

# SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS DE MADERA EN ALTURA (BOX-BEAMS)





TFM- Ricardo de Miguel

TUTOR- Rafa Zuza

# SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

## INDICE

### 0. ABSTRACT

#### 1. OBJETIVO DEL TRABAJO: RESUMEN PROPUESTA

#### 2. ANTECEDENTES Y ANÁLISIS DE SISTEMAS ESTRUCTURALES DE MADERA EN EDIFICACIÓN EN ALTURA

##### 2.1.- Productos y tecnologías en madera para construcción estructural

- 2.1.1.- Glued-Laminated Timber (Glulam) o Madera Laminada Encolada
- 2.1.2.- Cross-Laminated Timber (CLT) o Panel Contralaminado
- 2.1.3.- Dowel Laminated Timber (DLT)
- 2.1.4.- Nail Laminated Timber (NLT)
- 2.1.5.- Forjados colaborantes de madera- Hormigón, (TTC, Timber-Concrete Composite)
- 2.1.6.- Paneles LVL

##### 2.2- Normativa en la edificación en altura

##### 2.3- Evolución y actualidad de la EMA (Edificación de Madera en Altura)

##### 2.4.- Breve repaso de los edificios de madera en altura más emblemáticos y descripción de su sistema constructivo

##### 2.5.-Estrategias estructurales de la edificación en altura en acero y hormigón y comparativa con la madera

##### 2.6- Estrategias estructurales en la edificación en altura de madera

##### 2.7- Trabajos de investigación de sistemas estructurales en altura: Sistema FTTT de Michael Green (Green & Taggart, 2020)

### 3. ESTADO DEL ARTE

#### 3.1- Propuesta de un sistema estructural basado en secciones huecas de paneles de madera CLT

#### 3.2- Antecedentes en el estudio de las vigas cajón: Trabajos de investigación publicados.

3.2.1 Trabajo de Yue Chen, A.M. ASCE, Frank Lam, M. ASCE publicado en 2013, Bending Performance of Box-Based Cross-Laminated Timber Systems. (Chen & Lam, 2013)

3.2.2 Trabajo de Xiaofeng Suna, Minjuan Hea, Zheng Lia,\*, Frank Lam: Seismic Performance assessment of conventional CLT shear wall structures and post-tensioned CLT shear wall structures (Sun, He, Li, & Lam, 2019)

#### 3.3- Antecedentes en el estudio de las vigas cajón: Obras realizadas

3.3.1 Cubierto piscina de Salamanca, Miguel Nevado

### 4. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4.1 Propuesta de un edificio en base a una planta tipo de partida

#### 4.2 Uso de pilares y vigas cajón cajón en CLT como elemento rigidizador del núcleo y estructura: Adaptación de la estructura a la planta y búsqueda de la sección de CLT

#### 4.3 Modelización de la estructura: Dibujo del edificio en Cadwork

#### 4.4 Cálculos preliminares

- 4.4.1 Cálculo del forjado mediante el software Calculatis
- 4.4.2 Cálculo de vigas de CLT de sección hueca de 13,5 mts de vano en Dlubal
- 4.4.3 Pruebas de pórticos en Laminata y comprobación de sección hueca similar en MLE
- 4.4.4 Parámetros de carga del edificio y cálculos preliminares

#### 4.5 Modelado de la estructura doble vano en software de cálculo Dlubal

- 4.5.1 Modelado estructura doble vano en base al predimensionamiento REV 1
- 4.5.2 Resultados de cálculo de la estructura doble vano REV 1
- 4.5.3 Modelado de la estructura con pilares intermedios

#### 4.6 Modelado y cálculo final de la estructura en Dlubal

- 4.6.1 Dimensionamiento y modelado de la estructura
- 4.6.2 Resultados finales de cálculo

### 5. CONCLUSIONES

#### 5.1 Conclusiones del trabajo

#### 5.2 Futuros campos de investigación

### 6. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

#### 6.1 Referencias y citas realizadas durante el trabajo por orden alfabético

#### 6.2 Bibliografía utilizada durante el trabajo por orden alfabético

### 7. ANEXOS

#### 7.1 Anexo 1: Cálculo de forjado mediante el software Calculatis

#### 7.2 Anexo 2: Cálculo de vigas de CLT de sección hueca de 13,5 mts de vano en Dlubal

#### 7.3 Anexo 3: Cálculo de sección equivalente

#### 7.4 Anexo 4: Informe con resultados cálculo Dlubal





## 0. ABSTRACT:

BOX BEAMS AS STRUCTURAL SYSTEM IN TIMBER HIGH-RISE BUILDINGS

We are experiencing a comeback in the use of wood as a structural material in the construction of buildings, especially in the case of high-rise construction. Several factors are contributing to this rebirth of wood: the development of new materials such as the Cross-laminated Panel or CLT, the improvement of existing materials, gluing and jointing, new technologies such as Numerical Control, wide and fast production capacity, in addition to the lower qualification necessary in labor for its production and installation, overcoming topics such as its affectation by fire and greater degradation than other materials, and changes in regulations are allowing its quick development in its use as structural material, moving to a fast evolution in terms of the height achieved by these structures. Currently the 18 stories have been reached, with plans to double it in a few years with several projects. In this investigation, the different types of structural systems currently used in high-rise buildings are compared, and a new type is proposed, based on timber box-beams as a more sustainable alternative to systems with massive use of wood or mixed systems with concrete or steel, generally used today. In the present work, box beams made with timber panels for the formation of beams, pillars, connections and bracing core for high-rise buildings will be proposed, and their viability will be demonstrated through the design and structural calculation of a 21-storey building made with the proposed method

KEY WORDS: Timber Box Beams, Timber high-rise buildings, Wood efficiency in high rise buildings

## 1. OBJETIVO DEL TRABAJO: RESUMEN PROPUESTA

SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA DE MADERA

Estamos viviendo un resurgimiento en el uso de la madera como material estructural en la construcción de edificios, especialmente en el caso de la edificación en altura.

Varios factores están contribuyendo a este renacer de la madera: el desarrollo de nuevos materiales como el Panel Contra-laminado o CLT, la mejora de materiales ya existentes, encolados y uniones, nuevas tecnologías como el Control Numérico, amplia y rápida capacidad de producción, además de la menor cualificación necesaria en mano de obra para su producción e instalación, superación de tópicos como su afectación por el fuego y mayor degradación que otros materiales, y cambios en normativas está permitiendo su rápido desarrollo en su utilización como material estructural, trasladándose a una rápida evolución en cuanto a la altura conseguida por estas estructuras, donde en pocos años se han alcanzado las 18 plantas actuales, con previsión de duplicarla en varios proyectos.

En el presente trabajo se comparan los distintos tipos de sistemas estructurales actualmente utilizados en los edificios en altura, y se propone un nuevo tipo, basado en las secciones huecas de madera como alternativa más sostenible a los sistemas con uso masivo de madera o sistemas mixtos con hormigón generalmente usados en la actualidad.

En el presente trabajo se propondrán secciones huecas realizadas con paneles de madera para la formación de vigas, pilares, conexiones y núcleos de arriostramiento para edificación en altura, y se demostrará su viabilidad mediante el diseño y cálculo estructural de un edificio de 21 plantas realizado con el método propuesto.



## 2. ANTECEDENTES Y ANÁLISIS DE SISTEMAS ESTRUCTURALES DE MADERA EN EDIFICACIÓN EN ALTURA

### 2.1.- Productos y tecnologías en madera para construcción estructural

La revolución en la construcción en altura en madera se produce como consecuencia de la capacidad de mecanizar e industrializar las piezas de madera, con la posibilidad de montar rápidamente los edificios y reducir drásticamente los tiempos de construcción, fiabilidad y control, la mejora en los materiales de encolados y elementos de unión, así como por la aparición y desarrollo de nuevos elementos constructivos basados en madera.

En el presente capítulo se analizan alguno de estos elementos constructivos, los de mayor difusión y las posibilidades de utilización en las diferentes partes de la estructura de la edificación en altura.

Entre los más utilizados encontramos los siguientes tipos:



Cross laminated timber (CLT) – LVL Panels – Glue Laminated Timber (Glulam) – Timber-Concrete Composite (TCC). Image © StructureCraft

### 2.1.1.- Glued-Laminated Timber (Glulam) o Madera Laminada Encolada

Internacionalmente conocida como Glulam, es la principal tecnología usada en madera estructural. Su desarrollo se produjo con el descubrimiento de nuevos adhesivos que permiten un comportamiento estructural similar a la madera maciza.

Se obtiene mediante el pegado de listones de madera de hasta 40 mm de espesor. a lo largo mediante finger joints y encolados entre sí con la fibra en la misma dirección mediante colas (actualmente libres de formaldehidos), lo que permite evitar las imperfecciones de la madera, así como alcanzar grandes secciones.

Además permite su curvatura y realizar contraflechas, lo que permite salvar grandes luces con un peso mucho menor que un elemento del mismo volumen en un material tradicional.



[https://www.thebalancesmb.com/thmb/ywjYBh4-VzMtkypv91m0ZduVz58-/1200x675/smart/filters:no\\_upscale\(\)/ewp\\_glulam-56af60b93df78cf772c3b57d.jpg](https://www.thebalancesmb.com/thmb/ywjYBh4-VzMtkypv91m0ZduVz58-/1200x675/smart/filters:no_upscale()/ewp_glulam-56af60b93df78cf772c3b57d.jpg)





## 2.1.2.- Cross-Laminated Timber (CLT) o Panel Contralaminado

Es una evolución de la madera laminada, y después de ella es el producto de madera más usado en la actualidad en la realización de estructuras de madera en la edificación residencial, ya sea en unifamiliares o en residencial de varias alturas, siendo ya habitual su uso estructural en edificios de madera de 4 a 10 plantas. Su extenso uso ha hecho que se le llegue a denominar como el “hormigón del siglo XXI” debido a su creciente popularidad.

Consiste en un panel formado por varias capas (mínimo tres) de madera aserrada. Cada capa se encola con la dirección de las fibras a 90°, con una disposición de capas simétrica.

Esta disposición permite el trabajo del panel en las dos direcciones, por lo que sus paneles pueden utilizarse tanto como forjados, como de muros de carga o cubiertas. Cuando es suplementado con nervaduras de madera laminada, pasa a denominarse Rib- Panel.



Imagen Panel CLT Egoín Andaluca

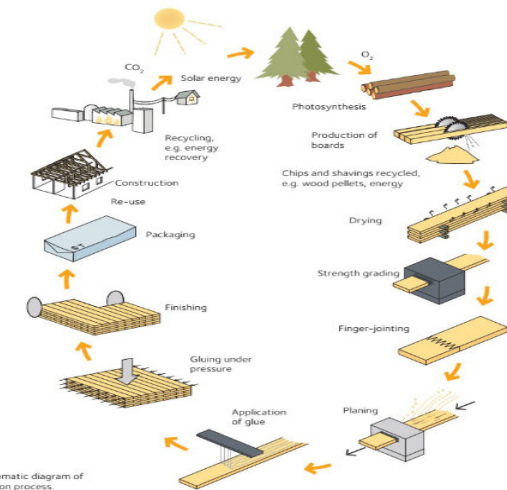


Figure 1.6 Schematic diagram of the CLT production process.



Generalmente es madera de conífera, variando su especie y características mecánicas: Pino Radiata en el Norte de España, Picea Abis o Pino Silvestre en centro y Norte de Europa y Abeto Douglas en USA. Las ETA de los fabricantes más usados en Europa indican en general una resistencia de C24

Actualmente el uso del CLT solamente se permite en clase de servicio 1 y 2.

## 2.1.3.- Dowel Laminated Timber (DLT)

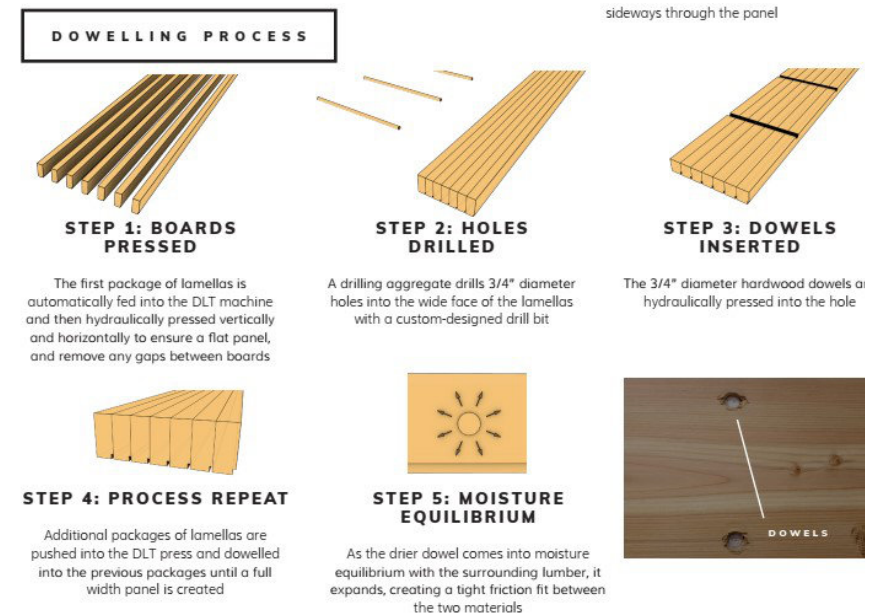
El DLT o Madera Laminada mediante Pasadores (DLT) es un producto de madera que se puede usar especialmente para forjados, donde es particularmente eficiente para tramos horizontales pero también como elementos de pared o como elemento visto en techos, ya que se pueden realizar juntas pre-fresadas en el canto, creando un panel con un diseño arquitectónico muy flexible, y puede contener acústica preintegrada, así como conductos eléctricos y otras instalaciones

Aunque no es muy conocido en Europa, actualmente solo disponible en USA, es un producto muy interesante con gran proyección, . Está conformado por paneles de madera maciza trabajando de canto en una dirección, utilizándose tacos de madera a modo de pasadores para un ajuste por fricción entre ellos.

Los paneles DLT son el único producto de madera laminada que no implica pegamento ni clavijas de metal entre los distintos tableros ( solo cola en las finger joints), ya que los paneles DLT se producen por prensado y la inserción de pasadores de madera a una humedad mucho más baja que el resto de la madera, provoca un pretensado transversal al alcanzar la humedad de equilibrio

## 2.1.4.- Nail-Laminated Timber (NLT)

Prácticamente sustituido por el DLT, similar a este último pero con los listones clavados entre sí.

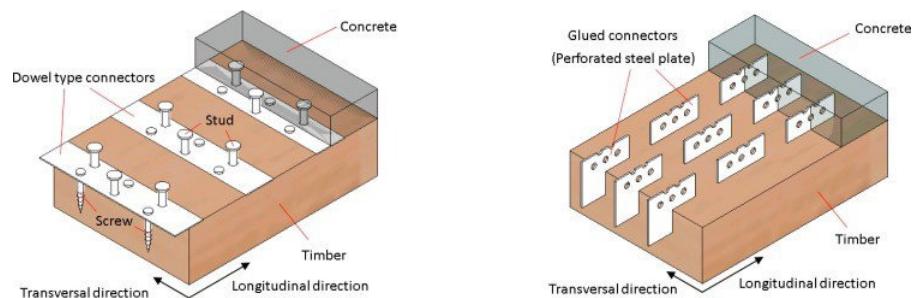


StructureCraft DLT Design & Profile Guide © V4.0 – USA



## 2.1.5.- Forjados colaborantes de madera- Hormigón, (TTC, Timber-Concrete Composite)

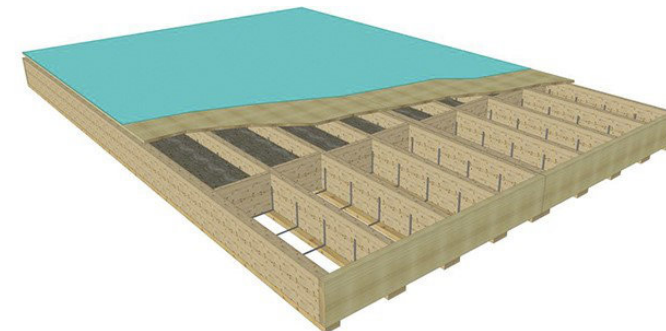
Permite aunar la ventaja de los dos materiales: la ligereza de la madera con la capacidad de trabajo y acústica de la masa del hormigón. El uso de la madera como base, tanto en CLT como con DLT (USA), a modo de encofrado del hormigón para la realización de forjados mixtos colaborantes mediante el uso de conectores de acero, permite mayor capacidad de carga, así como de la mejora del comportamiento acústico y ante el fuego del forjado.



<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0141029618338665-gr3.jpg>

## 2.1.6.- Paneles LVL

Realizados en base a Madera Microlaminada, su obtención es un proceso similar al de la madera contrachapada. es un producto de madera en panel, obtenido laminando gruesas chapas de madera en dirección paralela a la veta. Las chapas de madera orientadas longitudinalmente son unidas con juntas en bisel y generalmente se fabrica en chapas de 3,2 mm de espesor. En algunos casos a los productos de LVL se les puede añadir de una a tres capas cruzadas para obtener mayor resistencia. Los grosores disponibles abarcan desde 21 mm hasta 75 mm, y en casos especiales hasta 150 mm. Actualmente la mayoría de la producción se destina a vigas de celosía o vigas formando parte de forjados. Ejemplo de su uso como forjados en edificios en altura es el edificio Mjøstårnet (edificio en madera más alto del mundo en la actualidad).



(Abrahamsen & AS,2017)



TFM- Ricardo de Miguel

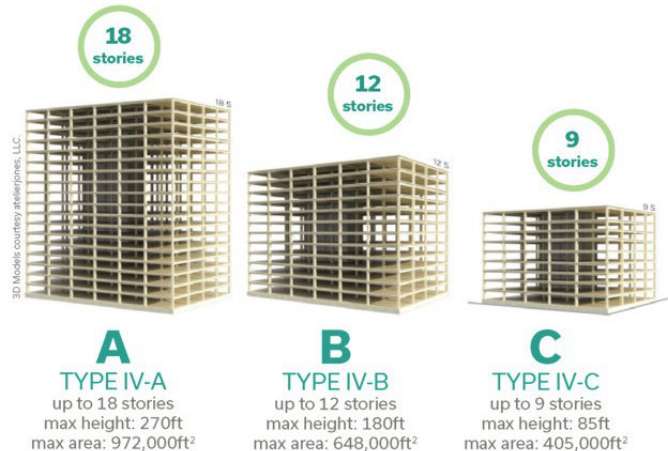
TUTOR- Rafa Zuza

## SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

### 2.2- Normativa en la edificación en altura

Hasta hace pocos años era muy restrictiva, pero con el cambio en la Normativa que afecta al el Código Internacional de Construcción (International Building Code - IBC), con entrada en vigor en 2021 se va a abrir la posibilidad de realizar un mayor número de edificios en altura en el futuro:

1. La normativa diferenciará entre tres tipos de construcción:
2. Edificios hasta 18 pisos, con elementos de madera protegidos con enlucido o placas de yeso (Tipo IV-A),
3. Edificios menor o igual a 12 pisos, con paredes y techos de madera expuesta (Tipo IV-B)
4. Edificios de máximo 9 pisos, resistente al fuego de 2 horas (Tipo IV-C).



©Think Wood

En España, el máximo condicionante lo impone el CTE y Eurocódigo 5, en el DBSI indicando condiciones de resistencia y estabilidad al fuego de acuerdo con el uso del edificio, así como de la altura de evacuación sobre rasante.

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

<sup>(1)</sup> La resistencia al fuego suficiente R de los elementos estructurales de un suelo que separa sectores de incendio es función del uso del sector inferior. Los elementos estructurales de suelos que no delimitan un sector de incendios, sino que están contenidos en él, deben tener al menos la resistencia al fuego suficiente R que se exija para el uso de dicho sector.

<sup>(2)</sup> En viviendas unifamiliares agrupadas o adosadas, los elementos que formen parte de la estructura común tendrán la resistencia al fuego exigible a edificios de uso Residencial Vivienda.

<sup>(3)</sup> R 180 si la altura de evacuación del edificio excede de 28 m.

<sup>(4)</sup> R 180 cuando se trate de aparcamientos robotizados.

### El CLT en la Normativa española:

El CLT es un material relativamente novedoso y hasta el año 2016 cada fabricante tenía su propio DITE o ETA (Documento de Idoneidad Técnica Europeo / European Technical Approval) que explica las características del producto y sus requisitos de fabricación y uso para la obtención del marcado CE.

Desde 2016 la norma UNE-EN 16351:2016 regula a nivel europeo la caracterización estructural del producto, los controles de producción y los requisitos para la obtención del marcado CE.





En cuanto al cálculo estructural, las estructuras de CLT deben cumplir las exigencias de seguridad estructural requeridas en el CTE (Código Técnico de la Edificación) que también se exigen a otros materiales estructurales como el acero, el hormigón o la fábrica.

