

Trabajo Fin de Grado

La prefabricación estructural de la madera contralaminada y su aplicación en obra nueva y rehabilitación.

Autor

Sergio Cortés Jiménez

Directores

Begoña Genua Díaz de Tuesta
José Cegoñino Banzo

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2014-2015



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. _____,

con nº de DNI _____ en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
_____, (Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, _____

Fdo: _____

Resumen

La prefabricación estructural de la madera contralaminada y su aplicación en obra nueva y rehabilitación.

La siguiente memoria, resumen del Trabajo Fin de Grado titulado del mismo modo, contiene una breve exposición de las posibilidades y cualidades de la madera contralaminada dentro del mundo de la arquitectura. Partiendo de una recopilación de características y aplicaciones de este versátil material, con su correspondiente valoración cualitativa; se pasa a un análisis cuantitativo de dos ejemplos construidos. Dicho análisis se lleva a cabo por medio del método de los elementos finitos y nos permite comprender el comportamiento de este material, así como comparar los resultados con los obtenidos de la bibliografía. Para entender de mejor modo el funcionamiento de este material se ha optado por analizar dos obras de muy diversa índole, por un lado se analiza una obra nueva para comprender la efectividad dentro de este ámbito y por otra parte se analiza una intervención dentro del segmento de las rehabilitaciones para ver su compatibilidad con las estructuras preexistentes.

ÍNDICE

Introducción al tema de investigación y su justificación.....	4
Objetivos.....	5
Metodología	6
Estado de la cuestión.....	7
El CLT	8
¿Por qué madera?.....	8
¿Qué es el CLT?	12
Modulación de las piezas y Producción	13
Las colas y otros elementos de unión	14
Tecnología de corte CNC.....	14
Propiedades ventajosas en obra nueva y en rehabilitación	15
Respuesta frente a incendios.....	15
Investigaciones al respecto y porque se inventó	17
Sismos y anclajes metálicos	17
Empresas del sector	18
Catálogo de proyectos y breve descripción de sus valores e innovaciones.....	19
Ca la Dona	19
Pabellón de España en la Expo Milano 2015	23
Diferentes ejemplos de dRMM Architects.....	25
Refugio del Monte Rosa.....	27
Análisis estructural de diferentes soluciones mediante elementos finitos	29
Respuesta estructural esperada del material	29
Soluciones en obra nueva: Stadthaus, 24 Murray Grove, London	30
Soluciones en rehabilitación: Ca la Dona	39
Valoración del sistema y resultados de ambos cálculos por elementos finitos.	43
Conclusiones: el futuro del CLT y sus campos de aplicación	44
Bibliografía y referencias	45
Anexo I: Breve descripción del método de cálculo usado.....	48
Anexo II: Planimetría de ambos ejemplos calculados	50
Anexo III: Modelado con las cargas usadas para el cálculo.....	55
Anexo IV: Mapas de resultados obtenidos en el cálculo por elementos finitos	59

Introducción al tema de investigación y su justificación

El tema de investigación parte de las inquietudes propias de alguien que se encuentra tan próximo a acabar el grado en estudios de arquitectura que le permite hacer una valoración retrospectiva y plantearse que echa en falta en su formación. Esta investigación trata de llegar a un acuerdo entre el estudio teórico y la práctica. Mediante la combinación de las sinergias de dos áreas, la ingeniería y la arquitectura, se ha tratado de cumplir el objetivo de dar un ápice de realidad a los números y ver las aplicaciones de la teoría.

En cuanto a la excusa que ha servido de fiel aliada para realizar esta unión, se trata de un material con el suficiente grado de tecnificación como para posibilitar un análisis numérico, así como con las múltiples posibilidades de uso como para seducir a arquitectos.

Entrando en los motivos que han llevado a la elección de este material (CLT), para realizar dicha profundización, se encuentran el hecho de que parece un material más que apropiado para nuestros días. De manera ciertamente egoísta, se ha tratado de darle un trasfondo práctico e informativo a este estudio, con el fin de obtener información sobre un material que puede ser muy recurrente en las próximas décadas. En los sucesivos apartados vamos a ver como este material es referente en cuanto a protección del medioambiente, seguridad laboral, prefabricación flexible, facilidad en el transporte, idoneidad en rehabilitación, cualidades estéticas y tantos otros temas de gran actualidad. Así mismo se van a tratar de desmentir afirmaciones al respecto de la baja resistencia frente al fuego de los compuestos madereros, la mala respuesta frente a agentes patógenos y humedades, así como la falsa creencia de que estos sistemas elevan el coste de la obra o el escepticismo ante las capacidades portantes de un material que parece del siglo pasado.

Por estos y otros motivos, los siguientes apartados tratan de demostrar la validez del CLT como material del siglo XXI.

Así mismo se va a exponer una serie de cálculos realizados con el fin de comprender mejor las capacidades de este material. Dichos cálculos se llevan a cabo mediante la metodología de los elementos finitos. Esta forma de trabajar con cálculos estructurales ha sido investigada para realizar el presente TFG y se ha materializado con el cálculo de dos edificios mediante el programa de cálculo Nx-Ideas.

Objetivos

Los objetivos del Trabajo Fin de Grado que trata de ser resumido en esta memoria pasan por el aprendizaje de una nueva herramienta de cálculo mediante el método de los elementos finitos, así como el mayor conocimiento del CLT en sí mismo.

En cuanto al objetivo de profundizar en el método de los elementos finitos, se ha partido sobre la base teórica aprendida en las correspondientes asignaturas de estructuras. Una vez asentada esta base teórica se ha procedido al objetivo en sí mismo, de aprender a modelar y calcular un edificio completo mediante un software informático que se base en dicho método. Mediante este cálculo se trata de conseguir un conocimiento global del funcionamiento de una estructura modelada desde cero, así como cierto grado de autosuficiencia a la hora de enfrentarse a un proyecto propio.

En cuanto al conocimiento sobre el material elegido, el CLT, se trata de conseguir un abanico lo suficientemente amplio de características y ejemplos construidos como para ser capaz de afrontar un hipotético proyecto en el cual se fuese a emplear este material compuesto.

Metodología

Sin profundizar en el proceso de investigación, se procede a enumerar los diferentes pasos seguidos en la metodología de trabajo.

- Elección de ambos departamentos para realizar la codirección.
- Investigación sobre materiales de tipo prefabricado y compuestos de madera.
- Elección del CLT como material de estudio.
- Búsqueda de ejemplos para ser analizados por el método de los elementos finitos.
- Investigación en el manejo del programa Nx-Ideas para realizar los modelados y posteriores cálculos.
- Investigación sobre las propiedades del CLT y valores para realizar el cálculo.
- Búsqueda de los procesos de fabricación y diversos ejemplos de utilización.
- Modelado y cálculo de dos proyectos por el método de los elementos finitos.
- Fase de revisión, resumen y selección.
- Valoración de los cálculos obtenidos por el método de los elementos finitos.
- Redacción de la memoria.
- Valoración y conclusiones.

Estado de la cuestión

Haciendo un símil con la evolución de la carrera de Jean Prouvé (1901-1984), al igual que este, los fabricantes de madera han pasado de ser artesanos de taller a generar piezas de un alto grado de tecnificación mediante avanzadas técnicas propias de las industrias más modernas. Sin embargo el sentido en el cual enfoca el genio parisino su carrera dista completamente del material aquí expuesto. Este fundó sus estudios y patentes principalmente en la construcción prefabricada con metal, usando la madera en momentos muy puntuales debido a la situación de guerra que atravesaba Europa. Este avance de la prefabricación con materiales como el acero, llevado a cabo por Prouvé y tantos otros que trabajaron con prefabricados de hormigón y acero, ayudó, junto con las técnicas de construcción en obra con hormigón armado, a dejar de lado la construcción en madera.

Junto a este factor, se encuentra la falsa creencia de que una obra de hormigón y/o acero es más sólida y estable. Afirmación completamente falsa, pues esta ficticia apariencia de solidez de las construcciones actuales se reduce a unos centímetros de aplacados de piedra o brillantes metales pulidos, perfectamente compatibles con la madera como elemento estructural, si así se desea.

Por otro lado, como dice Enrique Nuere en su artículo 'Tradición recuperada', la degradación de tantas estructuras de hormigón que habían sido consideradas la panacea de la construcción, junto con los impedimentos de las nuevas normativas frente a incendios que prohíben las estructuras miesianas de perfiles de acero vistos, han facilitado la vuelta de un material que en realidad nunca se fue. De este modo, en la década de 1980 resurgió en España el interés por la madera, que culminaría con la llegada de los nuevos perfiles de madera laminada y el CLT a finales de la década siguiente.



I. 1 Industria de fabricación del CLT

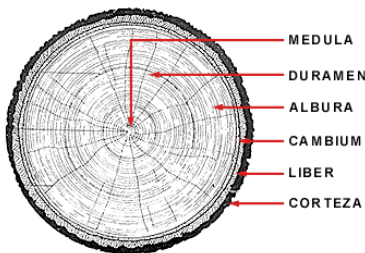
El CLT



I. 2 Asociación de investigación de las Industrias de la Madera

Antes de enunciar ninguna de las múltiples propiedades de este material, conviene aclarar el tema de las siglas y nombres que reciben toda una serie de patentes que comparten ciertas características comunes. Dada la relativa novedad de este material, existe una falta de estandarización y normativa común para todos los productores. Esto se traduce en que cada estudio realizado le otorga un nombre, así como cada empresa otorga el suyo a sus productos patentados. En el ámbito más cercano es frecuente referirse a este material como 'Tablero Contralaminado', pues es el otorgado por Aitim (Asociación de investigación de las Industrias de la Madera). Sin embargo, en este estudio se ha decidido nombrarlo bajo las siglas CLT (Cross Laminated Timber) usadas en la mayor parte de países anglosajones, o bajo una traducción directa de este nombre, madera contralaminada, por considerar más apropiado el hecho de mencionar explícitamente su materia prima.

¿Por qué madera?



I. 3 Estructura tipo de un tronco de árbol

Dado que se trata de un material de construcción que usa madera como materia prima, necesita poca introducción respecto a su origen. Pese a esto, es necesario recordar ciertos conceptos como que el 28% de la superficie terrestre está cubierta por bosques, o que ya no es necesario recurrir a la tala extensiva para abastecer de madera a la industria de la construcción. De entre las diferentes variedades de madera existente, las más comunes en el mundo de la construcción, por cualidades y por volumen empleado, son las coníferas, que representan 300 millones de m³ de material de construcción cada año. Se trata de especies de gran producción en volumen de madera y rápido crecimiento, siendo la materia prima principal de los paneles CLT.

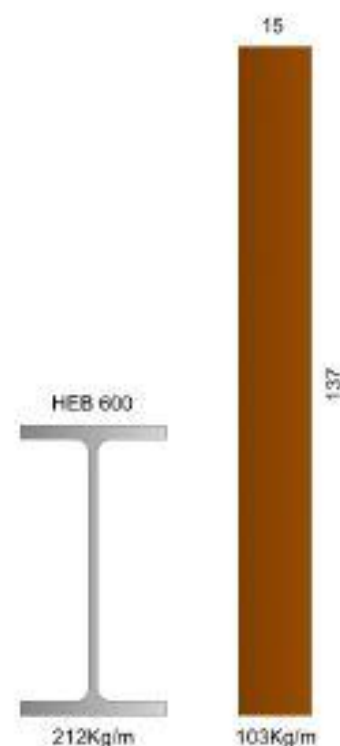


I. 4 Construcción con madera CLT

Así mismo, es pertinente decir que se pierde anualmente más masa boscosa por enfermedades de la madera y por incendios que la que se consume mundialmente para ser usada en la construcción. Esto sin tener en cuenta que la gran mayoría de empresas del sector se basan en plantaciones controladas donde la reforestación es una tarea principal. En particular, una de las marcas líderes en producción de paneles CLT, la marca KLH, exige a sus proveedores certificados de procedencia de la materia prima, lo cual le permite a la marca obtener altos reconocimientos en cuanto a respeto medioambiental.

Pese a que pueda parecer un material desbancado por el acero y el hormigón, la madera nunca se ha terminado de marchar del sector de la construcción. Eso sí, este material ha sufrido un mayor retroceso en el sur de Europa frente al que ha sufrido en otros países como Estados Unidos o Canadá, o en la península escandinava, donde sigue estando completamente vigente en el sector de la construcción de viviendas. La madera ha sido considerada por muchos un material de segunda, en especial por sus características desfavorables frente a la humedad, los xilófagos y el fuego. Pero por otro lado, bien es sabido que una estructura de madera puede resistir más tiempo frente al fuego que determinadas estructuras de acero.

Dos aspectos de las estructuras de madera que tenía difícil solución eran la limitación de luces abarcables y la existencia de imperfecciones internas que debilitasen la pieza minorando su capacidad portante. Pues bien, con la aparición de las técnicas de producción de piezas formadas por láminas de madera encoladas se han conseguido solucionar ambos. La industria es capaz de cubrir grandes luces y a la vez minorar las imperfecciones por la superposición de diferentes capas unidas por adhesivos. En cuanto a la cubrición de grandes luces, cabe decir que su relativo uso ha estado movido más por motivos estéticos que por cuestiones referentes a sus capacidades. Sin embargo, en el binomio estructural resistencia-peso gana la madera frente a otras soluciones clásicas, como el hormigón o el acero. Según un estudio realizado por la Universidad Politécnica de Madrid para la embajada canadiense, para la misma resistencia, una viga metálica puede llegar a pesar hasta 1,5 veces más y una viga de hormigón entre 2,5 y 3,5 veces más que una viga de madera con una resistencia equivalente.



I. 5 Comparativa dimensión-peso de dos vigas con similar resistencia

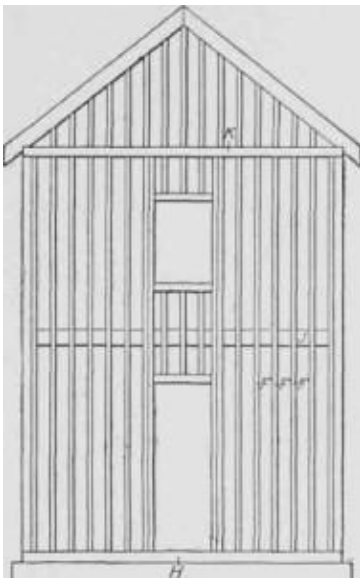
	Carga (Kg/m)	Luz (m)	Dimensiones (cm)	Peso (Kg/m)	Energía de fabricación (KJ/m)
Viga de madera laminada	2.800	7,5	13 x 80	55	157.000
Viga de acero IPE-360	2.800	7,5	12,5 x 36	57	653.000

I. 6 Cuadro comparativo de resistencia, peso y coste energético ¹

¹ Estudio realizado por Luis Beltrán (Profesor titular de arquitectura en la Universidad politécnica de Madrid) y Mikel Landa (Profesor de arquitectura en la Universidad de Navarra), perteneciente al documento 'La casa canadiense de estructura de madera', encargado por la Embajada de Canadá.

Con el anterior cuadro resumen queda patente, que pese a que la relación resistencia-peso no siempre sea tan desfavorable con respecto a la de la madera, existen otros factores a tener en cuenta, como por ejemplo la energía consumida en su fabricación. Si atendemos a esta última encontramos otro de los argumentos a tener en cuenta a favor de un material generado a partir de madera, pues este ahorro de energía se traduce en un menor coste y unas emisiones de gases contaminantes infinitamente menores.

Al respecto de la cuestión de la durabilidad de los materiales construidos a base de madera, cabe destacar ciertos aspectos que suelen ser pasados por alto, como por ejemplo el diferente grado de durabilidad entre la albura y el duramen. Junto con este, el grado de humedad es determinante, pues no a todas las especies atacan por igual los insectos xilófagos y hongos. El porcentaje de humedad es determinante, pues por debajo del 19% se considera que remiten la mayor parte de los ataques mencionados, pudiendo recibir el sello de calidad S-DRY. Este dato de porcentaje de humedad es determinante tanto en el proceso de prefabricado de las piezas, como en la puesta en obra y posterior mantenimiento. Así pues, es recomendable evitar el contacto con la obra húmeda y aportar las capas anti-vapor necesarias en los cuartos de baño y cocinas, así como en los cerramientos con el exterior. Cabe decir que pese a estas consideraciones, siempre es necesario tratar las piezas fabricadas con madera en función de la especie de la materia prima y del uso que se le va a dar.



I. 7 Sistema 'Ballon Frame'



I. 8 Sistema 'Platform Frame'

Como antecedentes directos del material que se expone en este documento, las dos técnicas más frecuentes en la construcción mediante elementos prefabricados de madera han sido el sistema de 'plataforma' y el llamado 'ballon'. Siendo el primero de ellos el punto base sobre el cual se desarrolla la técnica constructiva del CLT, pues a diferencia del segundo, la técnica de plataforma se basa en elementos portantes verticales de una planta, sobre los cuales se coloca el forjado de madera para proseguir con los elementos verticales de la siguiente planta. De esta forma se reducen los tamaños de las piezas prefabricadas y se gana rapidez en el transporte y puesta en obra. Del mismo modo los paneles de madera CLT se ensamblan siguiendo esta lógica constructiva, añadiendo un plus de rigidez y estabilidad a la estructura, en lo que se ha dado a conocer como 'honey comb'.

