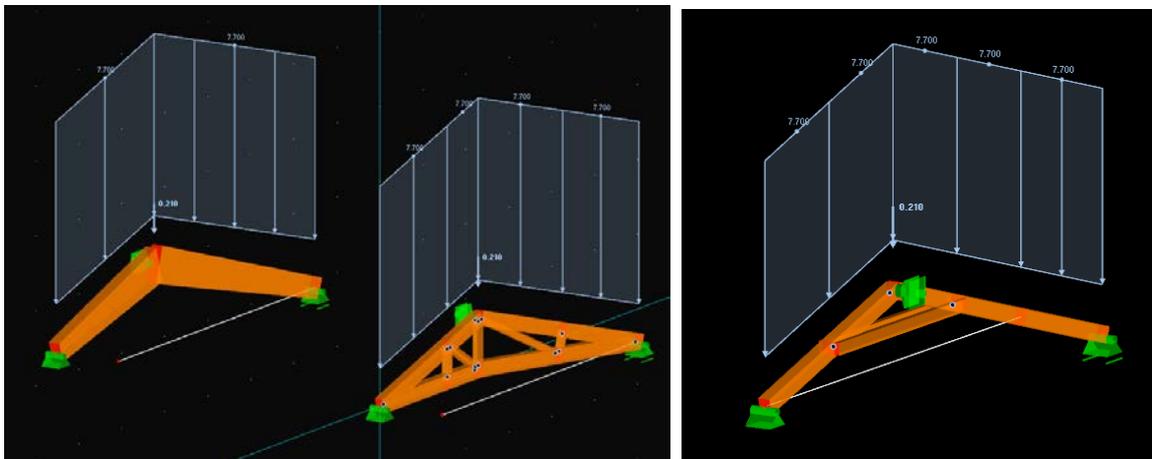
- En relación a los pilares, se dimensiona el P02 al ser el más desfavorable, como de madera GL24h, partiendo de la sección indicada para elementos de hormigón armado en el proyecto original y consiguiendo una sección más reducida.
- En el caso de los paneles de cubierta, inicialmente se estima que es técnicamente viable la aplicación de paneles con la dirección principal paralela a cumbrera (biapoyado o triapoyado) o perpendicular a esta (biapoyado), si bien hay diferencias notables para el espesor mínimo de espesores. En el caso de los paneles con la dirección principal perpendicular a la cumbrera, es necesario, además, estudiar la viga de cumbrera y los dinteles de los huecos de fachada sobre los que descansará el panel.

Planta ático

Posteriormente, al calcular el ático de forma separada mediante el programa informático Dlubal se ha comprobado que era necesario disponer un caballete en el encuentro entre faldones de cubierta. Se han valorado diferentes diseños si bien el primer condicionante es la altura libre disponible ya que algunas de las opciones limitaban el posible paso por debajo de ella, como podrían ser las cerchas con cordón o tirante inferior, ya que este quedaría a la altura de la cabeza

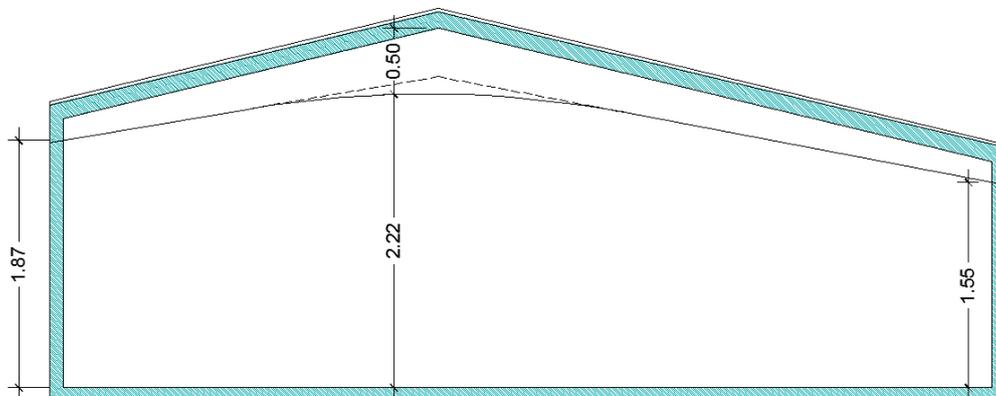
Otro de los problemas encontrados para solucionar este punto ha sido la asimetría de la sección. En el caso de haber utilizado cerchas, el diseño de estas, considerando también la necesidad de permitir el paso por debajo de la misma, habría derivado en unas soluciones muy complejas. Otra opción planteada ha sido dos vigas articuladas entre sí y con un cordón a media altura, si bien esta solución derivaba en una solución con grandes cantos debido a las flechas.

Pruebas de funcionamiento de diferentes soluciones:



En primer lugar, dado que las secciones de los posibles forjados entre pisos se ha reducido en mínimo 12cm respecto del proyecto original, se ha restado 5cm a la altura suelo a suelo de cada planta piso, para pasar los 15cm resultantes a la altura libre del ático.

Después de realizar varias pruebas con vigas de canto variable y cerchas se concluye que la solución más efectiva es una viga continua curva de canto variable tipo boomerang. Con esta viga y añadiendo altura libre como se ha indicado, se llega a la siguiente sección esquemática:



Como se puede observar, este tipo de viga, en este caso, favorece mantener la habitabilidad del ático y a la vez solucionar el apoyo de los paneles en el encuentro entre faldones. En el Anexo V, en el que se incluyen los resultados obtenidos mediante el programa Dlubal, se pueden observar los datos de comprobación de esta viga en situación de proyecto.

7.5 DIMENSIONADO DEL EDIFICIO COMPLETO

La memoria de cálculo mediante programa Dlubal se encuentra en el Anexo V de este trabajo.

Tal como se ha visto en los apartados anteriores, el proyecto ha derivado a una estructura mixta de madera y acero a fin de facilitar el cumplimiento de las normativas urbanística y de habitabilidad locales.

El dimensionado de la estructura se ha realizado mediante el programa informático Dlubal. El procedimiento de cálculo ha seguido las siguientes fases:

- A) Modelado del conjunto, incluyendo cargas.
- B) Cálculo de elementos horizontales y verticales de CLT (forjados) mediante subprograma RF-Laminate.
- C) Cálculo de elementos horizontales de acero (vigas) mediante subprograma RF-Steel
- D) Cálculo de elementos horizontales de madera laminada (vigas) mediante subprograma RF-Timber Pro
- E) Cálculo de elementos verticales de CLT (forjados) mediante subprograma RF-Laminate.
- F) Cálculo de elementos verticales de acero (pilares) mediante subprograma RF-Steel
- G) Cálculo de elementos verticales de madera laminada (pilares) mediante subprograma RF-Timber Pro
- H) Comprobación a fuego de los elementos de madera laminada mediante subprograma RF-Timber Pro
- I) Cálculo de la sección reducida de elementos de CLT y comprobación mediante subprograma RF-Laminate.
- J) Comprobación a sismo del conjunto.

Para el modelado los elementos estructurales se ha recurrido a software BIM y la posterior importación del modelo analítico en Dlubal. Esto generó reinterpretaciones de nodos y líneas así como errores gráficos por imprecisiones tales como vértices no coincidentes o líneas paralelas separadas por escasos milímetros.

Dado la complejidad del edificio (falta de continuidad vertical de los elementos estructurales), en un primer cálculo del conjunto, se obtuvieron gran cantidad de errores gráficos y de resultados que, por la limitación de la capacidad del equipo utilizado, era imposible rastrear. Esto llevó a dividir el cálculo en varias partes

- A) Modelado y cálculo del ático:
 - a. Se ha introducido una serie de vigas debajo de esta estructura para replicar y simular la existencia de otra estructura inferior.
 - b. Se han seguido los pasos A a G de las fases señaladas anteriormente.
- B) Modelado y cálculo de la estructura de planta primera a tercera: cálculo realizado
 - a. En la zona correspondiente al ático no se han insertado las cargas correspondientes, por lo que el cálculo se ha reducido a una aproximación numérica y a depurar errores gráficos del modelo inicial.
 - b. Se han seguido los pasos A a G de las fases señaladas anteriormente.
- C) Unión de las dos estructuras y cálculo del conjunto:
 - a. Se han seguido los pasos A a J de las fases señaladas anteriormente.

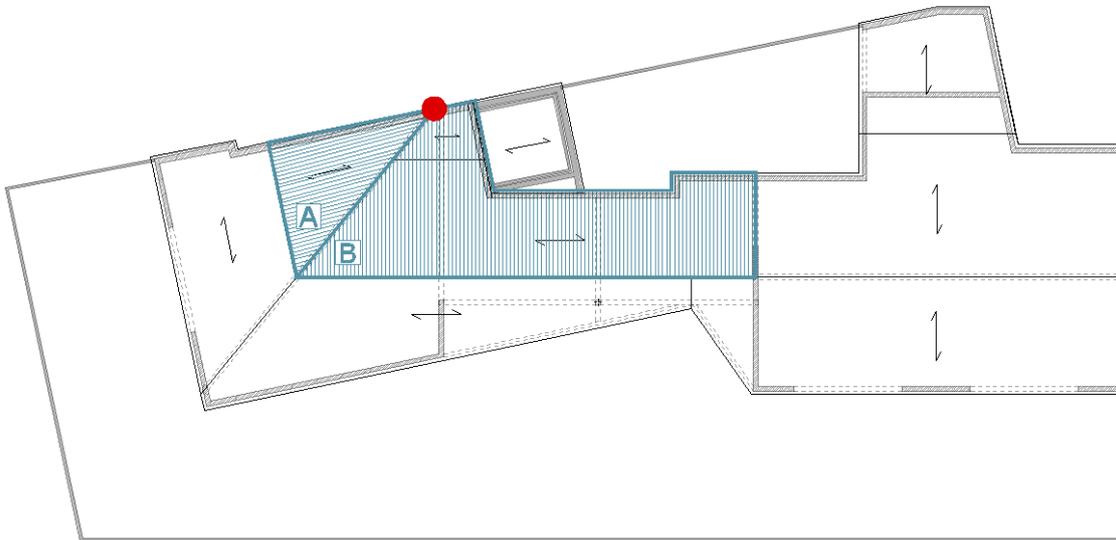
Las posibles combinatorias se muestran en el Anexo V – Resultados de cálculo mediante software Dlubal.

7.6 RESULTADO FINAL

Los resultados del dimensionamiento a través del programa Dlubal quedan recogidos en el Anexo V de esta memoria y, a partir de estos, se han corregido los planos de estructuras contenidos en el Anexo III, que se habían realizado en un origen con los valores obtenidos mediante el predimensionado y el cálculo de elementos sencillos (Anexo IV).