Puesto que el CLT aún no ha sido incluido de forma específica en la normativa de cálculo de estructuras de madera, como puede ser el CTE DB SE-Madera, para el cálculo de la resistencia del material se utiliza el Método Gamma recogido en el Eurocódigo 5. (Las diez claves para dominar el diseño de edificios de clt. 2019).



Imagen 11. Fuente imágenes: CTE, Ministerio de Fomento, AITIM. | Autor montaje imágenes: María Sánchez Ontín (elaboración propia)

## 2.3- Evolución y actualidad de la EMA (Edificación de Madera en Altura)

La edificación en madera está experimentando un crecimiento vertiginoso en todo el mundo; después de haberse reducido su uso como material estructural prácticamente a pequeña edificación residencial, renace en la actualidad siendo alternativa al uso del acero y hormigón como material estructural en todo tipo de tipologías de edificación.

El desarrollo de nuevas tecnologías y materiales; la posibilidad de mecanización y prefabricación mediante su industrialización, el compromiso con el cambio climático, y el cambio normativo de ciertos códigos de la edificación, como el IBC (International Building Code), está posibilitando su desarrollo en proyectos en altura como alternativa al acero y hormigón.

Los siguientes datos nos dan una idea de su reciente desarrollo y rápida evolución de su uso en la edificación en altura:

Según el CTBUH (Council of Tall Buildings and Urban Habitat), en 2008 solo había un edificio en estructura de madera que sobrepasara las 8 plantas, y hasta 2018, excluyendo edificaciones históricas, se habían realizado en todo el mundo solamente 17 edificios de más de 7 plantas en madera, de los cuales solo unos pocos construidos entre 2009 y 2015 superaban las 10 plantas de altura.

En la actualidad, en todo el mundo se están realizando edificios en altura, siendo los siguientes los más altos y emblemáticos ya construidos:

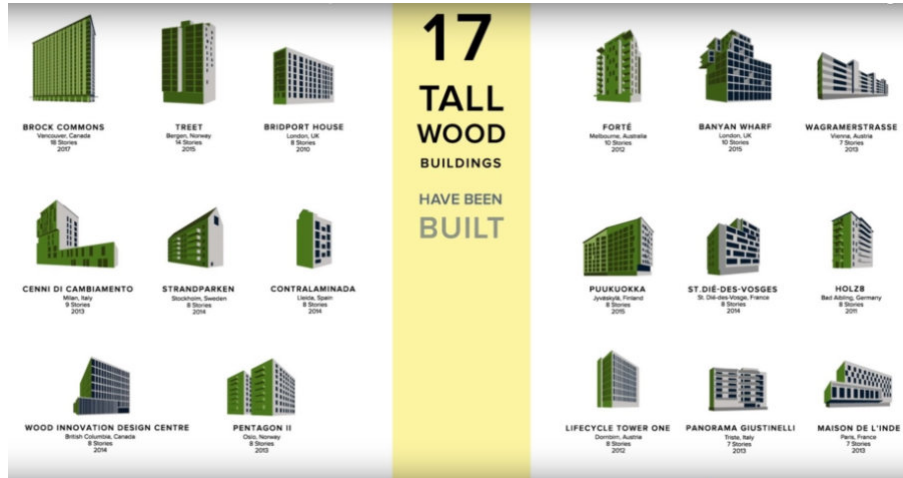




TFM- Ricardo de Miguel

TUTOR- Rafa Zuza

## SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS



### 2.4.- Breve repaso de los edificios de madera en altura más emblemáticos y descripción de su sistema constructivo

Breve descripción del sistema estructural empleado en los principales edificios en altura por orden cronológico en la evolución del sistema constructivo empleado.

#### Stadhaus, Londres, UK- 9 plantas - 2009

Se le considera el pionero en el uso del panel de CLT para la edificación en altura, pero se diseñó como si fuera a construirse en hormigón, realizándose en madera privándole de muchas de sus ventajas de diseño.

- Mjøstårnet** (Voll Arkitekter), , Norway- 18 plantas- 2019
- Brook Commons**- Vancouver, Canada- 18 plantas- 2017
- Treet**- Bergen, Norway- 14 plantas- 2015
- Banyan Wharf**- London, UK- 10 plantas- 2015
- The Cube**- London
- Dalston Lane**- london
- Forte**- Melbourne, Australia- 10 plantas, 32 mts- 2015

En cuanto a España, hasta 2018, el edificio más alto, realizado con estructura de madera ,era el edificio Contralaminada, construido en Lleida en 2014, de 6 plantas con núcleos y paredes de carga en CLT.



Imagen del video de youtube Top 5: The world Tallest Timber Buildings/ The BIM





## Forte- Melbourne, Australia- 10 plantas - 2012

Edificio de 32 mts de altura. Construido en solo 11 meses y completado en 2012, fue el primer rascacielos de Australia en madera y el edificio más alto en CLT cuando fue completado.

El arriostramiento y la transmisión de cargas se consigue a través de los paneles de CLT, los cuales conforman el núcleo de escaleras y trabajan como muros de carga.

## Banyan Wharf-The Cube (Howkins and Brown)- Londres, UK- 10 plantas, - 2015

Edificio de 33 mts de altura. Cuando se completó en 2015, fue también el edificio en madera más alto del mundo. Estructura híbrida en CLT y acero.

Núcleo de escaleras y muros de carga formados por paneles de CLT.



Imagen del video de youtube Top 5: The world Tallest Timber Buildings/ The BIM



Imagen del video de youtube Top 5: The world Tallest Timber Buildings/ The BIM





TFM- Ricardo de Miguel

TUTOR- Rafa Zuza

## SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

### Dalston Lane (Waugh Thistleton)- Londres, UK- 10 plantas, - 2015. Residencial

Edificio de 33 mts de altura. Estructura completamente en CLT salvo la PB y acabado final con cerramientos en ladrillo.

Arriostramiento y transmisión de cargas a través de los paneles de CLT.

### The Treet, Noruega-2015

Con este edificio por primera vez se alcanzan los 50 mts de altura, récord hasta la construcción del edificio Broock Commons, en Vancouver, 2 años más tarde.

Con plinto de hormigón, por primera vez se usa en altura el sistema estructural de tubo celosía con grandes diagonales en fachada. Se colocan dos forjados de hormigón en plantas superiores para incrementar peso y reducir el movimiento horizontal producido por el viento.

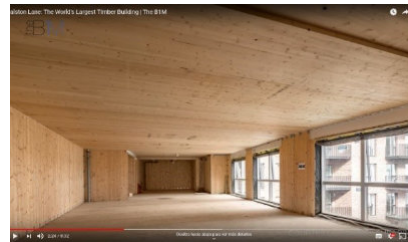
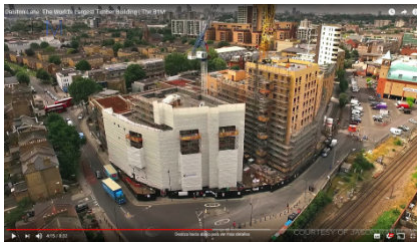


Imagen del video de youtube Dalston Lane: The World's Largest Timber Building | The B1M

[https://www.youtube.com/watch?v=YqGH1\\_tAjIU](https://www.youtube.com/watch?v=YqGH1_tAjIU)



# SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

TFM- Ricardo de Miguel



TUTOR- Rafa Zuza

## Brock Commons /Acton Ostry Architects & Hermann Kaufmann 2017, 18 plantas (57,9 mts de altura)

Fue el edificio construido en madera más alto hasta el Mjostarnet (Marzo 2019)

Planta baja y arriostramiento mediante doble núcleo de hormigón armado, con forjados en CLT y pilares en Madera Laminada, se incide en la industrialización y pre-fabricación de distintos elementos, como cerramientos y diseño de conectores de acero para transmitir las cargas verticalmente entre pilares, lo que supuso un incremento del ritmo de construcción a dos plantas por semana. Para cumplir los requerimientos de resistencia al fuego para dos horas, se revistió casi todo el edificio con paneles de yeso.

The TallWood House at Brock Commons / Acton Ostry Architects & Hermann Kaufmann Architekten. Image © Acton Ostry Architects & University of British Columbia

Imagen del video de youtube Top 5: The world Tallest Timber Buildings/ The BIM. Image © Pollux Chung /courtesy of Seagate Structures.



## Mjøstårnet (Voll Arkitekter) –Brumunddal, Norway, Marzo del 2019

Actualmente, en 2020, es el edificio más alto del mundo construido en madera con 85,4 mts de altura (© 2020 Council on Tall Buildings and Urban Habitat).

Consta de 18 plantas y su uso se distribuye en Hotel, oficinas y residencial.

Arriostramiento por grandes cruces diagonales de madera laminada que triangulan la estructura horizontal y verticalmente, dándole rigidez al conjunto.

El CLT actúa como elemento secundario, soportando las cargas del núcleo de escaleras y ascensor sin estar conectado a la estructura principal de madera laminada.

Los elementos de los forjados, realizados en Madera laminada y Paneles de Kerto-LVL (Laminated Veneered Lumber) ayudan a transmitir las cargas horizontales de viento a la estructura de madera laminada. Cálculo realizado con el software Robot (Abrahamsen & AS, 2017).



[https://www.youtube.com/watch?v=v3JqSsc8ZKk&list=PLr270UzXLTsENigzg7c4rlqekD\\_7cxBDJ&index=6&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=v3JqSsc8ZKk&list=PLr270UzXLTsENigzg7c4rlqekD_7cxBDJ&index=6&t=0s)

<https://www.youtube.com/watch?v=cd06dyjWWS4>





TFM- Ricardo de Miguel

TUTOR- Rafa Zuza

# SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

FUTURO:

Haut (Arup Ing.)- Amsterdam, Holanda- 21 plantas- Project

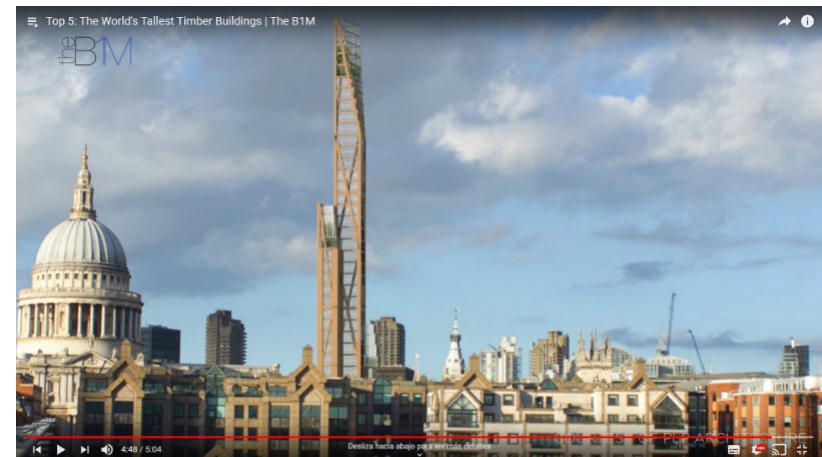


Ander Berensson Arch. Estocolmo, Suecia- 40 plantas- Project

Tree Tower (Panda Arq.), Toronto, Canadá (Arup dev.)- Amsterdam, Holanda-18 plantas- Project



London Barbicane Center (PLP Arq. And Cambridge University), Londres, UK 80 pisos, 300 mts altura- Project





## 2.5.-Estrategias estructurales de la edificación en altura en acero y hormigón y comparativa con la madera

Estructuralmente podemos considerar que un edificio en altura es aquel en que predominan los esfuerzos horizontales frente a los verticales. Los esfuerzos horizontales principalmente se calculan para las acciones, tanto de viento como de sismo.

A continuación, se exponen las principales estrategias estructurales consideradas en la edificación en altura con acero y hormigón, para compararlas con el desarrollo que ha seguido la construcción en altura de madera, con la adaptación de dichos sistemas o mediante la realización de sistemas mixtos de madera con acero u hormigón.

La diferencia en las estrategias seguidas con las estructuras en madera se deben principalmente a sus particularidades con respecto a los materiales tradicionales:

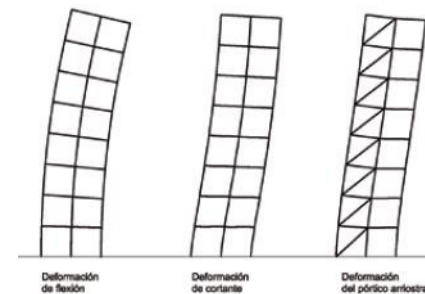
- Su anisotropía o diferente forma de trabajar de acuerdo con la orientación de su fibra. En la madera hay que procurar que los esfuerzos trabajen en la dirección adecuada.
- Las uniones de los elementos estructurales. No se pueden realizar empotramientos perfectos con este material, considerándose las uniones y apoyos generalmente como articulaciones. Siendo muy difícil su diseño ante determinados esfuerzos como la tracción.
- Comportamiento higrotérmico, a tener en cuenta tanto en las uniones, ya que una merma o dilatación puede cambiar su forma de trabajo, como en su diseño y protección frente a agentes exteriores.
- Comportamiento frente al fuego. En casi todas las normativas, este tipo de edificación exige resistencia al fuego 120 en los elementos estructurales y que no exista posibilidad de transmisión de llamas. En algunos casos, justificadamente se puede resolver mediante una sección adecuada a la velocidad de carbonización, pero en muchos casos habrá que proteger o tratar la madera frente a la acción del fuego.

### 1.- Sistema de pórticos:

Basado en la rigidez de unión de los nudos en vigas o pilares. Predominan esfuerzos de flexión, por lo que son estructuras dúctiles, pero con capacidad resistente limitada y con una deformabilidad excesiva. A partir de cierta altura hay que disponer de elementos de arriostramiento frente a acciones horizontales. Esta tipología sólo es razonable aplicarla para edificios de menos de 25 plantas, aunque se ha usado en edificios como el Empire State (102 plantas) (Miguel Ángel Astiz Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. E.T.S. Ingenieros de Caminos, & Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, ).

Es el caso del llamado Post and Beams, pilares en vigas de madera. La madera, por sus características particulares, debe triangularse en todos sus planos para evitar su deformabilidad, ya sea con tirantes, tornapuntas o mediante el macizado de los marcos que impidan la deformación.

Este sistema es el históricamente usado en entramados ligeros y pesados, mediante el sistema Ballon Frame, que realiza los pilares continuos con los forjados apoyados en ellos, limitándose su altura a la longitud máxima de la madera o su evolución en el sistema Platform Frame, por el que las viguetas del forjado van apoyándose en los montantes inferiores, sistema que se ha impuesto debido a su facilidad de ejecución y menor esbeltez de los tabiques.



(Miguel Ángel Astiz Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. E.T.S. Ingenieros de Caminos, & Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, )



### 2.- Pantallas o muros de cortante:

Es una evolución del sistema de arriostramiento para rigidizar pórticos, mediante el cual, se rellena o maciza el marco ocupado por el arriostramiento, obteniendo el concepto de pantalla o muro de cortante. Se proyectan dichas pantallas en varias direcciones para absorber acciones laterales y esfuerzos torsores. Su esquema y dominio de aplicación es semejante a los pórticos arriostrados. Se considera demasiado rígido y con falta de ductilidad respecto a acciones sísmicas (es paliado con el uso de amortiguadores), por lo que en general se usa hasta las 35 plantas, aunque se ha usado en edificios de gran altura como las Torres Petronas.

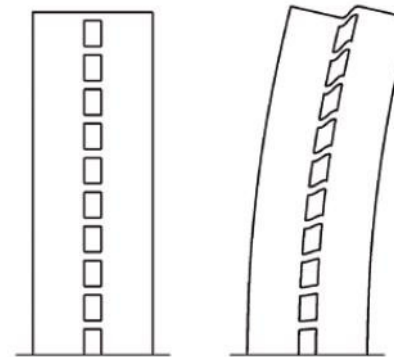
En la construcción tradicional de madera es el sistema usado en edificios en altura antes de la aparición del acero y hormigón como sistema estructural. Apoyándose en paredes portantes de piedra o ladrillo, o macizando los marcos de las triangulaciones se alcanzaban las seis, incluso ocho plantas sin problema, como se puede ver en los cascos históricos de muchas ciudades.

Es el tipo de sistema usado en el caso del CLT, en el cual el propio panel realiza la función de arriostramiento horizontal y vertical, tanto en su uso en forjados como en muros..

La combinación de este sistema con el anterior es el usado en estructuras mixtas de hormigón madera en edificios como el Brock Commons de Vancouver, por el que se realiza un núcleo de hormigón para absorber los esfuerzos horizontales, dejando al sistema de pórticos la transmisión de esfuerzos verticales.

### 3.- Sistema de pantallas acopladas:

En caso de mayor altura, habría que aumentar el canto de las pantallas, con consiguiente pérdida de funcionalidad de la planta, por lo que se abren huecos en las pantallas uniéndolas en cada planta mediante forjados o vigas en común, comportándose como una viga de gran canto pero con flexibilidad a cortante gracias a la posibilidad de flexión de los elementos entre pantallas. Al combinarse con los pórticos se suman las cualidades de los dos tipos anteriores, transmitiendo a los pórticos los esfuerzos verticales y a las pantallas los horizontales. Con este sistema se pueden superar las 50 plantas.

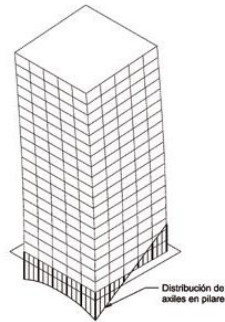


(Miguel Ángel Astiz Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. E.T.S. Ingenieros de Caminos, & Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid,)



## 4.- Estructuras tubulares:

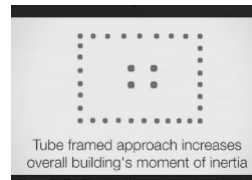
Abarca las estructuras tipo tubo, y tubo en tubo, tubo múltiple y tubo arriostrado. Responde de forma natural al concepto del edificio como ménsula sometida a las acciones horizontales, dando lugar a las secciones de pared delgada óptimas para resistir flexión en construcción metálica, con eficacia frente a torsión, al desplazar las columnas a la fachada incrementa el Momento de inercia del edificio. Introducido por Fazlur Khan, la mayor parte de edificios de más de 50 plantas deben utilizar este esquema u otro similar.



Se concentran los esfuerzos de flexión en las columnas de esquina, y su importancia depende de la geometría del conjunto y de la rigidez de las vigas horizontales

## 5.- Tubo en tubo:

Es una variante del sistema anterior: Se dispone de un núcleo de servicios en el centro y un anillo exterior al haberse desplazado las columnas a fachada con la función indicada anteriormente. El efecto del cortante es mayor conforme aumenta la altura del edificio. Para remediarlo se usan pantallas intermedias que reparten los esfuerzos de flexión: solución de tubo múltiple



## 6.- Tubo arriostrado:

Alternativa al tubo porticado, se rigidiza cada plano exterior mediante elementos diagonales que convierten esos planos en celosías, reduciendo esfuerzos de flexión pudiéndose reducir el canto de las vigas horizontales, aunque los elementos diagonales interfieren en el diseño de la fachada. Edificio John Hancock de Chicago de 344 mts.

Es el sistema utilizado en el edificio más alto del mundo, el Mjostarten de Noruega, realizado íntegramente en madera mediante este sistema

## 7.- Celosías espaciales:

Necesitan de unas columnas de gran sección en vértices y sistemas de montantes y diagonales, pero diseño difícil en los nudos por la magnitud de las fuerzas, a diferencia del anterior hay pocas columnas principales que se limitan a ser los cordones de la celosía

En el caso de la madera es el sistema usado por varios de los edificios en fase de proyecto, o desarrollos teóricos, como el proyecto River Beech W350 (Tokio) de 350 mts de altura .

