



Trabajo Final de Master

# **EDIFICIOS ALTOS DE MADERA LAMINADA**

## **CASO DE ESTUDIO: LAKE SHORE APARTAMENTS**

MASTER EN ARQUITECTURA AVANZADA, PAISAJE, URBANISMO Y DISEÑO 6  
ESPECIALIZACIÓN EN TECNOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA Y EL URBANISMO

Universidad Politécnica de Valencia

Autora:

**Arquitecta Roxanna Lake Guerrero**

Tutores:

Doctora Arquitecta Apolonia Begoña Serrano Lanzarote

Doctor Arquitecto Adolfo Alonso Durá

Doctor Arquitecto Ernesto Fenollosa Forner

VALENCIA, DICIEMBRE 2014



## **DEDICATORIA**

*Esta tesina de master se la dedico a mi madre, Helias Maria Guerrero Reyes, por la cual siento un gran orgullo y respeto, quien siempre con su ejemplo me ha enseñado a persistir en todos los proyectos que me he planteado a pesar de las adversidades que se me presenten.*

---



## Agradecimientos

En este periodo de tiempo que me ha llevado la realización de este master, han sido muchas las personas e instituciones que en mayor o menor medida han contribuido a su realización, directa o indirecta, dándome apoyo emocional o profesional. Debido a esto me gustaría dedicarles unas palabras de agradecimiento. No nombrare a todos, pero es segura que todos saben lo profundamente agradecida que estoy.

**A Dios**, gracias Señor por bendecirme tanto, llenarme diariamente de tu gracia e iluminar mi camino. Gracias por demostrarme cada día que solo contigo las cosas son posibles.

**A mi esposo**, Diógenes Peña, por tu paciencia en este viaje que juntos decidimos emprender, pero que ambos sabemos lo difícil que ha sido, gracias por perseverar pacientemente brindándome apoyo, alegrar mis días, haciendo mas corta la distancia que nos separa. Te amo!

**A mis padres**, Helias María Guerrero Reyes y Juan Alberto Lake Sánchez, gracias por ser y mantenerse siendo padres ejemplares, guiándome incondicionalmente y sin cansancio, apoyándome en todo momento.

**A mis hermanos**, Michell, Juan Alberto, Yuberys, por darme ánimos y mantenerse siempre atentos, compartir este periodo y experiencia conmigo.

**A mi Familia**, por tenerme siempre entre sus oraciones, estar pendiente de todos mis pasos y orientarme.

**A mis amigos**, Reybelys Perez, Rossy Jenny García, gracias por mantenerse siempre comunicadas conmigo y no alejarse de mi, dandome apoyo emocional como siempre lo han hecho y mis nuevos amigos Andreina Caraballo y Angely Matos, les agradezco su solidaridad y cariño, que hicieron que el estar lejos de casa se sintiera menos.

**A la MESCYT**, gracias por el apoyo económico a través del programa de Becas Internacionales, el cual me ha permitido culminar el master exitosamente, sin él esto no hubiese sido posible, por lo cual estoy altamente agradecida.

**A la universidad**, en especial a la Oficina de Acción Internacional, gracias por su organización, disciplina, brindando siempre las condiciones necesarias para la formación.

**A mis asesores**, Apolonia Begoña Serrano Lanzarote, Adolfo Alonso Durá, Ernesto Fenollosa Forner, gracias por sus esfuerzo y dedicación, por compartir sus conocimiento, ser tan meticulosos en la correcciones y pacientes, mil gracias.

*Roxanna Lake*

---



<b>Contenido</b>	
<b>1. Marco General</b>	<b>9</b>
1.1. Introducción	11
1.2. Motivación	12
1.3. Objetivos	12
1.4. Metodología	13
<b>2. Estado actual de la madera laminada estructural.</b>	<b>15</b>
2.1 Antecedentes	18
2.2 Generalidades	19
2.3 Balance ecológico en la edificación	22
2.4 Usos frecuentes en la actualidad	24
2.5 Nuevos avances en el sector de la madera laminada de uso estructural	26
<b>3. Sistemas estructurales verticales</b>	<b>29</b>
3.1 Aspectos generales de las estructuras verticales	32
3.2 Acciones en la estructura	34
3.3 Sistemas de transmisión de cargas	35
3.4 Principales fundamentos de refuerzo	38
3.5 Sistemas de soporte de carga para el forjado	43
3.6 Muros y pilares	44
3.7 Uniones	44
<b>4. Análisis de casos de estudios de Rascacielos en madera</b>	<b>45</b>
4.1 El caso de Vancouver: Tall Wood. Michael Green	49
4.2 Otros casos de estudios	55
- El caso de Noruega: Treet. Bergen y Omegn Building Society (BOB) (Abrahamsen, R. B. 2014).	55
- El caso de Munich: J. W. Van de Kuilen. 2010.	57
<b>5. Documentación y características de Lake Shore Drive Apartments</b>	<b>59</b>
5.1 Diseño Arquitectónico	61
5.2 Diseño Estructural	64
5.3 Sistema de transmisión de cargas	67

---

<b>6. Evaluación y diagnóstico del comportamiento estructural de Lake Shore Drive Apartments en acero, hormigón y madera laminada</b>	<b>69</b>
6.1 Modelo de la estructura, geometría y materiales	74
6.2 Modelo de las acciones	77
6.3 Combinaciones adoptadas	80
6.4 Solicitaciones en pórticos	82
6.5 Deformaciones en pórticos	91
6.6 Solicitaciones en forjados	94
6.7 Estudio de energía embebida de los pilares de los tres sistemas estructurales.	100
<b>7. Resultados</b>	<b>103</b>
7.1 Dimensionamiento pórtico tipo	106
7.2 Parámetros de mantenimiento de las estructuras de madera laminada.	113
<b>8. Conclusiones</b>	<b>115</b>
<b>9. Bibliografía</b>	<b>121</b>
Libros	123
Artículo de revista científica	124
Artículos de revistas	124
Página Web	125
Otros	125
Referencias de las figuras	126
<b>10. Anexos</b>	<b>131</b>
Anexo 1: Tablas y graficas complementarios para el cálculos de las acciones.	133
Anexo 2: Combinaciones realizadas por el programa Architrave para las limitaciones ELU y ELS	135
Anexo 3: Compendio de solicitaciones agrupadas por sistemas estructural en su situación mas desfavorable.	149

---





## **1. Marco General**

1.1 Introducción

1.2 Motivación

1.3 Objetivos

1.4 Metodología



## 1.1 Introducción

Los edificios altos son estructuras tecnológicas habitables, donde predomina la verticalidad con una huella mínima en el suelo. Estos son necesarios para poder cubrir la alta densidad de las grandes ciudades cada vez más pobladas debido a las tendencias migratorias del campo a la ciudad.

Además, construyendo en altura, parte del terreno pasa a estar disponible para su reconstrucción por la naturaleza, suponiendo un aumento de las zonas verdes, contribuyendo a la sostenibilidad del planeta, mimetizando la degradación y ocupación del suelo como consecuencia de los procesos de extracción, generación de residuos y vertido definitivo de los mismos, que se derivan de la degradación y deterioro de entornos natural y paisajístico, pérdida de ecosistemas y biodiversidad, etc.

Ciudades como Hong Kong, Tokio, New York y Chicago son protagonistas de esta tipología edificatoria, constituyendo un sello representativo llenos de expresividad tecnológica. Pero la arquitectura actual demanda proyectos más sostenibles, desde la construcción misma del edificio y a lo largo de toda su vida útil, lo cual se logra mediante una correcta adaptación al medio y adecuada materialización, disminuyendo así la degeneración del medio ambiente y mejorando la calidad de vida de los usuarios.

Es por ello que cada vez más se aboga por el uso de materiales que sean sostenibles como lo es la madera laminada, yendo más allá de la pura imagen, ajustando la ingeniería y proyectando consideraciones estructurales como la ductilidad y la buena apariencia de las estructuras y su eficacia en la obra seca, sin perder de vista su carácter de herramienta por encima de sus valores plásticos. En cualquier caso, el uso de la madera laminada debería potenciarse más, y no solo bajo los sistemas habituales, ya que su aplicación ofrece posibilidades que van más allá de la restauración o la cubrición de grandes luces como se pretende demostrar con esta investigación.

Los avances tecnológicos que han surgido en los últimos años referente a este material están permitiendo que cada vez más sea utilizada como alternativa de sistema constructivo en comparación con los dos materiales de construcción más utilizados, hormigón y acero, representando ventajas significativas frente a estos, como su resistencia, valor estético y ligereza.

Si a esto le sumamos las reducciones en el consumo de energía embebida que representa para la obra su proceso de fabricación como otro beneficio que aporta su utilización, y la arquitectura actual demandando cada día ser más sostenible, humanista y con un diálogo más estrecho con el territorio, esta alternativa constructiva es el futuro de los sistemas estructurales.

Esta tesina estudiará si este material resiste las acciones a que se ve expuesta una estructura vertical, como las cargas horizontales de viento y sismo, a fin de aportarle rigidez y estabilidad al sistema con un mínimo de intervención de otro material y cuál es la energía embebida que tiene su fabricación y montaje para poder compararlo con un sistema estructural igual realizado en hormigón armado y acero y analizar las ventajas frente a las desventajas de su utilización.

Se parte en definitiva de la necesidad detectada de aportar unos valores contrastados del consumo energético que supone las estructuras. La mayoría de los estudios realizados hasta ahora se encaminan exclusivamente hacia el ahorro energético durante el uso de los edificios. Se ha creído, por lo tanto, necesario poder cuantificar el gasto energético que supone en una de sus etapas principales.

*“Así, cada material posee sus propias cualidades que se deben conocer para poder trabajar con él. Eso vale también para el acero y el hormigón. Reconocemos que no se consigue*

*nada por el material, sino solo por el uso correcto del material. Tampoco los nuevos materiales nos aseguran una superioridad. Cada materia solo vale lo que hacemos con ella.*" Ludwig Mies van der Rohe. (Rohe, 1981, p.46)

### 1.2 Motivación

La razón principal que me motiva a desarrollar una investigación de proyecto de edificio en altura, cuya estructura sea realizada en madera laminada, es apuntando a que los edificios sean ecológicos desde su construcción.

Esto es debido a que gracias a su escala como infraestructura densa, con poco porcentaje de ocupación de suelo, lo convierte en tipología edificatoria idónea para las grandes ciudades, de modo que se hace repetitivo su utilización, tanto para uso residencial como oficinas y/o comercial, haciendo necesario que se estudie como disminuir su enorme consumo de energía embebida en la fabricación de los elementos constructivos y en el transporte y montaje. De esta manera que se perfecciona la tipología de edificio completamente ecológico y deje de ser solamente pensado para que lo sea en su estado de servicio.

Igualmente motiva la aspiración de que la presente investigación sirva para potenciar el uso de la madera laminada en los diseños estructurales de la arquitectura, dándole otro enfoque que no sea el de cubrir grandes luces que es su principal uso.

### 1.3 Objetivos

#### General:

Determinar si la madera laminada puede satisfacer las necesidades que el hormigón armado y el acero cubren para construir edificios en altura, en los lugares que abunde su producción.

#### Particulares:

- Investigar y analizar experiencias concretas que puedan existir en utilización de la madera para edificios en altura.
- Establecer los requerimientos estructurales que debe tener un edificio en altura construido con madera laminada.
- Poder establecer unos criterios para incorporar este tipo de estructuras a programas de cálculo estructural existentes hoy en día en el mercado profesional.
- Estimar la energía embebida tanto en la fase de fabricación, como en la ejecución, mantenimientos y posterior demolición.
- Establecer los parámetros de mantenimiento que deberían realizarse.
- Identificar ventajas y barreras que podría suponer el uso de este material, especialmente, frente a otros mucho más utilizados como es el hormigón o el acero.

## 1.4 Metodología

Para poder lograr esta investigación se desarrollarán las siguientes fases con el fin de establecer un procedimiento racional para alcanzar los resultados de manera eficaz.

### **Fase 1: Estado actual de la madera laminada estructural.**

En esta fase se pretende establecer el estado del arte de la madera laminada con fines estructurales, con el objetivo de situarnos en la actualidad de la utilización de este material. En este se desarrollarán los siguientes acápites: Antecedentes, generalidades, balance ecológico, usos frecuentes en la actualidad, nuevos avances.

Para lograrlo se estudiarán revistas y libros especializados en la materia, se consultará a las empresas, especialmente ubicadas en el norte de Europa, que ya tienen alguna experiencia en el uso innovador de la madera estructural y visitas a las principales asociaciones de empresarios de la madera para la construcción.

### **Fase 2: Establecer cuáles son las características que debe tener las estructuras verticales.**

Con el fin de contextualizarnos sobre las características que deben cumplir las estructuras de edificios altos se establecen los siguientes puntos a desarrollar: Aspectos generales de las estructuras verticales, acciones en el sistema estructural, como se transmiten las cargas, sistemas de refuerzo, sistemas de soporte de carga para el forjado, muros y pilares, uniones.

Para ello se estudiarán libros especializados en estructuras verticales y rascacielos, se examinarán apuntes de teoría de estructura y se consultarán especialistas en la materia.

### **Fase 3: Elección caso de estudio.**

Se identificará y caracterizará estructural y constructivamente un edificio en altura que pudiera ser fácilmente replicable en el mercado, de manera que constituyera un modelo representativo de edificios en altura.

Se analizarán diversos edificios ya construidos, para lo que se efectuará un análisis comparativo de varios con idea de identificar aquel que pueda constituir un modelo replicable.

### **Fase 4: Análisis y diagnóstico de la estructura.**

En esta fase se estudiará el comportamiento estructural del edificio seleccionado mediante la herramienta informática Architrave, para luego proceder a la interpretación de los resultados obtenidos respondiendo a las siguientes preguntas:

- Cuál es el motivo del fallo? Agotamiento, flecha, estabilidad...
- Qué porcentaje del límite ha alcanzado la variable que se está analizando?
- Se ha elegido el mejor diseño?
- Están los perfiles correctamente orientados?

- Que hipótesis de carga es determinante y que produce el fallo?
- Se comporta la estructura como se predijo en el predimensionamiento?
- Se ha elegido el tipo de cimentación adecuada?
- Cabe alguna modificación estructural?

También se estudiará otros aspectos, bajo un análisis multicriterio que incluyera, entre otros, la energía embebida y la generación de residuos (recurriendo para ello a las principales bases de datos especializadas en la materia), evaluación de la durabilidad o vida de servicio, facilidad de ejecución,... de cada uno de los tipos de estructura analizados. La cuantificación de energía se ha centrado en una parte de la estructura, los pilares, con el objetivo de obtener las cifras del consumo energético en esta parte de las estructuras que tiene una gran repercusión.

### **Fase 5: Resultados**

Muestra comparativa del uso de madera laminada, hormigón y acero en el edificio en cuestión.

Dimensionamiento del edificio con los tres sistemas estructurales y compararlos prestando atención a los siguientes puntos:

- Módulo estructural
- Sistema de arriostramiento
- Parámetros de mantenimiento

### **Fase 6: Conclusiones**



## **2. Estado actual de la madera laminada estructural.**

2.1 Antecedentes

2.2 Generalidades

2.3 Balance ecológico

2.4 Usos frecuentes en la actualidad

2.5 Nuevos avances





Los avances tecnológicos en los 15 últimos años han llevado al desarrollo y uso comercial de materiales nuevos con características positivas para el medio ambiente como lo es la madera laminada, un material 100% reciclable y renovable, por lo tanto sostenible.

Son muchas las posibilidades de utilización que esta tiene como elemento estructural, especialmente para la ejecución de estructuras complejas, sin ser estas su único campo de trabajo. Aún más hoy en día, con los adelantos científico que se han venido desarrollando en los últimos años a través de la investigación sobre nuevas adherencias y nuevos sistemas de anclajes que permiten soportar mayores cargas con menos sección del elemento, haciendo de esta una buena solución constructiva.

Y conociendo todas las ventajas que se han ido estudiando desde los años 60', en comparación con los dos materiales de construcción convencionales (hormigón y acero), como su respuesta frente al fuego, resistencia, valor estético y ligereza, y la arquitectura actual demandando cada día más ser más sostenible, humanista y con un diálogo más estrecho con el territorio, esta alternativa constructiva es el futuro de los sistemas estructurales.

La incorporación de técnicas de diseño y fabricación digital para una planificación integrada, aplicación, control y mejora continua en todos los procesos materiales de fábrica y los recursos asociados con el producto, están generando la creación de un gran campo de trabajo para la madera laminada como material de construcción y un predecible campo de desarrollo en el futuro para la edificación de todo tipo de proyecto, sean estos desde obras singulares hasta una vivienda mínima.

Integrar estos dos aspectos, diseño y fabricación, permite la construcción de espacios conceptualmente innovadores. Un ejemplo de ello es el pabellón de verano de la Serpentine Gallery, proyectado en el 2005 por Álvaro Siza y Eduardo Souto de Moura, (ver figura 2.1). Al poder mecanizar nudos y uniones mediante máquinas de control numérico bidimensionales, lograron obtener unos niveles de capacidad de producción elevados y resolver gran parte de los encuentros mediante uniones sencillas.

La idea es empezar a visualizar el uso de madera laminada como principal solución constructiva en los lugares donde esta abunde y no represente un consumo en emisiones de CO<sub>2</sub> solo en transporte, ya que la producción de hormigón y acero contribuye de manera significativa a las emisiones de gases por efecto invernadero al medio ambiente.

*“La sostenibilidad consiste en construir pensando en el futuro, no solo teniendo en cuenta la resistencia física de un edificio, sino pensando también en su resistencia estilística, en los usos del futuro y en la resistencia del propio planeta y de los recursos energéticos”.* Renzo Piano. (Piano, 1998, p.60)



Figura 2.1. Serpentine Gallery, 2005

### 2.1 Antecedentes

La historia de este producto refleja la capacidad humana para superar los problemas que surgían a la hora de cubrir grandes luces, utilizando piezas rectas o curvas de madera, así como la optimización de su uso.

Aunque es difícil establecer su origen, cuyo punto de inflexión lo marca la aparición de los adhesivos estructurales, la madera laminada con carácter estructural nació en el siglo XVI con el arquitecto Filiberto de l'Orne (1515-1570) quien fabricó arcos con tablas recortadas en forma de camones que se clavaban contrapeándose hasta conseguir una sección suficientemente rígida. La concepción actual de la madera laminada encolada es atribuida al carpintero alemán Karl-Friedrich-otto Hetzer, gracias a los progresos de la industria química de las colas, pudo sustituir las bridas, pernos y clavos que se utilizaban. (García – Esteba, Guindeo – Casasus, Peraza – Oramas, & De palacios de Palacios, 2002, pp. 179 - 183)

Hasta el siglo XX solamente se realizan uniones carpinteras acompañadas de algún elemento metálico utilizado como medio de afianzamiento. Al intervenir en esta clase de uniones los esfuerzos de compresión se transmiten por contacto y sin dificultad. Los tacos de madera utilizados hasta entonces para formar piezas compuestas con el fin de realizar empalmes de barras sometidas a esfuerzos de tracción, o para incrementar la capacidad de resistencia a la flexión de las vigas, son reemplazados por conectores de acero que en sus comienzos son placas dobladas en forma de U o de V. Posteriormente se desarrollan conectores de anillo introducidos de modo ajustado entre dos piezas de madera. Estos conectores permitieron transmisiones de cargas más elevadas en piezas de mayor escuadría. El uso de un material más resistente facilitó el diseño de uniones de apariencia más ligera.



Figura 2.2. Patente Otto Hetzer

El primer país donde este producto tuvo un espectacular desarrollo fue Suiza. En 1920 existían más de 200 edificios con viga o arcos de tipo Hetzer, (ver figura 2.2). Aunque las primeras construcciones que incorporaron madera laminada en el desarrollo estructural de proyectos se fechan en la década de los ochenta, lo cierto es que su uso no comenzó a generalizarse hasta los noventa, especialmente en su segunda mitad.

En Estados Unidos Max Hanisch fue el responsable de la introducción de la tecnología de la madera laminada en 1934 empleando arcos de madera laminada encolada con adhesivos.

En 1952 los fabricantes más importantes de estructuras de madera, tanto de laminada como de aserrada, unieron sus fuerzas y crearon el American Institute of Timber Construction (AITC). Esta Asociación Nacional Técnica fue creada para normalizar la industria y para su promoción. La aparición de la madera laminada encolada permitió ofrecer mejor repuesta estructural al presentar una mayor rigidez frente a las uniones mecánicas laminadas, permitiendo una mayor libertad formal por la facilidad de realizar piezas curvadas.

## 2.2 Generalidades

*“Madera laminada es la unión de tablas a través de sus cantos, caras y extremos, con sus fibras en su misma dirección, conformando un elemento no limitado en escuadría ni en largo, y que funciona como una sola unidad estructural”.* Ingeniero Vicente Pérez. (Pérez, 1992)

La madera laminada encolada son elementos estructurales que se forman a través del pegado de láminas de madera con la dirección de la fibra fundamentalmente paralela. El espesor de láminas oscila regularmente entre 20 mm y 45 mm, siendo habituales espesores de 38 mm. El número de láminas es igual o superior a 4.

Para su fabricación se utilizan madera maciza estructural, adhesivos estructurales, productos protectores y productos de acabado. Es idónea para la ejecución de estructuras complejas y a las cuales se requiera conferir un aspecto único y elegante como podemos apreciar en Haesley Nine Bridges Golf Club house (ver figura 2.3). También su utilización está desarrollándose en la construcción residencial, debido al crecimiento de la producción estándar según establece Robert Figueras, gerente de Tecnofusta innovació, quien afirma que el crecimiento que ha tenido en los últimos años ha sido favorecido por darles a conocer a los arquitectos las posibilidades que este producto puede ofrecer, lo que ha conllevado la sustitución de la madera maciza por la madera laminada.

Ventajas: entre las ventajas resaltan sus cualidades estéticas, sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad. Permite la creación de elementos de sección variable, libres de defecto y de directriz curva. Facilidad y rapidez de su instalación, También responden muy bien ante situaciones de incendio, cumpliendo los requisitos de estabilidad requeridos por el Código Técnico de la Edificación. Otra ventaja que esta tiene es su cualidad intrínseca de aislante térmico, aunque no se usa con este objetivo, pero es esta propiedad de aplicación en su capacidad de evitar puentes térmicos formando parte de un elemento constructivo al que si afecta el aislamiento térmico como son los pilares por ejemplo.

Puntos débiles: puesto que el proceso de pegado requiere un control de calidad estricto tecnológico, es necesario contar con personal especializado e instalaciones que permitan una manufactura con buen control de calidad. Esto hace que las maderas laminadas sean en general más costosas que las maderas aserradas. También en ambientes húmedos, puede variar el ancho y espesor del elemento si no se elige correctamente.

Maderas: habitualmente se utilizan especies como las coníferas (pinos y abetos) para la clase de servicio 1 y 2, y Pino Silvestre para la clase 3 y 4. Esto es debido, a que el origen del sistema estructural se dio en países europeos de donde son nativas estas especies. Estas maderas pueden alcanzar densidades básicas de  $450 \text{ Kg/m}^3$ , la cual es muy baja comparada con la del acero de  $7850 \text{ Kg/m}^3$  y el hormigón de  $2.400 \text{ Kg/m}^3$  y pueden tener módulos de elasticidad de  $9000 \text{ MPa}$  ( $91.771 \text{ kg/cm}^2$ ) y su resistencia a la flexión es de aproximadamente  $800 \text{ kg/cm}^2$ . La densidad de la madera laminada con respecto a la madera aserrada estructural aumenta alrededor de un 10%.

En Norteamérica se utiliza también el Pino Oregón, Hemlock Occidental, Picea plateada, Pino amarillo del sur, Pino del caribe, Roble blanco americano, Cedro rojo del Pacífico y Cedro amarillo. A nivel general, como especie frondosa se puede mencionar el Eucalipto, Roble, Castaño, y en menor medida el Fresno, Haya e Iroko.

Propiedades mecánicas: las propiedades mecánicas están normalizadas por las clases resistentes, las cuales están definidas en la norma UNE-EN 14080, que distingue 14 clases resistentes, que se exponen en el anexo 1. De estas 7 se presentan cuando la composición es homogénea y las otras 7 cuando es combinada.

Durabilidad: en la práctica no existen problemas de durabilidad para las estructuras de madera laminada en las clases de servicio 1 (interior) y 2 (interior y bajo cubierta sin exposición directa al agua de lluvia). Para las clases de servicio 3.1 (exterior bajo cubierta) y 3.2 (exterior bajo intemperie) se requiere especies de mayor durabilidad natural o tratamientos químicos de protección. Normalmente no se utilizan para la clase de servicio 4 (al exterior en contacto con el suelo o agua dulce) o 5 (al exterior en contacto con el agua de mar).

Para la utilización en clase de servicio 3 y 4, las láminas se tratan previamente por inmersión, pulverización (dependiendo de sus dimensiones) o con otros acabados superficiales, teniendo en cuenta la compatibilidad del tratamiento con el adhesivo. Además se elige una especie con la durabilidad natural suficiente para la clase de uso que corresponda la estructura.

Tipos:

Se clasifican según la orientación de las láminas, horizontal y vertical; el número de tablas utilizadas, en de una sola tabla o más de una tabla; el grado de simetría de la sección, equilibras o simétricas y asimétricas; geometría de la sección, en sección continua o variable; calificación estructural de las láminas, homogénea o combinada; grado de prefabricación, elementos de prefabricación o a medidas; según la orientación de las láminas, misma orientación o distinta orientación; y según su apariencia y acabado superficial, en estándar, en blanco sin acabado, con acabado.

La madera laminada combinada se refiere a que no todas las láminas son de la misma clase resistente. Las combinaciones más frecuentes son aquellas en las que las láminas exteriores son de una clase resistente superior a las láminas interiores y cumplen con la proporción definida entre láminas exteriores e interiores en la normativa. En Estado Unidos a esta clasificación se le llama Híbrida.

En el caso de la orientación de las láminas, las de distinta orientación, las láminas extremas tienen el corazón orientado al exterior para mejorar su durabilidad. Estas se usan para elementos destinados a la clase de servicio 3.

Uniones: las uniones constituyen uno de los puntos cruciales en el diseño de las estructuras de maderas. Estas pueden ser encoladas, mecánicas, y carpinteras. Actualmente las investigaciones en uniones están encaminadas a la reproducción comportamientos estructurales de rótulas, enlaces rígidos, empotramientos en la cimentación, empalmes de barras, ensambles viga/pilar, nudos de celosías, nudos de emparrillados, nudos de estructuras espaciales. (Argüelles - Álvarez, 2010) Ver Fig. 2.4.



Figura 2.3. Haesley Nine Bridges Golf Club house.

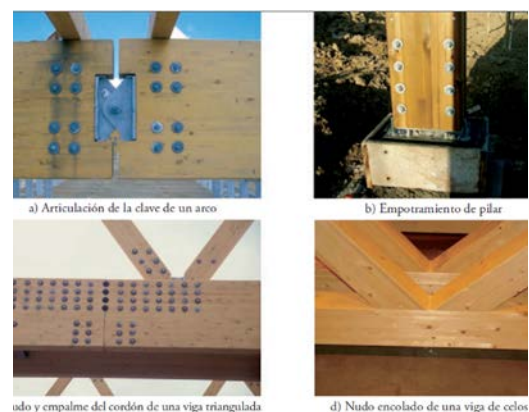


Figura 2.4. Diferentes tipos de uniones

**Adhesivos:** los adhesivos más empleados son de tres tipos: caseína, urea y resorcina. Este se elige en función del lugar de ubicación de la pieza y su exposición a la humedad (clases de servicio). Es fundamental que este componente se adapte a las condiciones de servicio de las piezas para evitar problemas de durabilidad.

**Dimensiones y tolerancias:** la longitud y la propia forma de la pieza están limitada por el tamaño de la fábrica y por las limitaciones de transporte. La longitud máxima en pieza recta está en torno a los 36 o 38 m. La anchura y altura envolventes del vehículo de transporte se limitan a unos 4,50 m, por estas razones es frecuente que la estructura deba componerse por varias piezas unidas en obra mediante juntas de transporte.

La madera laminada encolada se fabrica a partir de tablas de madera maciza con formatos y tamaños variables, siendo frecuente el uso de tablas de entre 100 y 220 mm de ancho y grosores oscilando entre 20 mm y 45 mm. Los valores nominales de anchura, altura y longitud de las piezas se ajustan a las tolerancias especificadas en la norma UNE-EN 390.

**Contenido de humedad:** el contenido de humedad medio de cada lámina para entrar en fabricación está normalizado y depende de si la madera ha sido tratada o no con un producto protector. El contenido final de humedad de las piezas suministradas a obra debe ser acorde a la humedad relativa de servicio esperada, siendo recomendables contenidos de humedad de la madera inferiores al 15% para ambientes interiores (clases de servicio 1 y 2) e inferiores al 18% para madera tratada de uso exterior (clase de servicio 3).

**Reacción al fuego:** su clase de reacción al fuego, según la norma UNE – EN 14080, es D-s2, d0, siempre que cumpla con una densidad media mínima de 380 Kg/m<sup>3</sup> y el espesor mínimo de la pieza sea de 40mm. Si el fabricante define una mejor clase de reacción al fuego, tiene que aportar un informe de ensayo y su clasificación según la norma UNE –EN 13501-1.

Para la resistencia al fuego se toma como parámetro la velocidad de carbonización, los cuales se considera como valores eficaces de 0,5 a 0,7 mm/min. Esto quiere decir por ejemplo, una pieza de madera laminada trabajando a flexión con tres caras expuestas al fuego que sería la típica configuración de una vigueta o correa vista, requiere una anchura mínima de 90 a 100mm para alcanzar la resistencia al fuego de 30 minutos (R 30). De cualquier modo, esto debe comprobarse mediante el cálculo según la normativa de Seguridad contra Incendio del CTE o la norma UNE – EN 1995 -1-2.

**Almacenaje, transporte y montaje:** para ello se debe proteger de la humedad, ralladura y decoloración recubriéndola con plásticos opacos y se colocándola sobre rastreles, manteniéndola protegida hasta su instalación. Durante el transporte y montaje se evita someter las piezas a tensiones superiores a las previstas, por lo que en algunos casos es necesario utilizar más de una grúa con un amarre bien distribuido para moverlas.

Se debe tener en cuenta las longitudes para la circulación por carretera, siendo de fácil transporte longitudes hasta 13,30 m, a partir de esta hay que solicitar permisos y autorizaciones de circulación y prever que la ruta tenga acceso para los giros que deba realizar el medio de transporte especial. En la práctica se ha llegado a transportar hasta 50 m de largo, 5 metros de ancho y la altura que permita la cabina tractora. En caso de que existan limitaciones en la vía de circulación se fracciona las piezas a transportar.

### 2.3 Balance ecológico en la edificación

Tras la crisis energética de la década de los setenta se comienza a estudiar el comportamiento energético de los edificios, introduciendo conceptos como la energía generada dentro de los mismos, transmitida al exterior a través de sus paramentos. Actualmente se está trabajando desde diferentes frentes en la búsqueda de una mayor eficiencia energética en la edificación, entre los cuales están:

La investigación y desarrollo industrial de los materiales,

Líneas de investigación sobre el comportamiento energético de los edificios,

Introducción de normativas para la utilización de energías renovables,

Programas de concienciación ciudadana para el ahorro.

*“Las múltiples formas de energía que están presentes en la construcción y en el estado de servicio de los edificios, interactúan de forma natural con los seres vivos, es por ello importante velar por la circulación de todas estas energías, su intensidad y dosificación para diseñar y construir con ellas logrando la armonía entre el hombre con el medio ambiente.”* (Suzuki, M., Oka, T., & Okada, K., 1995).

La disminución de la huella ecológica de los componentes y materiales de la construcción contribuye a la reducción de impactos asociados, como el colapso de los recursos naturales, fruto de una sobreexplotación de las materias primas, las cuales son derivadas de unas prácticas de consumo no sostenibles. Estos ocasionan la desaparición de los materiales no renovables, tales como los combustibles fósiles, suponiendo un impacto irreversible por lo que su sobreexplotación tiene efectos difícilmente recuperables desde el punto de vista del desarrollo sostenible.

La selección de aquellos materiales que requieren el mínimo uso e intensidad de procesos energéticos para su extracción, producción, transformación y desecho, reduce el uso de combustibles fósiles y las emisiones a la atmósfera asociadas a los procesos energéticos. Ejemplo de esto sería, la madera laminada como elemento en las operaciones de construcción.

*“Se estima que a nivel mundial se debería implementar en el mediano plazo una política activa de forestación para producir cerca de 500.000 millones toneladas de madera para absorber los niveles actuales de emisiones tóxicas hasta el año 2025. Las estimaciones económicas realizadas para eliminar 1 tonelada de CO<sub>2</sub> por medio de la replantación de árboles al año 2002 es de USA\$1,00. La producción, el transporte, y la elaboración con valor agregado de un elemento constructivo de madera de 1 m<sup>3</sup> consume de 8 a 30 KW/h de energía, si se compara con el material hormigón armado que necesita de 150 a 200 KW/h, o con un material metálico que consumen de 500 a 600 KW/h y de aluminio con consumo de cerca de 800 KW/h de energía, se observa el alto beneficio ecológico y hasta económico que implica su uso intensivo.”* (Jacobo, & Vedoya, 2004)

Otro beneficio energético que aporta es su comportamiento ante el fuego en caso de incendio, pues la madera no se deforma como el metal o colapsa como el hormigón armado y permite ser reparada, es de fácil mantenimiento y lo más importante es su reciclabilidad.

En el mundo actualmente hay unas 4.000 millones de hectáreas de bosque presentes en los diferentes continentes, de esta manera la superficie terrestre cubierta por bosques representa el 30% del total. En el caso directo de Norteamérica, Estados Unidos posee el 8% de la superficie forestal mundial, es decir, unos 312 millones de hectáreas. El 14% de las existencias en formación de todo el mundo (incluido el 18% de las existencias en formación de coníferas) se halla en Estados Unidos. (FAO 2014)

Según establece George Vitas, Especialista en Información Forestal de la Secretaría de Agricultura de los Estados Unidos, este país cuenta con abastecimientos de madera capaces de sostener grandes y diversas industrias forestales. Además sus productos madereros suponen aproximadamente una cuarta parte de todas las materias primas utilizadas para fines fabriles y para construcción.

La madera desempeña un papel crucial en la lucha contra el cambio climático. Un mayor uso de productos de madera provenientes de una gestión forestal sostenible estimula la expansión de este tipo de bosques y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero. Es el único material que reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Según el Centro Nacional de Desarrollo de la Madera de Francia (CNDM) un m<sup>3</sup> de madera empleada en la edificación significa la retirada de 1,6 toneladas de CO<sub>2</sub> de la atmósfera (por sí misma almacena 1 tonelada, el resto viene del efecto sustitutorio de otros materiales emisores).

El consumo de los productos de madera incrementa los depósitos de carbono almacenado en los árboles, facilitando el cumplimiento de los compromisos del protocolo de Kyoto.

Cada metro cúbico de madera retiene un promedio de 0,8 a 0,9 toneladas de CO<sub>2</sub>. El uso de madera en sustitución de otros materiales ahorra un adicional de 1,1 toneladas de CO<sub>2</sub> emitido cuando se utiliza por ejemplo hormigón. Esto resulta en un ahorro total de aproximadamente 2 toneladas de CO<sub>2</sub>. (Van De Kuilen, J. W. G., Ceccotti, A., Zhouyan, X., & He, M., 2011, p. 1627).

### 2.4 Usos frecuentes en la actualidad

Teóricamente se puede llegar a fabricar piezas de madera laminada de dimensiones ilimitadas, pero en la práctica aparecen unas series de factores limitativos:

- Anchura de la cepilladora es de 2m, limitando el canto de la pieza.
- Las dimensiones de las prensas también limitan el canto y la longitud final de la pieza.
- Capacidad de grúas en la obra.
- El transporte, un camión mide 25 m con un ancho de hasta 4,50m, por lo que para superar esta longitud sería necesario utilizar un camión más un remolque si es que existe la posibilidad de maniobra en las vías de circulación desde la fábrica hasta la obra.

Vigas: suelen ser de madera de abeto con un grueso aproximado de 45 mm de sección y largos variados, ensambladas mediante entalladura múltiple en sentido longitudinal y posteriormente encoladas por sus caras, a fin de conformar una sola unidad estructural. Ver figura 2.5. La viga recta de sección constantes es la más barata de producir y se puede llegar hasta 30 metro de luz. (Tecnifusta, 2011)

Vigas	Longitud	Sección
Estándar	Desde 5m hasta 12m – 13,50m	12 cm hasta 20 cm en incrementos de 4cm (12, 16, 20,...) y grosores de 6 cm a 26 cm en incrementos en 2 cm.
Especial	13,50m – 45 m	Canto superior a los 26m y se puede fabricar en sección circular.
Curvada	14m – 40m	Cantos de 64 cm a 200 cm y el grosor supera los 26 cm.

Figura 2.5. Catalogo de dimensiones de vigas.

Cerchas: las cerchas prefabricadas Freespan se componen de un cordón superior e inferior de madera laminada y barras de celosías de madera aserrada escuadrada. Esta selección de material según su función estructural permite optimizar las escuadrías y conseguir un peso total menor, aumentar la longitud de las luces a cubrir hasta 40 metros y la carga máxima soportada – 1.000 KN consiguiendo una estabilidad frente al fuego EF-60.

Pilares: los sistemas de pilares de madera laminada constituyen una alternativa rentable frente al hormigón prefabricado o los pilares de acero, donde su resistencia es comparativamente menor. La distribución de la carga puede realizarse con pilares empotrados o articulados de sección angular, cuadrada o en cruz. La única limitación en cuanto a su dimensión es el transporte.

Por el grado de compacidad de su sección estos pueden ser: macizos o simples, huecos, que son aquellos en los que las láminas dejan un hueco central para aumentar su momento de inercia. Compuestos, los cuales están formados por la unión mediante separadores de dos o más perfiles de MLE. Estos pueden ser simétricos, en V, en árbol y triangulados. Ver Figura 2.6.

Mallas reticuladas: destinada para la cubrición de todo tipo de naves y superficies donde se quiere eliminar el máximo de apoyos interiores. Sus barras prefabricadas, las cuales pueden ser rectas o curvas, están unidas con medios exclusivamente mecánicos esféricos, cilíndricos, prismáticos y planos y se fijan mediante pernos, pasadores o adhesivos. Pueden formar casquetes radiales o triangulares, bóvedas o una forma libre.



**Marcos o Pórticos:** los sistemas de marco son soluciones estructurales económicas para una distribución óptima de la carga en condiciones de montaje difíciles, por ejemplo cuando no es posible transportar pesados componentes prefabricados de hormigón hasta la obra. Los más frecuentes son los marcos triangulares, constituyendo una aplicación de la madera laminada muy atractiva, desde el punto de vista arquitectónico. Con este tipo de estructura es posible alcanzar los 60 metros de luz. Ver figura 2.7. El nudo rígido entre pilar y viga puede resolverse mediante corona de pernos o bulones, lo que supone que uno de los dos elementos debe ser compuesto. También puede resolverse con la continuidad de la pieza a través de las propias láminas.



Figura 2.6. Pilares de Metla House. Joensuu, Finlandia.



Figura 2.7. Timber Warehouse and Showroom, Hergatz, Austria. 1995

**Panel Sándwich autoportante:** formado por dos tableros de madera unidos a un núcleo de espuma rígida de poliestireno extrudido. Constituyen un soporte válido para recibir cualquier tipo de material de acabado, ofreciendo un conjunto de ventajas, entre las que destacan las siguientes: cumple la función de estructura y aislamiento al mismo tiempo; permite una estructura de cubierta más ligera, sencilla y económica; hace aprovechable el espacio bajo cubierta.



Figura 2.8. Bodegas Protos, Peñafiel, España. (2010)

**Arcos:** estos se conforman en forma de arcos biarticulados en tres o cuatro partes que se unen mediante conectores metálicos. Los más usados son los conectores Simpson. En Estados Unidos se han construido edificios con arcos de madera laminada de más de 100 metros de luz. En general la curvatura se adapta a curvas estándar: parábolas, círculos, elipses, avales etc. Los nudos de arranque y de la clave pueden ser articulados o empotrados. Estos pueden ser: arco en V invertida, en pórtico, circular o elíptico, parabólico (Figura 2.8.), triangular con tirante, carpanel.

### 2.5 Nuevos avances en el sector de la madera laminada de uso estructural

*"La arquitectura no es bella si no tiene nada que ver con las estructuras". Ikeda Masahiro. (Mikako, 2005, p. 26)*

En los últimos años, la industria de los productos derivados de la madera con uso estructural está claramente dirigida hacia los productos prefabricados con propiedades mecánicas elevadas y los adelantos del sector han llevado a una continua mejora de este producto, gracias a los nuevos sistemas de producción gestionados por programas informáticos que han rentabilizado la fabricación de las series unitarias, constituidas por elementos individuales adaptados a situaciones específicas, suponiendo un avance frente a los sistemas cerrados, más ligados a la producción en masa.

*"La evolución en las tecnologías de fabricación y del propio material constructivo, han surgido una gran cantidad de sistemas innovadores que, con sus características específicas, han renovado y pasado de la práctica constructiva al sistema." Gerd Grohe. (Grohe, 1995)*

A continuación se enumeran algunas de dichas innovaciones:

- Uniones de vigas mediante varillas metálicas.

- Pasadores autotaladrantes: son de acero al carbono. Se fabrican con diámetros de 5 a 7 mm y largos que varían de 73 a 193 mm y de 113 a 233 mm, respectivamente. Se aplican en uniones acero / madera con un máximo de 3 placas de acero embutidas de 5 mm de espesor o una sola placa de 10 mm. Figura 2.9.

- Conectores de doble rosca autoperforantes: son elementos de enlace concebidos para unir piezas de madera/madera. Se diferencian de los tirafondos tradicionales por sus dos roscas, una de avance y otra de apriete. Entre las dos zonas roscadas hay una zona no roscada, denominada caña, de 30 mm de longitud. Las longitudes disponibles son: 160, 190, 220, 245 y 300 mm. Los conectores madera / hormigón se utilizan en obras de rehabilitación para hacer solidaria la losa de hormigón con la viga de madera consiguiéndose una viga mixta cuya capacidad de carga llega a duplicar a la de la madera. Figura 2.10.

- Barra toda rosca: corresponde a un sistema de refuerzo en zonas de tracción perpendicular a la fibra (zonas de vértice, vigas entalladas y refuerzo en superficies de tracción perpendicular), véase la figura 3.3. Se trata de barras sin cabeza, de diámetro de 16 mm o 20 mm con largos de 3 metros de las que se obtiene por corte la longitud deseada. Resistencia a la tracción del acero: 800 N/mm<sup>2</sup>. Requieren pretaladro: Diámetro 16 mm: pretaladro de 12 mm; Diámetro 20 mm: pretaladro de 15 mm; Precisan de cabezal para la puesta en obra. (Argüelles - Álvarez, 2010)



Figura 2.9. Pasadores autotaladrantes.

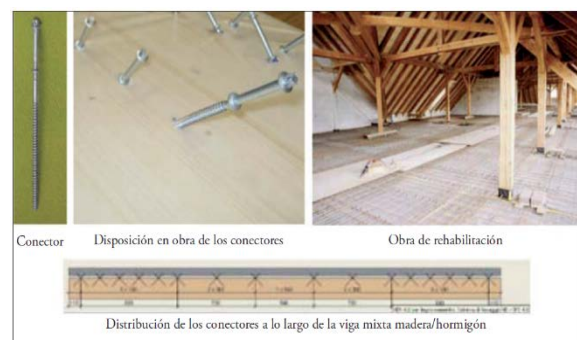


Figura 2.10. Conectores madera/hormigón

- Adhesivos: Melamina – Urea – Formaldehído (MUF) de color traslucido. Resorcina – Fenol-Formaldehído (RPF), de color marrón oscuro. Permite tiempos de trabajo algo mayores que los adhesivos MUF. Ha sido desplazado por la melamina debido a razones medioambientales y sus emisiones de formaldehído. Poliuretano de un componente (PUR), de color transparente. Resinas especiales epoxi para uniones madera-acero. (Pereza Sánchez, J. E., Menéndez Pidal, I., Velasco Rivas, J. M., & Sanz Pérez, E., 2014).

- Tratamientos termoquímicos para eliminar problemas de durabilidad.

- Nuevos tratamientos ignífugos y colas más respetuosos con el medio ambiente.

- Paneles de fibras cruzadas para forjados y muros.

- Fabricación a partir de maderas diferentes de las habituales, como eucalipto, teca, bambú o roble. Desde el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC) por ejemplo, se plantea resolver problemas vinculados con la industria de la construcción, específicamente en el área de la vivienda. Se plantean dos líneas generales de investigación, en el marco de las cuales se desarrollan diferentes propuestas particulares: el uso de la madera de pino caribe como material de construcción, y el desarrollo de componentes constructivos de pino caribe para la producción de viviendas. (Loreto, Molina, & Vivas, 2013)

- Desarrollo de productos próximos a la madera laminada, como 'dúos' y 'tríos' laminados (mayor grosor de lámina) o tableros contralaminados (piezas laminares de madera que permiten realizar estructuras superficiales, muros y forjados completos a partir de tableros de gran formato).

Es un sector todavía en investigación a pesar de su antigüedad, sobre todo en lo que se refiere a uniones entre elementos de madera y productos de tratamientos.

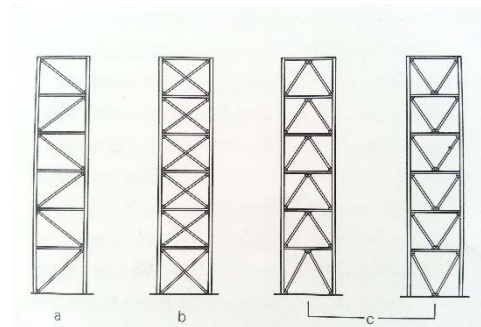
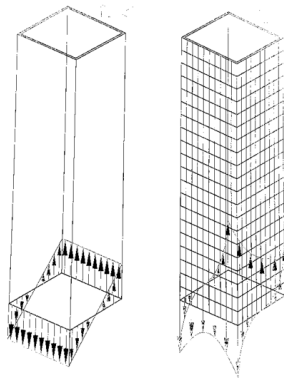
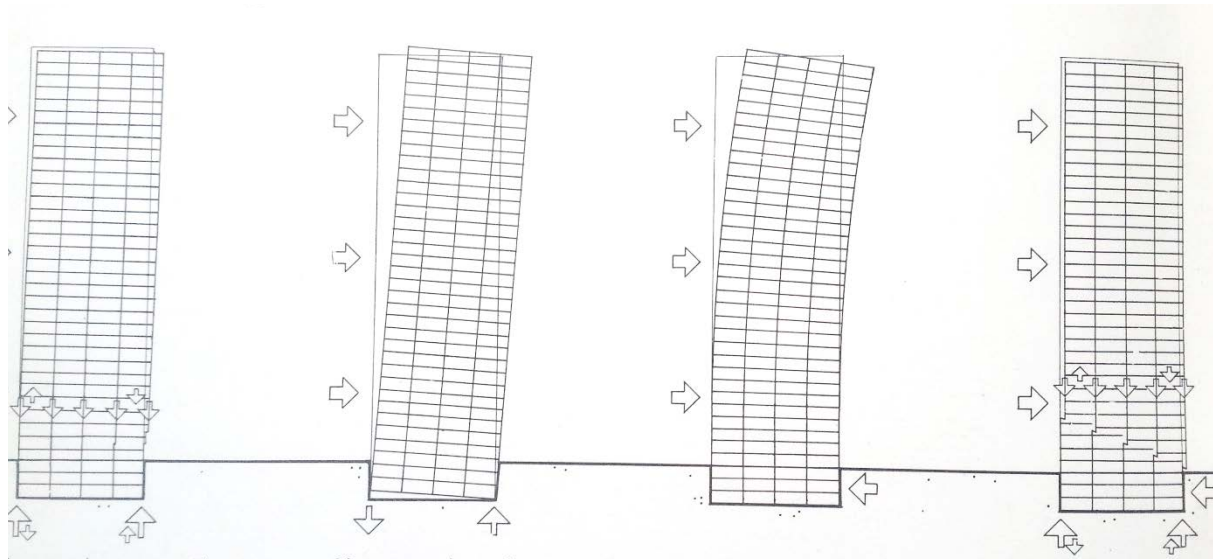
En lo referente a uniones, los nuevos elementos de fijación, permiten mejor comportamiento estructural de las rótulas, y los enlaces rígidos; de la misma manera que se están introduciendo nuevas resinas epoxi para conseguir realizar todo tipo de uniones e incluso realizar juntas de transporte y reducir así el coste total de la construcción.

En el campo de los tratamientos, se avanza hacia un producto cada vez más respetuoso con el medio ambiente y sostenible.

De la mano de los procesos industriales robotizados, se han introducidos cambios fundamentales en la construcción con madera laminada, estos avances tecnológicos han propiciado asimismo un cambio de planteamiento: los elementos superficiales o placas han sustituido a los lineales como piezas básicas de los sistemas.

La ductilidad y la buena apariencia de las estructuras de madera y su eficacia en la obra seca no deben hacernos olvidar su carácter de herramienta por encima de sus valores plásticos. En cualquier caso, el uso de la madera debería potenciarse, y no solo bajo los sistemas habituales, ya que su aplicación ofrece posibilidades que van más allá de su aplicación en la restauración en la cubrición de grandes luces.





### 3. Sistemas estructurales verticales

3.1 Aspectos generales de las estructuras verticales

3.2 Acciones en la estructura

3.3 Sistemas de transmisión de cargas

3.4 Sistemas de refuerzo

3.5 Sistemas de soporte de carga para el forjado

3.6 Muros y pilares

3.7 Uniones



Son muchas las consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta a la hora de proyectar la estructura de un edificio en altura, su complejidad conlleva a un planeamiento multifuncional mucho más rigurosos que en el caso de un edificio convencional de baja o mediana altura. Aspectos como los efectos del viento, protección contra incendio y como se reparten las cargas en la estructura y se envían a la cimentación son más estudiados cuando se diseñan.

*“Los sistemas estructurales verticales son los elementos sólidos rígidos que se extienden predominantemente en sentido vertical, asegurados contra esfuerzos laterales y anclados firmemente al suelo, pueden recoger cargas desde planos horizontales a gran altura sobre aquél y transmitirlos a los cimientos”.* Heinrinch Engel. (Engel, 1970, p. 233)

Las estructuras verticales se enfrentan a dos problemas principales: uno es la provisión de un soporte vertical adecuado y la otra es la dificultad de resistir gran cantidad de carga lateral, incluyendo el efecto dinámico del viento.

El objetivo de las estructuras verticales es la absorción de las cargas horizontales y la capacidad de transmitir el momento resultante a la base, logrando la estabilidad de la estructura. Este sistema requiere continuidad de los elementos que transmiten la carga al suelo, y por lo tanto, necesitan congruencia de los puntos de reunión de cargas para cada planta. Esta debe asegurar la rigidez, la estabilidad y la resistencia para evitar el colapso del edificio.

Conforme a que la construcción comienza a crecer en altura, por una parte el volumen comienza a ganar esbeltez y por otra las acciones horizontales comienzan a dominar sobre las gravitatorias, con lo que la estructura gradualmente abandonará el estado sólido de compresión para alcanzar el de un voladizo empotrado en el suelo.

La clasificación de los edificios en función al número de niveles es relativa, por lo que para esta investigación se consideran la siguiente:

- Edificios Bajos: de 1 a 5 niveles
- Edificios Medianos: de 6 a 10 niveles
- Edificios Altos: de 11 niveles en adelante

De 10 plantas hasta las 15 plantas hay que tener muy en cuenta las deformaciones y en adelante, es preciso estudiar además el Sistema Estructural, como única vía de proceder a conferir al edificio en altura de una estructura eficiente y cuyo costo se enmarque dentro de los costos estándares para este del 25-30% del costo total de la construcción.

La necesidad de dar cabida a la carga del viento en lugar de cargas gravitacionales ha tenido un mayor efecto en la estética de los edificios de gran altura. Al igual que con los elementos verticales de soporte, en la mayoría de los rascacielos, el diseño se realiza sin expresar la estructura de refuerzo, de manera que, aunque muchos de estos edificios son innovadores en sentido estructural, esto no se evidencia visualmente. Los edificios muy altos, sin embargo, han sido diseñados para comportarse como voladizos verticales individuales con la estructura concentrada en el exterior; en estos casos la expresión de la acción estructural era inevitable, ejemplo de ello el HBSC, Hong Kong, de Norman Foster en 1986.

#### 3.1 Aspectos generales de las estructuras verticales

Con el fin de conseguir condiciones adecuadas para una planta flexible y buenas posibilidades para la posterior organización espacial, los proyectos de los sistemas estructurales verticales tienden a la mayor reducción posible de los elementos de transmisión de cargas verticales, tanto en sección como en número.

Es por ello que estas estructuras se definen generalmente por elementos verticales continuos, para un empleo óptimo de la superficie de planta, cajas de escaleras, cabinas de ascensor, conductos de instalaciones y revestimiento exterior.

Según Johann Eisele y Ellen Kloff en su "Manual de Gran Altura" , el comportamiento de un sistema estructural de gran altura bajo carga lateral es comparable a un voladizo fijado en el subsuelo. Si se supone una carga lateral uniforme, el momento extremo fijo en los voladizos aumenta cuadráticamente con la altura. En realidad las cargas horizontales no son constantes en la altura, pero aumenta. Por lo tanto el momento hacia la base aumenta más rápidamente. Por ello el problema más importante es el vuelco.

Las cargas que deciden el proyecto de un sistema estructural vertical se obtienen de la sumatoria del peso propio, las cargas de uso y el viento. Éstas se componen en una resultante oblicua. A menor inclinación de la resultante, mayor es la dificultad de transmitir las a la cimentación. La presión del viento por unidad de área se incrementa con la altura del edificio, su influencia en la estructura cobra mucha más importancia que las cargas verticales.

Sistemas estructurales: deben permitir proporcionar resistencia a las fuerzas laterales y rigidez para mantener las deformaciones ante esas cargas dentro de los límites tolerables.

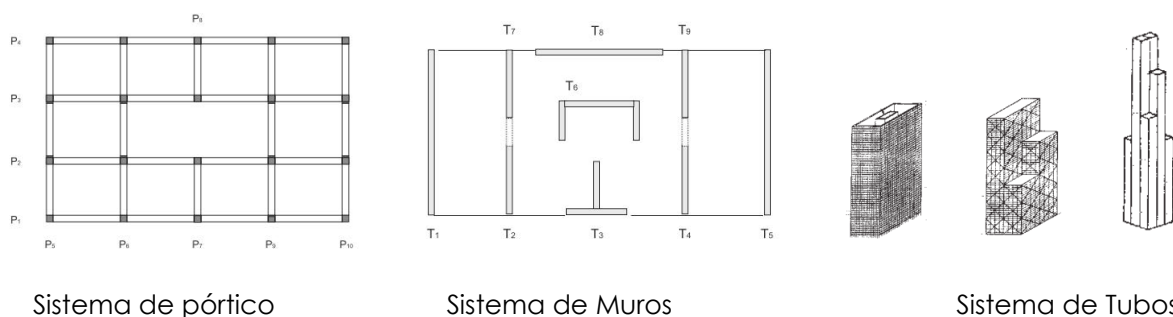


Figura 3.1. Sistemas estructurales

A) Sistema estructurado exclusivamente con pórticos. Es un sistema flexible con el cual si se desea incrementar la rigidez debe incrementarse la sección (el momento de inercia a flexión) de las vigas o pilares, o disminuir la longitud de las vigas (por interposición de más pilares). Este sistema es eficiente para alturas no mayores de 15-20 pisos.

B) Sistema de muros y muros acoplados, el cual la resistencia a cargas horizontales está confiada exclusivamente a muros. Los muros acoplados se da cuando dos (o más) muros coplanares son conectados entre sí por medio de vigas a nivel de cada losa. Este sistema es eficiente para alturas no mayores de 20 a 30 pisos.

1 Eisele, J., & Kloff, E. (2002). Load - bearing structures. High-rise manual typology and design, construction and technology [HochhausAtlas] (Elizabeth Schwaiger Trans.). (pp. 77-95). Munchen: Birkhauser.