En cuanto al comportamiento estructural de la materia prima usada en el CLT, simplemente cabe recordar su buen comportamiento a tracción y compresión en la dirección paralela a las fibras. Sin embargo este comportamiento se ve ampliamente empeorado en el sentido perpendicular a dichas fibras. Esta heterogeneidad de respuesta de la madera es lo que define a la madera como material ortótropo, a diferencia de los materiales con similares comportamientos en todas las direcciones. Esta necesidad de generar un material isótropo, para la prefabricación de elementos industrializados, es una de las que ha llevado a la industria a desarrollar los materiales a base de madera laminada y colas. En particular, la colocación de láminas giradas 90º alternamente en los compuestos de CLT genera un efecto placa que es de gran ayuda en la construcción con elementos prefabricados.

Mención aparte merecen los datos respecto a la huella ecológica del material (carbon footprint), donde el balance de producción es sumamente ventajoso. Posteriormente se hablará de las emisiones durante la producción, sin atender a ellas, está considerado que por cada tonelada de madera extraída de un bosque, este ha absorbido 1,47 toneladas de CO² y generado 1,07 toneladas de O².

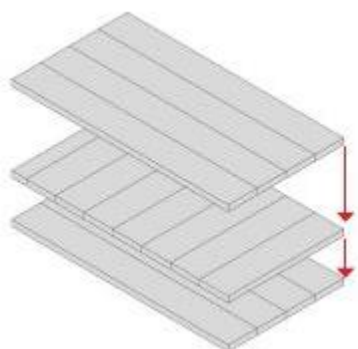


I. 9 Obra realizada con madera laminada



I. 10 Obra realizada con madera CLT

¿Qué es el CLT?

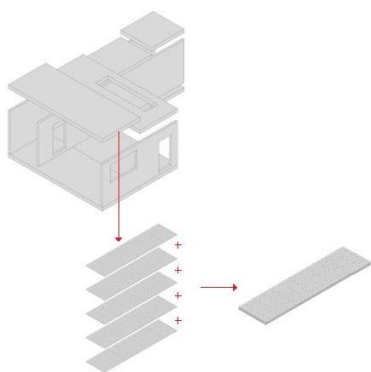


I. 11 Disposición de las capas en un panel CLT con tableros colocados a 90º

Son multitud las definiciones sobre este material, al igual de amplio que lo es el abanico de patentes existente. Sin embargo no merece la pena particularizar en la definición otorgada por cada marca productora, pues las propiedades son suficientemente similares como para considerarlos un mismo material.

En lo que coinciden todos los productores, es en la denominación de panel estructural conformado por encolado de tableros de madera, conteniendo entorno al 99,4% de madera y un 0,6% de colas.

La materia prima principal es la madera de conífera aserrada. Estos tableros son encolados y conformados mediante grandes presiones que les dotan de gran uniformidad. Los modelos espesores más frecuentes están formados por 3 o 5 capas colocadas a 90º alternadamente, sin embargo se producen elementos de mayor espesor y número de capas, manteniendo siempre un número impar de capas.



I. 12 Sistema constructivo en base a placas

La ventaja principal de este material es la facilidad para crear elementos que funcionan como placas, con la posibilidad de ser usados en forjados y muros portantes con modificaciones mínimas. Cada elemento se ha diseñado para ser usado en posición vertical u horizontal, pues no se trata de un material completamente isótropo, ya que la dirección de las fibras de las capas exteriores sigue mandando a la hora de orientar los elementos.

Se trata de paneles estructurales capaces de conformar al mismo tiempo las divisiones y fachadas, ya sea con acabado visto o quedando ocultos tras los acabados superficiales. Esta cualidad genera una mayor superficie útil en los proyectos, pues estructura y divisiones están generadas por los mismos paneles.

<p>Los paneles de madera contralaminada KLH se elaboran con tablas de madera de coníferas estratificadas en cruz, reduciendo el alabeo y la dilatación a un mínimo insignificante, encoladas con procesos que permiten traspirar la madera, convirtiéndose en placas de madera maciza de gran formato.</p>	<p>VENTAJAS</p> <ul style="list-style-type: none"> > Rapidez y precisión de ejecución > Libertad de diseño > Obra seca > Mayor superficie útil > Excelente relación resistencia – peso > Bajo impacto ambiental > Fabricación sometida a control de calidad externo > Capacidad para transmitir cargas en todas las direcciones
	

I. 13 Definición y características según Alter Materia

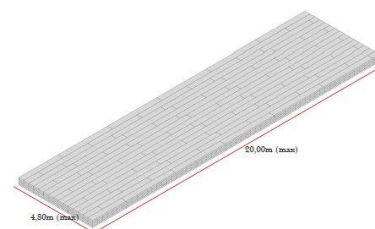
Modulación de las piezas y Producción

Se produce a partir de tableros de madera conífera aserrados, que pueden ser generados en cualquier aserradero convencional y son entregados a la planta de montaje sin cepillar, pues el cepillado se produce sobre las diferentes capas de tableros alineados, para unificar espesores, y sobre el panel de CLT ya terminado. La disposición de los paneles no necesita aporte de cola entre los tableros de una misma capa, pero si con los situados en la capa siguiente, colocados a 45º o 90º con respecto de la anterior. Los tableros usados pueden ser de primera y segunda clase según lo dispuesto en la norma UNE-56544, pero siempre dentro del tipo de madera considerada como estructural en el EUROCODIGO 5. Así mismo, la humedad requerida a los tableros usados para la fabricación está entorno al 12%.

Los espesores más comunes para cada una de las capas están comprendidos entre 10 mm y 50 mm, alcanzando espesores totales de los paneles de entre 70 mm y 800mm. En cuanto a los anchos, suelen ser de 1.200 mm, pudiendo reducirse a 600 mm o llegar a alcanzar 5000 mm. Las longitudes máximas llegan hasta los 20 m, pese a que rara vez se alcanzan por dificultar el transporte y puesta en obra.

El proceso productivo puede ser terminado con muy diversos acabados, ya sea el propio panel, o mediante acabados superficiales en forma de melaninas sin función estructural. Todas las empresas productoras ofertan una amplia variedad de acabados, tanto pensados para ser vistos como no vistos, estando restringido su uso visto en los lugares que la normativa frente a incendio así lo requiera. Así mismo su uso visto al exterior no es recomendable.

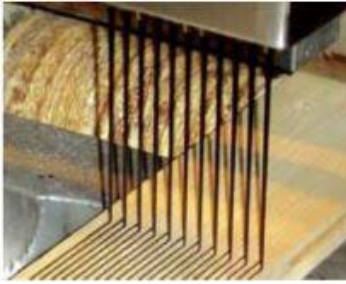
Según datos del sector (www.dataholz.com), el consumo de energía en su producción es de 6.160 MJ/m³, lo cual incluye la plantación, el proceso de aserrado, la generación de la cola y la conformación final de los paneles contralaminados. Un valor reducido que le aporta gran competitividad al producto final.



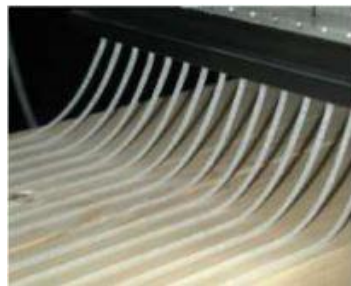
I. 14 Proporciones tipo de los paneles



I. 15 Fabricación de los paneles



I. 16 Colas tipo PRF



I. 17 Colas tipo PUR

Las colas y otros elementos de unión

Desde colas compuestas por productos poco respetuosos con el medioambiente, pasando por otras de compuestos más sostenibles, hasta paneles generados con la ayuda de elementos transversales, tipo remache. Esta es la amplia gama generada por las diferentes patentes existentes en el mercado.

Este elemento que compone entorno al 0,6% de los paneles es el responsable de cierto escepticismo a la hora de valorar su respeto al medioambiente. Las colas pueden ser de tipo fenólico (PRF), a base de poliuretanos (PUR) o polímeros de isocianato (EPI). Una de las empresas líderes del sector, KLH, está usando colas a base de poliuretanos (PUR) sin solventes ni formaldehídos, perjudiciales para el medio ambiente. Así mismo existe un importante campo de investigación en la incorporación de colas de tipo orgánico, como es el caso de la empresa Metsa Wood que resina de melanina (MF/MUF), siendo este un compuesto completamente orgánico.

Analizando los datos obtenidos de las diferentes empresas productoras, las colas con base de poliuretano (PUR) sin formaldehídos son las más extendidas en la producción de paneles de CLT.

Una vez se han aplicado las colas entre las sucesivas capas, se procede al prensado, ya sea por prensa hidráulica o de vacío. El método más común es mediante prensas de tipo hidráulico, manteniendo constante unas presiones entre 0,25 MPa y 0,60 MPa. En algunos casos es necesario aplicar presiones de tipo lateral para asegurar la no separación de los tableros.

Tecnología de corte CNC

Bajo estas siglas se encuentra una metodología de corte de gran ayuda para la prefabricación de paneles CLT. Se trata de corte mediante 'Computer Numerical Control' y permite realizar desde cortes para definir los cantos del panel, hasta aberturas para puertas y ventanas. Dentro de este se encuentran tanto las máquinas de corte mecánico, como las máquinas en base a láser.



I. 18 Máquina de corte por control numérico usada por Jesfer

Propiedades ventajosas en obra nueva y en rehabilitación

Tanto en obra nueva como en rehabilitación, el hecho de poder disponer los elementos estructurales con relativa libertad da grandes ventajas al CLT con respecto de otros sistemas prefabricados que necesitan complejas uniones. Esto se debe a la relativa facilidad de efectuar las uniones en obra y modificar los paneles, si fuese necesario.

Por otro lado aporta un alto grado de rigidez a la obra debido al llamado sistema de construcción en panal de abeja (honey comb), hecho que resulta determinante en obras de rehabilitación, pues la propia estructura añadida es capaz de dar un alto grado de estabilidad a las preexistencias. En rehabilitaciones donde solo se conserva la fachada, esta técnica constructiva es capaz de dar un mayor grado de seguridad debido a la redistribución de las cargas en las diferentes particiones con carácter portante, evitando asientos diferenciales y desplomes de la fachada.

Otro dato a tener en cuenta a favor de este tipo de intervenciones en seco para rehabilitaciones es la ausencia de humedades generadas durante el proceso de obra. Estas podrían degenerar en patologías sobre los elementos estructurales en buen estado.

Otra de las propiedades apreciadas de este material y que le hace extenderse por nuevos países es su buena respuesta frente a sismo, ya que el alto grado de arriostamiento le concede una buena reacción ante acciones dinámicas.



I. 22 Rehabilitación mediante paneles CLT. Hotel rural en Riahuelas



I. 19 Forte building by Lend Lease



I. 20 Interior de una estructura de paneles CLT



I. 21 Colocación en obra de un pael de grandes dimensiones

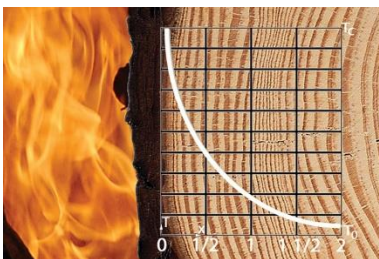
Respuesta frente a incendios



I. 23 Estado de unos paneles de CLT tras un test de incendios



I. 24 Test realizado con un edificio de 3 plantas construido íntegramente con estructura CLT. Realizado en el Building Research Institute in Tsukuba in Japan



I. 25 Relación tiempo-profundidad quemada

Como ya se ha mencionado, una de las principales oposiciones a la madera como material de construcción es su supuesto mal comportamiento frente al fuego. En este punto cabe destacar la diferencia entre dos conceptos en cuanto a la interacción fuego-estructura. Por un lado tenemos la reacción al fuego, donde la madera no tiene unas propiedades idóneas y por otro lado tenemos la resistencia al fuego, donde la madera cuenta con excelentes propiedades.

Mientras que si le acercamos una llama a la madera esta puede prender dándole una mala reacción al fuego, si tenemos en cuenta el tiempo de resistencia frente al fuego, la propia madera es capaz de retardar el avance del fuego. Esta buena resistencia al fuego se debe al hecho de que la madera es un mal conductor del calor y no permite la transmisión del calor al interior de la pieza. Una vez el fuego ha alcanzado un elemento estructural de madera, la temperatura exterior se eleva creando una capa de madera carbonizada, siendo estas capas exteriores las que dificultan el paso del oxígeno y por tanto la penetración del fuego hacia el interior de la pieza, dando excelentes propiedades a estas piezas para ser capaces de resistir los tiempos de evacuación de la estructura.

Sin embargo la mala reacción al fuego puede ser fácilmente mejorada con los pertinentes tratamientos, en función del tipo de riesgo del local en el cual se encuentran. Así pues, en lugares donde no sea necesario dejar vista la estructura de madera, se puede mejorar la reacción frente al fuego con elementos tan sencillos como plastes ignífugos.

De este modo, cabe decir que la oposición a la construcción con madera por motivos relacionados con el fuego esta ciertamente infundada actualmente. Pues el motivo de que se declare un incendio no tiene que ver con que la estructura sea de madera. Y una vez se ha declarado el incendio, las estructuras de madera nos permiten disponer del tiempo suficiente para evacuar el edificio. Del mismo modo, para que una estructura de madera arda necesita que se prolongue la aplicación de llama durante el tiempo suficiente para que sea la propia madera la que contenga la llama.

Evidentemente, los daños pueden ser más apreciables en una estructura de madera que ha sufrido un incendio, pero no hay que olvidar que una estructura metálica puede llegar al colapso en pocos minutos y quedar rápidamente inservible debido a las grandes deformaciones que se producen en el metal y a la pérdida de resistencia de este. Mención especial merece el hormigón armado, que pese a poseer buenas cualidades de reacción frente al fuego, puede quedar inservible tras un incendio debido a su contenido en acero, obligando a demoler la estructura.

Investigaciones al respecto y porque se inventó

La investigación principal podría considerarse la llevada a cabo en los años 90 como resultado de la colaboración entre los principales productores de madera de Austria y Alemania y diversos centros de investigación de la zona. Lo que en un principio fue la búsqueda de un nuevo mercado para una industria maderera con gran capacidad de producción, se convirtió en un adecuado binomio industria-investigación que generó un material y una técnica constructiva con grandes posibilidades de futuro.

La asociación austriaca de la madera unida bajo las siglas 'ProHoz' se asoció con el 'Institute of Timber Engineering and Wood Technology' de la austriaca 'Graz University of Technology', con el fin de investigar en la creación de este material. Esta colaboración viene a demostrar que la creación de nuevos materiales parte de la relación entre industria e investigación, teniendo ello argumentos a favor y en contra, como el hecho de que sean las necesidades de dar salida a la gran producción de una industria lo que dé pie a investigaciones fructíferas.

Sismos y anclajes metálicos

Pese a que no se ha realizado ningún ensayo o calculo específico en el presente TFG, existen multitud de ensayos al respecto, dando especial importancia a los realizados en Japón. Los sismos son uno de los puntos en el cual se cuestiona más la validez de este material, sin embargo, desde la industria elogia las capacidades del CLT frente a las acciones dinámicas de los terremotos.

Uno de los factores claves en la respuesta frente a sismos es la masa del edificio, pues serán los movimientos horizontales de esta los que generen grandes esfuerzos sobre la estructura. Reduciendo la masa de la estructura con respecto a construcciones convencionales en hormigón conseguimos edificios con mejores propiedades en cuanto a la relación masa-sismo.

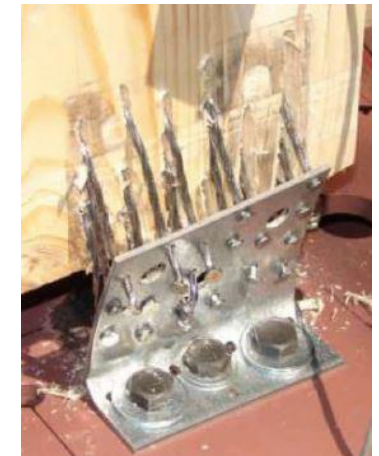
Sin embargo los anclajes necesarios entre los paneles son el punto débil del sistema, produciéndose desperfectos importantes donde los anclajes se atornillan a la madera. Una solución de la industria es dotar al sistema de una cierta ductilidad para minimizar los desperfectos. Por otro lado se recomienda combinar plantas completamente rigidizadas con otras que tengan cierta ductilidad para así minimizar los desperfectos. Por último la técnica constructiva con CLT tiende a generar estructuras redundantes, impidiendo el colapso por una serie de fallos puntuales.



I. 26 Ensayo sísmico de un edificio entero realizado con CLT. Japón



I. 27 Operario realizando conexiones entre paneles de un mismo forjado



I. 28 Patologías generada tras un test sísmico

Empresas del sector



I. 29 Planta de fabricación

Pese a existir más empresas de las aquí mostradas, estas son las que más producción anual tienen. Junto a ellas se muestran los datos de otras dos empresas españolas:

Jesfer, que pese a no producir paneles de CLT, se encuentra relativamente cerca de la escuela en la cual se ha realizado este TFG y enfoca su trabajo al procesado de los paneles para generar el despiece de proyectos. Y Alter Materia que ocupa el mismo segmento, pero con suministradores de CLT distintos.

Los datos de producción anual de paneles de CLT han sido obtenidos del documento redactado por Tristan Wallwork tras el 'Cross-Laminated Symposium of Vancouver en 2012' y comparados, en la medida de lo posible, con los datos facilitados por las correspondientes páginas web de cada empresa.



I. 30 Transporte

KLH (Austria): 650.000m² de paneles anualmente

Mayr Melnhof Holz (Austria): 500.000m² de paneles anualmente

Schilliger Holz (Suiza): 200.000m² de paneles anualmente

Stora Enso Timber (Finlandia): 500.000m² de paneles anualmente

Binderholz (Austria): 400.000m² de paneles anualmente

Merk Finnforest (Alemania): 200.000m² de paneles anualmente

Jesfer (Almudévar, Aragón, España), planta dedicada a la construcción con madera y punto más cercano donde se procesan paneles de CLT, provenientes de Binderholz (Austria).