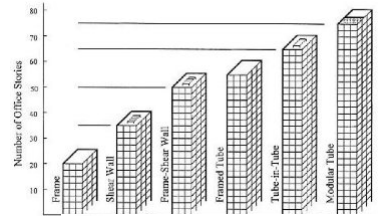
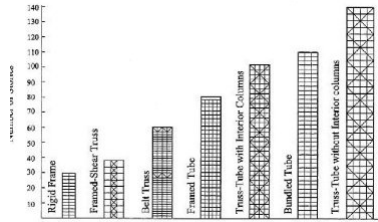
En resumen, según número de plantas la estrategia estructural ha sido la siguiente:



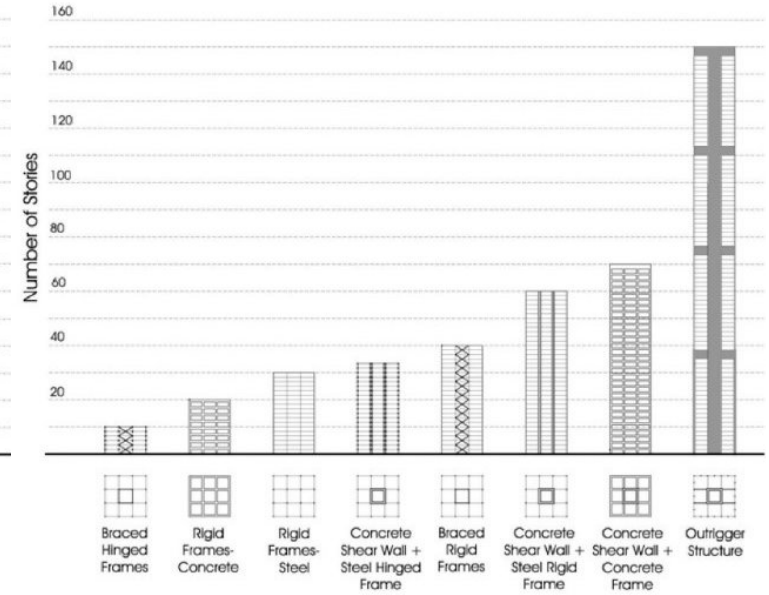
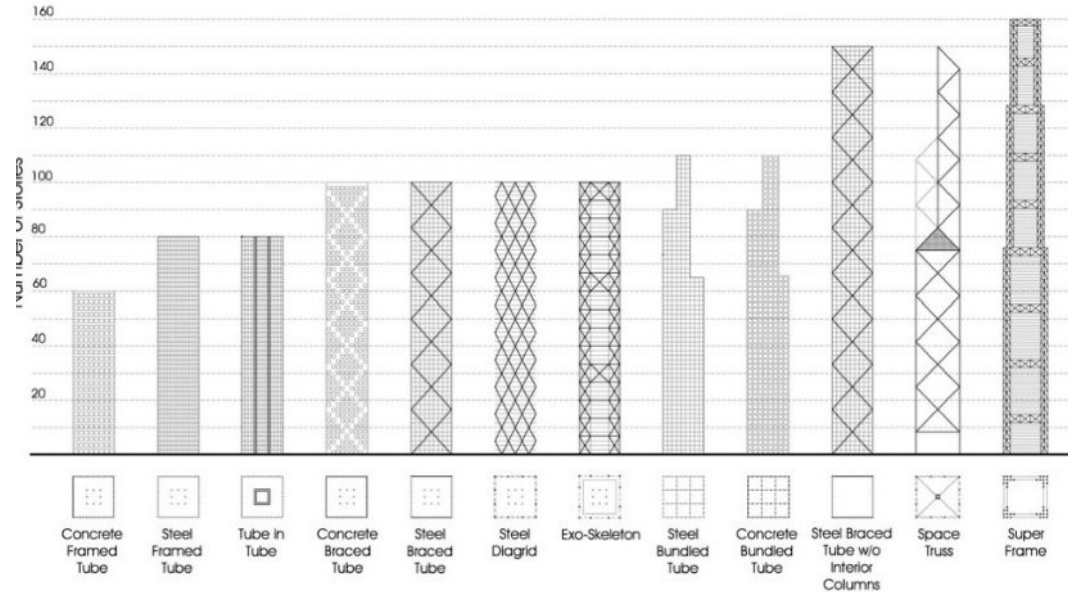


TUTOR- Rafa Zuza

# SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS



“Consideración de las acciones de viento en la arquitectura, implicaciones del diseño desde el elemento estructural hasta el entorno urbano” Dr. Iñigo Calderón Urízar-Aldaca, Ph.D.







## 2.6- Estrategias estructurales en la edificación en altura de madera

Según el CTB, se considera que un edificio tiene estructura de madera, cuando los elementos principales estructurales, tanto vertical como lateralmente, así como los elementos estructurales de forjados están contruidos con madera. En todos los edificios de estructura de madera se puede incluir el uso puntual de elementos de otro material distinto a la madera para la conexión entre elementos de madera. Edificios de madera con un sistema de forjado de planchas de hormigón o el uso de losas de hormigón sobre vigas de madera se considera también una estructura de madera ya que el hormigón no está trabajando como estructura primaria (Ctuh height criteria).

Analizando las estructuras utilizadas en los edificios de madera en altura, se pueden indicar básicamente tres esquemas estructurales diferentes:



Estructural celosía tipo tubo:  
Mjøstårnet



Estructura en CLT

### 1.- Sistema mixto:

Se basa en uno o varios núcleos de hormigón para la transmisión de los esfuerzos horizontales, realizándose el resto de la estructura con sistema de pórticos de madera laminada o CLT y forjados de CLT o LVL. Ejemplo del edificio Brock Commons, no se puede considerar que sean edificios realizados 100% en madera

### 2.- Sistema en celosía tipo tubo:

Arriostamiento del edificio mediante elementos diagonales realizados en madera laminada, siguiendo el esquema tubo, se comporta como una celosía capaz de transmitir los esfuerzos horizontales. Implica mayores dimensiones de las secciones de madera pero evita tener que disponer de un sistema mixto, aunque en algún caso se deben disponer de forjados de hormigón en las plantas superiores para limitar las oscilaciones debidas al viento. Es el sistema con el que se han alcanzado las mayores alturas en construcción en madera hasta la fecha, siendo el sistema empleado en los edificios Treet y Mjostarten, ambos en Noruega.

3.- Panel CLT para la realización de muros portantes (Shear Wall) y forjados, usándose el mismo panel como arriostamiento de esfuerzos horizontales y la transmisión de los verticales.

Siguen el sistema Platform Frame, tiene el inconveniente de limitar enormemente el diseño de las plantas e imposibilitar su versatilidad. Se ha usado en edificios como máximo de 12 pisos, pudiendo alcanzarse como máximo los 15 según la relación con el peso estructural y su posible aplastamiento. Sistema empleado en los edificios pioneros de madera en altura: Stadhouse, Forte, The Cube.

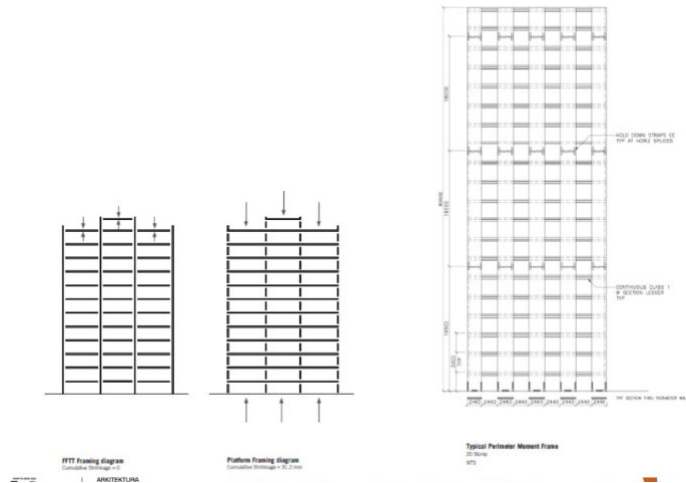


## 2.7- Trabajos de investigación de sistemas estructurales en altura: Sistema FTTT de Michael Green (Green & Taggart, 2020)

Entre los trabajos de investigación realizados sobre las posibilidades y sistemas estructurales para la construcción en altura, uno de los más interesantes es el realizado por el arquitecto Michael Green, en su trabajo *The Case for Tall Building*, estudia la evolución de los edificios en altura teniendo en consideración las limitaciones de los sistemas utilizados hasta la fecha y propone varias esquemas estructurales para edificios de 20 y 30 plantas realizados mediante el sistema denominado FTTT.

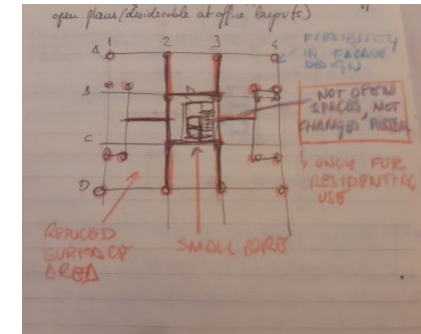
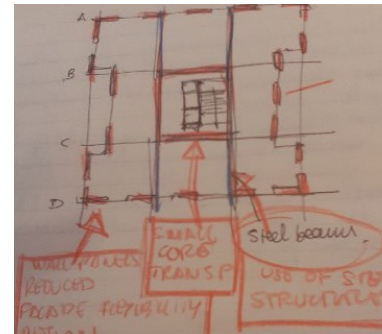
En su trabajo deduce que en un edificio de 12 plantas se produce un aplastamiento de 31,2 mm debido a la compresión perpendicular a la fibra, proponiendo varias configuraciones diferentes para la transmisión de cargas verticales e indicando que se debe realizar un núcleo rígido con un sistema ductil en fachada, con uso de perfiles de acero en la misma.

Ejemplos de estrategias. FTTT Michael Green.



El sistema propuesto por Michael Green fue pionero en aprovechar las ventajas de cada tipo de tecnología de madera aplicada a la edificación en altura, pero de cara a su aplicación en los edificios en altura creo presenta las siguientes limitaciones:

- La planta propuesta es de superficie pequeña (25x22 mts) con un núcleo muy reducido de comunicaciones (tan solo dos elevadores para 20 plantas).
- Los paneles de fachada y las pantallas interiores limitan mucho el diseño exterior del edificio, así como su uso.





## 3.- ESTADO DEL ARTE

### 3.1- Propuesta de un sistema estructural basado en secciones huecas de paneles de madera CLT

La evolución de la edificación en altura debe dar lugar a nuevas formas estructurales. En la actualidad el incremento en altura de los edificios, y por tanto de los esfuerzos a soportar se está solucionando mediante sistemas mixtos madera-hormigón o mediante el uso de vigas laminadas de grandes dimensiones (1485x625 mm) cuando el sistema estructural se compone solamente de madera (edificio Mjostaten, Noruega).



Corner column size:

1485 mm x 625 mm

Typical internal columns:

725 mm x 810 mm  
625 mm x 625 mm



Corner columns:

Max compressi  
11500 kN

Max tensi  
5500 kN

La propuesta del presente trabajo es una nueva estrategia estructural basada en la sustitución de elementos estructurales de gran escuadría (vigas, pilares, arriostramientos) usados en la edificación en altura: por secciones huecas realizadas en panel de madera (box-beams)

Al igual que el acero evolucionó hacia estructuras tubulares para aumentar el momento de inercia, ahorrando en el consumo de material material, el objetivo es realizar el estudio del comportamiento de las secciones huecas en panel de madera, analizando su capacidad estructural en edificios de madera en altura.

Como los árboles usan las fibras verticales para resistir las acciones mecánicas y llevar su alimento a las distintas partes de la planta, se podría aprovechar la forma hueca de dichas secciones para el paso de instalaciones y comunicaciones entre las diferentes partes del edificio.

El presente trabajo buscará encontrar las formas más adecuadas para dichos elementos obteniendo en consideración investigaciones publicadas así como proyectos realizados con el uso del CLT como vigas cajón.

El desarrollo de la investigación se realizará a través de los siguientes puntos:

A) Investigaciones realizadas en el campo del CLT y búsqueda de proyectos similares realizados.

B) Propuesta de una forma estándar para pilares y vigas cajón como base de partida del análisis, posibles conectores para transmisión de esfuerzos.

C) Aplicación en dimensiones de planta estándar de un edificio en altura realizado con otro material.

D) Cálculo de la capacidad estructural mediante la modelización de dicho edificio.

E) Otras ventajas: libertad de diseño en fachadas del edificio, Brise Soleil, posibilidad de uso de los elementos huecos para el paso de instalaciones del edificio.



### 3.2- Antecedentes en el estudio de las vigas cajón: Trabajos de investigación publicados.

#### 3.2.1 Trabajo de Yue Chen, A.M. ASCE, Frank Lam, M.ASCE publicado en 2013, Bending Performance of Box-Based Cross-Laminated Timber Systems. (Chen & Lam, 2013)

Se realizan ensayos con paneles laminados con sus fibras en distintas orientaciones, así como forjados tipo vigas cajón realizados con dichos paneles:

Concluyen que para ciertos esfuerzos, la orientación de las fibras del tablero de CLT a 45°, mejoraban notablemente sus capacidades mecánicas, con una relación EI mayor al 72% con respecto a otros paneles:

Así como en su utilización en cajones, con una resistencia a la flexión y cortante muy superior a otros sistemas, e indicando que se debería desarrollar su uso comercial.

Table 5. Tested and Predicted Apparent and True EI Values of Plates with Different Layups

Configuration	True EI (kN·m <sup>2</sup> )			Apparent EI (kN·m <sup>2</sup> )		
	Tested	Predicted	Error (%)	Tested	Predicted	Error (%)
Cross-laminated plates	191	193	0.99	196	189	-3.51
Parallel laminated plates	199	210	5.53	208	209	0.75
Cross-laminated plates with OSB facing	88	91	2.67	93	93	0.34
45° laminated plates	362	362	0.25	370	350	-5.30

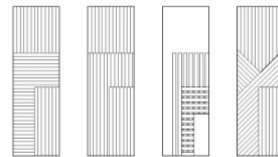


Fig. 1. Different plate layups: three-layer cross-laminated plate, three-layer parallel laminated plate, cross-laminated plate with OSB facing, and four-layer 45° laminated plate

Configuration	EI obtained between midspan and points A, B, C, D (kN·m <sup>2</sup> )			EI obtained between midspan and support (kN·m <sup>2</sup> )		
	Tested	Predicted	Error (%)	Tested	Predicted	Error (%)
Boxes consisting of cross-laminated plates	1,387	1,342	-3.26	1,389	1,301	-6.32
Boxes consisting of parallel laminated plates	1,520	1,437	-5.47	1,399	1,416	1.23
Boxes consisting of cross-laminated plates with OSB facing	1,130	1,197	5.89	1,118	1,164	4.86
Boxes consisting of 45° laminated plates	2,162	2,280	5.45	2,096	2,210	5.42

© ASCE

04013006-11

J. Struct. Eng.



Fig. 8. Box system consisting of 45° laminated

No existen comercialmente este tipo de placas en CLT, pero se podría realizar el corte a 45° mediante control numérico de placas comerciales y encolado posterior, pero tendría un gran sobrecoste.

Finalmente no uso este trabajo en el TFM, por su no disponibilidad comercial y difícil modelizado en dIubal, pero su uso en los núcleos de arriostramiento de los ascensores ahorraría sección en la madera.

#### 3.2.2 Trabajo de Xiaofeng Suna, Minjuan Hea, Zheng Lia,\*, Frank Lam: Seismic Performance assessment of conventional CLT shear wall structures and post-tensioned CLT shear wall structures (Sun, He, Li, & Lam, 2019)

En dicho trabajo se demuestra las ventajas de post-tensionar paneles de madera cada 2 plantas como ventaja en comportamiento de madera en edificios altos (a partir de 8 plantas) ante el seísmo.

Creo que su ejecución es fácil de acuerdo con las ventajas de seguridad estructural que pueden presentar para centrar las cargas en el núcleo del edificio.

Se podría estudiar su aplicación a los paneles de madera del núcleo de arriostramiento, aunque finalmente no uso este trabajo en el cálculo estructural del TFM, pero creo que en la construcción de un edificio en altura, aportarían muchas ventajas el añadir elementos de estas características en zonas sísmicas, sobre todo.



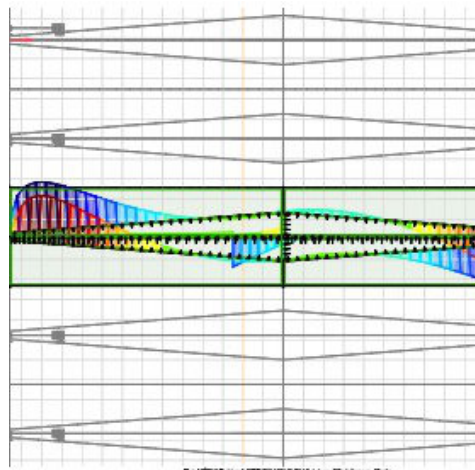


## 3.3- Antecedentes en el estudio de las vigas cajón: Obras realizadas

### 3.3.1 Cubierta piscina de Salamanca, Miguel Nevado

Realización de la cubierta de las piscinas de Salamanca mediante el uso de vigas de CLT de 27 mts de longitud unidas por tirafondos.

Este proyecto es el que me dio la idea del posible uso del CLT para formar vigas y pilares en edificios en altura. Software de cálculo: Axis (Miguel Nevado).





TFM- Ricardo de Miguel

TUTOR- Rafa Zuza

## SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

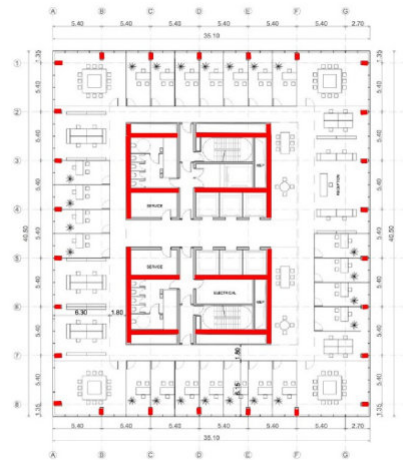
### 4.- DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 4.1 Propuesta de un edificio en base a una planta tipo de partida

Como base de partida del análisis y para analizar las soluciones en una estructura, se propone una planta estándar en un edificio en altura de más de 20 plantas, para ver como se pueden disponer los pilares/ vigas cajón y cada cuantas plantas se pueden realizar uniones y conexiones.

Se propone la planta del edificio de BIG proyectado en Frankfurt como punto de partida para probar los elementos propuestos, adaptándola a la construcción en madera.

EDIFICIO METZ FRANKFURT 185  
Autores: BIG (Bjarke Ingels Group)



#### 4.2 Uso de pilares y vigas cajón cajón en CLT como elemento rigidizador del núcleo y estructura: Adaptación de la estructura a la planta y búsqueda de la sección de CLT

Originalmente se opta por el uso de un panel de CLT estándar de 2,95 mts de anchura por 16 mts de longitud para la búsqueda de la dimensión y forma más adecuada de los elementos estructurales, para lo que se estudian diferentes opciones, posteriormente se verá que por transporte la dimensión máxima de un panel de CLT no debe ser de 13,50 mts.

- Diseños preliminares

Se opta por un CLT 160 5s, con dos tipos de secciones: 1070x720 en los pilares y vigas del anillo de compresión externo y 720x720 internamente en pilares y vigas, siendo en este caso una U para el paso de instalaciones, cerrándose en su parte superior por el propio forjado de CLT, permitiendo de esta forma la posibilidad de algún tipo de registro a instalaciones que pasen por su hueco.

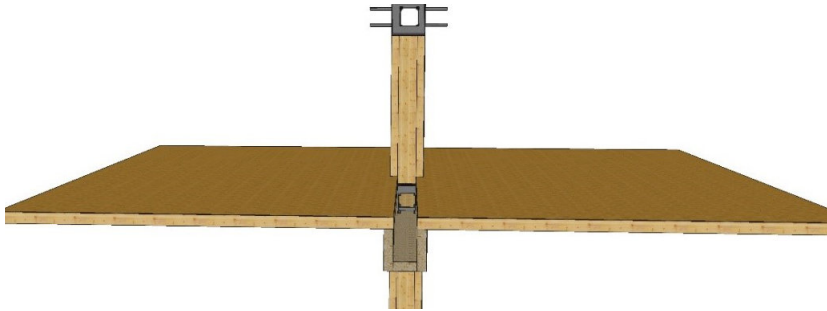
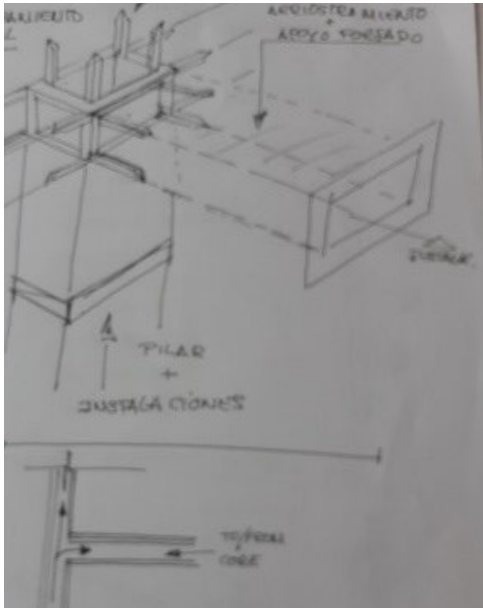
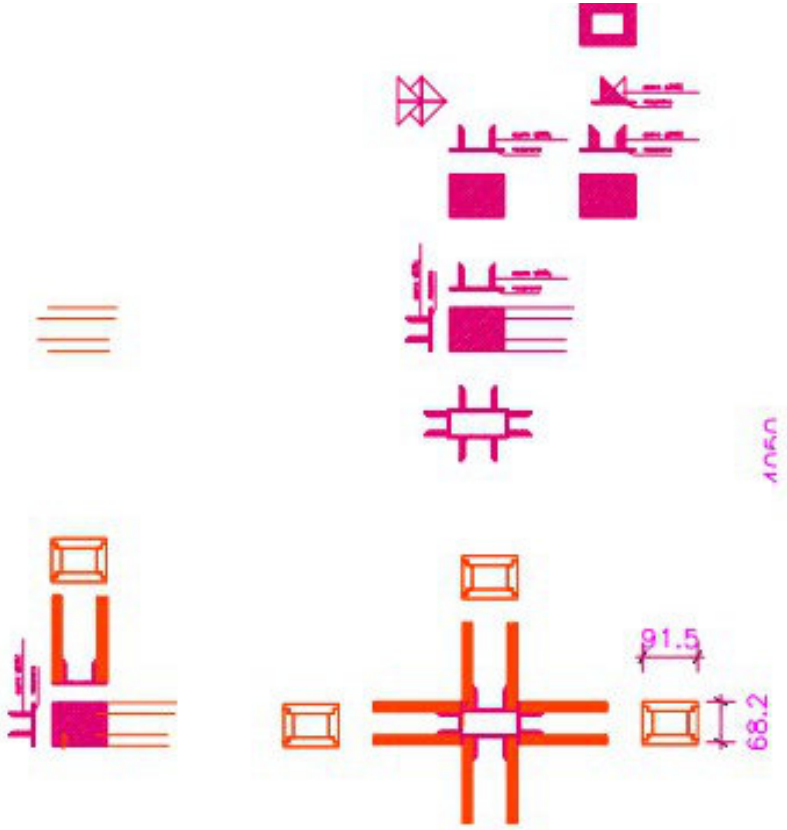
Asimismo se van diseñando los conectores para la unión de los elementos estructurales; mediante una serie de elementos de unión con patillas, que permitan un fácil montaje a pie de obra y su posterior elevación para pre industrializar el montaje lo máximo posible. Deberán asumir la transmisión de cargas verticales a la cimentación, Los paneles a su vez se unirán mediante tirafondos de diámetro 10 L200 a 45° de la fibra.