C) Sistema de Pórticos y muros combinados donde cada elemento contribuye a suplir las deficiencias del otro. La deformación del pórtico es por corte y la del muro por flexión. Los forjados rigidizan y obliga a desplazarse solidariamente. Se han llegado a construir edificios de hasta 40 pisos.

D) Tubos estructurales variantes: tubos incluidos (tube-in-tube), tubos combinados o tubos con diagonales en fachada. Con estos sistemas se han construido los edificios más altos en las décadas de 1970-1980: con alturas entre 50 y 100 pisos.

Materiales de los sistemas estructurales:

En el capítulo anterior se profundizo sobre la madera laminada, por lo que no se mencionara en este apartado, salvo señalar que con esta puede ser utilizado para formar un Sistema Estructura Vertical. También se verán ejemplos en el próximo capítulo.

En la actualidad existe una gran cantidad y variedad de materiales disponibles en la industria de la construcción e ingeniería. Debido a esto existen muchos tipos diferentes de estructuras. Sin embargo, los componentes principales en cualquier tipo de estructuras son el acero y el hormigón armado. En la mayoría de las estructuras se lleva a cabo combinando estos elementos para lograr uno solo.

Acero: las características físicas de este material lo hacen idóneo, pues es muy resistente con relación a su peso; soporta principalmente las solicitaciones atracción.

Los sistemas estructurales realizados con este material pueden ser pesados o livianos. Los pesados se utilizan principalmente en el caso de puentes, almacenes industriales, viviendas en altura etc. y se construyen con perfiles laminados o perfiles soldados a partir de chapas o perfiles conformados obtenidos a partir de chapas laminadas en caliente. Los livianos son generalmente aplicados a edificaciones de uno o pocos niveles, está formada por perfiles conformados a partir de chapas laminadas en frío y luego galvanizadas. Hay que tener en cuenta con este tipo de estructuras de protegerla contra la corrosión, y el fuego.

El arriostramiento se logra mediante vigas de celosías y tirantes. Es posible lograr una conexión rígida con elementos de este material combinando elementos de sujeción y soldadura.

Hormigón Armado: El tipo estructural más difundido es el entramado de barras con nudos rígidos, realizados "in situ", con continuidad de sus elementos. En algunos casos se pueden incorporar uniones con algún grado de libertad como juntas de dilatación o rótulas. Las estructuras realizadas con este material son elegidas también por las grandes ventajas que ofrece por su rigidez y óptimo comportamiento frente a agentes atmosféricos y al fuego.

La estructura de hormigón armado está compuesta por diferentes materiales que trabajan en conjunto frente a la acción de las cargas a que está sometida. Los materiales que intervienen en su composición son el acero y el hormigón. El acero presente en las barras y mallas, en las armaduras cumple la misión de ayudar a soportar los esfuerzos de tracción y corte a los que está sometida la estructura ya que el hormigón, el cual tiene resistencia a la compresión, mientras que su resistencia a la tracción es casi nula.

#### 3.2 Acciones en la estructura<sup>2</sup>

**Cargas verticales:** El comportamiento de las cargas verticales en edificios en altura es igual que en edificios de mediana y baja altura. Las cargas muertas surgen a partir del peso propio de los elementos de construcción y de los acabados. Las cargas vivas se dependen del uso. Dependiendo del número niveles del sistema, las cargas vivas pueden ser reducidas para las consideraciones de transferencia de carga y el dimensionamiento de los elementos de soporte de carga vertical, sin que dicha reducción exceda el 40 por ciento.

**Cargas horizontales:** Debido a la gran influencia de la acción horizontal sobre el diseño de la estructura, el cálculo para la estabilización lateral debe ser cuidadosamente analizado. Las cargas laterales generalmente se deben a desviaciones inesperadas, como el viento y cargas sísmicas.

**Deflexiones inesperadas:** Las deflexiones inesperadas surgen de la imprecisión en la fabricación de los elementos de construcción. Además de este problema de fabricación, la configuración irregular de la base en un sitio no homogénea también puede llevar a una desviación. Cualquier defecto de esa índole produce fuerza lateral adicional que debe ser incorporado en el diseño.

**Viento:** En general, un edificio alto es susceptible a la oscilación. Esto significa que las cargas de viento no se deben considerar como cargas estáticamente equivalentes, pero deben ser investigadas en virtud de los aspectos de la dirección dominante. Por lo general se llevan a cabo experimentos de túnel de viento para determinar la influencia de la carga del viento. La presión y succión del viento afecta la superficie del cerramiento del edificio que traslada la carga sobre la estructura. Aquí la forma y la geometría del edificio son particularmente decisivas en la determinación de zonas de gran arrastre en las esquinas. Esta oscilación conduce tanto a una aceleración lateral perceptible de los ocupantes, y a una desviación lateral máxima.

El valor normal de la frecuencia propia en la que la aceleración lateral se puede percibir en edificio de gran altura se encuentra en torno al 0,5 por ciento de la aceleración debida a la gravedad. A valores de entre 2 y 4 por ciento de la aceleración debido a la gravedad de las oscilaciones se hacen sentir tan inquietante, y se vuelven insoportables a valores más altos. Con un período de retorno estadístico de 10 años, se recomienda que la aceleración lateral no exceda de 0,2 por ciento de la aceleración debida a la gravedad. En EE.UU. este valor se fija normalmente en combinación con el uso del edificio.

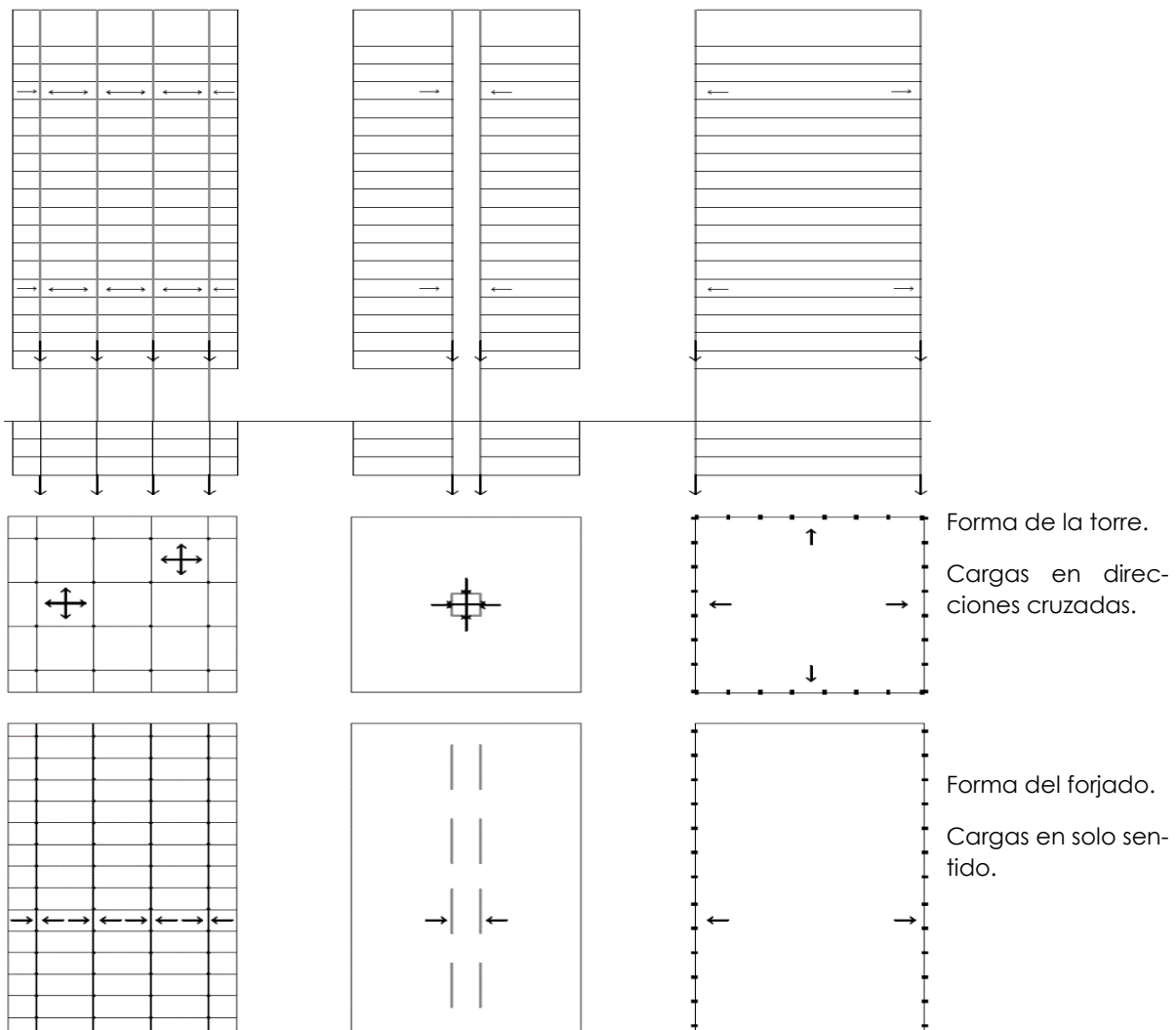
**Cargas sísmicas:** En área susceptible a la actividad sísmica, terremotos poderosos pueden causar aceleraciones laterales extremas. Sin embargo, la probabilidad de que ocurra un terremoto de gran alcance durante la vida útil de un edificio es relativamente pequeña. Por lo tanto es económicamente justificable para diseñar estructuras de gran altura para que con soportar un importante choque de terremoto agotando toda la fuerza estructural y capacidades de transferencia de carga sola. La principal prioridad es la seguridad de las personas, mientras que el daño a los elementos de acabado está permitido y se determina en relación con el riesgo. Estas consideraciones significan que la estructura de gran altura en zonas de terremotos se debe diseñar para poseer las reservas de alta resistencia de plástico. En términos concretos, esto significa que las esquinas del marco deben doblarse sin romperse.

---

<sup>2</sup>Datos extraídos del Manual de gran altura de Johann Eisele y Ellen Kloft, (Eisele, 2002, pp. 77-95) corresponden a las normativas alemanas.

### 3.3 Sistemas de transmisión de cargas

Los sistemas estructurales verticales pueden distinguirse por los diferentes sistemas de recolección de cargas en las diferentes plantas. En los sistemas reticulados los puntos de unión se distribuyen uniformemente sobre la totalidad de la planta; en los de luz libre se disponen de modo periférico y en los sistemas en voladizo la zona colectora de cargas se sitúa centralmente. Esta recolección de cargas está íntimamente relacionadas con la configuración y la organización de la planta. La dependencia es tal que los distintos sistemas de transmisión de cargas dan origen a sus correspondientes sistemas de organización de plantas para edificios de altura. Los siguientes gráficos fueron extraído del libro de Sistemas de Estructurales, (Engel, 1970, p. 233-262)

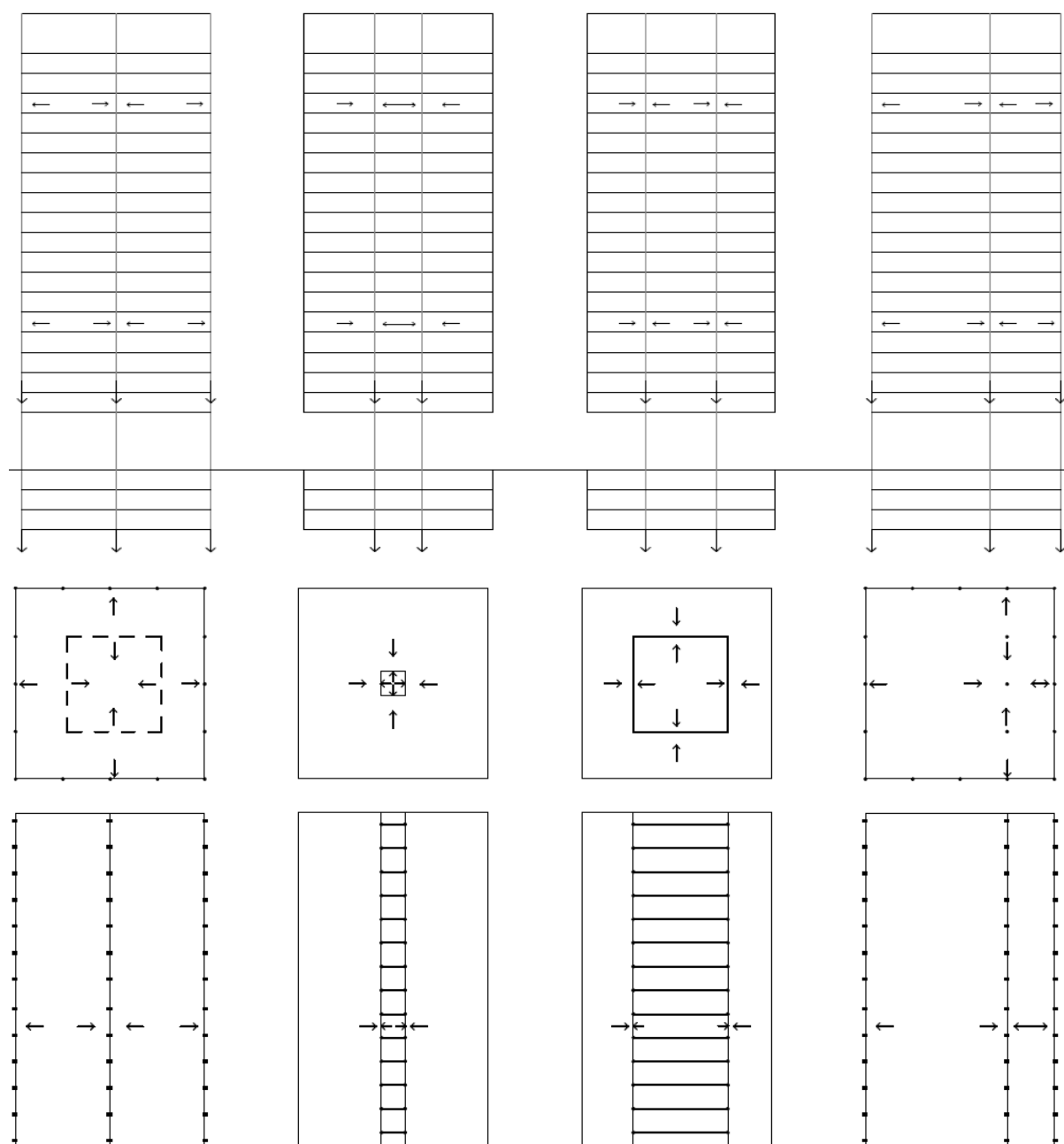


**Sistema en retícula.**  
Puntos de reunión de cargas distribuidos uniformemente. Las cargas de cada área se reúne por unidad de área (retícula) y se trasmite individualmente al suelo.

**Sistema en voladizo.**  
Puntos de reunión de cargas en el centro. Las cargas se transmiten en cada planta a los soportes centrales y son conducidas al suelo.

**Sistema de tramos libres.**  
Puntos de reunión de cargas en el contorno del edificio. Las cargas se transmiten en cada planta al contorno y son conducidas periféricamente al suelo.

Figura 3.2. Sistemas principales de transmisión de cargas en estructuras verticales



**Sistema de tramo libre con soporte central.**

Las cargas de cada planta se dirigen parcialmente a los muros exteriores.

**Sistema de retícula y voladizo.**

Las cargas se transmiten hacia el interior de los puntos de un sistema reticulado central de reunión de ellas.

**Sistema de voladizo tramo libre.**

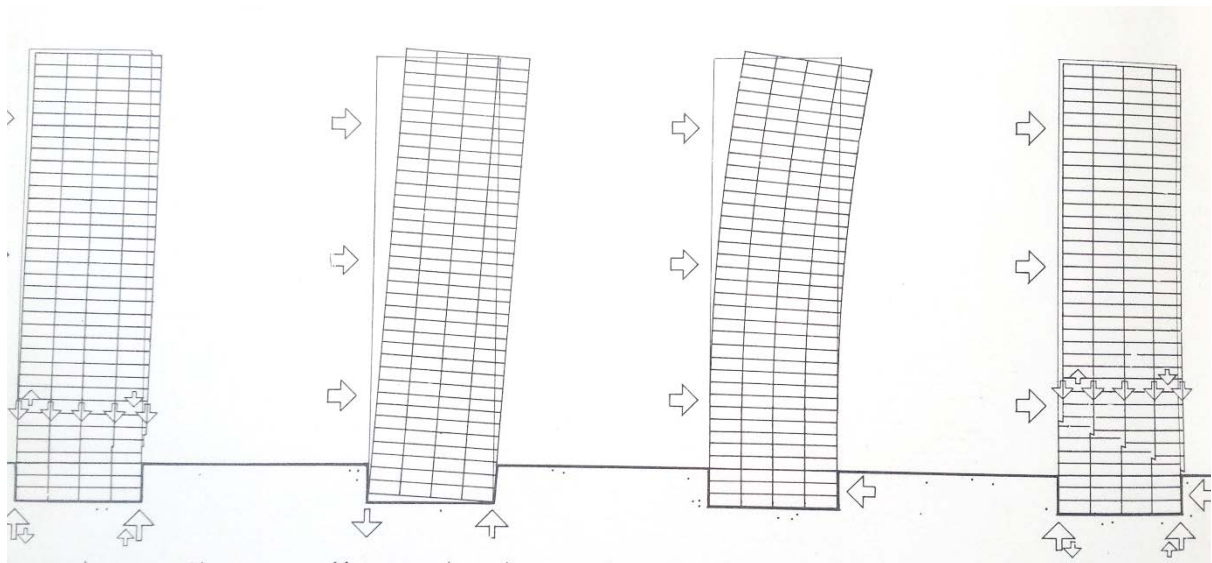
Las cargas se transmiten a los puntos intermedios de reunión, tanto desde el centro como desde los lados.

**Sistema de tramos asimétricos.**

Las cargas se transmiten desigualmente a los puntos de reunión.

Figura 3.3. Sistemas compuestos de transmisión de cargas en estructuras verticales.

Sistemas de transmisión de las fuerzas horizontales



Esfuerzo de compresión    Momentos de vuelco    Momentos flectores    Esfuerzo cortante

Figura 3.4 Cargas críticas y deformaciones en los sistemas estructurales verticales

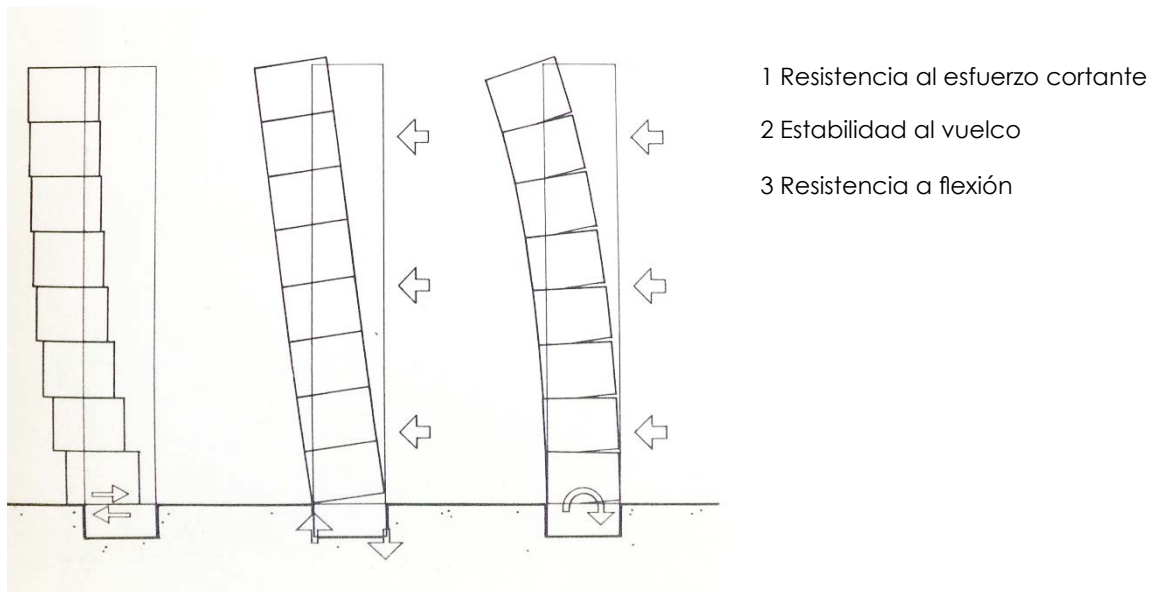


Figura 3.5 Acción del viento en la estructura.

### 3.4 Principales fundamentos de refuerzo

Figura 3.6 muestra los principios básicos en la disposición de los elementos en el plano de refuerzo. Al menos tres elementos son necesarios en cada plano horizontal para reforzar un plano de planta. Las líneas de acción de estos elementos de refuerzo no deben ser concurrentes. Esta disposición evitará los desplazamientos de la planta a lo largo de los ejes X e Y y también impide la rotación.

En la construcción de gran altura, normalmente el núcleo de circulación vertical se realiza mediante muros rigidizadores. Para mejorar la rigidez lateral y minimizar las tensiones de torsión, es razonable localizar el núcleo en el medio de la planta. La figura 3.7 muestra el aumento de los efectos de carga lateral de acuerdo a la excentricidad.

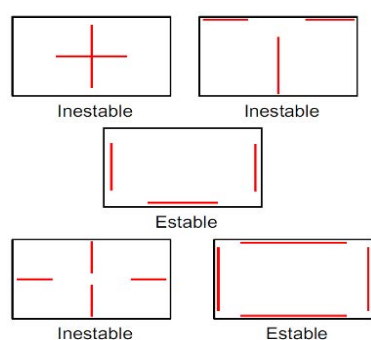


Figura 3.6. Disposición de los elementos núcleo en la carga de refuerzos estructurales

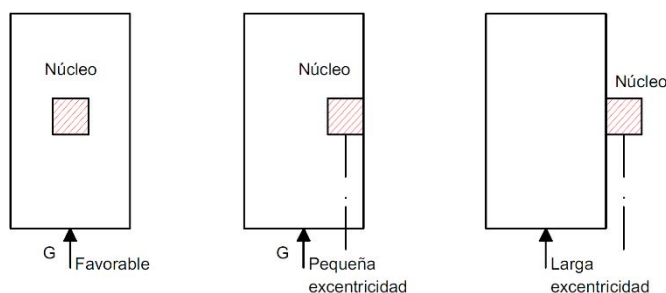


Figura 3.7. Influencia de la posición del horizontal

#### 3.4.1 Elementos de refuerzos

Marcos rígidos: Este tipo de refuerzo estructural puede estar formado por diferentes elementos estructurales (pilares, vigas, muros, tirantes cruzados, losas) los cuales estarán unidos rígidamente soportando diversos sistemas de piso. En el caso de los muros, debe ser rellenos y pueden ser de fábrica o elementos prefabricados. La elección de estos diferentes tipos dependerá si estos son para soporte lateral (muros y tirantes cruzados), soporte vertical (pilares y muros), soporte horizontal (losas y vigas).

La introducción de refuerzos diagonales para aumentar la resistencia lateral es simple si se toma la flexibilidad necesaria de planta en cuenta. Además, las conexiones rígidas reducen la flexión de las vigas por su efecto de sujeción. Fuerzas uniformes de flexión y cortante se producen con la absorción de cargas laterales por el marco, y ello conduce a diversas deformaciones.

Su acción puede restringirse a un plano o extenderse en varias direcciones, sus juntas adquieren gran importancia ya que la mayor magnitud de esfuerzos y fuerza interna se encuentra en ellos. Para su fabricación generalmente se usa hormigón armado o acero.

Marcos tirantes: mayor altura de los esfuerzos de flexión, la base de la estructura será tan grande que el sistema estructural ya no será económico. Los tirantes de refuerzo adicionales absorben las cargas laterales en estas tramas rígidas y los marcos de los soportes ya no están sujetos a la flexión. La ventaja estática y constructiva debe ser considerada a la luz de las restricciones en el uso de derivados de la arriostramiento diagonal. La figura 3.8 muestra las posibles disposiciones de refuerzo de los apoyos que permiten que se integre aberturas.

Durante la etapa de diseño se recomienda organizar el marco de refuerzo diagonal de tal manera que siempre exista la centralidad de las conexiones. Esto significa que las líneas de

acción de las barras individuales deben cortar en un punto. En el caso de viga y pilares esto no siempre es posible, y estas excentricidades provocan tensiones secundarias, que deben tenerse en cuenta en los cálculos. Otra consideración de diseño es la reducción de los marcos formados por pilares bajo una gran carga vertical. Esta disminución provoca necesariamente reducción en los tirantes diagonales, y se debe permitir cuidadosamente en el diseño.

La figura 3.9 muestra las diferentes formas de disposición de los refuerzos diagonales los cuales pueden ser: arriostramiento diagonal simple, refuerzo diagonal doble (Cruz de San Andrés), y refuerzo diagonal k.

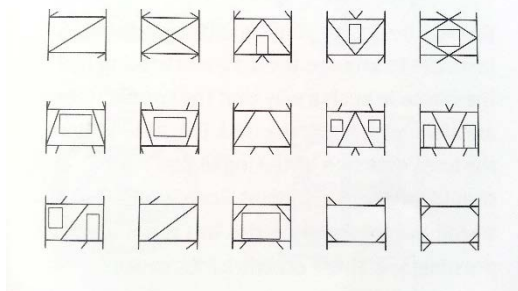


Figura 3.8. Diferentes modalidades del marco de refuerzos

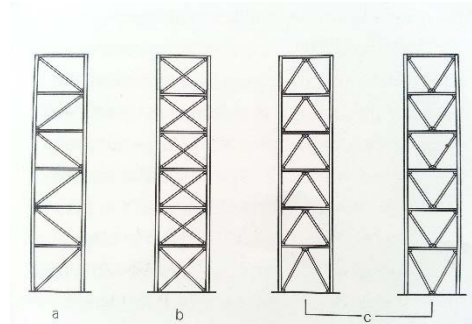


Figura 3.9. Diferentes formas de refuerzos diagonal.

Arriostramiento diagonal simple (alternativa a): produce fuerzas de compresión y de tracción en la diagonal, dependiendo de la dirección de las cargas laterales. Las diagonales deben diseñarse considerando las flexiones puntales que absorben las fuerzas de compresión y deben estar integrados en los planes de acabado.

Refuerzo diagonal doble (Cruz de San Andrés) (alternativa b): este refuerzo diagonal doble sólo es eficaz como refuerzo cuando ambas diagonales se forman como miembros de tensión. Bajo el efecto de la carga lateral una de las diagonales absorbe la fuerza de tracción, mientras que la otra diagonal relaja bajo la carga y no contribuye a la eliminación de cargas. Como las deformaciones elásticas de las diagonales de tensión son relativamente grande la deformación total es también grande. Con diagonales de tensión, no se recomienda para las condiciones de carga dinámica causados por un terremoto, ya que las fuerzas laterales cambian de dirección con frecuencia. Como resultado, las diagonales que inicialmente no están contribuyendo a la eliminación de cargas se inciden en el primer cambio de dirección. Esto coloca enormes tensiones sobre las diagonales de tensión y los apoyos individuales.

Refuerzo diagonal k (alternativa c): no sólo se utiliza para ayudar a absorber las cargas horizontales, también puede contribuir a una reducción de la extensión, lo que lleva a una disminución en el esfuerzo de flexión en las vigas del soporte. Se hace una distinción entre apoyos dispuestos en K que proporcionan apoyo a la viga usando ya sea las fuerzas de compresión o de tracción cuando las vigas se cuelgan entre las barras k (figura 6) las diagonales están sometidas a una especie de pre-estrés por la carga permanente y esto reduce las fuerzas de compresión de la carga del viento, la disminución elástica de los pilares también debe tenerse en cuenta en el diseño. Sin embargo, debido a la flexibilidad relativa de las vigas de piso, el arriostramiento mediante barras diagonales en K no asume cargas verticales en la misma medida que los pilares se acortan bajo el efecto de la carga vertical. Otra ventaja de los apoyos k comprimidos en comparación con diagonales simples es que su longitud de pandeo es menor.

Apoyos en K son especialmente adecuados en el establecimiento de sistemas de disipación de energía. El edificio puede disfrutar de considerables reservas de plasticidad introduciendo elementos deslizantes diseñados especialmente entre las conexiones de las diagonales en la k de refuerzo. Estas reservas se pueden utilizar para compensar las grandes cargas sísmicas

por medio de deformaciones plásticas. Sirven de amortiguadores de oscilación, también se pueden integrar en el k arriostamiento cuyas uniones tienen una influencia positiva en el comportamiento dinámico del edificio.

#### 3.4.2. Muros de cortante, acoplados y núcleos

Los huecos de los ascensores, escaleras y sus respectivas antesalas se realizan normalmente en hormigón armado para mejorar la rigidez del edificio, son propicios para asumir el esfuerzo a cortante que se presentan a través de las cargas laterales. Al igual que los demás sistemas de estructuras, se debe prestar atención a la carga permanente, en particular en los extremos, para adecuar la cantidad de barras de refuerzo de los muros de cortante en estas áreas. Una forma de garantizar esta fuerza adicional es hacer uso de los muros transversales en los bordes del muro.

Los muros de cortante acoplados forman sistemas estructurales muy complicados. Son la combinación de pórticos, pantallas y muros de corte, junto a la retirada simultánea de carga lateral. La figura 3.10 muestra esquemáticamente la interacción de las paredes y los pórticos acoplados. Los distintos comportamientos en la deformación como se ilustra, muestran que los pórticos de los muros de corte son más rígidos hacia el suelo. Esta limitación ayuda a rigidizar el pórtico, que a su vez reduce la deformación horizontal de los muros de corte en la parte superior del edificio.

El acoplamiento con elementos no rígidos como se muestra en la figura 3.10 sólo tiene el efecto de que la deformación horizontal en la pared y el marco es el mismo en cada planta. Sin embargo, si el pórtico y el muro o el muro y el muro están conectados entre sí con elementos rígidos de acoplamiento (vigas o losas), se forma un momento de restauración en el soporte de acoplamiento y la deformación se reduce aún más. La figura 3.11 muestra esquemáticamente la influencia de elementos de acoplamiento rígidos.

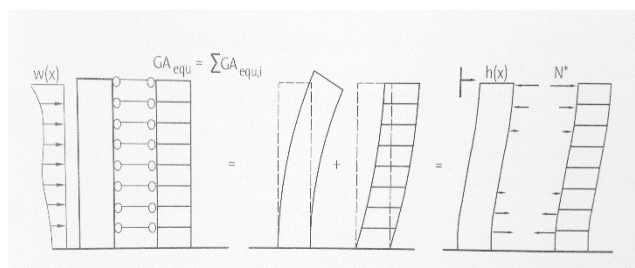


Figura 3.10. Interacción de las paredes y los marcos de cortante, acoplados por conectores no rígidos

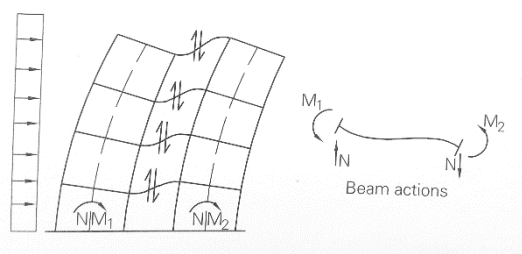


Figura 3.11. Acoplamiento de la viga rígida de dos muros de corte y tensiones en las vigas

#### 3.4.3. Estructuras de tubo

Para edificios en altura es necesario eliminar no sólo la carga vertical, sino también algo de la carga horizontal en el área de fachada, asegurando la rigidez contra las fuerzas cortantes de los puntos de las esquina de fachada sobre toda la anchura y la profundidad del edificio, de esta manera la fachada se forma en un cuerpo rígido, una "estructura de tubo" todo el ancho del edificio se convierte en más estable estructuralmente. La conexión rígida se puede lograr utilizando estructuras de trama, las paredes articuladas o incluso diagonales. Además de los elementos de refuerzo en la fachada de gran altura con estructuras de tubo también se realiza una zona de núcleo interno, necesaria para el acceso a las diferentes plantas, que se puede utilizar para contribuir a la rigidez horizontal. La altura del edificio y el acoplamiento de los dos sistemas son determinantes aquí. En la estática se utiliza el término "tubo en tubo", esto describe un sistema de soporte de carga en el que el tubo exterior se acopla al tubo interior usando las losas del suelo.



Este sistema se utilizó mucho en la década de 1970 con el World Trade Center (110 plantas, arquitectos: Yamasaki y Roth & Sons) en New York y el centro John Hancock (100 plantas, los arquitectos: SOM), en Chicago.

Estos "tubos disueltos" hacen una diferencia significativa en su comportamiento de las carga en comparación con los tubos ordinarios como se muestra en la figura 3.12 la izquierda se considera una viga cajón, la cual está sujeto a carga lateral, que, siguiendo la teoría de flexión técnica, causa un patrón de acentuación lineal en los dos planos en trama paralela a la dirección de la fuerza. Por razones de continuidad de los esfuerzos normales que surgen en los puntos de las esquina se mantendrá constante a lo largo de los planos del perímetro, situada perpendicular a la dirección de la fuerza. Esta contribución a la eliminación de la carga a través de las placas del perímetro está asegurado por la resistencia al corte de la viga caja cerrado.

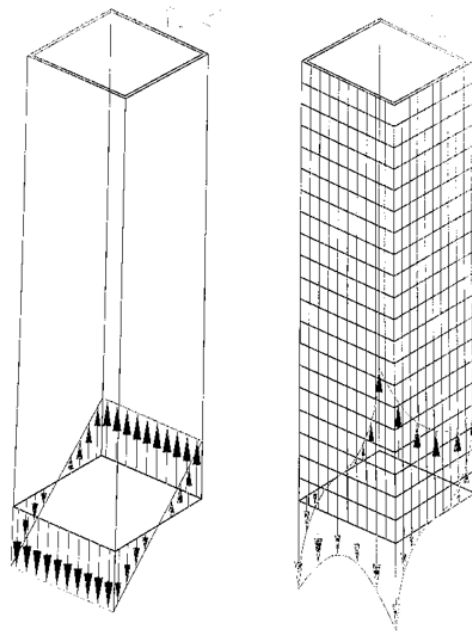


Figura 3.12. Distribución de la tensión normal en viga cajón, sin (izquierda) y con (derecha) efecto de retraso del cortante.

En una estructura de tubo abierto que consta de pilar y vigas, la continuidad elástica en los planos del perímetro sólo se proporciona por la rigidez de las vigas a esfuerzos de cortante. Sin embargo, esta rigidez es claramente inferior a la de un tubo continuo. Los pilares en las zonas medias de ambos planos de la trama por lo tanto, pueden evadir la fuerza de deformación normal. Este efecto se llama "arrastre por cortante" y conduce a una mayor tensión en los pilares de las esquinas. Del mismo modo los pilares en el centro de los planos del perímetro no están sujetos a tensión, por lo que en contraste con el tubo cerrado, la distribución de esfuerzos normales no es constante a lo largo de la anchura del perímetro.

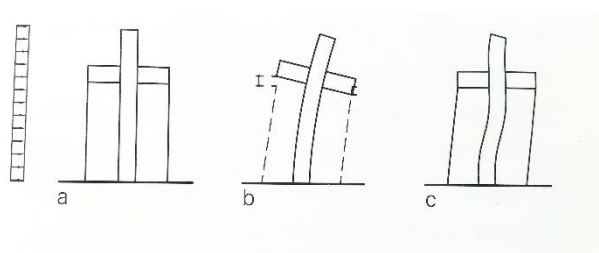
Similar a los sistemas descritos anteriormente para el refuerzo, los pilares de las estructuras de tubos se acortan o alargan por fuerzas normales como resultado de la componente de flexión de la deformación. La fuerza de corte de la carga horizontal del tubo se aísla por la flexión de los pilares y las vigas en los planos de la trama. Tensiones adicionales surgen en estos voladizos de la trama.

La concentración de las fuerzas normales a los pilares de las esquinas en la zona inferior de una gran altura es mayor en comparación con aquellas fuerzas que surgen de la carga muerta. Esfuerzos de flexión adicionales deben reducirse mediante la activación de elementos de refuerzo adicionales tales como muros de corte o núcleos. La alta rigidez de estos otros elementos aliviará los grandes esfuerzos de flexión en la zona inferior de la causa tubo del bastidor por fuerzas de cortante.

Tubos de marcos de tirantes: Estos tubos atirantados deben asumir cargas horizontales de la misma manera como una armadura fija en el subsuelo. De forma análoga a los tubos de bastidor rígidos, la acción de flexión de las cargas horizontales se descarga como fuerza normal en los pilares. Sin embargo, los esfuerzos de corte ya no son absorbidos por las vigas y los pilares como flexión secundaria, pero se eliminan como fuerzas de tracción o compresión en las diagonales. Esta redistribución de esfuerzos de corte conduce a un considerable ahorro en material de construcción. Los marcos en los planos de la trama ya no están sujetos a momentos de flexión adicionales y por lo tanto puede tener más elementos de ornamentación. Para aumentar la eficacia de eliminación de carga lateral, las diagonales están conectados a los pilares y vigas en sus puntos de intersección. El soporte vertical se emplea por lo tanto también en la eliminación de las cargas horizontales y la carga se distribuye de manera más uniforme.

#### 3.4.4. Núcleo de estructuras voladizas / estructuras básicas de los estabilizadores

Cuando los núcleos individuales son demasiado delgados para asumir las cargas horizontales, estos pueden ser acoplados el uno al otro o a los pilares de fachada, utilizando vigas adicionales (estabilizadores). Sin embargo, en contraste con muros de corte acoplados, el acoplamiento se produce sólo en las plantas individuales y no es continua en la altura del edificio. Esto permite una disposición libre de organización de la planta. Por lo general en los voladizos se utiliza para la planta de máquinas, de modo que no se plantean restricciones sobre el uso de suelo. La figura 3.13 muestra el modo de acción de los elementos de soporte de carga (por lo general de altura de piso a piso) y su acoplamiento con los pilares de la fachada representan que los estabilizadores son capaces del retorno del núcleo deformado a la vertical, de ese modo a reduce la deformación horizontal del edificio. Aquí el desempeño de vigas rígidas fija fin a las centrales (estabilizadores) y descansando sobre soportes no en expansión puede ser visto fácilmente. (fig. 10, el ejemplo b, c).



a - sistema del núcleo estabilizador sin carga.

b - deformación sin influencia de los estabilizadores.

c - deformación sin la rotación inversa causada por los estabilizadores.

Figura 3.13. Acción de la estructura de los estabilizadores.

Las estructuras voladizas están muy tensionadas, este sistemas de soporte de carga generalmente es construido de concreto reforzado para poder soportar las fuerzas concentradas. Los estabilizadores también pueden ser utilizados para conectar dos núcleos independientes de forma rígida, lo que aumenta la rigidez total considerablemente.

### 3.5 Sistemas de soporte de carga para el forjado

Una gran parte del coste estructural, además de las medidas necesarias para proporcionar rigidez horizontal se gasta en la construcción de forjados. Por supuesto, esto significa que la selección de un sistema de forjado adecuado afecta el costo total de la construcción.

Forjados apoyados en una dirección: Es un tipo de forjado que consiste de una pieza maciza de espesor uniforme cuyos bordes son apoyados sobre dos vigas paralelas las cuales transmiten la carga a los pilares. Estas pueden ser de hormigón armado (losa alveolar, losa maciza, losa plana aligerada), madera aserrada, madera laminada, chapa grecada. En el caso del hormigón, el refuerzo de la losa va colocado en una sola dirección, de vigueta a vigueta.

En cualquier material seleccionado, la cantidad de viguetas que haya en un tablero depende principalmente de la separación entre pilares y de la carga viva que deba soportar; la separación entre las viguetas debe ser uniforme, por lo general estarán apoyadas en el centro de las traveses o en los tercios o cuartos de su claro. A este tipo de construcción se le conoce también como piso de vigas y traveses, su construcción es fácil y la cimbra es bastante sencilla. Son económicas para soportar cargas vivas medianas y pesadas en luces relativamente cortos, de 1.80 m a 3.60 m; estos luces pueden aumentarse para cargas vivas ligeras, de 200 a 300 Kg. /m<sup>2</sup>, pero al tener claros largos en este tipo de losas se obtienen cargas muertas que por lo general son grandes. Ver figura 3.14.

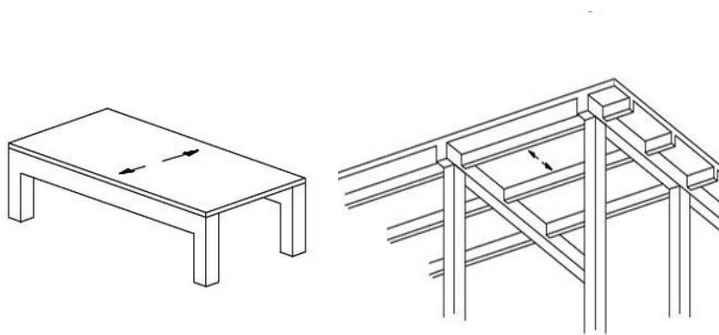


Figura 3.14. Sistemas de forjados y vigas trabajando en una dirección

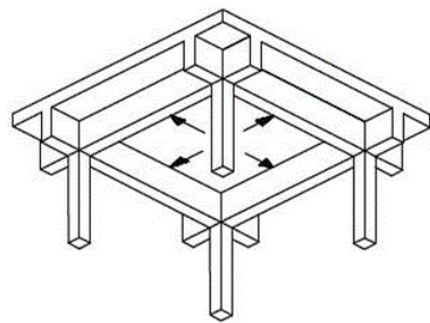


Figura 3.15. Sistemas de forjado y vigas trabajando en dos direcciones

Forjados apoyados en dos direcciones: es aquella que cubre tableros cuadrados o rectangulares cuyo perímetro descansan sobre vigas a las cuales les transmite su carga y estas a su vez a los pilares (ver figura 3.15). Se supone que los apoyos de todos sus lados son relativamente rígidos, con flechas muy pequeñas comparadas con los forjados en una dirección. Estos aunque estén en tableros aislados, es necesario que su análisis se haga en forma tridimensional ya que son elementos estructurales altamente indeterminados.

En el caso de losas de hormigón el sistema reforzado en dos direcciones indica que la losa deberá llevar acero de refuerzo correspondiente a los momentos calculados en dos direcciones.

Este tipo de forjado es fácilmente adaptable a diseños irregulares. Estas pueden ser de hormigón armado (Losas macizas, losa plana aligerada, losa reticular o celular con casetones fijos), chapa grecada, madera laminada.

#### 3.6 Muros y pilares

Los principales puntos relativos a los muros y pilares ya se han tratado anteriormente en el tema de "Sistemas de refuerzos" y sus características especiales se han mencionado.

Los elementos esencialmente a compresión pueden ser monolíticos o entramados por muchas piezas, continuos o con huecos. Para rigidizar mediante muros se utiliza el ensanchamiento de la base, el arriostramiento prolongado o plantas curvas o plegadas.

El acero, hormigón y sus diversas combinaciones son los materiales principales de elección para la construcción de los muros y pilares de estructuras verticales. Los muros de cerramiento de núcleos de ascensores y cajas de escalera deben cumplir con estrictos requisitos de seguridad contra incendios. La fuerza normal de hormigón armado se adopta cuando esto prueba suficiente para la estabilidad estructural. Si las tensiones son demasiado grandes, se utiliza hormigón de alta resistencia, o perfiles de acero se insertan en los puntos débiles para dar refuerzo extra. Otros factores en la construcción de edificios determinarán cuál de estos métodos se elija.

El pilar trabaja a compresión lineal y está sujeto al aplastamiento o pandeo dependiendo de su esbeltez relativa. Este es usado desde nivel de la superficie del terreno, bajo el suelo se ensancha y luego se abre en zapata. La más común es la que está constituida por hormigón armado previamente encofrado o prefabricado, pero también puede existir de acero que es común en edificaciones de varios niveles y se fabrica con pilares previamente modulados.

Esta tesina pretende demostrar que estas características resistentes se pueden lograr con muros y pilares de madera laminadas como veremos en los demás capítulos.

#### 3.7 Uniones

*"por la falta de un clavo se perdió la herradura; por la falta de una herradura se perdió el caballo; por la falta de un caballo se perdió el jinete."* Benjamín Franklin, 1758.

Ha habido muchas innovaciones en las uniones con el punto de vista del soporte de la carga gravitacional en edificios altos. Cambios en la relación entre los elementos estructurales verticales y horizontales han conducido a la creación de grandes espacios libres de pilares en los interiores. En el ámbito de la tecnología edificatoria, *"el termino unión se refiere a la forma como se resuelven los encuentros entre los diversos elementos participantes y el lugar donde se realiza este encuentro."* (Martin, 1981, pp. 9-27)

Una vez ubicados correctamente, debe intervenir los métodos y elementos necesarios para su fijación, la cual debe garantizar un comportamiento óptimo frente a las acciones naturales previstas. La fijación puede ser por adhesión, conexión, sujeción, trabazón.

Los elementos de conexiones son adicionales que se utilizan en las estructuras prefabricadas; el diseño apropiado de esto es la operación más importante realizada en la prefabricación. Pueden afectar la economía de un sistema, así como también su respuesta a las cargas laterales y gravitacionales.



## 4. Análisis de casos de estudios de rascacielos en madera

4.1 El caso de Vancouver: Tall Wood. Michael Green

4.2 Otros casos de estudios:

- El caso de Noruega: Treet. Bergen y Omegn Building Society (BOB)
- El caso de Estocolmo: HBS 2023. Berg | C. F. Møller Architects
- El caso de Chicago: Big Wood 2013. Michael Charters



“En un proyecto de arquitectura intervienen muchísimos aspectos y, durante, la construcción, algunos pierden importancia y otros se convierten en fundamentales. Esto nos enseña dos cosas: primero, que no es tan fácil llegar a conseguir lo que te habías propuesto, y segundo, que se puede construir todo aquello que uno quiera. Y también que hay cosas, al cambiarlas de escala y construirla te sorprenden necesariamente”. Zaha Hadid. El croquis n. 73, 1995, p. 9

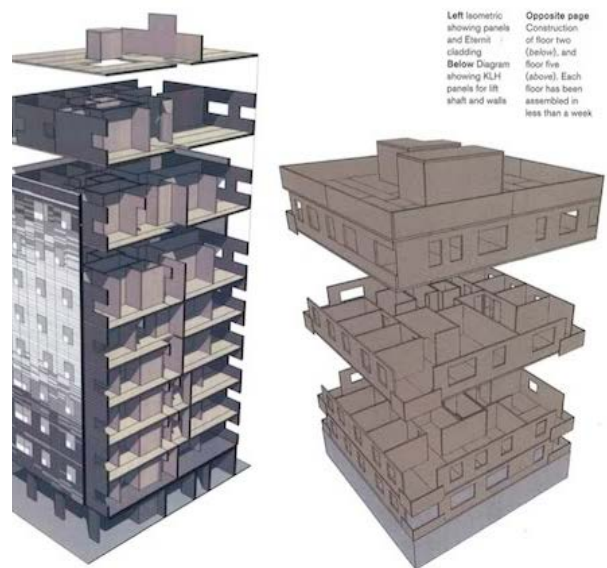
La madera es el material de construcción producido naturalmente más importante que utilizamos hoy en día. Es sin duda uno de los mejores materiales de la edificación que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y el almacenamiento de carbono en nuestros edificios, teniendo también en cuenta que este es un material que es renovable y resistente.

En los últimos años se han realizado edificios de mediana altura construidos en madera, siendo uno de los más emblemáticos el Stadthaus en Londres, edificio habitacional de nueve pisos construido con paneles de madera laminada. El Stadthaus es solo un ejemplo de una serie de edificios en altura construidos principalmente en Europa usando este relativamente nuevo sistema constructivo. Ver figura 4.1.

Estos edificios fueron construidos usando el sistema CLT (Cross-laminated timber) son soportados tanto por los paneles de madera laminada en la envolvente, como por los paneles en particiones interiores, no existen elementos estructurales predominantes tales como pilares o vigas. El concepto hace uso de barras de tensión de acero integrados a vigas de madera. Con estas barras se disminuyen un gran número de elementos de fijación. (Van De Kuilen, J. W. G., Ceccotti, A., Zhouyan, X., & He, M., 2011).

La función estructural de muros interiores implica que los edificios construidos estén subdivididos, por lo que no puede ser utilizado para edificios comerciales donde son necesarios espacios de grandes luces, lo que hace que este sistema sea utilizado mayormente en edificios de uso residencial.

En Nueva Zelanda y Australia, se ha generado una corriente de investigación que busca el desarrollo de sistemas estructurales en madera para edificios comerciales con espacios interiores de grandes luces, cuyo principal requisito es que sean resistentes a rigurosos eventos sísmicos. El nombre de este consorcio es Structural Timber Innovation Company Ltd, STIC, y está formado por universidades y empresas madereras de Nueva Zelanda y Australia.



composición fotos Blog.IS-ARQuitectura.es

Figura 4.1. Sistema de paneles de madera laminada del Stadthaus.

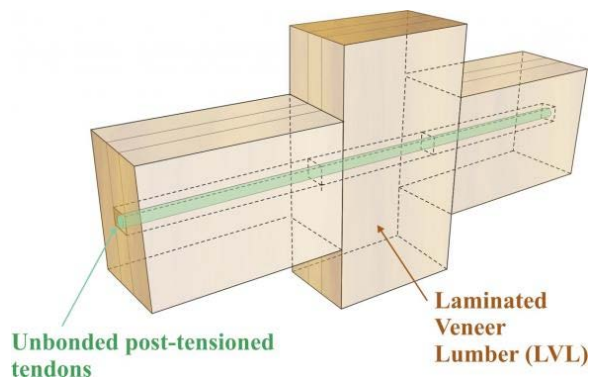


Figura 4.2 Sistema LVL. (Sistema de madera post-tensionada)

El sistema estructural desarrollado por STIC es un sistema de madera post-tensionada utilizando LVL (Laminated Veneer Lumber) o madera laminada (ver figura 4.2); el nombre del sistema es Pres-Lam, el cual radica en un movimiento controlado de balanceo en las conexiones; en el caso de marcos, vigas y pilares se encuentran conectadas simplemente por un tendón post-tensionado a través de la viga lo que implica que durante un desplazamiento lateral se produce una apertura en la junta tensando paulatinamente el tendón e incrementando la fuerza de post-tensionado. Un aumento en esta fuerza implica un aumento en la capacidad de momento en la conexión y adicionalmente se genera una fuerza que intenta recentrar la estructura, es decir cerrar la apertura. (Pérez, N. 2010).

Debido a que la mayor parte del movimiento se concentra en la apertura de la junta, las vigas y los pilares están sujetas a una deformación que los mantiene muy cerca del rango elástico por lo que es esperado un mínimo daño durante un sismo.

Existen otros sistemas más convencionales que pretenden alcanzar gran altura con estructuras realizadas completamente en madera. Uno de los principales promotores de utilizarla para la construcción de edificios en altura ha sido el arquitecto Michael Green el cual aboga por utilizarla para construir Edificios Altos, particularmente en madera laminada, impulsados por la necesidad de encontrar alternativas seguras, sin emisiones de carbono y sostenible a los materiales estructurales predominantes del mundo urbano (TED Conferences, 2013). Las soluciones propuestas hacen frente a los grandes desafíos del cambio climático, la urbanización y el desarrollo sostenible al contribuir significativamente en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para explicar todo esto mejor hemos tomado el informe realizado por MGB ARCHITECTURE + DESIGN "El caso de los edificios de madera altos. Cómo la madera laminada ofrece una alternativa segura, económica y respetuosa del medio ambiente para las estructuras de construcción altas." (MGB ARCHITECTURE + DESIGN. 2012, p. 57-78).

Los diagramas estructurales FFTT ilustran 4 posibilidades estructurales de configuraciones que utilizan el sistema. Con cada opción, la capacidad estructural determina principalmente las posibles alturas del edificio. Por ejemplo, en la Opción 1, la altura de construcción posible es hasta 12 plantas, se emplean muros de madera laminada para el núcleo estructural y pilares en el perímetro como estructura de soporte. En opciones 2 y 3, que alcanzan mayor altura hasta 20 plantas, se requiere una estructura adicional, muros interiores y exteriores estructurales. Para la opción 4, como en la opción 2 y 3, muros interiores y exteriores estructurales proporcionan apoyo adicional.

La industria de la construcción representa aproximadamente el 39 por ciento de todas las emisiones artificiales de carbono, según establece Michel Charter para la revista eVolo (Aielo, 2013), una cifra que se reduciría considerablemente si más edificios, grandes y pequeños, fueron hechos de madera.



#### 4.1 El caso de Vancouver: Tall Wood. Michael Green

Este proyecto fue concebido a raíz del exceso de árboles que hay en la región, el cual debe ser aprovechado, evitando pérdidas innecesarias y contribuyendo a la reducción de la huella de carbono de Canadá. Para hacer frente al problema, en 2009 el parlamento de la Columbia Británica aprobó un primer acto que requiere la madera para ser considerada como el principal material de construcción en todos los nuevos edificios construidos con dinero público.

Michael Green, un arquitecto con sede en Vancouver, propuso un sistema de construcción que, según él permite la construcción de rascacielos de 20 plantas, erigidos en forma segura utilizando productos de madera como CLT<sup>3</sup> (madera contralaminada). Él ahora está ofreciendo el sistema libremente a los arquitectos de todo el mundo bajo una licencia de código abierto.



Figura 4.3 Sistema FFTT.

FFTT<sup>4</sup> es un sistema de izado único que une los paneles macizos de madera laminada de manera efectiva mediante marcos, reduciendo el costo para construir edificios altos de madera. El sistema utiliza pilares rígidos estructurales. Fue desarrollado por primera vez por Michael Green y Eric Karsh en 2008 y ha evolucionado hasta el actual enfoque descrito más adelante.

Los paneles de madera macizos se utilizan para forjados, muros y el núcleo del edificio con pilares de madera (hasta 12 plantas) y las vigas de acero y estructura principal (12 plantas y más) integrados en los paneles macizos de madera laminada que apoyan plantas. La introducción de acero permite reforzar la estructura y una gran flexibilidad para que el sistema alcance alturas con una solución predominantemente completamente en madera.

El sistema FFTT es adaptable a muchos tipos de edificios, escalas y localizaciones y permite la rápida erección de edificios simples y estructuralmente sólidos. Los marcos de madera requieren la reorganización y la enseñanza de las industrias de la construcción en los mercados extranjeros con el fin de aumentar el uso de los recursos madereros.

<sup>3</sup>Cross Laminated Timber

<sup>4</sup>Siglas extraída del informe "THE CASE FOR Tall Wood BUILDINGS", presenta una nueva forma de construir edificios altos. FFTT se refiere a Finding the Forest Through the Trees (encontrar el bosque a través de los árboles) es un enfoque de panel macizo de madera laminada.

Caso de estudio - opción 1

En esta opción, que permite hasta 12 plantas de altura del edificio, los muros del núcleo son de madera laminada y en el perímetro pilares del mismo material que se despliegan como la estructura de soporte en muros autoportantes. Dado que ninguno de los muros interiores es requerido para tener una función de soporte de carga, el diseño de planta es muy flexible. Además, en la ausencia de muros de carga exteriores, esta opción permite flexibilidad en el diseño de su fachada, incluyendo la posibilidad de que esta sea muro cortina completamente. Al ser de planta libre, la capacidad para acomodar fácilmente los cambios en la distribución, posiciona esta opción muy competitiva en términos de uso y la planificación, sobre todo en el mercado de oficinas.