Alter Materia (Segovia, España), especializados en despiece y montaje de estructuras CLT, con paneles suministrados por KLH (Austria). Esta empresa ha sido la responsable del despiece de la estructura del pabellón de España en la Expo Milano 2015.

Catálogo de proyectos y breve descripción de sus valores e innovaciones

Ca la Dona

Situación: **Calle Ripoll nº25, Barcelona.**

Arquitectos: **Sandra Bestraten Castells y Emilio Hormías Laperal.**

Ejemplo de rehabilitación, comparaciones económicas y medioambientales con respecto a otras soluciones.

Antes de hablar de este caso de rehabilitación en particular, convendría hacer una reflexión sobre lo que es rehabilitar y el ahorro energético. Si rehabilitamos, de alguna manera es para preservar piezas arquitectónicas relevantes y como medida de ahorro sostenible. Así pues este término debería quedar alejado de los ejemplos en los cuales se sustituye por completo la estructura y se mantiene únicamente la fachada. Sirva el presente ejemplo como demostración de las posibilidades del CLT en temas de rehabilitación, adaptándose perfectamente a los elementos estructurales que pueden ser rescatados.

Se trata de un claro ejemplo de rehabilitación estructural mediante paneles prefabricados de CLT. Responde a lo que se ha llamado desde KLH como prefabricación flexible, por la no necesaria generación de moldes para fabricar estos módulos que posteriormente se transportan y montan en obra, como por la posible modificación de estas piezas a lo largo de su vida útil.

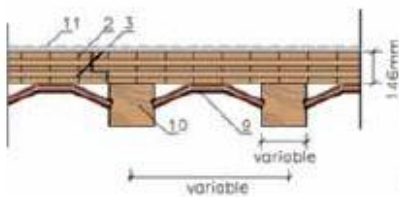
La idea era generar una serie de elementos que fuesen fáciles de transportar y colocar en obra, sin aumentar las cargas sobre la estructura preexistente. Esta estructura fue analizada con el fin de sacar a la luz una serie de patologías que debían ser subsanadas sin afectar al resto del edificio, por su interés patrimonial. Esta no modificación del edificio afecta desde la conservación de muros y huecos en ellos, pasando por núcleos de escaleras o entrevigados de madera.



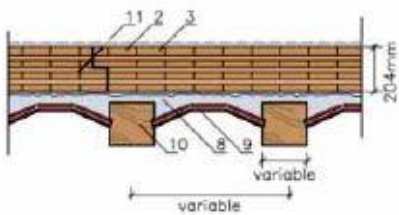
I. 31 Colocación de los paneles diseñados a medida



I. 32 Colocación en obra facilitada por las dimensiones de los paneles



I. 34 Solución inicial



I. 33 Solución adoptada finalmente



I. 35 Operario procediendo al anclaje de los paneles

Tras el análisis previo del edificio se detectaron grandes patologías en los forjados del mismo, lo cual se planteó subsanar mediante paneles de CLT como refuerzo de los forjados existentes. Esto se conseguiría mediante una adecuada conexión entre los nuevos paneles de CLT y las vigas preexistentes. Pero una vez analizados los pros y contras de esta solución se decidió desechar la misma, no por incapacidad estructural, sino por el tiempo que habría conllevado generar elementos intermedios a medida entre cada una de las vigas y los paneles de CLT. Las grandes diferencias entre las patologías de unos tramos y otros hacían inviable el coste de tiempo que conllevaría crear unas conexiones adecuadas entre todos los forjados y los paneles de CLT.

Finalmente se optó por retirar los forjados sin valor patrimonial y mantener los que sí que requiriesen dicha protección pero desprovistos de cualquier función portante, más allá de auto-sustentarse. En el proceso de rehabilitación se quitaron las capas de baldosa hidráulica y rellenos para aligerar el peso sobre los forjados mantenidos y para permitir el tratamiento fungicida necesario. Una vez saneado el entorno y consolidados los elementos verticales, se procedió a la colocación de los nuevos forjados, compuestos por paneles de CLT, completamente desconectados con respecto a los antiguas que habían de ser conservados.

Los paneles están formados por 3-5 capas de abeto generando entes sólidos con anchura de 1200 mm y dos grosores tipo, según el vano a cubrir. Este ancho es la mitad del considerado como estándar para este tipo de intervenciones, esto se debe a la forma de montaje y a la planificación del proceso. Con la intención de elevar el grado de seguridad de los operarios, encargados de maniobrar los paneles y anclarlos a los soportes sobre las paredes, se diseñó un plan de montaje que empezaba por montar la cubierta para posteriormente descolgar los paneles desde esta e ir bajando en altura. Mediante este sistema se permitía introducir todos los paneles colgados por unos raíles que estaban anclados a los paneles CLT de la cubierta. Así se reducía el riesgo producido por paneles colgando de grandes grúas y se agilizaba el proceso gracias a introducir estos por las ventanas de fachada, haciendo uso de los raíles mencionados.

En cuanto al estado global de la estructura, los muros y cimentación han sido reforzados, mediante gunitados los primeros y por medio de pilotaje y losa la segunda. En cuanto a las cargas globales que soporta el edificio, se ve reducido en un 4% el peso propio, pero se incrementa la sobrecarga de uso por su cambio de uso como edificio público (5 KN/m^2). Por lo que respecta a la interacción general de la estructura, cabe destacar su mayor grado de arriostramiento y su mejor respuesta frente a acciones dinámicas debido a la actual bidireccionalidad de los forjados.

La estabilidad al fuego requerida en la norma para edificios de pública concurrencia (5 KN/m^2) es de 90' que es cumplida por los propios paneles de CLT del forjado. Esta característica no se da siempre en todos los casos donde se interviene con CLT, de hecho suele ser necesario añadir algún tipo de plaste que dé el aporte necesario para cumplir 90' frente al fuego. En este cumplimiento influye claramente el hecho de que el espesor mínimo de los paneles sea de 202mm.

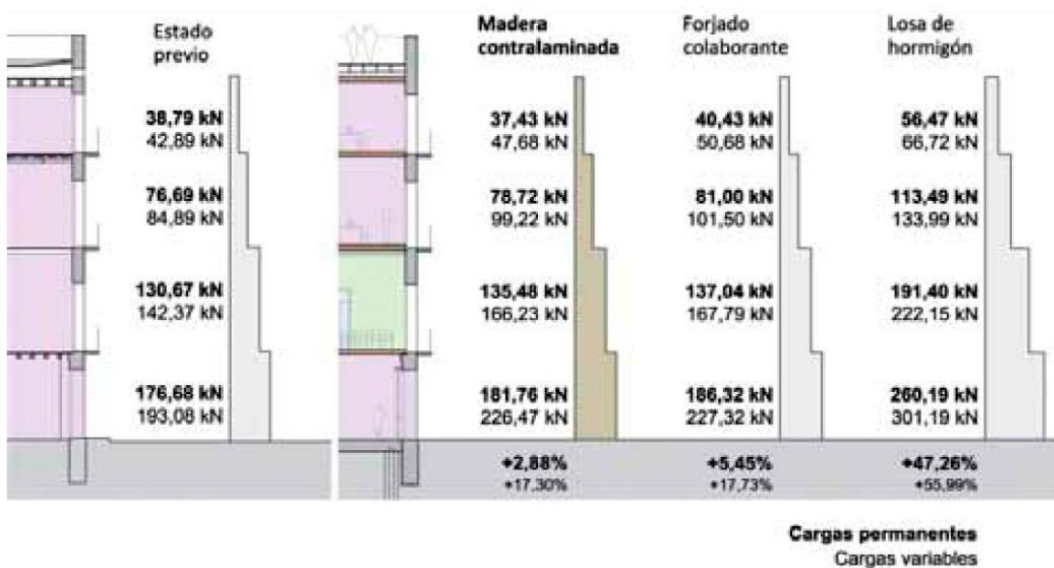
En cuanto al aislamiento acústico, los paneles de CLT aportan un aislamiento de 39 dB, que son completados por las resistencias acústicas del resto de capas del forjado hasta llegar a los 55dB requeridos en el DB HR para particiones entre diferentes unidades de uso.



I. 36 Operario usando un sistema de seguridad anclado a los propios tableros

Una de las principales reservas hacia esta técnica constructiva reside en el tema económico, pues se tiende a pensar que resultan soluciones más caras. Para poder analizar correctamente este tema hay que tener en cuenta tanto el coste de los paneles, como el gasto en transporte o el gasto en mano de obra en el montaje en obra. Un mayor tiempo de obra se traduce en sobrecostes finales, de este modo, si comparamos los 2 meses que costó el montaje de la estructura, es fácil ver el ahorro generado con respecto a los 5 meses que estimaron los arquitectos para una obra con hormigón.

En los siguientes gráficos se muestran diversas soluciones típicas y la comparación entre ellas. Las cargas permanentes y variables que habrían generado sobre la estructura mantenida, así como una comparación desde el punto de vista medioambiental y de tiempo de montaje.^{2,3}



I. 37 Comparativa de diferentes soluciones estructurales planteadas²

² Comparativa realizada por S.Bestraten y publicada en 'Informes de la construcción, Vol 64, diciembre del 2012.

Losa de hormigón	Forjado de chapa colaborante	Paneles de madera contralaminada
ESTADO DE CARGAS:		
Peso propio: 5,00-6,25 KN/m ²	Peso propio: 2,50 KN/m ²	Peso propio: 1,02-1,24 KN/m ²
Cargas a cimientos: + 33%	Cargas a cimientos: + 12%	
Incremento de pesos propios y cargas permanentes respecto el estado previo del edificio		
+ 54%	+ 18%	- 4%
Incremento de cargas a cimientos respecto el estado previo del edificio Sobrecargas de uso en el estado previo (residencial) 2 KN/m ² y en el estado final (pública concurrencia) 5 KN/m ²		
+ 70%	+ 45%	+ 30%
REPERCUSIÓN ECONÓMICA: Comparativa aplicada a los capítulos presupuestarios de cimentación y estructuras de la consolidación estructural en C/Ripoll 25		
+ - 0 %	- 5%	+ - 0%
REPERCUSIÓN MEDIOAMBIENTAL (Kg de CO₂): Comparativa aplicada a los capítulos presupuestarios de cimentación y estructuras de la consolidación estructural en C/Ripoll 25		
1.240.262 Kg de CO ₂ + 470 %	1.160.695 Kg de CO ₂ + 430 %	217.944 Kg de CO ₂
ESTADO DE CARGAS:		
Agotamiento de la capacidad de carga de paredes ↓ Obliga a doblar la estructura vertical y a realizar nuevos cimientos	Necesidad de subestructura metálica ↓ Incremento de canto (45 cm) ↓ Obliga a derribar todos los forjados para mantener el nivel en balcones y escalera patrimonial.	No comporta variaciones substanciales sobre los estados de cargas originales del edificio.
COMPATIBILIDAD MATERIALES EXISTENTES:		
Aportació d'aigua + material no transpirable ↓ Incrementos de humedad / Incompatibilitades químiques ↓ Limita la durabilitat		No comporta variaciones: materiales tradicionales
Componente elevado de acero ↓ Favorece la interferencia de más campos magnéticos		Material más saludable
TIEMPO DE MONTAJE: Según rendimientos de los equipos, los procesos en cada uno son:		
Preparación de apoyos + Montaje de encofrados o chapas + Colocación de armados + Hormigonado		Preparación de apoyos + Colocación de paneles (2-3 personas por 50 m ² /día)
TIEMPO DE ENTRADA EN CARGA:		
28 días		Inmediato
SEGURIDAD:		
Trabajos sobre encofrados y sistemas provisionales		Trabajos sobre estructura definitiva
REVERSIBILIDAD/RECICLABILIDAD:		
Afectación a toda la estructura por vibraciones Gran volumen de residuos de derribo		Construcción en seco Reutilización y reciclaje

I. 38 Comparativa entre las diferentes posibles soluciones³

³ Comparativa realizada por S.Bestraten y publicada en 'Informes de la construcción, Vol 64, diciembre del 2012.

Pabellón de España en la Expo Milano 2015

Situación: **Milán.**

Arquitecto: **Fermín Vázquez, b720.**

Consultor de estructuras: **Miguel Nevado.**

Año: **2015**

Ejemplo de obra efímera de diseño español. Crítica al planteamiento de reciclaje.

Mediante este ejemplo se quiere poner de relieve la actualidad del material, incluso como material digno de ser usado en un edificio que va a representar a un país frente al mundo. Se ha elegido el pabellón de España, por la cercanía que sugiere, pero la madera y en particular el CLT ha tenido una presencia relevante en los edificios de esta exposición. Esto refleja un cambio de objetivos en el ámbito de las exposiciones internacionales, pues los planteamientos de respeto al medioambiente van más allá de las palabras y el contenido, para pasar a estar en la base del continente.

Las intenciones por parte de los arquitectos estaban claras desde el principio, pero no así su materialización. Estas eran la evocación de la tradición y la modernidad en lo que respecta a la cultura y alimentación españolas. Para ello se hacían eco de multitud de materiales, que iban a trasladar hasta Milán los olores y las texturas de nuestro pasado, como por ejemplo superficies de corcho, esparto, o la madera de las barricas.

Sin embargo, se dejaba de lado algo tan fundamental como es la estructura, pues la intención era levantar el pabellón con estructura metálica, demostrando esto el desconocimiento de las propiedades de un material como es el CLT. Fue fruto del proceso de consultoría estructural cuando apareció la posibilidad de usar CLT, enlazando aún más el proyecto con los objetivos de una exposición que se plantea como sostenible y mejorando los plazos tan ajustados.

La disposición parte de dos naves, tradición y modernidad, siendo recubierta la estructura en esta segunda con chapa para darle una materialidad diferente. La necesidad de generar dos niveles y una absoluta transparencia de los pórticos, se consigue brillantemente gracias a los anclajes entre una sucesión de cajas de CLT y los propios pórticos. Estos anclajes son fundamentales, pues generan la necesaria levedad deseada para el conjunto. La sucesión de cajas y pasarelas es la encargada de dotar al conjunto de una gran estabilidad lateral.



I. 39 Vista general del pabellón principal



I. 40 Modelo de cálculo usado en su fase de diseño



I. 41 Anclaje situado entre los pórticos y las cajas expositivas

Centrando la mirada en el material, las características que le otorga en cuanto a la posibilidad de reciclaje, industrialización, plazos reducidos, presupuesto ajustado, lo hacen idóneo para este tipo de intervenciones. Sin dejar de remarcar una cierta crítica al modelo de reciclaje entendido actualmente, pues el futuro de este pabellón pasará, si nadie lo remedia, por convertirse en material combustible para la industria. Esto se debe a que actualmente se diseñan las piezas de CLT a medida para proyectos concretos, dificultando su posible reutilización si cambia la función del edificio. Pese a que resulte una tarea difícil, se lograría un mayor respeto medioambiental si se pudiese lograr una adecuada prefabricación sistematizada, permitiendo la readaptación de los elementos que componen un pabellón de estas características.



I. 42 Proceso de puesta en obra

A modo de resumen, cabe destacar el uso de 700 toneladas de madera CLT, que de haberse realizado en hormigón armado habrían sido más de 1800 toneladas de estructura, según los cálculos de la Universidad Politécnica de Madrid (2,5-3,5 veces más pesado que la madera).

El periodo de montaje de la estructura comprendió 3 meses, con un grupo de 15-20 operarios, lo que impidió usar madera de origen español, como se había planteado en un comienzo, por el consiguiente alargamiento de estos plazos.



I. 43 Vista general de su construcción

Diferentes ejemplos de dRMM Architects

Arquitecto: **dRMM Architects**

Situación: **London, UK**

Ejemplos de obras de mediano y pequeño tamaño dentro de un estudio especializado en trabajar con CLT.

Con este ejemplo no se trata de profundizar en ninguno de los proyectos expuestos, sino de generar una visión global sobre un estudio europeo especializado en proyectar con la técnica constructiva expuesta en el presente TFG. Este estudio cuenta con multitud de proyectos diseñados con CLT que no están expuestos en este apartado.

Naked house

Podría tratarse de un juego, un desplegable de cortar y montar, pero es una vivienda. Aprovechándose de las capacidades del CLT como material prefabricado y de fácil montaje, no sería difícil imaginarse esta pequeña vivienda siendo montada y desmontada en diferentes emplazamientos. En el concepto de partida se encuentra la peculiaridad de que la vivienda ha de ser almacenable dentro de un contenedor para proceder a su transporte y posterior montaje, sirviendo este contenedor como pódium sobre el cual se apoya la vivienda de CLT.



I. 45 Vista general del proyecto



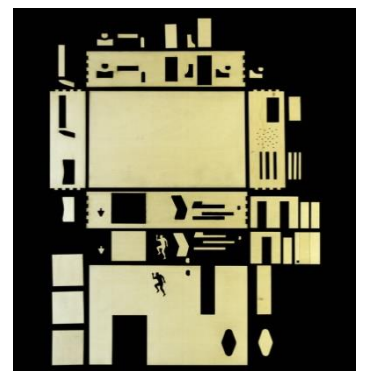
I. 47 Emplazamiento tipo



I. 44 Acabado visto del CLT



I. 46 Puesta en obra



I. 48 Kit de montaje



I. 49 Emplazamiento original de Mk forty tower

Mk forty tower

Se trata de un hito en el lugar de fácil montaje/desmontaje y transporte. Enteramente construido con CLT, genera un abanico de posibilidades dentro de este sistema. Sirviendo de particular ejemplo en cuanto a la generación sus unas escaleras mediante piezas de CLT. Así mismo este proyecto tiene la vocación de ser un test de posibilidades de este material.