Se diseña originalmente el forjado como cierre de las vigas en su parte superior para acceso a instalaciones. Durante el cálculo se comprueba que la deformación de los forjados produciría una torsión grande en las vigas, por lo que es mejor realizar accesos puntuales según tensión soportada.





BOX BEAM 92X64 Y BUSQUEDA CONECTORES

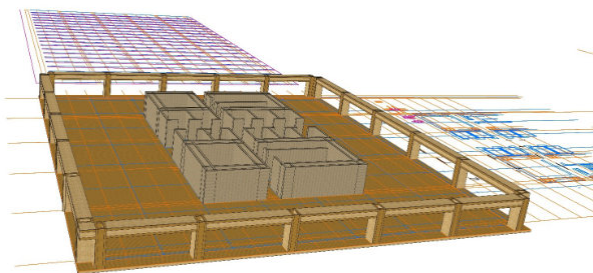




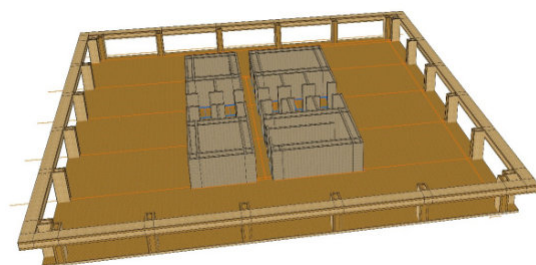


### 4.3 Modelización de la estructura: Dibujo del edificio en Cadwork

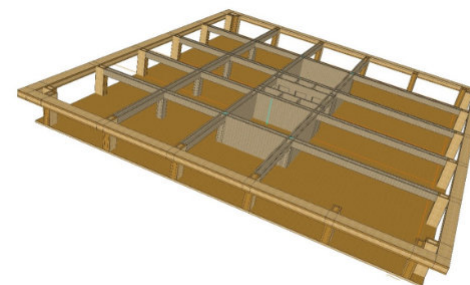
Estudio de diversas opciones estructurales para el diseño de los elementos



Opcion 1: Anillo a eje de pilares



Opcion 2: Anillo exterior a exterior del eje de pilares con núcleo grande

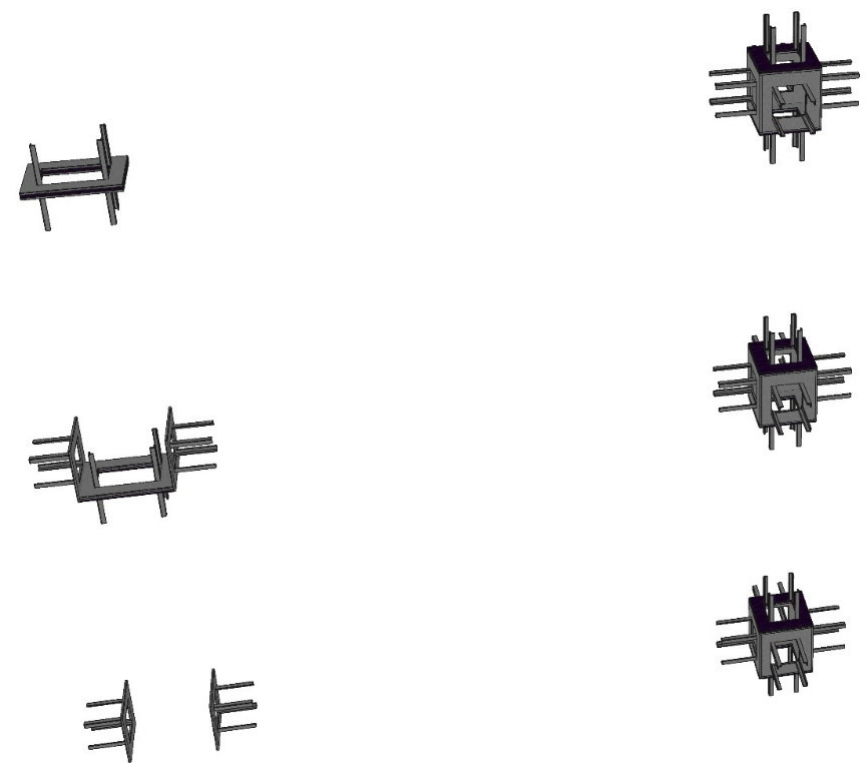
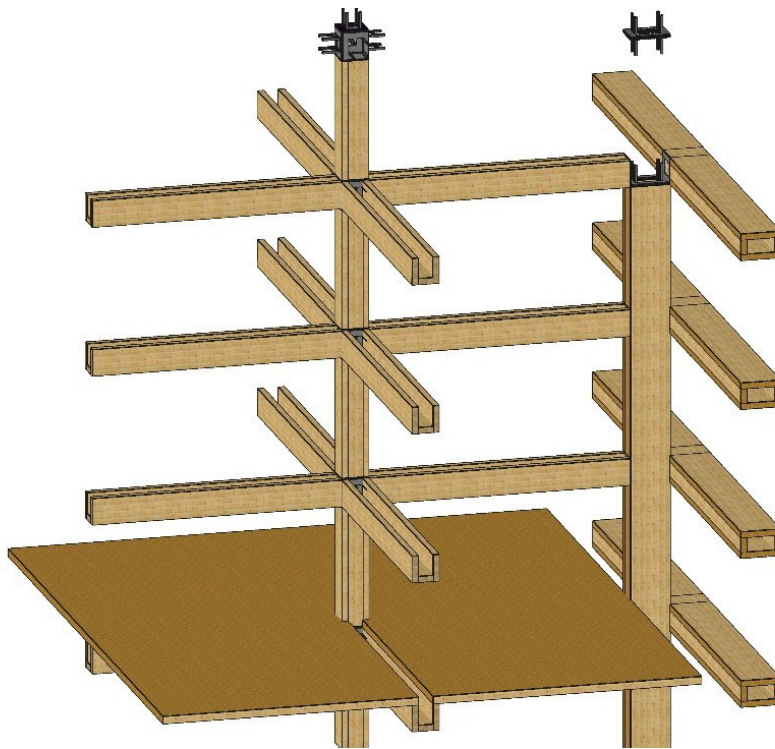


Opcion 3: Anillo exterior a exterior del eje de pilares con adaptación del núcleo al programa:



Esquema del sistema estructural, en pilares se intenta aprovechar la longitud de la placa uniendo pilares cada 3 plantas:

Estudio de los conectores entre diversos elementos de la estructura:



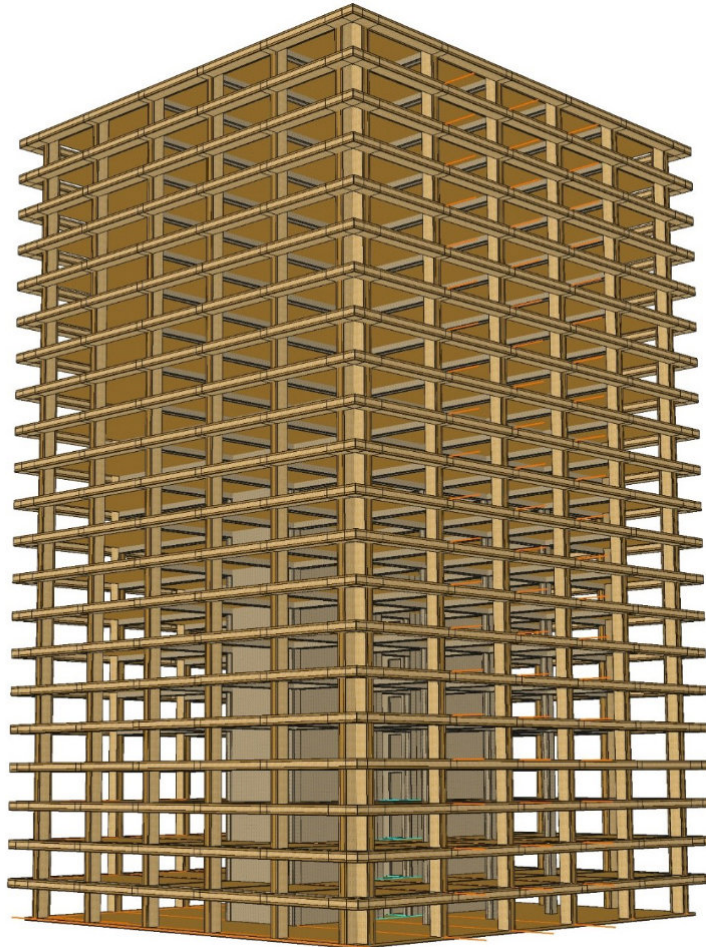


TFM- Ricardo de Miguel

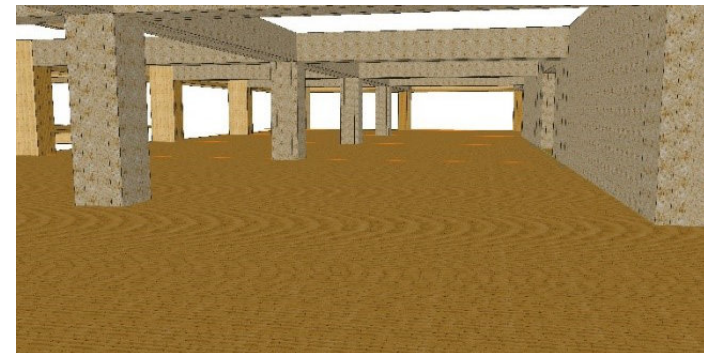
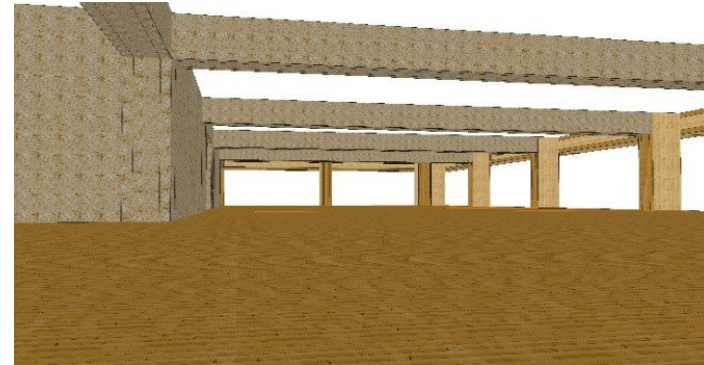
TUTOR- Rafa Zuza

## SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

### Propuesta inicial de la estructura del edificio completo en Cadwork



Se realiza en Dlubal un análisis de la posibilidad del doble vano, ya que permite una mayor libertad en el diseño de la planta, y según cálculo se puede realizar esa viga en doble vano con una sección de 900x720 mm (incluido el forjado) con paneles tipo Lss5-220



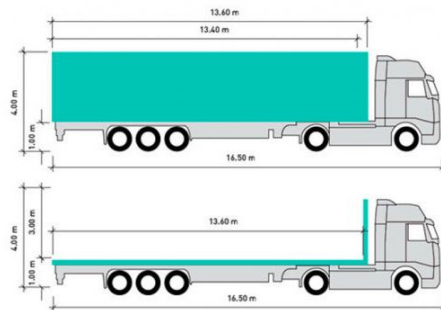




En el transcurso de los cálculos, compruebo que el límite de longitud para evitar un transporte especial en el panel son 13,5 mts de longitud y 2,50 de anchura, por lo que rediseño y modelizo el edificio en Cadwork teniendo en cuenta dichas dimensiones tanto en las placas del forjado, aprovechando las placas al máximo, como en las vigas y pilares. (Las diez claves para dominar el diseño de edificios de clt. 2019)

- **Modelización final en Cadwork del edificio:**

VEHÍCULO DE LONAS ESTÁNDAR / REMOLQUE ESTÁNDAR



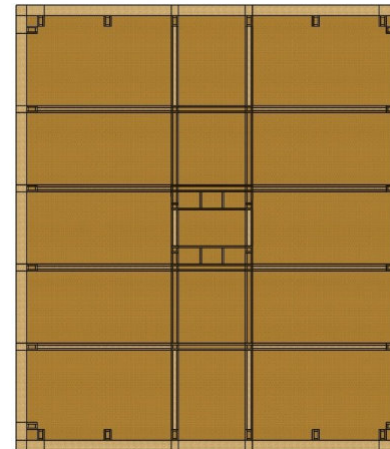
SUMINISTRO EN VERTICAL



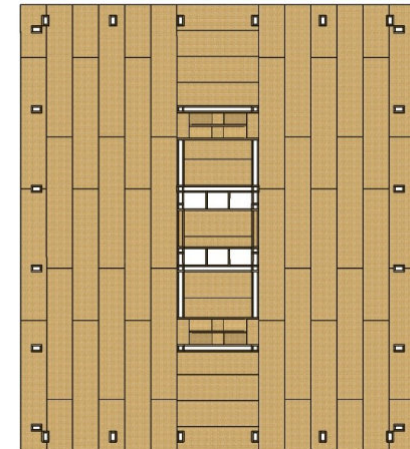
SUMINISTRO EN HORIZONTAL



(Las diez claves para dominar el diseño de edificios de clt. 2019)



Planta tipo con viga de doble vano



Forjado con placas de CLT de 13,5 x 2,65 mts

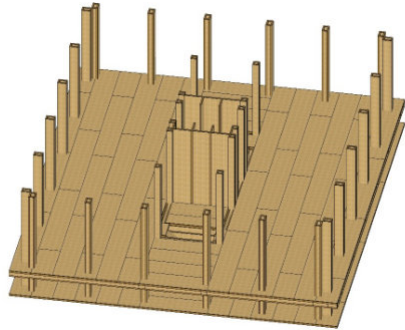


TFM- Ricardo de Miguel

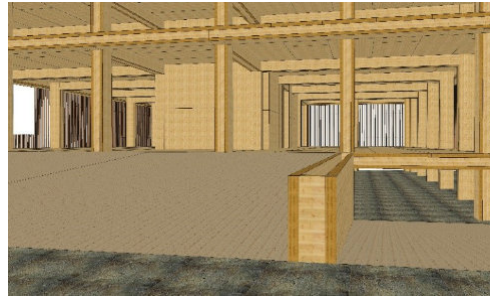
TUTOR- Rafa Zuza

## SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

Sistema de montaje, pilares de 13,2 mts cada 3 plantas:

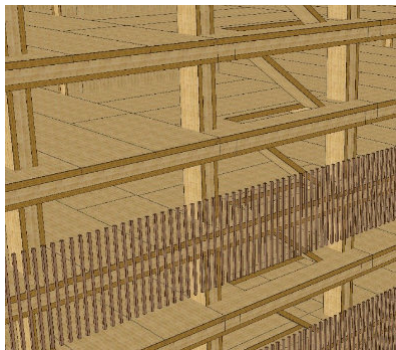


Vista del acceso al peatonal y al aparcamiento de bicicletas:

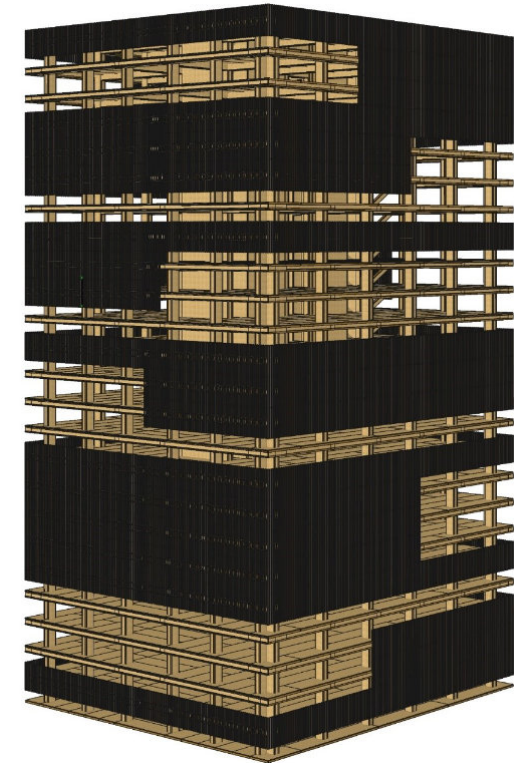
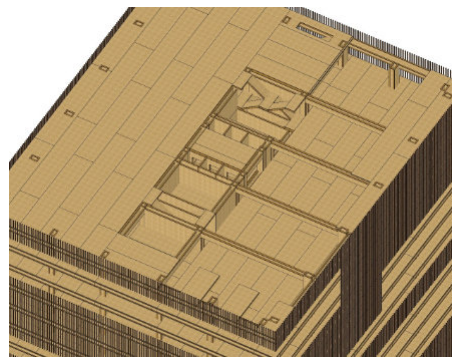


Ejemplo diseño en fachada, para resaltar la libertad compositiva que permite este sistema. La estructura está calculada para clase de servicio 1, pero el nivel de tensión de las vigas de atado exteriores, a menos del 20% posiblemente permita su uso en clase dos:

Otro ejemplo de las posibilidades de este tipo de estructura es la posibilidad de realizar un área exterior, incluso creando escaleras de emergencia si fueran necesarias en alguna normativa realizando un cerramiento alineado con la parte interna de los pilares y realizando un deambulatorio en el exterior:



Vista de planta con visión de escaleras y vigas:





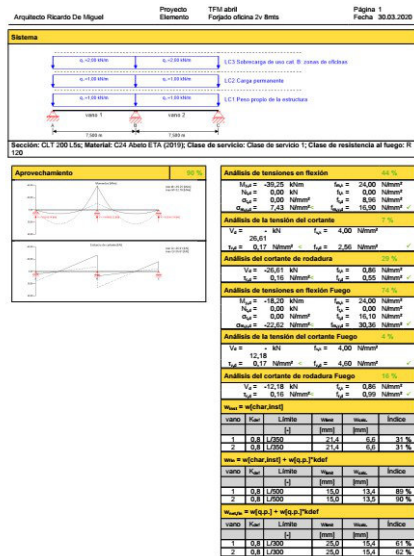
## 4.4 Cálculos preliminares

### 4.4.1 Cálculo del forjado mediante el software Calculatis

Se intenta aprovechar al máximo la placa estándar, por lo que siendo esta originalmente de 16 mts, se situaron los apoyos a 8mts entre ejes de vano, dando lugar a una luz libre de 7, 5 mts. (posteriormente se modificaron las dimensiones de las placas a 13,5 mts, situándose en el otro sentido, por lo que el cálculo va en favor de la seguridad).

Como base de cálculo se considera como edificio de categoría B, con carga permanente de 1,25 KN/m<sup>2</sup> más peso propio y sobrecarga de uso de 2 kn/m<sup>2</sup>.

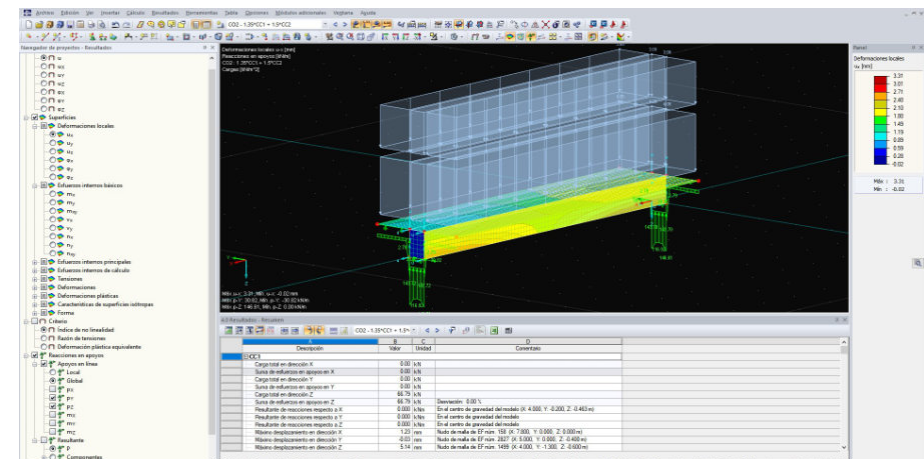
Mediante el programa Calculatis se calcula el elemento de CLT necesario dando lugar a un CLT de 200 mm de espesor de 5 capas: 40-40-40-40-40, cumpliendo asimismo 120 min a fuego (Anexo 1).