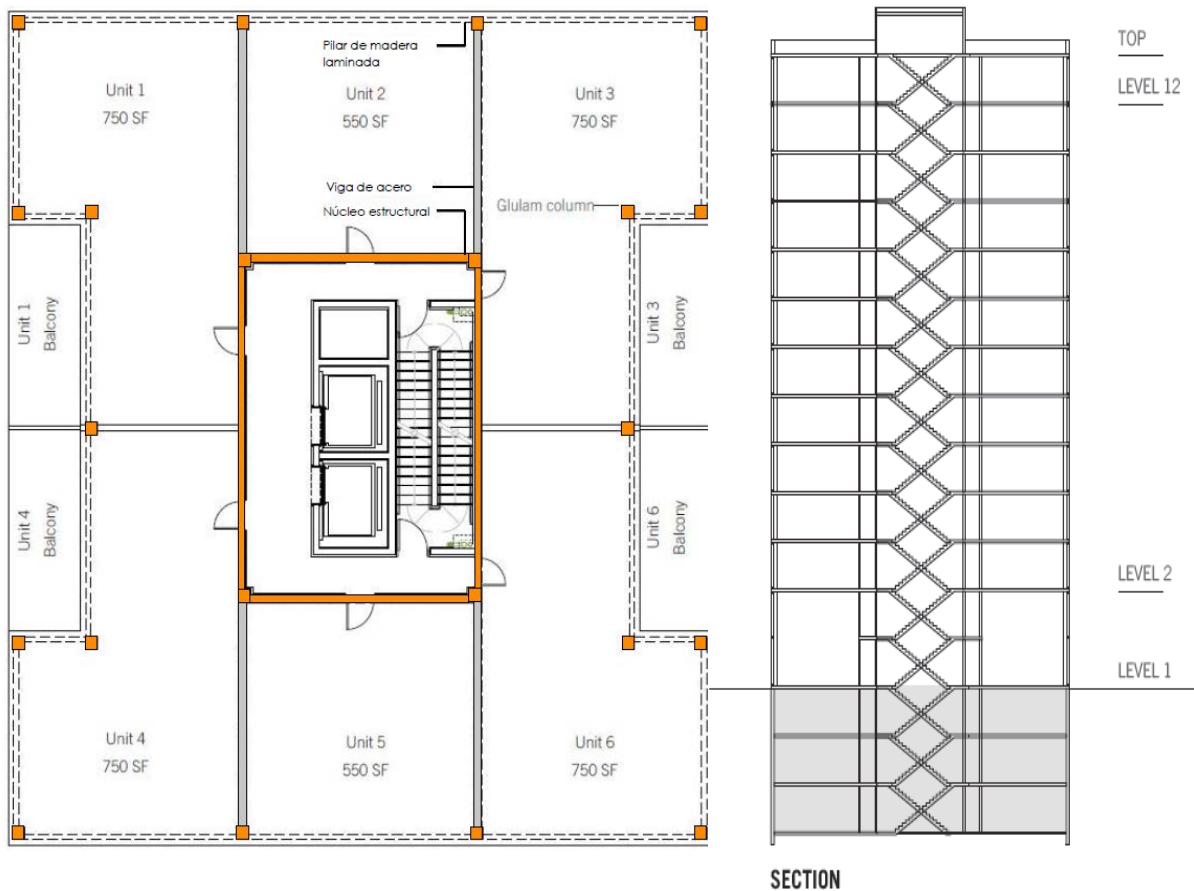


Figura 4.4 Planta resaltando los elementos portantes y sección del esquema estructural y aprovechamiento de la planta de la opción 1.

## Caso de estudio - opción 2

Con esta opción se puede alcanzar hasta 20 pisos de altura utilizando como núcleo estructural muros y pilares de madera y pilares perimetrales. Al igual que en la opción 1, en ausencia de muros estructurales exteriores, esta opción también permite una gran flexibilidad en el diseño de su fachada. En términos de organización del espacio interior, la introducción de muros portantes interiores disminuye la flexibilidad en el diseño de planta y los futuros cambios, sin embargo, estos muros estructurales interiores puede ubicarse para usos específicos, como muros divisorios entre las unidades. Esta estructura se presta a ser más adecuado para una aplicación residencial, ya que no ofrece los planes abiertos deseables de diseños de oficina.

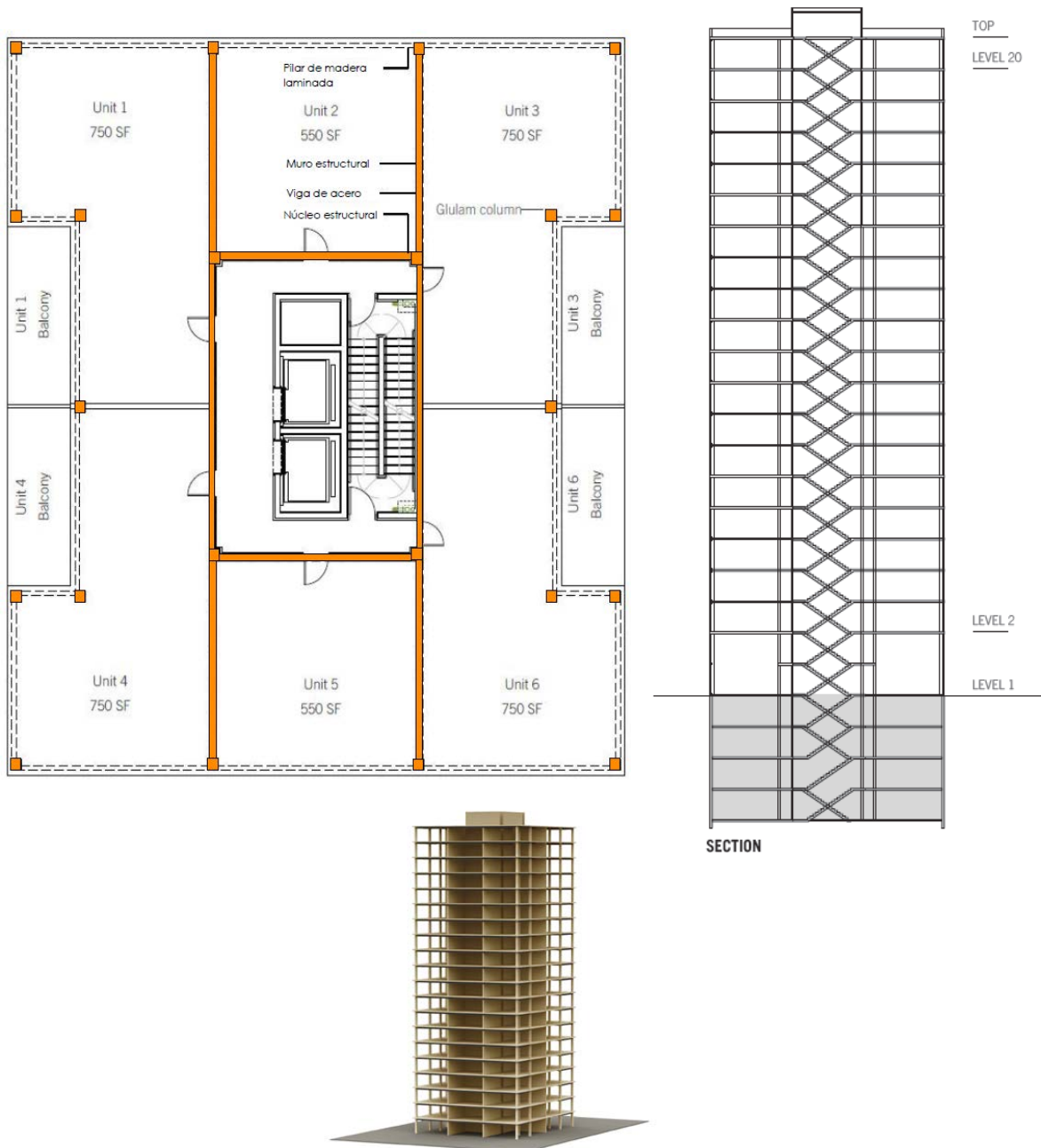
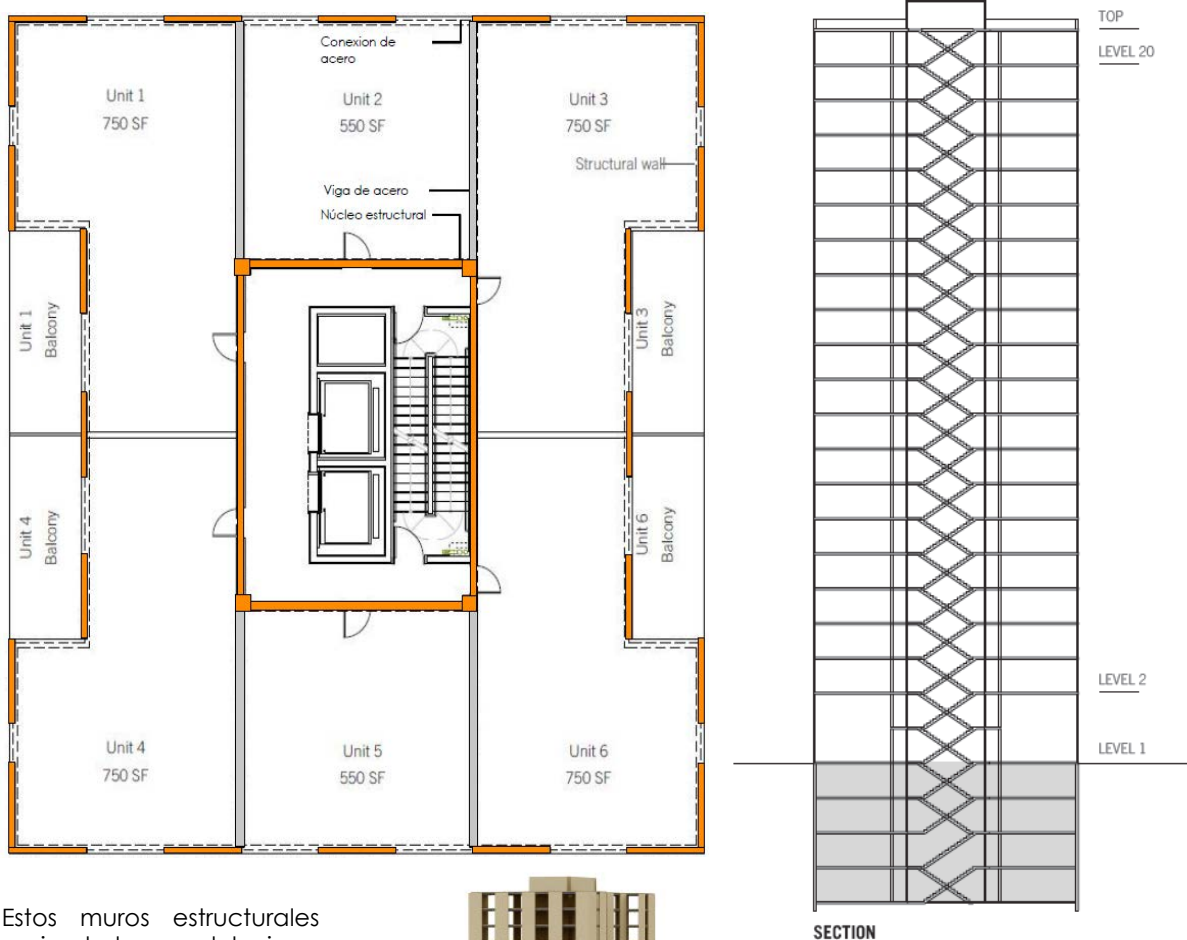


Figura 4.5 Planta resaltando los elementos portantes y sección del esquema estructural y aprovechamiento de la planta de la opción 2.

Caso de estudio - opción 3

Esta opción es similar a la Opción 2, con un máximo alcanzable altura del edificio de 20 plantas. Esto se logra utilizando muros de madera estructural para el núcleo y la introducción de muros exteriores portantes también de madera. Aquí, los muros estructurales exteriores han reemplazado los del interior y los pilares de madera laminada del perímetro de la opción 1 y 2. El impacto de esto es que el interior está libre de estructuras de nuevo, lo que permite flexibilidad en términos de la distribución interior y permitiendo futuras modificaciones. Por otro lado, la presencia de las paredes estructurales exteriores ahora limita la flexibilidad de la fachada, sin embargo, desde un punto de rendimiento térmico, estas paredes exteriores proporcionan oportunidades para su mejoramiento. Esta estructura es particularmente adecuada para uso residencial y cuando se requiera una composición opaca de la fachada. Mientras, su diseño interior abierto sería adecuado para una distribución de oficinas, aunque sería cuestionada debido a sus vistas obstruidas y la cantidad de luz natural que recibiría en relación con un muro cortina completamente acristalada.



Estos muros estructurales perimetrales son del mismo tamaño y están distanciados a igual medida formando un módulo estructural estándar.

Figura 4.6 Planta resaltando los elementos portantes y seccion del esquema estructural y aprovechamiento de la planta de la opción 3.

## Caso de estudio - opción 4

Esta opción permite alturas de hasta 30 pisos utilizando núcleo estructural formado por muros interiores y exteriores estructurales. Como resultado de ello, ofrece la menor flexibilidad en la organización espacial de las cuatro opciones. Sus muros interiores estructurales limitarían a uso residencial, como en la opción 2.

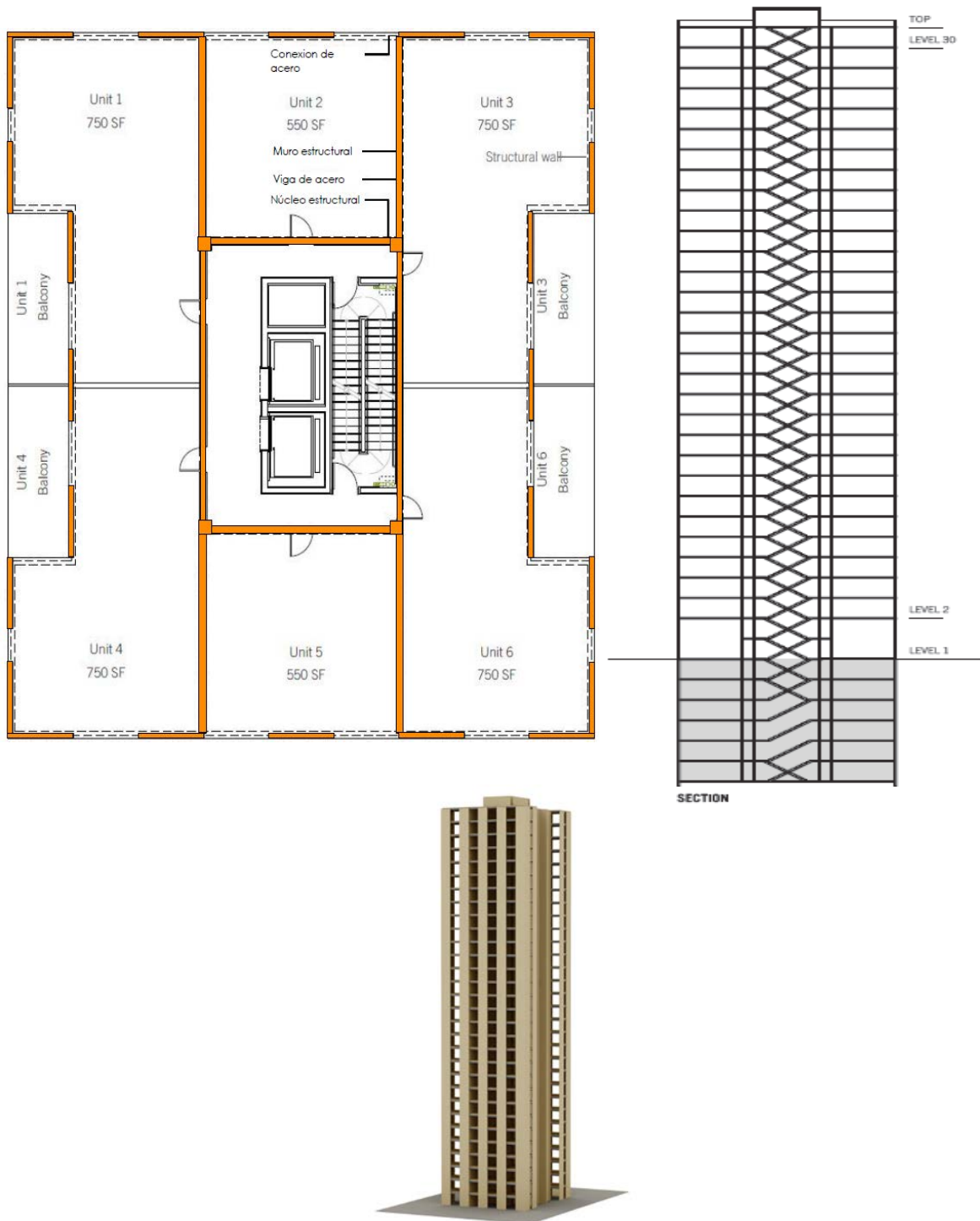


Figura 4.7 Planta resaltando los elementos portantes y sección del esquema estructural y aprovechamiento de la planta de la opción 4.

##### Impacto arquitectónico implícito como consecuencia de la estructura

Las configuraciones estructurales, además de la determinación de las alturas de los edificios alcanzables tendrán un impacto tanto en el diseño en la distribución de la planta del edificio. Por ejemplo, la opción 1 ofrece la mayor cantidad de flexibilidad en el diseño de su partición interior. Esta configuración estructural es más semejante al típico edificio de hormigón que utiliza un núcleo estructural y pilares perimetrales que le permiten una planta libre. En las opciones 3 y 4, donde se requiere una estructura adicional para el aumento de la altura del edificio, las restricciones se colocan en el diseño de cualquiera de las particiones interiores.

El sistema está diseñado considerado como sistema estructural universal para diseñar edificios de madera en altura. Sin embargo, es importante entender que también ha sido impulsado por una serie de problemas de arquitectura pertinente a los edificios altos que son cruciales para el éxito del sistema. El sistema FFTT permite flexibilidad en la planificación y diseño de la fachada de la torre con alguna disminución en flexibilidad una vez que el sistema se utiliza en aplicaciones por encima de 20 plantas. Por encima de esta altura, una torre de FFTT se limitaría probablemente para uso residencial. La flexibilidad en la planificación de la torre es importante para una serie de razones:

- Diseño abierto (donde no hay división por muros portantes) permite una variedad de usos, incluyendo la oficina o residencial, permite modificaciones futuras.
- Carácter exterior y masificación son importantes para ajustar a los detalles específicos de un sitio determinado, requisitos de ubicación, vistas y ver los pasillos, las condiciones de sombreado o expresión arquitectónica.

Además de están las consideraciones de acústica y condiciones de vibración, integración de sistemas, seguridad, protección contra el fuego. En resumen, lo que hemos encontrado es que hay no hay obstáculos con la utilización del FFTT como sistema estructural, el cual satisface las necesidades típicas de un diseño de la torre dejando posibilidades abiertas a la imaginación de todos arquitectos.

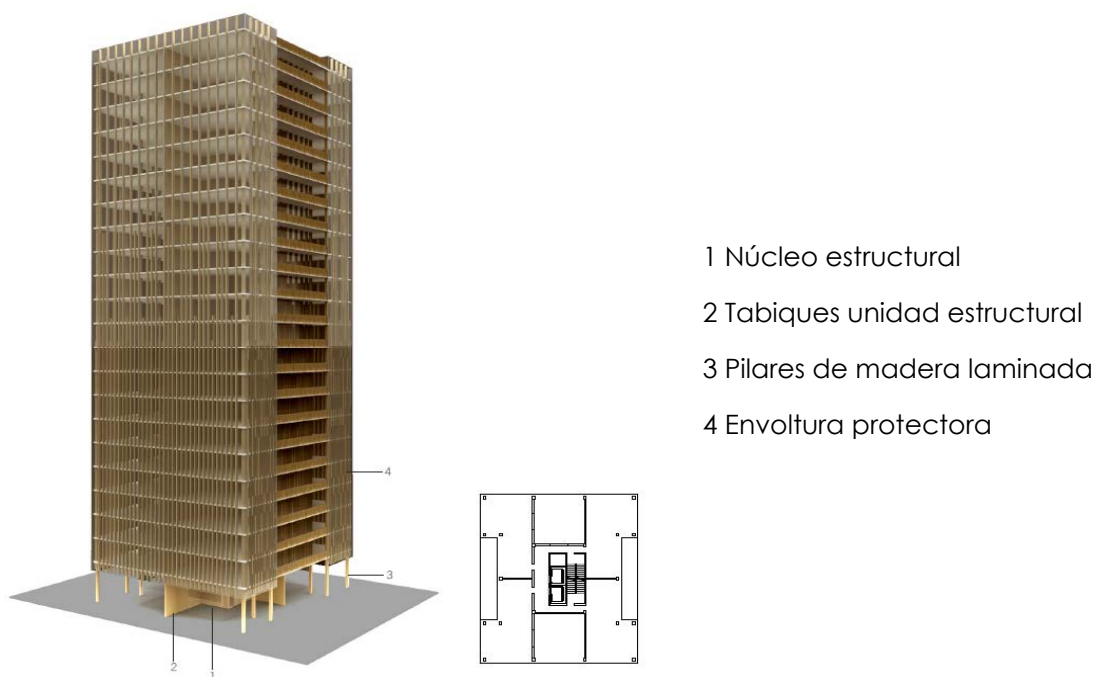


Figura 4.8 OPCIÓN 2 - Ilustrado con un muro cortina de madera laminada

## 4.2 Otros casos de estudios

### El caso de Noruega: Treet. Bergen y Omegn Building Society (BOB) (Abrahamsen, R. B. 2014).

Este edificio es un proyecto multifamiliar de apartamentos de lujo de 14 niveles (49 metros de altura) en el centro de Bergen, Noruega. El actual poseedor del récord del edificio más alto de madera construido es el Forté de Melbourne en Australia, tiene 10 niveles con 32 metros de altura.



Figura 4.9 Perspectiva proyecto "Árbol". Bergen, Noruega

La ejecución del Treet inicio en abril del 2014, el proyecto fue creado por Bergen y Omegn Building Society (BOB).

El sistema estructural está formado por pilares de madera laminada y núcleo de madera contralaminada. La envolvente del edificio será una fachada de muro cortina. Se espera que la instalación contará con importantes propiedades para absorber el carbono. Los módulos de apartamentos del edificio han sido diseñados para cumplir con el estándar Passivhaus de sostenibilidad.

El proyecto cuenta con un equipo multidisciplinar que desarrolla cada aspecto en la ejecución de este. El proyecto estructural lo lleva la firma de ingeniería estructural escandinava Sweco, la cual está colaborando con el estudio de arquitectura Artec quien lleva el diseño. Moelven está trabajando en la madera laminada y los elementos estructurales de

madera contralaminada (CLT) y Kodumaja producirá los módulos de construcción. En una presentación detallada en el Simposio Internacional de la Madera en Vancouver 2014 (Abrahamsen, R. B. 2014), Sweco dijo que el proyecto se basa, en parte, en los estudios de viabilidad previos para estructuras verticales con entramados de madera en Kirkenes y Stavanger, Noruega. Se informa que el costo inicial es algo mayor que en acero y/o estructura de hormigón, pero el tiempo de montaje es más corto.

El diseño de geometría regular también se realizó con el objetivo de abaratar costes. Se espera que su ejecución se concluya en otoño del 2015.

Aspectos técnicos:

- Conexiones: placas ranuradas y pasadores de acero ocultas entre la madera.
- Prefabricación de la mayor parte de los elementos.
- Diseño modulado reduciendo al mínimo las variantes que se puedan presentar para asegurar el menor coste posible. Todas las instalaciones están integradas en los módulos.

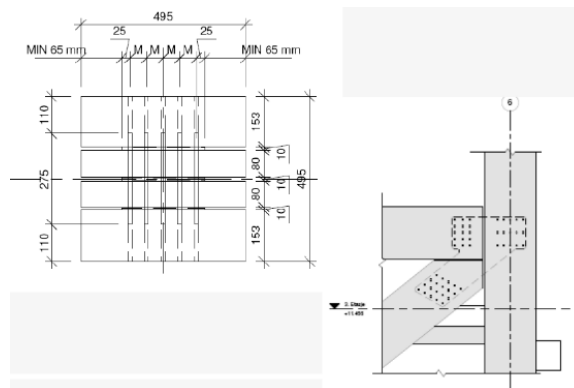


Figura 4.10 Conexión oculta.

- Para proteger la madera se utilizó en las fachadas norte y sur vidrio y la este y fachadas sur tienen revestimiento metálico adicional.
- El material utilizado es madera laminada y madera contralaminada.
- La madera laminada soporta la carga principal. CLT es utilizado para formar el núcleo estructural (15 plantas) y algunas paredes interiores, pero no está conectado a la madera laminada.
- Se utilizó losas de hormigón en tres niveles del edificio para rigidizar la estructura y de este modo mejorar el comportamiento dinámico.
- El edificio se levanta sobre la parte superior de un garaje de hormigón.
- Cimentación está realizada sobre pilotes y anclajes de tensión.
- El proyecto fue dibujado en Revit y calculado en Robot Structure Millenium.
- La calidad de la madera es GL30h.
- Los módulos se apilan hasta 4 plantas, y son sólo conectado a la estructura principal en el módulo más bajo.
- El pilar básico es de 405x650 mm y 495x495 mm y el diagonal es de 405x405 mm.



Figura 4.11 Esquema estructural: 550 m<sup>3</sup> madera laminada, 385 m<sup>3</sup> CLT para una altura total de 49 m.



**El caso de Munich: J. W. Van de Kuilen. 2010.**

Jan-Willem Van de Kuilen planteó un sistema para construir rascacielos con madera contralaminada utilizando hormigón para el núcleo de rigidización.

Este plantamiento surge de investigaciones realizadas por J. W. G. Ceccotti en el 2008, quien conjuntamente con la experiencia de otros colegas que habían realizado edificios de 3 y 7 pisos utilizando madera contralaminada en Japón y especialmente por las investigaciones sobre conexiones entre paneles realizadas por Sandhaas en el 2009.

Dichas investigaciones fueron publicadas en Elsevier y en el World Conference on Timber Engineering ambas publicaciones en el 2010. (Van De Kuilen, J. W. G., Ceccotti, A., Zhouyan, X., & He, M., 2011)

El sistema plantea un concepto de rascacielos de hormigón-madera para edificios muy altos. A fin de comprobar la viabilidad, utilizaron un edificio rectangular diseñado con más de 40 plantas y una altura total de 150 metros con plantas estabilizadores ubicados en el nivel 10, 20 y 30, ver figura 4.13. Las paredes exteriores estarían formadas de CLT, el cual tiene un buen comportamiento bajo las cargas de compresión, pero sería necesario un número de elementos de fijación el lado de tensión del edificio. Para evitar esto, se integraron barras de acero en los paneles de CLT, ver Figura 4.14.

Con las dimensiones utilizadas en el ejemplo, el edificio utiliza alrededor 0.75m³ por panel de CLT por m² de apartamento. Este edificio es de 43 pisos con unos 142m de altura y es de uso residencial. Las dimensiones de la planta son 35m x 25m. Un total es requerido alrededor 26300m³ de madera, evitando alrededor de 50.000 toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto es equivalente a lo que 33 mil vehículos emiten en un año.

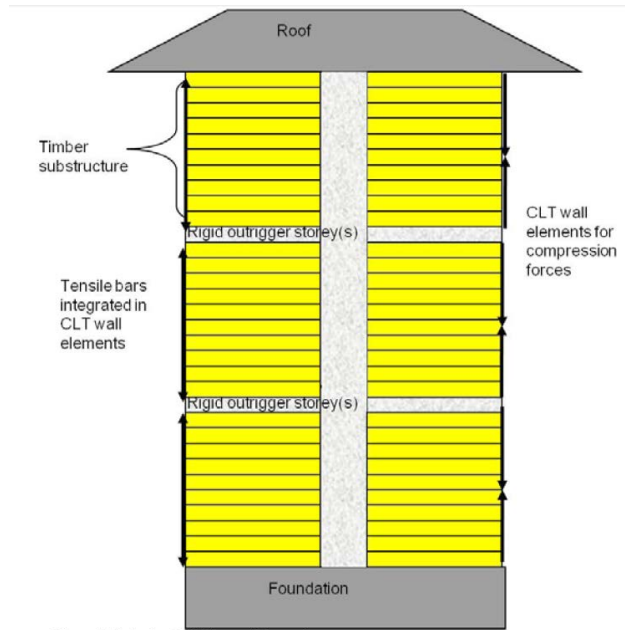


Figura 4.12 Esquema estructural: 40 niveles o mas con plantas estabilizadoras cada 10 niveles.

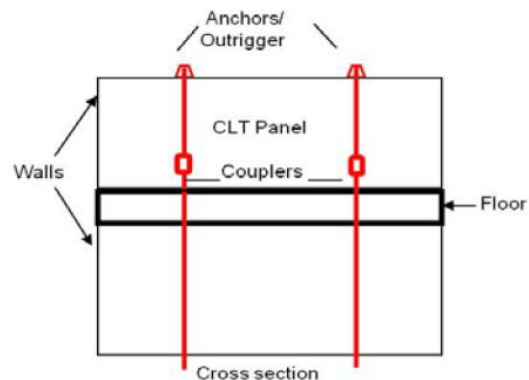
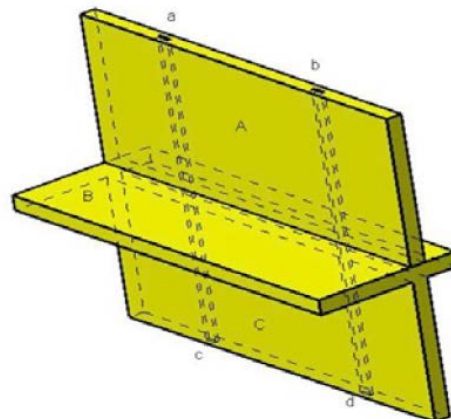


Figura 4.13 Conexión de pared-piso-pared de CLT con barras de tensión integrados

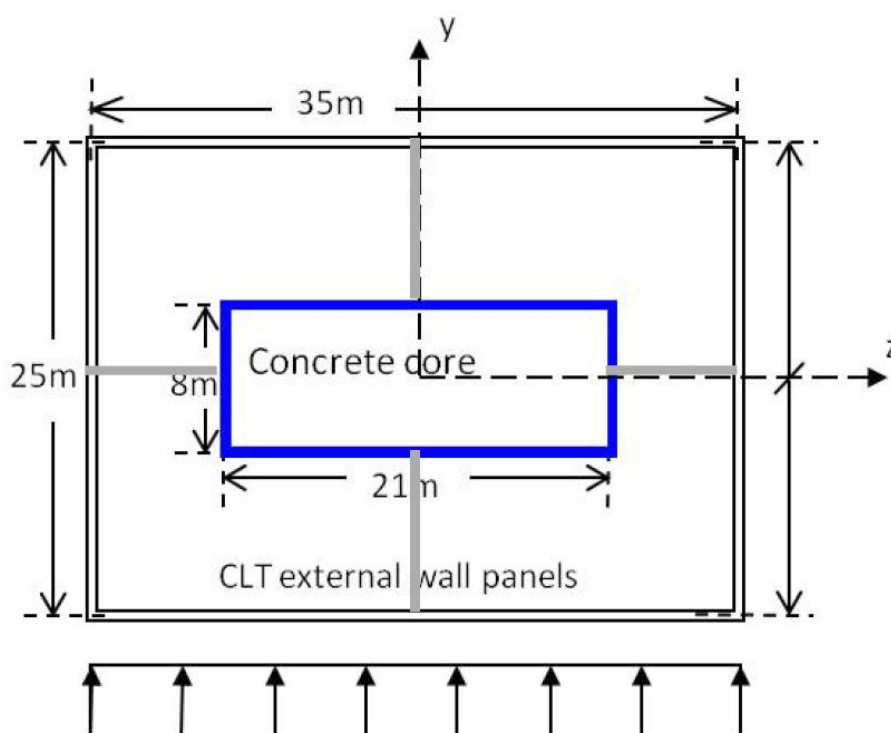


Figura 4.14 Diagrama de distribución en planta de los elementos estructurales.

Al final de la investigación los autores concretaron que "la viabilidad de un rascacielos de hormigón-madera ha sido analizado y demostrado que es posible. El número de barras de acero integradas necesarias para asumir las fuerzas de tracción en el lado de tensión del edificio parecería razonable. El siguiente paso en el proceso será un diseño más avanzado, el análisis de cortadura a transferir y los muros de corte entre el núcleo de hormigón y la madera con paredes exteriores. Además, el espesor de los paneles de CLT se estimó inicialmente en 350 mm, pero esto parece alta con respecto a la calculada tensiones y deformaciones. Más en general, aspectos como la seguridad contra incendios y el rendimiento terremoto serán estudiado en el futuro."

También las conclusiones de la investigación arrojaron que para que este funciones es necesario:

- Estabilidad al núcleo;
- Un brazo de palanca para los momentos de flexión globales;
- Una división entre las secciones de la madera para la seguridad contra incendios;
- Permitir la construcción de servicios (equipos);
- Espacios de refugio en caso de emergencias.



## **5. Documentación y características de Lake Shore Drive Apartments**

5.1 Diseño Arquitectónico

5.2 Diseño Estructural

5.3 Sistema de transmisión de cargas



Este edificio se escogió debido a la configuración de su planta estructural regular, tomando en cuenta las luces, su esbeltez, el sistema estructural y de arriostramiento empleados, fácilmente escalable, ajustable y repetible para modificar su materialidad, de modo que la investigación funcione en un futuro para edificios de oficina y comerciales.

860 | 880 Lake Shore Drive

1948-1951

Chicago, Illinois, EUA.

Calle Chestnut Street, Calle Delaware y North Lake Shore Drive

## 5.1 Diseño Arquitectónico



Figura 5.1. Vista de las torres en 1950.



Figura 5.2. Vista del diseño de fachada.

De Estilo Internacional, estas dos torres fueron diseñadas por Mies Van Der Rohe y culminadas en 1951. Orientadas con el lago Michigan hacia el este, fueron creadas tras la necesidad provocada por el incendio ocurrido en 1871 que devastó gran parte de Chicago, lo que conllevó a reconstruir la ciudad y a la vez encontrar una solución ante la creciente demanda poblacional que estaban teniendo.

Para ello Mies desarrolló dos paralelepípedos idénticos de 82 metros de altura (26 plantas) que albergaría 208 unidades habitacionales.

En esta volumetría se podría decir que la forma sigue la estructura, y aunque se realicen cambios en la función del edificio, la volumetría tendría el mismo lenguaje representando la influencia de diversas tendencias, por lo que a pesar de haber pasado 66 años de su proyección, continúan con aire contemporáneo con la época.

La fachada está compuesta por una retícula formada por cuatro unidades de ventana divididas por montantes de aluminio que van de suelo a techo alineado entre los módulos estructurales, conformando el cerramiento delimitado por el área entre pilares y vigas.

Por ello, la estructura de la envolvente se compone de un sistema de llenado de marco que crea un modelo de contraste entre el acero negro y la superficie del vidrio.

Esta envolvente de vidrio y acero que acentúan su verticalidad a través de la utilización de ventanas rectangulares, más altas que anchas, conjuntamente con los montantes, hace que todas las fachadas sean iguales. Ver figura 5.2.

La planta arquitectónica de cada torre tiene 685.44 m<sup>2</sup> para albergar 8 unidades de viviendas de 80.0 m<sup>2</sup> para las unidades centrales y 70.0 m<sup>2</sup> para las de esquina. Ver figura 5.2.

Cada unidad está dotada de un dormitorio, cuarto de baño, cocina, sala y área de comedor, en un diseño de planta abierto buscando el máximo aprovechamiento del espacio. Los servicios están ubicados de manera que en ningún caso este en contacto con la fachada.

La cocina queda en continuidad de una pequeña sala y siempre cerca de la entrada de la unidad.

Las habitaciones, concentradas en las esquinas, están separadas del salón y comedor por un mueble central que crea un ámbito de circulación distinto para estos espacios de uso más privado.

La circulación vertical está centralizada, resuelta con dos escaleras y dos ascensores, de esta manera permiten distribuir las unidades alrededor de ella, sin que esta obstaculice el contacto con el exterior de ninguna unidad.



Figura 5.3. Planta arquitectónica tipo.

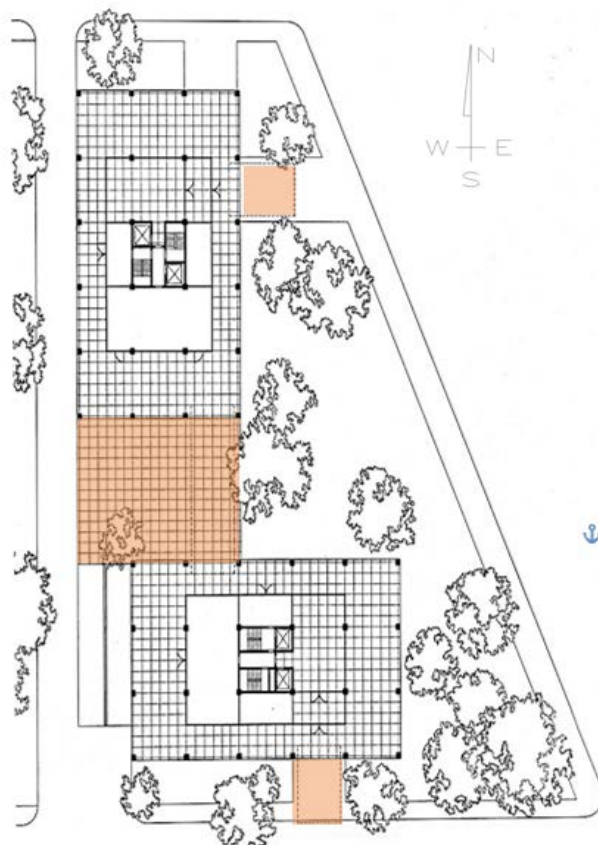


Figura 5.4. Planta Baja cuadriculada señalizando los voladizos y marquesina.

Las dos torres idénticas están colocadas en ángulo recto según la dirección de la trama urbana de la ciudad, emplazadas sobre un solar asimétrico. Están conectadas en planta baja por una marquesina que dispone ambas entradas. Ver figura 5.4.

La planta baja está compuesta por tres voladizos, uno cubre la comunicación entre los dos edificios y otros dos que salen de cada uno de los volúmenes hacia las vías perimetrales. Se colocan colgadas del forjado de la primera planta, dejando holgura entre el voladizo y el forjado, y biapoyados en dos pilares laterales, dejando también cierta holgura.

Los voladizos penetran hacia el interior del perímetro del edificio 110cm, coincidiendo con la dimensión de un módulo del pavimento.

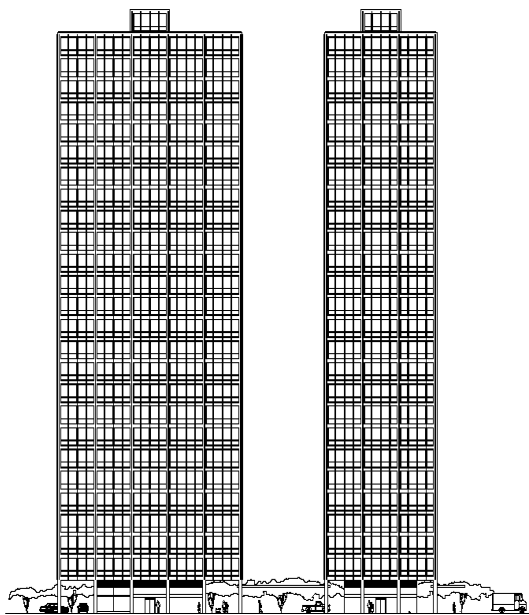


Figura 5.6. Alzado Norte



Figura 5.5. Vista de uno de los voladizos.

## 5.2 Diseño Estructural

La información sobre esta estructura fue suministrada por estudiantes la cátedra de proyectos estructura I del profesor Fenollosa (Domínguez, Fernández, Santiago, Molist, López, & Silja, 2009) los cuales hicieron un análisis estructural del edificio.

**Sistema:** estructural está compuesto por pórticos organizados sobre una cuadrícula con módulo estructural de 3 x 5 de 21'00" x 21'00" (6,40 x 6,40 metros) que fue representada con pilares de acero visto prefabricados colocados en las intersecciones de la cuadrícula. El núcleo de circulación vertical está en el módulo central quedando cuatro pilares a los bordes. La altura de entrepiso es de 3.20 metros.

**Elementos:** los elementos que componen la estructura de los edificios está formada por vigas y pilares atornillados entre sí. Los pilares se unen cada dos plantas y están formados por perfiles W 310 x 310 x 313 de Fy<sub>d</sub> 275 N/mm<sup>2</sup>. Las vigas internas son perfiles W 360 x 170 x 57.8, de 60 cm \* 60 cm, y las perimetrales son perfiles W 250 x 250 x 149, de 60 cm x 60 cm. En sentido longitudinal, las vigas se unen directamente con los pilares; en sentido transversal, además de las vigas que van a los pilares, se colocan correas separadas cada 1,5 m para apoyar el forjado de chapa colaborante de 19,6 cm.

Los montantes verticales que aparecen en la fachada son UB 8x4 están unidos al revestimiento de chapas de acero. Los correspondientes a los pilares ayudan a tirar la placa con que se reviste el pilar, manteniéndola sin ondulaciones, además de facilitar su traslado a obra, puesto que ambos elementos son unidos ya en taller.

En la figura 5.9 se resumen todos los elementos estructurales que componen el edificio.

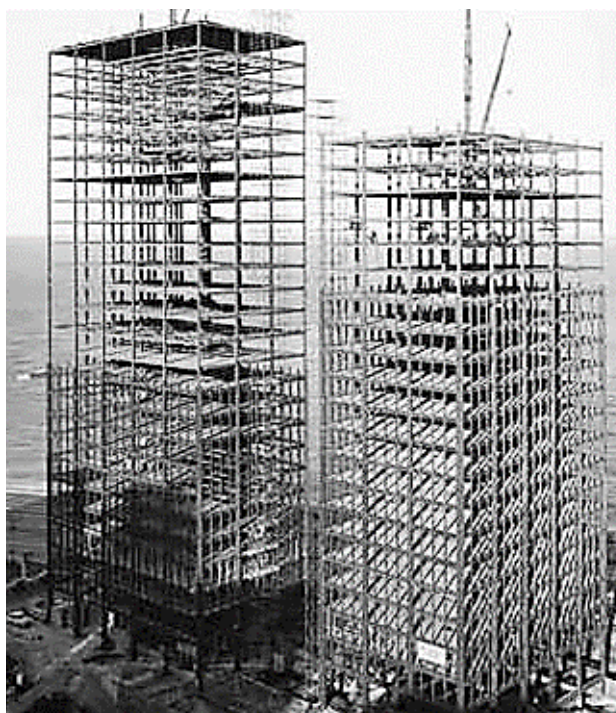


Figura 5.7. Vista de la estructura de las torres en el proceso de construcción.

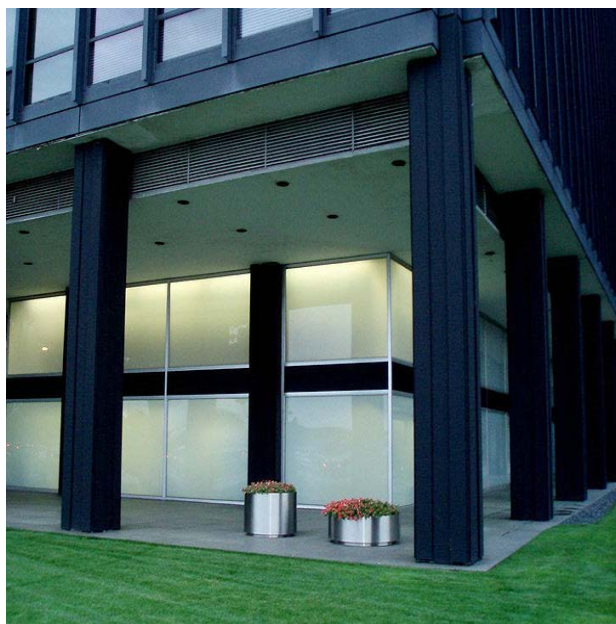


Figura 5.8. Vista de la estructura de acero, con recubrimiento de hormigón y revestimiento nueva vez de acero.



Elementos estructurales	
Muro de sótano de hormigón armado $e=60$ cm.	
Zapata corrida de muro de sótano 200 cm x 80 cm y de 350 cm x 70 cm.	
Zapata aislada de hormigón armado 350 cm x 350 cm x 120 cm y de 200 cm x 200 cm x 80 cm.	
Pilares: Perfiles de acero laminado W 310 x 310 x 313 recubiertos de hormigón formando una sección de 60 cm x 60 cm.	
Vigas perimetrales: perfiles de acero laminado W 250 x 250 x 149 recubiertos de hormigón formando una sección de 60 cm x 60 cm.	
Vigas internas: perfiles de acero laminado W 360 x 170 x 57.8 recubiertos de hormigón formando una sección de 60 cm x 60 cm.	
Montantes verticales de perfiles de acero de UB 8 x 4	
Forjado de chapa colaborante: $e=5$ mm Refuerzos interiores solo en tramos perimetrales de luces de 5,70m: 2 $\varnothing 8$ por modulo; $L=350$ cm. Mallazo de reparto $\# \varnothing 4 200 \times 300$	<p>SECCIÓN (COTAS EN CM)</p>

Figura 5.9 Tabla que resume los elementos que compone el sistema estructural

**Materiales:** Los pilares y vigas al ser metálicos, por normativas de seguridad, fueron revestidos por 5 centímetros de hormigón. Para que sigan siendo acero visto, estos son revestidos con chapas de acero sobre el cual se suelda perfiles "I" no portantes. Los perfiles "I", sin función estructural, soldados a las vigas y pilares, tienen una separación entre ejes de 1,60 m, generan un relieve y crean una trama secundaria que refuerza las líneas verticales.

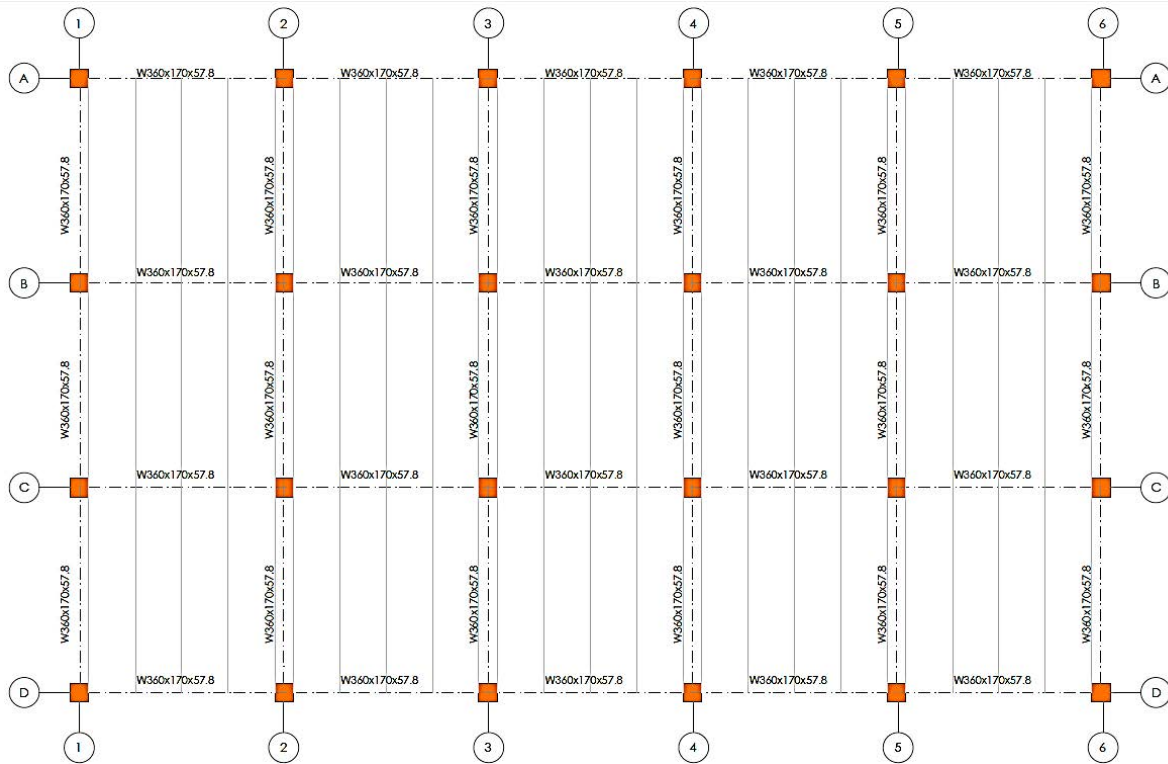


Figura 5.10. Planta estructural tipo realizada.

**Rigidez:** Como se ha mencionado en el capítulo 3, la provisión de una rigidez adecuada, especialmente rigidez lateral, es fundamental en el diseño de estructuras verticales. Por lo tanto en este edificio se rigidizan los nudos en los pórticos, puesto que sin esta la estructura sería inestable, dependería de la resistencia de los pilares la cual no es suficiente dada la altura del edificio.

También la capa de compresión del forjado de chapa colaborante ayuda a mejorar la rigidización, ya que funciona como diafragma rígido, haciendo que todos los pórticos trabajen juntos.

**Cimentación:** es común para las dos torres y se realiza mediante zapatas aisladas que transmiten la carga de los pilares al terreno y zapatas corridas centradas que ayudan a transmitir el esfuerzo producido por los muros perimetrales del sótano al terreno. El sótano es común para ambas torres y aumenta un módulo estructural para cada lado, la cimentación de estos es menor, ya que solo soporta ese nivel.

### 5.3 Sistema de transmisión de cargas

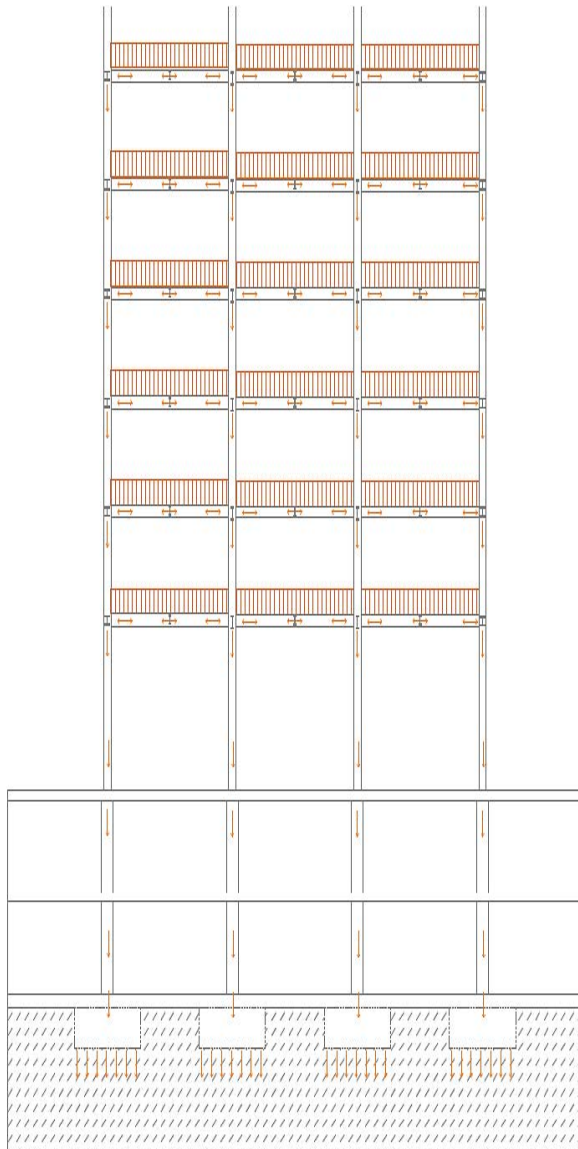


Figura 5.11. Transferencia de cargas verticales.

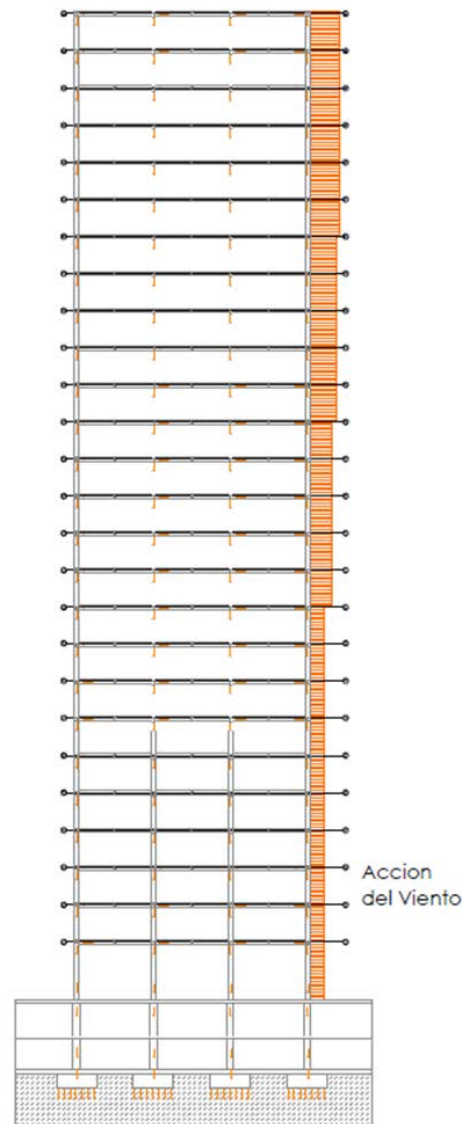


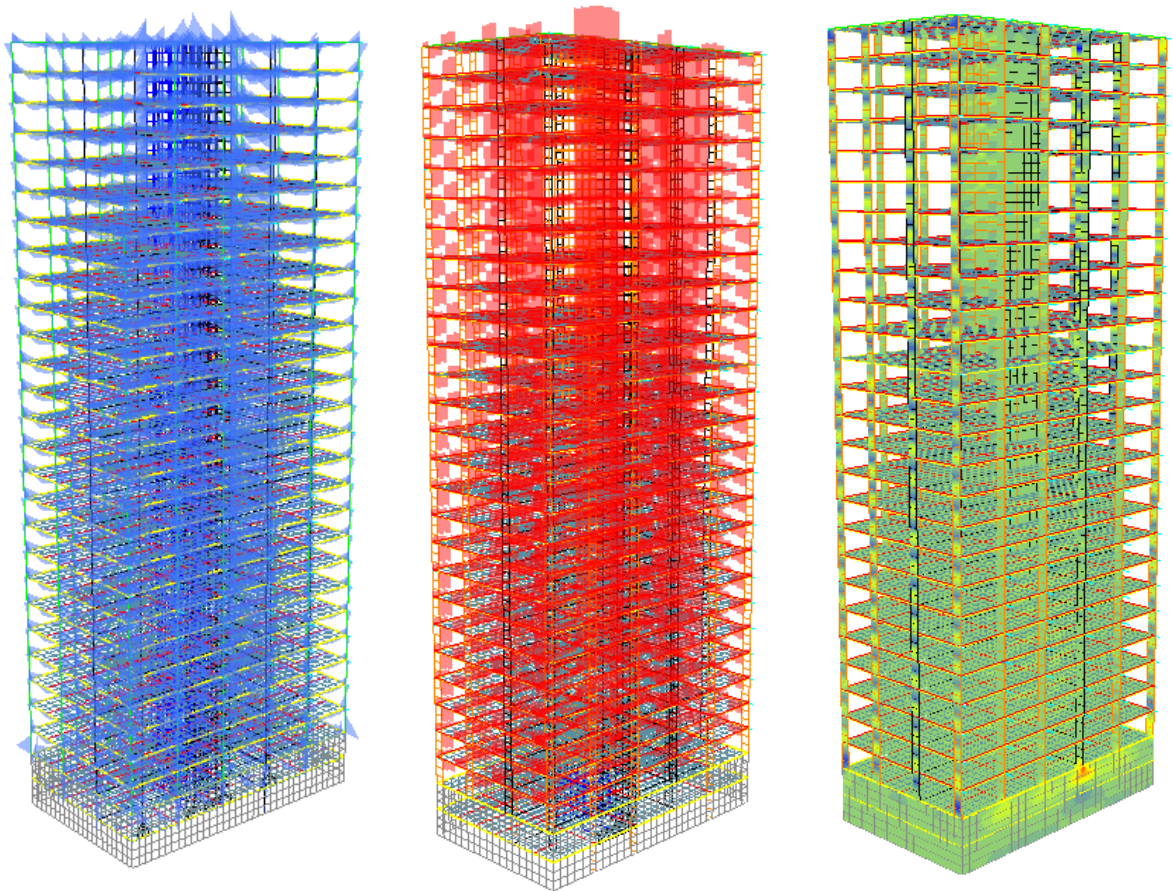
Figura 5.12. Transferencia de cargas horizontales.