El sistema se eleva mediante paneles de 162 mm sin necesidad de cimentación añadida. Siendo posible su montaje en apenas siete días. Nuevamente, todos los paneles estructurales se pueden almacenar en un mismo contenedor, que es usado como cafetería mientras permanece en el mismo lugar.

En palabras de los arquitectos, se trata de 'useful art'.



I. 50 Prototipo de escaleras diseñado para la torre

Rundeskogen, Timber towers. Sandnes, Norway

Se trata de un edificio con vocación de marcar su presencia dentro de un entorno de viviendas de baja altura.

Sirva este ejemplo como muestra de los recelos que siguen existiendo frente al sistema. Pues pese a exponer este proyecto, soy consciente de su construcción con hormigón. Dicha estructura está construida con este, relegando la madera a elementos secundarios. Pese a haber estado diseñado para ser construido con CLT y demostradas su perfecta resistencia, la presión de los propietarios obligó a usar una solución mixta.



I. 51 Vista de dos de las tres 'Timber Towers'



I. 52 Emplazamiento de las 'Timber Towers'

Refugio del Monte Rosa

Situación: **Los Alpes suizos**

Arquitecto: **ETH Zürich-Studio Monte Rosa y Bearth & Deplazes Architekten**

Año: **2003/2004**

Ejemplo de construcción con dificultad de transporte, plazos reducidos, buen acondicionamiento y con la implicación directa de estudiantes universitarios.

Antes de hablar del proyecto en sí conviene hacer un comentario sobre los participantes en la fase de diseño del proyecto. Este surge de la propia escuela ETH con una implicación directa de 33 estudiantes a lo largo de 4 semestres de duración. El proyecto surge como consecuencia de la colaboración con el Club Alpino Suizo y enmarcado en el 150 aniversario de la escuela.

Se trata de una zona de difícil acceso (3000 m de altura), por lo que el hecho de construir con un material que reduce el peso de la estructura hasta en un tercio (comparando con soluciones en hormigón armado) facilita el transporte y reduce los costes de la obra.

Este ejemplo no se trata de un proyecto construido por completo con estructura de CLT, pues se alternan los paneles con pilares y vigas. Pero al igual que hace la revista Tectónica, en su dossier de productos del número 38, se considera este un proyecto icónico y digno de ser expuesto. Todos los elementos estructurales son transportados hasta la obra en helicóptero, al igual que el resto de materiales de construcción y colocados en su posición definitiva.

La estructura se eleva sobre un pódium metálico que distancia al resto del edificio de las capas de nieve perpetuas y la humedad. Sobre este se levanta la estructura de madera, usando paneles de CLT y elementos lineales de madera maciza. La estructura principal la generan los 10 muros radiales que subdividen la planta en espacios triangulares, liberando a la fachada de capacidad portante principal. Para que esta estructura resista las acciones sísmicas, pues se encuentra en una zona de riesgo, las uniones entre muros y forjados se han diseñado en forma de apoyos elásticos para disipar la mayor parte de energía en caso de terremoto.



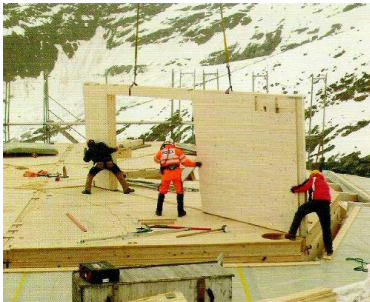
I. 53 Emplazamiento del proyecto



I. 54 Sala común



I. 55 Puesta en obra mediante helicóptero

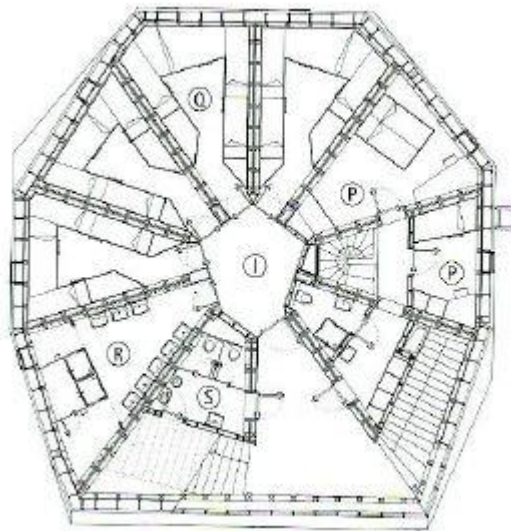


I. 56 Ajuste y conexión entre paneles

Del mismo modo, el uso de madera repercute en una menor necesidad de capas de aislante y su consiguiente transporte hasta el lugar (30 cm de lana mineral). Esta característica se combina con toda una serie de sistemas de acondicionamiento de gran eficiencia que dotan al proyecto de un alto grado en materia de sostenibilidad. El edificio cuenta con captadores solares y acumuladores de agua para conseguir el autoabastecimiento del complejo.

Al mismo tiempo toda una serie de decisiones meticulosamente estudiadas ayudan a un adecuado acondicionamiento pasivo. Por un lado la fachada sur se inclina con una pendiente de 66% para optimizar la captación de los paneles solares, mientras que la fachada norte perfila su pendiente con intención de minimizar la acumulación de nieve. Por otro lado, la forma de octógono en planta trata de combinar la habitabilidad del edificio y la generación de una envolvente reducida que minimice las pérdidas energéticas.

El panel usado está generado por la empresa Schilliger, que lo denomina como Crosslam, destacando de él la facilidad de montaje debido a sus patentes de anclajes. Esta empresa oferta entre sus posibilidades la incorporación de capas de cemento, capa anti radiación electromagnética, o aislante, que aportan diferentes posibilidades, convirtiendo este material en un compuesto de varios.



I. 57 Planta tipo

Análisis estructural de diferentes soluciones mediante elementos finitos

Respuesta estructural esperada del material

En cuanto a las hipótesis y simplificaciones hechas para el cálculo, se ha tomado la decisión de uniformizar el módulo elástico de los paneles en las dos direcciones principales. De esta forma se ha hecho la suposición de que el material funciona realmente como una placa que distribuyendo uniformemente las cargas por todo el plano. Esto no es del todo real, pero se aproxima bastante a la realidad y se ha considerado una aproximación válida. En parte esta direccionalidad del material viene marcada por la existencia de número impar de capas.



I. 58 Efecto placa en los paneles horizontales

Paneles usados en posición horizontal	
E (Módulo elástico)	12.000 N/mm ²
G (Módulo de cizalladura)	690 N/mm ²
Capacidad del material	24 N/mm ²

Paneles usados en posición vertical	
E (Módulo elástico)	12.000 N/mm ²
G (Módulo de cizalladura)	250 N/mm ²
Capacidad del material	2,7 N/mm ²

Las conexiones muro-forjado se han realizado en ambos casos considerando empotramientos entre ambos. El funcionamiento real sería un punto intermedio entre unas conexiones por apoyo y los empotramientos simulados, dependiendo de la rigidez de los anclajes usados.

Los anclajes se han considerado perfectos, recayendo la idoneidad de los mismos sobre las empresas propietarias de las patentes.



I. 59 Vista general del edificio Stadthaus, 24 Murray Grove

Soluciones en obra nueva: Stadthaus, 24 Murray Grove, London

Introducción al edificio Stadthaus, 24 Murray Grove

Situación: **London**.

Arquitecto: **Waugh Thistleton**.

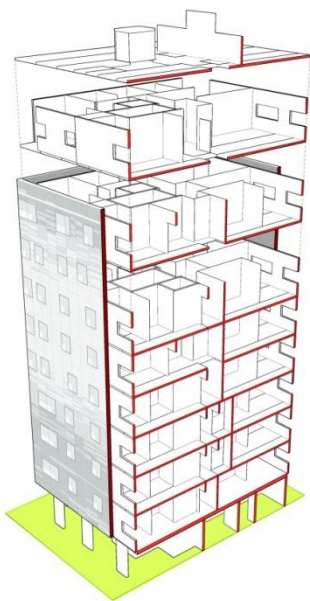
Año: **2009**

La decisión de elegir este proyecto para analizarlo por elementos finitos no se debe a su especial valor arquitectónico, ni a novedosas formas u optimizadas relaciones cargas-estructura. Responde simplemente a su carácter sencillo y cotidiano, que no nos resultaría difícil imaginarlo en cualquiera de nuestras ciudades.

Y sin embargo fue considerado el edificio residencial más alto en ser construido con madera a fecha de 2009. Este dato es el realmente relevante del Stadthaus, se trata de un edificio de madera que respeta el medioambiente desde su proceso de construcción hasta su futura demolición. Se trata de un edificio que cumple todos los principios enunciados a favor de este material y su correspondiente técnica constructiva, como lo son la rápida construcción, los escasos residuos generados en el proceso constructivo, la estructura tipo 'panal de abeja', el fácil transporte...

La estructura se alza sobre una base de hormigón que fue impuesta por la normativa municipal londinense, pese a demostrarse su resistencia estructural de haberse construido en madera CLT. En cuanto a la composición de las diferentes piezas de CLT, estas están compuestas por 3 ó 5 capas de madera de pino y abeto suministradas por la marca especializada KLH. Las uniones se realizan mediante tirafondos y pasadores especialmente verificados para este tipo de construcción.

Un extra que aporta el CLT a este proyecto es su versatilidad y variabilidad en planta, pues se pueden cambiar muros de su posición original con relativa facilidad. Esto no quiere decir que puedan ser movidos por el propio usuario sin afectar a la estructura, pero en el caso de reforma sería posible el cambio de posición de ciertos elementos. He aquí otro de los puntos fuertes de este sistema constructivo con respecto a los anteriores sistemas de construir viviendas en madera, pues el conocido como sistema 'ballon frame' contiene determinados elementos estructurales que resultan complicados de modificar. Por otro lado la práctica constructiva del 'ballon frame' en Reino Unido tenía la limitación impuesta de siete plantas de altura.



I. 60 Modelo volumétrico en fase de proyecto

Esta relativa versatilidad de la construcción en CLT se puede apreciar en los puntos de máximas tensiones de los forjados inferiores, pues al existir dos distribuciones diferentes de planta, las transmisiones verticales de las cargas no descienden en el mismo plano hasta la base de hormigón. Pese a la existencia de estos puntos donde se concentran las tensiones, que son los responsables del espesor adoptado por dichos forjados, se consigue edificar con un espesor de forjado relativamente pequeño (146 mm).

La anteriormente mencionada existencia de dos distribuciones diferentes en planta se debe a la presencia de dos usos diferentes dentro del edificio. Esto a su vez genera la necesidad de duplicar escaleras y ascensores en las plantas primeras. Esta duplicidad de uso se debe al hecho de existir viviendas de propiedad privada y apartamentos de alquiler en las plantas inferiores. Pese a esta variación, existen determinados puntos donde la transmisión de cargas sí que es continua desde la azotea a la planta baja, así pues los núcleos y divisiones entre viviendas se mantienen inalteradas.

En cuanto a los principios de sostenibilidad, más allá del uso de los paneles de CLT, con todo lo que ello conlleva, este edificio busca el máximo grado de respeto medioambiental y por ello usa unos paneles de madera para las fachadas con un 70% de madera reciclada. Este hecho sería imposible en elementos estructurales, pues la normativa y la actual práctica no lo permiten.⁴

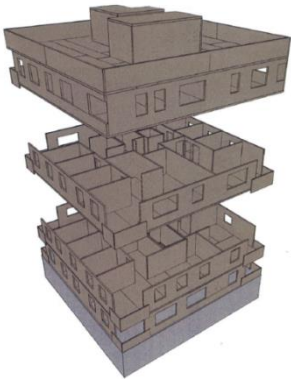
Aún más relevante en el ámbito del respeto ambiental es el balance de emisiones de CO₂, que lejos de limitarse a las bajas emisiones del mismo en el proceso constructivo, se trata de un material de origen orgánico que supone la absorción de grandes cantidades de CO₂ de la atmosfera. Así pues, el balance global de emisiones con respecto a una construcción tradicional con hormigón armado es de 310 toneladas menos de CO₂ vertido en la atmosfera. Esta baja 'huella de carbón' que posee el edificio se puede descomponer en las 124 t que habría producido el uso de hormigón y en 188 t que se asume como absorbido por parte de la plantación controlada de los 900 m³ de madera usados en la fabricación de los paneles por parte de KLH.⁴



I. 61 Sistema honey comb



I. 62 Colocación de forjados mediante grua



I. 63 Vista explotada del edificio

Así mismo la eficiencia de la construcción de este proyecto se puede apreciar en el hecho que de los aproximadamente 900 m^3 de madera usada para la fabricación de los paneles, se ha podido comprobar con el modelado de la estructura que al menos se han transformado en producto final 810 m^3 . Esto supone un 90% de aprovechamiento de la materia prima para la fabricación del CLT, que si lo asociamos con el 70% de madera reciclada en los paneles de fachada, hace un cómputo global de gran eficiencia y respeto con el medio ambiente.⁴

En cuanto a la resistencia frente al fuego, la estructura aguanta de por si 60' y es capaz de alcanzar holgadamente los 90' requeridos mediante la adición de acabados superficiales ignífugos en los puntos donde esta resistencia al fuego se ve comprometida.⁴

El confort térmico del edificio queda completamente garantizado con un aporte mínimo de aislante. Añadiendo a los paneles de CLT una capa de 100mm se consigue unos valores de $U=0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ que cumplen sobradamente la normativa y suponen un espesor total de muro de $100 \text{ mm} + 128 \text{ mm}$.⁴

La mencionada técnica constructiva de panal de abeja (honey comb) permite generar una planta con cierta libertad en torno a un núcleo de comunicaciones común. Así pues la gran mayoría de las particiones internas están compuestas por muros de carácter portante, así como las fachadas. Esta técnica constructiva conlleva una gran facilidad en el proceso de montaje, pues se procede mediante un simple apilamiento de nuevos elementos portantes verticales sobre el forjado entre plantas. Esto permite el rápido levantamiento de la estructura con ayuda de una grúa y un reducido número de operarios. En total, el montaje de la estructura de CLT se realizó en 8 semanas, lo que supone una planta por semana, incluyendo el proceso de uniones y anclajes entre las diferentes piezas y la preparación de los espacios para instalaciones. En particular, los procesos de montaje de la estructura CLT se llevaron a cabo en 27 días de trabajo distribuidos en estas 8 semanas por parte de un grupo de 4 operarios austriacos. El proceso completo de construcción se elevó hasta las 49 semanas, muy por debajo de las 72 semanas que se estima habría durado con construcción tradicional.⁴

Obviamente este proceso requirió de una gran planificación previa y de un prefabricado previo. Pero es suficiente con decir que el prefabricado de los paneles duró 3 días en la planta de KLH uk para hacerse una idea del avanzado sistema de producción que lleva asociado.⁴

Para hacernos una idea del nivel de precisión logrado en esta construcción, los márgenes considerados como válidos en la puesta en obra fueron de $\pm 5 \text{ mm}$, la mitad de los 10 mm asumibles con prefabricados de hormigón.

⁴ Los datos que aparecen en este apartado han sido consultados en diversas publicaciones, así como de la información facilitada por los arquitectos. www.australiandesignreviev.com. Ar technolog. www.boonline.co.uk. Detail 02/09.

Valores usados en el cálculo de edificio

Pese a que el elemento estructural de las 8 plantas de vivienda es el mismo, el CLT, existen tres variantes en lo que respecta a grosores. Uno de los puntos fuertes de la construcción prefabricada es la estandarización, sin embargo en una obra de tal envergadura resulta imposible reducir la construcción a un único modelo de pieza.

Si se tratase de un método constructivo que requiriese la generación de grandes moldes que necesitan ser amortizados, desde luego la existencia de elementos portantes con tres espesores diferentes supondría un incremento en el proceso de fabricación. Sin embargo al tratarse de sistemas de producción informatizados que basan la generación de piezas en el corte robotizado, esta variedad de espesores no supone un aumento considerable en el presupuesto.

Solución adoptada en el núcleo del edificio (ascensor y escaleras) para cumplir la exigencia de la normativa en cuanto a resistencia al fuego:

Grosor de CLT usado: 245mm, compuesto por dos paneles de CLT, uno de 128 y otro de 117

Solidarizados entre sí por elementos de anclaje. En total se emplearon 146 m³ para estos elementos portantes y así lo muestra el análisis de los resultados del programa de cálculo.

Volume : 1.460 E+02 m³

Mass : 7.153 E+04 Kg

Como método de verificación de dichos resultados, decir que la densidad resultante es de 490 kg/m³, coincidente con el valor facilitado por el fabricante de estos elementos de madera.

Solución adoptada en el resto de elementos verticales de carácter portante:

Grosor de CLT usado: 128mm. En total se emplearon 340 m³ para estos elementos portantes y así lo muestra el análisis de los resultados del programa de cálculo.

Volume : 3.408 E+02 m³

Mass : 1.670 E+05 Kg

Como método de verificación de dichos resultados, decir que la densidad resultante es de 490 kg/m³, coincidente con el valor facilitado por el fabricante de estos elementos de madera.

Solución adoptada en los forjados de CLT:

Grosor de CLT usado: 146mm. En total se emplearon 318 m³ para estos elementos portantes y así lo muestra el análisis de los resultados del programa de cálculo.