Respecto a estos resultados, cabe destacar que, si bien todos los elementos que conforman la estructura cumplen a ELU y ELS según los parámetros de la norma así como de resistencia de materiales, hay determinados puntos muy concentrados que dan fallos puntuales debido a concentraciones de carga.

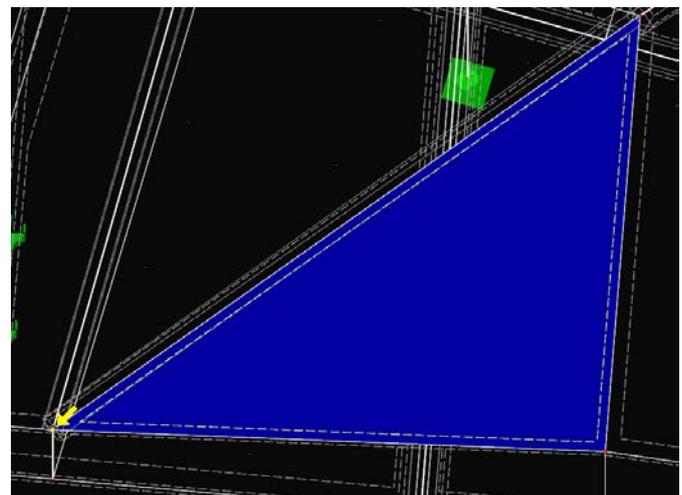
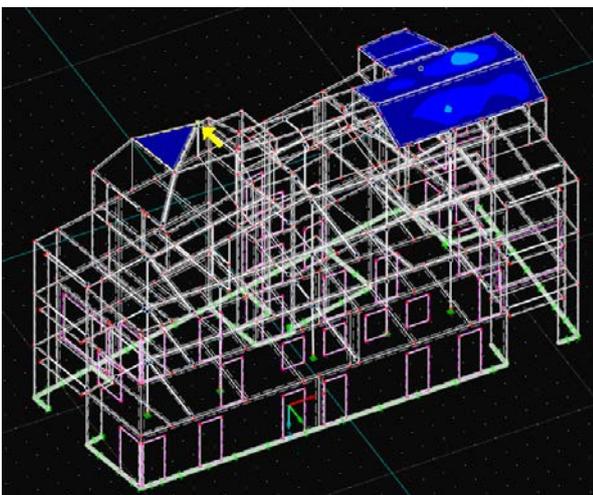
Es posible que la explicación más plausible, dadas las pequeñas dimensiones de las zonas donde se observan estos errores y a que no existen cargas puntuales sobre dichos elementos, sea que deriven de la malla de elementos finitos junto con la forma que tiene el programa de interpretar algunos apoyos o encuentros. El caso más significativo sucede entre dos paneles de cubierta que forman una limahoya. En el vertice inferior de dicha línea se producen razones de tensiones de hasta el 150%, respecto de la resistencia del material, en compresión paralela a la fibra.



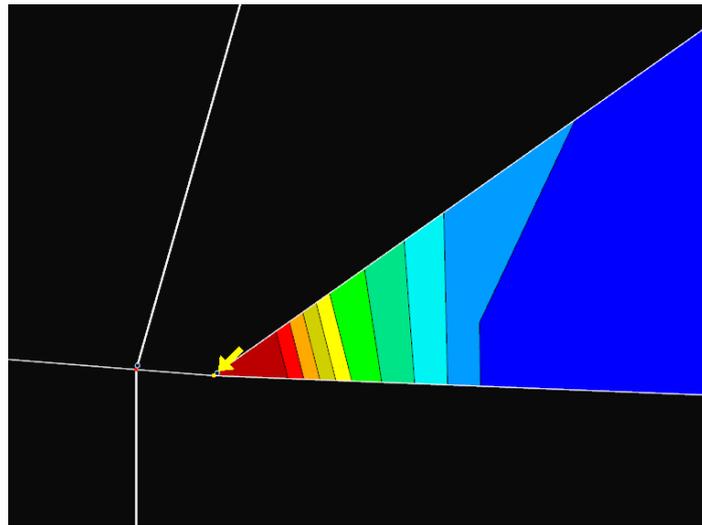
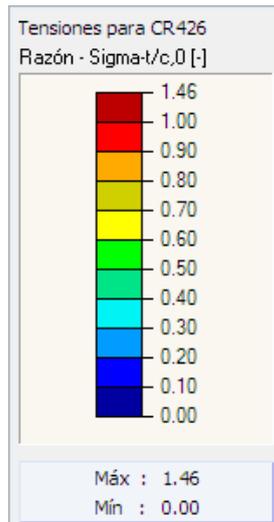
Este panel A se corresponde al panel 124 del modelo de Dlubal, mientras que el panel B se corresponde al 125. Los resultados para esos paneles, en el vértice marcado en rojo, son los siguientes:

Superf. núm.	A	B	Coordenadas del punto [m]			Carga	Núm.	Capa z [mm]	Lado	Tensiones [N/mm ²]			Razón [-]
			X	Y	Z					Símbolo	Existente	Límite	
124	660	-2.526	-3.596	-14.443	CR426	5	100.0	Superior	$\sigma_{t/c,0}$	9.84	6.72	1.46	
	660	-2.526	-3.596	-14.443	CR426	5	100.0	Superior	$\sigma_{b+t/c,0}$	9.84		1.47	
125	28727	-2.520	-3.595	-14.443	CR426	2	25.0	Superior	$\sigma_{t/c,0}$	6.82	6.72	1.01	
	28727	-2.520	-3.595	-14.443	CR426	2	25.0	Superior	$\sigma_{b+t/c,0}$	10.21		1.31	

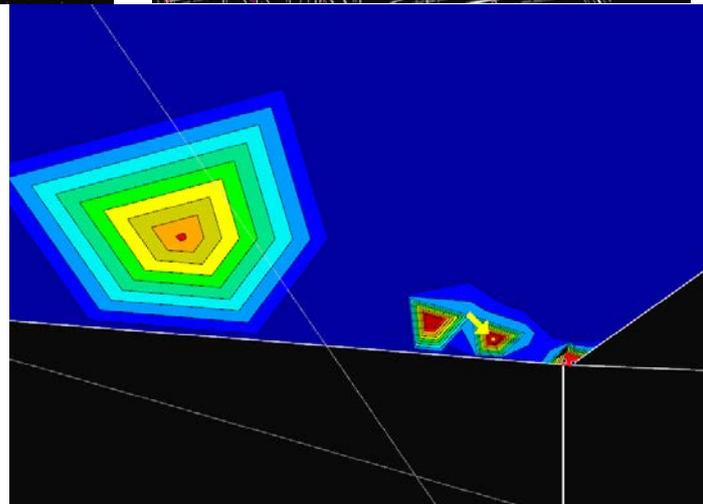
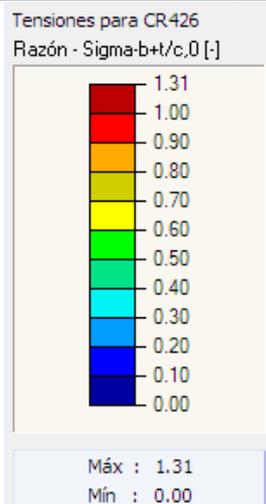
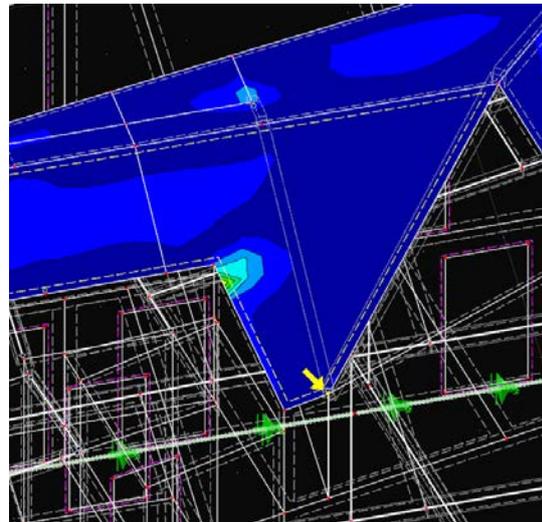
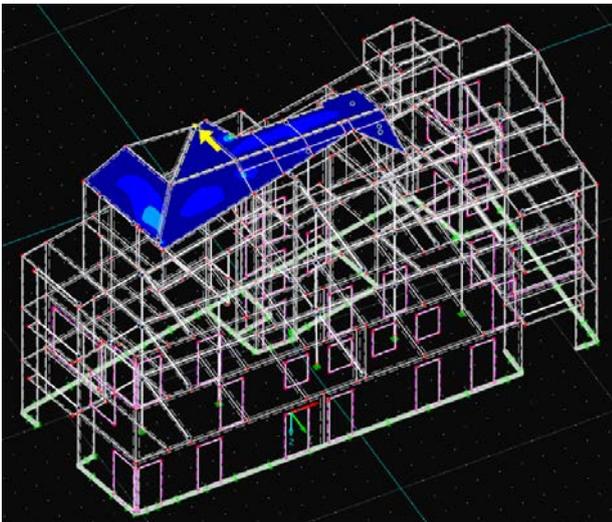
Como se puede ver en las siguientes imagenes, el programa marca un vertice pero muestra valores uniformes para todo el panel 124(A):



Solo haciendo un zoom en profundidad es posible ver como en una longitud pequeña los valores de razón de tensiones se disparan y se concentran en torno al vértice mencionado.