El sistema de transferencia de cargas en este modelo estructural es muy simple, ante cargas verticales, la restricción al giro de los extremos de las vigas, impuestas por su continuidad con los pilares, hace relativamente rígido el sistema. Las cargas verticales producidas por el peso propio de los materiales, la sobrecarga de uso y mantenimiento, y las cargas de nieve son transmitidas por los forjados a las vigas, estas las reparten hacia los pilares esencialmente por fuerzas axiales que las conducen a la cimentación y esta al terreno como muestra la figura 5.11.

Por el contrario, las cargas horizontales se resisten esencialmente por flexión tanto en las vigas como en los pilares, lo que hace que el control de las deformaciones sea un aspecto importante en el diseño de estructuras a base de pórticos que deban resistir cargas laterales de cierta consideración, especialmente como se trata de pórticos de varios niveles.

Las cargas horizontales producidas principalmente por el viento son recibidas por los forjados y estos los transmiten a las vigas que se encargan de repartirlas a los pilares para ser conducidas a la cimentación y luego al terreno. Ver figura 5.12.





## **6. Evaluación y diagnóstico del comportamiento estructural de Lake Shore Drive Apartments en acero, hormigón y madera laminada**

6.1 Modelo estructural

6.2 Acciones en la edificación

6.3 Combinaciones adoptadas

6.4 Solicitaciones en pórtico

6.5 Deformaciones en pórtico

6.6 Solicitaciones en forjados

6.7 Estudio de energía embebida de los pilares de los tres sistemas estructurales



*“La obra es un lugar extraordinario donde todo está siempre en movimiento, en continuo descubrimiento e invención. Es la obra que te dice cuáles son las jerarquías, las elecciones que hay que tomar a partir de unas decisiones que quizá, sobre el papel te parezcan irrelevantes. En definitiva, la obra no se acaba nunca, como los edificios y las ciudades, son fábricas infinitas o inacabadas”.* Renzo Piano. Renzo Cassigoli. Conversación con Renzo Piano Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 2005, p. 29

Para la evaluación y diagnóstico del comportamiento estructural se modelizó uno de los dos edificios que conforman el Lake Shore Apartments, al ser los dos idénticas no consideramos necesario analizar ambos edificios.

Se procuró que los tres sistemas estructurales (hormigón, acero y madera laminada) sean lo más parecido posible, utilizando la misma distribución de los elementos estructurales, empleando el método por elementos finitos para el cálculo estructural y planteando las mismas acciones a la que estas estarían sujetas.

En una primera etapa se estableció la tipología estructural de pórticos con núcleo de rigidización, de modo que las cargas de cada planta se dirijan parcialmente a los soportes exteriores y se definen unas dimensiones generales. De esta manera se establece el modelo de diseño estructural.

El análisis de la resistencia se realizará bajo las ecuaciones que expresan el equilibrio estático de la estructura, es decir, las resultantes de tensiones internas tienen que estar en equilibrio con las cargas exteriores que actúan sobre la estructura.

Para las deformaciones elásticas, se estudiará las propiedades elásticas del material precisando el valor del módulo de Young en función de las fuerzas internas existentes, de modo que se analice que la estructura mantiene la continuidad y cumple las condiciones de apoyo, comprobando la compatibilidad de la estructura.

Por último, para garantizar un análisis estructural completo se verificará que estas cumplan con la ley de comportamiento, regida por las relaciones entre las tensiones y las deformaciones.

La modelización de la estructura planteada para cada material se realizó en autocad con la aplicación de Architrave, de la siguiente manera:

1<sup>er</sup>o se crearon las diferentes hipótesis que corresponderían a las cargas que actuarían en las estructuras.

2<sup>do</sup> se dibujaron las barras correspondientes a las vigas, muros y pilares de las estructuras con sus respectivas dimensiones asignadas, las cuales se introdujeron por capas de acuerdo al material y a su ubicación en el espacio, diferenciando así los sistemas estructurales y los diferentes niveles en las que estos se encontraban. Para ello se hizo una planta tipo la cual se copiaría al final para formar la estructura completa.

3<sup>er</sup>o se aplicó la sección a cada elemento de acuerdo a la resistencia característica del material.

4<sup>to</sup> se modelizó los elementos finitos como las pantallas para el arriostamiento y los forjados.

5<sup>to</sup> los pilares y muros se han considerado empotradas en la cimentación.

6<sup>to</sup> Se asignaron todas las cargas actuantes determinadas en el apartado de acciones en la estructura.

7<sup>mo</sup> Se multiplico esta planta tipo hasta formar los 26 niveles tomando en cuenta la variación de cargas en la cubierta.

A partir de aquí se generó el modelo en un fichero .ave para que Architrave y .Dxe para ANGLE, para que estos hicieran el cálculo lineal estático y dimensionamiento de la estructura. Para la estructura de madera laminada se hicieron comprobaciones de flechas y desplazamiento lateral con cálculos manuales.

Las comprobaciones se harán siguiendo los parámetros establecidos del CTE<sup>5</sup> y el Eurocódigo, ya que las limitaciones son muy similares a las del IBC<sup>6</sup>. De cualquier modo esta ultima también fue consultadas.

Con este capítulo se pretende representar gráficamente las solicitaciones y las deformaciones para ver cómo están trabajando los elementos estructurales y comprobar que trabajan confortablemente y que el comportamiento global de la estructura cumple con los criterios normativos. De esta forma se observan las secciones de la pieza sometidas a un determinado esfuerzo o momento, así como los giros o desplazamientos que sufren estas secciones, representando claramente los valores máximos y mínimos y las posiciones de las secciones a las que corresponden. Cada elemento de la estructura debe ser suficientemente resistente como para soportar las cargas para la cual se proyectó, pero la resistencia global de la estructura se determinara por la interacción entre los elementos que la componen.

Para la comprobación se ha elegido como elemento de análisis dos pórticos tipo, uno en el eje longitudinal y el otro en el eje transversal de cada uno de los sistemas estructurales que nos ocupa, ambos corresponden al núcleo del sistema estructural. Las acciones consideradas se indican en el apartado de combinaciones adoptadas, las cuales se analizaron primero independientemente cada una de ellas hasta encontrar la más desfavorable de todas para cada uno de los tipos de estructura y con ella realizar el análisis de las solicitaciones y deformaciones.

Se comprobará que sus deformaciones están dentro de los límites aceptables, que sea suficientemente rígidas bajo las cargas señaladas, de modo que las deformaciones no interfieran con su función y que permanezca estable, evitando pandeos en los pilares por ejemplo.

Una vez calculada la estructura, la siguiente etapa consiste en el diseño y dimensionamiento de los distintos detalles de la misma, como las uniones, rigidizadores, etc., los cuales aún no son idealizados en el modelo general de la estructura.

---

5 Código Técnico de la Edificación. Normativa Española.

6 Código Internacional de la Edificación que es la normativa en términos de edificación que utiliza los Estados unidos.



El siguiente esquema resumen las etapas anteriormente descritas que se tomarán para la evaluación y diagnóstico del comportamiento de los sistemas estructurales planteados:

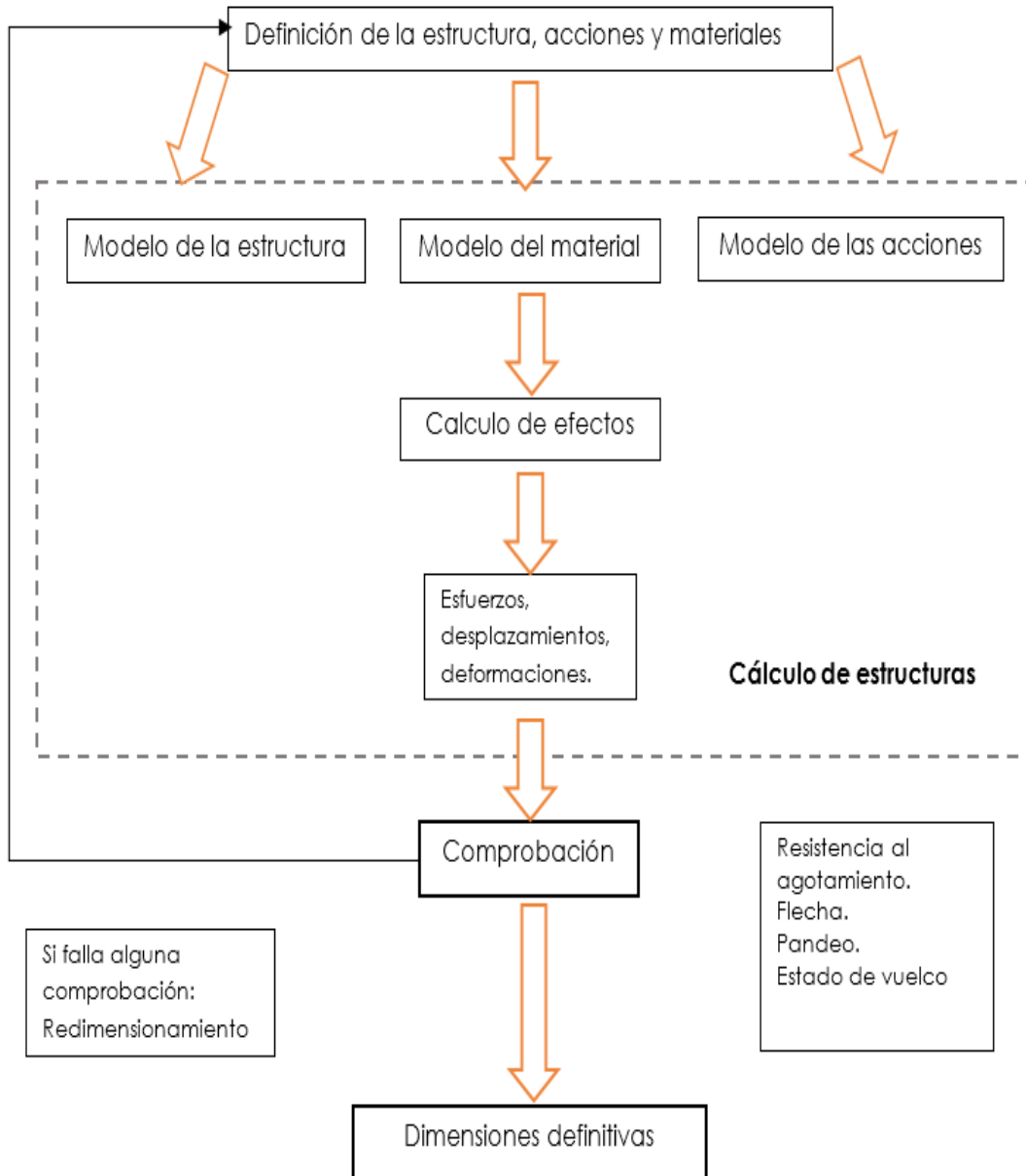


Figura 6.1 Esquema de cálculo y comprobación estructural, extraído del libro de Apuntes de Teoría de Estructuras. (López & García, 2013)

### 6.1 Modelo de la estructura, geometría y materiales

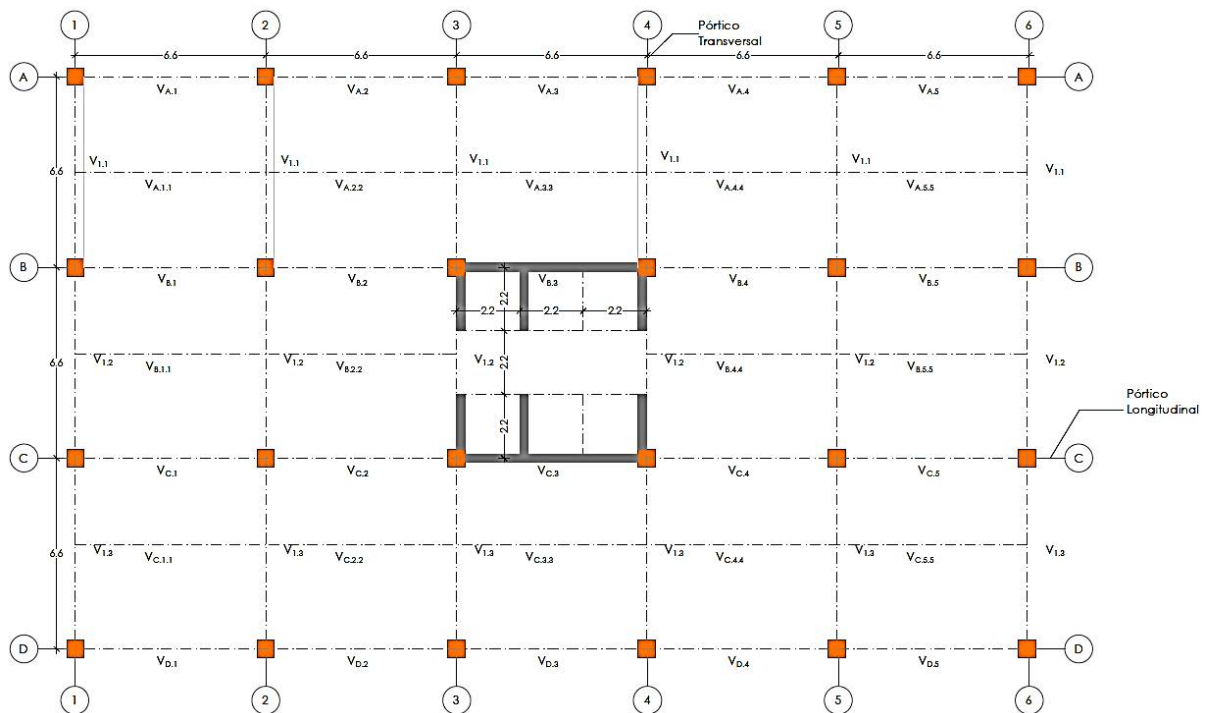


Figura 6.2 Modelo estructural sistema en acero y hormigón armado.

El modelo estructural para el sistema en acero y hormigón armado está planteado de la misma manera: estructura formada por 6 pórticos en sentido transversal del edificio con tres tramos cada uno y 4 pórticos en el sentido longitudinal con 5 tramos cada uno, lo que hace un total de 20 pilares distanciados desde su centro de eje a 6,6 metros en ambas direcciones y 10 vigas de 5 tramos para el caso del sentido longitudinal del edificio y de 3 tramos para la que están en el sentido transversal, todos unidos mediante nudos rígidos. El pórtico C y el 4 fueron los seleccionados como pórtico tipo para el análisis estructural. Un núcleo central está formado con pantallas de hormigón armado de 0,30 m y viguetas separadas a 2,2 m. Ver figura 6.3

Estructura de acero: Los pórticos están conformados por perfiles laminados S275 de resistencia cuya densidad característica es de 7850 kg/m<sup>3</sup>, exceptuando los pilares B2, C2, B5, C5 que son de S420 hasta el nivel 7. Los perfiles seleccionados fueron HEM600 para los niveles comprendido desde planta baja hasta la séptima planta, HEM450 para las siguientes 5 plantas, HEM 320 para las 7 plantas que le continúan y HEM260 para el resto de plantas. Las vigas A, D, 1 y 6 que conforman el perímetro de la estructura se seleccionaron IPE 240.

En el caso de las vigas internas, estas fueron seleccionadas de acuerdo a que trabajara la mayor parte de su capacidad de resistencia. Los pórticos longitudinales están compuestos por IPE400 para los tramos 1 y 5 que son los extremos, HEM 320 para los tramos 2 y 4 que son los más próximos al núcleo e IPE300 para el tramo 3 que corresponde a la viga del núcleo. En el caso de los pórticos transversales, lo componen perfiles IPE450 para los tramos 1, tramos 2 (centrales) IPE300, tramos 3 IPE550. Todas con acero de resistencia característica S275.

Estos elementos soportan el forjado de chapa colaborante de 18 cm de espesor, cuyo peso propio se detallará más adelante en el análisis de las cargas permanentes.

Estructura de hormigón armado: Los pórticos están formados por pilares de sección cuadrada de 0,80 m x 0,80 m para los dos primeros niveles, 0,70 m x 0,70 m para los siguientes 12 niveles y 0,60 m x 0,60 m para los 10 últimos. Estos están distanciados a 6,6 m desde el centro de su eje en ambas direcciones con un total de 20 pilares. Las vigas internas son rectangulares de 0,45m de ancho y 0,65m de canto con y las perimetrales son de 0,40m de ancho 0,60 de canto.

Los forjados es una losa de hormigón armado de 0,22m de resistencia HA-25 al igual para los elementos de soporte, cuya densidad característica es de 2400 kg/m<sup>3</sup>.

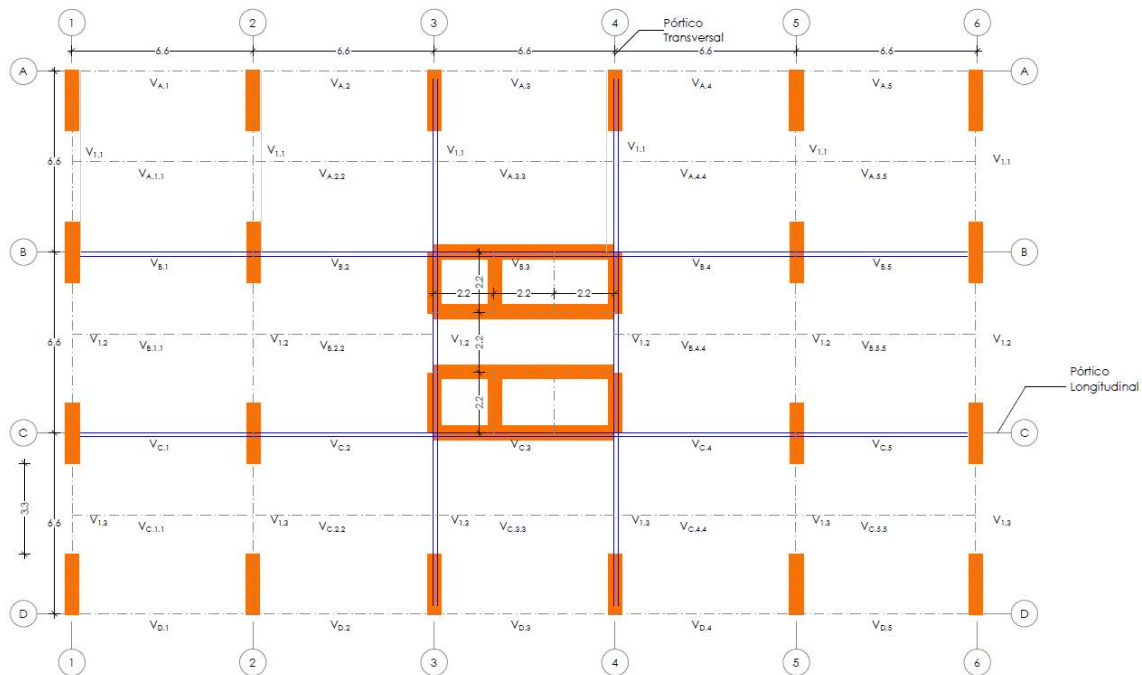


Figura 6.3 Modelo estructural sistema en madera laminada.

Estructura de madera laminada: se trata de una estructura formado por paneles de madera laminada de 1,10 m de ancho y 0,50m de espesor, orientados de manera transversal. Los paneles están separados a 3,30 m. Las vigas tienen la misma disposición que en las estructuras de acero y de hormigón armado, siendo estas de sección cuadrada de 0,65 m ancho por 0,65 m en el caso de las perimetrales y rectangulares de 0,65 m ancho por 0,70 m canto en el caso de las vigas internas. Las vigas de los ejes B y C y 3 y 4 son perfiles de acero HEM220. El núcleo central está formado por pantallas de madera laminada con las mismas características de paneles. Ver figura 6.3.

Los forjados de madera laminada homogénea son de 0,15 m de espesor de resistencia GL 28h al igual que los elementos de soporte, cuya densidad característica es de 425 kg/m<sup>3</sup> y su densidad media es de 460 kg/m<sup>3</sup>.

Los tres sistemas están diseñados para tener 26 niveles de 3,2m de altura de entrepiso como el modelo original del Lake Shore Aparments.

Cimentación: en los tres sistemas se realiza mediante zapatas aisladas de hormigón armado de 1 metro de profundidad para los pilares, y zapatas corrida para los muros del sótano de 1m de profundidad igualmente.

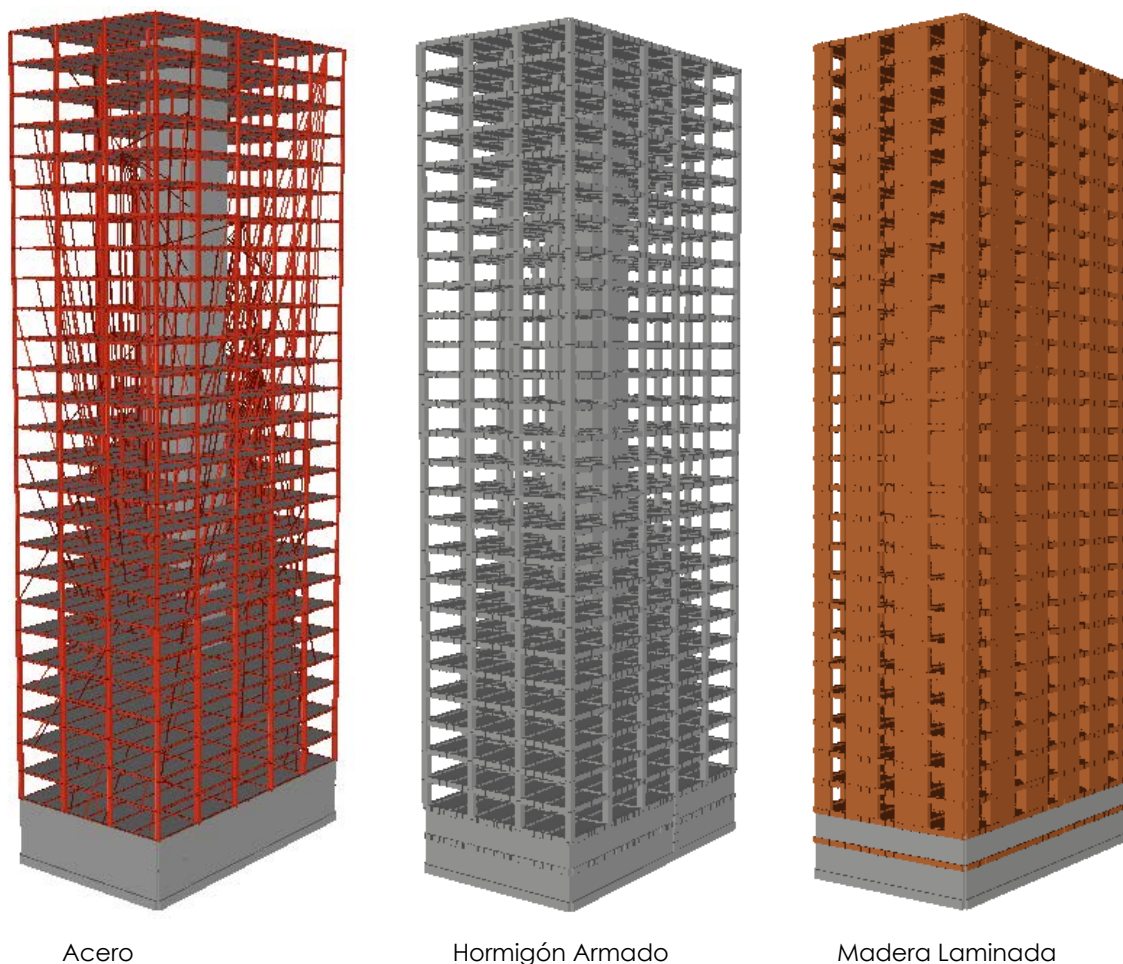


Figura 6.4 Modelo tridimensional de las estructuras de Acero, Hormigón Armado y Madera Laminada.

La siguiente tabla resume los parámetros de los modelos estructurales, su geometría y materiales.

En milímetros

Materiales		Geometría					
	Resistencia	Altura	Luz	Pilares	Vigas perimetrales	Vigas internas	Forjados
Acero	S275	3.200	6.400	HEM260 HEM320 HEM450 HEM600	IPE240	IPE300 IPE400 IPE450 IPE550 HEM320	180
H. A.	HA-25	3.200	6.600	600 x 600 700 x 700 800 x 800	400X600	450X650	220
M. L. E.	GL 28H	3.200	6.600	Paneles 1100 x 500	650 X 650	650 X 700 HEM 220	150

Figura 6.5 Resumen de elementos estructurales en la modelización del Lake Shore Aparments.

## 6.2 Modelo de las acciones

Las acciones a considerar serán las acciones permanentes, las variables y de las accidentales solo sismo, las cuales determinaran los efectos producidos para los tres sistemas estructurales a comparar.

El análisis estructural se realizará mediante el programa informático anteriormente mencionado Architrave, desarrollado por la UPV, el cual calcula los esfuerzos a los que está sometida la estructura determinando su rigidez, las deformaciones, mediante el análisis lineal estático, el cual determina los Estado Limite Ultimo y Estado Limite de Servicio de la estructura. Las comprobaciones de cumplimiento ante acciones sísmica se realizaran con el programa informático ANGLE.

Las cargas actuante en la estructura, el programa informático de cálculo estructural utilizado, Architrave, las multiplica por su factor de seguridad correspondiente, los cuales son extraídos del DB\_SE<sup>7</sup> de la tabla de coeficientes parciales de seguridad, anexo 1 sin necesidad de asignarlos independientemente. El IBC tiene sus propios coeficientes de seguridad, pero debido a que estos no difieren significativamente no consideramos que fuese necesario el sustituir los del DB\_SE.

Los pesos específicos aparentes de los materiales de construcción también son extraídos de este documento en su apartado Acciones en la edificación del prontuario de pesos específicos y coeficientes de razonamiento interno, anexo 1.

Con el objetivo de definir exactamente estas acciones, se establece un modelo simplificado representativo de todas aquellas que actúan sobre la estructura y que además conduzca a resultados del lado de la seguridad.

### Hipótesis Planteadas:

- 1.- Peso Propio
- 2.- Sobrecarga de uso (Categoría A)
- 3.- Nieve
- 4.- Viento N-S
- 5.- Accidental de sismo (ME)
- 6.- Mantenimiento (Categoría G)
- 7.- Viento E-O

### Acciones Permanente (G):

La modelización mediante elementos finitos considera el peso propio, de modo que no hay que colocarle una carga que lo incluya, solamente con especificar el material y el espesor del forjado el programa le asigna su peso propio. Por esta razón, en el caso del forjado de la estructura en acero para poder modelizarlo mediante este método, es necesario determinar el espesor que llevaría este a partir de los elementos que lo componen, de modo que el programa no calcule un peso muy por encima del que sería.

Para ello se consideró un forjado de chapa grecada con capa de hormigón cubriendo la misma área que en el caso que en los demás materiales, para poder determinar el espesor que resulte ser el peso propio que considerará el programa.

---

<sup>7</sup>Documento Básico Seguridad Estructural. Normativa Española.

## 6. Evaluación y diagnóstico del comportamiento estructural en acero, hormigón y madera laminada

### Forjado de Chapa colaborante de 180 mm

Peso Propio Chapa grecada de 8 mm con capa de hormigón,

espesor total de 180mm = 3 KN/ m<sup>2</sup>

Tabiquería = 1,0 KN/m<sup>2</sup>

Pavimento baldosa cerámica = 6.4 m X 0,18 KN/m<sup>3</sup> = 1,2 KN/ m<sup>2</sup>

Total = **5,20 KN/m<sup>2</sup>**

### Forjado de losa de hormigón armado HA-25de 220 mm

Peso propio = 0,22 M X 25,0 KN/m<sup>3</sup> = 5,5 KN/m<sup>2</sup>

Tabiquería = 1,0 KN/m<sup>2</sup>

Pavimento Baldosa cerámica = 6.4 m X 0,18 KN/m<sup>3</sup> = 1,2 KN/ m<sup>2</sup>

Total = **7,70 KN/m<sup>2</sup>**

### Forjado de madera laminada GL28h de 150 mm

Peso propio = 0,15 M X 3,7 KN/m<sup>3</sup> = 0,5 KN/m<sup>2</sup>

Tabiquería = 1,0 KN/m<sup>2</sup>

Pavimento baldosa cerámica = 6.4 m X 0,18 KN/m<sup>3</sup> = 1,2 KN/ m<sup>2</sup>

Total = **2,70 KN/m<sup>2</sup>**

**Acciones Variables (Q):**

Sobrecargas de uso:

Los valores para la sobre carga de uso se obtienen en la Tabla 1607.1. Valor mínimo de la carga viva distribuida uniformemente y concentrada del IBC.

1 libra por pie cuadrado es igual  $0.0479 \text{ KN/m}^2$

Para el forjado de entrepiso, la sobrecarga de uso que le corresponde es la categoría A, según las especificación del IBC de acuerdo a la utilización del edificio le corresponden  $40 \text{ Lb/ pie}^2 = 1.916 \text{ Kn/m}^2$  se asumirá **2 KN/m<sup>2</sup>**.

La carga en la estructura para mantenimiento (categoría G), solo accesible para su conservación serán,  $20 \text{ Lb/ pie}^2 = 0.958 \text{ Kn/m}^2$  se asumirá **1 KN/m<sup>2</sup>**.

Nieve

La carga de nieve extraída del IBC en capítulo 7 del mapa de cargas de nieve de los estados unidos le corresponde al estado de Chicago  $25 \text{ Lb/ pie}^2 = 1.20 \text{ KN/m}^2$

Viento

Se considera la acción del viento uniforme en toda la altura del edificio con hipótesis de viento tanto de norte a sur como de este a oeste. La misma será introducida como carga puntual en el pilar en el caso de las estructuras de acero y hormigón armado y en el centro del panel para la estructura de madera laminada, determinada de la siguiente manera:

Para los pilares intermedios  $S \times QH = FH$  y para los pilares de esquina  $S \times QH = FH / 2$

S = Altura del pilar

QH= Luz del vano

FH= Viento según normativa IBC

$3,20 \text{ m} \times 6,60 \text{ m} \times 1 \text{ KN/m}^2 = 21,12 \text{ KN Pilares intermedios}$

$3,20 \text{ m} \times 6,60 \text{ m} \times 1 \text{ KN/m}^2 / 2 = 10,56 \text{ KN Pilares de esquina}$

**Acciones Accidentales (A):**

Sismo

Para determinar la acción sísmica en los tres modelos estructurales se utilizará el programa informático ANGLE el cual de acuerdo a la aceleración determina las vibraciones que soporta la estructura y la deformada que esta provoca. De acuerdo al IBC, la zona donde está ubicado el edificio le corresponde una aceleración del 10% de la gravedad. En el anexo 1 se adjuntará el mapa del espectro de respuesta sísmica en los Estados Unidos. Para el análisis sísmico se asumirá un suelo de ductilidad media.

### 6.3 Combinaciones adoptadas

Las combinaciones realizadas por el programa son para el Estado Límite Último (ELU) 12 situaciones persistentes, para el Estado Límite de Servicio (ELS) 28 las cuales son: 12 situaciones características, 12 situaciones frecuentes y 4 situaciones casi permanentes las cuales estarán en el anexo 2.

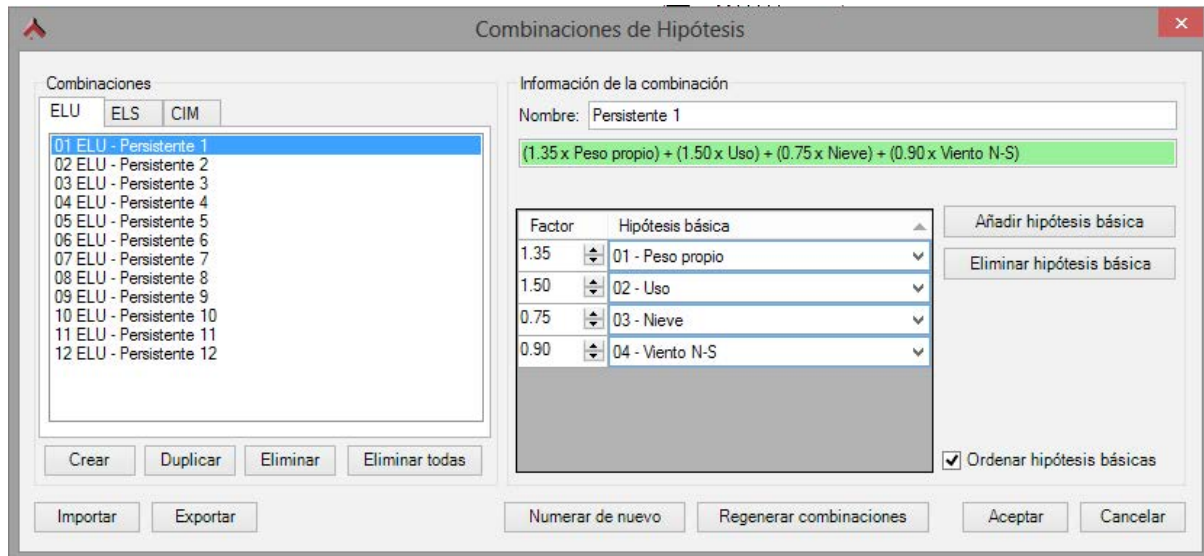


Figura 6.6 Combinación ELU Situación Persistente 1.

En la combinación para determinar el Estado Límite Último en la situación persistente 1, el programa informático Architrave combina las hipótesis simultáneas de peso propio, uso, nieve y viento N-S mayorando estas con factor de seguridad de 1,35 para el peso propio, 1,50 para la carga de uso, 0,75 para la carga de nieve y 0,90 para el viento en dirección norte-sur. Ver figura 6.6.

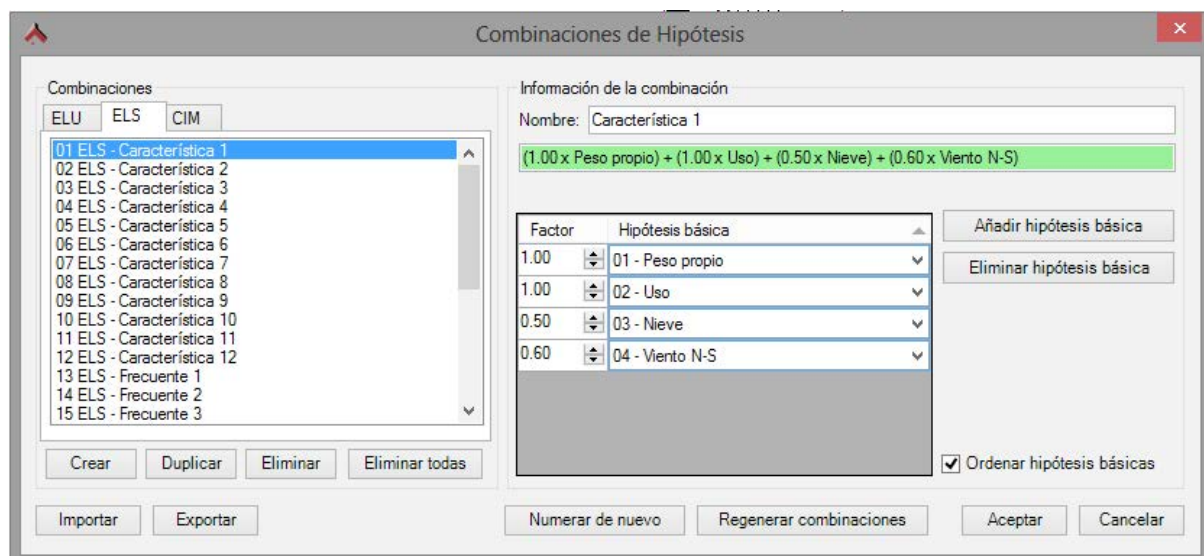


Figura 6.7 Combinación ELS Situación Característica 1.



En el caso del Estado Limite de Servicio, la situación característica 1 también toma las mismas hipótesis que la Situación persistente 1 del ELU, pero esta mayor las cargas con diferentes factores de seguridad que las descrita anteriormente, siendo estas para el peso propio y la carga de uso 1,00, para la carga de nieve 0,50 y la de viento norte-sur 0,60. Ver figura 6.7.

La combinación que presenta una deformada más desfavorable es la ELU Situación Persistente 2 (ver figura 6.8) en las estructura de Hormigón Armado y de Acero que combina las hipótesis simultaneas de peso propio mayorada con un factor de seguridad de 1,35, la de uso con 1,05, nieve con 0,75 y viento con 1,50. Para la estructura de Madera Laminada es la ELU Situación Persistente 5 (ver figura 6.9) con las misma combinación anteriormente descrita.

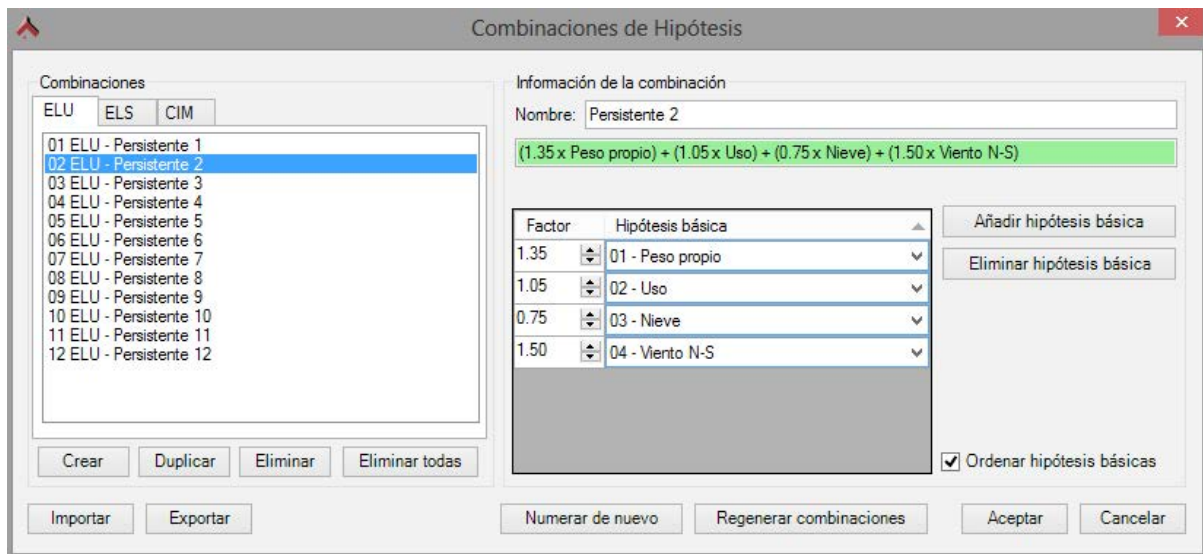


Figura 6.8 Combinación ELU Situación Persistente 2.

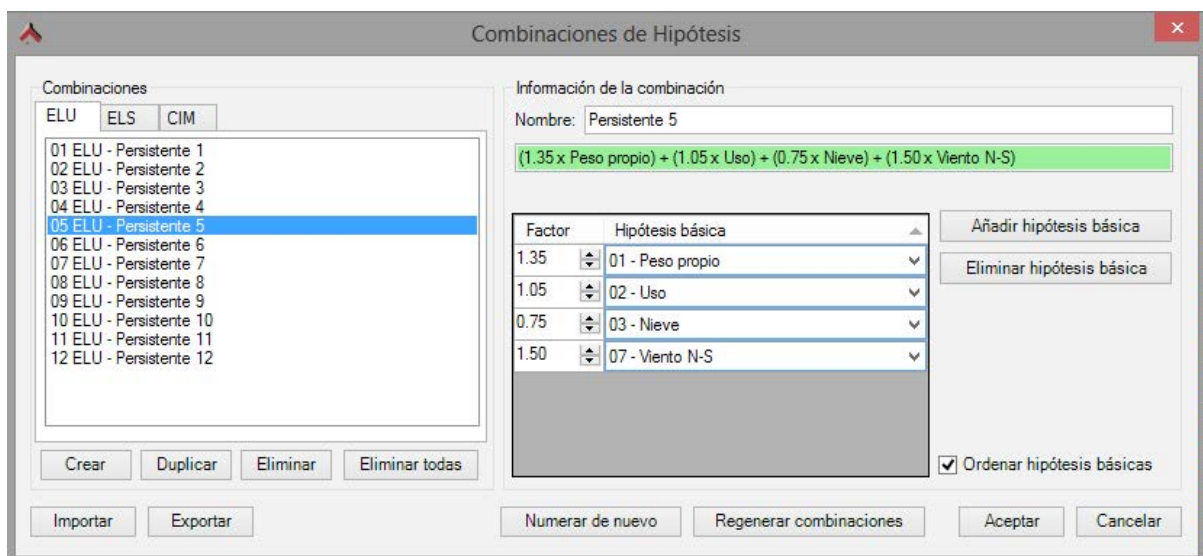


Figura 6.9 Combinación ELU Situación Persistente 5.

## 6.4 Solicitaciones en pórticos

### 6.4.1 Axiles

#### Estructura de Acero

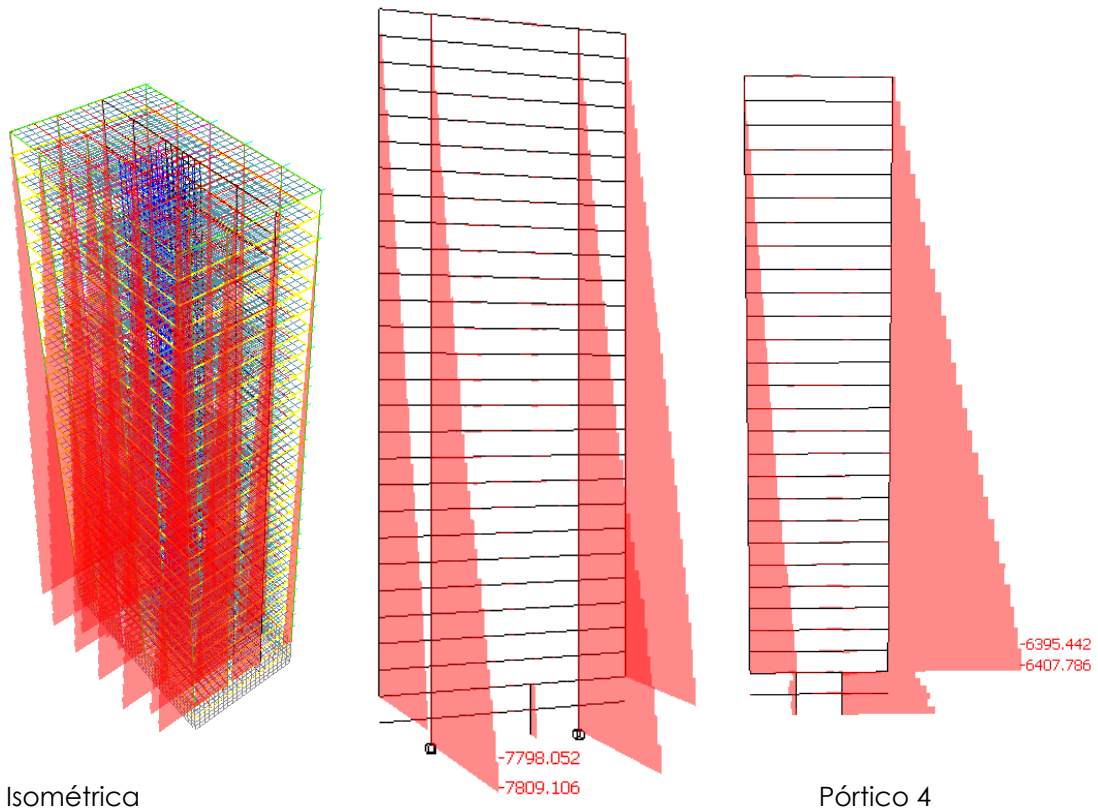


Figura 6.10 Diagramas de esfuerzo axial, estructura de acero.

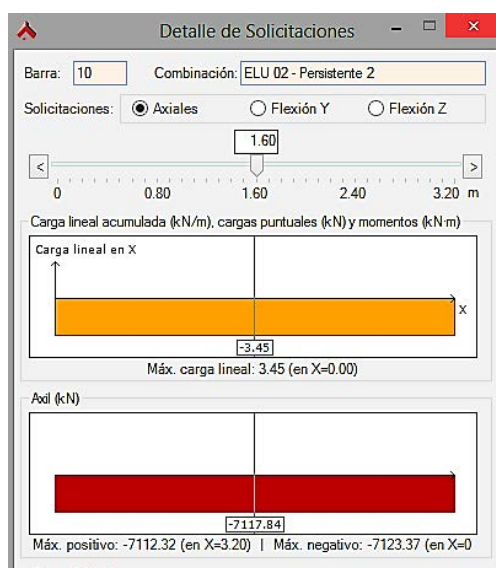


Figura 6.11 Diagrama de axil libre, Pórtico C, estructura de acero.

El fallo de la estructura producido por el esfuerzo axial más desfavorable producto de todas las cargas verticales a la que está sometida la estructura se presentaría en la base del pilar correspondiente al pórtico C si supera los  $-7.809,106$  KN. Este se presenta en la combinación del Estado Limite Último en la situación persistente 1.

En el pórtico 4 este es de  $-6.407,786$  KN. se presenta en la combinación del Estado Limite Último en la situación persistente 2.

Es evidente en las gráficas que el máximo esfuerzo axial se produce en la base de los pilares como resultado de la sumatoria de todas las tensiones perpendiculares a la sección transversal de estos y si hacen mayores en los pilares interiores que en los que se encuentra en la envolvente ya que reciben el doble de cargas. En el caso del pórtico 4, se presenta el mayor axil en el pilar de la envolvente que recibe la fuerza del viento de la combinación adoptada.

## Estructura de hormigón Armado

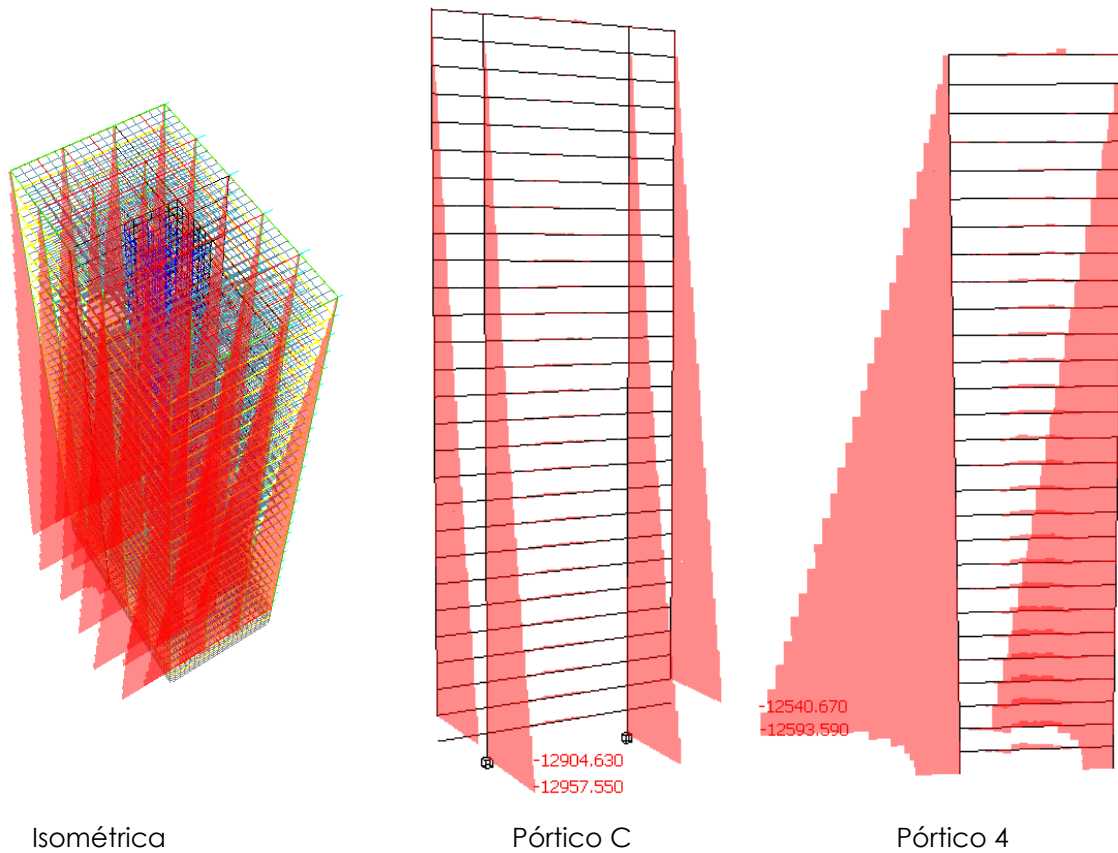


Figura 6.12 Diagramas de esfuerzo axial, estructura de hormigón armado.



Figura 6.13 Diagrama de axil libre, pórtico C estructura de hormigón armado.

El axil más desfavorable en la estructura de hormigón armado producto de todas las cargas verticales a la que está sometida la estructura se presenta en la base del pilar correspondiente al pórtico C siendo este de  $-12.957,550$  kN, tomada de la combinación del Estado Límite Último en la situación persistente 1.

Para el pórtico 4 el mayor axil se presenta en ELU situación persistente 2 y es de  $-12.593,590$  kN.

**Estructura de Madera Laminada**

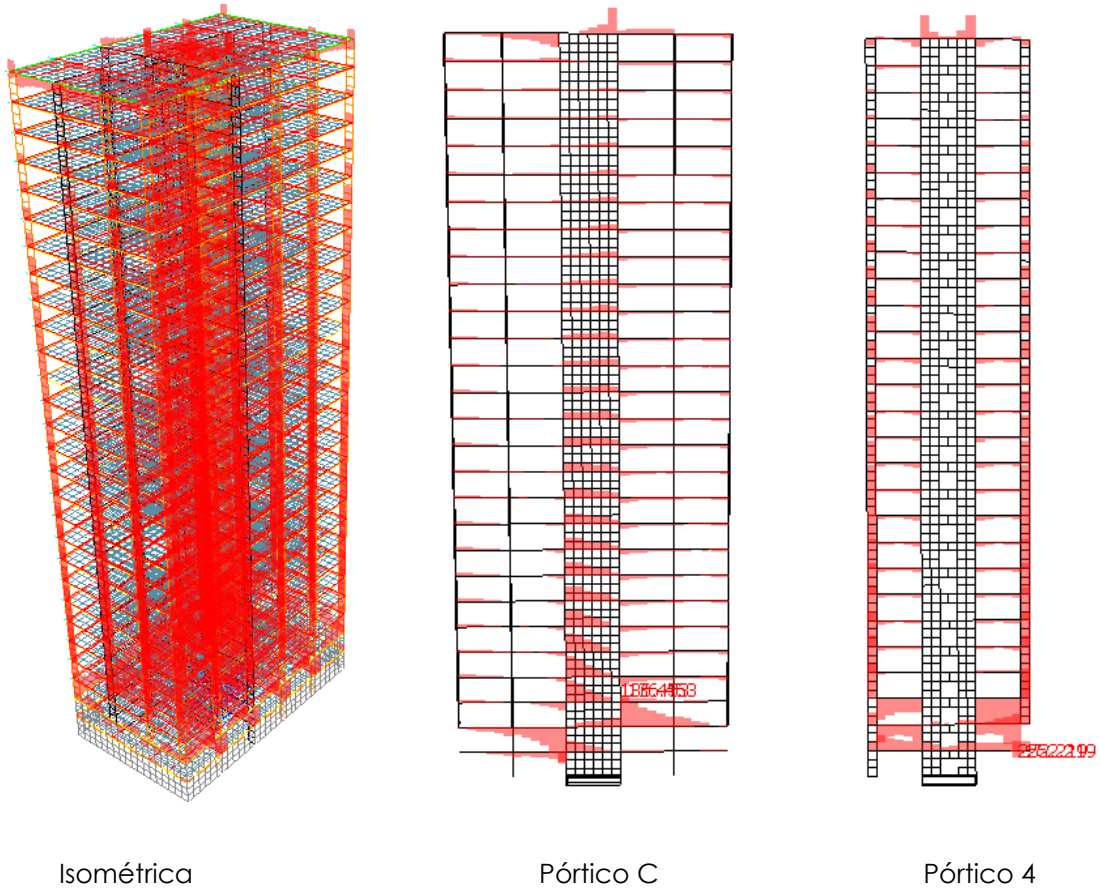
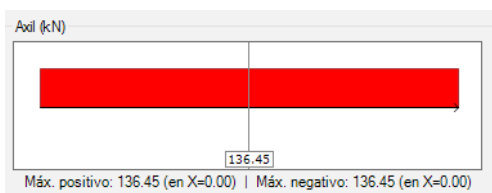


Figura 6.14 Diagramas de esfuerzo axial, estructura de madera laminada.

En pórtico C



El axil más desfavorable en la estructura de madera laminada producto de todas las cargas verticales a la que está sometida la estructura se presenta en la base del panel pórtico 4 y es de -252,22 KN en ELU situación persistente 4.

Para pórtico C este es de -136,45 KN, tomada de la combinación del Estado Limite Último en la situación persistente 11.

En pórtico 4

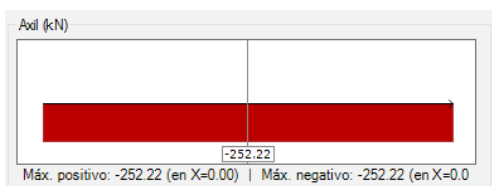


Figura 6.15. Diagrama de axil libre, pórtico C estructura de madera laminada.

## 6.4.2 Cortantes en Y

### Estructura de Acero

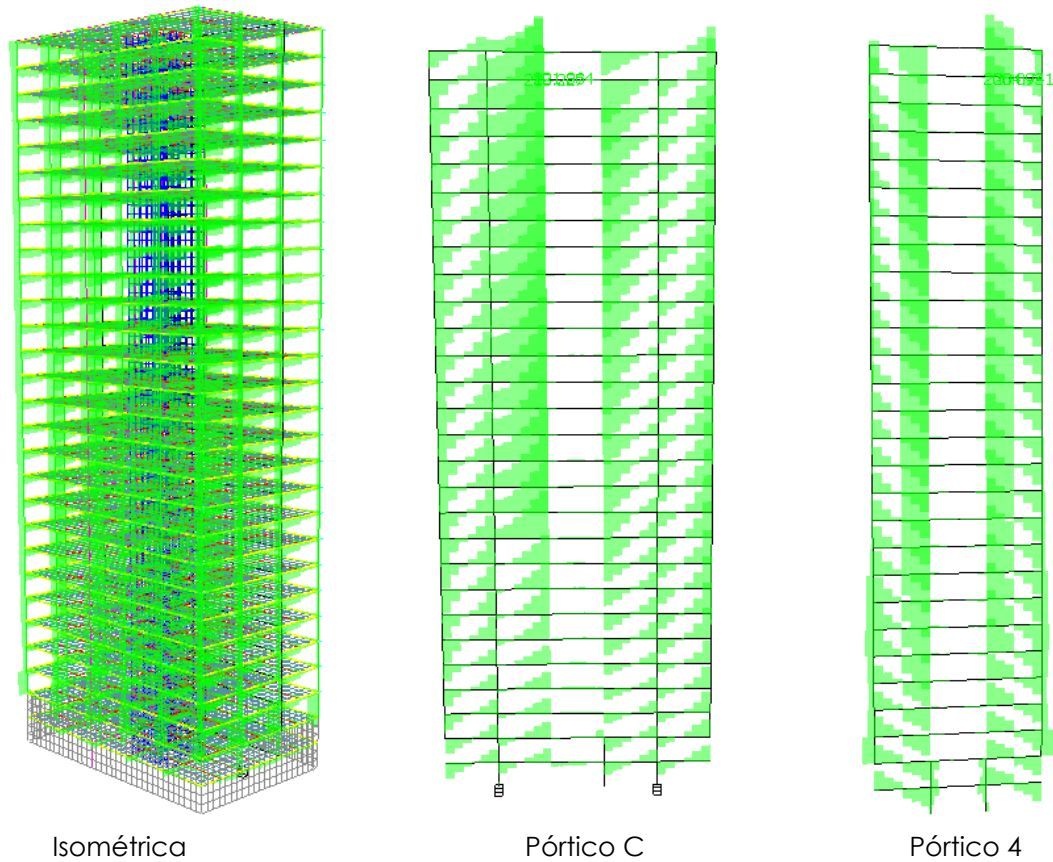


Figura 6.16 Diagramas de esfuerzo cortante, estructura de acero.