Volume : 3.189D+02 m³

Mass : 1.563D+05 Kg

Como método de verificación de dichos resultados, decir que la densidad resultante es de 490 kg/m³, coincidente con el valor facilitado por el fabricante de estos elementos de madera.

Resultados obtenidos en el cálculo y breve comentario.

Los mapas de resultados contenidos a continuación usan como unidades Newton y metro, mostrando tensiones en ' N/m^2 ' y desplazamientos en ' m '. No debe dar lugar a confusión la escala de colores y los aparentemente intensos valores rojos, pues los valores entran dentro de lo admisible.

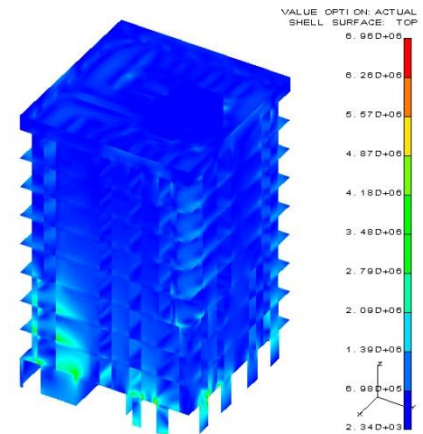
Tensiones

Como se mencionado anteriormente, el edificio se compone de base de hormigón en la primera planta, sobre la cual se levantan 8 plantas de vivienda construidas íntegramente con madera contra laminada como elemento estructural. Dado que el interés de este trabajo es el análisis de la madera, se desestima valorar los resultados de los elementos de hormigón.

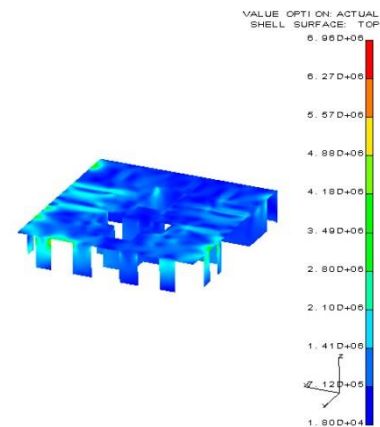
Como simple muestra de los valores de las tensiones en el hormigón:

Tensión máxima: $6.94 \text{ N}/\text{mm}^2$. Muy por debajo de los valores admisibles en los hormigones de uso común.

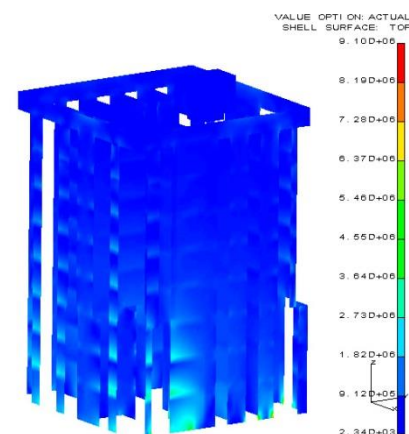
Los valores máximos de tensión en los elementos estructurales de CLT se sitúan en las fachadas, localizándose en los puntos de contacto entre la base de hormigón y la estructura de CLT, lo cual parece bastante lógico. En concreto la **tensión máxima es de $9.1 \text{ N}/\text{mm}^2$** , muy por debajo de los $24 \text{ N}/\text{mm}^2$ que la empresa KLH facilita como límite último de sus elementos diseñados para colocar en posición vertical. Así mismo cumple con los coeficientes de seguridad facilitados por la norma europea EN 1995 (Eurocódigo 5), que en el caso de las maderas laminadas y encoladas se sitúa en 1.25. De este modo quedaría un valor **límite último de $19.2 \text{ N}/\text{mm}^2$** tras aplicar el coeficiente de seguridad, muy por encima del valor obtenido en el presente cálculo.



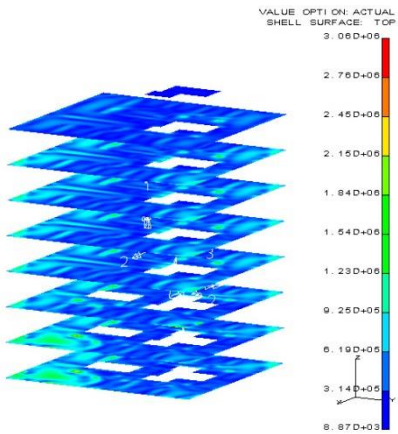
I. 64 Mapa de tensiones en todo el edificio



I. 65 Mapa de tensiones en la base de hormigón



I. 66 Mapa de tensiones en los elementos verticales

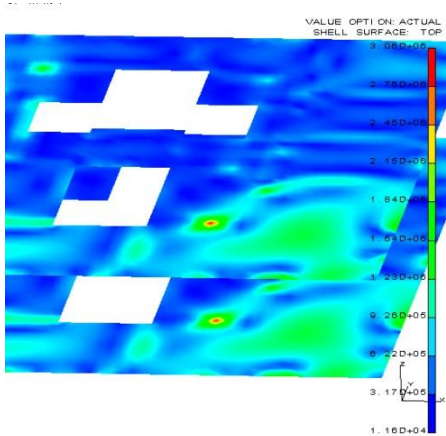


I. 67 Mapa de tensiones en los forjados de CLT

Por otro lado es necesario analizar el **comportamiento de los elementos horizontales**, ya que la empresa facilita un valor inferior (2.7 N/mm^2) como valor a tener en cuenta para sus piezas diseñadas para posiciones de tipo horizontal. Tras aplicar el coeficiente de seguridad facilitado por la norma europea EN 1995 (Eurocódigo 5) se obtiene un **límite último de 2.16 N/mm^2** .

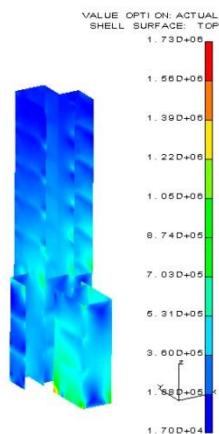
El valor de tensión máxima para elementos horizontales tiene un pico en los forjados inferiores debido a la variación en la planta de las viviendas. Esta irregularidad en la transmisión de las cargas verticales genera unos picos que se aproximan bastante al límite

anteriormente mencionado, sin superarlo. Dado a las características de análisis de los elementos placa mediante el método de los elementos finitos, se desprecia el valor crítico dado en un punto concreto y se analizan las reacciones en el entorno de este pico de tensiones. Esto se realiza de este modo debido a que no se está dimensionando la realidad de los anclajes. Estos anclajes serían de acero y por tanto absorberían la mayor parte de las cargas localizadas en estos puntos. De esta forma la tensión considerada como máxima sería 2.15 N/mm^2 , que como se aprecia se aproxima al valor facilitado anteriormente. Me atrevería a decir que el grosor adoptado para estas piezas horizontales ha sido elegido debido al deseo de crear dos tipos diferentes de plantas, pues el resto de superficies horizontales sobrepasan holgadamente los valores límite del material



I. 68 Detalle de los máximos localizados sobre los forjados

Pese a que puede parecer un desperdicio de material, uno de los principales puntos fuertes de esta técnica constructiva es la llamada construcción en panal de abeja, que ofrece gran versatilidad y solidez global gracias al gran efecto de arriostramiento interno. Por otro lado son mayores los beneficios de uniformizar todas las piezas, que los sobrecostes económicos generados por el sobredimensionado del canto.



I. 69 Detalle de la distribución de tensiones en el núcleo central

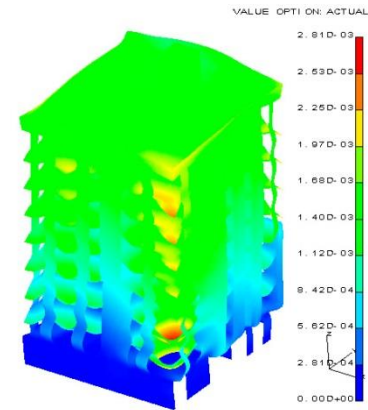
Por último merecen ser tratados a parte **los elementos verticales del núcleo de escaleras y ascensor**. Pese a que en otros ejemplos de construcción en CLT se opta por edificar estos núcleos con obra húmeda, en este caso se realizan con el mismo material, pero reforzando el grosor. De esta forma se demuestra la versatilidad del material y su capacidad para comprender toda la estructura de un edificio.

El valor de tensión máximo que se obtiene en estos elementos es de **1.73 N/mm²** que nuevamente se aprecia en los puntos de unión entre hormigón y madera. Este valor se encuentra muy por debajo del valor **límite último de 19.2 N/mm²**.

Desplazamientos

En cuanto a los desplazamientos, se da la característica común de que los puntos de mayor desplazamiento se dan en las partes altas del edificio, producto de la acción de la nieve y sobre todo del viento. Los valores están del orden de **2.17 mm para los elementos verticales** pertenecientes al perímetro del muro de azotea y en torno a **2.81 mm para los forjados de CLT**. En este último caso hay que decir que se localizan en los elementos de voladizo de las terrazas.

Por otro lado resulta característica, nuevamente, la relación madera-hormigón, pues este último aparece completamente in-deformado en comparación con el CLT.



I. 70 Mapa completo de desplazamientos de todo el edificio

Sobredimensionado por el requerimiento de 90' de resistencia al fuego

Como se puede apreciar, los elementos verticales se encuentran completamente sobredimensionados. Esto viene a demostrar lo enunciado por los fabricantes del sector, quienes hablan de un 40% de espesores por motivos de resistencia estructural del edificio y un 60% debido a los requerimientos normativos en cuanto a resistencia frente al fuego. Fruto del análisis de este edificio mediante la metodología de elementos finitos, se puede afirmar que estos datos no son del todo ciertos, pues parecen algo exagerados, pero sí que nos encontramos ante una estructura ciertamente sobredimensionada si atendemos a su situación de carga habitual. Esto se debe al hecho de que esta estructura ha de aguantar 90' frente al fuego.

Lejos de servir estos resultados para sumarse a los escépticos frente a este material, se hace necesario reivindicar con mayor énfasis el valor y las posibilidades del CLT. Si un material con cualidades de sostenibilidad, prefabricación, modularidad, agilidad en el montaje, reciclable...; es capaz de generar edificios más ligeros, pese a su necesario sobredimensionado de la estructura por motivos de resistencia al fuego, en ese caso no se ve inconveniente alguno al uso de este material.

Por consiguiente se demuestra que es un material con el que se pueden cumplir ampliamente las normativas vigentes y ser medioambientalmente respetuoso.

Por otro lado los elementos de forjado están dimensionados únicamente según requerimientos debidos al momento generado en ellos, sin tener en cuenta el fuego. Pero no parece este un gran problema, pues el forjado de CLT tiene únicamente un espesor de 146 mm, lo cual facilita la incorporación de diferentes capas que permitan cumplir las normativas respecto a resistencia frente al fuego de 90'.

Soluciones en rehabilitación: Ca la Dona

Introducción al edificio Ca la Dona

Dado que este ejemplo se analiza en otros apartados de este mismo documento, debido a sus valores arquitectónicos y medioambientalmente sostenibles, parece innecesario añadir información sobre el mismo en este apartado.

Así pues se limitará la información aquí añadida a lo estrictamente necesario para la realización del cálculo mediante elementos finitos.

La estructura portante vertical de este edificio queda fuera del presente cálculo, pues se trata de una estructura heterogénea restaurada mediante sistemas de rehabilitación húmedos. Así pues se da por supuesta la resistencia de los elementos verticales gracias a su buen estado previo y al recubrimiento de los muros de piedra, ladrillo y tapial mediante gunitados de hormigón con mallado interno. Así mismo, no se presta atención a la cimentación, eso sí, hay que mencionar que el peso propio de la estructura fue ligeramente reducido con respecto al peso original, además de que se realizó un trabajo de consolidación de la cimentación.



I. 71 Proceso de puesta en obra facilitado por las dimensiones de los paneles

Valores usados en el cálculo del edificio

Los elementos analizados son los estrictamente añadidos en el proceso de rehabilitación, de este modo hay que remarcar la existencia de dos grosores tipo dentro de la intervención con CLT.

Solución adoptada en las salas con menores luces:

Grosor de CLT usado: 202 mm para las longitudes más cortas (hasta 5.3m)

Peso propio de estos elementos es de 1.02 KN/m^2

Cantidad de material empleado:

Volume : $2.344 \text{ E}+02 \text{ m}^3$

Mass : $1.172 \text{ E}+05 \text{ Kg}$

Como método de verificación de dichos resultados, decir que la densidad resultante es de 500 kg/m^3 , coincidente con el valor facilitado por el fabricante de estos elementos de madera.

Solución adoptada en las salas con mayores luces:

Grosor de CLT usado: 245 mm para las longitudes mayores (hasta 6.5m).

Peso propio de estos elementos es de 1.24 KN/m^2

Cantidad de material empleado:

Volume : $2.023 \text{ E}+02 \text{ m}^3$

Mass : $1.012 \text{ E}+05 \text{ Kg}$

Como método de verificación de dichos resultados, decir que la densidad resultante es de 500 kg/m^3 , coincidente con el valor facilitado por el fabricante de estos elementos de madera.

Resultados obtenidos en el cálculo y breve comentario.

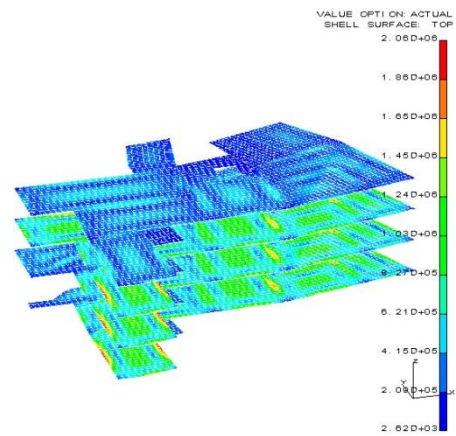
Los mapas de resultados contenidos a continuación usan como unidades Newton y metro, mostrando tensiones en ' N/m^2 ' y desplazamientos en ' m '. No debe dar lugar a confusión la escala de colores y los aparentemente intensos valores rojos, pues los valores entran dentro de lo admisible.

Tensiones

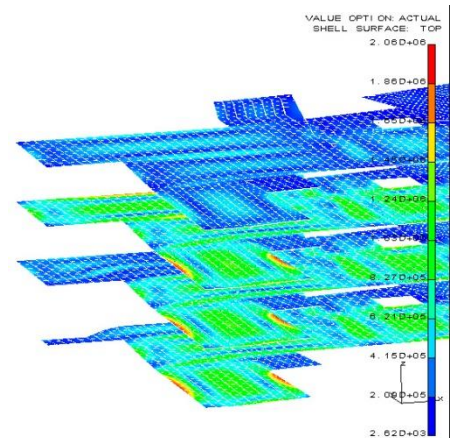
Pese a que el modelo realizado contiene los necesarios muros de piedra, tapial y ladrillo, se prescinde de mostrar los resultados del cálculo, pues no corresponde con el objetivo de estudio. De este modo se muestran únicamente los valores obtenidos en los forjados construidos con CLT.

Las tensiones máximas se localizan en los puntos centrales y los apoyos, hecho perfectamente previsible debido a las condiciones de apoyo elegidas para el cálculo. Lo sorprendente es el valor de estas tensiones máximas, ya que los tramos pintados en rojo solo alcanzan **$2.06 N/mm^2$** (apoyos) y el valor de límite último facilitado por la empresa de los paneles es muy superior. Según KLH, los forjados destinados a ser usados como forjados aguantan $24 N/mm^2$, que si se le aplica el coeficiente de seguridad facilitado por el Eurocódigo 5, 1.25 para las maderas laminadas y encoladas, nos da un valor **límite último de $19.2 N/mm^2$** . Como se puede apreciar, el margen es amplio ya que la mayor parte del canto se debe a normativa frente a incendios.

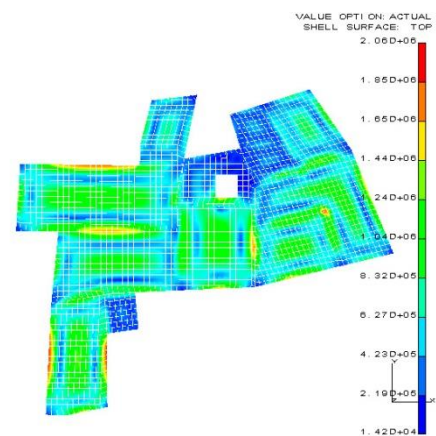
Un punto peculiar de la estructura viene definido por la presencia de una doble altura en la zona del acceso, lo cual obliga a colgar el forjado en voladizo mediante unos cables que lo sujetan al forjado inmediatamente superior, sin provocar con ello un excesivo aumento de las tensiones sobre este. Esto se debe a la no excesiva dimensión de voladizo y al efecto placa de la construcción con CLT.