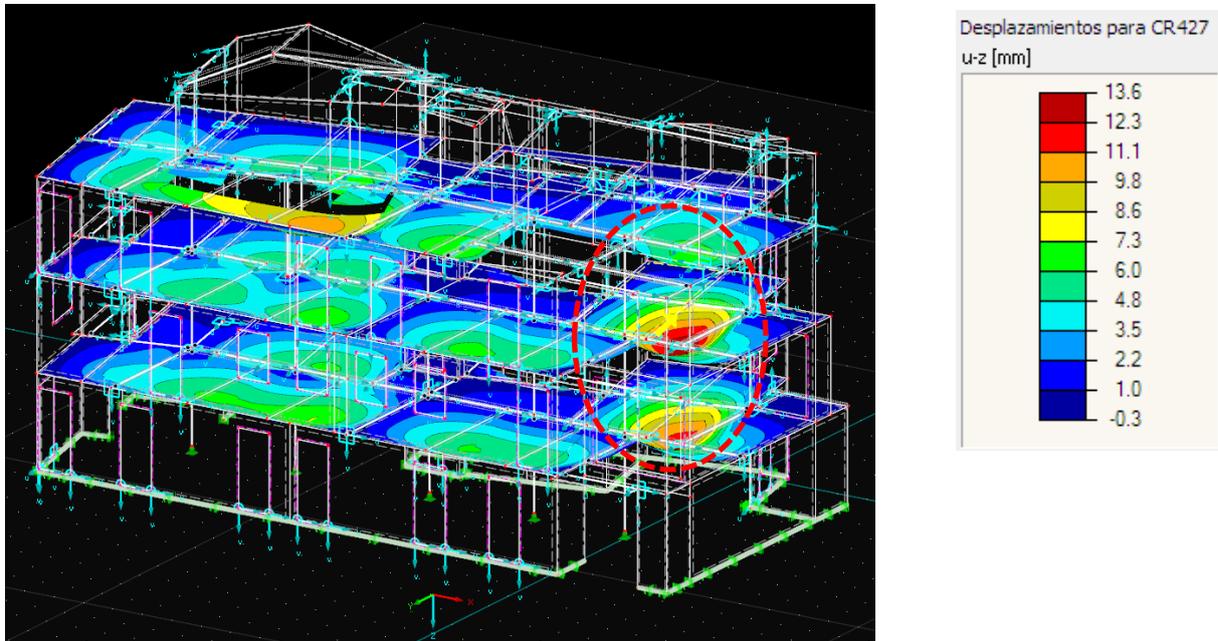
En el caso del panel 125(B) las imágenes son las siguientes:



Durante el proceso de cálculo se ha podido perfeccionar el modelo gráfico, mediante herramientas internas del propio programa, hasta limitar los errores a los dos mencionados (paneles 124 y 125 del modelo gráfico). Dada la forma puntual y extremadamente concentrada de estos así como la posible realidad del detalle constructivo y que el resto

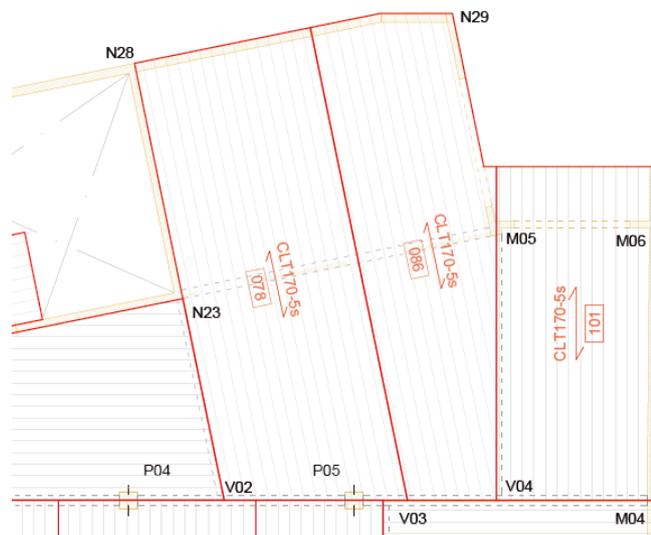
de los valores en ambos paneles son muy inferiores a los límites tolerables, se considera que ambos paneles funcionan correctamente y que los errores mostrados son despreciables.

Por otro lado, se detectan zonas deformadas que, si bien los desplazamientos quedan dentro de los valores límite, destacan sobre lo que sucede en la mayor parte del edificio:



La imagen anterior recoge los desplazamientos para los paneles de forjado en la situación más desfavorable. En la zona marcada, los paneles están dispuestos como triapoyados, con una viga de madera laminada colocada por debajo (C51 en techo de planta primera y C53 en techo de planta segunda), tal como se muestra en el recorte del plano que se muestra a la derecha:

En un primer momento puede parecer que la viga situada por debajo de estos paneles no esté trabajando, si bien, al entrar en el dimensionado de dicha viga en el subprograma RF Timber los datos indican lo contrario.



En la página siguiente se muestra un extracto del cálculo para la viga C53 así como la deformada en la situación más desfavorable. Como se puede observar, la sección dispuesta alcanza un 95% del límite de flecha ($L/300$). Por otro lado, la flecha que alcanza esta viga (13,8mm) es ligeramente superior a la de los paneles que apoyan sobre ella (13,6mm)

2.3 Cálculo por conjunto de barras

Conjunto núm.	A Barra núm.	B Posición x [m]	C Carga	D Razón	E	F
Cálculo según fórmula						
51	Barras continuas P1-1 (Barra núm. 105,125)					
	105	2.250	CR400	0.83	≤ 1	403) Comportamiento en servicio - Situación de proyecto cuasipermanente según 7.2 - Vano interior, dirección z
52	Barras continuas P2-1 (Barra núm. 8,9)					
	9	0.000	CR122	0.53	≤ 1	111) Resistencia de la sección - Cortante debido al esfuerzo cortante Vz según 6.1.7
53	Barras continuas P2-2 (Barra núm. 104,124)					
	104	0.250	CR400	0.95	≤ 1	403) Comportamiento en servicio - Situación de proyecto cuasipermanente según 7.2 - Vano interior, dirección z
54	Barras continuas P3-1 (Barra núm. 4,7)					

Max: 0.99 ≤ 1

Detalles - Barra 104 - x: 0.250 m - CR400

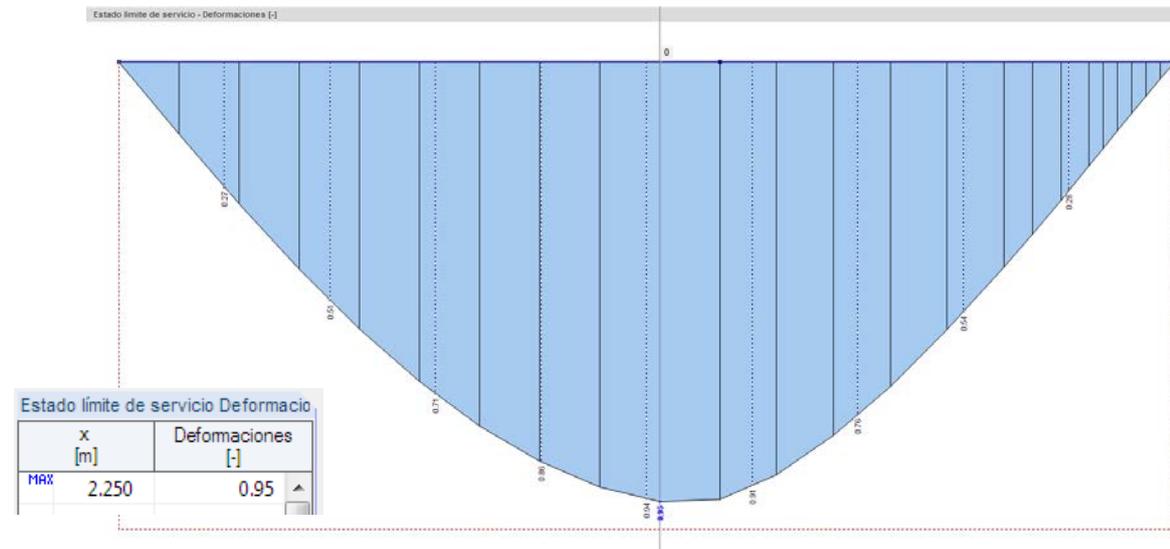
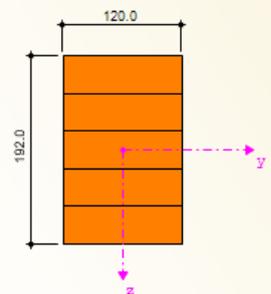
Datos de material - Madera laminada encolada GL24h

Datos de la sección - Rectángulo 120/192

Deformaciones

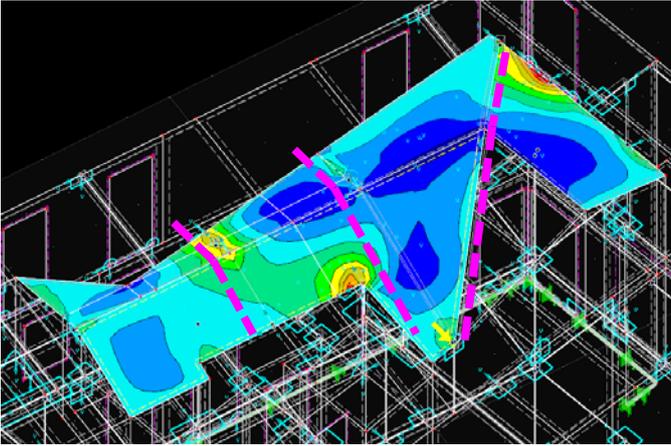
<input type="checkbox"/> Dirección x	W _x	-0.2	mm		
<input type="checkbox"/> Dirección y	W _y	-0.4	mm		
<input type="checkbox"/> Dirección z	W _z	15.0	mm		
Razón de tensiones					
<input type="checkbox"/> Deformación en vano interior	W _{fin,z}	13.8	mm		
<input type="checkbox"/> Longitud de referencia	l	4.392	m		
<input type="checkbox"/> Criterio de valor límite	l / W _{fin,límit}	300.00			
<input type="checkbox"/> Valor límite de deformación	W _{fin,límita}	14.6	mm		
<input type="checkbox"/> Razón de tensiones	η	0.95		≤ 1	Tabla 7.2

8 - Rectángulo 120/192



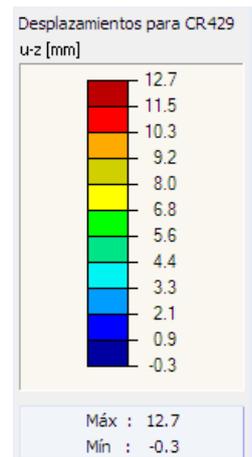
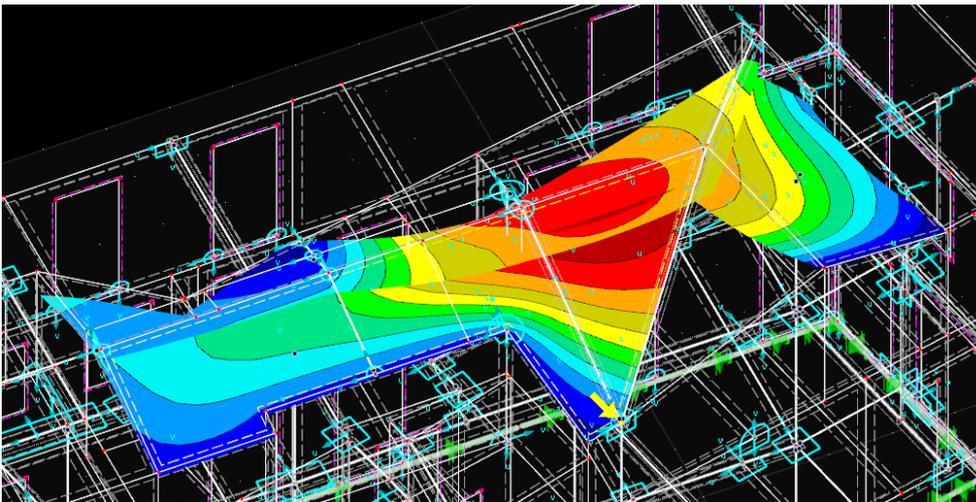
Lo anterior no invalida los datos de cálculo si bien hacen dudar de ellos. No ha sido posible averiguar por qué la deformación mostrada para los paneles no corresponden a la situación de disponer de una viga de apoyo por debajo ni corregirla.