### 4.4.2 Cálculo de vigas de CLT de sección hueca de 13,5 mts de vano en Dlubal

Se modela en el módulo RF-Laminate de Dlubal la viga doble vano de 13500 mm formada por paneles contralaminados y se realiza cálculo de comprobación.

La viga de 720x720 formada por paneles de contralaminado de 7 capas y espesor 220 mm (L7ss-220) cumple en tensión y deformaciones (Anexo 2)













TFM- Ricardo de Miguel

TUTOR- Rafa Zuza

# SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

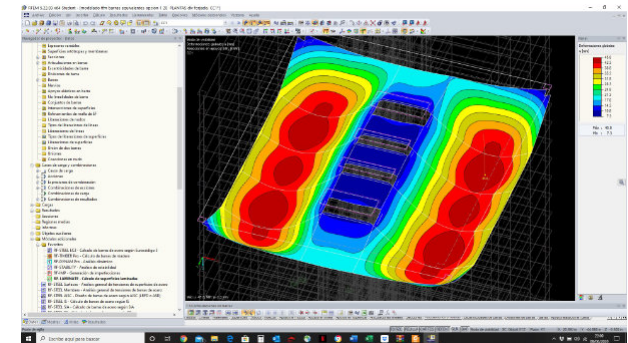
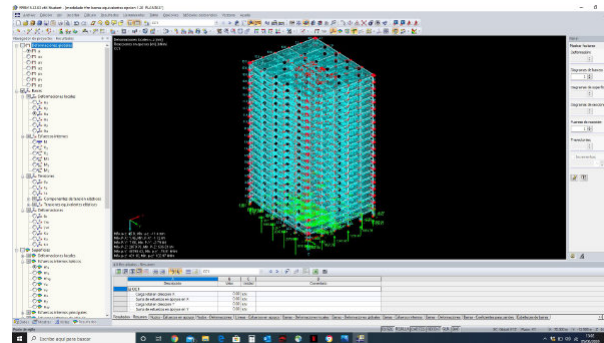
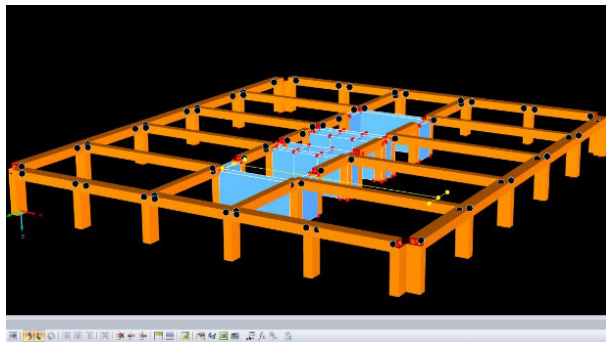
B) Primeros modelizados en Dlubal:

C) Cálculos preliminares en Dlubal:

Se comienza analizando el edificio en Peso Propio para ver como se comporta el edificio y por donde se están distribuyendo las cargas.

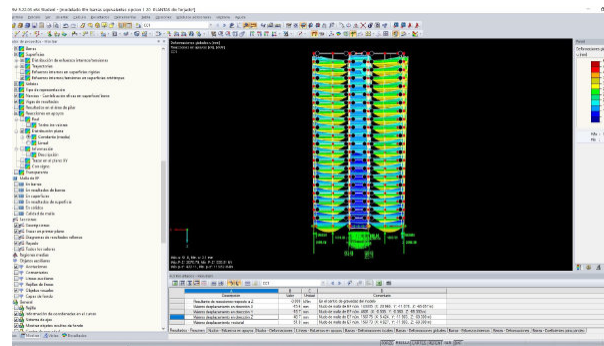
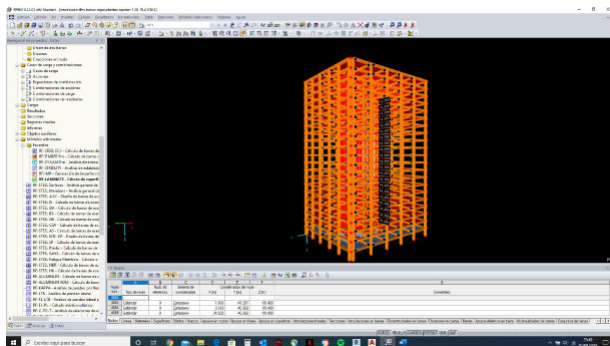
E) Se remodela el edificio planta por planta y con pórticos intermedios tras la última corrección y atribuyo los malos resultados a singularidades por huecos, barras dobles y fallos en modelizado. El edificio ocupa y 950 Mb y falla el procesador.

Modelizado 1 planta

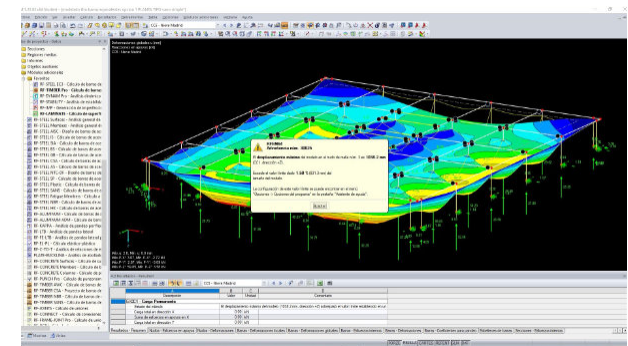


D) En cuanto se introducen las cargas del edificio el programa es incapaz de procesar la información, y se obtienen resultados con grandes disparidades.

Levantamiento 20 plantas



Modelado de una planta partiendo el vano de gran luz en dos





## 4.5 Modelado de la estructura doble vano en software de cálculo Dlubal

### 4.5.1 Modellado estructura doble vano en base al predimensionamiento REV 1

#### •CONSIDERACIONES PREVIAS:

Se usa la versión de Dlubal RFEM-18 en vez de la RFEM-22, ya que permite la designación de superficies individualmente para el cálculo.

#### •CARGAS CONSIDERADAS:

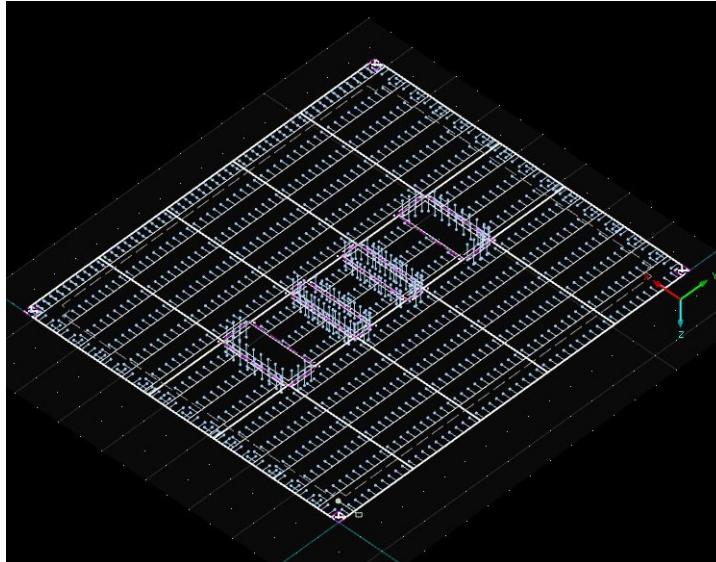
CC1: Peso Propio + Carga permanente (1,2 KN/m<sup>2</sup>)

CC2: Sobrecarga de Uso: Cat B Administrativo Oficinas (2,0 KN/m<sup>2</sup>)

CC3: Nieve < 1000 mts (1,0 KN/m<sup>2</sup>)

CC4: Viento: Presión +1,57 KN/m (0,95 KN/m<sup>2</sup>)

Succión -0,891 KN/m (0,544 KN/m<sup>2</sup>)



## RF-LAMINATE

### •FORJADOS

Se asigna CLT 200 de 5 capas y se dividen las superficies en 2,5 mts x 8 mts para asimilarlas lo máximo posible a un panel de CLT.

### •MUROS DE ARRIOSTRAMIENTO

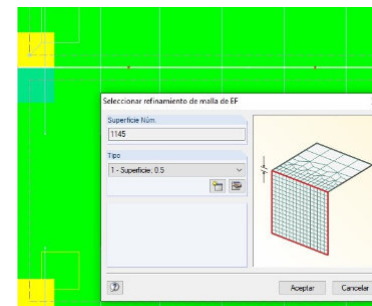
Serán los elementos que absorban todas las acciones horizontales y las transmitan al terreno en su parte inferior.

Asignación originalmente de CLT 160 de 5 capas. A su vez se dividen las superficies en paneles verticales.

Como la altura de cada planta es >2,95 se utilizarán paneles con la orientación de las capas exteriores en vertical, de suelo a techo.

### •EF Y REFINAMIENTOS DE MALLA:

La división en elementos finitos se realizará con una malla grande, de 5 mts, salvo para los elementos concretos o puntos singulares que se quiera estudiar, donde se realizará un refinamiento de malla a 0,5 mts.







TFM- Ricardo de Miguel

TUTOR- Rafa Zuza

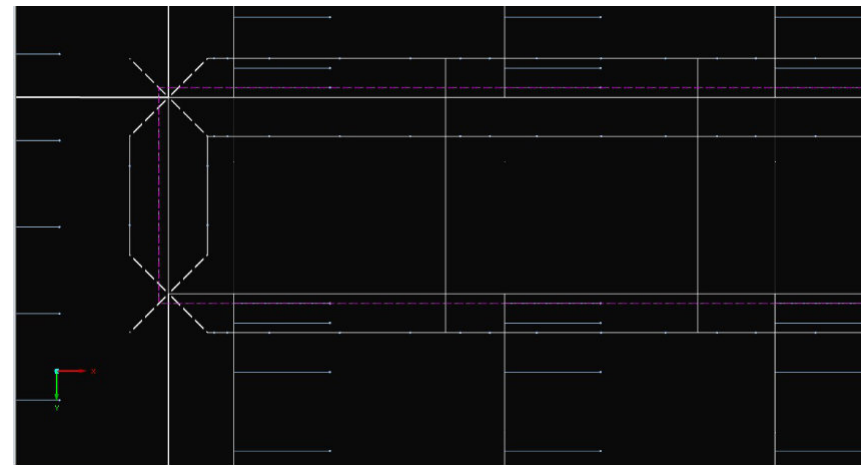
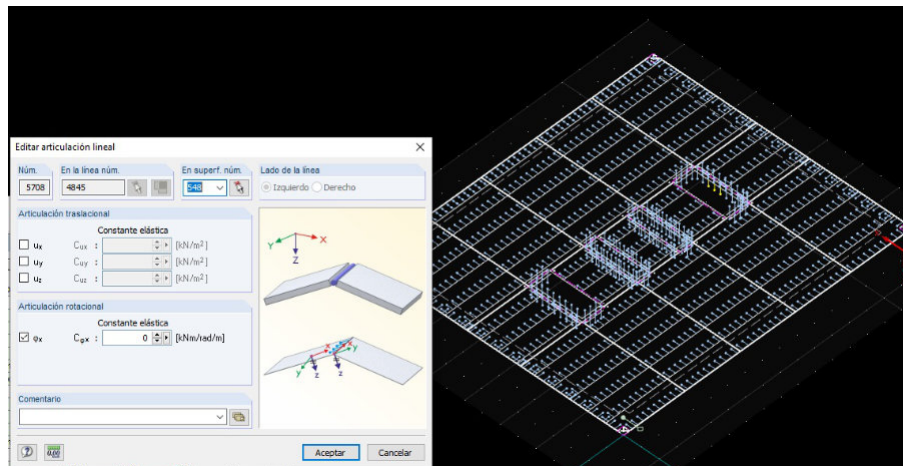
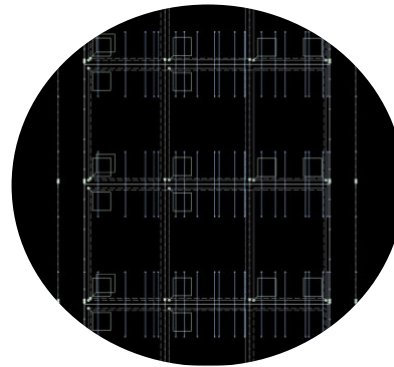
## SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

### •ARTICULACIONES LINEALES ENTRE PANELES

Se realizan articulaciones lineales en las juntas entre paneles, tanto verticales como horizontales, a lo largo de su eje x. Para ello los ejes z locales de todas las superficies deben estar orientados en la misma dirección.

### •UNION BARRAS RIGIDAS DE PILARES A MUROS DE CLT

Al haber usado barras equivalentes como pilares, en vez de paneles, se debe simular la unión de dichas barras a los muros de arriostramientos mediante barras rígidas, ya que en la realidad las secciones huecas irán unidas a dichos pilares de sección hueca. En el caso de las esquinas de l edificio se simula también la unión mediante barras rígidas.







## RF-TIMBER PRO

### •CONSIDERACIONES PREVIAS:

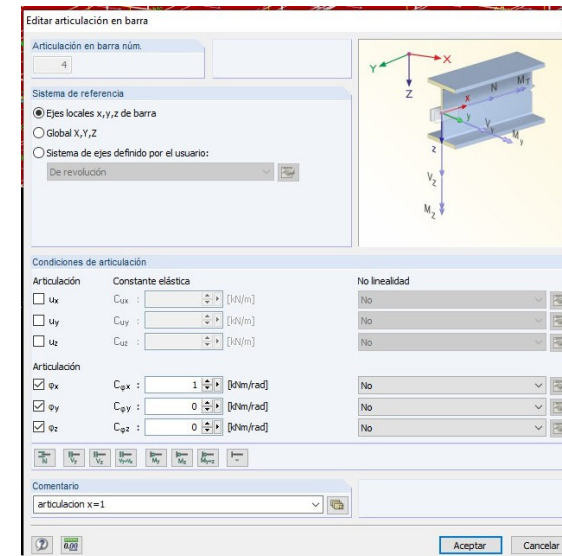
En el primer predimensionamiento son asignados los valores de la siguiente tabla a las secciones huecas de vigas y pilares:

Tipo barra	Secciones	Longitud	Apoyos por tipo sección
PILARES EXTERNOS:	HSV 1070/720/200/200/200	L=3,3 mts	apoyo NNE:100000SSN
PILARES INTERNOS:	HSV 720/720/200/200/200	L=3,3 mts	apoyo NNE:100000SSN
VIGAS DOBLE VANO:	HSV 720/720/200/240/240	L=13,5 mts	biart NNN E=1 SS Rig torsion 0,01
VIGAS DE ATADO EXTERIORES:	HSV 720/1070/160/160/160	L=8 mts/ 6,75 mts	biart NNN E=1 SS Rig torsion 0,01
VIGAS INTERNAS	HSV 720/720/160/160/160	Max 8 mts	biart NNN E=1 SS Rig torsion 0,01

### •ARTICULACIONES VIGAS

Se modifica la rigidez a torsión en todas las vigas al valor 0,1 para que el forjado no le transmita esa torsión.

Se articulan los extremos de las vigas para que no transmitan momentos a los pilares con los siguientes valores: NNN 1SS (N: no permitido, S si permitido). Valor de giro en x: 1 (knm/rad)





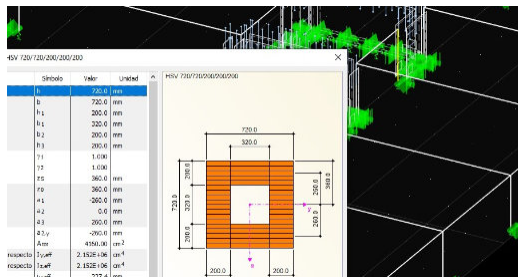


## ASIGNACION SECCIONES RFEM:

- PILARES INTERIORES:**

HSV 720/720/200/200/200 L=3,3 mts

Apoyo nudo cimentación NNE:100000SSN



Pilares interiores, secciones huecas de 720x720, e: 200

## CIMENTACIONES:

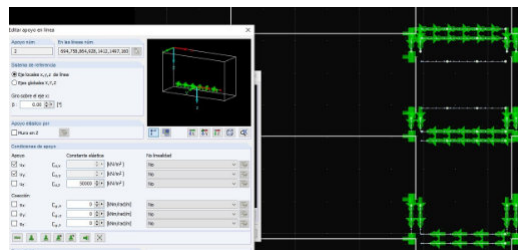
- APOYOS NUDOS TERRENO:**

Para las cimentaciones, se colocan articulaciones, impidiendo el movimiento en los ejes x e y, y asignando valores para el desplazamiento en z a modo de muelles, que en ulteriores comprobaciones habría que ponderar según deformabilidad del terreno. Se dan los siguientes valores:

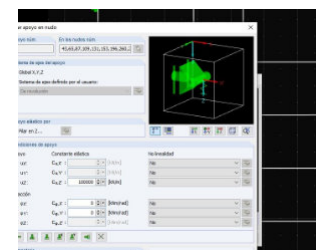
Apoyos en nudos pilares: Articulación con valor desplazamiento z de 100000KN/m (NN100000SSN)

Apoyos lineales muros: Articulación con valor desplazamiento z de 50000KN/m (NN50000SSN)

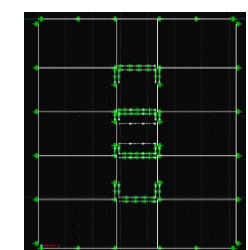
NOTA: Si se quisiera comprobar y colocar elementos de tracción con los resultados de carga finales, habría que indicar fallo a tracción y colocar holdowns con los valores según cálculo., Cálculos más precisos exceden del objetivo del presente trabajo.



Apoyo muros



Apoyo pilares



Esquema general de apoyos



## 4.5.2 Resultados de cálculo de la estructura doble vano REV 1

A continuación se exponen los resultados de los cálculos con modelo correcto en Dlubal. En principio se intenta mantener el doble vano de 13,5 mts., aumentando las secciones de la viga, pero como se puede comprobar por los resultados expuestos a continuación es inviable realizar el vano con dicha luz. En esta exposición de resultados se irán indicando resultados y acciones realizadas en el modelo, como consecuencia de ellos, hasta el modelo y cálculo final.

### RESULTADOS EN RF-LAMINATE

#### •FORJADOS CLT 200

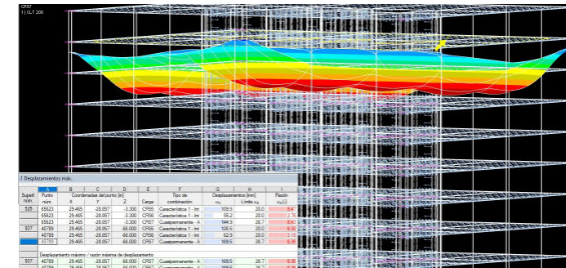
Como se ha explicado durante la descripción del modelado, se analizan dos superficies horizontales: el forjado de planta primera, muy rígido en sus apoyos (EA/L: 3,3) y el de la planta 18, con apoyos más flexibles.

Se comprueba, que aunque los máximos desplazamientos absolutos se producen en forjado planta superior en la dirección del eje z, dicha deformación está sumando desplazamientos Z de los pilares y flexiones de las vigas, las deformaciones resultantes relativas están dentro de los límites L/400 de integridad.

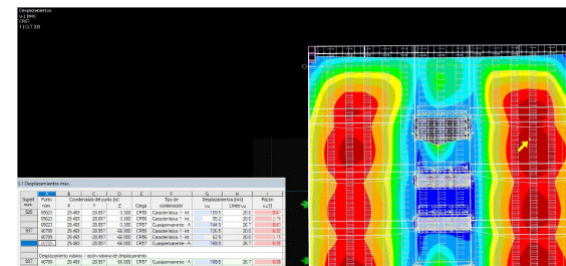
Se comprueba que el resto de razones >1 son consecuencia de singularidades en el modelados, que no se deben tener en cuenta en el conjunto de resultados finales, ya que son consecuencia de la modelización del edificio, por lo que se estima que el forjado de CLT-200 cumple, y se mantiene con ese espesor en todos los modelos y cálculos posteriores.