I. 72 Mapa de tensiones de todos los forjados de CLT



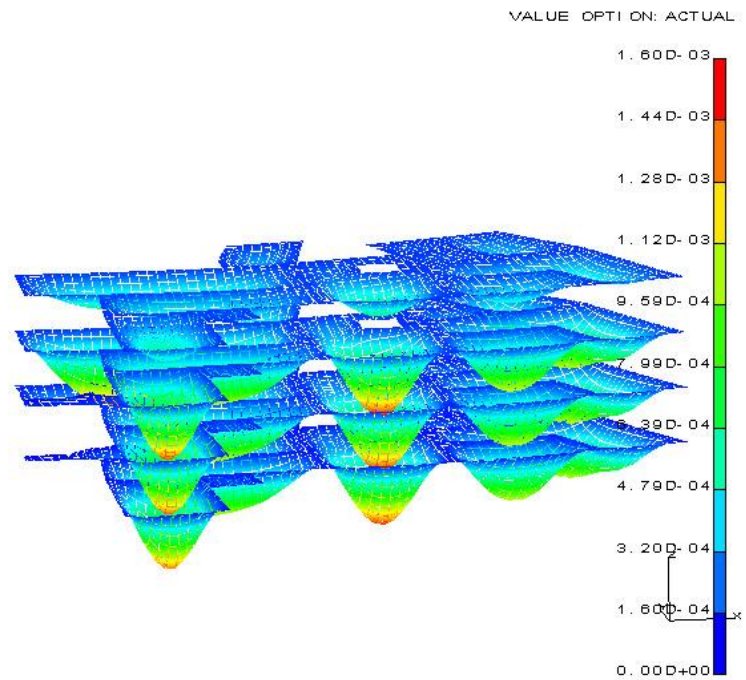
I. 73 Detalle de los puntos de máxima concentración



I. 74 Mapa de tensiones sobre el forjado más desfavorable, del cual se cuelga el forjado de la planta primera

Desplazamientos

En cuanto a los desplazamientos, obviamente los máximos se encuentran en los tramos centrales de las salas con mayores luces. En particular, el máximo absoluto se encuentra en la sala que usando forjado de 202 mm de canto tiene una mayor luz. Este máximo es de 1,6 mm, generando una flecha perfectamente admisible.



I. 75 Desplazamientos de todos los forjados calculados

Valoración del sistema CLT y resultados de ambos cálculos por elementos finitos.

A la vista de los resultados se puede afirmar su buen comportamiento estructural. Tanto en obra nueva como en rehabilitación queda patente que los espesores adoptados no son requeridos por las cargas aplicadas, sino por la normativa respecto a incendios.

Con el cálculo realizado, los empotramientos se consideran perfectos, confiando en este sentido en las especificaciones aportadas por los fabricantes de los anclajes metálicos

A la vista de los resultados, queda patente que el efecto placa que generan los paneles trabajando conjuntamente es realmente beneficioso. Siendo más ajustada esta hipótesis cuanto más se equilibren las resistencias de las placas en sus dos direcciones. Por tanto, el futuro del material pasa por acercarse a los comportamientos de los materiales isótropos.

Mención aparte merecen las flechas generadas en los forjados, que son sorprendentemente pequeñas, y facilitan su integración con otros elementos constructivos.

En cuanto a relación hormigón-madera observada en el ejemplo del Stadthaus building, se pueden apreciar acumulaciones de tensiones elevadas, requiriendo de un especial cuidado a la hora de diseñar los anclajes.

Conclusiones: el futuro del CLT y sus campos de aplicación

El presente trabajo fin de grado ha resultado de gran ayuda para comprender mejor el funcionamiento del material expuesto, así como el método de cálculo usado. Pudiéndose emplear ambos en diferentes campos. Sin embargo, el hecho de trabajar con CLT y el método de los elementos finitos hace patente la adecuación entre ambos sistemas, ya que la metodología de cálculo ha permitido adaptar y simular perfectamente las cualidades de este material. Desde la fase de modelado, pasando por la elección de elementos placa (Shell), todo se adapta perfectamente y complementa entre ambos.

El método de los elementos finitos permite calcular, de una manera bastante rápida, la estructura de proyectos de grandes dimensiones, localizando rápidamente los puntos más débiles del mismo. De ser necesario, se podría realizar a posteriori cálculos pormenorizados de estos puntos desfavorables, o diseñar uniones más adecuadas, sin embargo resulta de gran ayuda un modelo a gran escala que facilita la localización de fallos. Pese a que estos cálculos se hayan centrado en escalas globales, la potencia del método permite llegar al nivel de detalle deseado.

Resulta claramente patente en el cálculo mediante Nx-Ideas, que las construcciones de obra nueva con CLT son sumamente redundantes y el elevado grado de rigidez aportado por el sistema 'honey comb' es una realidad.

Realizando un balance general de lo aprendido cabe mencionar que las elecciones del tema de trabajo, así como la intención inicial de usar cálculos por elementos finitos y la elección de la dirección del trabajo fueron apropiadas.

Para finalizar, simplemente agradecer las horas de dedicación de ambos directores, que han llevado a cabo un adecuado seguimiento y enseñanza de métodos de investigación y cálculo desconocidos por mí anteriormente. Así mismo agradecer la información ofrecida por empresas del sector, como por ejemplo Jesfer, o la colaboración del ayuntamiento de Almazán, Soria, por permitirme visitar un edificio construido con CLT.

Bibliografía y referencias

Libros consultados:

TECTÓNICA 7. Junta seca

TECTÓNICA 11. Madera I

TECTÓNICA 13. Madera II

TECTÓNICA 31. Energía II

TECTÓNICA 33. Rehabilitación

TECTÓNICA 38. Industrialización

Green Architecture Now, Taschen

Wood Architecture now, Taschen

AV 149. Jean Prouvé

Arquitectura Viva 175. Expo Milano 2015

Arquitectura Viva 137. Más madera

Av Proyectos 64. Expo Milano 2015

Detail 02/09

Empresas y entes controladores del sector:

Jesfer

AITIM

Conferencias:

Cross-Laminated Symposium of Vancouver en 2012

Webs visitadas:

www.infomadera.net

www.clt.info

www.storaenso.com

www.conmadera.eu

www.klhuk.com/

www.atcp.com.br

www.caesoft.es

ww.civilgeeks.com

www.proholz.es

www.interempresas.net

www.enmadera.info

www.httconfemaderagalicia.es/?p=3089

www.b720.com

Documentos normativos:

NATIONAL ANNEX. UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures-
Part 1-3: General actions — Snow loads

CTE-SE

Artículos:

Building with engineered timber, NY Times. Com

Murray Grove, The world's tallest modern timber residential building

Why not timber high rises? By Russell Fortmeyer

Consolidación estructural del edificio patrimonial de C/Ripoll, 25 Barcelona.
Ca la Dona. S.Bestraten

Utilización de tableros contralaminados para la sustitución funcional de
forjados. 'Ca la Dona' Barcelona. Sandra Bestraten.

Documento cátedra madera nº4, 4º Simposium internacional de arquitectura y construcción de arquitectura en madera

El tablero contralaminado. Umberto Vitorio. Universidad Politécnica de Cataluña.

KLH component catalogue for cross laminated timber structures

KLH Technical Characteristics

Estructura en edificio de usos múltiples en el recinto ferial de Almazán, Soria. Miguel Nevado

Aitim 295, mayo-junio. Pabellón de España en la Expo Milano 2015

Rehabilitación con tableros contralaminados. Transformación de un edificio antiguo en hotel rural en Riahuélas, Segovia. Manuel García Barbero.

Referencias de imágenes

KLH industrias: 1,4,15,20,21,26,28,29,30

Cátedra Madera nº4, 4º Simposium internacional de arquitectura y construcción en madera: 5

The Craftsman blog: 1,8

Italcasamadera.com: 9

Madera-sostenible.com: 10

Autoría de dibujos, Umberto Vitorio. El tablero contralaminado: 11,12,14,58

Alter Materia: 13

Hundegger.de: 18

Lend Lease: 19

Boletín de información técnica nº 271: 22

Crosslamtimber.com: 24,25

Sandra Bestraten Castells: 31,32,33,34,35,36

Aitim: 39,40,41,42,43

Alex de Rijke para dRMM Architects: 44,45,46,47,48,49,50,51,52

Tectónica 31: 53,54,55,56,57

Anexo I: Breve descripción del método de cálculo usado

El cálculo de los dos proyectos se ha llevado a cabo mediante el método de los elementos finitos, requiriendo por ello una metodología de trabajo determinada. El programa elegido ha sido Nx-Ideas, pudiéndose haber elegido cualquier otro que funcione bajo la misma lógica matemática.

El método matemático que subyace a la metodología empleada está basado en el cálculo de desplazamientos para posteriormente obtener las tensiones mediante ecuaciones matemáticas. Se considera este apartado como parte de otro tipo de investigaciones y no se va a profundizar en el.

-MODELADO

El primer paso realizado es investigar los proyectos que se van a modelar, obteniendo el máximo número posible de datos sobre las geometrías. Estas geometrías se deben modelar en el programa de cálculo con el elemento elegido para ellas, existiendo elementos barra (beam), elementos sólidos (solid), elementos placa, (Shell) y muchos otros. En ambos ejemplos calculados en este estudio se han elegido elementos placa (Shell) por adaptarse mejor los modelos matemáticos de cálculo de estas a los paneles de CLT representados.

-CONDICIONES DE CONTORNO Y MATERIALES

En este punto se le deben añadir al modelo todas las condiciones deseadas, empotramientos, rótulas, cargas y todo tipo de apoyos en general.

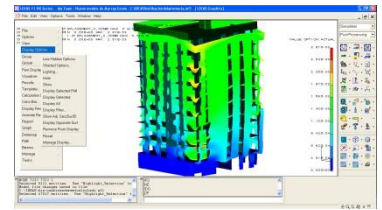
Así mismo se les deben asignar a todos los elementos un material y unas propiedades, creándose materiales con sus correspondientes propiedades que serán asignados a cada elemento.

En cuanto a las cargas, se deben generar cargas con y sin mayoraciones para realizar las combinaciones pertinentes según las hipótesis de estudio. Los diferentes coeficientes de las hipótesis se adaptan según la norma empleada.

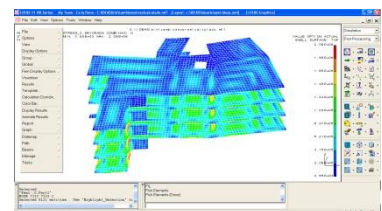
-CÁLCULO Y RESULTADOS

En este punto se calcula el edificio bajo las diferentes hipótesis de carga y apoyos generados para obtener los resultados según marca la norma. Hipótesis mayoradas para tensiones y esfuerzos e hipótesis sin mayorar para los desplazamientos.

Finalmente se procede a la obtención de los mapas de resultados y análisis mediante la escala de colores que muestra las distribuciones de tensiones, esfuerzos, desplazamientos...



I. 76 Espacio de trabajo, comprobación de las tensiones



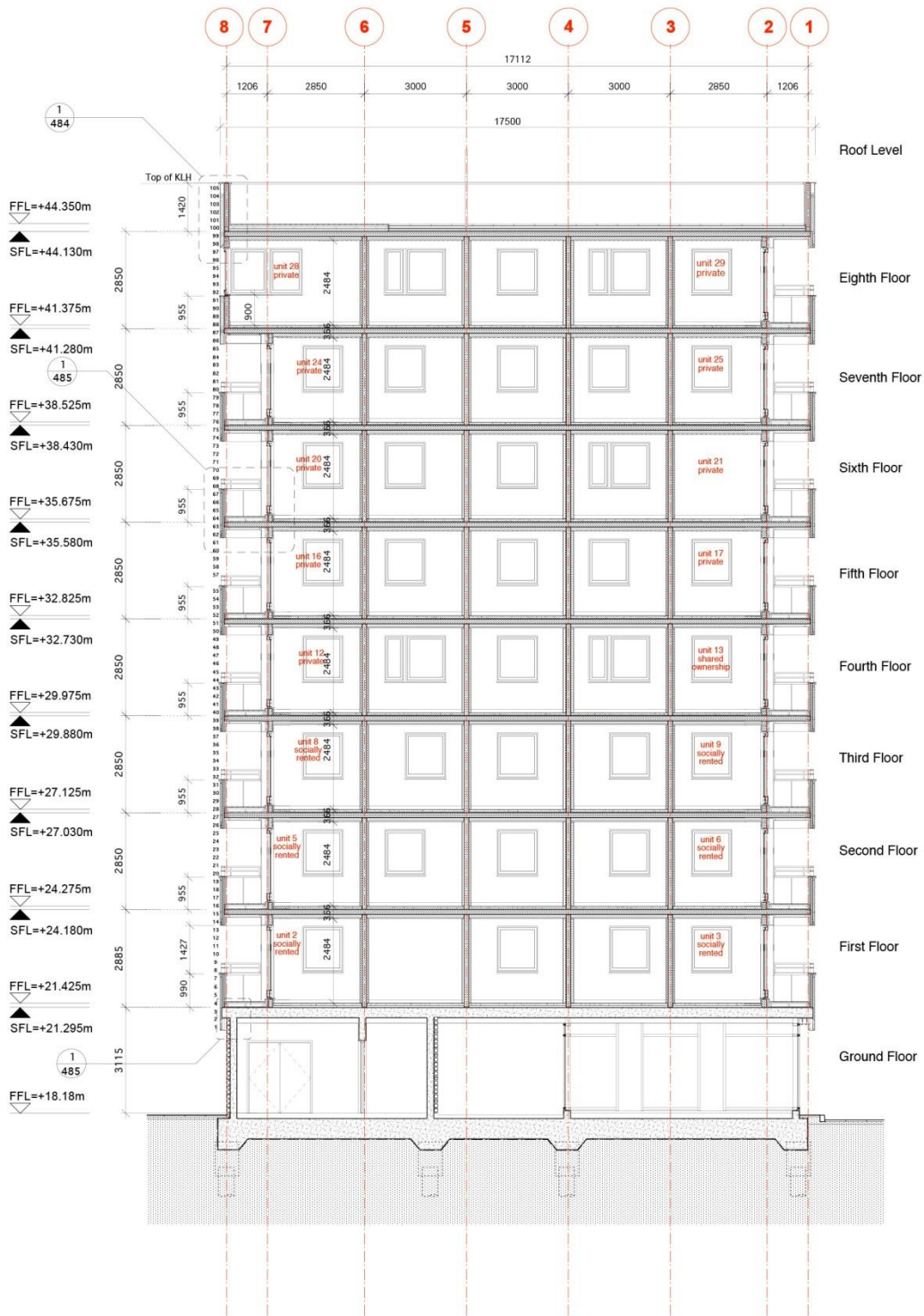
I. 77 Espacio de trabajo, comprobación de tensiones

Anexo II: Planimetría de ambos ejemplos calculados

Stadthaus

Secciones 1/200





Planta apartamentos de alquiler (1-3) 1/200



Planta viviendas privadas (4-8) 1/200



Ca la Dona

Plantas del proyecto de rehabilitación Sin escala

Planta primera



Planta segunda



Planta tercera



Cubierta



Anexo III: Modelado con las cargas usadas para el cálculo

Propiedades usadas para el material

Pese a que uno de los principales valores del CLT es la bi-direccionalidad del reparto de las cargas debido a su efecto placa. Esto no es del todo cierto, pues el material está compuesto siempre por un número impar de capas y por tanto la capa superior e inferior marcan la direccionalidad principal del material.

Para simplificar los cálculos se ha tomado la decisión de aproximar el CLT a un material isótropo y usar un único módulo elástico [$E=12000\text{N/mm}^2$] y coeficiente de poisson de [$\nu=0,4$].

En cuanto a las uniones, se ha decidido realizar los cálculos mediante empotramientos entre todas las placas en ambos casos.

Hipótesis de cálculo de acuerdo a norma

COEFICIENTES USADOS PARA LAS HIPÓTESIS								
CASO	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
PERMANENTE	1,35	1,35	1,35	1,35	0,8	1,35	1,35	1,35
SOBRECARGA		1,5	1,05			1,5	1,05	0,75
NIEVE		0,75	1,5			0,75	1,5	0,75
VIENTO				1,5	1,5	0,9	0,9	1,5
						HIPÓTESIS MÁS DESFAVORABLE		

Stadthaus

Las diferentes normativas consultadas para obtener coeficientes y métodos de cálculo han sido:

-Eurocódigo 1 para sobrecargas

-Eurocódigo 5 para coeficientes de la madera.

-Anexo al Eurocódigo 1 (National annex, UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures) para valores relacionados con el emplazamiento del edificio.

-CTE: SE-AE Acciones en la edificación

-CTE, Documento Básico de Seguridad Estructural SE-M

Acciones en la edificación:

-Sobrecarga de uso: 2 KN/m^2 en plantas, 1 KN/m^2 en cubierta.