Otro de los puntos interesantes del cálculo, es el comportamiento de los paneles de la cubierta del ático. Para que fuera estable, ha sido necesario disponer tres caballetes, ejecutados con vigas curvas y de canto variable (tipo boomerang) por debajo. Este hecho se puede apreciar en el gráfico de tensiones a flexocompresión que se muestra en la página siguiente; sobre ella se ha marcado, de forma aproximada, la distribución de estos caballetes en rosa:

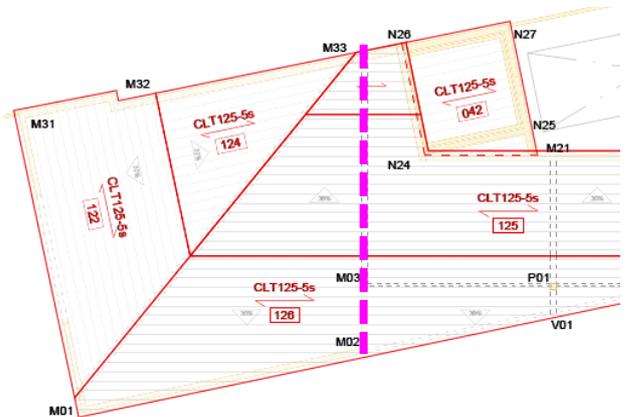
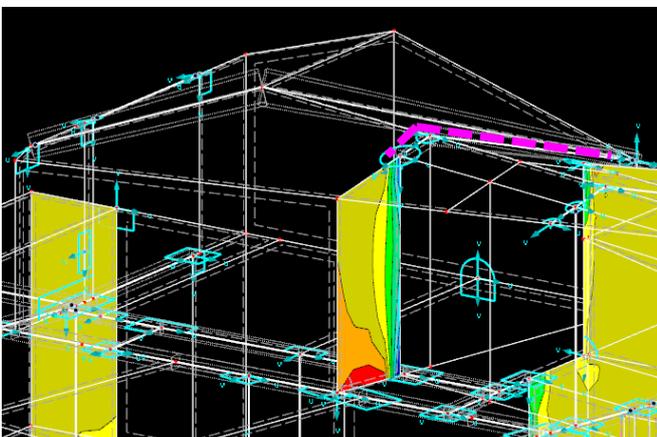


En esta imagen se puede volver a apreciar como de forma puntual se producen concentración de tensiones en puntos muy marcados, si bien en este caso corresponde al apoyo de los paneles de CLT de cubierta sobre encuentros entre muros de CLT.

Si se analiza la deformación de los paneles de cubierta en situación cuasipermanente, se observa como esta aumenta en la zona donde la cumbrera cambia de dirección y que además es la zona con mayor luz entre apoyos.



Dentro de los elementos verticales, se destaca uno de los muros de planta ático que sirve de apoyo para la cubierta y que da continuidad a uno de los caballetes:

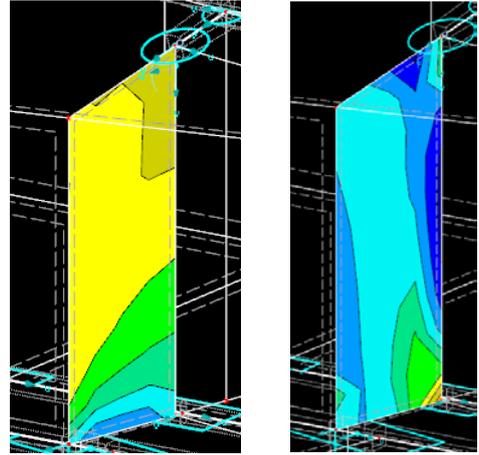


El gráfico anterior muestra las compresiones para la capa 2/5 del panel principalmente en dos zonas:

- Vertical bajo el apoyo del caballete
- Horizontal inferior, con concentración hacia los vertices dibujando un arco de descarga.

Lás imágenes de la derecha muestran como los esfuerzos a flexión en la capa 1/5 y el cortante en la capa 2/5 respectivamente, tienden a concentrarse en torno a la viga de apoyo interior, siendo la tendencia del panel a girar sobre esta viga y flexionar en torno a su plano mayor.

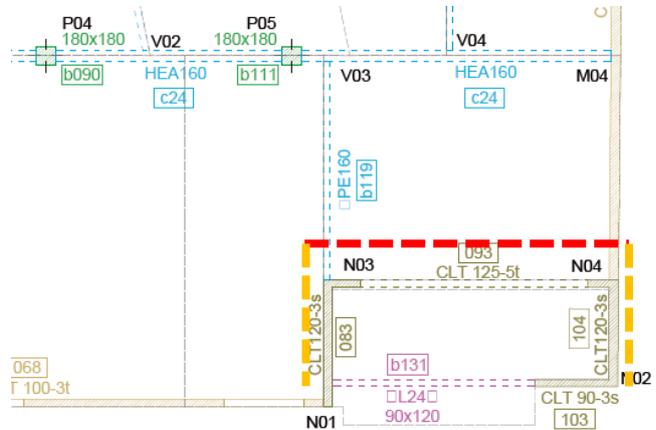
Esto ha llevado a que, a diferencia con otros paneles de fachada, sea necesario disponer uno de 125mm y 5 capas, con la dirección principal vertical como en el resto de casos.



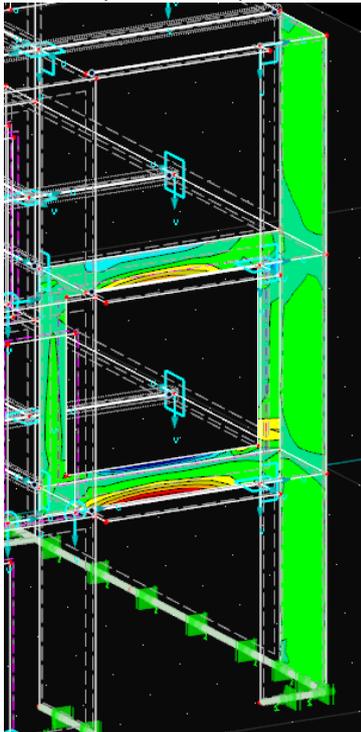
Otro panel de fachada importante por cálculo se encuentra en el balcón de planta segunda a c/ Emili Badiella:

Este panel, remarcado en rojo, viene determinado por tres circunstancias:

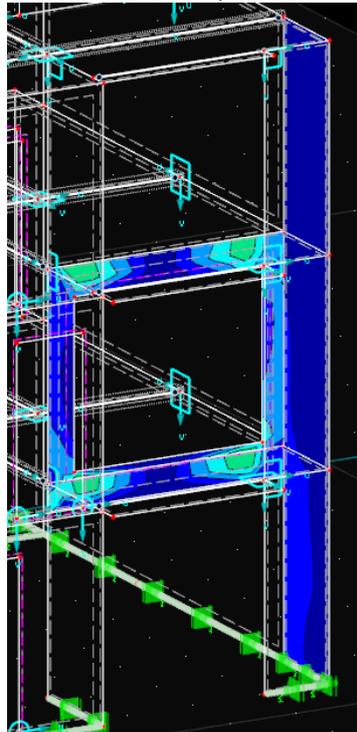
- Se puede considerar practicamente un marco de un hueco
- Forma parte del núcleo vertical de muros dispuesto en este balcón, uniendo y arriostrando otros dos paneles (en naranja) con grandes cargas.
- Aunque es parte del núcleo vertical comienza en techo de planta primera, a modo de viga descolgada, y acaba en techo de planta segunda enrasado con el nivel superior del forjado.



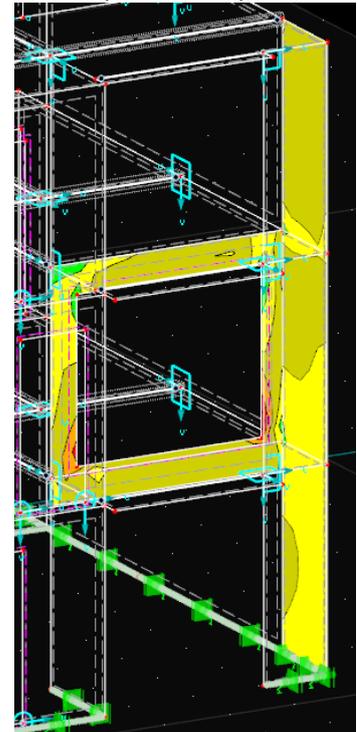
Compresiones capa 1/5



Cortantes capa 1/5



Compresiones capa 2/5



Se ha resuelto con un panel de 125mm con su dirección principal en horizontal ya que las cargas mas determinantes se producen tanto en la parte inferior como superior del panel, que funciona como un marco de ventana y, por tanto estas dos partes trabajan principalmente a flexión.

Además, en todas las imágenes anteriores se puede observar como las tensiones se agudizan en torno a los vertices interiores del marco.

7.8 OTRAS COMPROBACIONES: PROTECCIÓN AL FUEGO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

CONSIDERACIONES PREVIAS

El CTE SI establece, en su apartado 6, que la resistencia mínima al fuego para elementos estructurales en edificios residenciales (sin considerar cuartos de riesgo especial o zonas de aparcamiento) con altura de evacuación inferior a 15m, como este caso, es R60, por lo que todos los elementos estructurales deberán alcanzar, como mínimo esa resistencia.