#### •MUROS DE ARRIOSTRAMIENTO

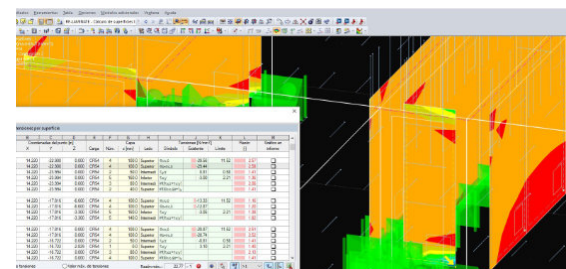
Se estudia la planta inferior para ver que muros son los más solicitados, ya que dan valores por encima de los límites, y se decide incrementar el espesor del CLT a 240. Después de diversas comprobaciones se decide incrementar a dicho espesor todos los muros de de los núcleos de arriostramiento.



Deformación forjado: desplazamientos Z . Perspectiva

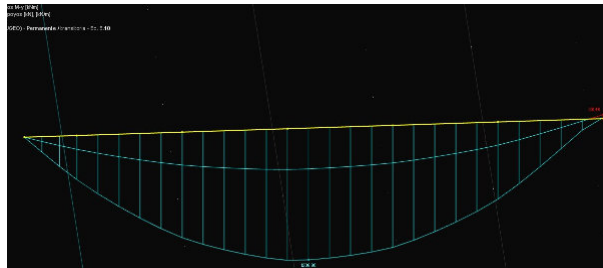


Deformación forjado: desplazamientos Z. Vista Planta



Esfuerzos en muros de arriostramiento





Momento Mx viga doble vano

## RESULTADOS EN RF-TIMBER PRO

### •VIGAS DOBLE VANO L: 13,5 mts.

El cálculo de las barras, mediante el módulo de Dlubal Timber Pro, arroja grandes magnitudes en las combinación ELU para las barras en vano doble, se analizan vigas individual con diversas secciones que ningún modulo resistente de una sección lógica para dicho vano puede asumir dicho momento:

Mx: 1206,9 knm

W: 61410 cm<sup>3</sup> (Módulo resistente sección HSV 720/720/240)

Tensión a flexión: 1,97 KN/cm<sup>2</sup>

19,7 N/mm<sup>2</sup> > 15,36 N/mm<sup>2</sup> máx. tensión a flexión

1,28 > 1 no cumple

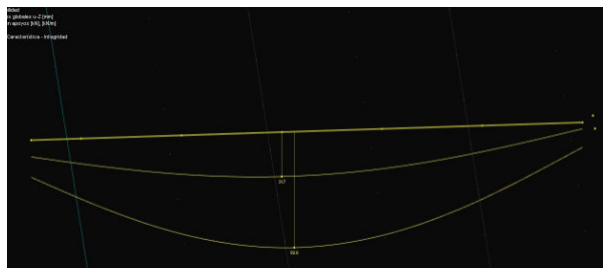
Las deformaciones están también fuera de los límites, aunque en este caso acumula también la deformación original del edificio:

UZ total: 82 mm-31 mm (Uz pilares apoyo): 51 mm > 35 mm (L/400: 14200/400).

Debido a que no hay secciones capaces de asumir dichos esfuerzos se introduce un pilar intermedio en el doble vano en los siguientes modelados y cálculos, por lo que la luz pasa a ser de 7 mts, y se producen unos esfuerzos asumibles por secciones lógicas.

### •APOYOS

Debido a los grandes desplazamientos en z, y poder comprobar las deformaciones relativas de cada elemento, se decide quitar los muelles de los apoyos y hacer articulaciones sin desplazamiento en z en los apoyos de los nudos.



Deformaciones viga doble vano



## 4.5.3 Modelado de la estructura con pilares intermedios

### CALCULO Y DIMENSIONAMIENTO FINAL NUEVO PILAR INTERMEDIO

Se añaden en el modelo los 8 nuevos pilares intermedios a mitad de la luz de la viga de doble vano, la cual pasa a tener unas luces de 7,25 mts a eje de apoyos.

En el nuevo cálculo se comprueban las tensiones en el pilar del nuevo pórtico, viéndose que los axiles en su arranque en PO son de gran magnitud: 8200 KN, además de tener flexo- compresión, por lo que habiendo comprobado diversas secciones se decide en esos 8 pilares: Incrementar el espesor de pared del pilar a 240 mm y cambiar la clase resistente a GL-28 H en las plantas 12 a 21 y realizar una sección cuadrada de 720x720 GL28h en las plantas 1 a 12.

## 4.6 Modelado y cálculo final de la estructura en Dlubal

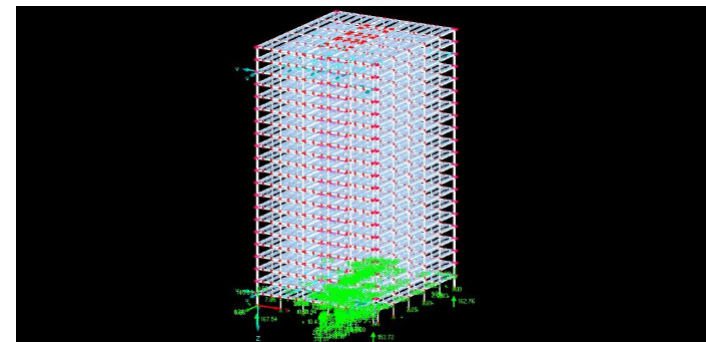
### 4.6.1 Dimensionamiento y modelado de la estructura

El modelado y dimensionamiento final del edificio se realiza de acuerdo con los resultados obtenidos a partir del primer pre-dimensionamiento y después de varios cálculos con diferentes espesores de paneles y secciones de vigas, con las consideraciones más importantes indicadas a lo largo del presente trabajo.

Las decisiones estructurales más importantes son las indicadas a continuación:

- Incorporación de pilares intermedios en la viga de luz 13.5 mts, con espesores distintos de planta 0 a 12 y de 12 a 21
- Eliminar los muelles en el apoyo de los pilares
- Incrementar espesor de los paneles de núcleos a CLT- 240
- **FORJADOS CLT 200**
- **MUROS DE NÚCLEOS DE ARRIOSTRAMIENTO CET 240**

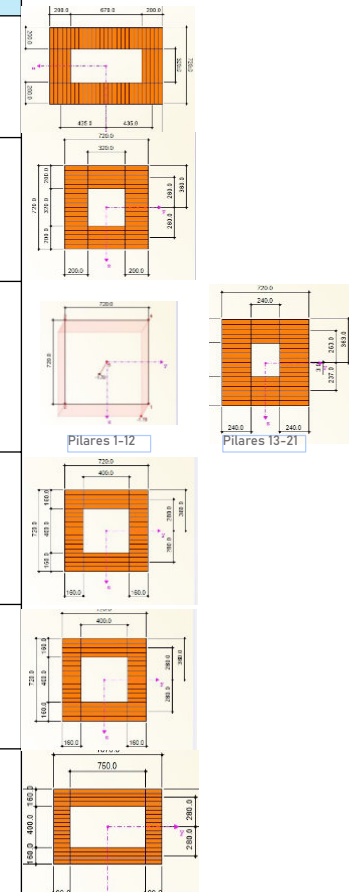
Sección	Material	Clase	Forma	Dimensiones	Resistencia	Comprobación
1	GL-28 H	GL-28 H	Rectangular	720x720	8200 KN	OK
2	GL-28 H	GL-28 H	Rectangular	720x720	8200 KN	OK





## •DIMENSIONADO FINAL DE SECCIONES HUECAS EN PILARES Y VIGAS

Tipo barra	Secciones	Longitud	Apoyos por tipo sección
PILARES EXTERIORES	Sec. Hueca 1070x720/ e:200 GL24h (HSV 1070/720/200)	L=3,3 mts	apoyo NNSSN (articulación en arranque)
PILARES INTERIORES ESQUINAS NÚCLEOS	Sec. Hueca 720x720/ e:200 GL24h (HSV 720/720/200)	L=3,3 mts	apoyo NNSSN (articulación en arranque)
PILARES INTERIORES MITAD DE VANO	P01-p12: M rect 720/720 GL28h P12-p21: Sec. hueca 720x720/e:240 GL28h (HSV 720/720/240)	L=3,3 mts	apoyo NNSSN (articulación en arranque)
VIGAS DE VANO INT (antigua doble vano)	Sec. Hueca 720x720/ e:200 GL24h (HSV 720/1720/160)	L=6,75 mts	biarticuladas NNN E=1 SS Rig torsion 0,01
VIGAS INTERIORES	Sec. Hueca 720x720/ e:160 GL24h (HSV 720/720/160)	Max 8 mts	biarticuladas NNN E=1 SS Rig torsion 0,01
VIGAS DE ATADO EXTERIORES	Sec. Hueca 720x1070/ e:160 GL24h (HSV 720/1070/160)	L=8 mts/ 6,75 mts	biarticuladas NNN E=1 SS Rig torsion 0,01





TFM- Ricardo de Miguel

TUTOR- Rafa Zuza

## SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

### 4.6.2 Resultados finales de cálculo

En el cálculo final comprueba que las secciones propuestas son válidas tanto en ELU (Estado de Límite Último) como en ELS (Estado Límite de Servicio) para las limitaciones de flecha en integridad L/400, confort L/350 y apariencia L/300 para todas las secciones.

Se comprueba asimismo que las deformaciones globales del edificio están dentro del límite L/500 establecido por la Normativa: (69000/500:138 mm).

A continuación indico con apoyo de imágenes los valores resultantes de cálculo más importantes:

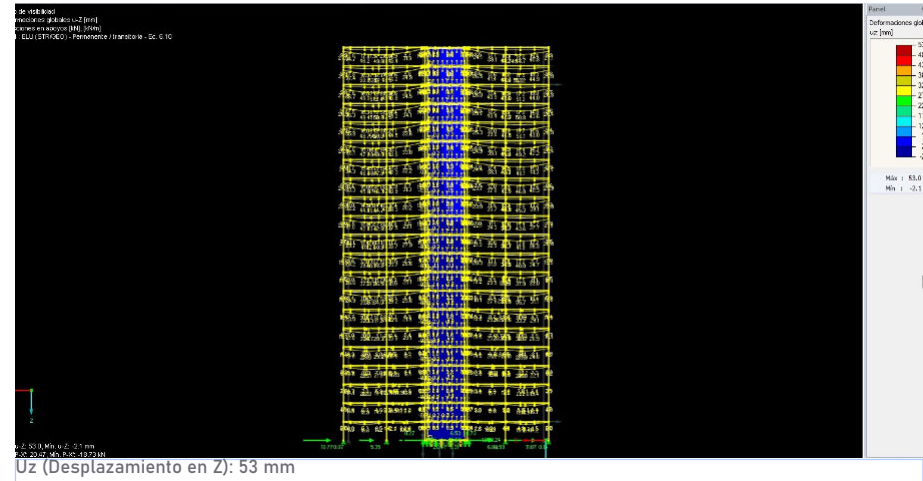
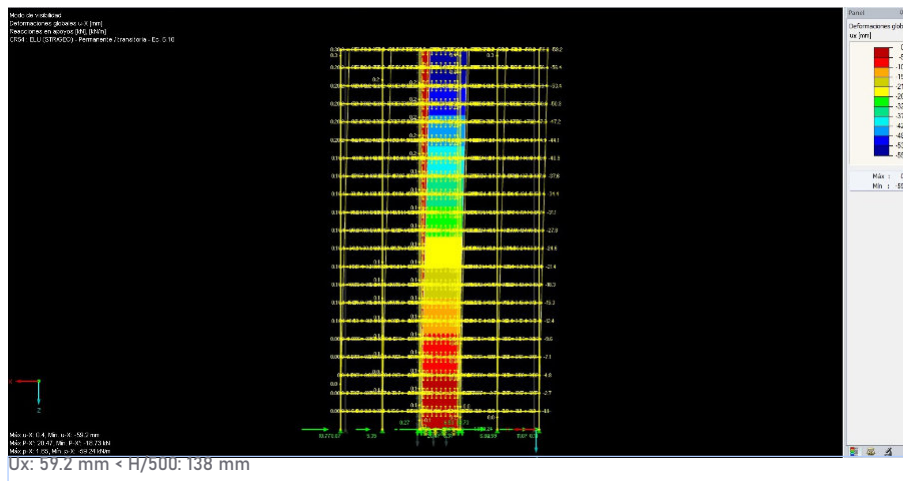
#### •DEFORMACIONES TOTALES EDIFICIO

##### *Desplazamientos horizontales en x:*

El desplazamiento horizontal total del edificio en el eje X es de 59,2 mm < límite Norma: L/500: 69000 mm/500: 138 mm. Cumple.

##### *Desplazamientos verticales en z:*

El mayor desplazamiento vertical total del edificio en el eje Z es de 53 mm. Cumple.







## • RESULTADOS TIMBER-PRO EN ELU

A continuación se exponen parte de los resultados obtenidos en el programa RFEM para el Estado Límite último por caso de carga. Todas las razones de tensiones (Tensión producida en una barra/ Máxima tensión admisible) cumplen y se sitúan por debajo de 1 (salvo singularidades como en la barra 106 que no se deben tener en cuenta, ya que son problemas en el modelado como nudos sueltos o repetidos).

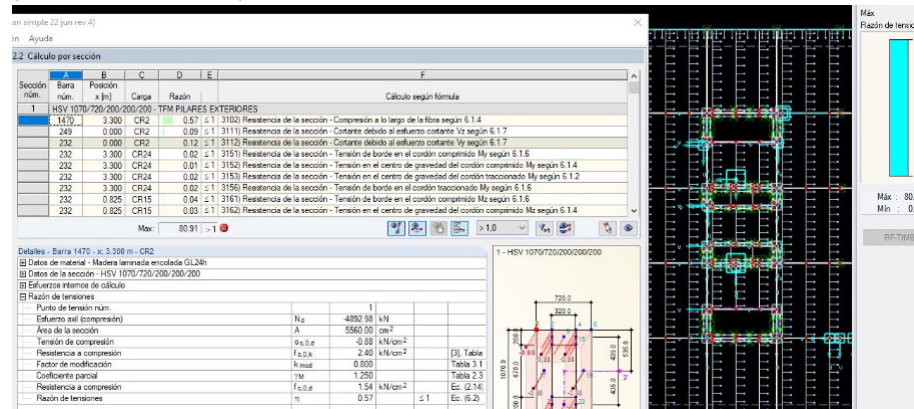
### • Resultados por combinación de resultados:

Carga	Descripción	Barra num.	Posición x [m]	Razón	Cálculo según fórmula	Situa de pr	Clase de dura de carga
Cálculo del estado límite último							
CR1	1.35'CC1/p	106	0.000	0.81 ≤ 1	3111) Resistencia de la sección - Cortante debido al esfuerzo cortante Vz según	PT	Permanente
CR2	1.35'CC1/p + 1.5'CC2/p	3302	3.300	0.95 ≤ 1	102) Resistencia de la sección - Compresión a lo largo de la fibra según 6.1.4	PT	Media
CR3	1.35'CC1/p + 1.5'CC2/p +	3302	3.300	0.85 ≤ 1	102) Resistencia de la sección - Compresión a lo largo de la fibra según 6.1.4	PT	Corta
CR4	1.35'CC1/p + 1.5'CC2/p +	3302	3.300	0.84 ≤ 1	102) Resistencia de la sección - Compresión a lo largo de la fibra según 6.1.4	PT	Corta
CR5	1.35'CC1/p + 1.5'CC2/p +	3302	3.300	0.84 ≤ 1	102) Resistencia de la sección - Compresión a lo largo de la fibra según 6.1.4	PT	Corta
CR6	1.35'CC1/p + 1.5'CC3/p	106	0.000	0.73 ≤ 1	3111) Resistencia de la sección - Cortante debido al esfuerzo cortante Vz según	PT	Corta
CR7	1.35'CC1/p + 1.05'CC2/p +	3090	3.300	0.74 ≤ 1	102) Resistencia de la sección - Compresión a lo largo de la fibra según 6.1.4	PT	Corta
CR8	1.35'CC1/p + 1.05'CC2/p +	3090	3.300	0.74 ≤ 1	102) Resistencia de la sección - Compresión a lo largo de la fibra según 6.1.4	PT	Corta
CR9	1.35'CC1/p + 1.5'CC3/p +	106	0.000	0.71 ≤ 1	3111) Resistencia de la sección - Cortante debido al esfuerzo cortante Vz según	PT	Corta

### • Resultados por tipo de sección:

Se mostrarán resultados por tipo de sección, indicando las singularidades a despreciar en su caso si las hubiera.

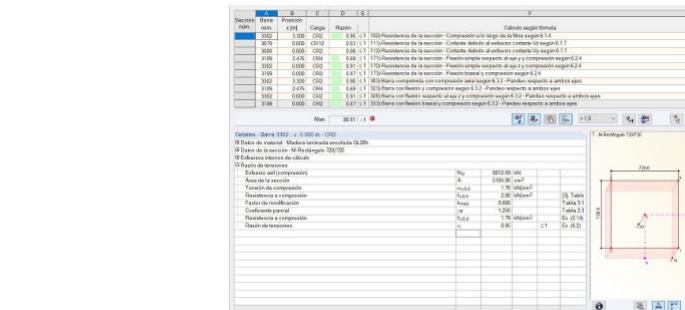
**PILARES EXTERIORES 1070/720/200 SECCIÓN HSV 1070/720/200**  
Cumplen todas las barras trabajando al 30% salvo dos singularidades (barras 1408/1366).



## PILARES INTERIORES MITAD DE VANO p1-12 Mrect 720x720

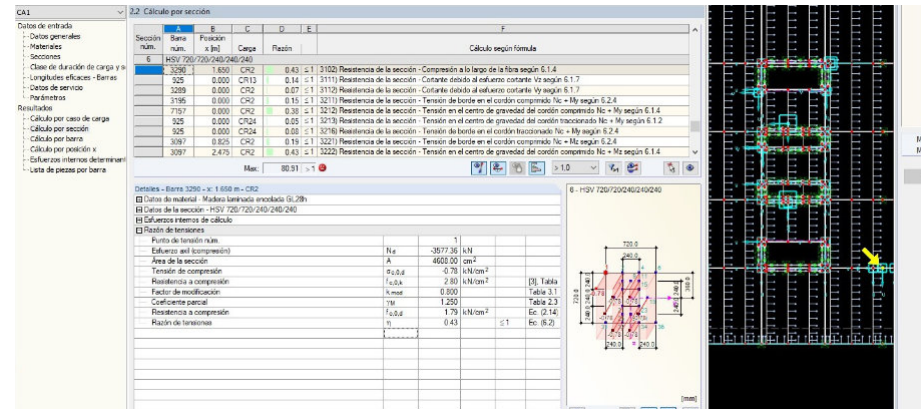
El motivo de haberse cambiado la sección de estos pilares a sección rectangular maciza rectangular de 720x720, desde planta 0 a 12 en los 8 pilares del pórtico intermedio, es consecuencia de la necesidad de poder soportar los axiles de -8600 KN en flexocompresión producida por acciones horizontales, que descienden por un solo pilar. Por el mismo motivo se cambia la clase de madera a GL28h.

De esta forma cumplen todos los pilares, pero trabajan al 90-95%.



## PILARES INTERIORES MITAD DE VANO 720/720/200 GL28h

Cumplen en torno al 46%, salvo singularidad en 757.

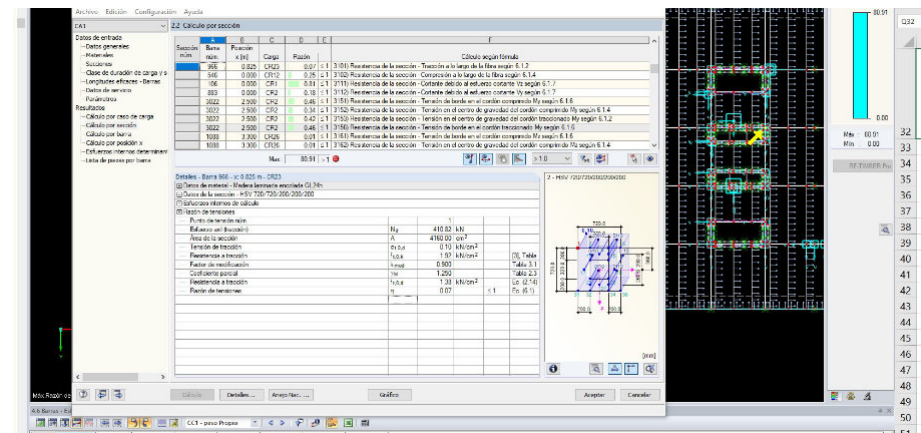




# SECCIONES HUECAS EN EDIFICIOS EN ALTURA BOX-BEAMS

## VIGAS VANOS 6,75 Y PILARES NUCLEOS ARRIOSTRAMIENTO 720/720/200

Una única singularidad en barra 106 que ha quedado suelta en el modelado, no se tiene en cuenta en valoración de resultados.



## VIGAS ATADO EXTERIORES 720/1070/200

Trabajan muy bajo, a menos del 13% salvo singularidad en 335 y 83.