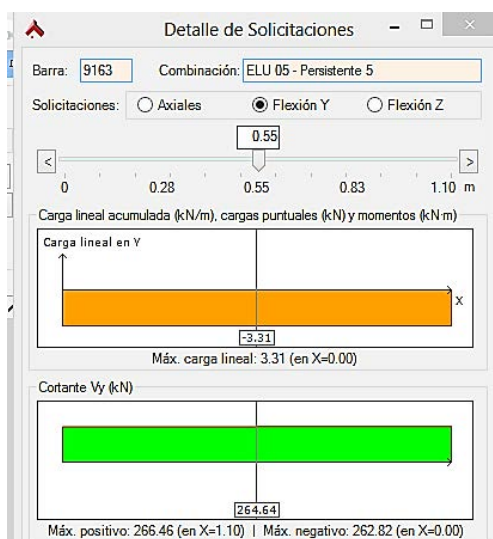


Figura 6.17 Diagrama de cortante libre, Pórtico C, estructura de acero

El máximo cortante en Y resultante de las máximas tensiones paralelas a la sección transversal de los elementos ocurre en el extremo de la viga continuo al núcleo del pórtico C en el nivel 24 y es de -266,46 kN en El Estado Limite Ultimo situación persistente 5.

En el pórtico 4 el máximo es de 214,04 kN y ocurre en el nivel igualmente en el nivel 24 en ELU situación persistente 4.

En ambos caso, el máximo cortante se produce en el extremo de contacto con la pantalla rigidizadora del sistema de arriostramiento.

### Estructura de Hormigón Armado

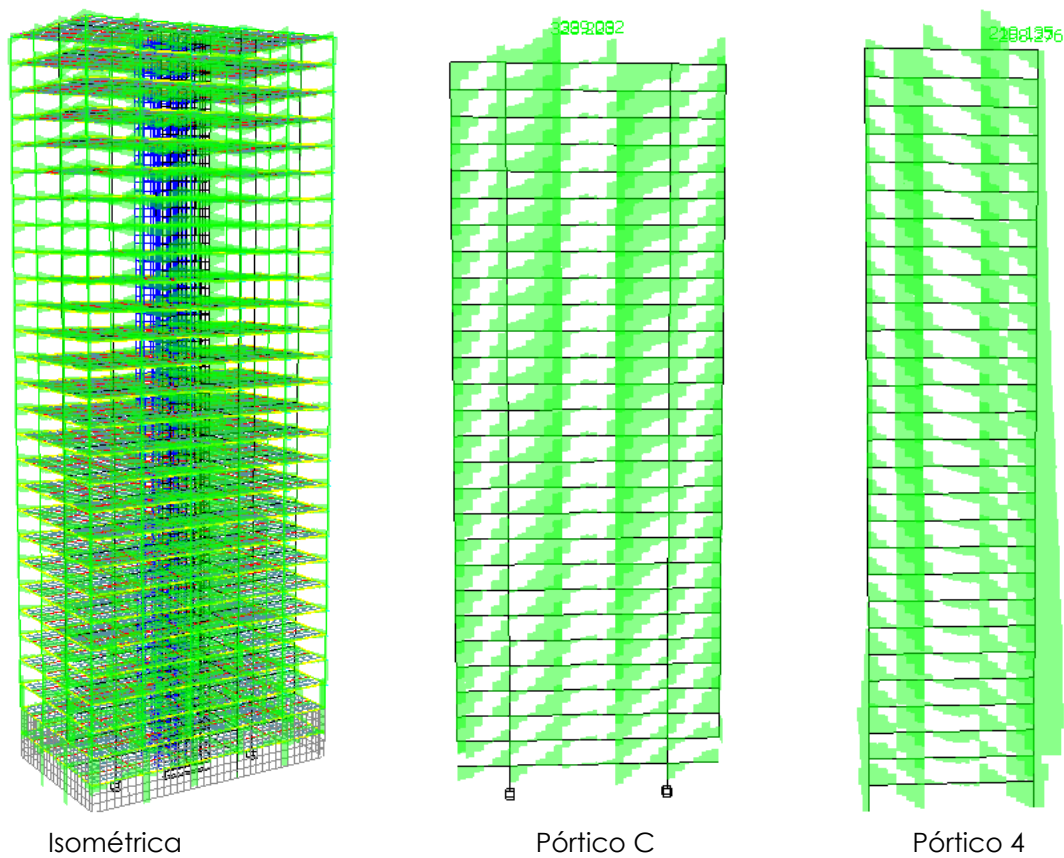
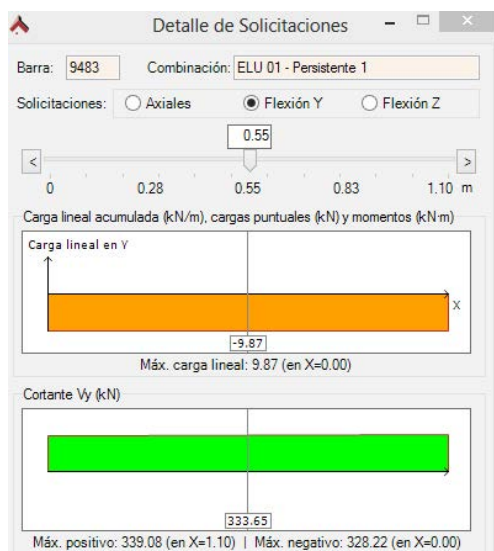


Figura 6.18 Diagramas de esfuerzo cortante, estructura de hormigón armado.



El agotamiento resistente producido por el esfuerzo cortante en Y resultante de las máximas tensiones paralelas a la sección transversal de los elementos ocurre en el extremo de la viga continuo al núcleo del pórtico C en el nivel 25 y es de 339,08 KN.

En el pórtico 4 el máximo es de 219,14 KN y ocurre en el nivel 26. En ambos caso, el máximo cortante se produce en el extremo de contacto con la pantalla rigidizadora del sistema de arriostamiento en ELU situación persistente 1.

Figura 6.19 Diagrama de cortantes libres, pórtico C, estructura de hormigón armado.

Estructura de Madera Laminada

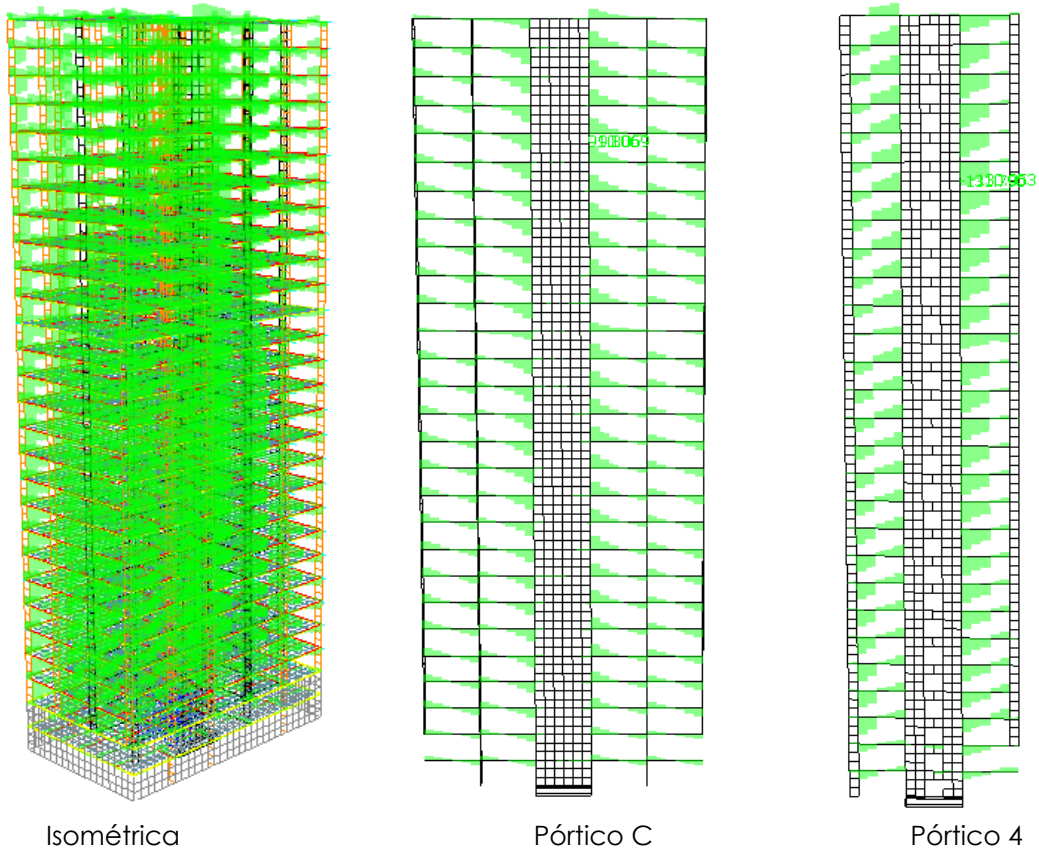
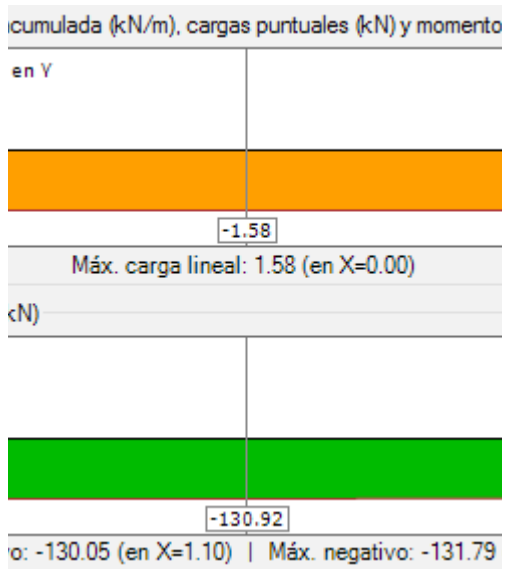


Figura 6.20 Diagramas de esfuerzo cortante, estructura de madera laminada.



El máximo cortante en Y resultante de las máximas tensiones paralelas a la sección transversal de los elementos ocurre en la viga del nivel 20 en ELU situación persistente 4 y es de para el pórtico 5 de 131,79 KN.

En el pórtico C el máximo es de -90,16 KN y ocurre en el segundo nivel. En ambos caso, el máximo cortante se produce en el extremo de la viga próximo al núcleo de rigidización.

Figura 6.21 Diagrama de cortantes libres en pórtico 4 estructura de madera laminada.

### 6.4.3 Momento Flector en Z

#### Estructura de Acero

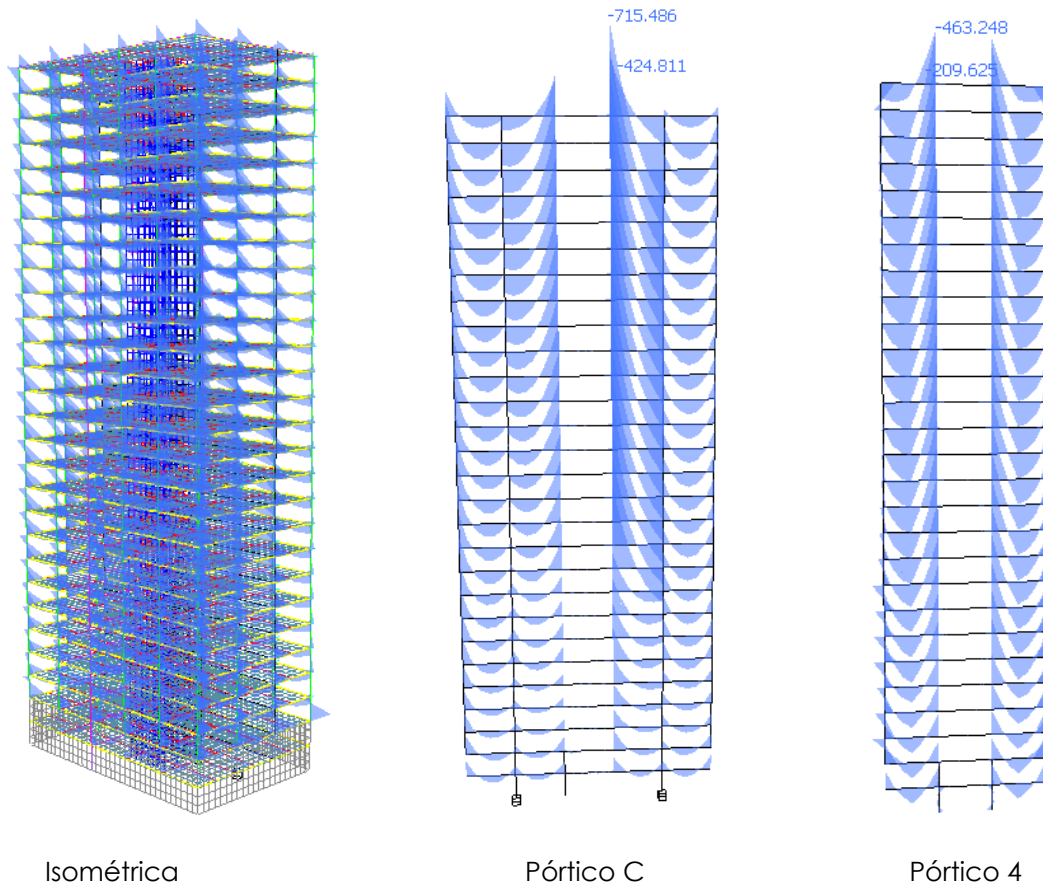
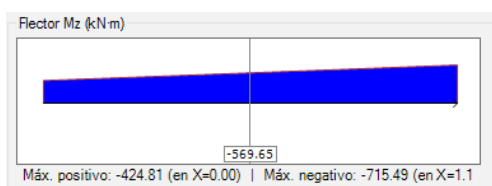


Figura 6.22 Diagrama de momento flector, estructura de acero.

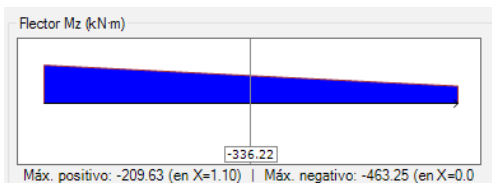
En pórtico C



El estado último de agotamiento producido el por el momento flector en Z es un momento negativo de -715,486 KN.m en el pórtico C. este ocurre en ELU situación persistente 5.

Para el pórtico 4 es de -463,268 KN.m. En ambos casos estos son producidos en la viga del nivel 25 en el extremo próximo al núcleo de rigidización.

En pórtico 4.



Estas vigas de sección uniforme están empotradas a las pantallas del núcleo, para producir el momento plástico completo de la viga. En el diagrama de momentos libres de la viga simplemente apoyada equivalente se muestra como este va disminuyendo hacia el extremo opuesto. Al momento máximo presentarse negativo, el diseño de esta debe proyectarse para soportar las compresiones que se producen.

Figura 6.23 Diagramas de momentos flectores libres, estructura de acero.



**Estructura de Hormigón Armado**

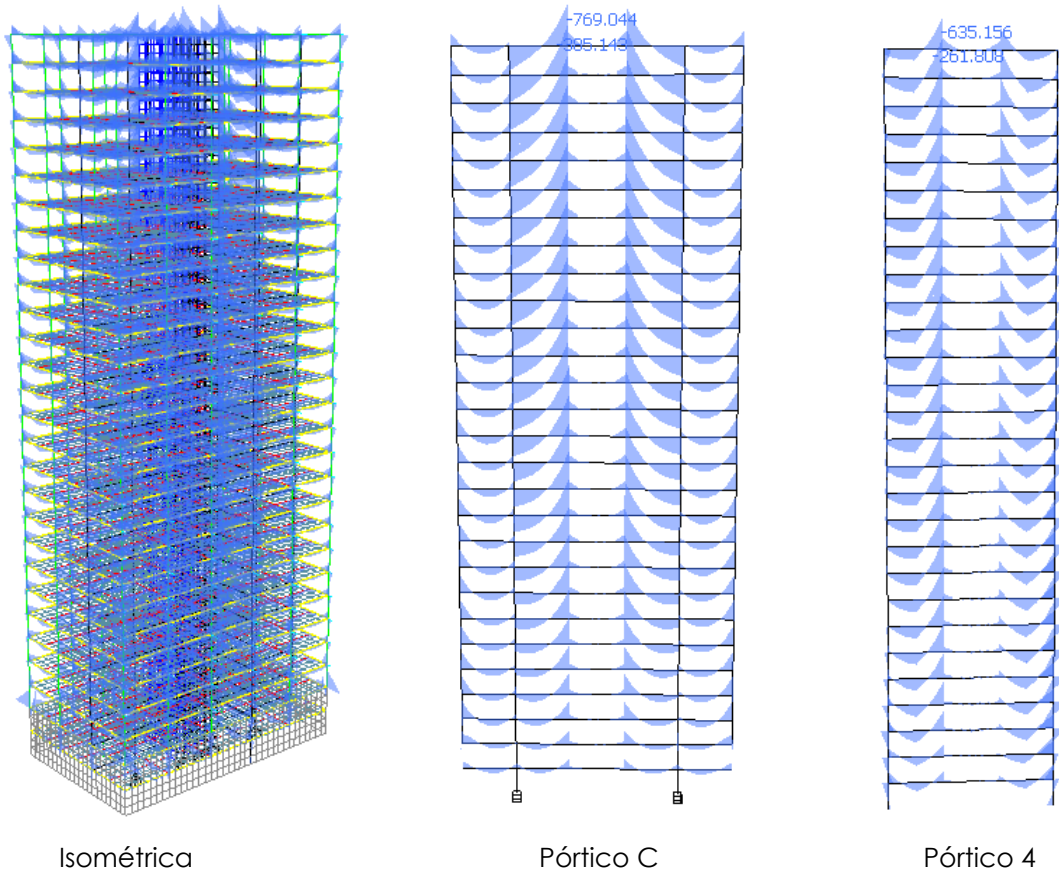
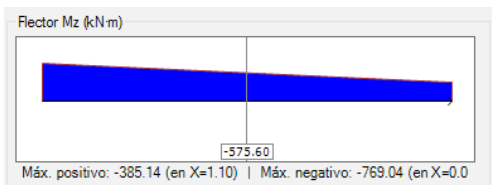


Figura 6.24 Diagrama de esfuerzo cortante, estructura de hormigón armado.

En pórtico C



El máximo momento flector actuante en Z es de -769,04 KN.m y ocurre en el tramo 2 de la viga del nivel 25 del pórtico C en la situación persistente 1 del Estado Límite Último.

Para el pórtico 4 este de -635,41 KN.m, en el tramo 1 de la viga del nivel 25 t en el extremo próximo al arriostamiento, en ELU situación persisten 1.

En pórtico 4.

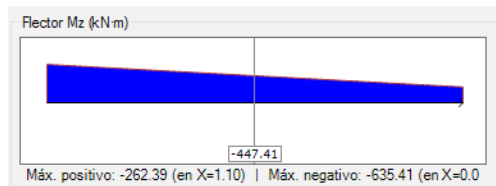


Figura 6.25 Diagramas de momentos flectores libres estructura de hormigón armado.

### Estructura de Madera Laminada

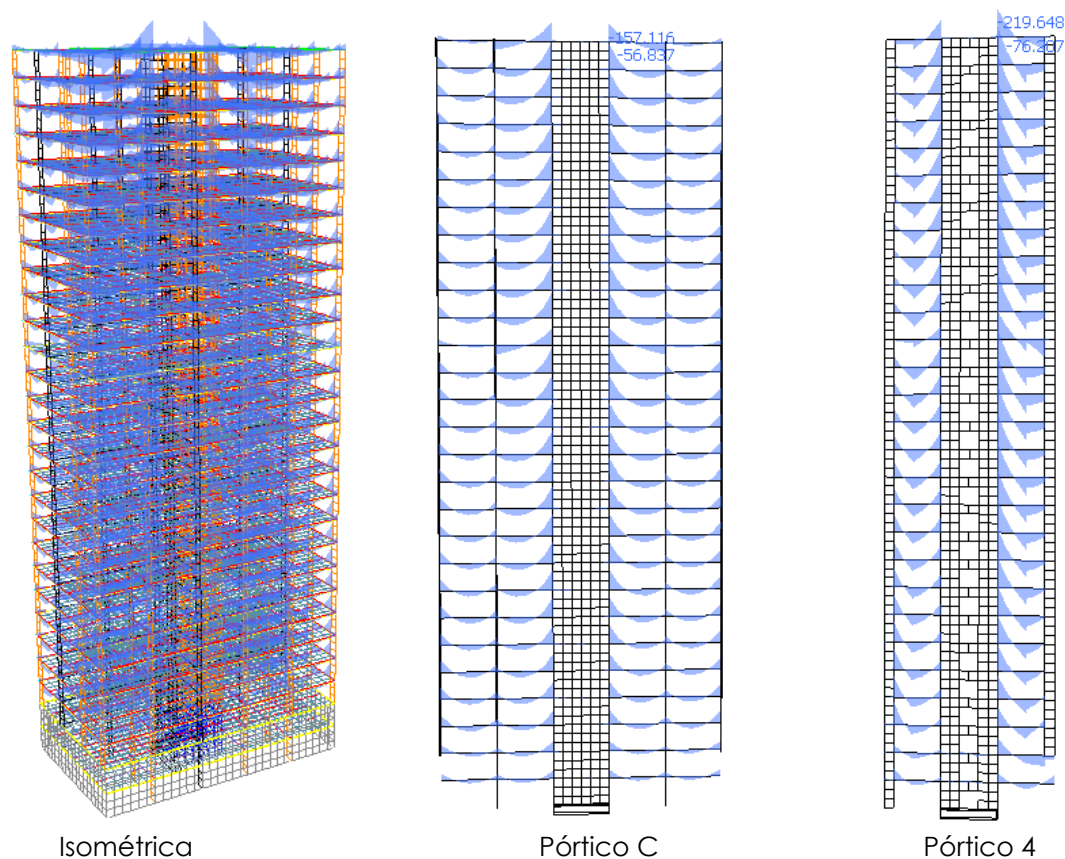
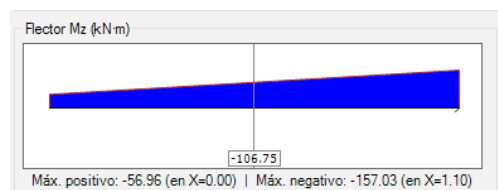


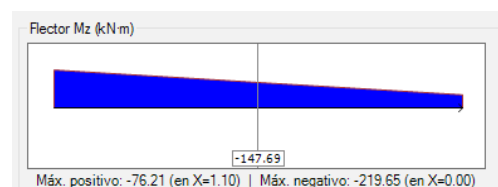
Figura 6.26 Diagrama de esfuerzo cortante, estructura de madera laminada.

En pórtico C



El máximo momento flector actuante en Z es de -769,04 KN.m y ocurre en el tramo 2 de la viga del nivel 25 del pórtico C en la situación persistente 1 del Estado Limite Ultimo.

En pórtico 4.



Para el pórtico 4 este de -635,41 KN.m, en el tramo 1 de la viga del nivel 25 en el extremo próximo al arriostamiento, en ELU situación persisten 1.

Figura 6.27 Diagramas de momentos flectores libres estructura de madera laminada.

### 6.5 Deformaciones en pórticos

#### Estructura de Acero

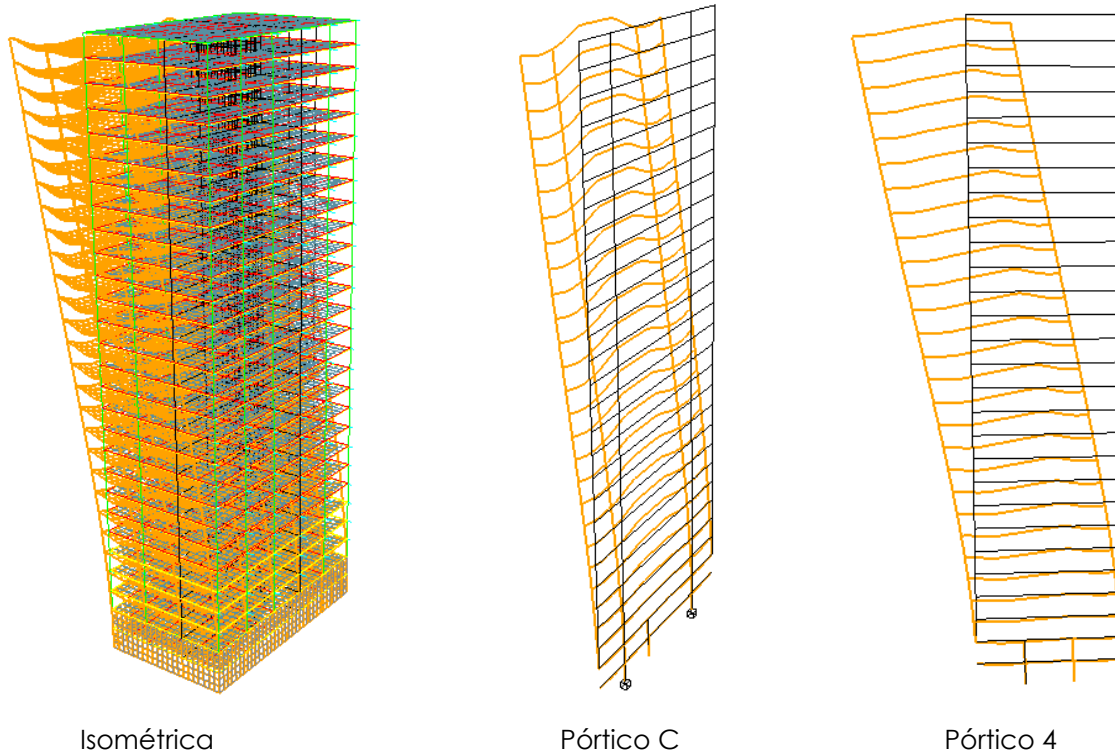


Figura 6.28 Diagramas de deformación estructura de acero.

En la viga de cubierta del pórtico C, la situación que presenta la flecha más grande ocurre en ELUS 20 que corresponde a la situación frecuente 8. La misma tiene una flecha absoluta de 2,391 cm. Como se muestra en la figura 6.29 esta no sobrepasa las limitaciones del CTE. Para el pórtico 4 esta se presenta en ELUS situación característica 5 y tiene una flecha absoluta de 2.831cm.

Pandeo		Flecha Vano			
ELUs desfavorables:	7	Flecha activa (cm):	0.312	Flecha activa/L: 1/	2,115
Beta Pandeo Y:	0.53	<b>Flecha activa CTE:</b>	<b>0.190</b>	Límite F. activa: 1/	400
Beta Pandeo Z:	0.50	Flecha instantánea (cm):	0.277	Flecha instant/L: 1/	0
Chi Y:		<b>Flecha instant. CTE:</b>	<b>Infinity</b>	Lím. F. instant: 1/	350
Chi Z:		Flecha total (cm):	0.589	Flecha total/L: 1/	1,120
<b>Pandeo CTE:</b>	<b>0.26</b>	<b>Flecha total CTE:</b>	<b>0.270</b>	Límite F. total: 1/	300
Cumple normativa		Cumple normativa		ELS desfavorable:	20

Figura 6.29 Comprobación de flecha pórtico C.

Pandeo		Flecha Vano			
ELUs desfavorables:	2	Flecha activa (cm):	0.400	Flecha activa/L: 1/	1,651
Beta Pandeo Y:	0.53	<b>Flecha activa CTE:</b>	<b>0.240</b>	Límite F. activa: 1/	400
Beta Pandeo Z:	0.50	Flecha instantánea (cm):	0.355	Flecha instant/L: 1/	0
Chi Y:		<b>Flecha instant. CTE:</b>	<b>Infinity</b>	Lím. F. instant: 1/	350
Chi Z:		Flecha total (cm):	0.755	Flecha total/L: 1/	874
<b>Pandeo CTE:</b>	<b>0.24</b>	<b>Flecha total CTE:</b>	<b>0.340</b>	Límite F. total: 1/	300
Cumple normativa		Cumple normativa		ELS desfavorable:	5

Figura 6.30 Comprobación de flecha pórtico 4.

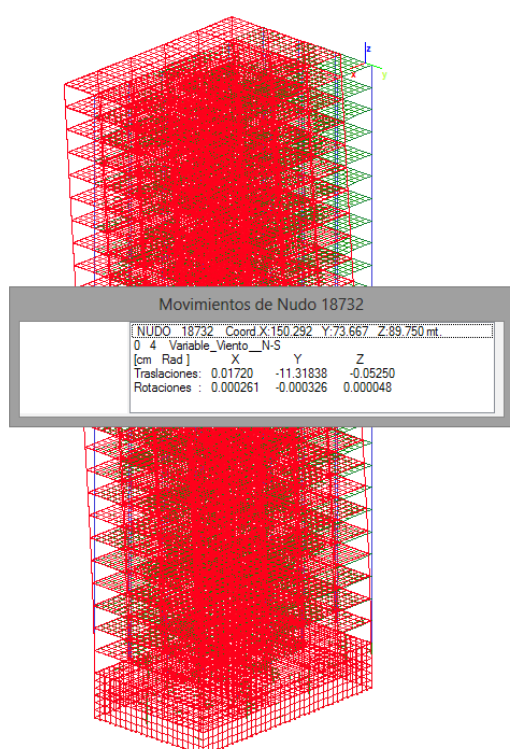


Figura 6.31 Diagrama de deformación por hipótesis de viento estructura de acero.

Comprobación desviación lateral del edificio por hipótesis de viento:

$$d/H \leq H/600 = 0.07 \leq 82/600$$

$$= 0.07 \leq 0.14 \text{ **Cumple**}$$

Comprobación desviación lateral del edificio por hipótesis de sismo:

$$d/H \leq H/600 = 0.11 \leq 82/600$$

$$= 0.11 \leq 0.14 \text{ **Cumple**}$$

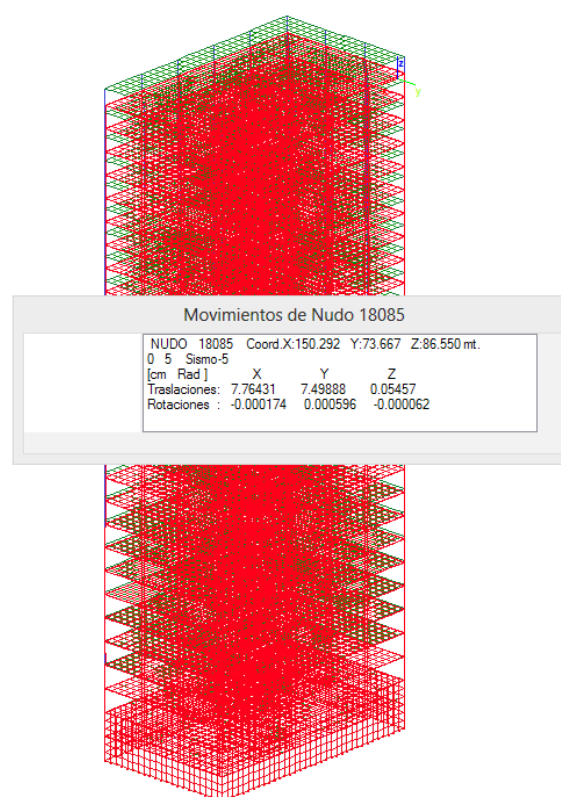


Figura 6.32 Diagrama de deformación por hipótesis de sismo estructura de acero.

**Estructura de Hormigón Armado**

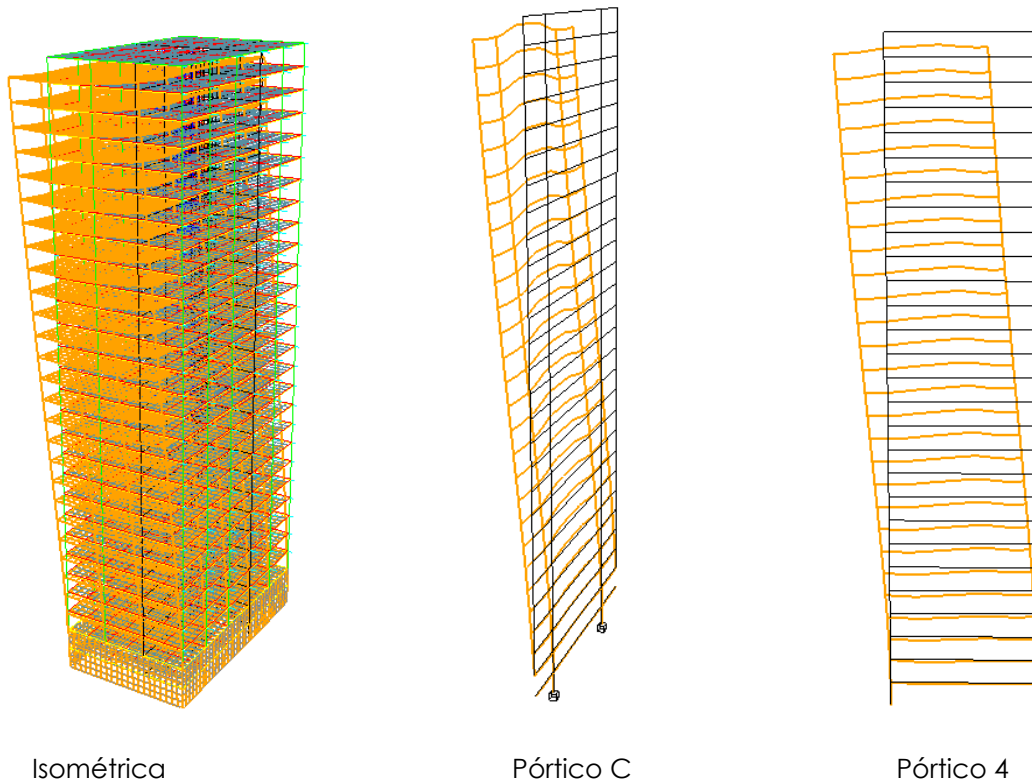


Figura 6.33 Diagramas de deformación estructura de hormigón armado.

La deformación mayor que ocurre en la estructura de hormigón armado se presenta en ELUs en la situación característica 2. La misma tiene una flecha absoluta de 2,712 cm en el pórtico C y de 2,783cm para el pórtico 4. Como se muestra en la figura 6.34 y 6.35 estas no sobrepasan las limitaciones del CTE.

Flecha (mm) en vano				límites	
F. Elástica:	1.66	F. Activa/L:	1/	4,935	400
F. Activa:	1.34	F. Total/L:	1/	2,324	250
F. Total:	2.84	(F. Total -10)/L:	1/	922	500

Comprobación de normativa			
Flexión:	Cumple	Torsión:	Cumple
Cortante:	Cumple	Flecha:	Cumple
Cabe izquierda:	Cumple	Cabe derecha:	Cumple
Cabe vano:	Cumple	Armadura mínima:	Cumple

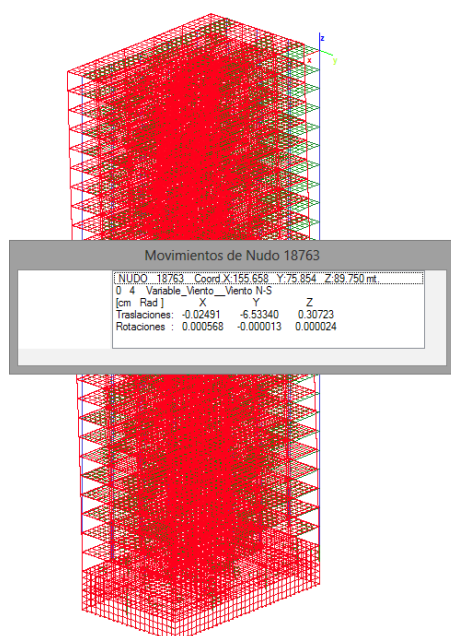
Figura 6.34 Comprobación de flecha viga 26, pórtico C, estructura de hormigón armado.

Flecha (mm) en vano				límites	
F. Elástica:	6.63	F. Activa/L:	1/	970	400
F. Activa:	6.80	F. Total/L:	1/	491	250
F. Total:	13.44	(F. Total -10)/L:	1/	1,919	500

Comprobación de normativa			
Flexión:	Cumple	Torsión:	Cumple
Cortante:	Cumple	Flecha:	Cumple
Cabe izquierda:	Cumple	Cabe derecha:	Cumple
Cabe vano:	Cumple	Armadura mínima:	Cumple

Figura 6.35 Comprobación de flecha, viga 26 pórtico 4, estructura de hormigón armado.



Comprobación desviación lateral del edificio por hipótesis de viento:

$$d/H \leq H/600 = 0.065 \leq 82/600$$

$$= 0.065 \leq 0.14 \text{ Cumple}$$

Figura 6.36 Diagrama de deformación por hipótesis de viento estructura de hormigón armado.

Comprobación desviación lateral del edificio por hipótesis de sismo:

$$d/H \leq H/600 = 0.079 \leq 82/600$$

$$= 0.079 \leq 0.14 \text{ Cumple}$$

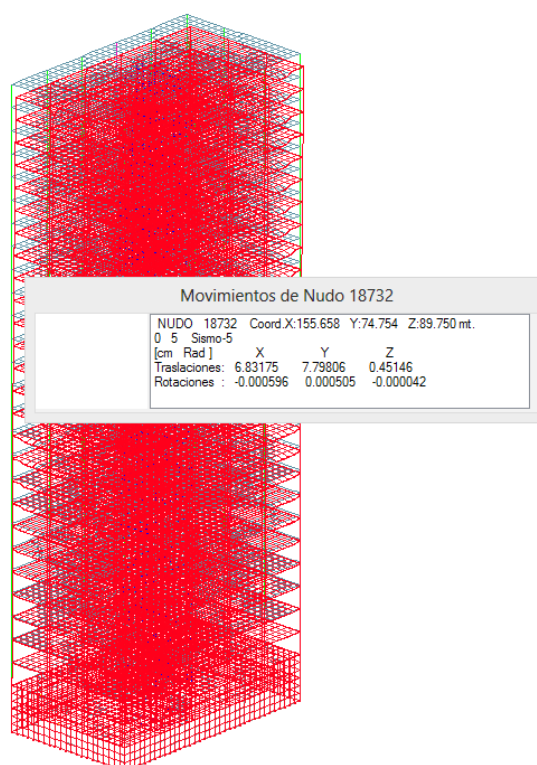


Figura 6.37 Diagrama de deformación por hipótesis de sismo estructura hormigón armado.

## Estructura de Madera Laminada

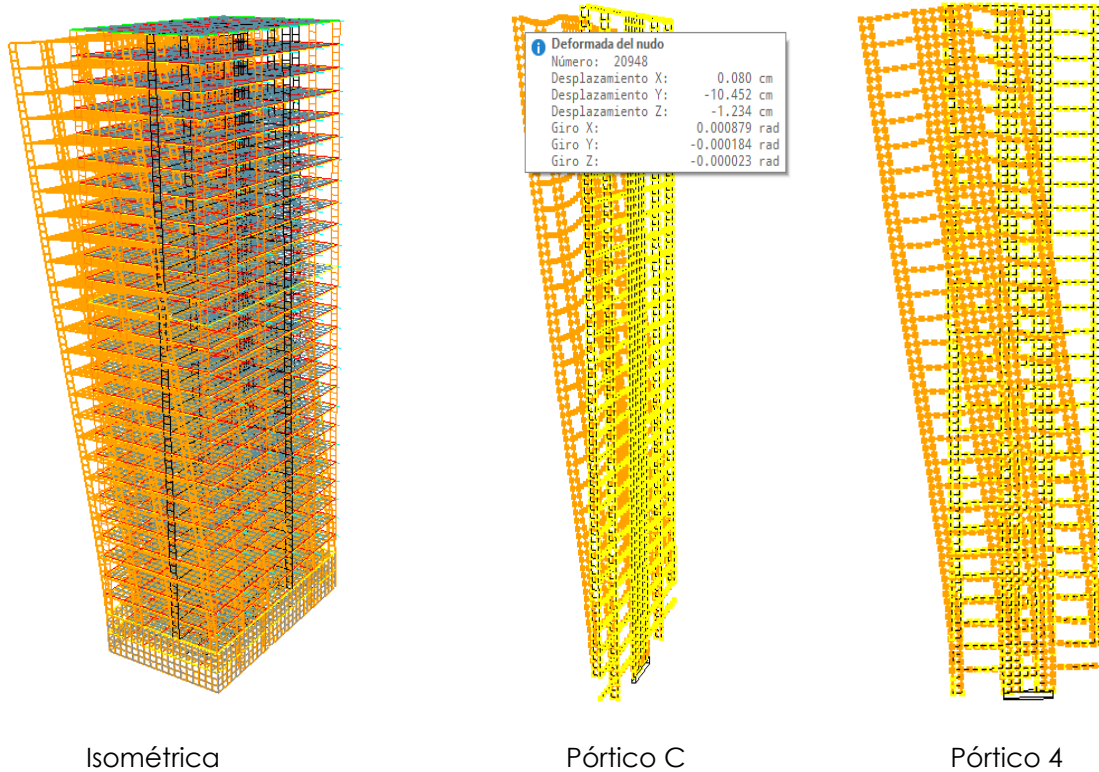


Figura 6.38 Diagramas de deformación estructura de madera laminada.

La limitación de la flecha admisible en estructura de acero en la normativa del IBC viene en el apartado IBC, capítulo 23, sección 2305: Diseño de requerimientos generales para resistencia de fuerzas laterales, que establece una flecha máxima de 1/360 para los elementos horizontales comunes, y 1/240 para los miembros de cubierta.

Las deformaciones máxima detectadas fueron en ELS la situación Característica 8 que presenta:

Por flechas

Comprobación desviación lateral del edificio:

Para las vigas de cubierta:

$$1/240 \rightarrow 6.4/240 = 0.035$$

$$d/H \leq H/600 = 0.10 \leq 82/600$$

$$= 0.10 \leq 0.14 \text{ Cumple}$$

$$0.012 \leq 0.035 \text{ Cumple}$$

Para las demás vigas:

$$1/360 \rightarrow 6.4/360 = 0.017$$

$$0.0132 \leq 0.017 \text{ Cumple}$$

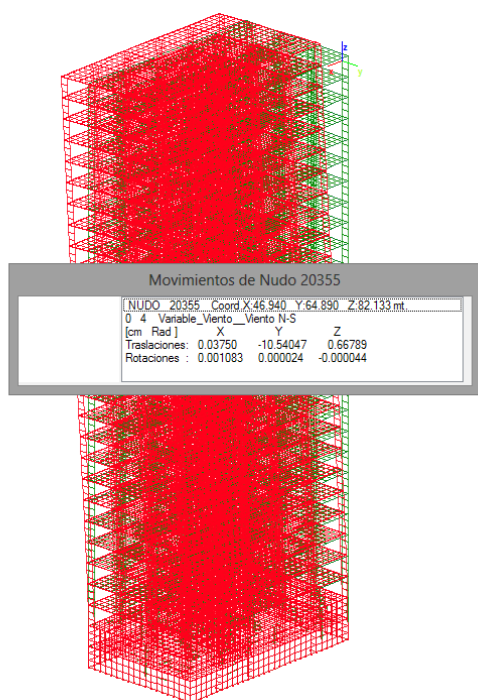


Figura 6.39 Diagrama de deformación por hipótesis de viento estructura madera laminada.

Comprobación desviación lateral del edificio por hipótesis de viento:

$$d/H \leq H/600 = 0.010 \leq 82/600$$

$$= 0.010 \leq 0.14 \text{ **Cumple**}$$

Comprobación desviación lateral del edificio por hipótesis de sismo:

$$d/H \leq H/600 = 0.05 \leq 82/600$$

$$= 0.05 \leq 0.14 \text{ **Cumple**}$$

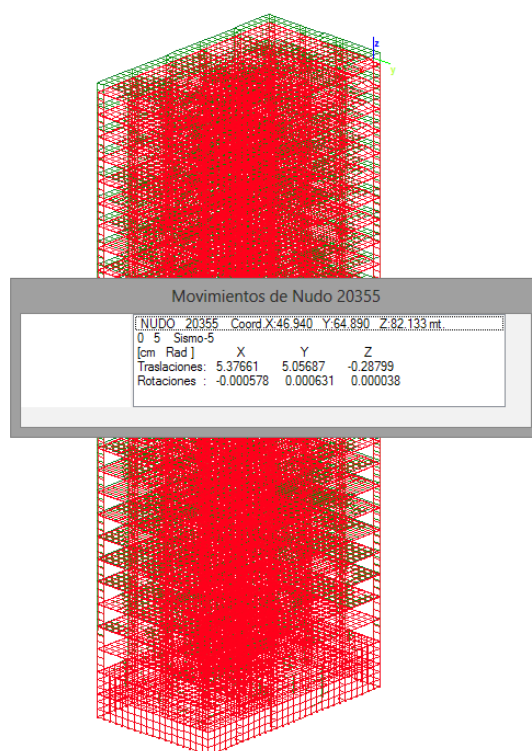


Figura 6.40 Diagrama de deformación por hipótesis de sismo estructura madera laminada.



## 6.6 Solicitaciones en forjados

### Estructura de acero

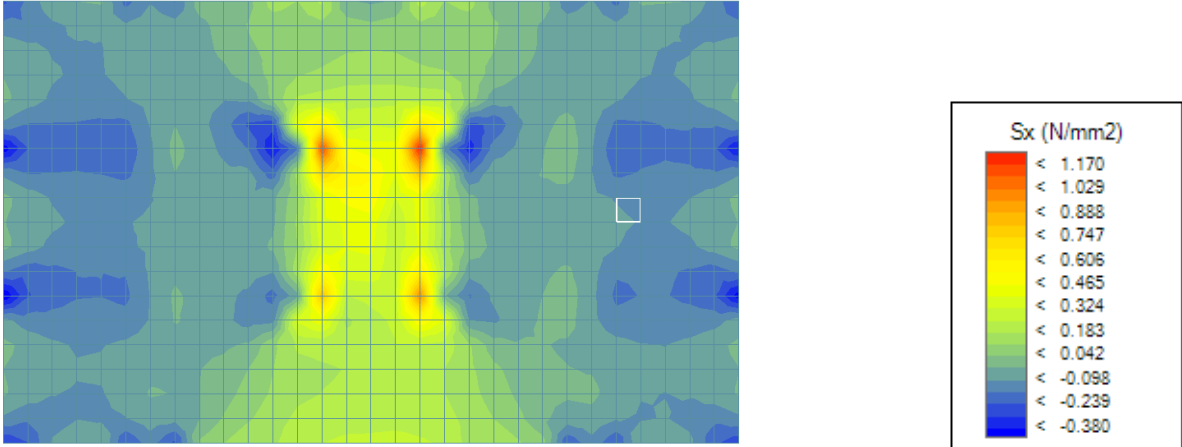


Figura 6.41. Tensiones de membrana Sx en forjado de cubierta estructura de acero.

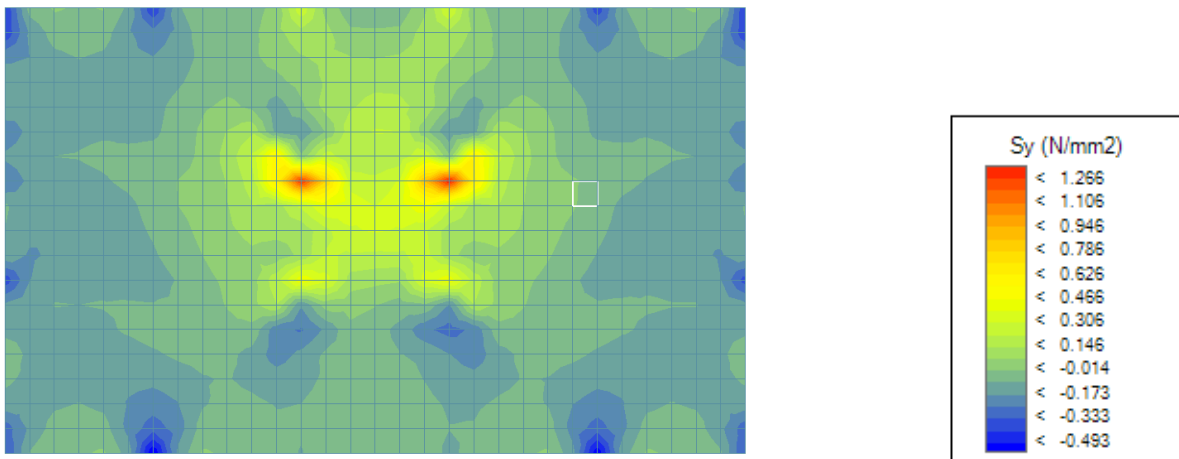


Figura 6.42. Tensiones de membrana Sy en forjado de cubierta estructura de acero.

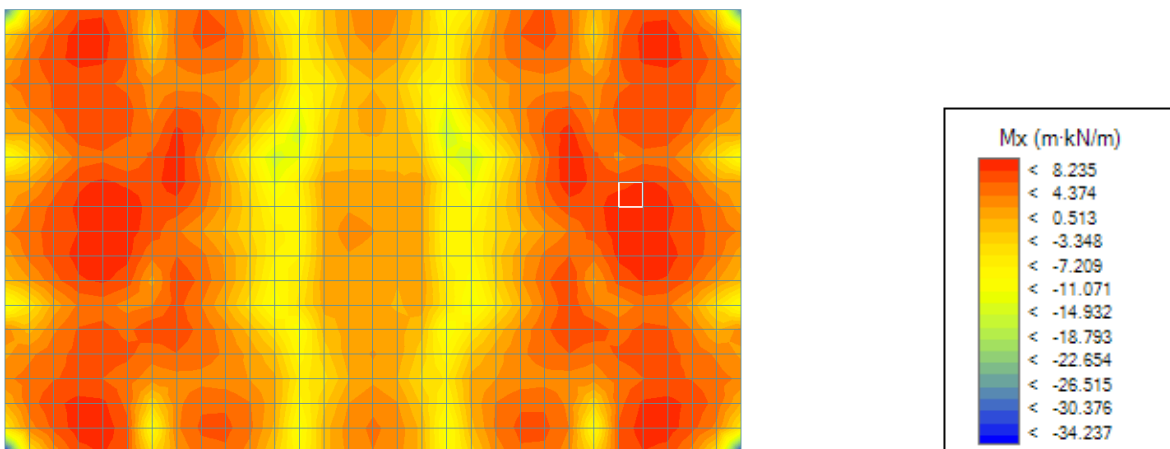


Figura 6.43. Flexión de la placa Mx en forjado de cubierta de la estructura de acero.

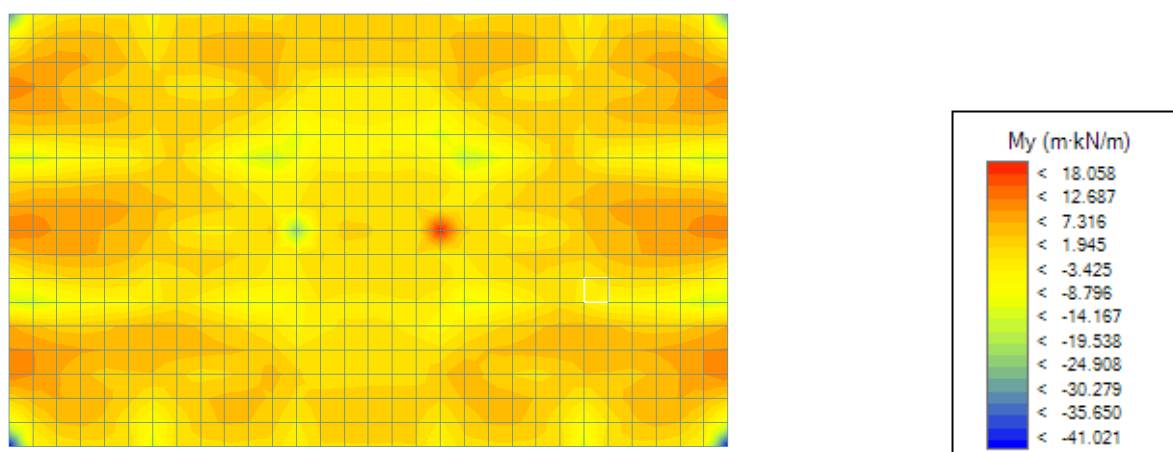


Figura 6.44. Flexión de la placa My en la cubierta de la estructura de acero.

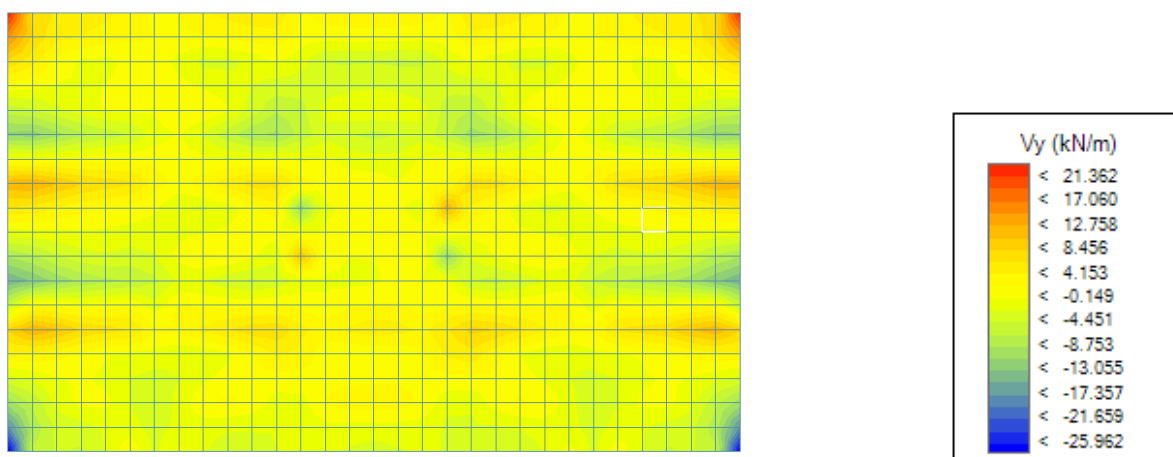


Figura 6.45. Flexión de la placa Vy en la cubierta de la estructura de acero.

Tension en la membrana			Flexion en la placa		
Sx	Sy	Von misses	Mx	My	Vy
1,170 N/mm2	1,266 N/mm2	1,270 N/mm2	8,235 Kn/m	18,058 Kn/m	21,362 Kn/m

Figura 6.46 Resumen de los resultados de las solicitaciones en el forjado de cubierta de la estructura de acero.

**Estructura de hormigón armado.**

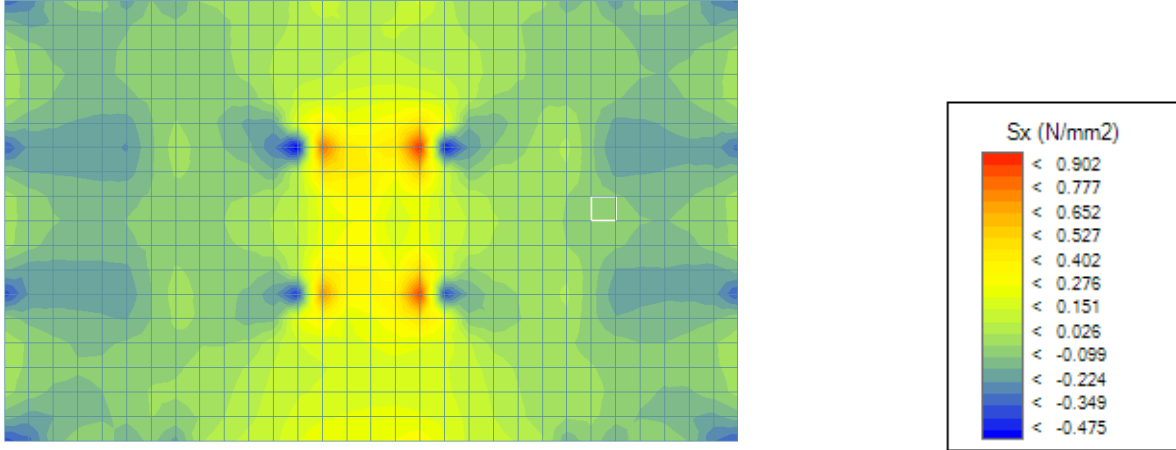


Figura 6.47 Tensiones de membrana  $S_x$  en forjado de cubierta estructura de hormigón armado.