Se establece una excepción para el caso de elementos de cubiertas ligeras cuyo fallo no suponga riesgo para la estabilidad de otras plantas ni para la compartimentación contra incendios. En el caso de este edificio se considera que la cubierta del ático reúne los requisitos para dicha consideración.

Cabe señalar la doble funcionalidad de algunos elementos a los que, por un lado, se le exige una resistencia al fuego como elementos estructurales y, por otro lado, una estabilidad e integridad al fuego como elementos delimitadores de la envolvente o de sectores de mayor tiempo. Esto lleva a que, a nivel arquitectónico, se deba exigir una mayor protección a algunos elementos por su función delimitadora, solucionandola mediante sistemas pasivos de mayor alcance, y que, al mismo tiempo, van a dotar de mayor protección como elemento estructural. Sin embargo, la comprobación estructural de dichos elementos se debe realizar en función de la resistencia indicada en la norma solo para dicho caso y, consecuentemente, para ese tiempo aunque sea menor que como elemento delimitador.

Esto sucede con las medianeras, en las que como elemento estructural se exige una R60 mientras que como elemento separador se les exige una EI120. Para este caso se ha considerado un trasdosado EI60, mientras que en el resto de situaciones el trasdosado considerado es EI30.

PROTECCIÓN AL FUEGO DE ELEMENTOS METÁLICOS

Para los elementos metálicos de forjado se reconoce el mal comportamiento del material frente al fuego, lo cual lleva de forma inexorable a emplear sobre estos elementos sistemas de protección pasiva, como son cierres en cajón, pinturas intumescentes o morteros ignífugos que aporten la resistencia mínima indicada por la normativa. Se debe considerar la propia protección que puede aportar el falso techo del edificio, cuya resolución podría ser para aportar un mínimo de EI30, como se ha señalado en otros apartados, y que este falso techo complemente la protección natural o añadida de cualquier elemento de los forjados. Por tanto, esto lleva a que en este trabajo no se evalúe la protección al fuego de los elementos metálicos.

Estas consideraciones también son validas para los posibles herrajes de la estructura.

PROTECCIÓN AL FUEGO DE ELEMENTOS LINEALES DE MADERA LAMINADA

Se contemplan dos posibilidades:

- Elementos lineales que forman parte de la cubierta del ático: al no ser una cubierta que afecte a la evacuación y cuya sobrecarga no excede de 1kN/m², se puede limitar la protección mínima al fuego a R30. Esta protección se puede conseguir mediante trasdosados o por sobresección del propio material. Para este trabajo, siguiendo el criterio del proyecto original, se ha considerado que los elementos planos que forman la cubierta del ático irán revestidos interiormente por un trasdosado de cartón-yeso, que perfectamente podría aportar dicha protección con los materiales adecuados. En cambio, para los elementos lineales, que son nuevos y ya reducen la altura libre en varias zonas, se comprueba la sección reducida mediante el programa Dlubal
- Elementos lineales en plantas piso: se ha procurado que las secciones de todos los elementos de madera laminada que forman parte de los forjados interiores y que descuelgan de estos tengan el mínimo canto

posible para poder ir alojadas dentro del falso techo diseñado y que aporta una EI30. Con esto, la comprobación a fuego de estos elementos se hace por el método de la sección reducida mediante el programa Dlubal y para una R30.

PROTECCIÓN AL FUEGO DE ELEMENTOS PLANOS DE MADERA TIPO CLT

Como ya se ha indicado en varios apartados, partiendo del diseño original, se disponen trasdosados en cerramientos y forjados, aportado como mínimo una EI30. Esto deja los siguientes casos:

Elemento	R min. s/CTE	Trasdosado	R faltante
Fachada	R60	EI30	R30
Medianera (*)	R60	EI60 (*)	R60
Forjado entre pisos	R60	EI30	R30
Divisoria	R60	EI30	R30

(*) En el caso de las medianeras se ha considerado un trasdosado EI60.

Para los elementos de CLT no es posible utilizar de forma directa el programa Dlubal ya que no dispone de módulo que permita insertar estos datos, por lo que se debe calcular de forma previa la sección reducida de los elementos anteriores y generar un modelo secundario para comprobarlas.

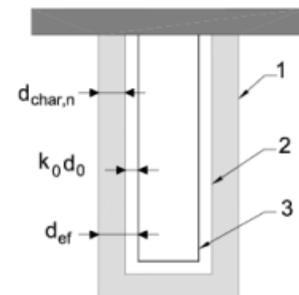
El método de la sección reducida aplicado se explica en el CTE DB SI Anejo E. Una vez calculada la sección reducida, el método de comprobación de la estructura será mediante la comprobación de su capacidad portante tal como se describe en el CTE SE-M, aunque considerando situación accidental.

En el CTE DB SI Anejo E se establece la siguiente ecuación para el cálculo de la sección reducida:

$$d_{ef} = d_{char,n} + k_0 \cdot d_0$$

Donde:

- def: profundidad eficaz de carbonización
- d₀: 7mm
- K₀: 1 si el tiempo de cálculo es superior a 20min (en este caso se considera 30 o 60min)
- d_{char,n}: profundidad carbonizada nominal calculada según apartado E2.2 de la norma.



- 1 Superficie inicial del elemento
- 2 Límite de la sección residual
- 3 Límite de la sección eficaz

El termino $d_{char,n}$ es un valor que depende de la velocidad a la que se carbonizan diferentes tipos de madera así como al tiempo de exposición de esta al fuego, quedando la siguiente expresión:

$$d_{char,n} = \beta_n t$$

En el caso de los paneles de CLT de madera de pino radiata, al no aparecer este tipo de producto de forma específica y clara en la norma, se considera equivalente a madera maciza, por lo que, dada su densidad característica, le corresponde una velocidad de carbonización de 0,80mm/min. Tal como establece la norma, se deben considerar dos posibles situaciones: madera no protegida y madera protegida.

Se establece la siguiente tabla de valores de carbonización en función del tiempo mínimo requerido y de la disposición de elementos de protección:

MADERA NO PROTEGIDA		
t (min)	d _{char,n} (mm)	def (mm)

30	24	31
60	42	55
90	72	79
120	96	103

En el caso de madera protegida se consideran dos periodos de tiempo (t_1 y t_2) con diferentes velocidades de carbonización, según lo indicado en la norma, y que el inicio de la carbonización se produce al fallar el elemento de protección.

A partir de estas consideraciones se elabora la siguiente tabla en la que se indican los tiempos de carbonización con protecciones EI30 y EI60:

EI protección	t (min)	d _{char,n} (t1) (mm)	d _{char,n} (t2) (mm)	def (mm)
30	30	0	0	0
30	60	14,38	11,5	32,88
30	90	44,38	35,5	86,88
30	120	74,38	59,5	140,88
60	60	0	0	0
60	90	14,38	11,5	32,88
60	120	44,38	35,5	86,88

Una de las conclusiones que se pueden extraer si se comparan ambas tablas es que es que no sale rentable considerar protecciones EI30 para elementos que deben cumplir una R de 90 o 120 minutos ya que la carbonización final es mucho mayor que si se considera desprotegida a la madera.

Elemento	R min. s/CTE	Trasdosado	Panel CLT mm/capas	D residual
Fachada	R 60	EI30	100 3c	67,12
Medianera	R 60	EI60	120 3c	120
Medianera	R 60	EI60	125 5c	125
Forjado entre pisos	R 60	EI30	170 5c	137,12
Divisoria exp. 1 cara	R 60	EI30	90 3c	57,12
Divisoria exp. 1 cara	R 60	EI30	100 3c	67,12
Divisoria exp. 2 caras	R 60	EI30 + EI30	90 3c	24,24
Divisoria exp. 2 caras	R 60	EI30 + EI30	100 3c	34,24

Se ha generado el modelo con secciones reducidas en el programa Dlubal pero, por falta de conocimientos sobre dicho programa, no ha sido posible completar esta comprobación. Se debe dar por válida la resistencia de los prontuarios en defecto de un cálculo más preciso.

8 DIMENSIONADO TERMOACÚSTICO DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Las fachadas, medianeras y cubiertas son elementos que definen la envolvente y, por tanto, son responsables directos en la protección frente al ruido o a las inclemencias meteorológicas. Al utilizar estos elementos como parte del sistema estructural (muros de carga y forjados), participarán activamente en esta función de protección, por lo que corresponde dimensionarlos también para esto.

Como se ha señalado en los puntos 6.1 y 6.2 de esta memoria, el dimensionado se hará conforme a la versión vigente del Código Técnico de la Edificación. Además, para realizar una comparativa objetiva y poder obtener conclusiones adecuadas, se redimensionarán en paralelo los elementos de la envolvente del proyecto original.

Los datos indicados a continuación se refieren únicamente a los sistemas constructivos estudiados de forma simple e independiente. En una situación real de proyecto, después de estos predimensionados, correspondería hacer un estudio termoacústico completo que tenga en consideración otras circunstancias tales como ventilación, pérdidas a través de otros sistemas (carpinterías, divisorias interiores, etc.) o la presencia de elementos emisores de ruidos (maquinaria, ascensor, etc.). Tampoco se estudian los elementos de la envolvente de planta baja.

VALORES LÍMITE APLICABLES

En las diferentes versiones del CTE se dan valores límite de transmitancia tanto para elementos simples (muro, forjado...) como para conjuntos de sistemas (fachada, cubierta...). Para el predimensionado en todos los casos de este estudio, se ha tomado como valor límite el más desfavorable, dada la preeminencia de sistemas opacos frente a los huecos.

Los valores límite indicados por las diferentes versiones de la norma quedan resumidos en la tabla del apartado 5.2 de esta memoria. Además, en cada subapartado dedicado al predimensionado de los diferentes sistemas se indican los valores aplicados para cada caso.

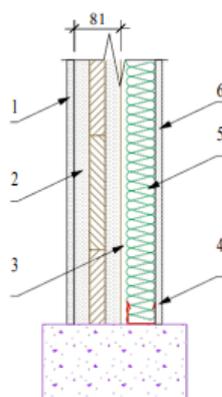
8.1 DIMENSIONADO SEGÚN PROTECCIÓN ACÚSTICA

Al depender de ensayos para obtener los valores de aislamiento acústico, se tomarán como referencia los valores indicados por los fabricantes en catálogo para sistemas equivalentes o de menores prestaciones (menos capas, menos espesor total o menos material aislante).

En cualquier caso, los sistemas ensayados considerados como equivalentes deberán aportar el aislamiento mínimo señalado por el CTE HR. Estos valores están recogidos en el apartado 6.2 de esta memoria.