-Sobrecarga por nieve: 250 N/m^2

-Carga del viento adaptada a la superficie modelada:

D: 1.21 KN/m^2

A1: -1.03 KN/m^2

E: -1 KN/m^2

A2: -1.55 KN/m^2

-Peso propio:

Densidad CLT: 490 Kg/m^3

Sobrecarga en fachada: 1 KN/m

-Peso ejercido por las escaleras sobre los apoyos en el forjado: 4 KN/m

CARGAS MAYORADAS								
HIPÓTESIS								
CASO	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
PERMANENTE(GRAVEDAD) (m/s2)	13,23	13,23	13,23	13,23	7,84	13,23	13,23	13,23
PERMANENTE PESO FACHADAS (N/m)	1350,00	1350,00	1350,00	1350,00	800,00	1350,00	1350,00	1350,00
PERMANENTE PESO ESCALERAS (N/m)	5400,00	5400,00	5400,00	5400,00	3200,00	5400,00	5400,00	5400,00
SOBRECARGA EN PLANTAS (N/m)	-	3000,00	2100,00	-	-	3000,00	2100,00	1500,00
SOBRECARGA EN CUBIERTA (N/m)	-	1500,00	1050,00	0,00	0,00	1500,00	1050,00	750,00
NIEVE (N/m)	-	187,50	375,00	-	-	187,50	375,00	187,50
VIENTO D (N/m)	-	-	-	1823,55	1823,55	1094,13	1094,13	1823,55
VIENTO E (N/m)	-	-	-	1500,00	1500,00	900,00	900,00	1500,00
VIENTO A1 (N/m)	-	-	-	1545,00	1545,00	927,00	927,00	1545,00
VIENTO A2 (N/m)	-	-	-	2325,00	2325,00	1395,00	1395,00	2325,00
						HIPÓTESIS MÁS DESFAVORABLE		

Ca la Dona

Las diferentes normativas consultadas para obtener coeficientes y métodos de cálculo han sido:

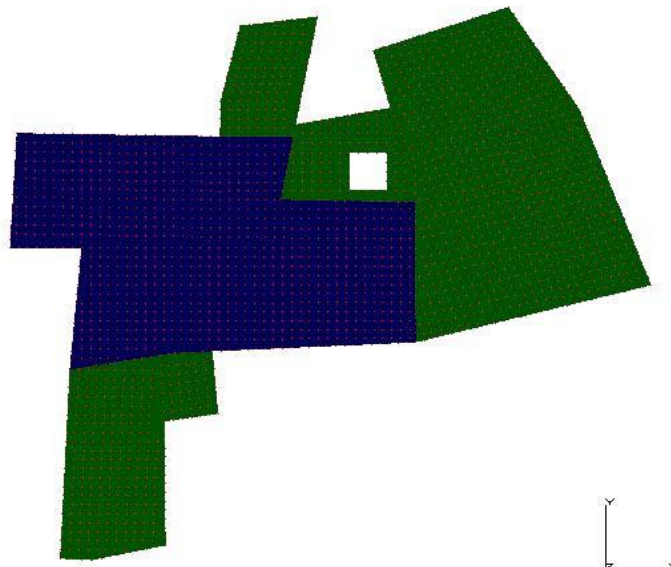
- Eurocódigo 1 para sobrecargas
- Eurocódigo 5 para coeficientes de la madera.
- CTE: SE-AE Acciones en la edificación
- CTE, Documento Básico de Seguridad Estructural SE-M

Acciones en la edificación:

- Sobrecarga de uso: 5 KN/m^2 en plantas, 1 KN/m^2 en cubierta.
- Sobrecarga por nieve: 200 N/m^2
- Peso propio:

Densidad CLT: 490 Kg/m^3

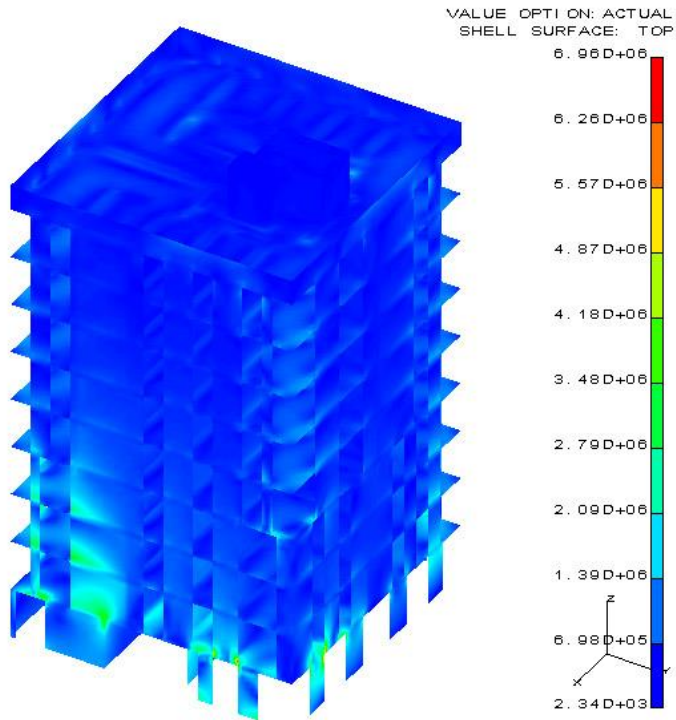
Planta tipo: Forjados de 245 mm en azul y forjados de 202 mm en verde



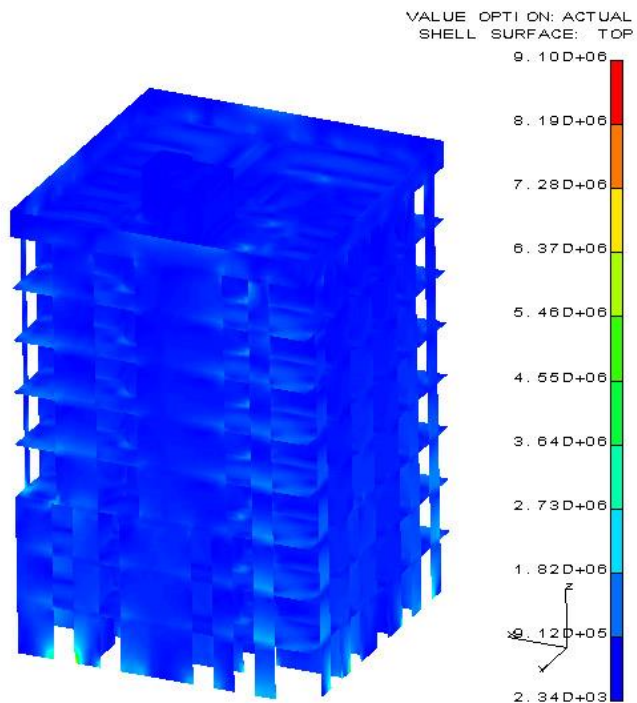
Anexo IV: Mapas de resultados obtenidos en el cálculo por elementos finitos

Stadthause

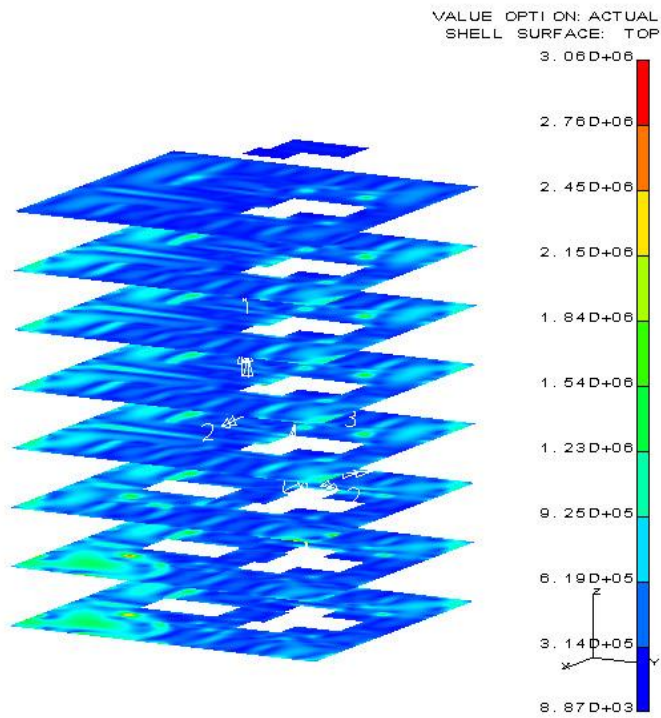
Tensiones en el edificio completo (N/m²)



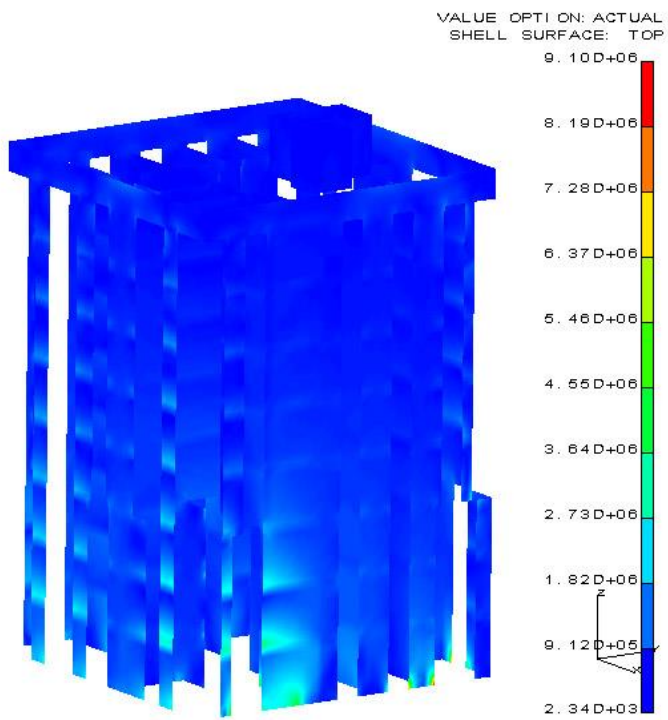
Tensiones únicamente en los elementos de CLT (N/m²)



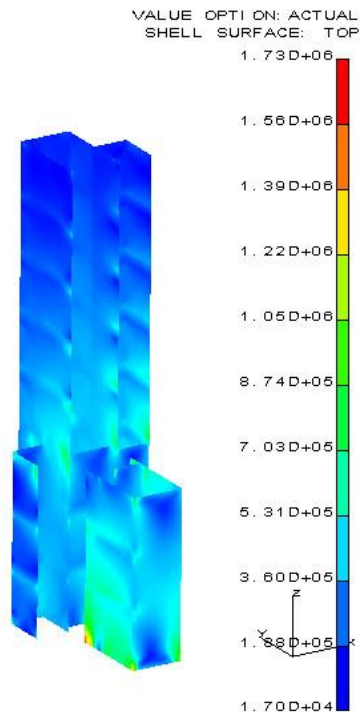
Tensiones en los forjados de CLT (N/m²)



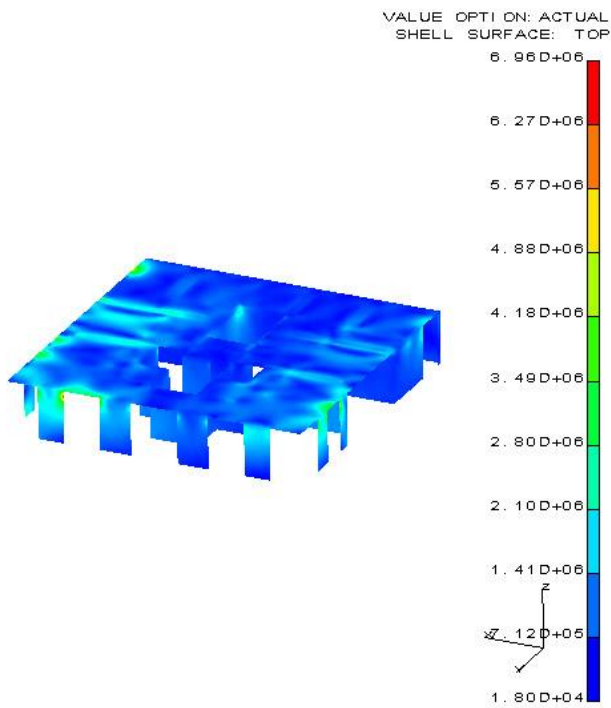
Tensiones en los elementos verticales del CLT (N/m²)



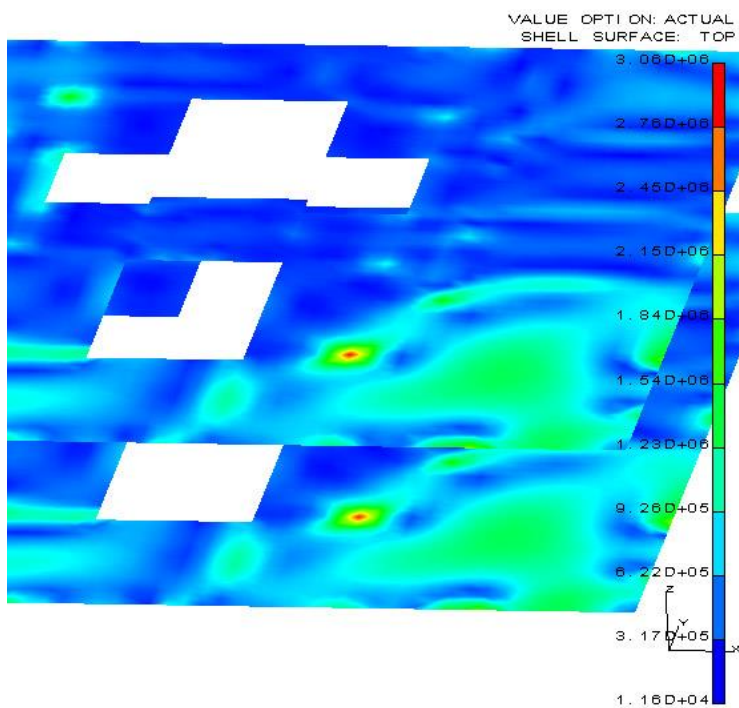
Tensiones en el núcleo de escaleras (N/m²)



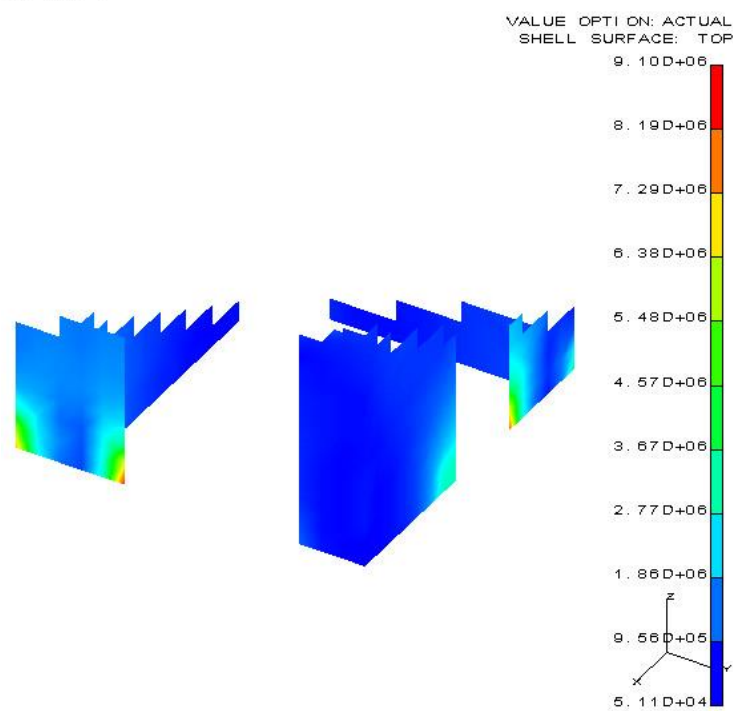
Tensiones en los elementos de hormigón (N/m²)



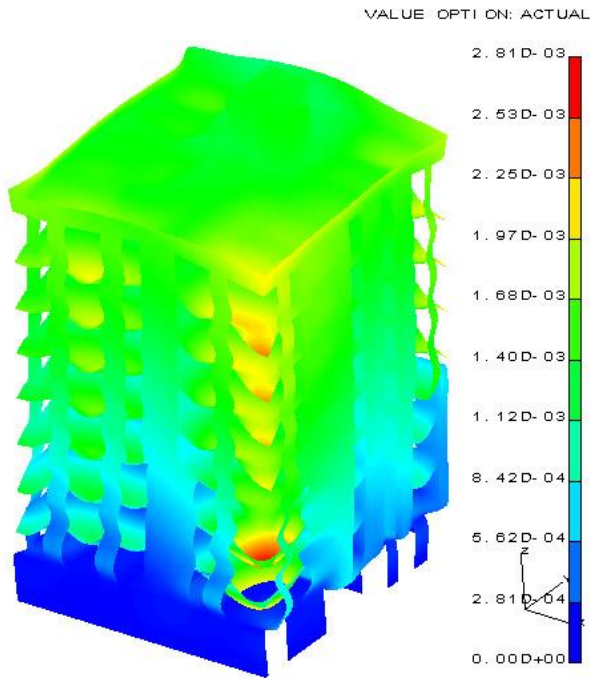
Tensión máxima particular de los elementos horizontales (N/m²)



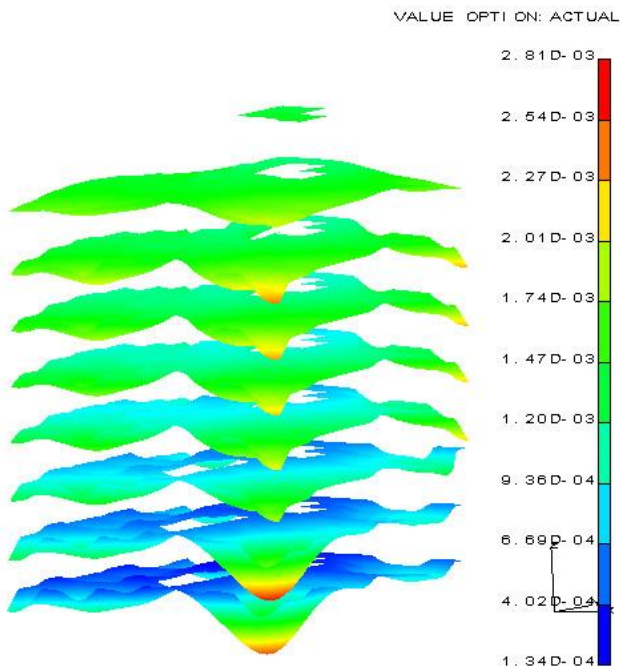
Tensión máxima particular de los elementos verticales y absoluta del conjunto del edificio (N/m²)