Sección num.	Barra num.	Posición x [m]	Carga	Razón	F
4	1259	0.000	CR1	0.00 ≤ 1	3101) Resistencia de la sección - Tracción a lo largo de la fibra según 6.1.2
	6951	0.000	CR2	0.00 ≤ 1	3102) Resistencia de la sección - Compresión a lo largo de la fibra según 6.1.4
	2976	1.395	CR2	0.34 ≤ 1	3111) Resistencia de la sección - Cortante debido al esfuerzo cortante Vz según 6.1.7
	3049	1.395	CR1	0.03 ≤ 1	3112) Resistencia de la sección - Cortante debido al esfuerzo cortante Vy según 6.1.7
	1724	0.000	CR2	0.13 ≤ 1	3151) Resistencia de la sección - Tensión de borde en el cordón comprimido My según 6.1.6
	1724	0.000	CR2	0.10 ≤ 1	3152) Resistencia de la sección - Tensión en el centro de gravedad del cordón comprimido My según 6.1.4
	1724	0.000	CR2	0.13 ≤ 1	3153) Resistencia de la sección - Tensión en el centro de gravedad del cordón traccionado My según 6.1.2
	1724	0.000	CR2	0.13 ≤ 1	3156) Resistencia de la sección - Tensión de borde en el cordón traccionado My según 6.1.6
	3039	0.500	CR2	0.12 ≤ 1	3171) Resistencia de la sección - Tensión de borde en el cordón comprimido My + Mz según 6.1.6

## VIGAS INTERIORES 720/720/ 160

Todas menos una al 37% trabajan por debajo del 25%. Sing en 1070.

Sección num.	Barra num.	Posición x [m]	Carga	Razón	F
5	7193	0.302	CR2	0.00 ≤ 1	100) Resistencia de la sección - Esfuerzos internos insignificantes
	6970	4.364	CR2	0.01 ≤ 1	3101) Resistencia de la sección - Tracción a lo largo de la fibra según 6.1.2
	695	0.000	CR12	0.00 ≤ 1	3102) Resistencia de la sección - Compresión a lo largo de la fibra según 6.1.4
	926	8.901	CR2	0.36 ≤ 1	3111) Resistencia de la sección - Cortante debido al esfuerzo cortante Vz según 6.1.7
	7190	0.000	CR2	0.04 ≤ 1	3112) Resistencia de la sección - Cortante debido al esfuerzo cortante Vy según 6.1.7
	926	4.451	CR2	0.23 ≤ 1	3151) Resistencia de la sección - Tensión de borde en el cordón comprimido My según 6.1.6
	926	4.451	CR2	0.18 ≤ 1	3152) Resistencia de la sección - Tensión en el centro de gravedad del cordón comprimido My según 6.1.4
	926	4.451	CR2	0.23 ≤ 1	3153) Resistencia de la sección - Tensión en el centro de gravedad del cordón traccionado My según 6.1.2
	926	4.451	CR2	0.23 ≤ 1	3156) Resistencia de la sección - Tensión de borde en el cordón traccionado My según 6.1.6



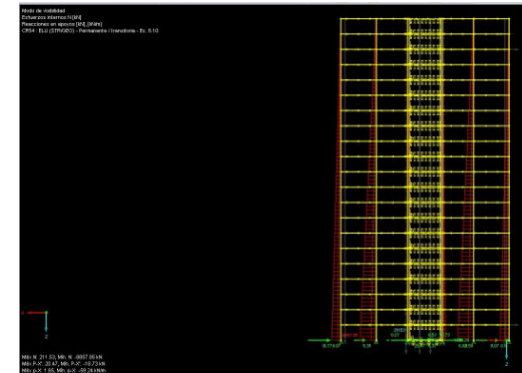


## •RESULTADOS RFEM ELU PÓRTICO INTERMEDIO

Vemos los esfuerzos en un pórtico intermedio:

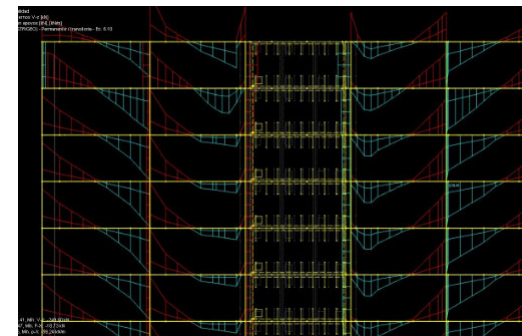
### **Axiles N:**

El Máximo, 8857 KN, se produce en arranque de los nuevos pilares intermedios:



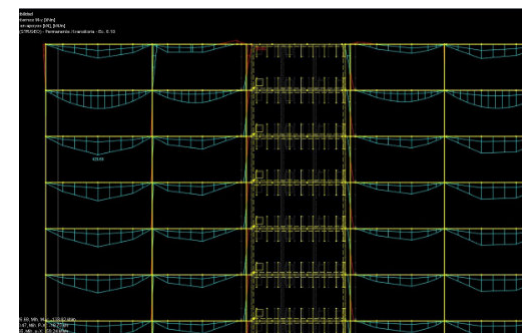
### **Cortantes Vz:**

Máximo, 234 KN,



### **Flectores My:**

Máximo, 2426 KNm/ Mz: 118,6 KNm







## RESULTADOS EN RF-LAMINATE

Todas las razones de tensiones están por debajo de 1 en las superficies verticales,

En las superficies horizontales también está ok, salvo un par de puntos singulares que se pueden despreciar en cálculo.

### •FORJADOS CLT-200

Como se ha explicado en el modelado, se analizan dos superficies horizontales: el forjado de planta primera, muy rígido en sus apoyos y el de la planta 18, con apoyos más flexibles.

Se comprueba que cumplen.

Se ve un pequeño error de modelado en la zona de escalera, en apoyo de la placa que se puede despreciar.

### **Deformaciones Planta 18:**

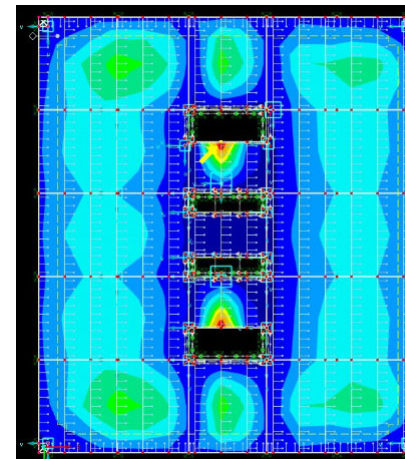
Se comprueba que cumplen salvo los dos puntos singulares en escalera, despreciable ya que el apoyo de la placa se realizará sobre una viga que en el modelado no esta bien realizado.

### **Deformaciones Planta 1:**

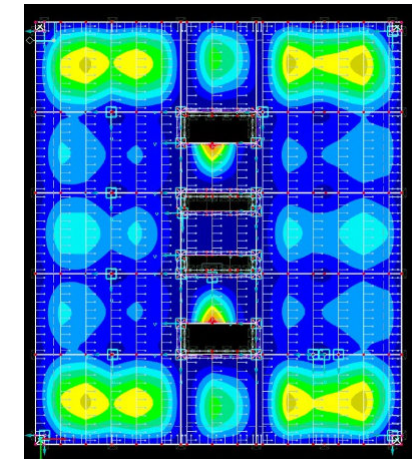
Cumple.

### **Tensiones internas forjados:**

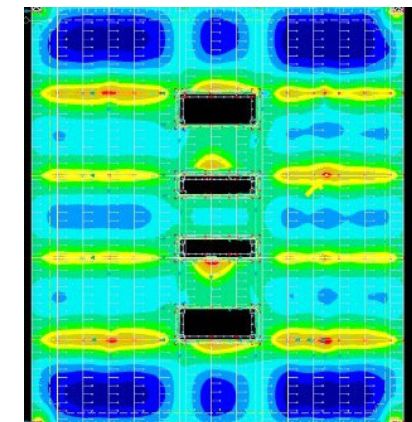
Cumple salvo lo dos puntos descritos.



Laminate: Deformaciones p18



Laminate: Deformaciones p1



Laminate: Tensiones p1





- MUROS ARRIOSTRAMIENTO CLT-240**

Cumplen todas las superficies.

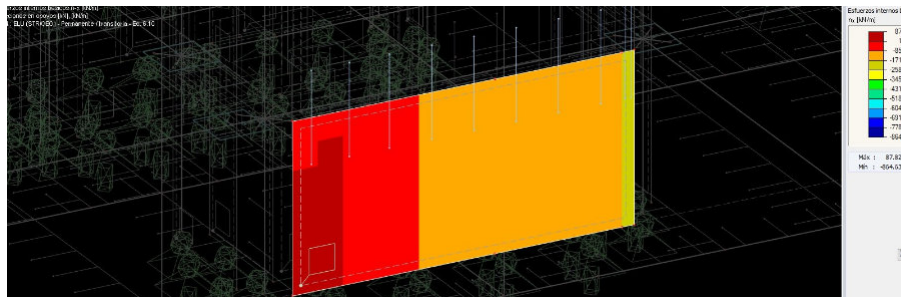
**Estudio de Esfuerzos en Muros de arriostramiento:**

Mediante el estudio de los esfuerzos axiales producidos en los muros en los muros comprobamos de qué manera los elementos están sometidos a tracción y compresión, valores necesarios para el posterior cálculo de conectores, escuadras de cortante para absorber esfuerzos horizontales y holdowns para los esfuerzos de tracción. Especialmente importante es analizar dichos esfuerzos en los muros de arranque desde cimentación, donde se transmitirán dichos esfuerzos al terreno.

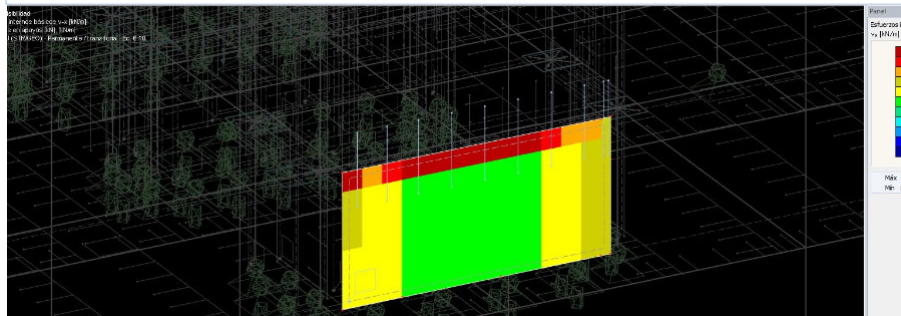
Tensiones [N/mm <sup>2</sup> ]		Razón	Gráfico en informe
Símbolo	Existente		
Tyz	-0.01	0.75	0.01
Txz	-0.01	2.00	0.00
Txy	-0.65	2.00	0.33
inf(Txz+Txy)			0.11
inf(σx,90+Ty)			0.01
σe,0	0.03	12.00	0.00
σe,90	0.00	0.00	0.00
σe,0	-10.40	10.50	0.99
σe,90	0.00	0.20	0.00
σb+σe,0	-10.40		0.99
σb+σe,90	0.00		0.00
Tyz	-0.01	0.75	0.01
Txz	0.00	2.00	0.00
Txy	-1.07	2.00	0.53
inf(Txz+Txy)			0.28
inf(σx,90+Ty)			0.01
σe,0	0.04	12.00	0.00



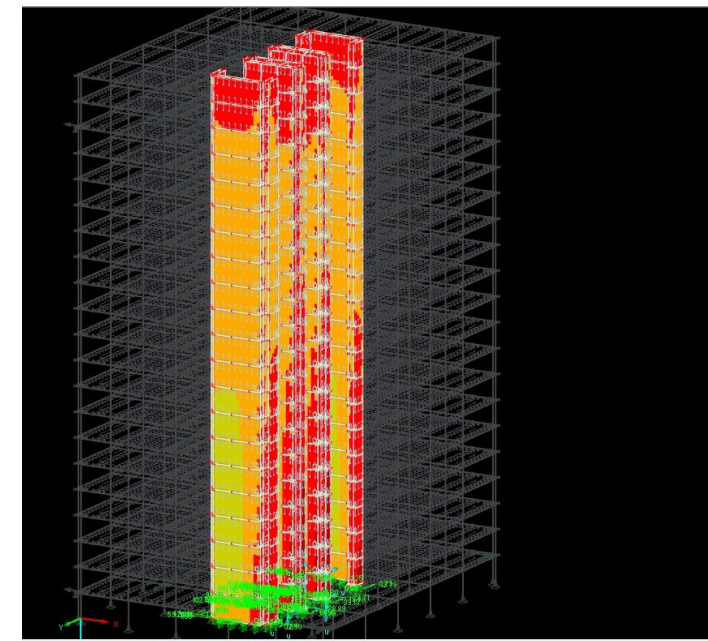
Resultado Laminata en muros de arriostramiento: cumplen todas las superficies



Esfuerzos de Compresión y Tracción en muro de arranque



Esfuerzos de CCortante en muro de arranque



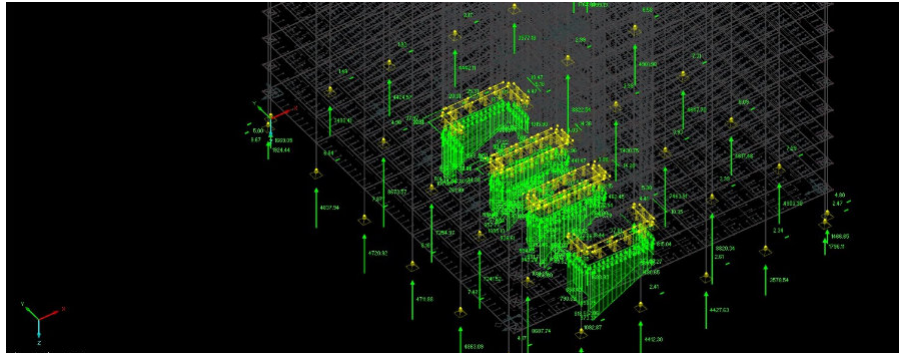
Axiales en el conjunto de muros de arriostramiento



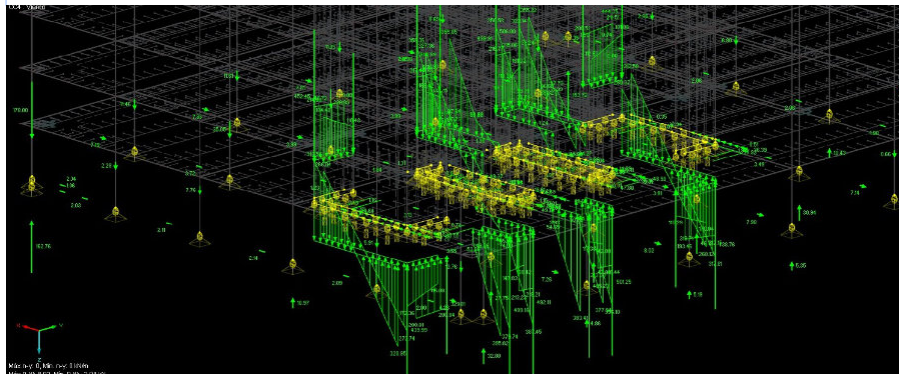
• REACCIONES EN APOYOS

Mediante las reacciones verticales y horizontales resultantes en los apoyos se podrán dimensionar las uniones y arranques de pilares y muros en su arranque. Se muestran dos de ellos, reacciones en combinación más desfavorable y reacciones con la acción horizontal del viento para poder ver como se intenta producir un vuelco del conjunto.

**Reacción con la combinación más desfavorable en ELU:**



**Reacción con la combinación Viento:**



• DATOS FINALES BARRAS

En el siguiente cuadro se ven algunos datos como el Peso, volumen y superficies de las barras.

Timber Pro: Datos finales barras

Descripción de la sección	Número de barras	Longitud [m]	Longitud total [m]	Área de superfi [m²]	Volumen [m³]	Peso unitario [kg/m]	Peso [kg]	Peso total [t]
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.18	1.18	3.39	0.32	174.72	205.73	0.206
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.17	1.17	3.37	0.32	174.72	204.47	0.204
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.16	1.16	3.35	0.32	174.72	203.20	0.203
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.16	1.16	3.33	0.31	174.72	201.93	0.202
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.15	1.15	3.31	0.31	174.72	200.67	0.201
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.14	1.14	3.29	0.31	174.72	199.40	0.199
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.13	1.13	3.27	0.31	174.72	198.13	0.198
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.13	1.13	3.25	0.31	174.72	196.87	0.197
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.12	1.12	3.22	0.30	174.72	195.60	0.196
7 - M-Rectángulo 720/720	96	3.30	316.80	912.38	164.23	238.46	786.93	75.545
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.26	1.26	3.62	0.34	174.72	219.67	0.220
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.26	1.26	3.64	0.34	174.72	220.93	0.221
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.27	1.27	3.66	0.35	174.72	222.20	0.222
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.28	1.28	3.68	0.35	174.72	223.47	0.223
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.29	1.29	3.70	0.35	174.72	224.73	0.225
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.29	1.29	3.73	0.35	174.72	226.00	0.226
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.30	1.30	3.75	0.35	174.72	227.27	0.227
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.31	1.31	3.77	0.36	174.72	228.53	0.229
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.32	1.32	3.79	0.36	174.72	229.80	0.230
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.32	1.32	3.81	0.36	174.72	231.07	0.231
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.33	1.33	3.83	0.36	174.72	232.33	0.232
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.34	1.34	3.85	0.36	174.72	233.60	0.234
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.34	1.34	3.87	0.37	174.72	234.87	0.235
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.35	1.35	3.89	0.37	174.72	236.13	0.236
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.36	1.36	3.91	0.37	174.72	237.40	0.237
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.37	1.37	3.93	0.37	174.72	238.67	0.239
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.37	1.37	3.95	0.37	174.72	239.93	0.240
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.38	1.38	3.98	0.38	174.72	241.20	0.241
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.39	1.39	4.00	0.38	174.72	242.47	0.242
5 - HSV 720/720/160/160/160	12	2.50	30.00	86.40	7.30	150.53	376.32	4.516
5 - HSV 720/720/160/160/160	6	1.86	11.13	32.05	2.71	150.53	279.23	1.675
2 - HSV 720/720/200/200/200	1	1.11	1.11	3.20	0.30	174.72	194.33	0.194
5 - HSV 720/720/160/160/160	6	0.60	3.63	10.45	0.88	150.53	91.07	0.546
	3520		10330.00	33152.00	3233.97			1971.130





## 5.- CONCLUSIONES

### 5.1 Conclusiones del trabajo

Mediante el presente trabajo se ha estudiado y probado la posibilidad del uso de las secciones huecas de madera en la realización de vigas y pilares como alternativa a las estrategias actuales en edificios en altura de madera: núcleos de arriostramiento realizados con materiales distintos a la madera, como hormigón o acero, o grandes escuadrías macizas de madera.

Mediante el sistema presentado se prueba mediante el cálculo la posibilidad de construir estructuras y edificios en altura, para lo que se realiza un modelo de edificio de 21 plantas y se realizan los cálculos, comprobándose en sus resultados que el método es válido para dichos edificios.

Este sistema se desarrollaría mediante la pre-industrialización y corte de los elementos, que deberían llegar pre-industrializados al emplazamiento de la obra para ello se ha intentado buscar las dimensiones más óptimas de las placas para el máximo aprovechamiento de los paneles existentes en el mercado, así como de su posibilidad de ser transportados en un transporte estándar, sin que suponga un coste extra.

El total de camiones estimados en la obra sería de 233, para un peso total de 5.825 Tm (unos 12595 m3) de estructura de madera, incluyendo Forjados, muros núcleos, escaleras interiores, vigas y pilares. Debido a este gran volumen, y por incrementar la sostenibilidad de este tipo de construcción, sería conveniente que la empresa suministradora de madera estuviese implantada lo más cercana posible al lugar de construcción, contando como suministradores con empresas locales que trabajen con especies autóctonas.

El sistema se complementaría con el uso de conectores similares a los propuestos en el trabajo, diseñados con el objetivo de facilitar el montaje de vigas y pilares mediante los mismos a pie de obra y elevación del conjunto para fácil ensamblaje de los mismos. Este tipo de conectores, con patillas de acero considerarán la transmisión directa de esfuerzos

entre los elementos verticales sin que de lugar en ningún caso al aplastamiento de paneles de madera en los forjados, los cuales tendrán además la función de arriostrar horizontalmente al edificio en este tipo de acciones. Se complementarán mediante tirafondos en el resto de la unión entre paneles.

### 5.2 Futuros campos de investigación

Durante el desarrollo del trabajo se constatan oportunidades de profundizar en la investigación de ciertos temas, que se escapaban al alcance del presente trabajo pero serían de gran interés en cuanto al desarrollo de este tipo de estructuras:

- ***Posibilidad del uso de paneles con capas a 45º y vigas cajón formados por este tipo de elementos***

En los ensayos de los trabajos de investigación realizados dan una serie de parámetros en los módulos de resistencia del conjunto que se podrían aplicar a este tipo de estructuras, disminuyendo la sección de los elementos usados, especialmente indicado estaría su uso en los núcleos de arriostramiento.