En el caso de los sistemas ensayados por la empresa Egoin según la información que aparece en su documento técnico *Anexo IV Certificados y ensayos de los paneles CLT*, la sección que más se aproxima a las secciones proyectadas es la siguiente:

B-P ANELENMADERA EGO CLT 81mm + AISLAMIENTO + BA13 2 LADOS

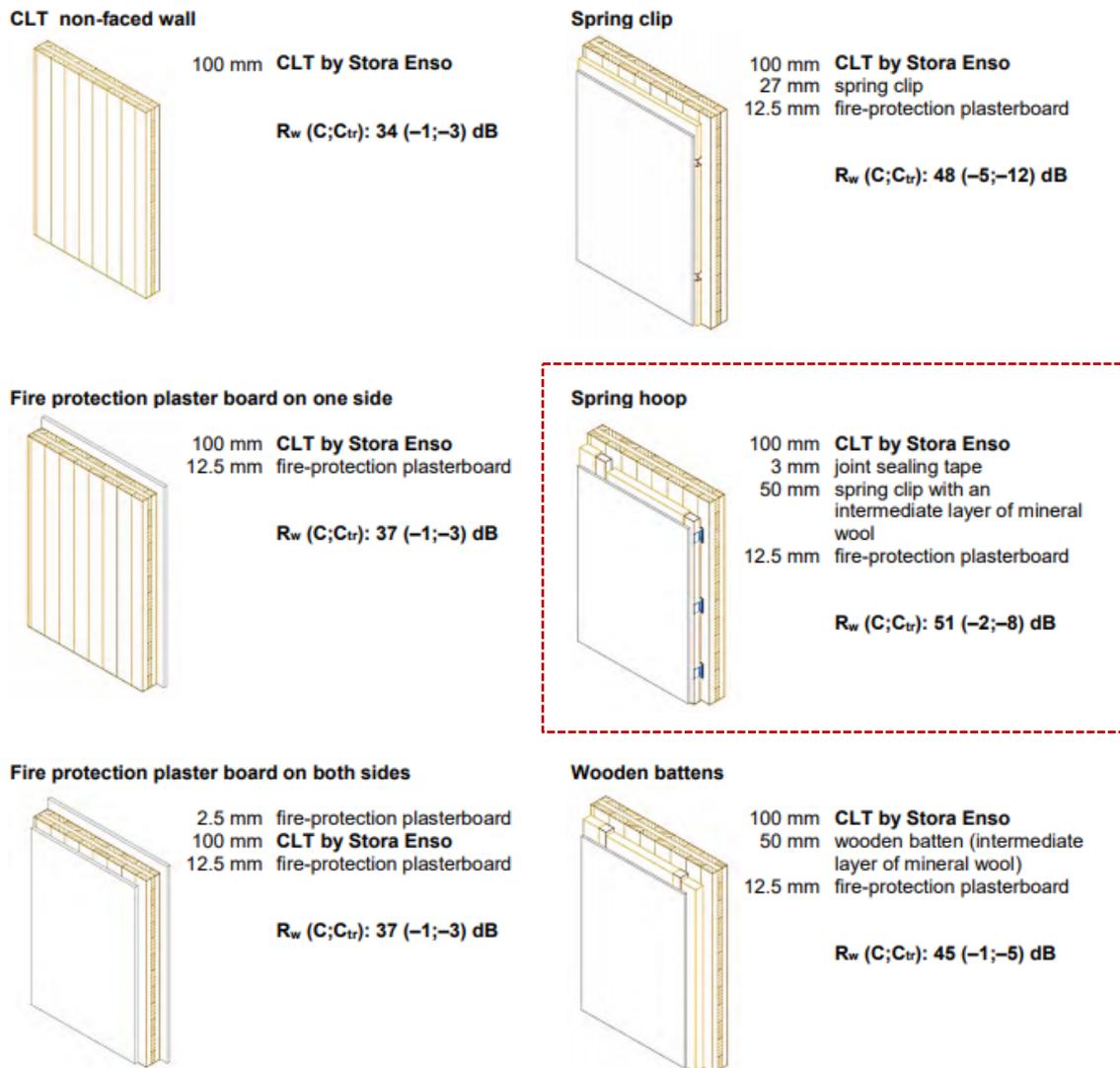


- 1.- Placa de yeso laminado (12.5mm)
- 2.- Panel EGO CLT 81mm
- 3.- Cámara de aire 10mm
- 4.- Perfiles de acero 48mm
- 5.- Lana de roca 50mm (35kg/m³)
- 6.- Placa de yeso laminado (12.5mm)

$$U=0.45 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ k})$$

$$R_w(C;C_v)= 53 (-4;-12) \text{ dB}$$

La siguiente imagen está extraída del documento *Soundproofing for CLT by Stora Enso* publicada por este fabricante con un resumen de diferentes composiciones basadas en CLT y su aislamiento a ruido aéreo:



Se ha marcado el sistema denominado *Spring hoop* por el fabricante ya que su composición puede servir de base a las composiciones de fachada, de medianera o de cerramiento del núcleo del ascensor del edificio propuesto.

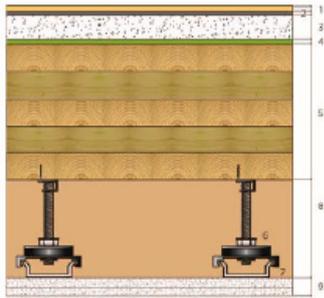
En ambos catálogos, para elementos verticales, con una hoja principal mínima, un trasdosado sencillo con placa de cartón-yeso y unos 50mm de aislamiento basado en lana mineral de baja densidad, se consiguen unas prestaciones aceptables.

Tal como se puede ver en las secciones constructivas tipo mostradas en el apartado siguiente, los sistemas diseñados para el edificio incorporarían otros elementos, por lo que las prestaciones acusticas necesariamente deben ser mejores a las prestaciones de los sistemas recogidos en los catálogos de los fabricantes.

De esta forma, es esperable que las secciones proyectadas cumplan con los valores mínimos de aislamiento a ruido aéreo, si bien sería necesario realizar los ensayos correspondientes. Al no considerarse la ley de masas para calcular el posible aislamiento aportado por el CLT, no es posible profundizar más en el dimensionado según acondicionamiento acústico.

En el caso de elementos horizontales, los elementos ensayados disponibles en los diferentes catálogos de fabricantes difieren notablemente de las posibles soluciones del proyecto a los que se ha tenido acceso. Recurriendo al manual

CLT Handbook (edición Canadá) se encuentra que, en su capítulo 9, se señalan diferentes soluciones ensayadas. Entre todas, se puede encontrar una que se asemeja bastante a la solución de proyecto para forjado entre viviendas.

Side view of the floor cross-section	Description of the CLT floor specimen, from top to bottom	AiIC	ASTC
	1. 10-mm thick laminated flooring 2. 5.5-mm thick felt (ThermaSonHD™) 3. 38-mm thick normal weight concrete 4. 12.7-mm thick wood fibreboard (BP) 5. 175-mm thick CLT 6. 100-mm high sound isolation clips (RSIC-1ADM® Multi-Clip) 7. Metal hat channels 8. Rock fibre insulation (Roxul-AFB®) 9. 15.9-mm thick and 12.7-mm thick Type X gypsum board for base and face layer, respectively	57	60
	1. 10-mm thick laminated flooring 2. 3.5-mm thick rubber membrane (InsonoFloor) 3. 25-mm thick gypsum board (PanoMag®) 4. 8 mm thick plastic underlayment (Insul-R®) 5. 175-mm thick CLT 6. 100-mm high sound isolation clips (RSIC-1ADM® Multi-Clip) 7. Metal hat channels 8. Rock fibre insulation (Roxul-AFB®) 9. 15.9-mm thick and 12.7-mm thick Type X gypsum board for base and face layer, respectively	60	58

Dentro de este documento, los valores AiIC, en dBA, se corresponden al aislamiento a ruido aéreo del elemento, mientras que los valores ASTC se corresponde al aislamiento a ruido de impacto. Los valores señalados son suficientes para cumplir con la normativa española, si bien, revisando el mismo manual, se puede observar como para forjados colaborantes con una base de CLT y una capa superior de hormigón armado, fijada mecánicamente a la inferior, aporta un aislamiento a ruido aéreo superior. El aislamiento a ruido de impacto viene condicionado, en todos los casos, por la solución de pavimento, que siempre debe ser flotante.

Para el forjado de cubierta plana destinado a zonas transitables, es de esperar que, al incluir una capa de hormigón aligerado para formación de pendientes, el aislamiento acústico conseguido sea superior al indicado para forjados entre viviendas.

Como en el caso de los elementos verticales, para los elementos horizontales también es escasa la información disponible y es necesario recurrir a ensayos de los sistemas propuestos.

Por los datos anteriores, y a nivel de proyecto, se establece como válido los siguientes espesores mínimos para paneles de CLT en función de parámetros acústicos:

- Elementos verticales: 100mm
- Elementos horizontales: 170mm

En cualquier caso, como ya se ha señalado en párrafos anteriores es necesario acudir a ensayos de los sistemas propuestos. Además, por lo ya indicado en el apartado 5.3 de esta memoria, sería necesario aplicar la opción general del CTE DB-HR para justificar dicho documento.