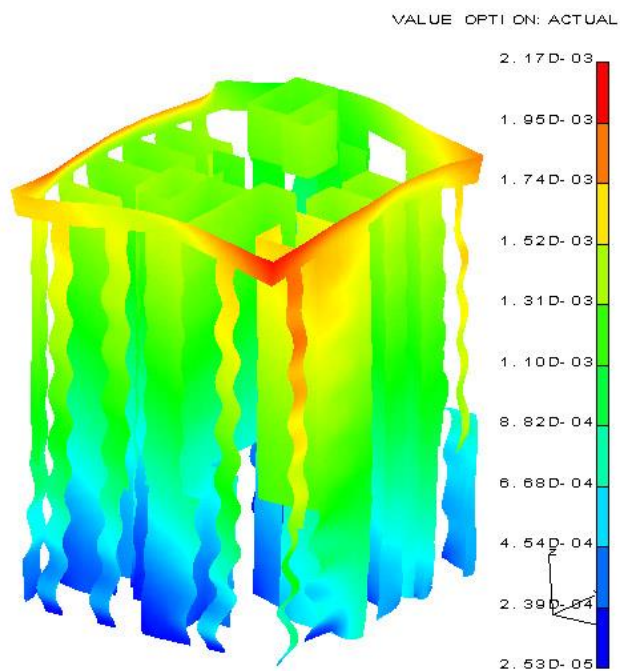
Análisis de desplazamientos en el edificio completo (m)



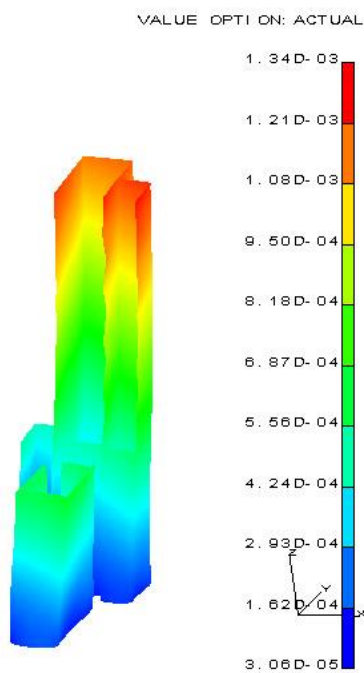
Análisis de desplazamientos en los forjados de CLT (m)



Análisis de desplazamientos en los elementos verticales (m)

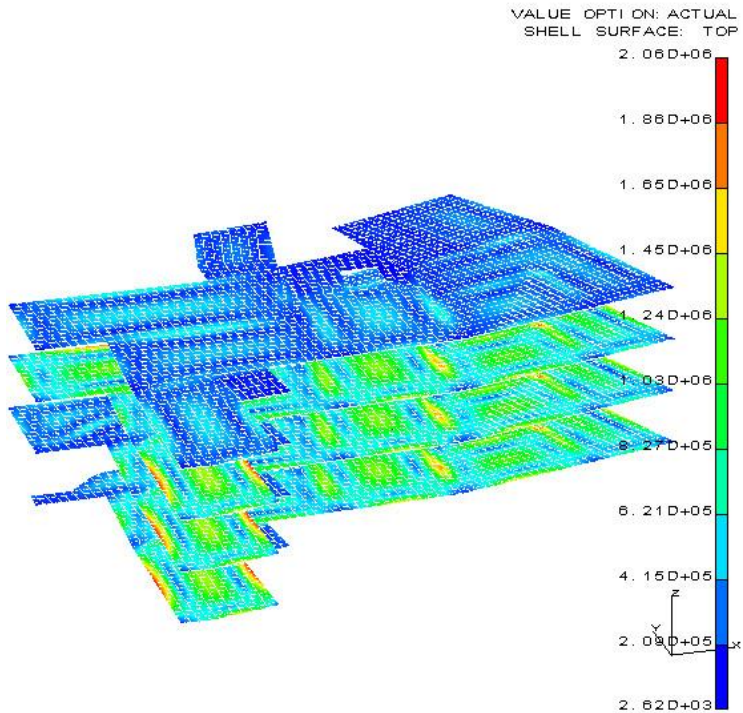


Análisis de desplazamientos en el núcleo de escaleras y ascensor (m)

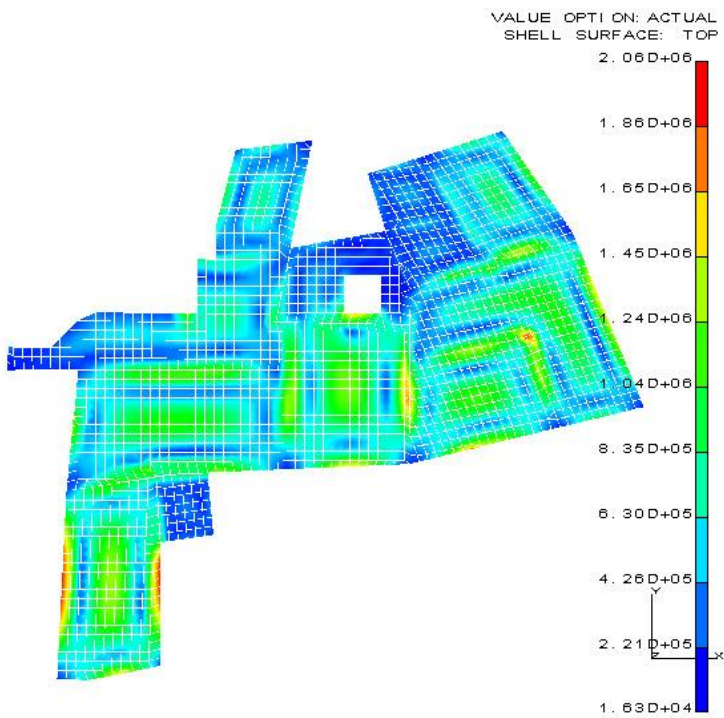


Ca la Dona

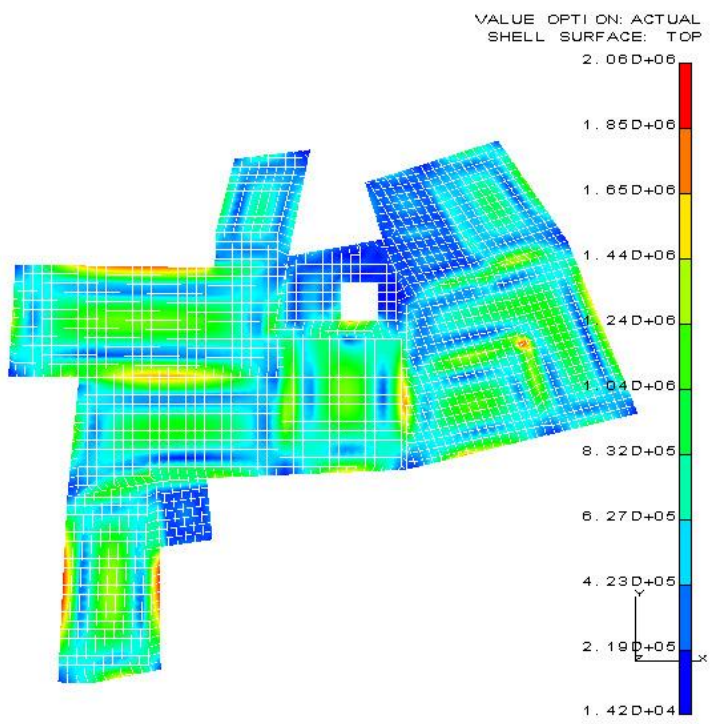
Tensiones en el edificio completo (N/m²)



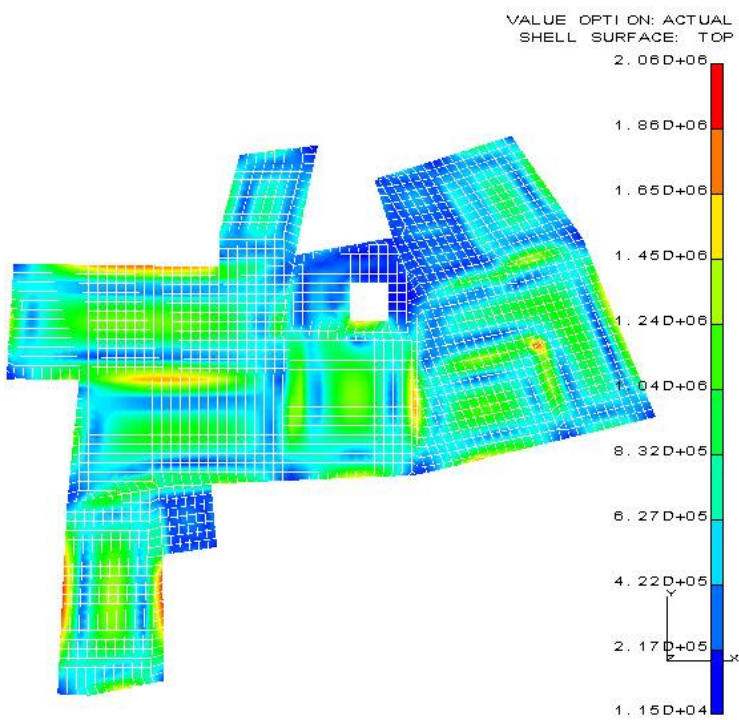
Tensiones en los forjados de CLT (N/m²), Planta primera



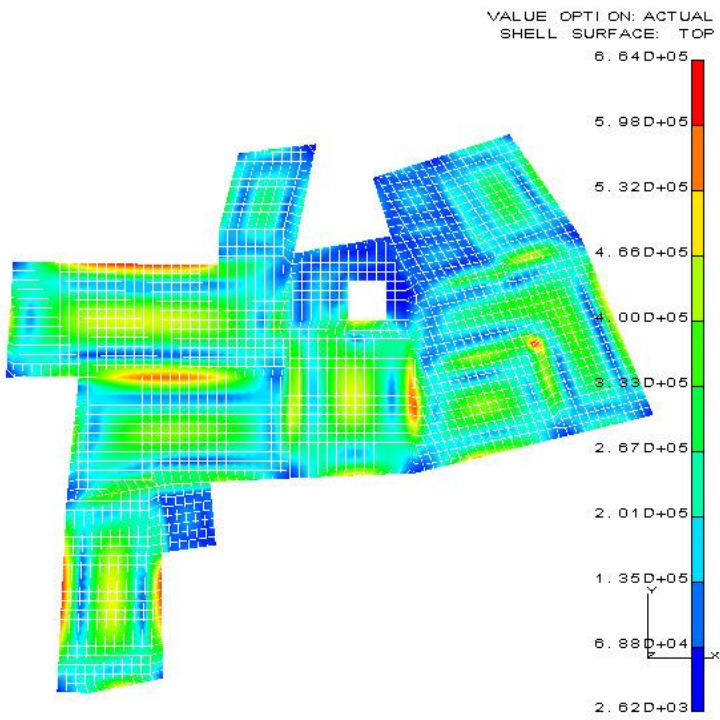
Tensiones en los forjados de CLT (N/m²), Planta segunda



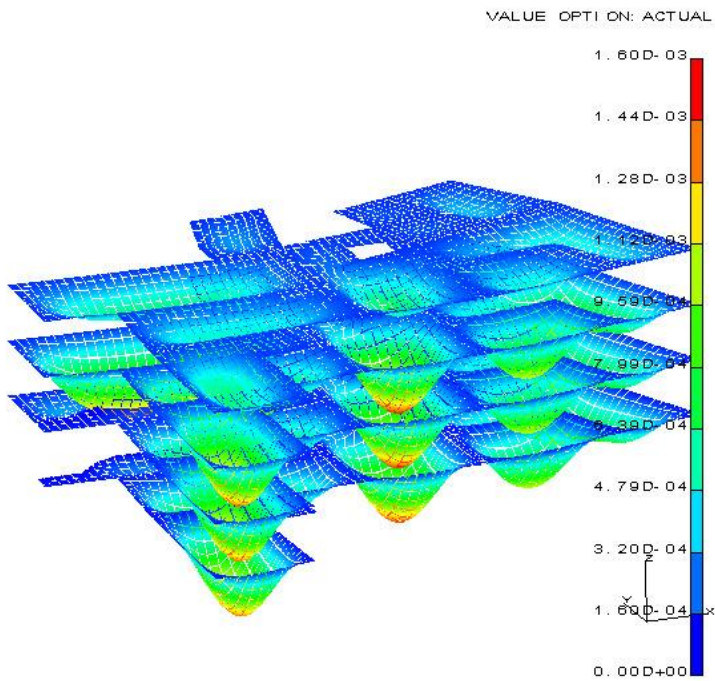
Tensiones en los forjados de CLT (N/m²), Planta tercera



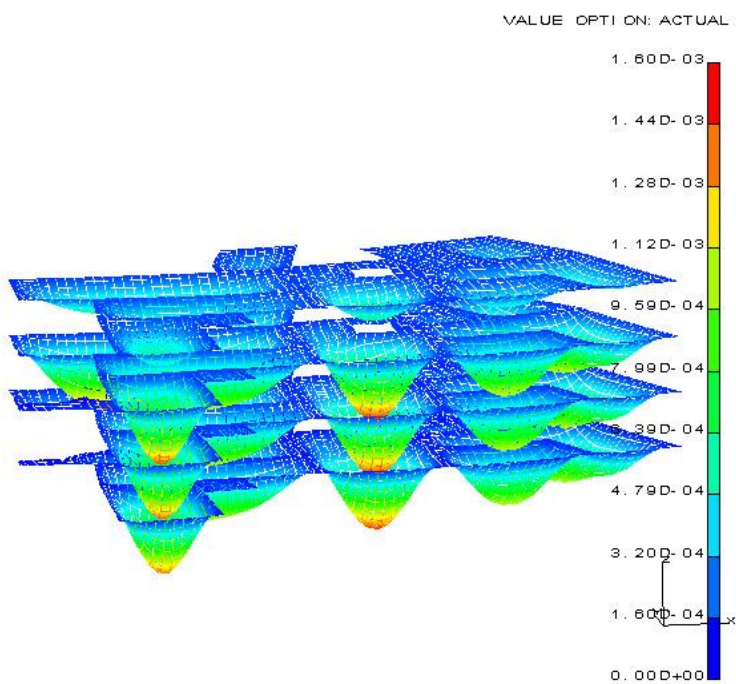
Tensiones en los forjados de CLT (N/m²), Planta segunda



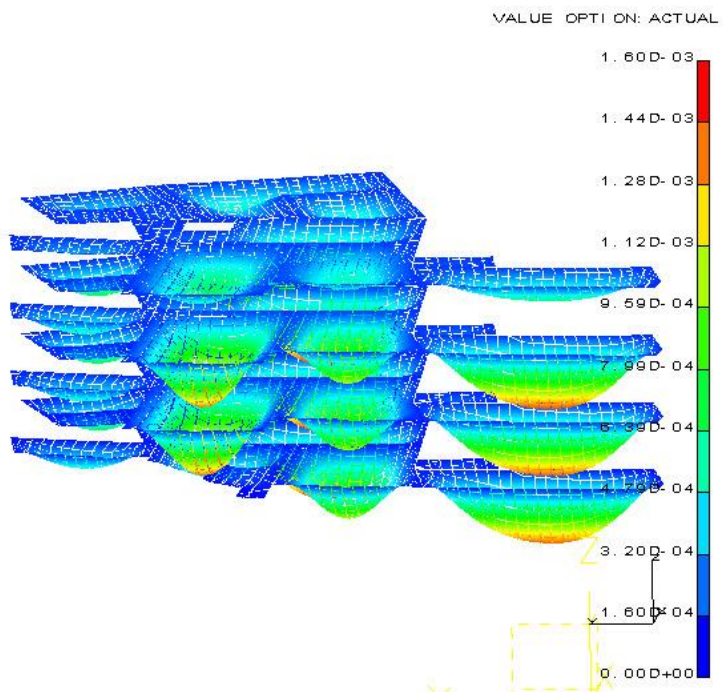
Análisis de desplazamientos en todos los forjados de CLT (m)



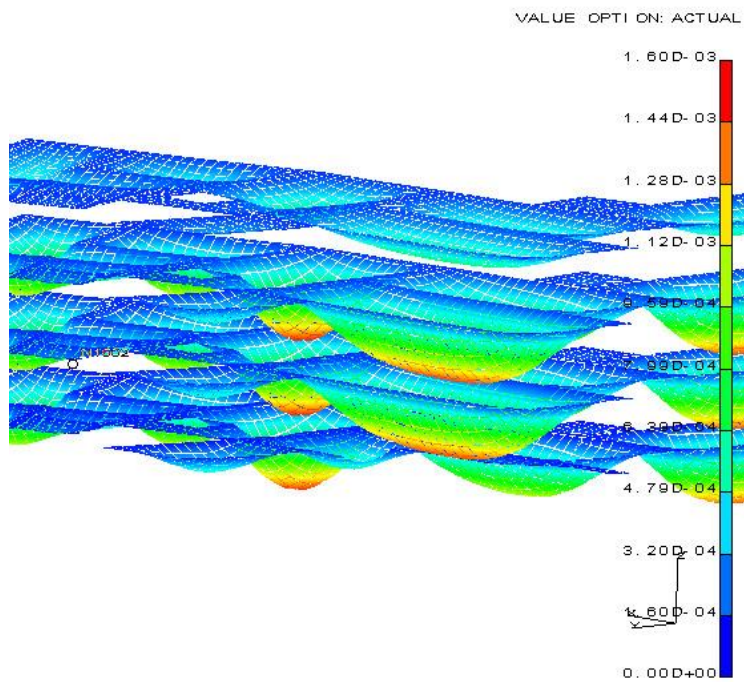
Análisis de desplazamientos en todos los forjados de CLT (m)



Análisis de desplazamientos en todos los forjados de CLT (m)



Análisis de desplazamientos en todos los forjados de CLT (m)



Análisis de desplazamientos en el forjado de CLT de la planta segunda (m)