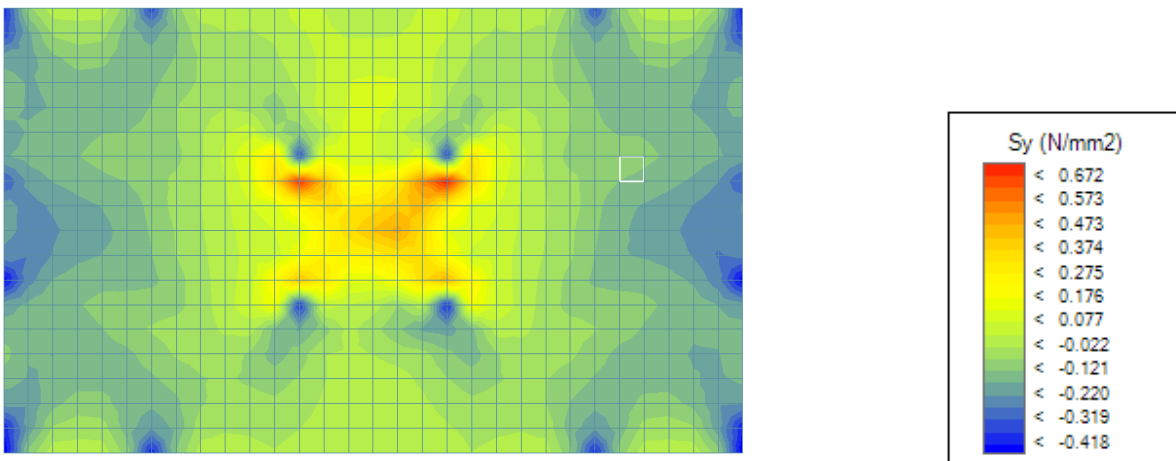


Figura 6.48 Tensiones de membrana  $S_y$  en forjado de cubierta estructura de hormigón armado.

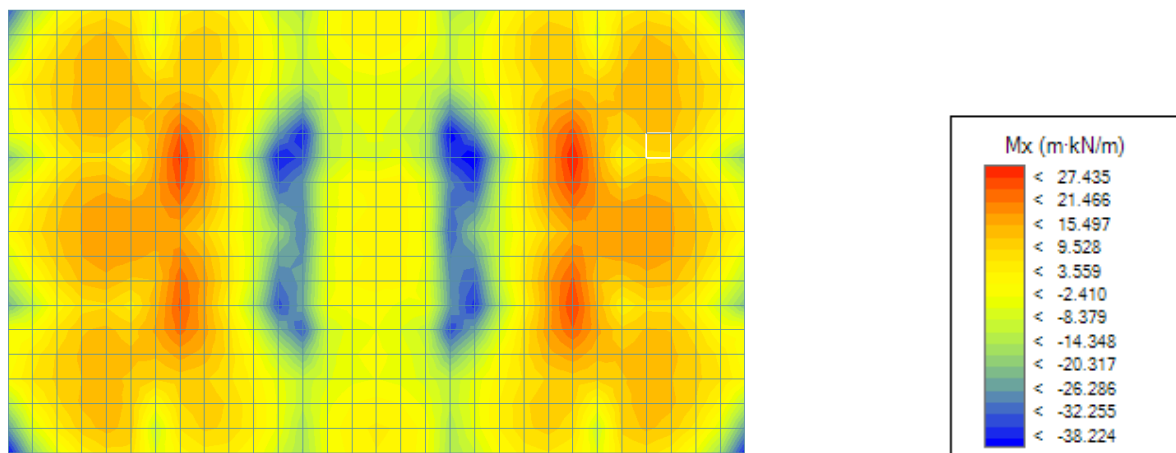


Figura 6.49 Flexión de placa  $M_x$  en la cubierta de la estructura de hormigón armado.

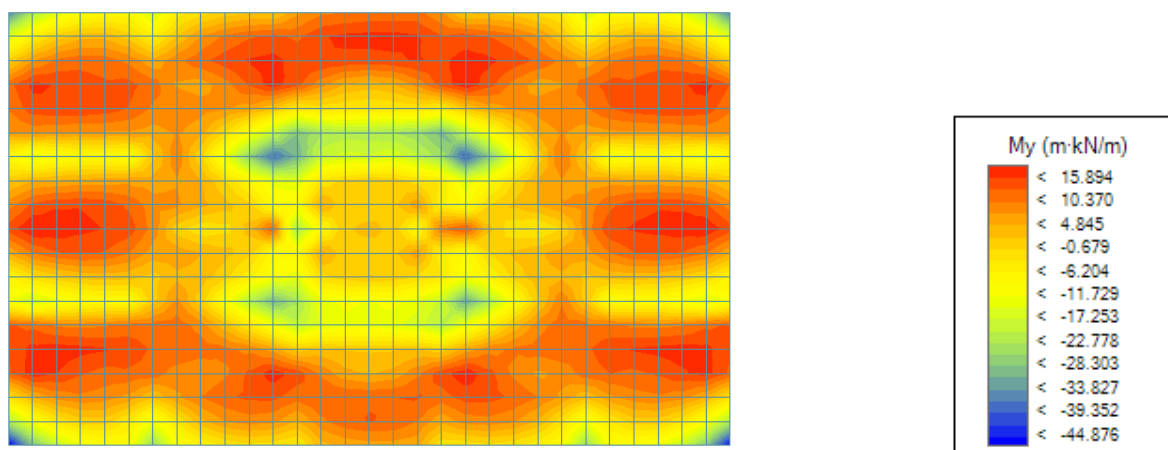


Figura 6.50 Flexión de placa My en la cubierta de la estructura de hormigón armado.

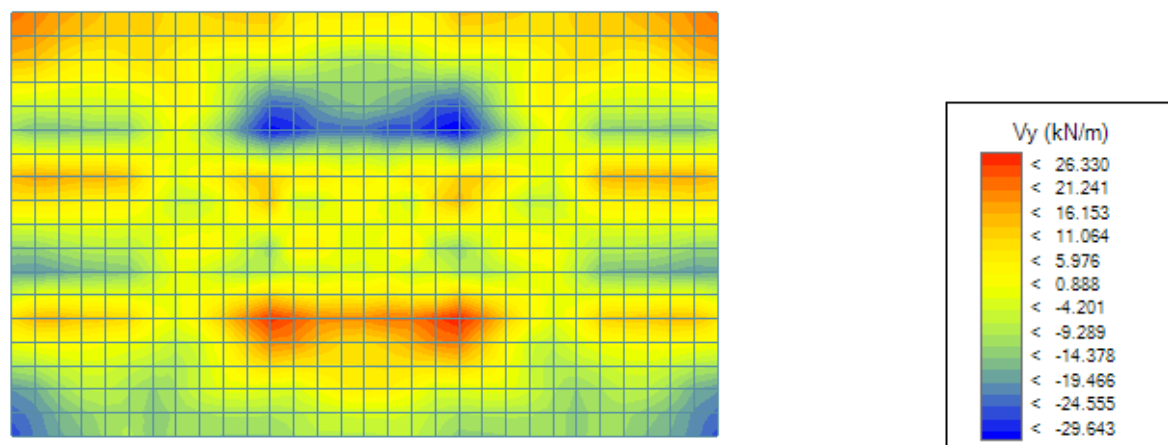


Figura 6.51 Flexión de la placa Vy en la cubierta de la estructura de hormigón armado.

Tensión en la membrana			Flexión en la placa		
Sx	Sy	Von misses	Mx	My	Vy
0,902 N/mm <sup>2</sup>	0,672 N/mm <sup>2</sup>	0,934 N/mm <sup>2</sup>	27,435 Kn/m	15,8964 Kn/m	26,330 Kn/m

Figura 6.52 Resumen de los resultados de las solicitaciones en el forjado de cubierta de la estructura de hormigón armado.

Estructura de madera laminada

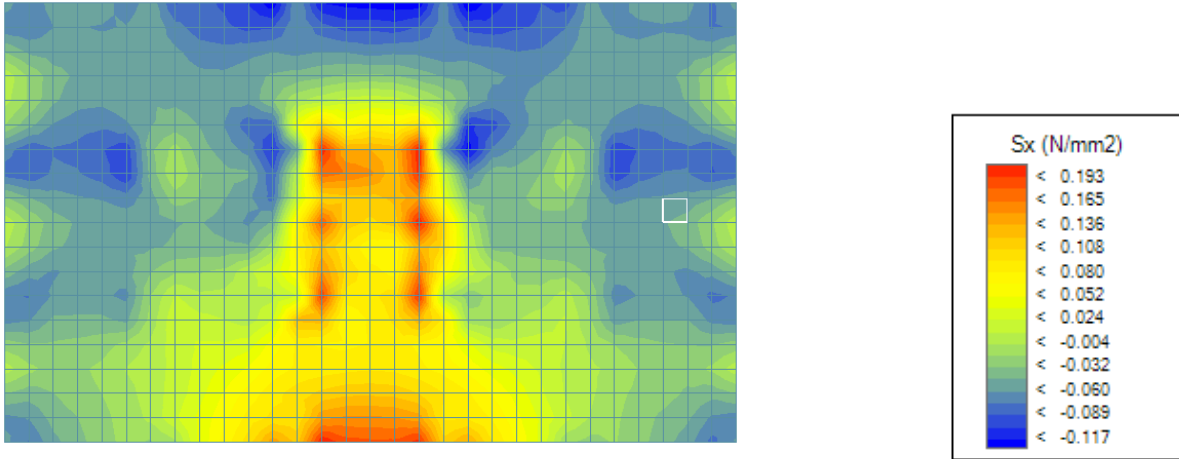


Figura 6.53 Tensiones de membrana  $S_x$  en forjado de cubierta estructura de madera laminada.

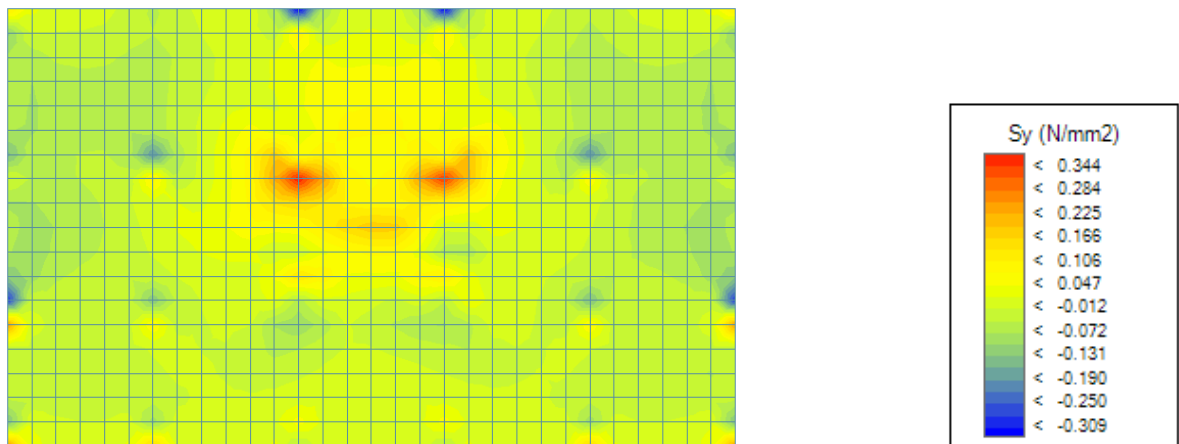


Figura 6.54 Tensiones de membrana  $S_y$  en forjado de cubierta estructura de madera laminada.

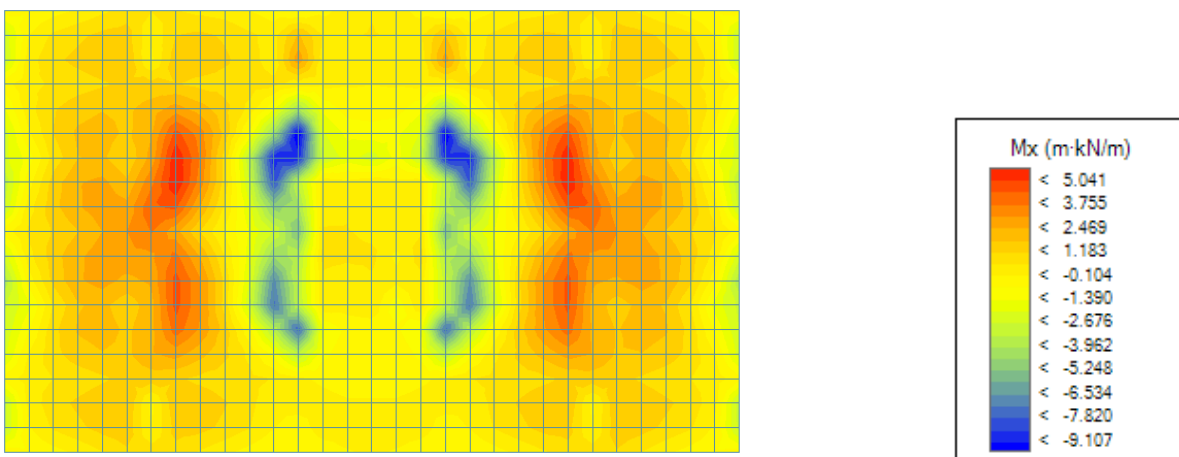


Figura 6.55. Flexión de placa  $M_x$  en la cubierta de la estructura de madera laminada.

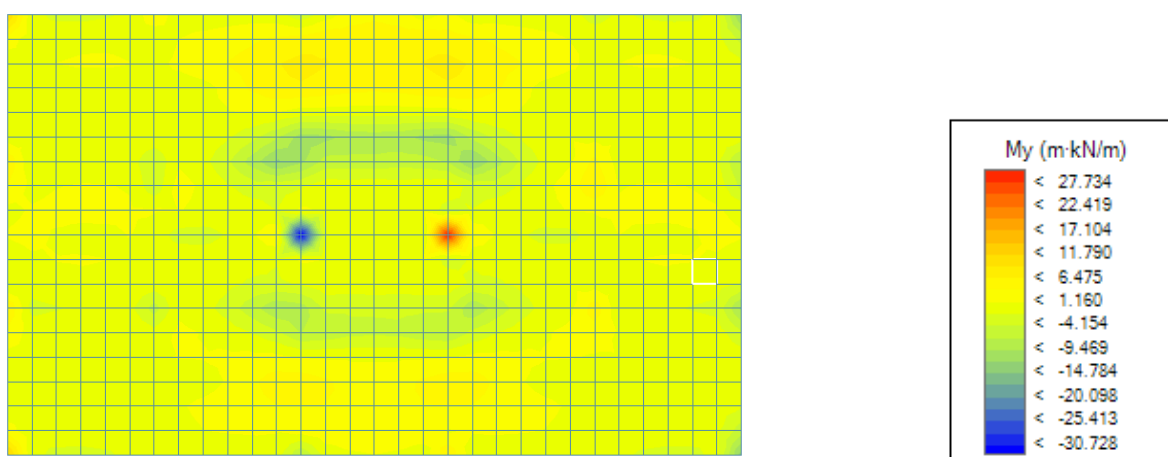


Figura 6.56. Flexión de placa  $M_y$  en la cubierta de la estructura de madera laminada.

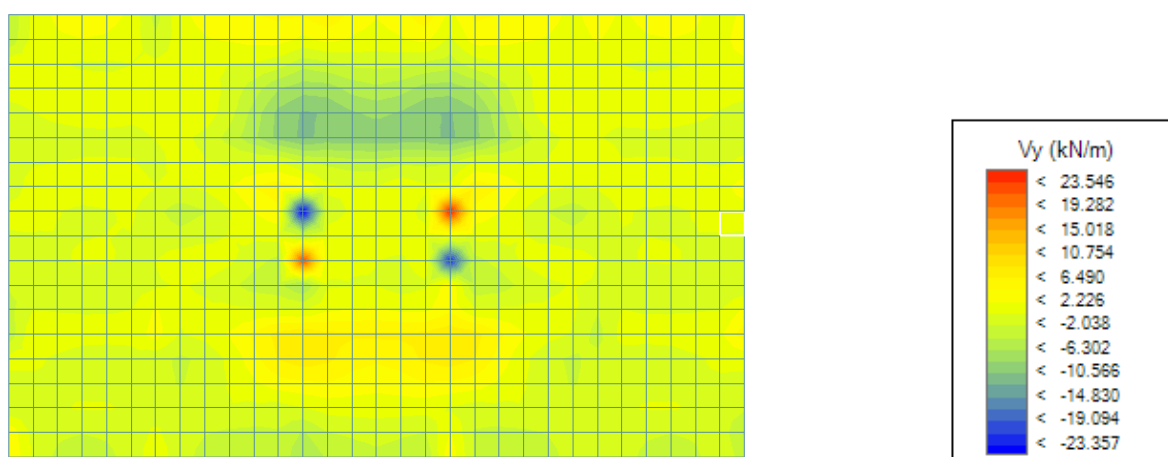


Figura 6.57 Flexión de la placa  $V_y$  en la cubierta de la estructura de madera laminada.

La combinación adoptada para mostrar los resultados fue ELU situación persistente 1

Tensión en la membrana			Flexión en la placa		
Sx	Sy	Von misses	Mx	My	Vy
0,193 N/mm <sup>2</sup>	0,344 N/mm <sup>2</sup>	0,470 N/mm <sup>2</sup>	-9,107 Kn/m	-30,728 Kn/m	23,546 Kn/m

Figura 6.58 Resumen de los resultados de las solicitaciones en el forjado de cubierta de la estructura de madera laminada.

## 6.7 Estudio de energía embebida de los pilares de los tres sistemas estructurales.

Con el objetivo de reducir al máximo la huella ecológica derivada por la producción y uso de los materiales y productos de la construcción, se están haciendo los análisis de energía embebida que conlleva realizar los materiales y elementos constructivos. Igualmente los procesos asociados a ellos, como la obtención y transformación de las materias primas empleadas y la generación de emisiones y desechos consecuencia de las diferentes formas de transformación, industrialización y puesta en obra y expresada en forma de su contribución a los Impactos Medioambientales Globales.

El principal problema de que este tipo de análisis no se lleve a cabo con mayor frecuencia y se estandarice su utilización es debido a la falta de base de datos que dificulta la realización del mismo. También de una normativa apropiada que regularice su proceso.

De todas formas consideramos muy importante realizarlo para comparar la producción de CO<sub>2</sub> que origina la fabricación de estos tres sistemas estructurales. Para ello primero definiremos el comportamiento energético de la producción de los tres materiales a partir del análisis sobre los principales materiales en la construcción. (Del Caño, A., Gomez, D., & De la Cruz, P., 2012).

Acero: Es un material reciclable. Se puede reciclar indefinidamente sin perder calidad.

El impacto negativo de la fabricación del acero se produce en las fases de transformación, acabado y protección, con un alto consumo de energía y emisiones a la atmosfera de gases y sustancias tóxicas. La protección mediante galvanizado, o pinturas de minio de hierro, son muy impactantes. Un aspecto positivo a tener en cuenta es su relación peso/capacidad portante, aligerando el peso de la estructura y liberando superficie útil.

Hormigón armado: El empleo del hormigón armado para estructuras de los edificios es mayoritario frente a otros materiales como el acero o la madera. En la fabricación de hormigones, la fase más impactante se produce en el transporte de central hormigonera a la obra y en la limpieza de camiones y útiles en fábrica y obra, por el empleo de grandes cantidades de agua, que en países y regiones con índices pluviométricos bajos, tiene una alta repercusión medioambiental.

El caso de los aditivos al ser materiales químicos, muchos de ellos provenientes de polímeros, son muy contaminantes, aunque su uso es en muy bajas proporciones, y la incidencia en principio es media, sobretodo porque con su uso, se mejora cuestiones como la puesta en obra, la necesidad de agua de amasado, la impermeabilidad o la durabilidad.

Madera laminada: La problemática ambiental de la madera va asociada al riesgo de deforestación si la tasa de tala supera a la tasa de regeneración. También si la extracción de madera se realiza en países tropicales en vías de desarrollo, originándose problemas sociales, de destrucción de ecosistemas y zonas rurales, y problemas ambientales graves como la erosión, la contaminación de las aguas y la destrucción del bosque como sistema productivo. Investigaciones muestran que la madera es la que tiene menos emisiones de carbono en el ciclo de vida, mientras que la los diseños convencionales (acero y hormigón), quedan mal posicionados. (Dodoo, A., Gustavsson, L., & Sathre, R., 2014).

Los productos de tratamiento de la madera contra insectos y hongos, y los barnices, tradicionalmente han incluido en su composición productos tóxicos y contaminantes. Es importante, que las maderas que se usen estén libre de formaldehído (catalogadas como E1 < 8 mg/100 gr) y tengan tratamientos para evitar hongos e insectos con resinas naturales y aceites, evitando la creosota. (Pereza Sánchez, J. E., Menéndez Pidal, I., Velasco Rivas, J. M., & Sanz Pérez, E., 2014). La madera que proviene de explotaciones forestales sostenibles, certificada con sello FSC (Forest Stewardship Council) o PEFC (Pan European Forest Certification), y con tratamientos de origen natural mediante aceites y resinas vegetales para evitar hongos e insectos, es una de las mejores alternativas en construcción sostenible, como recurso natural y renovable.

## 6. Evaluación y diagnóstico del comportamiento estructural en acero, hormigón y madera laminada

Para el estudio se tomará las metabase<sup>8</sup> del BEDEC<sup>9</sup> del ITEC.<sup>10</sup> (ITEC, 2014)

Datos generales:

Número de plantas: 26

Cantidad de pilares: 20 por plantas

Altura de entrepiso: 3.2 m

---

Estructura de Acero s275 N/mm<sup>2</sup>. Energía embebida por kg = 11,99 kWh/kg

---

Para los HEM600 (7 niveles)

HEM600 con peso de 285 kg/m

Peso = 3.2 m x 285 kg/m = 912 kg

Energía por pilar = 10.934,88 kwh

140 pilares HEM600 en la estructura

140 x 10.934,88 kwh = 1.530.883, 2 kwh

Para los HEM450 (5 niveles)

HEM320 con peso de 263 kg/m

Peso = 3.2 m x 263 kg/m = 841,6 kg

Energía por pilar = 10.015,04 kwh

100 pilares HEM450 en la estructura

100 x 10.015,04 kwh = 1.001.504 kwh

Para los HEM320 (7 niveles)

HEM320 con peso de 245 kg/m

Peso = 3.2 m x 245 kg/m = 784 kg

Energía por pilar = 9.400,16 kwh

140 pilares HEM320 en la estructura

140 x 9.400,16 kwh = 1.316.022,4 kwh

Para los HEM260 (7 niveles)

HEM260 con peso de 172 kg/m

Peso = 3.2 m x 172 kg/m = 550,4 kg

Energía por pilar = 6.549,76 kwh

140 pilares HEM260 en la estructura

140 x 6.549,76 kwh = 916.966,4 kwh

Energía embebida de los pilares de acero: **4.765.376 kwh**

---

Estructura de hormigón armado 25 N/mm<sup>2</sup>. Energía embebida por kg = 429,4 kWh/ m<sup>3</sup>

---

Pilares de 0,70 m x 0,70 m (12 Niveles)

Volumen= 0,70 m x 0,70 m x 3, 2 m = 1,568 m<sup>3</sup>

Energía por pilar = 673,30 kwh/ m<sup>3</sup>

240 x 673,30 kwh/m<sup>3</sup> = 161.592 kwh/m<sup>3</sup>

Pilares de 0,80 m X 0,80 m (4 niveles)

0,80 m x 0,80 m x 3, 2 m = 2,048 m<sup>3</sup>

Energía por pilar= 879,41 kwh/ m<sup>3</sup>

80 X 879,41 kwh/m<sup>3</sup> = 70.352,8 kwh/m<sup>3</sup>

---

<sup>8</sup>La metaBase es un conjunto de bases de datos con información de productos de la construcción que ofrece información de precios, pliegos de condiciones, características técnicas, empresas, certificaciones, imágenes de productos y datos medioambientales.

<sup>9</sup>Banco de datos

<sup>10</sup>Instituto Tecnológico de la Construcción de Cataluña



Pilares de 0,60 m x 0,60 m (10 niveles)

Volumen= 0,60 m x 0,60 m x 3, 2 m = 1,5152 m<sup>3</sup>

Energía por pilar = 494,67 kwh/m<sup>3</sup>

200 x 494,67 kwh/m<sup>3</sup>= 98.934 kwh/m<sup>3</sup>

Energía embebida en el total de pilares de hormigón armado: **330.878,8 kwh**

Estructura de madera laminada 28 N/mm<sup>2</sup>. Energía embebida por kg = 350 kwh/ m<sup>3</sup>

---

Paneles 1.10 m x 0,50m

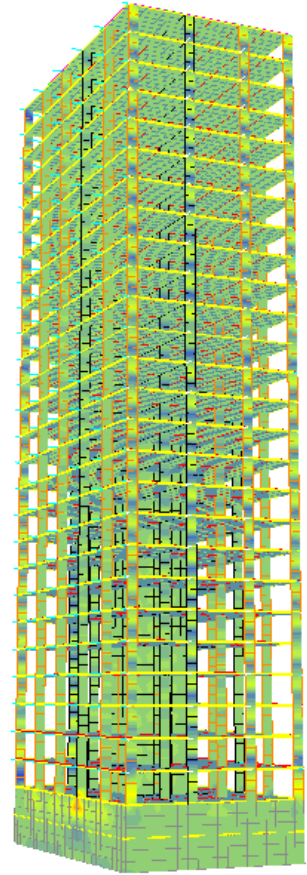
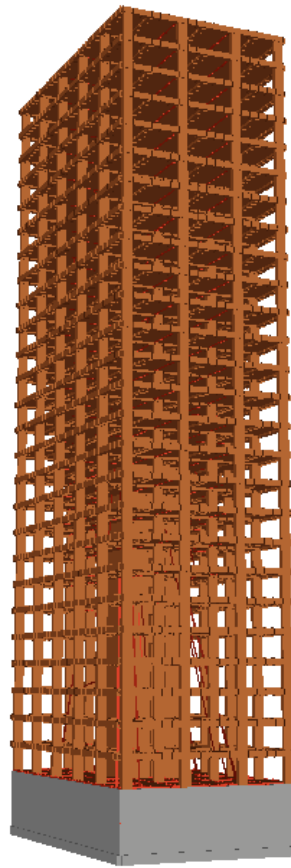
Volumen= 1.10m x 0,50m x 3, 2 m = 1, 76 m<sup>3</sup>

Energía por pilar = 3, 52 m<sup>3</sup> x 350 kwh/ m<sup>3</sup> = 1.232 kwh/ m<sup>3</sup>

520 paneles en la estructura

Energía embebida en el total de pilares de hormigón armado: **320.320 kwh**





## 7. Resultados

7.1 Dimensionado

7.2 Parámetros de mantenimiento



“Es vicio corrientísimo enamorarse de la elegancia de un proceso matemático y adoptar una determinada solución estructural solo por tener la ocasión de desarrollarlo, sin parar a evaluar los errores cometidos en las hipótesis para su planteamiento.” Eduardo Torroja.

Para tener una idea más clara y poder comparar fácilmente los datos obtenidos del análisis del LakeShore Apartments se diseñó la siguiente tabla mostrada en la figura 7.1. Recoge las solicitaciones que arrojo el cálculo estructural y de energía embebida de los tres sistemas estructurales.

Solicitaciones	Sistema estructural		
	Acero	Hormigón armado	Madera laminada
Axiles	-7.809,106 Kn	-12.957,550 Kn	252,22 KN
Cortantes	-266,46 Kn	339,08 Kn	131,79 kn
Momento flector	-715,486 Kn.m	-769,04 Kn.m	-219,65 Kn.m
Deformaciones	2,391 cm	2,783 cm	1,32 cm
Energía embebida	4.765.376 kwh	330.878,8 kwh	320.320 kwh

Figura 7.1 Tabla resumen de los resultados obtenidos en el análisis de los tres sistemas estructurales.

En esta se puede observar que la mayores solicitaciones las tiene la estructura de hormigón armado y las menores la estructura de madera laminada. Esto evidencia que debido al peso propio de los materiales de las mismas se producen las máximas tensiones en la estructuras, ha mayor peso mayor serán las tensiones.

Por las mismas razones, la máxima deformaciones se presentan en la estructura de hormigón armado, ya que estas son derivadas de los esfuerzos internos que ocurren en los elementos estructurales en su estado límite de servicio.

Los resultados que se muestra de la energía embebida solo son de los pilares que conforman los sistemas estructurales, es decir, no están contempladas las vigas, forjado ni el núcleo de pantallas rigidizadoras.

Estos datos dan una idea de la relevancia del gasto energético en las estructuras de las edificaciones. La comparación de los valores del gasto energético entre los tres sistemas, resulta destacable la estructura de acero queda muy mal posicionada consumiéndose solo en la fabricación de los pilares necesario de 4.765.376 kwh frente a la de madera laminada 320.320 kwh.

Los resultados de los pilares de hormigón armado y de madera laminada tienen una diferencia de casi 11.000 kwh, si se considerará también el núcleo rigidizador la diferencia fuera mucho mayor. Cabe destacar la estructura madera laminada esta conformada por paneles no por pilares, resultando mucho mayor volumen a evaluar.

Era de esperarse que la estructura de acero fuese la que peor se comportase energéticamente, ya que su proceso de fabricación conlleva mucha energía en fabricarse.

Una vez obtenido estos resultados y analizados, se dimensionarán los pórticos seleccionados.

### 7.1 Dimensionamiento pórtico tipo

#### Estructura Acero

Figura 7.2 Peritación Pilar HEM320 pórtico C. Nivel 10

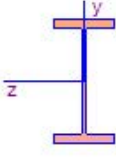
Figura 7.3 Peritación Pilar HEM600 pórtico. Nivel 7

Para afinar el dimensionamiento de la estructura de acero y que sus perfiles trabajaran la mayor parte de su capacidad se utilizaron dos perfiles diferentes para los pilares, el HEM600 para los pilares de los primero 7 niveles y HEM320 para el resto hasta completar los 26 niveles. Como pueden observar en la figura 7.2 y 7.3 ambos trabajan la mayor parte de su capacidad resistente y cumplen con todas las limitaciones que exige la normativa de modo que el único efecto será un pequeño acortamiento producto de la compresión que ejerce la carga axial.

**Comprobacion de la Barra 1016**

**PERFIL HEM\*600**

Ax 364.2 cm<sup>2</sup>  
Ay 120.2 cm<sup>2</sup>  
Az 233.7 cm<sup>2</sup>  
Ix 1495.3 cm<sup>4</sup>  
Iy 18978.3 cm<sup>4</sup>  
Iz 237841.7 cm<sup>4</sup>



BARRA 1016 Nodos 1642- 2339 Luz 3.200 mt. Capa 00\_PILARES  
Acero Fy 420N/mm<sup>2</sup> YM0: 1.05 YM1: 1.05

Tens.max Vmises 355.05 88.76 % en Comb.1  
Coef.CTE= 0.89 en Comb.1  
Coef pandeo-CTE 0.92 BetaY= 0.66 BetaZ= 0.53 en Comb.1  
Pandeo en PlanoXY XiZ= 1.000 en PlanoXZ XiY= 0.951 Pandeo lateral XiL= 1.000

↓ ↑ **Perita**

Perita M z/y

Usuario kN m.

U Nd 0

Mzd 0

Myd 0

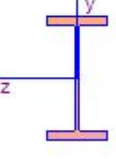
**Camb Secc** **Salva** **>> DXF**

Figura 7.4 Peritación Pilar HEM600 pórtico C. Nivel 1

**Comprobacion de la Barra 1104**

**PERFIL HEM\*600**

Ax 364.2 cm<sup>2</sup>  
Ay 120.2 cm<sup>2</sup>  
Az 233.7 cm<sup>2</sup>  
Ix 1495.3 cm<sup>4</sup>  
Iy 18978.3 cm<sup>4</sup>  
Iz 237841.7 cm<sup>4</sup>



BARRA 1104 Nodos 1818- 2503 Luz 3.200 mt. Capa porticolongitudinal  
Acero Fy 420N/mm<sup>2</sup> YM0: 1.05 YM1: 1.05

Tens.max Vmises 365.71 91.43 % en Comb.1  
Coef.CTE= 0.91 en Comb.1  
Coef pandeo-CTE 0.94 BetaY= 0.66 BetaZ= 0.53 en Comb.1  
Pandeo en PlanoXY XiZ= 1.000 en PlanoXZ XiY= 0.951 Pandeo lateral XiL= 1.000

↓ ↑ **Perita**

Perita M z/y

Usuario kN m.

U Nd 0

Mzd 0

Myd 0

**Camb Secc** **Salva** **>> DXF**

Figura 7.5 Peritación Pilar HEM600 pórtico 4. Nivel 1

Los pilares HEM 600 que conforman los primeros 7 niveles, dispuestos próximos al núcleo (B2, C2, B5, C5) son de resistencia característica S420 como pueden observar en las figuras 7.4 y 7.5.

## 7. Resultados

Peritar Viga 7.22.2 (Barras: 7800, 7807, 7814, 7821, 7828, 7835)

**Prontuario**

Perfil: **HEM**

Dimensión: **320**

Material

Tipo Acero: **S275**

Fyk: **275,000** Fu: **410,000**

Peritar

Guardar Restablecer

**Propiedades de la sección**

Área (cm<sup>2</sup>): **312.00**

Ix (cm<sup>4</sup>): **1,826.50**

Iy (cm<sup>4</sup>): **19,710.00**

Iz (cm<sup>4</sup>): **68,130.00**

Longitud Total Viga

Longitud (m): **6.60**

<< Información básica

**Pórtico de vigas**

< Ver viga anterior

Nombre del pórtico: **7.22**

Nº de vigas: **6**

Viga actual: **7.22.2**

Ver viga siguiente >

Comprobaciones

Cumple Normativa

**Resistencia**

ELU desfavorable: **5**

Ten. Von Misses (N/mm<sup>2</sup>): **201.57**

**Resistencia CTE:** **0.73**

Cumple normativa

**Pandeo**

ELUs desfavorables: **5**

Beta Pandeo Y: **0.52**

Beta Pandeo Z: **0.50**

Chi Y:

Chi Z:

**Pandeo CTE:** **0.23**

Cumple normativa

**Flexión Vano**

Flecha activa (cm): **0.981**

**Flecha activa CTE:** **0.590**

Flecha instantánea (cm): **0.872**

**Flecha instant. CTE:** **Infinity**

Flecha total (cm): **1.854**

**Flecha total CTE:** **0.840**

Cumple normativa

Flecha activa/L: 1/ **672**

Límite F. activa: 1/ **400**

Flecha instant/L: 1/ **0**

Lím. F. instant: 1/ **350**

Flecha total/L: 1/ **356**

Límite F. total: 1/ **300**

ELS desfavorable: **19**

Modifique el perfil o el tipo de material hasta que los factores de resistencia, pandeo y flechas sean menores que 1.00. En todo caso, se recomienda recalcular y redimensionar el modelo con los cambios realizados.

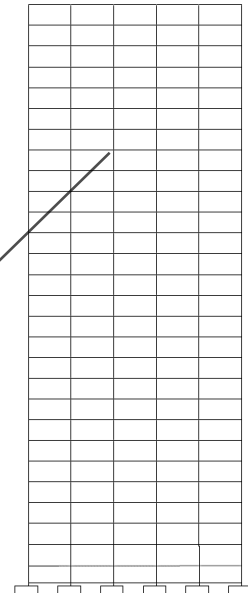


Figura 7.6 Peritación Viga HEM320 pórtico C. Nivel 20, tramo 2.

Peritar Viga 10.8.3 (Barras: 3201, 3202, 3203, 3204, 3205, 3206)

**Prontuario**

Perfil: **IPE**

Dimensión: **500**

Material

Tipo Acero: **S275**

Fyk: **275,000** Fu: **410,000**

Peritar

Guardar Restablecer

**Propiedades de la sección**

Área (cm<sup>2</sup>): **116.00**

Ix (cm<sup>4</sup>): **91.80**

Iy (cm<sup>4</sup>): **2,140.00**

Iz (cm<sup>4</sup>): **48,200.00**

Longitud Total Viga

Longitud (m): **6.60**

<< Información básica

**Pórtico de vigas**

< Ver viga anterior

Nombre del pórtico: **10.8**

Nº de vigas: **3**

Viga actual: **10.8.3**

Ver viga siguiente >

Comprobaciones

Cumple Normativa

**Resistencia**

ELU desfavorable: **2**

Ten. Von Misses (N/mm<sup>2</sup>): **246.04**

**Resistencia CTE:** **0.90**

Cumple normativa

**Pandeo**

ELUs desfavorables: **2**

Beta Pandeo Y: **0.51**

Beta Pandeo Z: **0.50**

Chi Y:

Chi Z:

**Pandeo CTE:** **0.32**

Cumple normativa

**Flexión Vano**

Flecha activa (cm): **0.191**

**Flecha activa CTE:** **0.120**

Flecha instantánea (cm): **0.170**

**Flecha instant. CTE:** **Infinity**

Flecha total (cm): **0.362**

**Flecha total CTE:** **0.160**

Cumple normativa

Flecha activa/L: 1/ **3,448**

Límite F. activa: 1/ **400**

Flecha instant/L: 1/ **0**

Lím. F. instant: 1/ **350**

Flecha total/L: 1/ **1,825**

Límite F. total: 1/ **300**

ELS desfavorable: **5**

Modifique el perfil o el tipo de material hasta que los factores de resistencia, pandeo y flechas sean menores que 1.00. En todo caso, se recomienda recalcular y redimensionar el modelo con los cambios realizados.

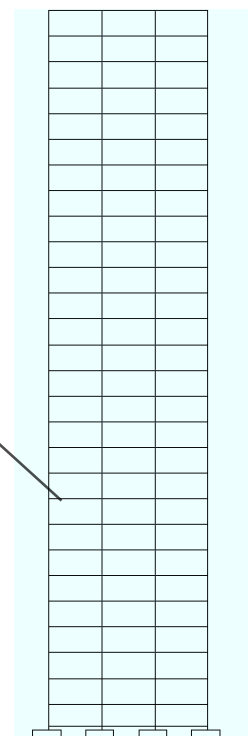


Figura 7.7 Peritación Viga IPE500 pórtico 4. Nivel 6, tramo 1.

Estos tramos de vigas corresponden a los continuos al pórtico tipo que son los que presentan mayor sollicitación de esfuerzos, razón por la cual son los que tienen el perfil mayor.



Estructura de Hormigón Armado

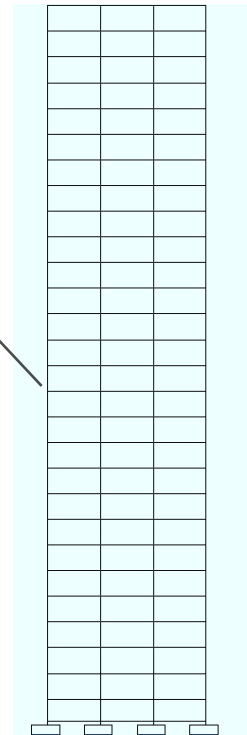
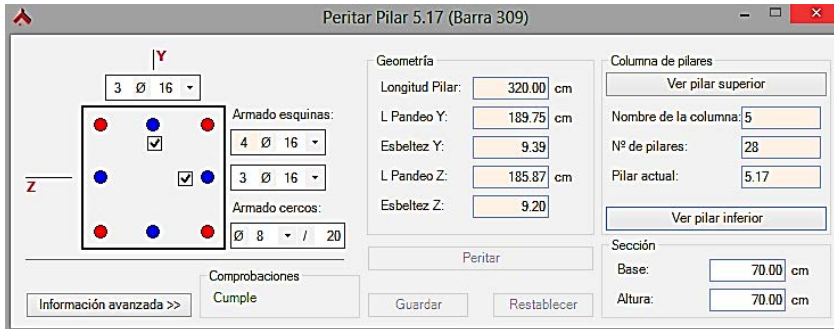


Figura 7.8 Peritación pilar 70 cm x 70 cm pórtico 4. Nivel 15.

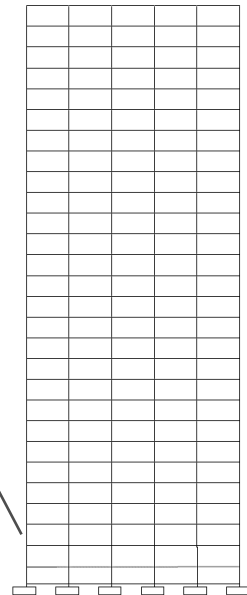
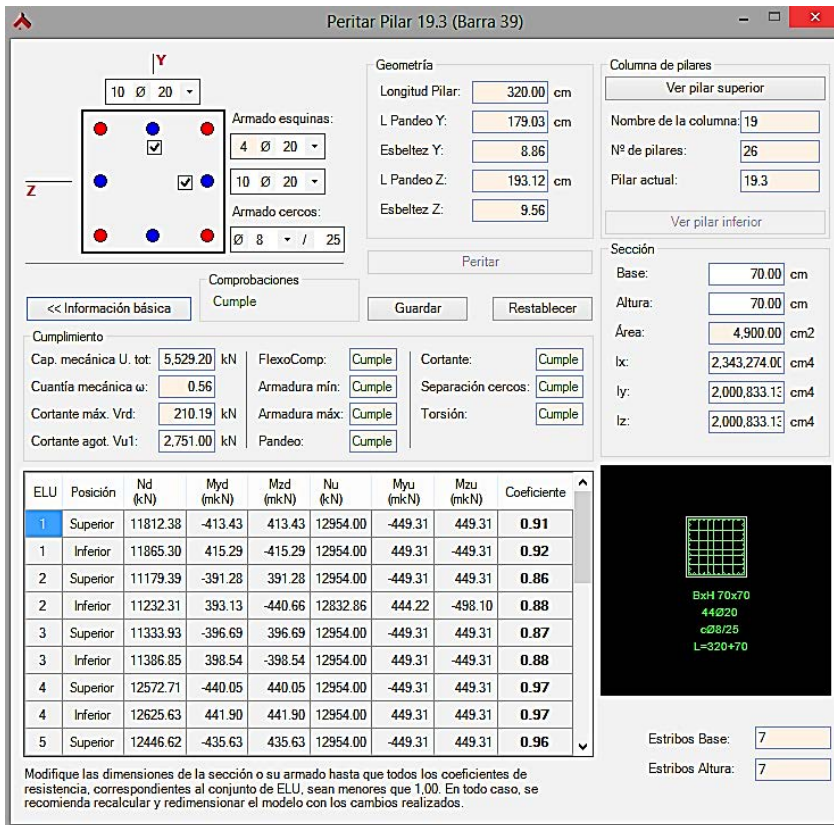


Figura 7.9 Peritación pilar 70 cm x 70 cm pórtico C. Nivel 1.

En la estructura de hormigón armado se utilizó un único tipo de pilar, el cual es cuadrado de 70 cm x 70 cm. El dimensionamiento del mismo varió según el nivel. Para los niveles inferiores por ser los más solicitados poseen 4 Ø de 20 en el armado de las esquinas con cercos de Ø de 8 a 25 cm de separación. En los niveles superiores, el armado va disminuyendo y es 4 Ø de 16 en el armado de las esquinas con cercos de Ø de 8 a 20 cm de separación. Ver figuras 7.5 y 7.6.

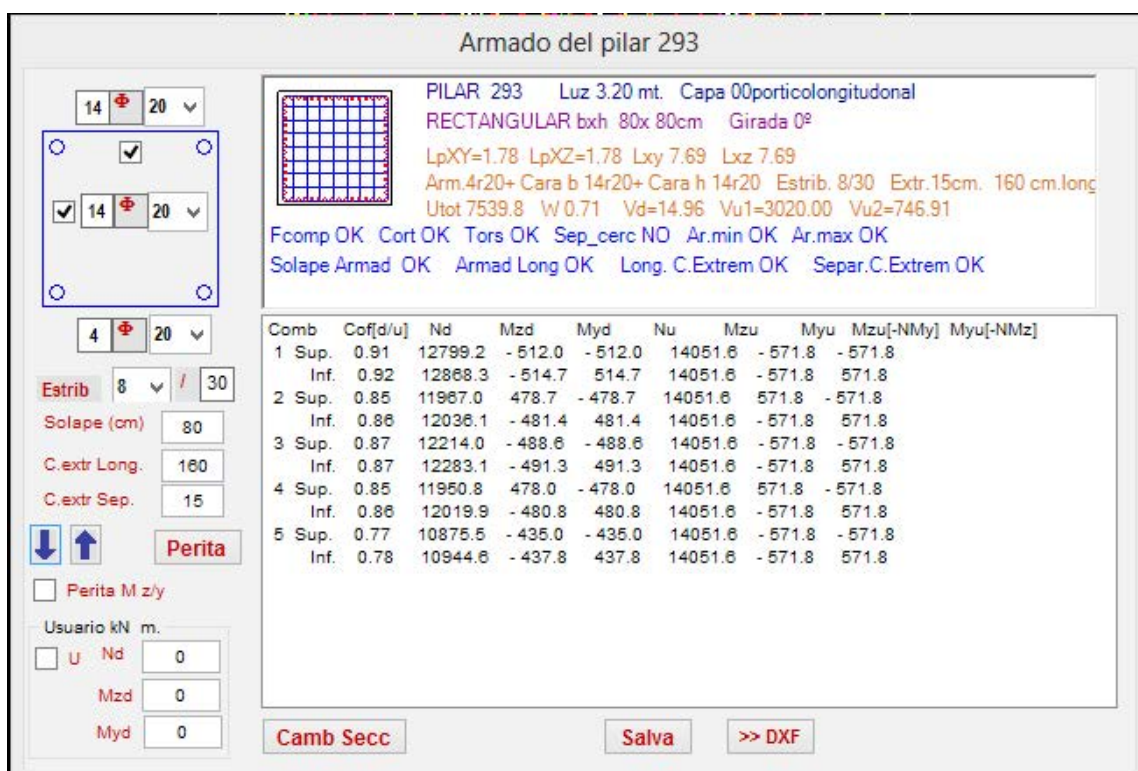


Figura 7.10 Peritación Pilar 0,80 m X 0,80 m pórtico C. Nivel 1

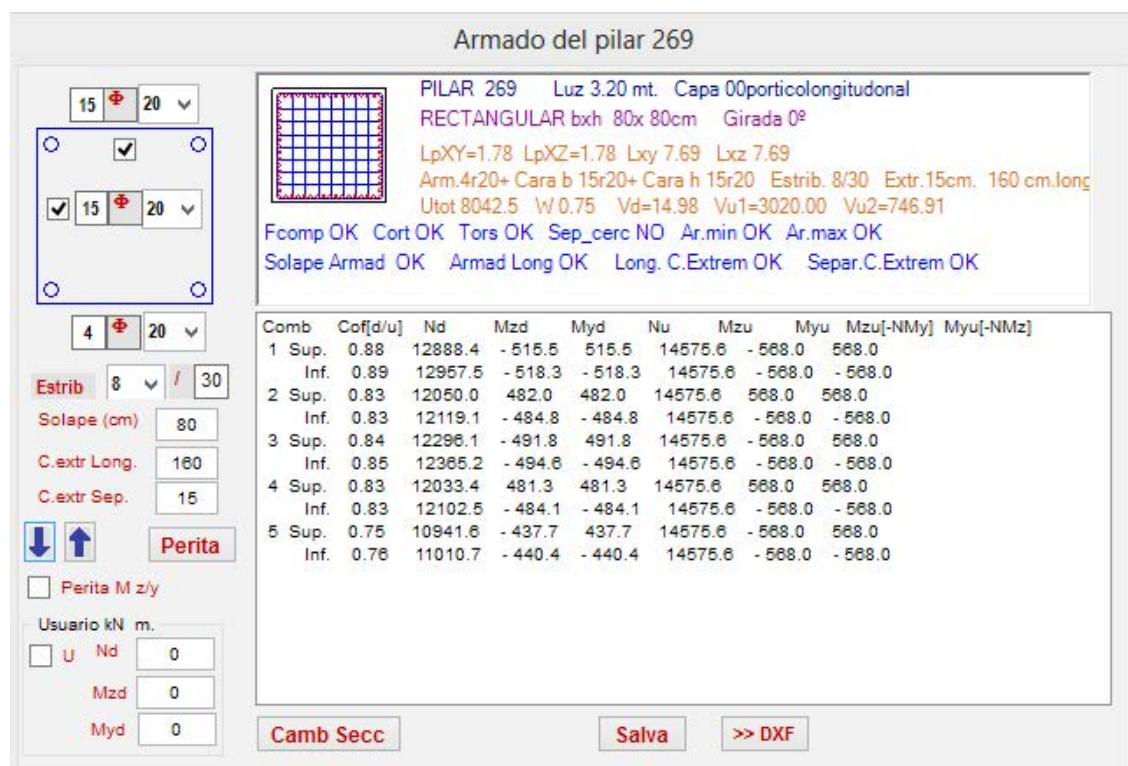


Figura 7.11 Peritación Pilar 0,80 m X 0,80 m pórtico 4. Nivel 1

Los pilares próximos al núcleo (B2, C2, B5, C5) son de sección cuadrada de 0,80 m X 0,80 m, armados como muestran las figuras 7.10 y 7.11

Todas las vigas son de sección rectangular de 45 cm x 65 cm, diferenciándose su armadura de acuerdo a las solicitaciones. En el caso de los tramos 2 y 4 que son los continuos al núcleo del pórtico C, estos son: 4 Ø de 20 en la parte superior, 5 Ø de 16 en la parte inferior, doblemente armados con cercos de Ø de 8 a 30 cm de separación. Ver figura 7.7

En el pórtico 4, los tramos 1 y 3, su armadura está dispuesta de la siguiente manera: 4 Ø de 16 en la parte superior, 7 Ø de 12 en la parte inferior, doblemente armados con cercos de Ø de 8 a 30 cm de separación. Ver figura 7.8

Como pueden observar en las figuras, estos cumplen con todos las limitaciones de la normativa demostrando la estabilidad de la estructura.

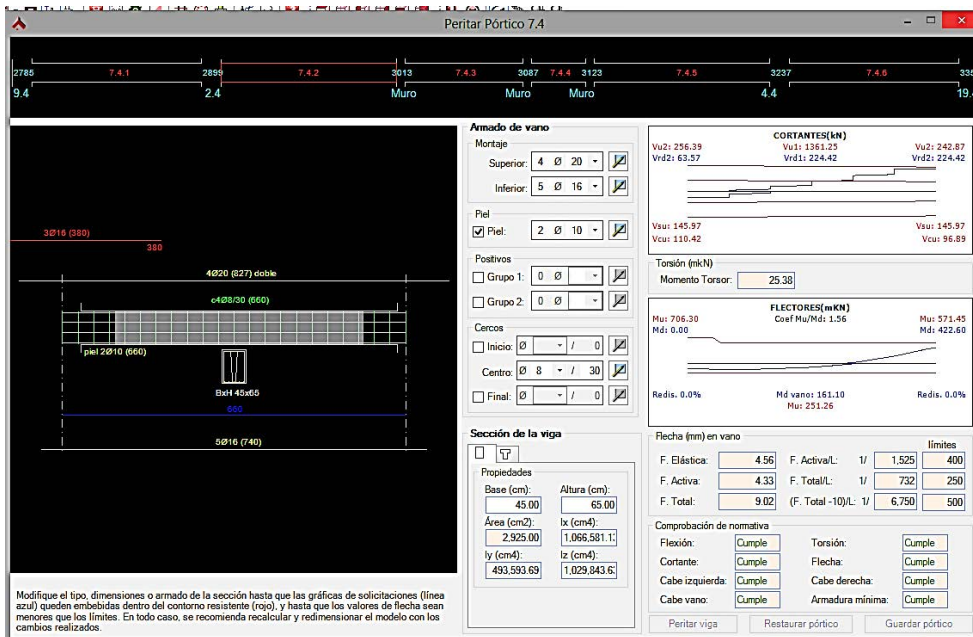


Figura 7.12 Peritación viga pórtico C. Nivel 2.

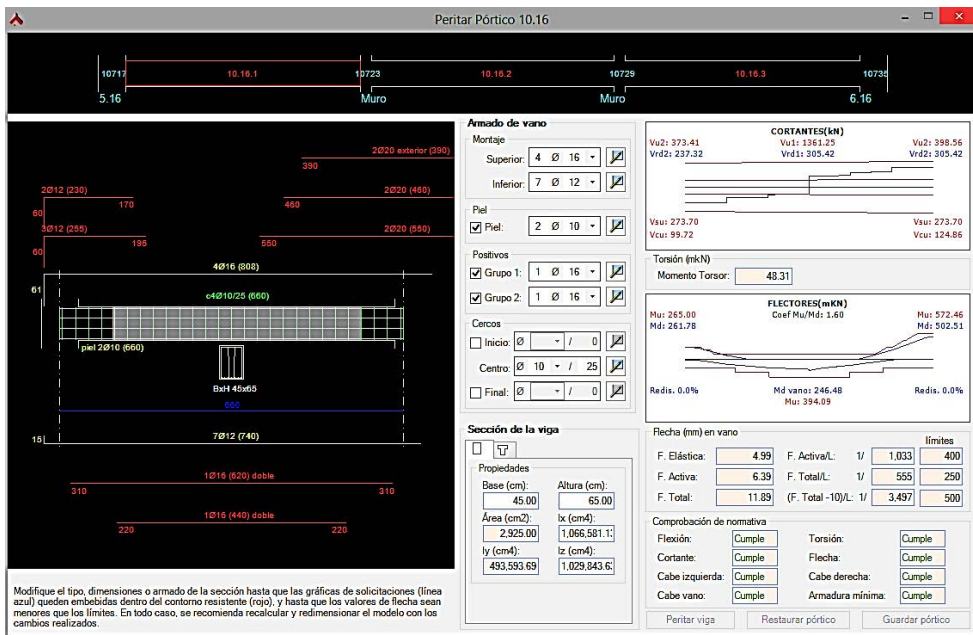
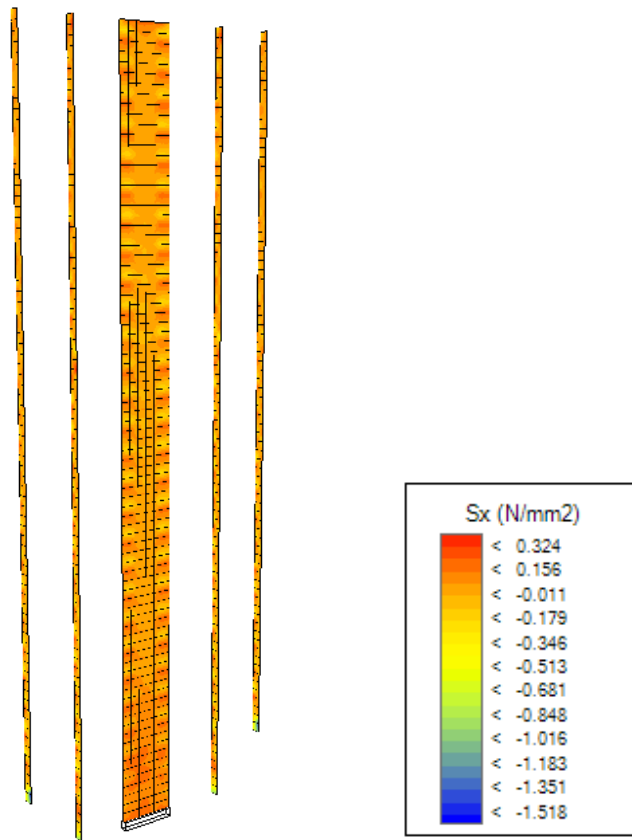


Figura 7.13 Peritación viga pórtico 4. Nivel 14

Estructura de madera laminada



Las máximas tensiones de membrana Sx ocurren en la base de los paneles que conforman los soportes del Sistema estructural de madera laminada, siendo esta de -1,518 N/mm<sup>2</sup> en ELU situación persistente 2.

Figura 7.14. Tensiones de la membrana Sx en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.