8.2 DIMENSIONADO SEGÚN TRANSMITANCIA

En las siguientes tablas se muestran valores de cálculo de las transmitancias por sistema constructivo siguiendo el siguiente procedimiento:

- Cálculo de la transmitancia del sistema ejecutado (CTE 2013) para fijar transmitancia de referencia.
- Adaptación del sistema ejecutado a nueva norma (CTE 2020)
- Adaptación del sistema con madera (CLT) a nueva norma

1. Cálculo de transmitancias en los sistemas del proyecto original y adaptación a nueva normativa

FACHADA

Transmitancia térmica límite s/ CTE 2020

- Elementos simples: 0,41 W/m²K
- Sistemas: 0,22 W/m²K

Valores según CTE 2013		λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior				0,04
Placa de piedra		1,700	0,025	0,01
Cámara de aire ventilada			0,040	0,09
Aislamiento de lana mineral		0,034	0,060	1,76
Enfoscado - mortero de cemento		1,300	0,010	0,01
Hoja de ladrillo perforado catalán		0,565	0,130	0,23
Enfoscado - mortero de cemento		1,300	0,010	0,01
Cámara de aire no ventilada			0,010	0,15
Aislamiento de lana mineral		0,034	0,045	1,32
Placa de cartón yeso		0,250	0,015	0,06
Interior				0,13
Resistencia total				3,82
Transmitancia (U=W/m ² K)				0,26
Espesor del aislamiento (m)			0,105	
Espesor total (m)			0,345	

Valores según CTE 2020		λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior				0,04
Placa de piedra		1,700	0,025	0,01
Cámara de aire ventilada			0,040	0,09
Aislamiento de lana mineral		0,034	0,070	2,06
Enfoscado de mortero de cemento		1,300	0,010	0,01
Hoja de ladrillo perforado catalán		0,587	0,135	0,23
Enfoscado de mortero de cemento		1,300	0,010	0,01
Cámara de aire no ventilada			0,010	0,15
Aislamiento de lana mineral		0,034	0,060	1,76
Placa de cartón yeso		0,250	0,015	0,06
Interior				0,13
Resistencia total				4,55
Transmitancia (U=W/m ² K)				0,22
Espesor del aislamiento (m)			0,130	
Espesor total (m)			0,375	

Medianera

Transmitancia térmica límite s/ CTE 2020

- Elementos simples: 0,65 W/m²K
- Sistemas: 0,65 W/m²K

Valores según CTE 2013		λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior				0,13
Panel EPS		0,037	0,020	0,54
Hoja de ladrillo perforado catalán		0,587	0,135	0,23
Enfoscado - mortero de cemento		1,300	0,010	0,01
Cámara de aire no ventilada			0,010	0,15
Aislamiento de lana mineral		0,034	0,045	1,32
Placa de cartón yeso		0,250	0,015	0,06
Interior				0,13
Resistencia total				2,57
Transmitancia (U=W/m ² K)				0,39
Espesor del aislamiento (m)			0,065	
Espesor total (m)			0,235	

Valores según CTE 2020

Al ser el coeficiente de transmitancia térmica del proyecto original inferior al valor límite de la nueva norma, en este caso no es necesario realizar un ajuste.

Cubierta plana transitable

Transmitancia térmica límite s/ CTE 2020

- Elementos simples: 0,35 W/m²K
- Sistemas: 0,27 W/m²K

Valores según CTE 2013		λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior				0,04
Pavimento cerámico		1,280	0,010	0,01
Capa de compresión (mortero)		1,300	0,060	0,05
Aislamiento de lana mineral		0,034	0,080	2,35
Impermeabilización		0,230	0,005	0,02
Formación de pendientes horm. alig.		0,090	0,100	1,11
Forjado reticular 25+5 (nervio 12cm)		0,652	0,300	0,46
Cámara de aire no ventilada			0,250	0,18
Placa de cartón yeso		0,250	0,015	0,06
Interior				0,10
Resistencia total				4,38
Transmitancia (U=W/m ² K)				0,23
Espesor del aislamiento (m)			0,080	
Espesor total (m)			0,820	

Valores según CTE 2020

Al ser el coeficiente de transmitancia térmica del proyecto original inferior al valor límite de la nueva norma, en este caso no es necesario realizar un ajuste.

Cubierta inclinada

Transmitancia térmica límite s/ CTE 2020

- Elementos simples: 0,35 W/m²K
- Sistemas: 0,27 W/m²K

Valores según CTE 2013		λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior				0,04
Teja cerámica		1,280	0,015	0,01
Capa de compresión (mortero)		1,300	0,060	0,05
Aislamiento de lana mineral		0,034	0,080	2,35
Impermeabilización		0,230	0,005	0,02
Losa de hormigón		1,650	0,160	0,10
Cámara de aire no ventilada			0,020	0,17
Placa de cartón yeso		0,250	0,015	0,06
Interior				0,10
Resistencia total				2,90
Transmitancia (U=W/m ² K)				0,34
Espesor del aislamiento (m)			0,080	
Espesor total (m)			0,355	

Valores según CTE 2020		λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior				0,04
Teja cerámica		1,280	0,015	0,01
Capa de compresión (mortero)		1,300	0,060	0,05
Aislamiento XPS		0,034	0,060	1,76
Impermeabilización		0,230	0,005	0,02
Losa de hormigón		1,650	0,160	0,10
Cámara de aire no ventilada			0,020	0,17
Aislamiento de lana mineral		0,034	0,050	1,47
Placa de cartón yeso		0,250	0,015	0,06
Interior				0,10
Resistencia total				3,78
Transmitancia (U=W/m ² K)				0,26
Espesor del aislamiento (m)			0,110	
Espesor total (m)			0,385	

2. Dimensionado térmico de los nuevos sistemas constructivos

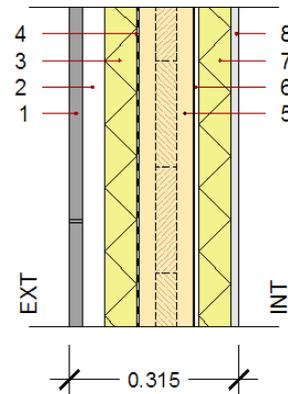
En este dimensionado se tiene en cuenta el resultado del cálculo estructural obtenido según lo señalado en el apartado 7 de esta memoria, así como el predimensionado a fuego, acústica y térmica (solo elementos de la envolvente). En el caso de la limitación de la transmitancia térmica de los elementos se han utilizado los valores límite de la última versión del CTE DB-HE (2020), ya señalados en apartados anteriores.

ELEMENTOS DE LA ENVOLVENTE

Fachada

Panel CLT 100	λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior			0,04
Placa de piedra	1,700	0,025	0,01
Cámara de aire ventilada		0,040	0,09
Aislamiento de lana mineral	0,034	0,060	1,76
Lámina de vapor/impermeabilización	0,250	0,001	0,00
Panel CLT	0,170	0,100	0,59
Lámina de vapor	0,250	0,001	0,00
Cámara de aire no ventilada		0,010	0,15
Aislamiento de lana mineral	0,034	0,060	1,76
Placa de cartón yeso	0,250	0,015	0,06
Interior			0,13
Resistencia total			4,61
Transmitancia (U=W/m ² K)			0,22
Espeor del aislamiento (m)		0,120	
Espeor total (m)		0,311	

FACHADA
CLT 100/3

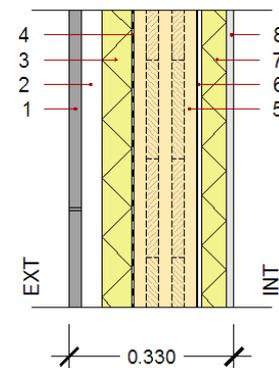


Comparativa con proyecto original:

- Transmitancia: se mantiene
- Espeor de aislamiento: -10mm (-8%)
- Espeor del conjunto: - 64mm (-16%)

Panel CLT 125	λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior			0,04
Placa de piedra	1,700	0,025	0,01
Cámara de aire ventilada		0,040	0,09
Aislamiento de lana mineral	0,034	0,060	1,76
Lámina de vapor/impermeabilización	0,250	0,001	0,00
Panel CLT	0,170	0,125	0,74
Lámina de vapor	0,250	0,001	0,00
Cámara de aire no ventilada		0,010	0,15
Aislamiento de lana mineral	0,034	0,050	1,47
Placa de cartón yeso	0,250	0,015	0,06
Interior			0,13
Resistencia total			4,46
Transmitancia (U=W/m ² K)			0,22
Espeor del aislamiento (m)		0,110	
Espeor total (m)		0,326	

FACHADA
CLT 125/5



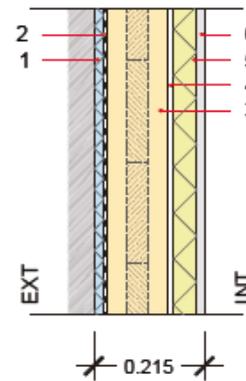
Comparativa con proyecto original:

- Transmitancia: se mantiene
- Espeor de aislamiento: -20mm (-16%)
- Espeor del conjunto: - 49mm (-12%)

Medianera

Panel CLT 120	λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior			0,13
Panel EPS	0,037	0,020	0,54
Lámina de vapor/impermeabilización	0,250	0,005	0,02
Panel CLT	0,170	0,120	0,71
Cámara de aire no ventilada		0,010	0,15
Aislamiento de lana mineral	0,034	0,045	1,32
Placa de cartón yeso	0,250	0,015	0,06
Interior			0,13
Resistencia total			3,06
Transmitancia (U=W/m ² K)			0,33
Esesor del aislamiento (m)		0,065	
Esesor total (m)		0,215	

MEDIANERA
CLT 120/3

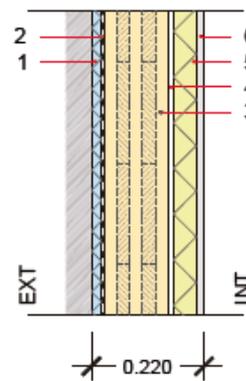


Comparativa con proyecto original:

- Transmitancia: se mantiene
- Esesor de aislamiento: se mantiene
- Esesor del conjunto: - 20mm (-8%)

Panel CLT 125	λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior			0,13
Panel EPS	0,037	0,020	0,54
Lámina de vapor/impermeabilización	0,250	0,005	0,02
Panel CLT	0,170	0,125	0,74
Cámara de aire no ventilada		0,010	0,15
Aislamiento de lana mineral	0,034	0,045	1,32
Placa de cartón yeso	0,250	0,015	0,06
Interior			0,13
Resistencia total			3,09
Transmitancia (U=W/m ² K)			0,32
Esesor del aislamiento (m)		0,065	
Esesor total (m)		0,220	

MEDIANERA
CLT 125/5



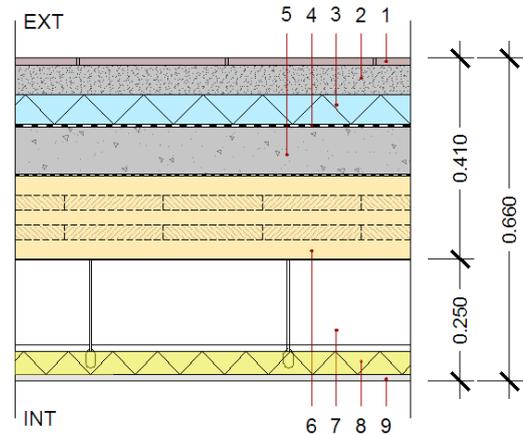
Comparativa con proyecto original:

- Transmitancia: se mantiene
- Esesor de aislamiento: se mantiene
- Esesor del conjunto: - 15mm (-6%)