- ***Aplicación de elementos post tensionados de acero en los los paneles de muros de arriostramiento***

Los ensayos de otros trabajos determinan su ventaja en edificios en altura frente a acciones sísmicas, pero su aplicación y cálculo en el modelo presentado excede el alcance del presente trabajo, donde no se ha considerado una zona sísmica en su cálculo, ya que en principio el edificio estaría emplazado en Madrid en terreno granítico, aunque sería un elemento a realizar si se construye el modelo en zonas sísmicas.

- ***Desarrollo y cálculo de los elementos de conexión***

Con los datos de los esfuerzos obtenidos en los diversos paneles y barras: vigas y pilares, se podrían calcular los conectores y uniones entre elementos, lo que constituiría un trabajo completo en si mismo-





## 6.- REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

### 6.1 Referencias y citas realizadas durante el trabajo por orden alfabético

Abrahamsen, R., & AS, M. L. (2017). Mjøstårnet-construction of an 81 m tall timber building. Paper presented at the International House Forum,

Chen, Y., & Lam, F. (2013). Bending performance of box-based cross-laminated timber systems. *Journal of Structural Engineering*, 139(12), 04013006.

Ctuh height criteria

Las diez claves para dominar el diseño de edificios de clt. (2019, -12-11T07:22:08+00:00). Retrieved from <https://maderayconstruccion.com/las-diez-claves-para-dominar-el-diseno-de-edificios-de-clt/>

Green, M., & Taggart, J. (2020). *Tall wood buildings*. Basel/Berlin/Boston: Birkhauser Verlag GmbH. Retrieved from [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE\\_ID\]/detail.action?docID=6132476](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=6132476)

Miguel Ángel Astiz Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. E.T.S. Ingenieros de Caminos, & Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Los esquemas estructurales de los edificios altos

Sun, X., He, M., Li, Z., & Lam, F. (2019). Seismic performance assessment of conventional CLT shear wall structures and post-tensioned CLT shear wall structures. *Engineering Structures*, 196, 109285.

### 6.2 Bibliografía utilizada durante el trabajo por orden alfabético

Abrahamsen, R., & AS, M. L. (2017). Mjøstårnet-construction of an 81 m tall timber building. Paper presented at the International House Forum,

Allen, E., Michel, N., Zalewski, W., & Allen, E. A., Edward. (2010a). *Form and forces : Designing efficient, expressive structures*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. Retrieved from <https://ehu.on.worldcat.org/oclc/813857801>

Ataei, A., Valipour, H. R., Bradford, M. A., & Chiniforush, A. A. (2019). Experimental study of steel-timber composite beam-to-column joints with extended end plates. *Construction and Building Materials*, 226, 636-650. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.154

Bestraten, S., & Hormias, E. (2012). Consolidación estructural del edificio patrimonial de C/ripoll, 25 de barcelona - ca la dona. *Informes De La Construcción*, 64(1), 79-94. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4213482&orden=393494&info=link>

Boggian, F., Andreolli, M., & Tomasi, R. (2019). Cross laminated timber (CLT) beams loaded in plane: Testing stiffness and shear strength. *Frontiers in Built Environment*, 5 doi:10.3389/fbuil.2019.00058

Buck, D., Wang, X. A., Hagman, O., & Gustafsson, A. (2016). Further development of cross laminated timber (CLT) – mechanical tests on 45° alternating layers. Paper presented at the 1107. Retrieved from <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-15772>

Chen, Y., & Lam, F. (2013b). Bending performance of box-based cross-laminated timber systems. *Journal of Structural Engineering*, 139(12), 4013006. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000786

Comparison and experimental verification of simplified one-dimensional linear elastic models of multilayer sandwich beams | elsevier enhanced reader. Retrieved from <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0263822319323499?token=C67869D4EDC11CFCD504A38C8949EFCBF31EB112A1D39E6B49ABAB23D945F9F80FD6EC3E14DB43F930DEA2EEDD6C3632>





Council on Tall Buildings and Urban Habitat. Council on tall buildings and urban habitat-timber structures. Retrieved from <https://www.ctbuh.org/resource/height>

Ctbuh height criteria

Dietsch, P., & Winter, S. (2012). Eurocode 5—Future developments towards a more comprehensive code on timber structures. *Structural Engineering International*, 22(2), 223-231. doi:10.2749/101686612X13291382991001

Las diez claves para dominar el diseño de edificios de clt. (2019, -12-11T07:22:08+00:00). Retrieved from <https://maderayconstruccion.com/las-diez-claves-para-dominar-el-diseno-de-edificios-de-clt/>

Domínguez Fuster, D., & Sintés Midmore, C. (2017). B - patio, vivienda unifamiliar Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6738534&orden=0&info=link>

Fernández Forcada, M. (2015). La madera contralaminada como alternativa en sistemas de baja energía estructural. Available from DIALNET. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=76658&orden=1&info=link>

Flaig, M. (2015). CLT-beams loaded in-plane direction - Part 1: Effective strength and stiffness properties for the shear design [In Plattenebene beanspruchte Biegeträger aus Brettsperholz: Teil 1: Effektive Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte für die Schubmessung] doi:10.1002/bate.201500066 Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84946833012&doi=10.1002%2fbate.201500066&partnerID=40&md5=50f0f7eb1d6bc993717aa840ab3a7112>

Gasparri, E., & Aitchison, M. (2019). Unitised timber envelopes. A novel approach to the design of prefabricated mass timber envelopes for multi-storey buildings. *Journal of Building Engineering*, 26, 100898. doi:10.1016/j.jobe.2019.100898

GAYÁ, J. E. M. Madera en altura.

Green, M., & Taggart, J. (2020). Tall wood buildings. Basel/Berlin/Boston: Birkhauser Verlag GmbH. Retrieved from [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE\\_ID\]/detail.action?docID=6132476](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=6132476)

Haynes, M., Coleri, E., & Estaji, M. (2019). Selection of the most effective pavement surfacing strategy for the glenwood cross laminated timber parking garage. *Construction and Building Materials*, 226, 162-172. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.220

Miguel Ángel Astiz Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. E.T.S. Ingenieros de Caminos, & Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Los esquemas estructurales de los edificios altos

Nevado, Miguel. Proyecto cubierta piscinas Salamanca.

Sun, X., He, M., Li, Z., & Lam, F. (2019). Seismic performance assessment of conventional CLT shear wall structures and post-tensioned CLT shear wall structures. *Engineering Structures*, 196, 109285.

Szeptyński, P. (2020). Comparison and experimental verification of simplified one-dimensional linear elastic models of multilayer sandwich beams. *Composite Structures*, 241, 112088. doi:10.1016/j.compstruct.2020.112088

Tannert, T., & Connolly, T. J. (2020). Hybrides tragwerk des 18-stöckigen studentenwohnheims "Tall wood building" in vancouver und alternative in holz. *Bautechnik*, 97(S1), 56-63. doi:10.1002/bate.201900103

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco al tutor supervisor del presente TFM, Rafa Zuza, todo su apoyo y aporte a lo largo del desarrollo del presente trabajo.

Asimismo agradezco al Ing. Manuel Ballesta, ingeniero responsable del software Dlubal su ayuda con el modelado del edificio en dicho programa.



7.- ANEXOS

7.1 Anexo 1: Cálculo de forjado mediante el software Calculatis

Arquitecto Ricardo De Miguel Proyecto TFM abril Página 1  
Elemento Forjado oficina 2v 8mts Fecha 30.03.2020

**Sistema**

Sección: CLT 200 L5; Material: C24 Abeto ETA (2019); Clase de servicio: Clase de servicio 1; Clase de resistencia al fuego: R 120

**Aprovechamiento 90 %**

**Análisis de tensiones en flexión 66 %**

$M_{y,d} = -30,25 \text{ kNm}$   $w_{y,d} = 24,00 \text{ N/mm}^2$   
 $N_{y,d} = 0,00 \text{ kN}$   $t_{y,d} = 0,00 \text{ N/mm}^2$   
 $\sigma_{y,d} = 0,00 \text{ N/mm}^2$   $f_{y,d} = 8,95 \text{ N/mm}^2$   
 $\sigma_{x,y,d} = 7,43 \text{ N/mm}^2$   $f_{x,y,d} = 16,90 \text{ N/mm}^2$  ✓

**Análisis de la tensión del cortante 7 %**

$V_d = - \text{ kN}$   $t_{y,d} = 4,00 \text{ N/mm}^2$   
 $T_{y,d} = 26,61 \text{ N/mm}^2$   $t_{x,d} = 2,56 \text{ N/mm}^2$  ✓

**Análisis del cortante de rodadura 29 %**

$V_d = -26,61 \text{ kN}$   $t_{y,d} = 0,86 \text{ N/mm}^2$   
 $t_{x,d} = 0,16 \text{ N/mm}^2$   $t_{y,d} = 0,55 \text{ N/mm}^2$  ✓

**Análisis de tensiones en flexión Fuego 74 %**

$M_{y,d} = -18,20 \text{ kNm}$   $w_{y,d} = 24,00 \text{ N/mm}^2$   
 $N_{y,d} = 0,00 \text{ kN}$   $t_{y,d} = 0,00 \text{ N/mm}^2$   
 $\sigma_{y,d} = 0,00 \text{ N/mm}^2$   $f_{y,d} = 16,10 \text{ N/mm}^2$   
 $\sigma_{x,y,d} = -22,62 \text{ N/mm}^2$   $f_{x,y,d} = 30,36 \text{ N/mm}^2$  ✓

**Análisis de la tensión del cortante Fuego 4 %**

$V_d = - \text{ kN}$   $t_{y,d} = 4,00 \text{ N/mm}^2$   
 $T_{y,d} = 12,18 \text{ N/mm}^2$   $t_{x,d} = 4,60 \text{ N/mm}^2$  ✓

**Análisis del cortante de rodadura Fuego 16 %**

$V_d = -12,18 \text{ kN}$   $t_{y,d} = 0,86 \text{ N/mm}^2$   
 $t_{x,d} = 0,16 \text{ N/mm}^2$   $t_{y,d} = 0,99 \text{ N/mm}^2$  ✓

**$w_{char} = w[char,inst]$**

vano	$K_{def}$	Límite [-]	$w_{lim}$ [mm]	$w_{char}$ [mm]	Índice
1	0,8	L/350	21,4	6,6	31 %
2	0,8	L/350	21,4	6,6	31 %

**$w_{lim} = w[char,inst] + w[q.p.]k_{def}$**

vano	$K_{def}$	Límite [-]	$w_{lim}$ [mm]	$w_{char}$ [mm]	Índice
1	0,8	L/500	15,0	13,4	89 %
2	0,8	L/500	15,0	13,5	90 %

**$w_{char,lim} = w[q.p.] + w[q.p.]k_{def}$**

vano	$K_{def}$	Límite [-]	$w_{lim}$ [mm]	$w_{char,lim}$ [mm]	Índice
1	0,8	L/300	25,0	15,4	61 %
2	0,8	L/300	25,0	15,4	62 %

**Reacción en el apoyo**

Tipo de caso de carga	$R_{med}$	$A_v$	$B_v$	$C_v$
			[kN]	
Peso propio de la estructura	0,6	2,83	9,34	2,83
Carga permanente	0,6	2,83	9,34	2,83

**Reacción en el apoyo**

Tipo de caso de carga	$R_{med}$	$A_v$	$B_v$	$C_v$
			[kN]	
Sobrecarga de uso cat. B: zonas de oficinas	0,8	5,66	16,67	5,66
		0,00	0,00	0,00

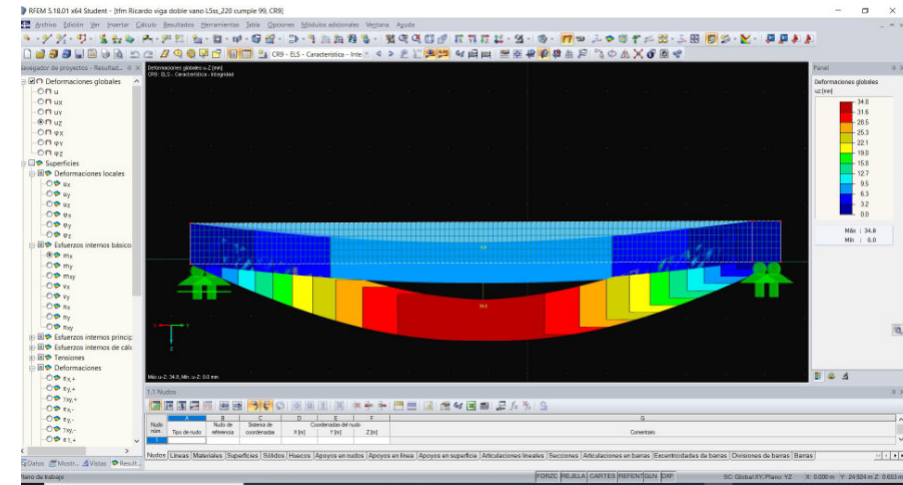
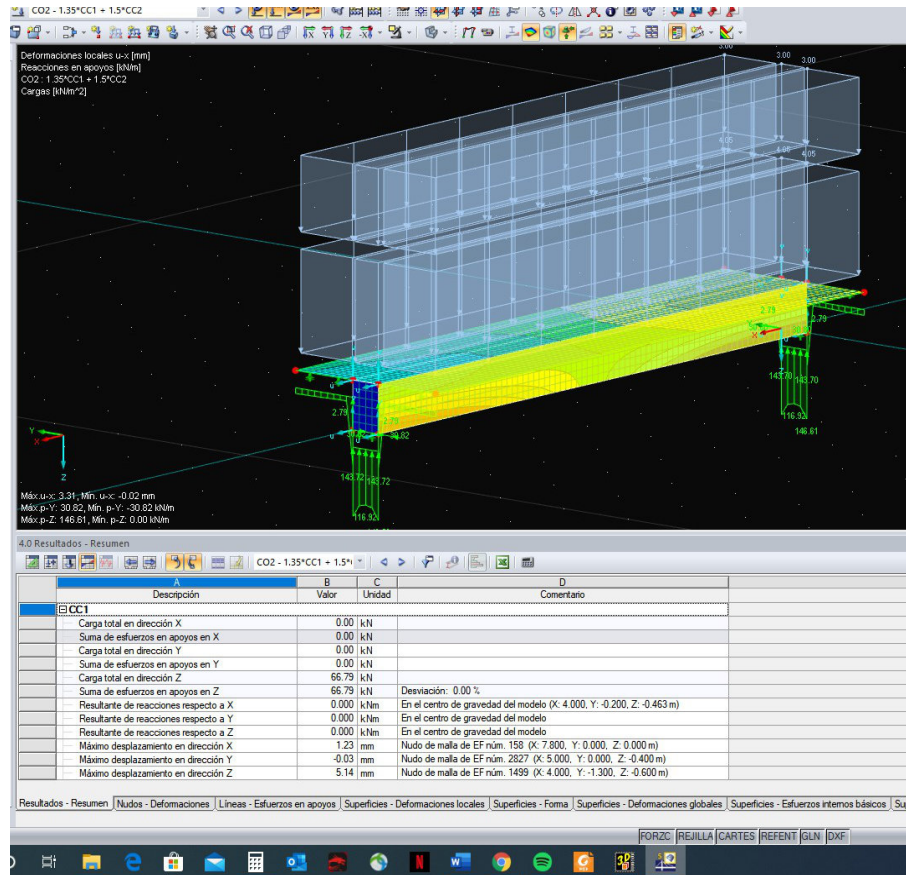
**Exención de responsabilidad**

El programa ha sido creado para ayudar a los ingenieros en su trabajo diario. Es un software de ingeniería que se ocupa de cuestiones complejas de cálculo estructural y análisis de acondicionamiento de edificaciones. Por lo tanto, este programa solo podrá ser utilizado por ingenieros cualificados y experimentados, con un conocimiento profundo del diseño, cálculo estructural y acondicionamiento ambiental aplicado a estructuras de madera. El usuario del programa está obligado a revisar todos los datos de entrada, sin importar si estos han sido introducidos por el usuario o han sido proporcionados por defecto por el programa, así como a comprobar la plausibilidad de todos los resultados. La utilización de los resultados del programa no debe ser la base de cualquier hecho o decisión. Cualquier utilización de los resultados del programa está permitida únicamente si estos han sido comprobados exhaustivamente y validados por un ingeniero o arquitecto especializado en estructuras y/o acondicionamiento térmico de edificaciones. El usuario tiene la posibilidad de realizar impresiones desde el programa. No está permitida la modificación de ninguno de estos datos. Store Enso Wood Products GmbH no asume ninguna garantía con respecto al software. El programa ha sido desarrollado con la máxima diligencia, sin embargo Store Enso Wood Products GmbH, ni explícita ni implícitamente, ofrece ninguna garantía en cuanto a la exactitud, validez, vigencia e integridad de los datos y la información proporcionados por el programa. Store Enso Wood Products GmbH tampoco asume ninguna garantía en relación con el uso general del programa, su idoneidad para un propósito especial o de la confiabilidad del software con otros de terceros o proveedores. Bajo las condiciones anteriormente mencionadas, Store Enso Wood Products GmbH tampoco será responsable de fallos operativos o de la pérdida de programas y/o datos de entrada de procesamiento de datos del usuario. Legislación aplicable: Estas condiciones de uso se rigen por la legislación de Austria excluyendo, sin embargo, cualquier conflicto legal y cualquier legislación relativa a la Convención de la Comisión Internacional de Mercaderías (CISG).





## 7.2 Anexo 2: Cálculo de vigas de CLT de sección hueca de 13,5 mts de vano en Dlubal



Uz:  $34.8 < 45$  (L/300) con Lss-220, finalmente se realiza el modelado con Lss-240 por seguridad

No se adjunta el informe completo del cálculo en esta presentación para no hacer muy voluminoso el presente trabajo, en caso de interés, por favor contactad conmigo en el siguiente email:  
[rdemiguelfernandez@outlook.es](mailto:rdemiguelfernandez@outlook.es)

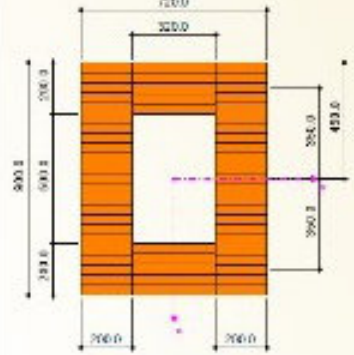


## 7.3 Anexo 3: Cálculo de sección equivalente

No se adjunta el informe completo del cálculo en Dlubal en esta presentación para no hacer muy voluminoso el presente trabajo. En caso de interés por verlo, se ruega contacten a través del siguiente email:

[rdemiguelfernandez@outlook.es](mailto:rdemiguelfernandez@outlook.es)

Propiedades de la sección	Unidad	Valor	Unidad
Alzura	m	900.0	mm
Ancho	m	700.0	mm
Alzura	m <sub>1</sub>	200.0	mm
Ancho	m <sub>2</sub>	300.0	mm
Ancho	m <sub>3</sub>	200.0	mm
Alzura	m <sub>4</sub>	200.0	mm
Coefficiente del empalmado	γ <sub>1</sub>	1.000	
Coefficiente del empalmado	γ <sub>2</sub>	1.000	
Posición del centro de gravedad	z <sub>G</sub>	400.0	mm
Distancia a la fibra neutra	z <sub>1</sub>	180.0	mm
Distancia a la fibra neutra	z <sub>2</sub>	380.0	mm
Distancia a la fibra neutra	z <sub>3</sub>	0.0	mm
Distancia a la fibra neutra	z <sub>4</sub>	380.0	mm
Distancia a la fibra neutra	z <sub>5</sub>	-180.0	mm
Área de la sección	A <sub>tot</sub>	4800.00	cm <sup>2</sup>
Momento de inercia de la sección respecto al eje	I <sub>y,eff</sub>	4.041E+06	cm <sup>4</sup>
Momento de inercia de la sección respecto al eje	I <sub>z,eff</sub>	2.663E+06	cm <sup>4</sup>
Radio de giro sobre el eje	i <sub>y,eff</sub>	287.8	mm
Radio de giro sobre el eje	i <sub>z,eff</sub>	223.6	mm
Peso	G	180.6	kg/m
Superficie	A <sub>superf</sub>	5.240	m <sup>2</sup> /m
Módulo de torsión	J <sub>t</sub>	5.330E+05	cm <sup>4</sup>
Módulo resistente elástico	W <sub>y,elast</sub>	89752.60	cm <sup>3</sup>
Módulo resistente elástico	W <sub>z,elast</sub>	89752.60	cm <sup>3</sup>
Módulo resistente elástico	W <sub>elast</sub>	72867.90	cm <sup>3</sup>
Módulo resistente elástico	W <sub>elast</sub>	72867.90	cm <sup>3</sup>
Momento estático	S <sub>y,est</sub>	6280.00	cm <sup>4</sup>
Momento estático	S <sub>z,est</sub>	5400.00	cm <sup>4</sup>



## 7.4 Anexo 4: Informe con resultados cálculo Dlubal

No se adjunta el informe completo del cálculo en Dlubal en esta presentación para no hacer muy voluminoso el presente trabajo. En caso de interés por verlo, se ruega contacten a través del siguiente email:

[rdemiguelfernandez@outlook.es](mailto:rdemiguelfernandez@outlook.es)