Las máximas tensiones en la membrana Sy ocurren en la base de los paneles que conforman los soportes del Sistema estructural de madera laminada, siendo esta de -11,644 N/mm<sup>2</sup> en ELU situación persistente 2.

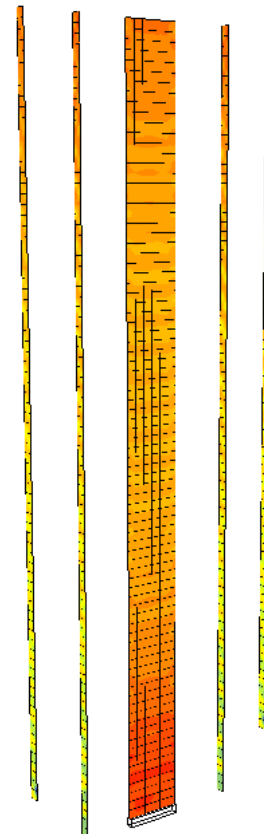
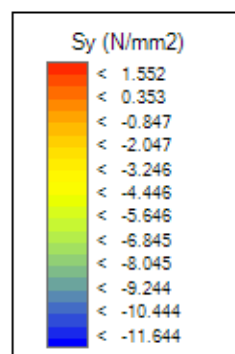
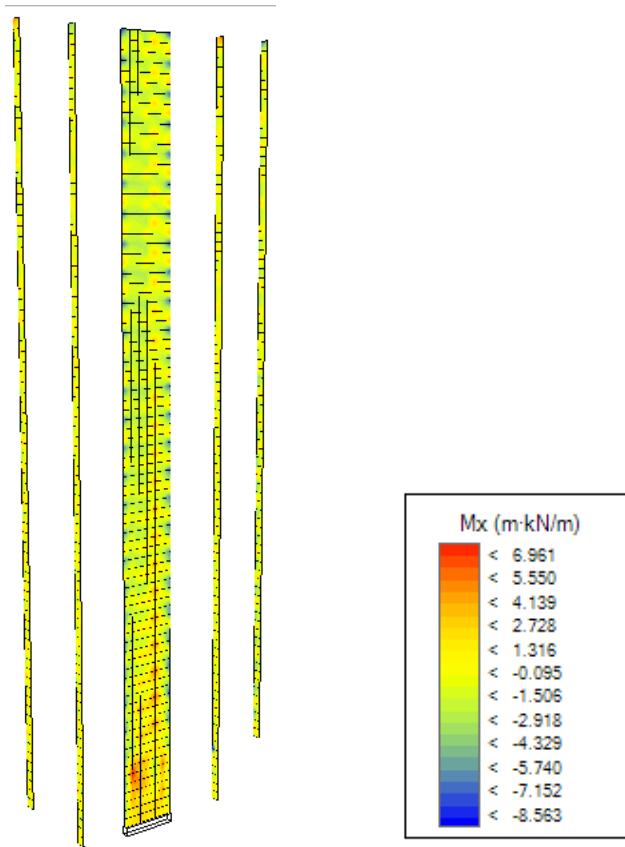


Figura 7.15. Tensiones de la membrana Sy en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.



Las máximas flexiones en  $M_x$  ocurren en el extremo en contacto con la cubierta de los paneles que conforman los soportes del Sistema estructural de madera laminada, siendo esta de  $-8,563 \text{ KN/m}$  en ELU situación persistente 2.

Figura 7.16. Flexión de la placa  $M_x$  en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.

Las máximas flexiones en  $M_y$  ocurren en el extremo en contacto con la cubierta de los paneles que conforman los soportes del Sistema estructural de madera laminada, siendo esta de  $-40,785 \text{ KN/m}$  en ELU situación persistente 2.

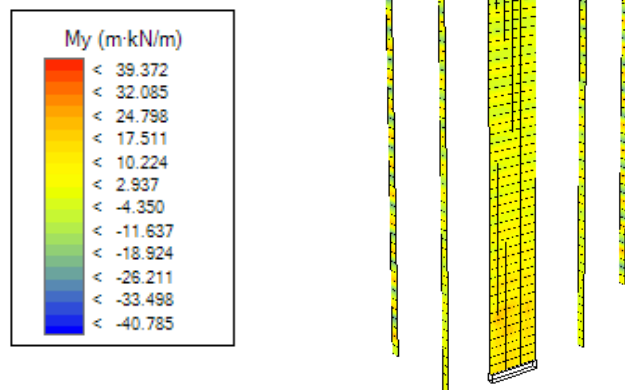
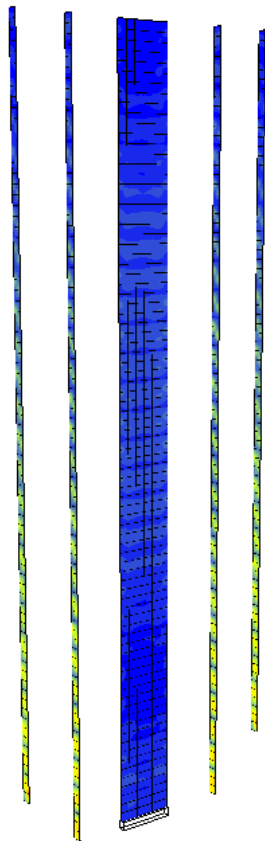


Figura 7.17. Flexión de la placa  $M_y$  en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.



CLASE RESISTENTE N/mm <sup>2</sup> densidad en kg/m <sup>3</sup>	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
R. Flexión característica	20	22	24	26	28	30	32
R. Tracción Paralela característica	16	17,6	19,2	20,8	22,4	24	25,6
R. Tracción Perpendicular característica	0,5						
R. Compresión Paralela característica	20	22	24	26	28	30	32
R. Compresión Perpendicular característica	2,5						
R. Cortante (cortadura y torsión)	3,5						
R. Cortante (rodadura)	1,2						
MOE medio paralelo	8.400	10.500	11.500	12.100	12.600	13.600	14.200
MOE característica paralelo	7.000	8.800	9.600	10.100	10.500	11.300	11.800
MOE medio perpendicular	300						
MOE característica perpendicular	250						
Módulo medio Cortante	650						
Módulo característico Cortante	540						
Módulo medio Cortante rodadura	65						
Módulo característico Cortante rodadura	54						
Densidad característica	340	370	385	405	425	430	440
Densidad media	370	410	420	445	460	480	490

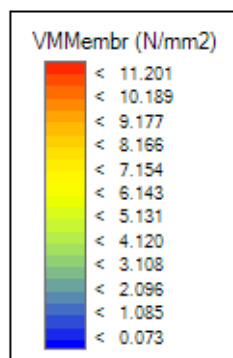


Figura 7.18. Tabla clase resistente de la madera laminada homogénea, según norma EN 14080.

Resistencia de cálculo:

$$(0,6) 28 / 1,25 = 13 \text{ N/mm}^2$$

Figura 7.19. Von Mises de los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.

La combinación adoptada para mostrar los resultados fue ELU situación persistente 1.

Tensión en la membrana		Flexión en la placa		Von Mises
Sx	Sy	Mx	My	
-1,518 N/mm <sup>2</sup>	-11,644 N/mm <sup>2</sup>	--8,563 Kn/m	-40,785 Kn/m	11,201 N/mm <sup>2</sup>

Figura 7.20 Resumen de los resultados de las solicitaciones en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.

**La tensión de comparación es inferior a la resistencia de cálculo = 13 N/mm<sup>2</sup>**

Las comprobaciones de diseño muestran que no se supera el límite elástico del material, así como las limitaciones de las deformaciones totales de los elementos estructurales.

## 7.2 Parámetros de mantenimiento de las estructuras de madera laminada.

Generalmente el mantenimiento rutinario consiste en una inspección cada 3 años y de producirse fenómenos excepcionales, como vientos extremos, goteras, etc., se realiza una inspección extraordinaria.

En todo caso se exige al suministrador de los elementos que aporte las correspondientes garantías y que especifique el mantenimiento adoptado, especificando los productos de acabado en las fichas técnicas. Las siguientes recomendaciones de procedimiento de mantenimiento son extraídas de la Guía de la Madera (Pereza Sánchez, J. E., Menéndez Pidal, I., Velasco Rivas, J. M., & Sanz Pérez, E., 2014).

Procedimiento de mantenimiento:

El procedimiento de mantenimiento de las estructuras de madera laminada es en función de la clase de uso en la que se encuentre la estructura o parte de la estructura, las cuales dependen básicamente del grado de humedad que pueda alcanzar la madera durante su vida de servicio y de la radiación a la que está sometida, previendo el riesgo de ataques de agentes xilófagos.

Para la clase de uso 1, en condiciones normales no necesita más mantenimiento que la limpieza periódica y la comprobación de que no hay ninguna incidencia.

En el caso de la clase de uso 2, las piezas situadas bajo cubierta exterior, se valorara después de la inspección rutinaria la necesidad de aplicar un fondo fungicida e insecticida. Lo recomendable es la aplicación cada 5 años. Revisar las protecciones colocadas en lateras o testas de la madera laminada.

En la clase de uso 3 se recomienda el refresco del tratamiento protector contra la radiación solar y agentes biológicos cada 3 años para los elementos orientados a sur y cada 5 años orientados a norte.

En la Confederación Española de Empresarios de la Maderas (CONFEMADERA, 2014), en su Guía de Construir en Madera, recomiendan que en caso de emplear productos de acabado o protección superficial que formen una película, como las pinturas y los barnices, se debe establecer un programa de seguimiento posterior. Igualmente, los revestimientos ignífugos superficiales deberán ser reparados tan pronto como se observen daños que hagan peligrar su integridad.

De todos modos, si se detectasen deterioros importantes como grietas, deformaciones, fallos uniones, ataques de termitas o insectos, etc., se debe avisar a un técnico competente para que audite el problema y proponga las soluciones de mantenimiento más adecuadas.

También tomar las medidas preventivas necesarias frente a agentes bióticas evitando tratamientos posteriores fuera de lo rutinario. Estas están establecidas en las normativas UNE-EN 335-1.2.3, UNE-EN 350-1,2, UNE-EN 460 Y UNE-EN 599-1,2.

Cabe destacar que el mejor parámetro de mantenimiento de las estructuras de madera laminada y de todas en general es un buen diseño, evitando específicamente la retención de agua.







## 8. Conclusiones

“(...) solo puedes hacer lo que haces concentrándote en ese proyecto y enfrentándose a los prejuicios, investigando, impregnándote del lugar en el que se ubica, debatiendo y aprovechando esa oportunidad como si fuera la primera. Esto siempre ha sido una parte importante de nuestro método de trabajar. Tratamos cada proyecto como si fuera el primero que hacemos. (...)” Norman Foster. (Foster. [Extracto de entrevista, Londres, 13 de junio 1996.])



“¿Cuánto pesa su edificio señor Foster?” Le pregunto Buckminster Fuller a Norman Foster en una conversación que sostenían estos dos grandes arquitectos. (Foster, 2013, [video]). Y me pregunto, aun conociendo estas cuestiones que nos expresan en la escuela de arquitectura desde los primeros años de formación, ¿nos hacemos esa pregunta? ¿Nos plantean el hecho que debemos proyectar pensando en las sostenibilidad de nuestro planeta?, ¿Qué entendemos por sostenibilidad, solo eficiencia energética?, sostenibilidad en el estado de uso del edificio, no pensamos en ser ecológicos antes de usarlo, ayudar al medio ambiente cuando lo construimos, cuando lo proyectamos.

El panorama hoy en día, avanza hacia un mundo que comienza a definir sus posturas frente al medio ambiente, el diseño y la arquitectura. Por eso el High Tech se ha convertido en uno de los principales referentes mundiales: el Eco-Tech. Poco a poco las personas tomaron cuenta de los problemas que vendrían en el futuro. La alta tecnología debe de ser usada como potenciadora del diseño y tras el minucioso análisis de los factores ambientales y de las características del terreno que determinarán la morfología del edificio, logrando grandes niveles de bienestar natural.

La arquitectura hoy en día está en caminata a la aplicación en el diseño de materiales con menor energía embebida en su transformación, como factor de ahorro energético, mínima emisión de gases invernadero, y máximo respeto a su estructura natural original, incluida la energía necesaria para el transporte.

Es por ello que tomamos consideraciones para mimetizar la energía empleada en el uso y la energía embebida de la construcción, las cuales se ven fuertemente afectadas por la condición del edificio, como en nuestro caso de estudio un edificio de uso muy común, residencial, haciendo que el impacto relativo de la construcción sea comparativamente más alto que en edificios terciarios.

El intercambio de hormigón y acero por un material sostenible ofrece considerables ventajas ambientales. La mayor parte del edificio hecho con madera, requiere menos energía durante la fabricación de los elementos y durante la etapa de construcción. Además, la madera es el único material de construcción con un CO<sub>2</sub> negativo, es decir, almacena CO<sub>2</sub>.

Como conclusiones del presente trabajo puedo señalar:

- Se ha realizado una revisión de la bibliografía especializada sobre el estado actual de la madera laminada, haciendo hincapié en el balance ecológico que esta tiene en la edificación y los nuevos avances en el sector con fines estructural.

Con respecto al balance ecológico en la edificación, se ha verificado que muestra un comportamiento mucho más favorable frente al hormigón armado y el acero, no solo por el hecho de que conlleva menor gasto de energía en la fabricación de los elementos, sino también porque almacena un promedio de 0,8 a 0,9 toneladas por m<sup>3</sup> de CO<sub>2</sub>. Esto significa que si cada panel del sistema de soporte tiene 1.76 m<sup>3</sup> y son 520 paneles, el sistema estructural de madera laminada tiene un total de 915,2 m<sup>3</sup> de madera sin considerar el núcleo, la cual almacenaría 823,68 toneladas de CO<sub>2</sub>, favoreciendo aún más al medio ambiente.

Se ha observado que los nuevos avances en el sector, estos están encaminados principalmente, con el desarrollo tecnológico de los medios de unión y nuevos adherentes que permiten una mayor fijación.

## 8. Conclusiones

---

- Se ha realizado una revisión de la bibliografía específica sobre el comportamiento de las estructuras verticales en general, sin discriminación de material. De ella se han extraído los requisitos para un buen funcionamiento y las acciones que repercuten en ella, observando que su principal problema es resistir las cargas horizontales de viento y sismo, para evitar el colapso o rotura de secciones o elementos. Además debe tener rigidez para evitar deformaciones excesivas, vibraciones excesivas y para contribuir a la estabilidad.

Sobre sus elementos, se ha visto que deben ser diseñados para transmitir las fuerzas horizontales a la cimentación y deben ser constituidos principalmente por elementos planos: pórticos y muros; elementos espaciales: tubos. También por elementos de distribución los cuales reparten las fuerzas a los elementos principales, estos son los forjados.

- Se han estudiado y analizado experiencias concretas de estructuras verticales de madera laminada planteados por arquitectos que abogan por su utilización, quedando establecidos los requerimientos estructurales que estos deben tener.

De estos escogí una solución estructural que utiliza en mayor medida elementos de madera laminada, la planteada por Michael Green. La misma tiene cuatro opciones diferentes de estructuración que permiten configurar edificios que van desde los 12 niveles hasta 30 con diferentes tipos de distribución de planta, pensadas principalmente para uso residencial.

- He documentado y analizado el edificio Lake Shore Aparments de Mies van der Rohe, su diseño arquitectónico, estructural y el sistema de transmisión de cargas. Este edificio lo escogí por ser un edificio con una estructura muy básica, que lo hace fácilmente reproducible.

- La estructura del Lake Shore Aparments de este edificio ha sido modelizada utilizando los tres materiales estudiados (acero, hormigón, y madera laminada) y se ha realizado un análisis comparativo de sus solicitaciones, deformaciones. Estos últimos valores se han ajustado a los exigidos por el CTE y a la vez por el IBC (normativa estadounidense).

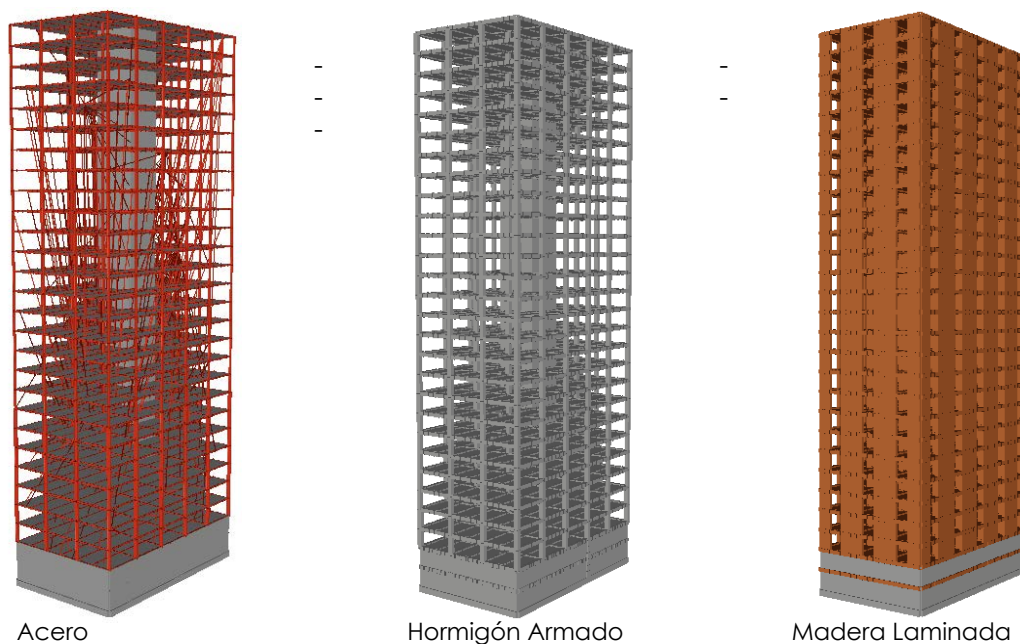


Figura 8.1 Modelo tridimensional de las estructuras de Acero, Hormigón Armado y Madera Laminada.

- Por otro lado se ha realizado un análisis comparativo de la energía embebida que conlleva la fabricación de sus pilares.

- Por último, se han investigado las exigencias de conservación de las estructuras de madera laminada, la cual conllevan un mantenimiento rutinario de acuerdo a las clases de servicio que dependen del grado de humedad a que esta se vea expuesta.

De los resultados de la evaluación y diagnóstico del comportamiento de los tres sistemas estructurales podemos concluir lo siguiente:

#### **En cuanto a los materiales:**

- Acero: el acero como material derivado del hierro altera el campo magnético natural del terreno, por lo tanto se considera inestable con la naturaleza. Conlleva un coste elevado de extracción y proceso de fabricación, al igual que un gran coste energético por su transformación. La manipulación de los elementos fabricados con este material, transporte y montaje, es complejo y la mano de obra debe ser muy especializada y estrictamente supervisada.

Su inestabilidad en contacto con el medio ambiente hace necesario un continuo mantenimiento ya que este material se oxida. Como consideración positiva medioambiental es que es un material reciclable.

- Hormigón armado: se trata de un conjunto de materia prima que se unen para conformarlo, parte de las cuales se encuentran en la naturaleza y otras son fabricadas. Con la mezcla de todos ellos se obtiene un material totalmente artificial por lo cual se considera con escasas calidades bióticas. En su proceso de fabricación, las extracciones de la materia prima, ocasiona daños irreparables a la naturaleza.

En cuanto a su puesto en obra, es hacedera, y la mano de obra no tiene que ser tan especializada como en el acero, además es mucho más económica. Requiere un mantenimiento leve contra la corrosión. Una vez finalizado su tiempo de vida, este material se debe des- echar, no es reciclable, lo que ocasiona muchos desperdicios y consume mucha energía en su eliminación.

- Madera laminada: como su origen es natural, con un control de gestión forestal sostenible, su proceso de extracción no perjudica el medio ambiente. Posee características bióticas excepcionales: Resistente, elástica, ligera, poca conductividad, buen aislamiento acústico y térmico, permeable a las radiaciones terrestres. Su proceso de fabricación tiene un coste energético insignificante ya que no necesita transformaciones químicas. Es de fácil montaje al ser ligera. Requiere mantenimiento rutinario. Es reciclable 100%.

#### **En cuanto al modelo estructural:**

- Acero: tiene más resistencia con menos sección de los elementos que la componen, por lo tanto se puede alcanzar mayores luces a cubrir con menor canto, lo que representa una ventaja significativa en cuanto distribución espacial.

- Hormigón armado: sus elementos son muy pesados, por lo tanto el esfuerzo axial en la base se hace enorme, lo que origina grandes cargas en la cimentación, y sus elementos requieren de grandes secciones para poder alcanzar grandes luces.

- Madera laminada: Para poder resistir las solicitaciones a la que es sometida hubo que recurrir a paneles en lugar de pilares como elemento de soporte, lo que limita la distribución espacial del edificio. A pesar de ello, la ligereza que aporta la estructura de madera laminada frente a las de hormigón armado o acero, se puso en manifiesto al tener los mínimos valores de tensiones y solicitaciones de los tres sistemas estructurales analizados. Esta es otra ventaja de su utilización: con ello disminuye significativamente el impacto producido en el terreno, contribuyendo a la preservación de los subsuelos.

**En cuanto a la energía embebida:**

Como la estructura es el apartado que mayor consumo energético presenta en el edificio, se ha realizado una comparación energética de los pilares de los tres sistemas estructurales utilizando la metabase del BEDEC del ITEC para el cálculo. Primero se ha obtenido el consumo de materiales en los tres sistema, 395.756 Kg en el caso de la estructura de acero, 863,16 m<sup>3</sup> el volumen de los pilares de hormigón y 915,2 m<sup>3</sup> el volumen en los paneles de madera laminada.

A continuación, a partir de la energía embebida por unidad de medida, se ha obtenido la energía embebida total. La siguiente tabla resume los resultados del análisis.

	Sistema estructural		
	Acero	Hormigón armado	Madera laminada
Energía embebida	11,99 kwh/kg	429,4 kwh/ m <sup>3</sup>	350 kwh/ m <sup>3</sup>
Volumen	395.756 Kg	863,16 m <sup>3</sup>	915,2 m <sup>3</sup>
Energía embebida total	4.765.376 kwh	330.878,8 kwh	320.320 kwh

Figura 8.2. Resumen del análisis de energía embebida en los tres sistemas estructurales.

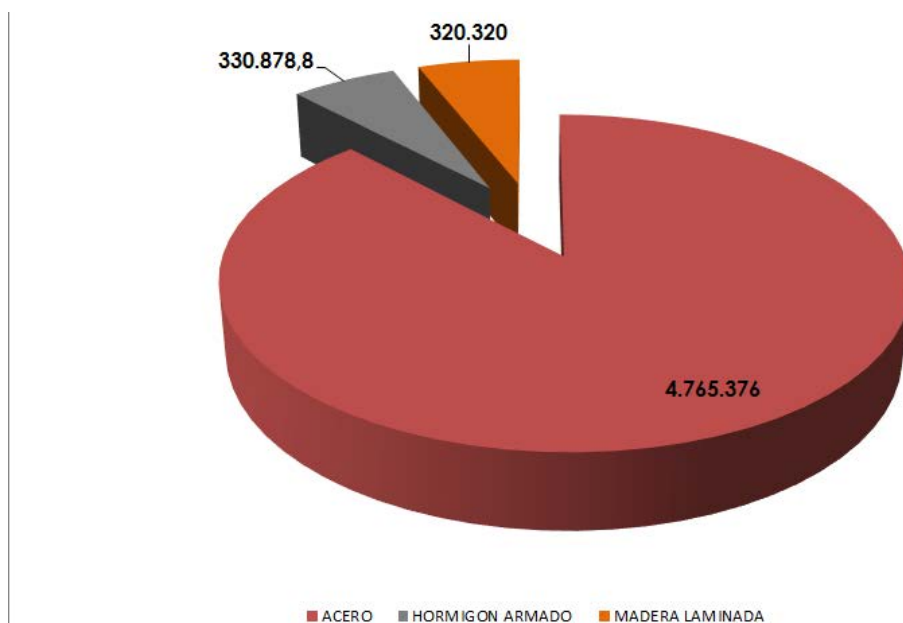


Figura 8.3. Proporción de energía utilizada en cada sistema estructural.

Con el gráfico queda claro el elevado consumo de energía en la fabricación de las estructuras de acero. Por ello, y desde el punto de vista de la sostenibilidad ambiental, es recomendable reducir el uso de este tipo de estructuras.

La energía consumida por la fabricación de la estructura de hormigón armado y madera laminada no difiere tanto en comparación con la estructura de acero, pero tomando en cuenta el dióxido de carbono que genera esta energía y considerando que la madera laminada lo absorbe, podría decir que como resultado final la madera laminada tiene emisiones nulas de CO<sub>2</sub>. De nuevo desde el punto de vista de la sostenibilidad, parece razonable recurrir a las estructuras de madera, siempre que esta no conlleve un gasto energético excesivo en transporte, es decir, utilizarla donde abunde el material.

Considerar la energía embebida que conlleva las estructuras a la hora de proyectarlas y diseñarlas utilizando madera laminada, se podría ahorrar hasta un 40% de la energía empleada. Este supuesto se corrobora en el estudio japonés realizado a cargo de Michiya Suzuki, Tatsuo Oka y Kiyoshi Okada, en el que en viviendas unifamiliares realizadas con estructura de madera. Su estructura supone solamente entre un 16% y un 20% de la energía consumida en la construcción. (Suzuki, M., Oka, T., & Okada, K., 1995).

Actualmente las normativas limitan solamente la energía del edificio en su estado de uso, pero entendemos que en un futuro próximo esta contemplara también la energía embebida en su construcción.

Teniendo en cuenta los datos presentados en la investigación, se señala que el estudio de la energía embebida en las estructuras supone un factor de estudio más dentro del análisis del ciclo de vida de los materiales y los edificios, que debe estar englobado dentro de un estudio de impacto medioambiental que reúna factores como idoneidad de los materiales, capacidad de reciclaje o reutilización, adecuación a las características intrínsecas del lugar, disponibilidad de materiales autóctonos, etc.

Para un futuro trabajo a desarrollar, sería recomendable realizar un análisis económico comparativo de los tres sistemas estructurales para ver las repercusión que esto tiene. También analizar las uniones de los diferentes elementos de madera. Otro posible campo de estudio podría ser establecer criterios para incorporar este tipo de estructura a programas de cálculo estructural existentes en el mercado profesional. Generación de residuos y en qué medida estos se pueden reciclar.







## **9. Bibliografía**

Libros

Articulos de revistas científicas

Articulos de revistas

Paginas Webs

Otros

Referencias de las figuras



**Libros**

Blaser, W. (Ed.). (1999). Mies van der rohe lake shore drive apartments high-rise building [Mies van der Rohe Lake Shore Drive Apartments Wohnhochhaus] (Katja Steiner, Bruce Akmberg, Ehingen Trans.). Basilea, Suiza: Birkhauser.

Eisele, J., & Kloft, E. (2002). Load - bearing structures. High-rise manual typology and design, construction and technology [HochhausAtlas] (Elizabeth Schwaiger Trans.). (pp. 77-95). Munchen: Birkhauser.

Engel, H. (1970). Sistemas estructurales verticales. In Deutsche Verlags (Ed.), Sistemas estructurales [Tragsysteme - Structure Systems] (De Aguirre e Yraola, Fernando, J B Garcia/Geraldo Trans.). (española ed., pp. 233-262). Madrid: Blume.

Jodidio, P. (Ed.). (1997). Sir Norman Foster. London: Taschen Benedikt,

García - Esteba, L., Guindeo - Casaus, A., Peraza - Oramas, C., & De palacios de Palacios, Paloma. (2002). Madera laminada encolada. La madera y su tecnología (pp. 179-183). Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.

López Aenlle, M., & García Prieto Marian (Eds.). (2013). Apuntes de teoría de estructuras (1a ed.). Madrid: Bellisco Ediciones.

Martin, B. (1981). Las uniones en la edificación. Las juntas en los edificios [Joints in Building] (Joan Lluís Zamora Trans.). (pp. 9-27). Barcelona, España: Gustavo Gili, S.A.

Pereza Sánchez, J. E., Menéndez Pidal, I., Velasco Rivas, J. M., & Sanz Pérez, E. (2014). Madera laminada encolada. Guía de la madera (II) construcción y estructuras (pp. 432-502). Madrid: Nueva imprenta, S. L.

Piano, R. (Ed.). (1998). Arquitecturas sostenibles. Barcelona: Gustavo Gili, p.60.

Rohe, L. V. d. (1981). Escritos, diálogos y discursos. (C.O.A. y A. T, Galería - Librería Yerba ed., p. 46). Murcia: Conserjería cultural.

**Artículos de revistas científicas**

Del Caño, A., Gomez, D., & De la Cruz, P. (2012). Uncertainty analysis in the sustainable design of concrete structures: A probabilistic method. Construction and Building Materials by Elsevier, 13, 865-873.

Dodoo, A., Gustavsson, L., & Sathre, R. (2014). Lifecycle carbon implications of conventional and low-energy multi-storey timber building systems. *Energy and Buildings* by Elsevier, 82, 194-210.

Jacobo, G. J., & Vedoya, D. E. (2004). Una chance para el futuro: La madera como alternativa para la construcción. *Comunicaciones Científicas y Tecnológicas: Instituto De Investigaciones Tecnológicas Para El Diseño Ambiental Del Hábitat Humano*, T-095

Suzuki, M., Oka, T., & Okada, K. (1995). The estimation of energy consumption and CO2 emission due to housing construction in Japan." *Energy and Buildings*, 22, 165-169.

Van De Kuilen, J. W. G., Ceccotti, A., Zhouyan, X., & He, M. (2011). Very tall wooden buildings with cross laminated timber. *Procedia Engineering* by Elsevier, 14, 1621-1628.

### **Artículos de revistas**

Aiello, C., Aldridge, P., Deville, N., & Jung, A. S. (2013). *eVolo skyscrapers*.

Argüelles - Álvarez, R. (2010). Uniones. Un reto para construir con madera: Conectores de última generación. Madrid: Real Academia de ingeniería, pp. 32,53.

Food and Agriculture Organization of the United Nation. (2014). The united states timber situation. *Timber Resources for America's Future. Forest Resource*, 14(3), 4 septiembre 2014.

Grohe, G. (1995). El futuro de la construcción con madera. *Tectónica: Madera De Uso Estructural*, 13, pp. 28-37.

Loreto, A., Molina, R., & Vivas, V. (2013). La madera: Una línea de investigación. *Tecnología y Construcción*, 16(3)

Mikako, Oshima. (2005). ¿Arquitectura contra estructura?. *Paisajes De Arquitectura y Critica*, 71, p. 26.

Pérez, N. (2010). Columna madera y tecnología: Comparación entre dos innovadores sistemas estructurales en madera para edificación en altura. *Tecnología De La madera/Madera* 21,

Pérez, Vicente. (1992). Utilización de la madera laminada. *Promateriales: Madera laminada de uso estructural*, p. 24.

## Páginas Webs

C.F. Møller Architects partner group. (2014). C.F. møller. Retrieved 08/13, 2014, from <http://www.cfmoller.com/p/HSB-2023-Vasterbroplan-i3048.html>

Confederacion Española de empresas de la madera. (2014). Confemadera hábita. Retrieved 13, 2014, from <http://www.confemadera.es/>

Instituto Tecnológico de la Construcción de Cataluña. (2014). Itec. Retrieved 10/12, 2014, from <http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>

Tecnifusta. (2011). Tecnifusta. Soluciones en madera laminada. Retrieved 5/7, 2014, from [http://www.tecnifusta.com/es/vigas\\_madera.html?gclid=CNTnk7H3zbwCFU\\_KtAodIRIAOA](http://www.tecnifusta.com/es/vigas_madera.html?gclid=CNTnk7H3zbwCFU_KtAodIRIAOA)

## Otros

Abrahamsen, R. B. (2014). 2014 international wood symposium. 21st century wood design and construction solutions meeting time, cost and performance expectations. Bergen in a Wood Construction Fever – the First 14 Storey Building, Vancouver, Canada. pp. 19-67.

Domínguez, Fernández, Santiago, Molist, López, & Silja. (2009). Análisis estructural del lake shore. Unpublished manuscript.

Foster, N. (2013, ). Influences. Message posted to <http://www.fosterandpartners.com/es/practice-data/videos/#&vid=78073341>

MGB ARCHITECTURE + DESIGN. (2012). In Equilibrium Consulting, LMDG Ltd and BTY Group(Eds.), the case for tall wood buildings how mass timber offers a safe, economical, and environmentally friendly alternative for tall building structures. (p. 57-78). Canada:

TED Conferences, L. (Producer), & TED:Ideas worth spreading (Director). (2013, Febrero 2013). Michael green: Why we should build wooden skyscrapers. [Video/DVD] Long Beach, California, Estados Unidos: TED.com.

## Referencias de las figuras

### Capítulo 2

Figura 2.1 Serpentine Gallery, por Álvaro Siza y Eduardo Souto de Moura, 2005. [http://www.artofthestate.co.uk/photos/serpentine\\_gallery\\_pavilion\\_2005\\_interior.jpg](http://www.artofthestate.co.uk/photos/serpentine_gallery_pavilion_2005_interior.jpg). Uso de dominio público.

Figura 2.2 Patente Otto Hetzer. <http://woodsrl.com.ar/wp-content/uploads/2012/04/IMG1.jpg>. Uso de dominio público.

Figura 2.3 Haesley Nine Bridges Golf Club house, Yeosu, South Korea, 2009.

Figura 2.4 Diferente modelos de uniones. (Pérez, N. 2010).

Figura 2.5 Catalogo de vigas de Tecnifusta (Tecnifusta, 2011)

Figura 2.6 Pilares de Metla House (2008) ubicada en Joensuu, Finlandia. Arquitecto Antti-Matti Siikala.

Figura 2.7 Timber Warehouse and Showroom, Hergatz, Austria. 1995

Figura 2.8 Bodegas Protos (2010) ubicada en Peñafiel, España. Arquitecto: Richard Rogers

Figura 2.9 Pasadores autotaladrantes. (Argüelles - Álvarez, 2010)

Fig. 2.10 Conectores madera/hormigón. (Argüelles - Álvarez, 2010)

### Capítulo 3

Figura 3.1. Sistemas de estructuras.

Figura 3.2. Sistemas principales de transmisión de cargas en estructuras verticales. (Engel, 1970, p. 236)

Figura 3.3 Sistemas compuestos de transmisión de cargas en estructuras verticales. (Engel, 1970, p. 237)

Figura 3.4. Disposición de los elementos de refuerzos estructurales. (Eisele, 2002, p. 83)

Figura 3.5. Influencia de la posición del núcleo en la carga horizontal. (Eisele, 2002, p. 83)

Figura 3.6. Diferentes modalidades de marcos de refuerzos. (Eisele, 2002, p. 84)

Figura 3.7. Diferentes formas de refuerzo diagonal. (Eisele, 2002, p. 84)

Figura 3.8. Interacción de las paredes y los marcos de cortante. (Eisele, 2002, p. 85)

Figura 3.9. Acoplamiento de la viga rígida de dos muros de corte. (Eisele, 2002, p. 85)

Figura 3.10. Distribución de la tensión normal en viga cajón. (Eisele, 2002, p. 87)

Figura 3.11. Acción de la estructura de los estabilizadores. (Eisele, 2002, p. 89)

Figura 3.12. Sistemas de forjados y vigas trabajando en una dirección. Creación propia

Figura 3.13. Sistemas de forjado y vigas trabajando en dos direcciones. Creación propia

### Capítulo 4

Figura 4.1. Sistema de paneles de madera laminada del Stadthaus. (Pérez, N. 2010).

Figura 4.2 Sistema LVL. (Sistema de madera post-tensada). (Pérez, N. 2010).

Figura 4.3 Sistema FFT. (MGB ARCHITECTURE + DESIGN. 2012, p. 57-78)

Figura 4.4 Planta y sección del esquema estructural opción 1. (MGB ARCHITECTURE + DESIGN. 2012, p. 57-78)

Figura 4.5 Planta y sección del esquema estructural opción 2. (MGB ARCHITECTURE + DESIGN. 2012, p. 57-78)

Figura 4.6 Planta y sección del esquema estructural opción 3. (MGB ARCHITECTURE + DESIGN. 2012, p. 57-78)

Figura 4.7 Planta y sección del esquema estructural opción 4. (MGB ARCHITECTURE + DESIGN. 2012, p. 57-78)

Figura 4.8 OPCIÓN 2 - Ilustrado (MGB ARCHITECTURE + DESIGN. 2012, p. 57-78)

Figura 4.9 Perspectiva proyecto "Árbol". Bergen, Noruega. (Abrahamsen, R. B. 2014)

Figura 4.10 Conexión oculta. (Abrahamsen, R. B. 2014)

Figura 4.11 Esquema estructural. (Abrahamsen, R. B. 2014)

Figura 4.12 Perspectiva del HBS 2023. (C.F. Møller, 2014)

Figura 4.13 Perspectivas del "Big Wood 2013". (Aiello, 2013)

Figura 4.14 Modelo estructural y sección del "Big Wood 2013". (Aiello, 2013)

## Capítulo 5

Figura 5.1 Vista de las torres en 1950. Archimaps. <http://www.regardinghomes.com/wp-content/uploads/archimapsmies-van-der-rohes-lake-shore-drive-apartments-in-1950-20140702091743-53b3ce3783a57-800x1078.jpg>. Uso de dominio público.

Figura 5.2. Vista del diseño de fachada. [http://www.archdata.org/img/bldg/5978\\_lake-shore-apartments\\_built\\_exterior\\_miller-taylor.jpg](http://www.archdata.org/img/bldg/5978_lake-shore-apartments_built_exterior_miller-taylor.jpg). Uso de dominio público.

Figura 5.3. Planta arquitectónica tipo. [http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Apartamentos\\_Lake\\_Shore\\_Drive\\_860-880](http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Apartamentos_Lake_Shore_Drive_860-880). Uso de dominio público.

Figura 5.4. Planta Baja cuadriculada señalizando los voladizos. <http://ad009cdnb.archdaily.net/wp-content/uploads/2010/03/1269874187-860-880-siteplan.jpg>. Uso de dominio público.

Figura 5.5. Vista de uno de los voladizos. [http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Archivo:13051\\_image\\_3.jpg](http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Archivo:13051_image_3.jpg). Uso de dominio público.

Figura 5.6. Alzado Norte. Extraída de los planos proporcionados por (Domínguez, Fernández, Santiago, Molist, López, & Silja, 2009)

Figura 5.7. Vista de la estructura de las torres en el proceso de construcción. <http://chuckman-chicagonostalgia.files.wordpress.com/2010/11/photo-chicago-lakeshore-apartments-under-construction-860-lake-shore-drive-mies-van-der-rohe-c1950.jpg>. Uso de dominio público.

Figura 5.8. Vista de la estructura de acero, con recubrimiento de hormigón y revestimiento nueva vez de acero. [http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Archivo:Lake\\_Shore\\_Drive\\_2.jpg](http://es.wikiarquitectura.com/index.php/Archivo:Lake_Shore_Drive_2.jpg). Uso de dominio público.

Figura 5.9 Tabla que resume los elementos que compone el sistema estructural. (Domínguez, Fernández, Santiago, Molist, López, & Silja, 2009)

Figura 5.10. Planta estructural tipo realizada. Creación propia.

Figura 5.11. Planta estructural del conjunto. Creación propia.

Figura 5.13. Transferencia de cargas verticales. Creación propia.

Figura 5.14. Transferencia de cargas horizontales. Creación propia.

## Capítulo 6

Figura 6.1 Esquema de cálculo y comprobación estructural. (López & García, 2013, p. 17)

Figura 6.2 Modelo estructural sistema en acero y hormigón armado. Creación propia.

Figura 6.3 Modelo estructural sistema en madera laminada. Creación propia.

Figura 6.4 Modelo tridimensional de las estructuras de Acero, Hormigón Armado y Madera Laminada. Creación propia.

Figura 6.5 Resumen de elementos estructurales en la modelización del Lake Shore Apartments. Creación propia.

**Las siguientes imágenes fueron extraídas del cálculo que se realizó en el programa informático Architrave, salvo las que especifique lo contrario.**

Figura 6.6 Combinación ELU Situación Persistente 1.

Figura 6.7 Combinación ELS Situación Característica 1.

Figura 6.8 Combinación ELU Situación Persistente 2.

Figura 6.9 Combinación ELU Situación Persistente 5.

Figura 6.10 Diagramas de esfuerzo axial, estructura de acero.

Figura 6.11 Diagrama de axil libre, Pórtico C, estructura de acero.

Figura 6.12 Diagramas de esfuerzo axial, estructura de hormigón armado.

Figura 6.13 Diagrama de axil libre, pórtico C estructura de hormigón armado

Figura 6.14 Diagramas de esfuerzo axial, estructura de madera laminada.

Figura 6.15 Diagramas de axil libre, estructura de madera laminada.

Figura 6.16 Diagramas de esfuerzo cortante, estructura de acero.

Figura 6.17 Diagrama de cortante libre, Pórtico C, estructura de acero.

Figura 6.18 Diagramas de esfuerzo cortante, estructura de hormigón armado.

Figura 6.19 Diagrama de cortantes libres, pórtico C, estructura de hormigón armado.

Figura 6.20 Diagrama de esfuerzo cortante, estructura de madera laminada.

Figura 6.21 Diagrama de cortantes libres estructura de madera laminada.

Figura 6.22 Diagrama de momento flector, estructura de acero.



Figura 6.23 Diagramas de momentos flectores libres, estructura de acero.

Figura 6.24 Diagrama de esfuerzo cortante, estructura de madera laminada.

Figura 6.26 Diagrama de esfuerzo cortante, estructura de madera laminada.

Figura 6.28 Diagramas de deformación estructura de acero.

Figura 6.29 Comprobación de flecha pórtico C.

Figura 6.30 Comprobación de flecha pórtico 4.

Figura 6.31 Diagrama de deformación por hipótesis de viento. ANGLE.

Figura 6.32 Diagrama de deformación por hipótesis de sismo. ANGLE.

Figura 6.33 Diagramas de deformación estructura de hormigón armado.

Figura 6.34 Comprobación de flecha viga 26, pórtico C, estructura de hormigón armado.

Figura 6.35 Comprobación de flecha, viga 26 pórtico 4, estructura de hormigón armado.

Figura 6.36 Diagrama de deformación por hipótesis de viento. ANGLE.

Figura 6.37 Diagrama de deformación por hipótesis de sismo. ANGLE.

Figura 6.38 Diagramas de deformación estructura de madera laminada.

Figura 6.39 Diagrama de deformación por hipótesis de viento. ANGLE.

Figura 6.40 Diagrama de deformación por hipótesis de sismo. ANGLE.

Figura 6.41. Tensiones de membrana  $S_x$  en forjado de cubierta estructura de acero.

Figura 6.42. Tensiones de membrana  $S_y$  en forjado de cubierta estructura de acero.

Figura 6.43. Flexión de la placa  $M_x$  en forjado de cubierta de la estructura de acero.

Figura 6.44. Flexión de la placa  $M_y$  en la cubierta de la estructura de acero.

Figura 6.45. Flexión de la placa  $V_y$  en la cubierta de la estructura de acero.

Figura 6.46 Resumen de los resultados de las solicitaciones en el forjado de cubierta de la estructura de acero. Creación propia.

Figura 6.47 Tensiones de membrana  $S_x$  en forjado de cubierta estructura de hormigón armado.

Figura 6.48 Tensiones de membrana  $S_y$  en forjado de cubierta estructura de hormigón armado.

Figura 6.49 Flexión de placa  $M_x$  en la cubierta de la estructura de hormigón armado.

Figura 6.50 Flexión de placa  $M_y$  en la cubierta de la estructura de hormigón armado.

Figura 6.51 Flexión de la placa  $V_y$  en la cubierta de la estructura de hormigón armado.

Figura 6.52 Resumen de los resultados de las solicitaciones en el forjado de cubierta de la estructura de hormigón armado. Creación propia.

Figura 6.53 Tensiones de membrana  $S_x$  en forjado de cubierta estructura de madera laminada.

Figura 6.54 Tensiones membrana  $S_y$  en forjado de cubierta estructura de madera laminada.

Roxanna Lake Guerrero

Figura 6.55. Flexión de placa  $M_x$  en la cubierta de la estructura de madera laminada.

Figura 6.56. Flexión de placa  $M_y$  en la cubierta de la estructura de madera laminada.

Figura 6.57 Flexión de la placa  $V_y$  en la cubierta de la estructura de madera laminada.

Figura 6.58 Resumen de los resultados de las solicitaciones en el forjado de cubierta de la estructura de madera laminada. Creación propia.

## Capítulo 7

Figura 7.1 Tabla resumen de los resultados obtenidos en el análisis de los tres sistemas estructurales. Creación propia.

**Las siguientes imágenes fueron extraídas del cálculo que se realizó en el programa informático Architrave, salvo las que especifique lo contrario.**

Figura 7.2 Peritación Pilar HEM320 pórtico C. Nivel 8.

Figura 7.3 Peritación Pilar HEM600 pórtico C. Nivel 1.

Figura 7.4 Peritación Pilar HEM600 pórtico C. Nivel 1. ANGLE

Figura 7.5 Peritación Pilar HEM600 pórtico 4. Nivel 1. ANGLE

Figura 7.6 Peritación Viga HEM320 pórtico C. Nivel 20, tramo 2.

Figura 7.7 Peritación Viga IPE500 pórtico 4. Nivel 6, tramo 1.

Figura 7.8 Peritación pilar 70 cm x 70 cm pórtico 4. Nivel 15.

Figura 7.9 Peritación pilar 70 cm x 70 cm pórtico C. Nivel 1.

Figura 7.10 Peritación Pilar 0,80 m X 0,80 m pórtico C. Nivel 1. ANGLE

Figura 7.11 Peritación Pilar 0,80 m X 0,80 m pórtico 4. Nivel 1. ANGLE

Figura 7.12 Peritación viga pórtico C. Nivel 2.

Figura 7.13 Peritación viga pórtico 4. Nivel 14

Figura 7.14. Tensiones de la membrana  $S_x$  en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.

Figura 7.15. Tensiones de la membrana  $S_y$  en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.

Figura 7.16. Flexión de la placa  $M_x$  en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.

Figura 7.17. Flexión de la placa  $M_y$  en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.

Figura 7.18. Tabla clase resistente de la madera laminada homogénea, según norma EN 14080.

Figura 7.19. Von Mises de los elementos de soporte de la estructura de madera laminada.

Figura 7.20 Resumen de los resultados de las solicitaciones en los elementos de soporte de la estructura de madera laminada. Creación propia.

## **10. Anexos**

En los siguientes anexos están comprendida toda la información que complementa de lo anteriormente expuesto.



**Anexo 1: Tablas y gráficos complementarios para el cálculos de las acciones.**

E RESISTENTE N/mm <sup>2</sup> dad en kg/m <sup>3</sup>	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h	GL 32h
cción característica	20	22	24	26	28	30	32
acción Paralela característica	16	17,6	19,2	20,8	22,4	24	25,6
acción Perpendicular característica	0,5						
mpresión Paralela característica	20	22	24	26	28	30	32
mpresión Perpendicular característica	2,5						
ortante (cortadura y torsión)	3,5						
ortante (rodadura)	1,2						
medio paralelo	8.400	10.500	11.500	12.100	12.600	13.600	14.200
característica paralelo	7.000	8.800	9.600	10.100	10.500	11.300	11.800
medio perpendicular	300						
característica perpendicular	250						
ulo medio Cortante	650						
ulo característico Cortante	540						
ulo medio Cortante rodadura	65						
ulo característico Cortante rodadura	54						
idad característica	340	370	385	405	425	430	440
idad media	370	410	420	445	460	480	490

Clases resistentes de madera laminada encolada homogénea, según la norma EN 14080.

E RESISTENTE N/mm <sup>2</sup> dad en kg/m <sup>3</sup>	GL 20c	GL 22c	GL 24c	GL 26c	GL 28c	GL 30c	GL 32c
cción característica	20	22	24	26	28	30	32
acción Paralela característica	15	16	17	19	19,5	19,5	19,5
acción Perpendicular característica	0,5						
mpresión Paralela característica	18,5	20	21,5	23,5	24	24,5	24,5
mpresión Perpendicular característica	2,5						
ortante (cortadura y torsión)	3,5						
ortante (rodadura)	1,2						
medio paralelo	10.400	10.400	11.000	12.000	12.500	13.000	13.500
característica paralelo	8.600	8.600	9.100	10.000	10.400	10.800	11.200
medio perpendicular	300						
característica perpendicular	250						
ulo medio Cortante	650						
ulo característico Cortante	542						
ulo medio Cortante rodadura	65						
ulo característico Cortante rodadura	54						
idad característica	355	355	365	385	390	390	400
idad media	390	390	400	420	420	430	440

. Clases resistentes de madera laminada encolada combinada, según la norma EN 14080.

Clase resistente de la madera laminada

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones

Tipo de verificación <sup>(1)</sup>	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria		
		desfavorable	favorable	
Resistencia	Permanente			
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80	
	Empuje del terreno	1,35	0,70	
	Presión del agua	1,20	0,90	
	Variable	1,50	0	
Estabilidad		desestabilizadora	estabilizadora	
	Permanente			
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90	
	Empuje del terreno	1,35	0,80	
	Presión del agua	1,05	0,95	
		Variable	1,50	0

<sup>(1)</sup> Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

Coeficientes parciales de seguridad para las acciones. Extraído del DB\_SE.

Tabla C.1 Peso específico aparente de materiales de construcción

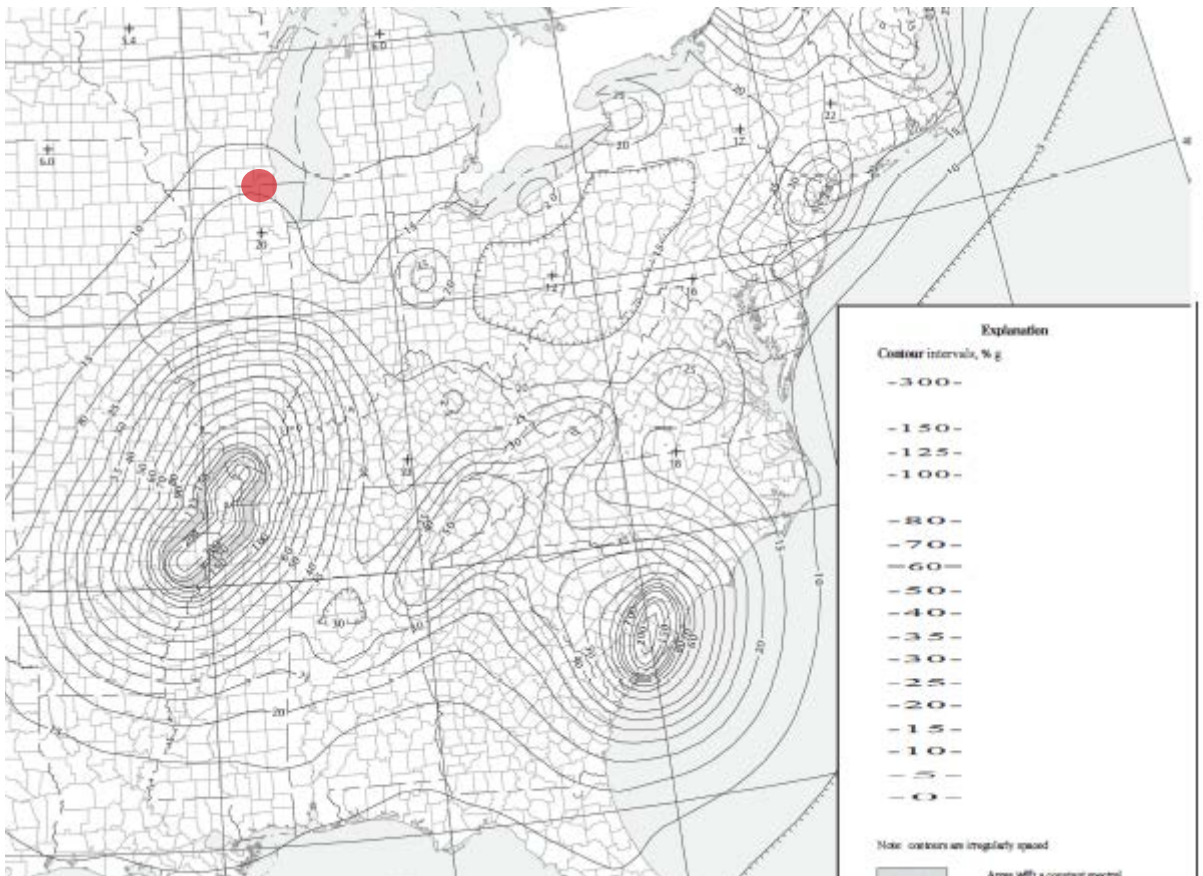
Materiales y elementos	Peso específico aparente kN/m <sup>3</sup>	Materiales y elementos	Peso específico aparente kN/m <sup>3</sup>
<b>Materiales de albañilería</b>		<b>Madera</b>	
Arenisca	21,0 a 27,0	Aserrada, tipos C14 a C40	3,5 a 5,0
Basalto	27,0 a 31,0	Laminada encolada	3,7 a 4,4
Calizas compactas, mármoles	28,0	Tablero contrachapado	5,0
Diorita, gneis	30,0	Tablero cartón gris	8,0
Granito	27,0 a 30,0	Aglomerado con cemento	12,0
Sienita, diorita, pórfido	28,0	Tablero de fibras	8,0 a 10,0
Terracota compacta	21,0 a 27,0	Tablero ligero	4,0
<b>Fábricas</b>		<b>Metales</b>	
Bloque hueco de cemento	13,0 a 16,0	Acero	77,0 a 78,5
Bloque hueco de yeso	10,0	Aluminio	27,0
Ladrillo cerámico macizo	18,0	Bronce	83,0 a 85,0
Ladrillo cerámico perforado	15,0	Cobre	87,0 a 89,0
Ladrillo cerámico hueco	12,0	Estaño	74,0
Ladrillo silicocalcáreo	20,0	Hierro colado	71,0 a 72,5
<b>Mampostería con mortero</b>		Hierro forjado	76,0
de arenisca	24,0	Latón	83,0 a 85,0
de basalto	27,0	Plomo	112,0 a 114,0
de caliza compacta	26,0	Zinc	71,0 a 72,0
de granito	26,0	<b>Plásticos y orgánicos</b>	
<b>Sillería</b>		Caucho en plancha	17,0
de arenisca	26,0	Lámina acrílica	12,0
de arenisca o caliza porosas	24,0	Linóleo en plancha	12,0
de basalto	30,0	Mástico en plancha	21,0
de caliza compacta o mármol	28,0	Poliestireno expandido	0,3
de granito	28,0	<b>Otros</b>	
<b>Hormigones y morteros</b>		Adobe	16,0
Hormigón ligero	9,0 a 20,0	Asfalto	24,0
Hormigón normal <sup>(1)</sup>	24,0	Baldosa cerámica	18,0
Hormigón pesado	> 28,0	Baldosa de gres	19,0
Mortero de cemento	19,0 a 23,0	Papel	11,0
Mortero de yeso	12,0 a 28,0	Pizarra	29,0
Mortero de cemento y cal	18,0 a 20,0	Vidrio	25,0
Mortero de cal	12,0 a 18,0		

<sup>(1)</sup> En hormigón armado con armados usuales o fresco aumenta 1 kN/m<sup>3</sup>

Peso específico aparente de los materiales de construcción extraído del DB\_AE.



Mapa de nieve de los Estados Unidos, señalizando Chicago.