Cubierta plana

Panel CLT 170	λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior			0,04
Pavimento cerámico	1,280	0,010	0,01
Capa de compresión (mortero)	1,300	0,060	0,05
Aislamiento XPS	0,034	0,060	1,76
Impermeabilización	0,230	0,001	0,00
Formación de pendientes horm. alig.	0,090	0,100	1,11
Panel CLT	0,170	0,170	1,00
Lámina de vapor	0,230	0,001	0,00
Cámara de aire no ventilada		0,195	0,18
Aislamiento de lana mineral	0,034	0,040	1,18
Placa de cartón yeso	0,250	0,015	0,06
Interior			0,10
Resistencia total			5,44
Transmitancia (U=W/m ² K)			0,18
Esesor del aislamiento (m)		0,100	
Esesor total (m)		0,641	

CUBIERTA PLANA TRANSITABLE
CLT 170/5



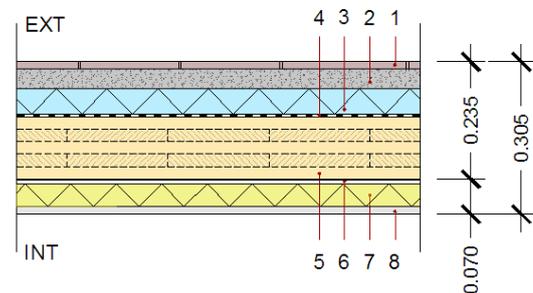
Comparativa con proyecto original:

- Transmitancia: -0,045 W/m²K (-20%)
- Esesor de aislamiento: +20mm (+25%)
- Esesor del conjunto: - 160mm (-20%)

Cubierta inclinada

Panel CLT 125	λ W/(m·K)	e (m)	R (m ² K/W)
Exterior			0,04
Teja cerámica	1,280	0,015	0,01
Capa de compresión (mortero)	1,300	0,040	0,03
Aislamiento XPS	0,034	0,050	1,47
Impermeabilización	0,230	0,001	0,00
Panel CLT	0,170	0,125	0,74
Lámina de vapor	0,230	0,001	0,00
Cámara de aire no ventilada		0,010	0,17
Aislamiento de lana mineral	0,034	0,045	1,32
Placa de cartón yeso	0,250	0,015	0,06
Interior			0,10
Resistencia total			3,95
Transmitancia (U=W/m ² K)			0,25
Esesor del aislamiento (m)		0,095	
Esesor total (m)		0,301	

CUBIERTA INCL. TEJA PLANA
CLT 125/5



Comparativa con proyecto original:

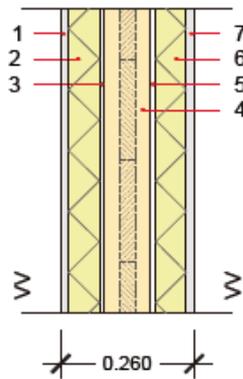
- Transmitancia: -0,01 W/m²K (-4%)
- Esesor de aislamiento: -15mm (-13%)
- Esesor del conjunto: - 84mm (-22%)

En todas las situaciones de elementos pertenecientes a la envolvente del edificio, al utilizar sistemas basados en CLT en sustitución de sistemas tradicionales (muros de fábrica de ladrillo y forjados reticulares de hormigón armado) se consigue una reducción de los espesores totales y, en la mayoría de casos, también de las necesidades de aislamiento térmico para igual transmitancia.

ELEMENTOS DIVISORIOS INTERIORES

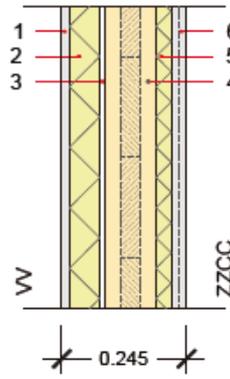
Sin entrar en el dimensionado termico como en el caso de los sistemas que componen la envolvente, a continuación se definen las secciones tipo de los sistemas interiores de divisoria:

**DIVISORIA INTERIOR
VV/VV - CLT 90/3**



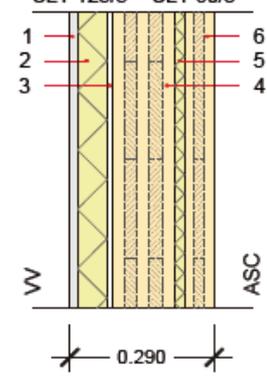
- 1- Trasdoso autoportante PYL 15mm
- 2- Aislamiento lana mineral 45mm
- 3- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 4- Panel CLT 90/3
- 5- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 6- Aislamiento lana mineral 45mm
- 7- Trasdoso autoportante PYL 15mm

**DIVISORIA INTERIOR
VV/ZZCC - CLT 100/3**



- 1- Trasdoso autoportante PYL 15mm
- 2- Aislamiento lana mineral 45mm
- 3- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 4- Panel CLT 100/3
- 5- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 6- Aislamiento lana mineral 30mm
- 7- Trasdoso 2xPYL 15mm + omega 30mm

**DIVISORIA INTERIOR
VV/ASC
CLT 125/5 + CLT 60/3**



- 1- Trasdoso autoportante PYL 15mm
- 2- Aislamiento lana mineral 45mm
- 3- Cámara de aire sin ventilar 10mm
- 4- Panel CLT 125/5
- 5- Aislamiento lana mineral 20mm
- 6- Panel CLT 60/3

8.3 COMPROBACIÓN DE LAS CONDICIONES HIGROTÉRMICAS DE LOS SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

Además de cumplir con lo indicado en el CTE HR o en el CTE HE, también es necesario que estas mismas soluciones cumplan con lo indicado en el CTE HS1 y que no se generen condensaciones entre las capas que las conforman.

Para comprobar las condiciones higrotérmicas de dichas soluciones se ha recurrido a la web <https://www.ubakus.de/u-wert-rechner/> en la que se pueden simular estos sistemas y calcular sus propiedades. Los resultados quedan recogidos en el Anexo VI de esta memoria



9 CONCLUSIONES

Este trabajo buscaba proponer una alternativa pausable, en un proyecto real, basada en madera frente a los sistemas habituales utilizados hoy en día para edificar. A lo largo del trabajo se ha trazado el camino seguido para verificar las diferentes posibilidades planteadas, comprobando la estabilidad y resistencia de la estructura.

Como se ha podido ver, se partía de un edificio residencial con unas grandes complejidades y que no respondía a un bloque típico en el que se suelen repetir las viviendas o, al menos, los ejes directores, sino que la norma era la adaptabilidad a casos muy diferentes. El proyecto original partía de la premisa de ofrecer un producto adaptado a los posibles clientes, lo que requería utilizar sistemas flexibles o, al menos, que no limitaran o restringieran las diferentes distribuciones, y resultaba en una distribución variable entre plantas.

Este trabajo demuestra que algunos de los sistemas basados en madera pueden ser buenas alternativas frente a sistemas tradicionales, como los cerramientos ejecutados con materiales cerámicos o la estructura en hormigón armado, en diseños complejos y partiendo del planteamiento original del arquitecto utilizando dichos materiales, si bien, la adaptación desde una estrategia proyectual a otra requiere de un intenso trabajo, más extenso de lo habitual, si se quiere respetar en todo el diseño original. La mayoría de complicaciones surgidas se podrían haber evitado contemplando desde un inicio la madera como una posibilidad real o si al menos se partiera desde un esquema con una estrategia equivalente. El uso de una estructura mixta con tres sistemas diferentes (paneles de CLT y elementos lineales de madera laminada o acero) ha ayudado a resolver muchos de los puntos críticos encontrados durante el proceso. En cualquier caso, el uso del acero para las jácenas del pórtico central ha sido básico para no perjudicar el proyecto al permitir estas resolver con mayor facilidad el encuentro con los paneles de forjado. Por otro lado, los paneles de CLT han dado una buena respuesta tanto para elementos horizontales como para verticales, reduciendo las secciones necesarias para los estados de carga indicados con respecto a un proyecto similar con sistemas tradicionales.

Una de las conclusiones que se pueden extraer es que una envolvente portante en CLT, sustituyendo tanto a los pilares de fachada como a los cerramientos, puede ser una buena solución para la mayoría de proyectos plurifamiliares actuales. Esto, además, por las capacidades aislantes de la madera, facilita dotar al edificio de una envolvente más eficiente y que requiere de menor aislamiento para cumplir con los parámetros de la normativa. También se puede considerar que, al ser un material uniforme en fachada, se reducen los puentes térmicos que se generan en un edificio con sistema porticado.

En el caso de la estructura interior depende de las necesidades de los usuarios, pero sería factible tanto una solución con muros de carga en CLT (si la estructura está muy reglada) como una solución porticada como en este proyecto.

Se puede concluir que el proceso presentado en este trabajo ha servido para definir y depurar un camino que facilite la resolución de otros edificios de características similares o con una concepción más sencilla, organizada y reglada, en la que el cambio de un tipo de estructura por otro debería resultar fácil y rápido, aunque al final todos los edificios tienen sus propias complejidades.

Ha quedado pendiente poder profundizar en el uso de forjados mixtos madera-hormigón y las posibles ventajas que esto aporta (reducción de canto para una misma luz o aumento de la luz para un mismo canto). También ha quedado pendiente poder profundizar en las diferencias entre sistemas desde el punto de vista del ahorro energético o de la huella de carbono, así como la repercusión de una estructura de madera, más ligera, sobre la estructura de hormigón armado en planta baja y la cimentación pero es de esperar que un material más ligero y sostenible aporte ventajas en esos aspectos.



10 BIBLIOGRAFÍA

- Revista AITIM nº 309 Septiembre/Octubre 2017 “Especial CLT”
- Guía de construir con madera, Confemadera, Ed. 2010
- Estructuras de madera, bases de cálculo, Aitim, Ed. 2018
- Tableros de madera de uso estructural, AITIM, Ed. 2004
- Canadian CLT Handbook, FP Innovations, Ed. 2019
- The CLT Handbook, Swedish Wood, Ed. 2019
- Código Técnico de la Edificación, RD 314/2006 y revisiones posteriores.
- Prontuario técnico para la construcción con paneles de madera contralaminados EGO CLT, Egoín, Ed. 2019
- Tablas de predimensionamiento, KLH, Ed. 2019
- Construcción, KLH, Ed. 2012
- Building physics, KLH, Ed. 2012
- CLT technical brochure, Stora Enso, sin fecha

11 ANEXOS

- I. **Planos de arquitectura, proyecto original**
- II. **Planos de estructuras, proyecto original**
- III. **Propuesta de estructuras**
- IV. **Cálculo de elementos sencillos**
- V. **Memoria de cálculo, Dlubal**
- VI. **Comprobación de condiciones higrotérmicas mediante Ubakus**