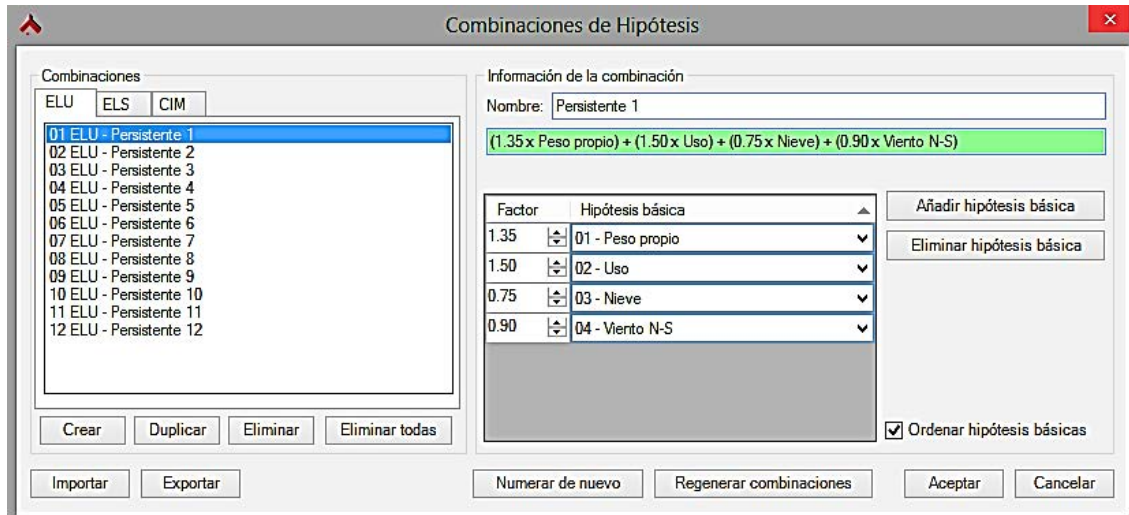
Mapa de respuesta de espectro sísmico de los Estados Unidos, señalizando Chicago.

Tabla C.2 Peso por unidad de superficie de elementos de cobertura

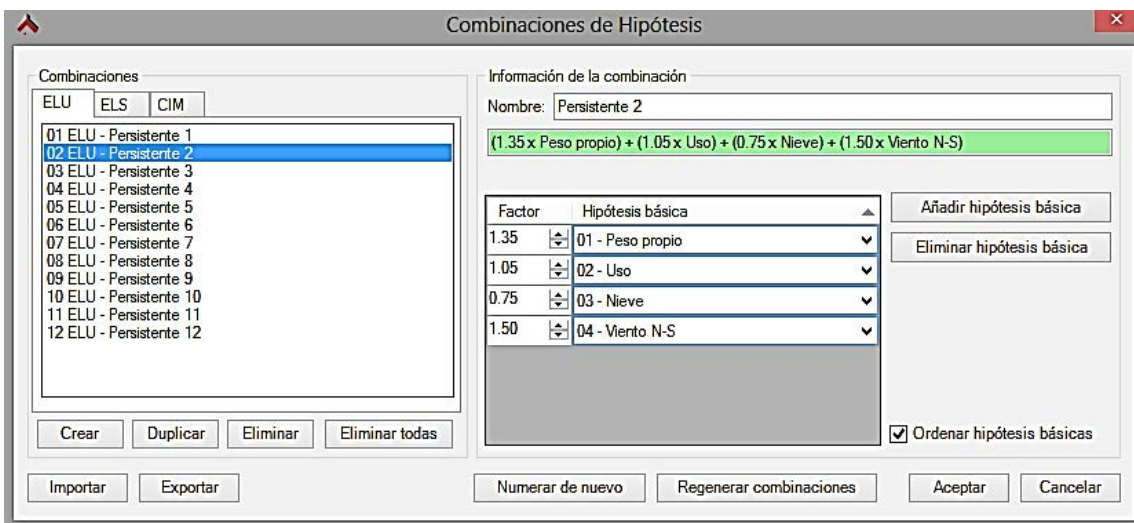
Materiales y elementos	Peso kN/m <sup>2</sup>	Materiales y elementos	Peso kN/m <sup>2</sup>
Aislante (lana de vidrio o roca) por cada 10 mm de espesor	0,02	Tablero de madera, 25 mm espesor	0,15
Chapas grecadas, canto 80 mm, Acero 0,8 mm espesor	0,12	Tablero de rasilla, una hoja una hoja sin revestir	0,40
Aluminio, 0 8 mm espesor	0,04	una hoja más tendido de yeso	0,50
Plomo, 1,5 mm espesor	0,18	Tejas planas (sin enlistonado) ligeras (24 kg/pieza)	0,30
Zinc, 1,2 mm espesor	0,10	corrientes (3,0 kg/pieza)	0,40
Cartón embreado, por capa	0,05	pesadas (3,6 kg/pieza)	0,50
Enlistonado	0,05	Tejas curvas (sin enlistonado) ligeras (1,6 kg/pieza)	0,40
Hoja de plástico armada, 1,2 mm	0,02	corrientes (2,0 kg/pieza)	0,50
Pizarra, sin enlistonado		pesadas (2,4 kg/pieza)	0,60
solape simple	0,20	Vidriera (incluida la carpintería) vidrio normal, 5 mm espesor	0,25
solape doble	0,30	vidrio armado, 6 mm espesor	0,35
Placas de fibrocemento, 6 mm espesor	0,18		

Peso por unidad de superficie de los elementos de cobertura

**Anexo 2: Combinaciones realizadas por el programa Architrave para las limitaciones ELU y ELS**



01 ELU- Persistente 1



02 ELU – Persistente 2



**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELU - Persistente 1  
02 ELU - Persistente 2  
**03 ELU - Persistente 3**  
04 ELU - Persistente 4  
05 ELU - Persistente 5  
06 ELU - Persistente 6  
07 ELU - Persistente 7  
08 ELU - Persistente 8  
09 ELU - Persistente 9  
10 ELU - Persistente 10  
11 ELU - Persistente 11  
12 ELU - Persistente 12

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Persistente 3

$(1.35 \times \text{Peso propio}) + (1.05 \times \text{Uso}) + (1.50 \times \text{Nieve}) + (0.90 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.35	01 - Peso propio
1.05	02 - Uso
1.50	03 - Nieve
0.90	04 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

03 ELU- Persistente 3

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELU - Persistente 1  
02 ELU - Persistente 2  
03 ELU - Persistente 3  
**04 ELU - Persistente 4**  
05 ELU - Persistente 5  
06 ELU - Persistente 6  
07 ELU - Persistente 7  
08 ELU - Persistente 8  
09 ELU - Persistente 9  
10 ELU - Persistente 10  
11 ELU - Persistente 11  
12 ELU - Persistente 12

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Persistente 4

$(1.35 \times \text{Peso propio}) + (1.50 \times \text{Uso}) + (0.75 \times \text{Nieve}) + (0.90 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.35	01 - Peso propio
1.50	02 - Uso
0.75	03 - Nieve
0.90	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

Importar Exportar Numerar de nuevo Regenerar combinaciones Aceptar Cancelar

04 ELU- Persistente 4

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELU - Persistente 1  
02 ELU - Persistente 2  
03 ELU - Persistente 3  
04 ELU - Persistente 4  
**05 ELU - Persistente 5**  
06 ELU - Persistente 6  
07 ELU - Persistente 7  
08 ELU - Persistente 8  
09 ELU - Persistente 9  
10 ELU - Persistente 10  
11 ELU - Persistente 11  
12 ELU - Persistente 12

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Persistente 5

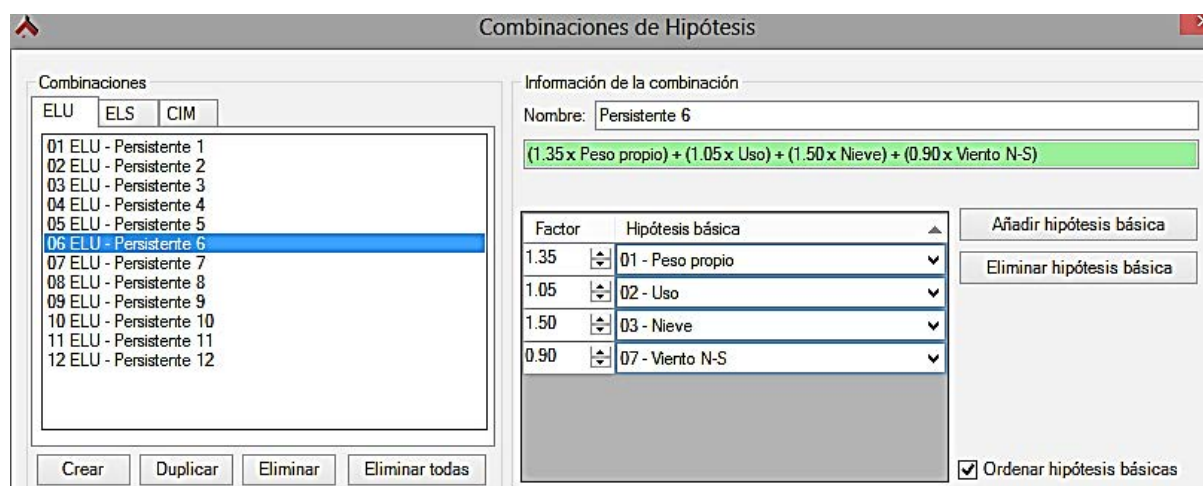
$(1.35 \times \text{Peso propio}) + (1.05 \times \text{Uso}) + (0.75 \times \text{Nieve}) + (1.50 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.35	01 - Peso propio
1.05	02 - Uso
0.75	03 - Nieve
1.50	07 - Viento N-S

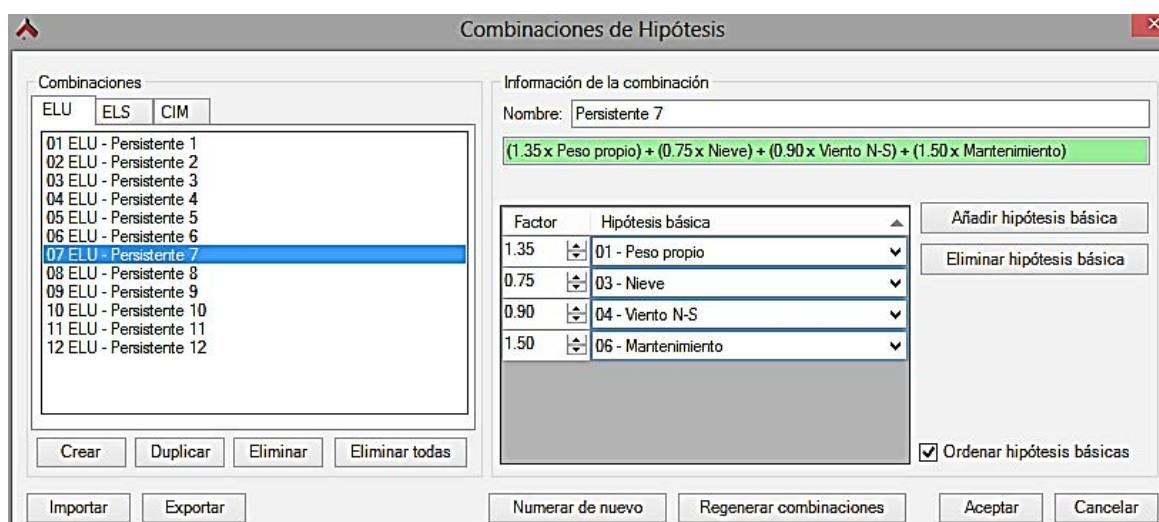
Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

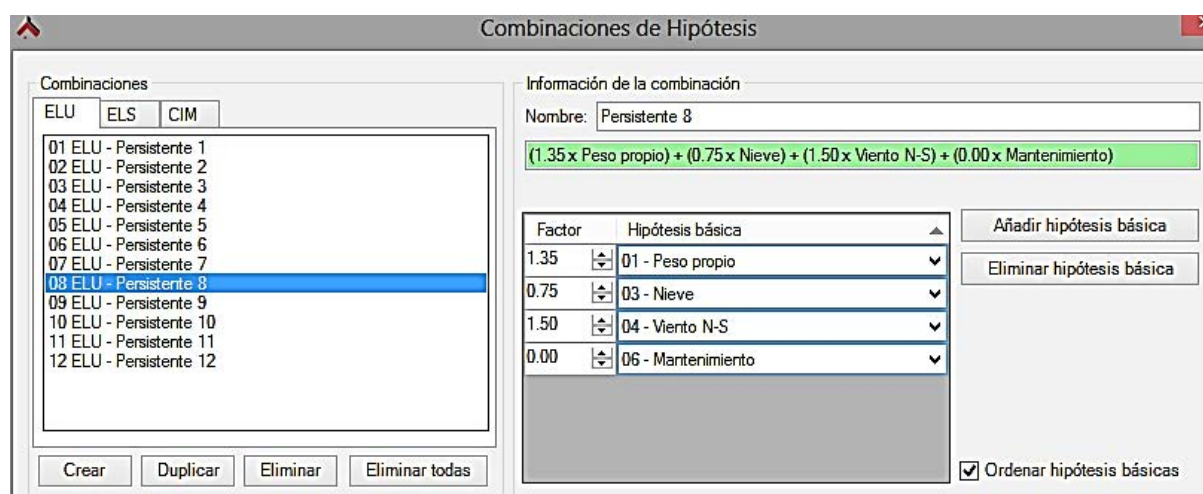
05 ELU- Persistente 5



06 ELU- Persistente 6



07 ELU- Persistente 7



08 ELU- Persistente 8

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU | ELS | CIM

- 01 ELU - Persistente 1
- 02 ELU - Persistente 2
- 03 ELU - Persistente 3
- 04 ELU - Persistente 4
- 05 ELU - Persistente 5
- 06 ELU - Persistente 6
- 07 ELU - Persistente 7
- 08 ELU - Persistente 8
- 09 ELU - Persistente 9**
- 10 ELU - Persistente 10
- 11 ELU - Persistente 11
- 12 ELU - Persistente 12

Crear | Duplicar | Eliminar | Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Persistente 9

$(1.35 \times \text{Peso propio}) + (1.50 \times \text{Nieve}) + (0.90 \times \text{Viento N-S}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento})$

Factor	Hipótesis básica
1.35	01 - Peso propio
1.50	03 - Nieve
0.90	04 - Viento N-S
0.00	06 - Mantenimiento

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

09 ELU- Persistente 9

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU | ELS | CIM

- 01 ELU - Persistente 1
- 02 ELU - Persistente 2
- 03 ELU - Persistente 3
- 04 ELU - Persistente 4
- 05 ELU - Persistente 5
- 06 ELU - Persistente 6
- 07 ELU - Persistente 7
- 08 ELU - Persistente 8
- 09 ELU - Persistente 9
- 10 ELU - Persistente 10**
- 11 ELU - Persistente 11
- 12 ELU - Persistente 12

Crear | Duplicar | Eliminar | Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Persistente 10

$(1.35 \times \text{Peso propio}) + (0.75 \times \text{Nieve}) + (1.50 \times \text{Mantenimiento}) + (0.90 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.35	01 - Peso propio
0.75	03 - Nieve
1.50	06 - Mantenimiento
0.90	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

10 ELU- Persistente 10

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU | ELS | CIM

- 01 ELU - Persistente 1
- 02 ELU - Persistente 2
- 03 ELU - Persistente 3
- 04 ELU - Persistente 4
- 05 ELU - Persistente 5
- 06 ELU - Persistente 6
- 07 ELU - Persistente 7
- 08 ELU - Persistente 8
- 09 ELU - Persistente 9
- 10 ELU - Persistente 10
- 11 ELU - Persistente 11**
- 12 ELU - Persistente 12

Crear | Duplicar | Eliminar | Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Persistente 11

$(1.35 \times \text{Peso propio}) + (0.75 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento}) + (1.50 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.35	01 - Peso propio
0.75	03 - Nieve
0.00	06 - Mantenimiento
1.50	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

11 ELU- Persistente 11

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELU - Persistente 1  
 02 ELU - Persistente 2  
 03 ELU - Persistente 3  
 04 ELU - Persistente 4  
 05 ELU - Persistente 5  
 06 ELU - Persistente 6  
 07 ELU - Persistente 7  
 08 ELU - Persistente 8  
 09 ELU - Persistente 9  
 10 ELU - Persistente 10  
 11 ELU - Persistente 11  
 12 ELU - Persistente 12

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Persistente 12

$(1.35 \times \text{Peso propio}) + (1.50 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento}) + (0.90 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.35	01 - Peso propio
1.50	03 - Nieve
0.00	06 - Mantenimiento
0.90	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

12 ELU- Persistente 12

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
 02 ELS - Característica 2  
 03 ELS - Característica 3  
 04 ELS - Característica 4  
 05 ELS - Característica 5  
 06 ELS - Característica 6  
 07 ELS - Característica 7  
 08 ELS - Característica 8  
 09 ELS - Característica 9  
 10 ELS - Característica 10  
 11 ELS - Característica 11  
 12 ELS - Característica 12  
 13 ELS - Frecuente 1  
 14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 1

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (1.00 \times \text{Uso}) + (0.50 \times \text{Nieve}) + (0.60 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
1.00	02 - Uso
0.50	03 - Nieve
0.60	04 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

01 ELS- Característica 1

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
 02 ELS - Característica 2  
 03 ELS - Característica 3  
 04 ELS - Característica 4  
 05 ELS - Característica 5  
 06 ELS - Característica 6  
 07 ELS - Característica 7  
 08 ELS - Característica 8  
 09 ELS - Característica 9  
 10 ELS - Característica 10  
 11 ELS - Característica 11  
 12 ELS - Característica 12  
 13 ELS - Frecuente 1  
 14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 2

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.70 \times \text{Uso}) + (0.50 \times \text{Nieve}) + (1.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.70	02 - Uso
0.50	03 - Nieve
1.00	04 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

02 ELS- Característica 2

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
 02 ELS - Característica 2  
**03 ELS - Característica 3**  
 04 ELS - Característica 4  
 05 ELS - Característica 5  
 06 ELS - Característica 6  
 07 ELS - Característica 7  
 08 ELS - Característica 8  
 09 ELS - Característica 9  
 10 ELS - Característica 10  
 11 ELS - Característica 11  
 12 ELS - Característica 12  
 13 ELS - Frecuente 1  
 14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 3

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.70 \times \text{Uso}) + (1.00 \times \text{Nieve}) + (0.60 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.70	02 - Uso
1.00	03 - Nieve
0.60	04 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

03 ELS- Característica 3

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
 02 ELS - Característica 2  
 03 ELS - Característica 3  
**04 ELS - Característica 4**  
 05 ELS - Característica 5  
 06 ELS - Característica 6  
 07 ELS - Característica 7  
 08 ELS - Característica 8  
 09 ELS - Característica 9  
 10 ELS - Característica 10  
 11 ELS - Característica 11  
 12 ELS - Característica 12  
 13 ELS - Frecuente 1  
 14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 4

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (1.00 \times \text{Uso}) + (0.50 \times \text{Nieve}) + (0.60 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
1.00	02 - Uso
0.50	03 - Nieve
0.60	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

04 ELS- Característica 4

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
 02 ELS - Característica 2  
 03 ELS - Característica 3  
 04 ELS - Característica 4  
**05 ELS - Característica 5**  
 06 ELS - Característica 6  
 07 ELS - Característica 7  
 08 ELS - Característica 8  
 09 ELS - Característica 9  
 10 ELS - Característica 10  
 11 ELS - Característica 11  
 12 ELS - Característica 12  
 13 ELS - Frecuente 1  
 14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 5

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.70 \times \text{Uso}) + (0.50 \times \text{Nieve}) + (1.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.70	02 - Uso
0.50	03 - Nieve
1.00	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

05 ELS- Característica 5

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
 02 ELS - Característica 2  
 03 ELS - Característica 3  
 04 ELS - Característica 4  
 05 ELS - Característica 5  
**06 ELS - Característica 6**  
 07 ELS - Característica 7  
 08 ELS - Característica 8  
 09 ELS - Característica 9  
 10 ELS - Característica 10  
 11 ELS - Característica 11  
 12 ELS - Característica 12  
 13 ELS - Frecuente 1  
 14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 6

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.70 \times \text{Uso}) + (1.00 \times \text{Nieve}) + (0.60 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.70	02 - Uso
1.00	03 - Nieve
0.60	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

06 ELS- Característica 6

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
 02 ELS - Característica 2  
 03 ELS - Característica 3  
 04 ELS - Característica 4  
 05 ELS - Característica 5  
 06 ELS - Característica 6  
**07 ELS - Característica 7**  
 08 ELS - Característica 8  
 09 ELS - Característica 9  
 10 ELS - Característica 10  
 11 ELS - Característica 11  
 12 ELS - Característica 12  
 13 ELS - Frecuente 1  
 14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 7

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.50 \times \text{Nieve}) + (0.60 \times \text{Viento N-S}) + (1.00 \times \text{Mantenimiento})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.50	03 - Nieve
0.60	04 - Viento N-S
1.00	06 - Mantenimiento

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

07 ELS- Característica 7

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
 02 ELS - Característica 2  
 03 ELS - Característica 3  
 04 ELS - Característica 4  
 05 ELS - Característica 5  
 06 ELS - Característica 6  
 07 ELS - Característica 7  
**08 ELS - Característica 8**  
 09 ELS - Característica 9  
 10 ELS - Característica 10  
 11 ELS - Característica 11  
 12 ELS - Característica 12  
 13 ELS - Frecuente 1  
 14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 8

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.50 \times \text{Nieve}) + (1.00 \times \text{Viento N-S}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.50	03 - Nieve
1.00	04 - Viento N-S
0.00	06 - Mantenimiento

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

08 ELS- Característica 8

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
02 ELS - Característica 2  
03 ELS - Característica 3  
04 ELS - Característica 4  
05 ELS - Característica 5  
06 ELS - Característica 6  
07 ELS - Característica 7  
08 ELS - Característica 8  
**09 ELS - Característica 9**  
10 ELS - Característica 10  
11 ELS - Característica 11  
12 ELS - Característica 12  
13 ELS - Frecuente 1  
14 ELS - Frecuente 2  
15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 9

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (1.00 \times \text{Nieve}) + (0.60 \times \text{Viento N-S}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
1.00	03 - Nieve
0.60	04 - Viento N-S
0.00	06 - Mantenimiento

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

09 ELS- Característica 9

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
02 ELS - Característica 2  
03 ELS - Característica 3  
04 ELS - Característica 4  
05 ELS - Característica 5  
06 ELS - Característica 6  
07 ELS - Característica 7  
08 ELS - Característica 8  
09 ELS - Característica 9  
**10 ELS - Característica 10**  
11 ELS - Característica 11  
12 ELS - Característica 12  
13 ELS - Frecuente 1  
14 ELS - Frecuente 2  
15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 10

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.50 \times \text{Nieve}) + (1.00 \times \text{Mantenimiento}) + (0.60 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.50	03 - Nieve
1.00	06 - Mantenimiento
0.60	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

10 ELS- Característica 10

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

01 ELS - Característica 1  
02 ELS - Característica 2  
03 ELS - Característica 3  
04 ELS - Característica 4  
05 ELS - Característica 5  
06 ELS - Característica 6  
07 ELS - Característica 7  
08 ELS - Característica 8  
09 ELS - Característica 9  
10 ELS - Característica 10  
**11 ELS - Característica 11**  
12 ELS - Característica 12  
13 ELS - Frecuente 1  
14 ELS - Frecuente 2  
15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 11

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.50 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento}) + (1.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.50	03 - Nieve
0.00	06 - Mantenimiento
1.00	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

11 ELS- Característica 11

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 01 ELS - Característica 1
- 02 ELS - Característica 2
- 03 ELS - Característica 3
- 04 ELS - Característica 4
- 05 ELS - Característica 5
- 06 ELS - Característica 6
- 07 ELS - Característica 7
- 08 ELS - Característica 8
- 09 ELS - Característica 9
- 10 ELS - Característica 10
- 11 ELS - Característica 11
- 12 ELS - Característica 12**
- 13 ELS - Frecuente 1
- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Característica 12

**(1.00 x Peso propio) + (1.00 x Nieve) + (0.00 x Mantenimiento) + (0.60 x Viento N-S)**

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
1.00	03 - Nieve
0.00	06 - Mantenimiento
0.60	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

12 ELS- Característica 12

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 01 ELS - Característica 1
- 02 ELS - Característica 2
- 03 ELS - Característica 3
- 04 ELS - Característica 4
- 05 ELS - Característica 5
- 06 ELS - Característica 6
- 07 ELS - Característica 7
- 08 ELS - Característica 8
- 09 ELS - Característica 9
- 10 ELS - Característica 10
- 11 ELS - Característica 11
- 12 ELS - Característica 12
- 13 ELS - Frecuente 1**
- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Frecuente 1

**(1.00 x Peso propio) + (0.50 x Uso) + (0.00 x Nieve) + (0.00 x Viento N-S)**

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.50	02 - Uso
0.00	03 - Nieve
0.00	04 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

13 ELS- Frecuente 1

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 01 ELS - Característica 1
- 02 ELS - Característica 2
- 03 ELS - Característica 3
- 04 ELS - Característica 4
- 05 ELS - Característica 5
- 06 ELS - Característica 6
- 07 ELS - Característica 7
- 08 ELS - Característica 8
- 09 ELS - Característica 9
- 10 ELS - Característica 10
- 11 ELS - Característica 11
- 12 ELS - Característica 12
- 13 ELS - Frecuente 1
- 14 ELS - Frecuente 2**
- 15 ELS - Frecuente 3

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Frecuente 2

**(1.00 x Peso propio) + (0.30 x Uso) + (0.00 x Nieve) + (0.50 x Viento N-S)**

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.30	02 - Uso
0.00	03 - Nieve
0.50	04 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

14 ELS- Frecuente 2



**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones: ELU | ELS | CIM

14 ELS - Frecuente 2  
**15 ELS - Frecuente 3**  
 16 ELS - Frecuente 4  
 17 ELS - Frecuente 5  
 18 ELS - Frecuente 6  
 19 ELS - Frecuente 7  
 20 ELS - Frecuente 8  
 21 ELS - Frecuente 9  
 22 ELS - Frecuente 10  
 23 ELS - Frecuente 11  
 24 ELS - Frecuente 12  
 25 ELS - Casi Permanente 1  
 26 ELS - Casi Permanente 2  
 27 ELS - Casi Permanente 3  
 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación  
 Nombre: Frecuente 3  
 $(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.30 \times \text{Uso}) + (0.20 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.30	02 - Uso
0.20	03 - Nieve
0.00	04 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

15 ELS- Frecuente 3

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones: ELU | ELS | CIM

14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3  
**16 ELS - Frecuente 4**  
 17 ELS - Frecuente 5  
 18 ELS - Frecuente 6  
 19 ELS - Frecuente 7  
 20 ELS - Frecuente 8  
 21 ELS - Frecuente 9  
 22 ELS - Frecuente 10  
 23 ELS - Frecuente 11  
 24 ELS - Frecuente 12  
 25 ELS - Casi Permanente 1  
 26 ELS - Casi Permanente 2  
 27 ELS - Casi Permanente 3  
 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación  
 Nombre: Frecuente 4  
 $(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.50 \times \text{Uso}) + (0.00 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.50	02 - Uso
0.00	03 - Nieve
0.00	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

16 ELS- Frecuente 4

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones: ELU | ELS | CIM

14 ELS - Frecuente 2  
 15 ELS - Frecuente 3  
 16 ELS - Frecuente 4  
**17 ELS - Frecuente 5**  
 18 ELS - Frecuente 6  
 19 ELS - Frecuente 7  
 20 ELS - Frecuente 8  
 21 ELS - Frecuente 9  
 22 ELS - Frecuente 10  
 23 ELS - Frecuente 11  
 24 ELS - Frecuente 12  
 25 ELS - Casi Permanente 1  
 26 ELS - Casi Permanente 2  
 27 ELS - Casi Permanente 3  
 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación  
 Nombre: Frecuente 5  
 $(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.30 \times \text{Uso}) + (0.00 \times \text{Nieve}) + (0.50 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.30	02 - Uso
0.00	03 - Nieve
0.50	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
 Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

17 ELS- Frecuente 5

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3
- 16 ELS - Frecuente 4
- 17 ELS - Frecuente 5
- 18 ELS - Frecuente 6**
- 19 ELS - Frecuente 7
- 20 ELS - Frecuente 8
- 21 ELS - Frecuente 9
- 22 ELS - Frecuente 10
- 23 ELS - Frecuente 11
- 24 ELS - Frecuente 12
- 25 ELS - Casi Permanente 1
- 26 ELS - Casi Permanente 2
- 27 ELS - Casi Permanente 3
- 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Frecuente 6

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.30 \times \text{Uso}) + (0.20 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.30	02 - Uso
0.20	03 - Nieve
0.00	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

18 ELS- Frecuente 6

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3
- 16 ELS - Frecuente 4
- 17 ELS - Frecuente 5
- 18 ELS - Frecuente 6
- 19 ELS - Frecuente 7**
- 20 ELS - Frecuente 8
- 21 ELS - Frecuente 9
- 22 ELS - Frecuente 10
- 23 ELS - Frecuente 11
- 24 ELS - Frecuente 12
- 25 ELS - Casi Permanente 1
- 26 ELS - Casi Permanente 2
- 27 ELS - Casi Permanente 3
- 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Frecuente 7

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.00 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Viento N-S}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.00	03 - Nieve
0.00	04 - Viento N-S
0.00	06 - Mantenimiento

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

19 ELS- Frecuente 7

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3
- 16 ELS - Frecuente 4
- 17 ELS - Frecuente 5
- 18 ELS - Frecuente 6
- 19 ELS - Frecuente 7
- 20 ELS - Frecuente 8**
- 21 ELS - Frecuente 9
- 22 ELS - Frecuente 10
- 23 ELS - Frecuente 11
- 24 ELS - Frecuente 12
- 25 ELS - Casi Permanente 1
- 26 ELS - Casi Permanente 2
- 27 ELS - Casi Permanente 3
- 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Frecuente 8

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.00 \times \text{Nieve}) + (0.50 \times \text{Viento N-S}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.00	03 - Nieve
0.50	04 - Viento N-S
0.00	06 - Mantenimiento

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

20 ELS- Frecuente 8

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3
- 16 ELS - Frecuente 4
- 17 ELS - Frecuente 5
- 18 ELS - Frecuente 6
- 19 ELS - Frecuente 7
- 20 ELS - Frecuente 8
- 21 ELS - Frecuente 9**
- 22 ELS - Frecuente 10
- 23 ELS - Frecuente 11
- 24 ELS - Frecuente 12
- 25 ELS - Casi Permanente 1
- 26 ELS - Casi Permanente 2
- 27 ELS - Casi Permanente 3
- 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Frecuente 9

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.20 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Viento N-S}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.20	03 - Nieve
0.00	04 - Viento N-S
0.00	06 - Mantenimiento

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

21 ELS- Frecuente 9

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3
- 16 ELS - Frecuente 4
- 17 ELS - Frecuente 5
- 18 ELS - Frecuente 6
- 19 ELS - Frecuente 7
- 20 ELS - Frecuente 8
- 21 ELS - Frecuente 9
- 22 ELS - Frecuente 10**
- 23 ELS - Frecuente 11
- 24 ELS - Frecuente 12
- 25 ELS - Casi Permanente 1
- 26 ELS - Casi Permanente 2
- 27 ELS - Casi Permanente 3
- 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Frecuente 10

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.00 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento}) + (0.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.00	03 - Nieve
0.00	06 - Mantenimiento
0.00	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

22 ELS- Frecuente 10

**Combinaciones de Hipótesis**

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3
- 16 ELS - Frecuente 4
- 17 ELS - Frecuente 5
- 18 ELS - Frecuente 6
- 19 ELS - Frecuente 7
- 20 ELS - Frecuente 8
- 21 ELS - Frecuente 9
- 22 ELS - Frecuente 10
- 23 ELS - Frecuente 11**
- 24 ELS - Frecuente 12
- 25 ELS - Casi Permanente 1
- 26 ELS - Casi Permanente 2
- 27 ELS - Casi Permanente 3
- 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Frecuente 11

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.00 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento}) + (0.50 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.00	03 - Nieve
0.00	06 - Mantenimiento
0.50	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

23 ELS- Frecuente 11

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3
- 16 ELS - Frecuente 4
- 17 ELS - Frecuente 5
- 18 ELS - Frecuente 6
- 19 ELS - Frecuente 7
- 20 ELS - Frecuente 8
- 21 ELS - Frecuente 9
- 22 ELS - Frecuente 10
- 23 ELS - Frecuente 11
- 24 ELS - Frecuente 12**
- 25 ELS - Casi Permanente 1
- 26 ELS - Casi Permanente 2
- 27 ELS - Casi Permanente 3
- 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Frecuente 12

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.20 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Mantenimiento}) + (0.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.20	03 - Nieve
0.00	06 - Mantenimiento
0.00	07 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

24 ELS- Frecuente 12

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3
- 16 ELS - Frecuente 4
- 17 ELS - Frecuente 5
- 18 ELS - Frecuente 6
- 19 ELS - Frecuente 7
- 20 ELS - Frecuente 8
- 21 ELS - Frecuente 9
- 22 ELS - Frecuente 10
- 23 ELS - Frecuente 11
- 24 ELS - Frecuente 12
- 25 ELS - Casi Permanente 1**
- 26 ELS - Casi Permanente 2
- 27 ELS - Casi Permanente 3
- 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Casi Permanente 1

$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.30 \times \text{Uso}) + (0.00 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.30	02 - Uso
0.00	03 - Nieve
0.00	04 - Viento N-S

Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

25 ELS- casi permanente 1

Combinaciones de Hipótesis

Combinaciones

ELU ELS CIM

- 14 ELS - Frecuente 2
- 15 ELS - Frecuente 3
- 16 ELS - Frecuente 4
- 17 ELS - Frecuente 5
- 18 ELS - Frecuente 6
- 19 ELS - Frecuente 7
- 20 ELS - Frecuente 8
- 21 ELS - Frecuente 9
- 22 ELS - Frecuente 10
- 23 ELS - Frecuente 11
- 24 ELS - Frecuente 12
- 25 ELS - Casi Permanente 1
- 26 ELS - Casi Permanente 2**
- 27 ELS - Casi Permanente 3
- 28 ELS - Casi Permanente 4

Crear Duplicar Eliminar Eliminar todas

Información de la combinación

Nombre: Casi Permanente 2

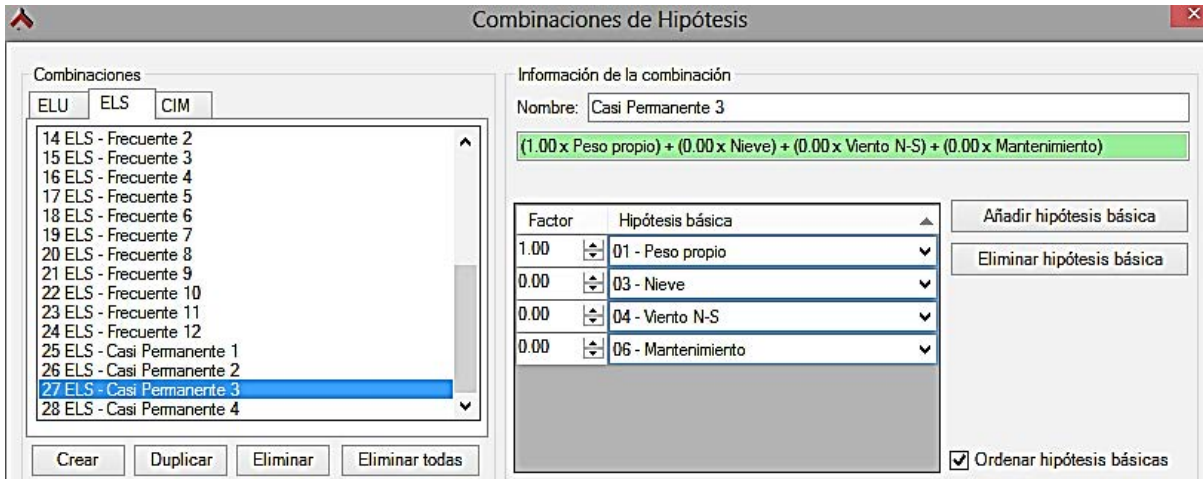
$(1.00 \times \text{Peso propio}) + (0.30 \times \text{Uso}) + (0.00 \times \text{Nieve}) + (0.00 \times \text{Viento N-S})$

Factor	Hipótesis básica
1.00	01 - Peso propio
0.30	02 - Uso
0.00	03 - Nieve
0.00	07 - Viento N-S

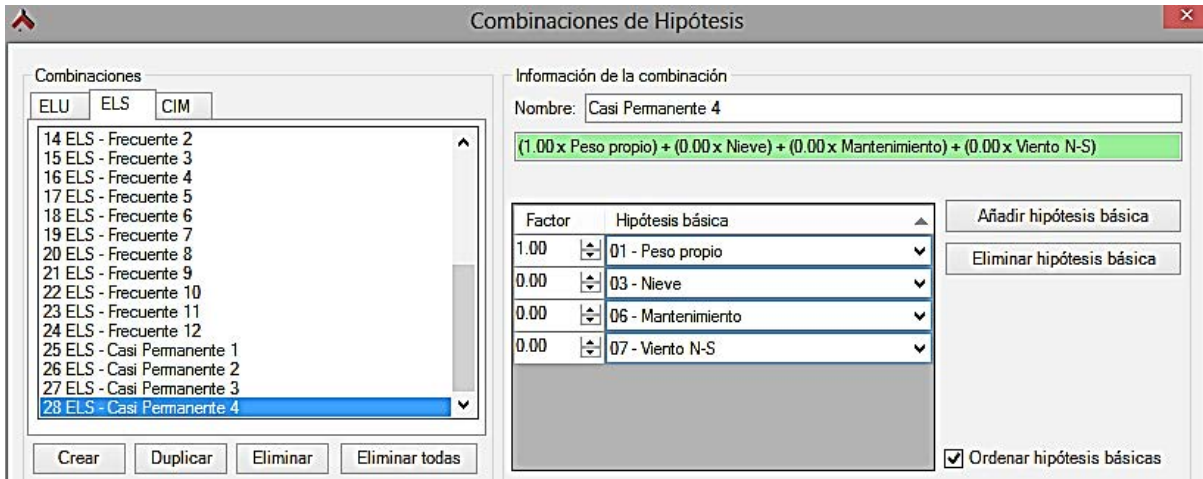
Añadir hipótesis básica  
Eliminar hipótesis básica

Ordenar hipótesis básicas

26 ELS- casi permanente 2



27 ELS- casi permanente 3

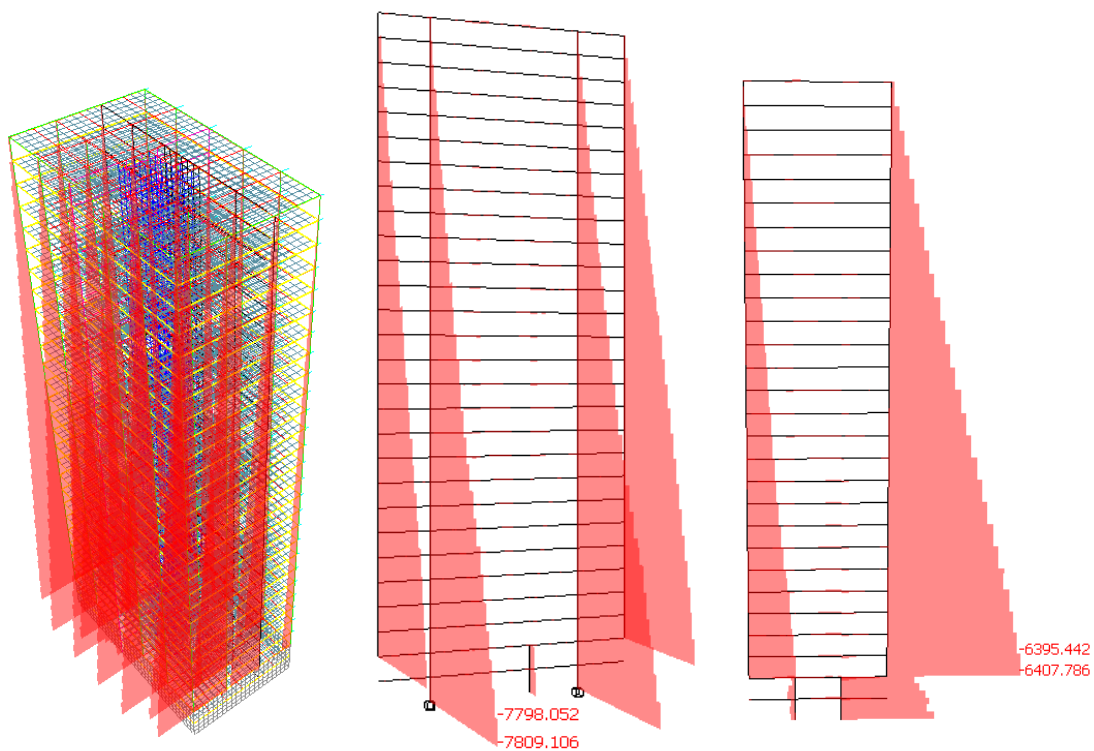


28 ELS- casi permanente 4

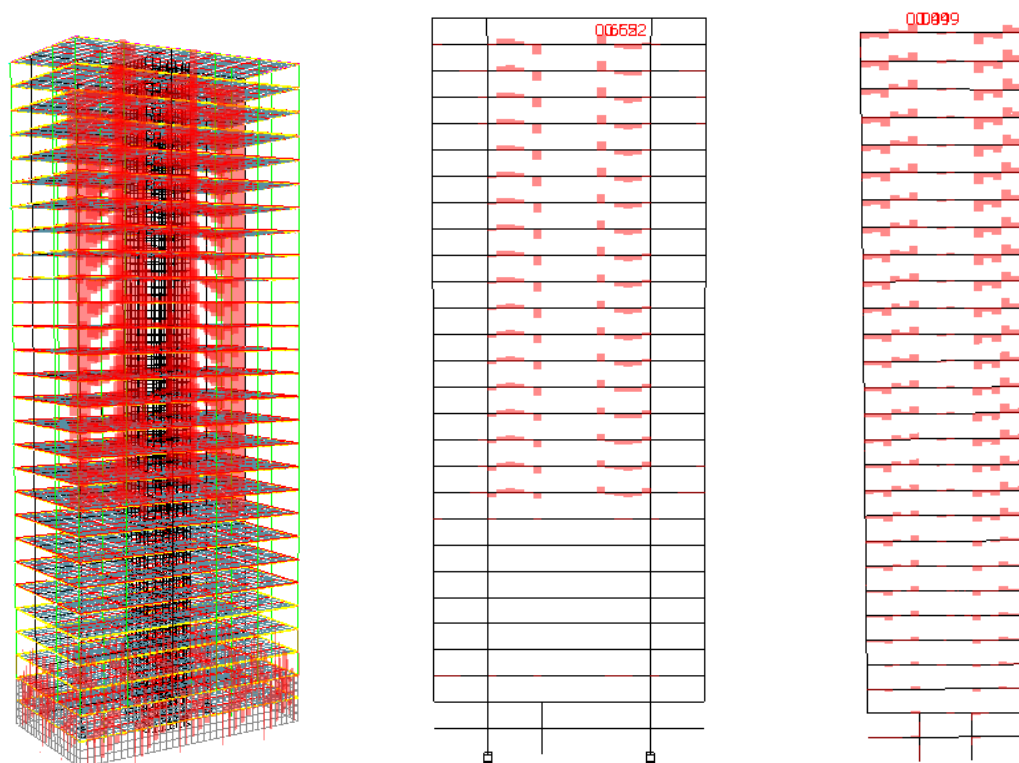
Anexo 3: Compendio de solicitaciones agrupadas por sistemas estructural en su situación

mas desfavorable.

Estructura de acero



Esfuerzo Axil en ELU persistente 1.

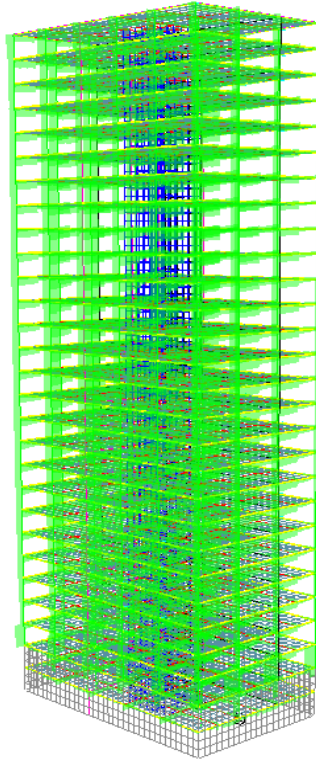


Momento torsor

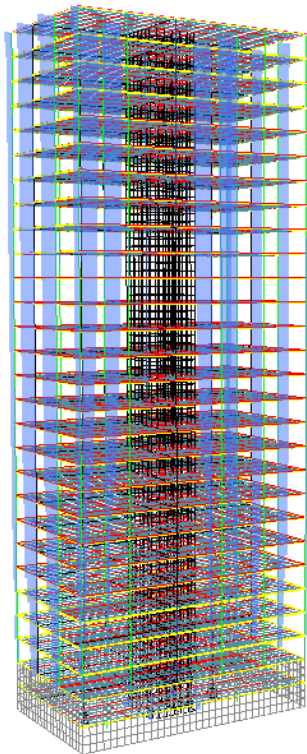
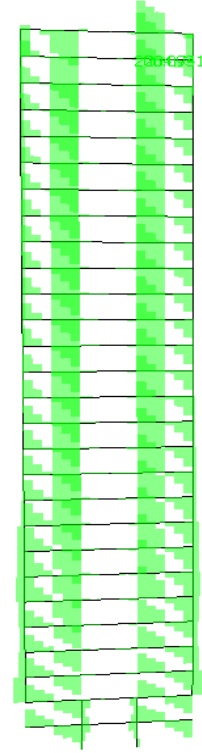
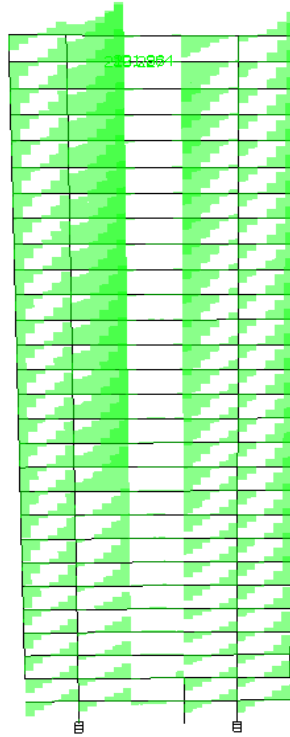
Isométrica

Pórtico C

Pórtico 4

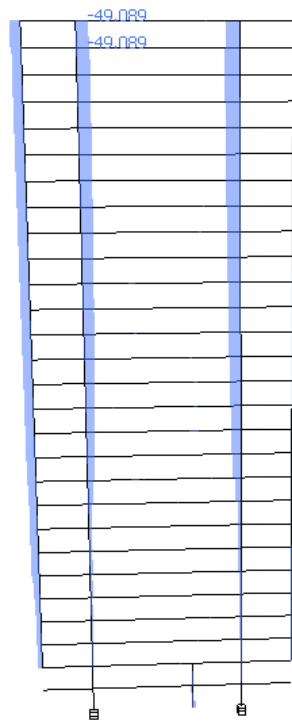


Esfuerzo cortante en Y

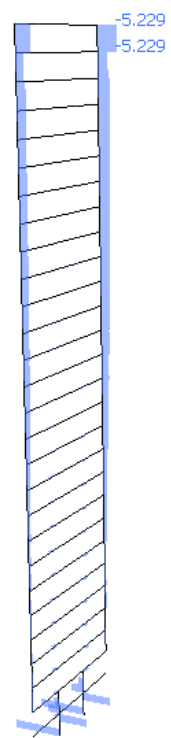


Esfuerzo cortante en Z

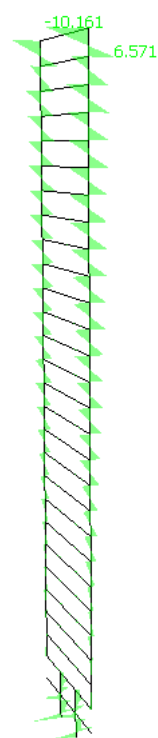
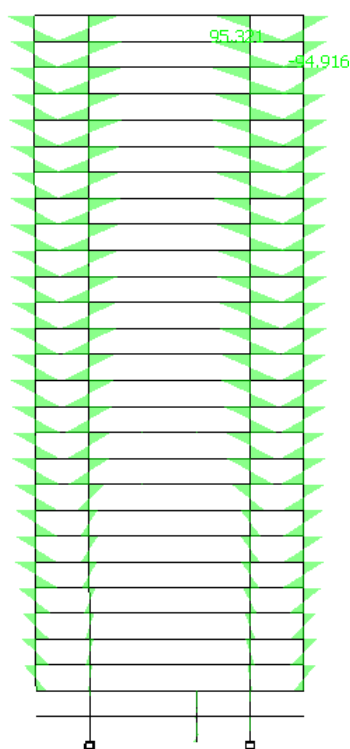
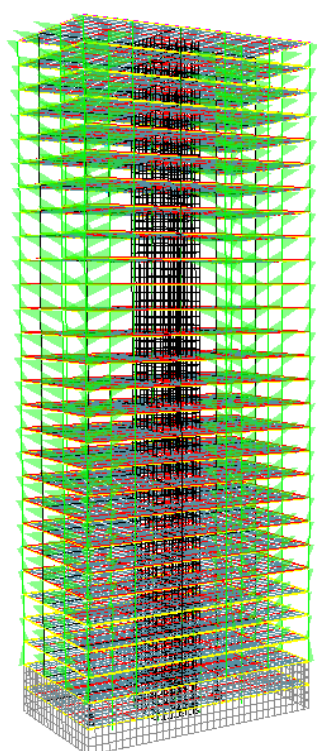
Isométrica



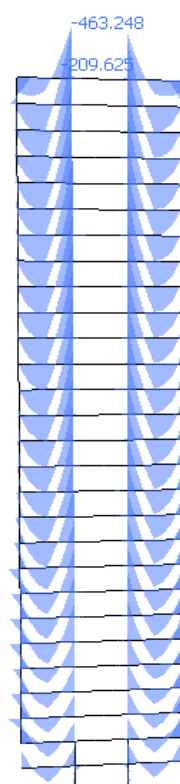
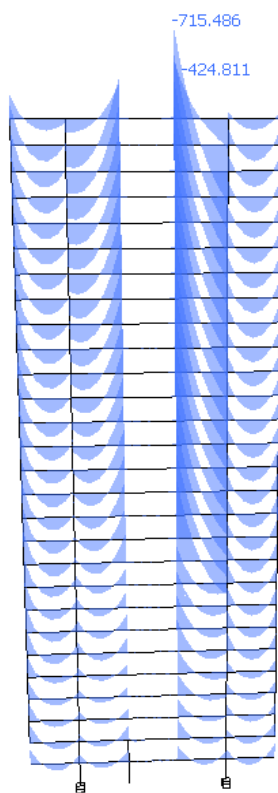
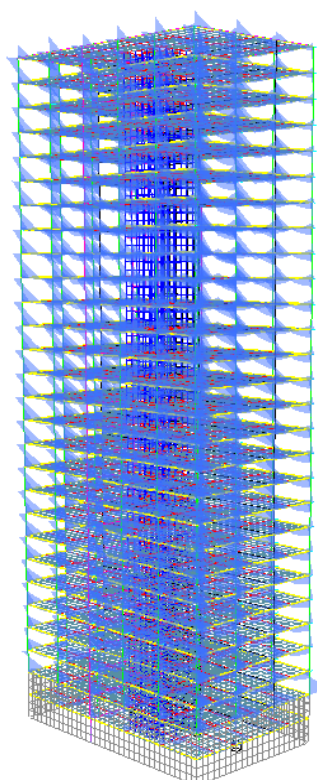
Pórtico C



Pórtico 4



Momento flector en Y



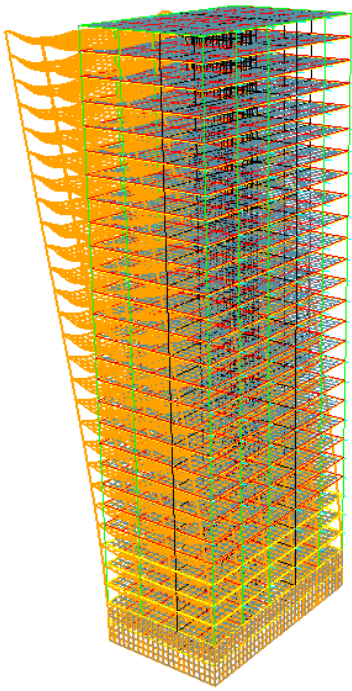
Momento flector en Z

Isométrica

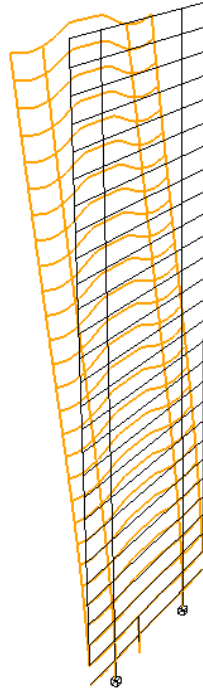
Pórtico C

Pórtico 4

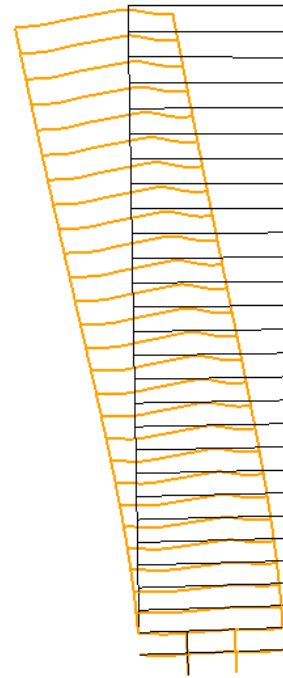




Deformación en Els 20  
Isométrica



Pórtico C



Pórtico 4

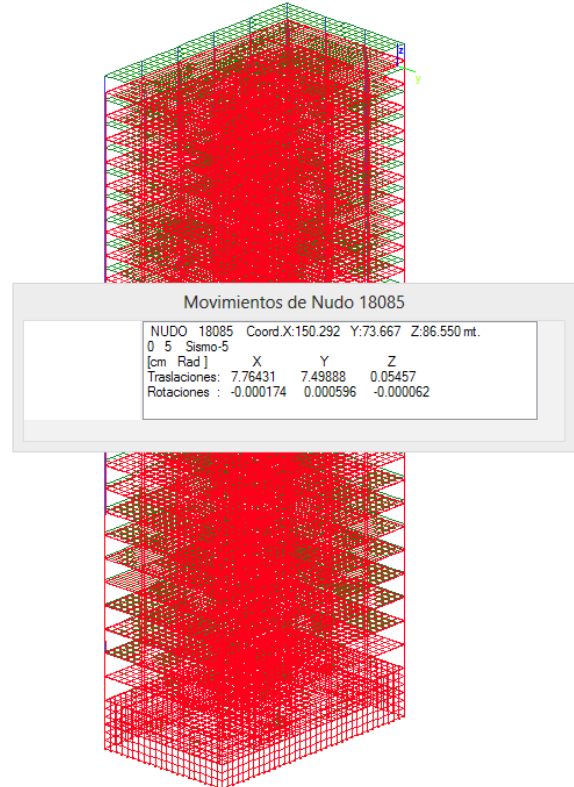
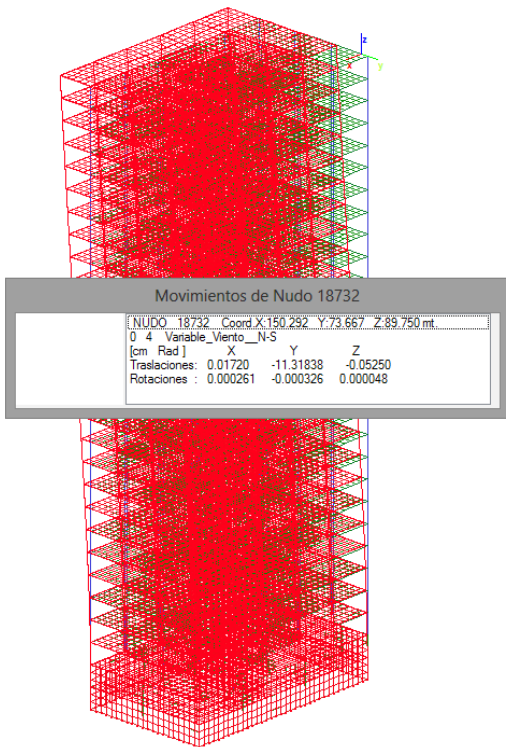
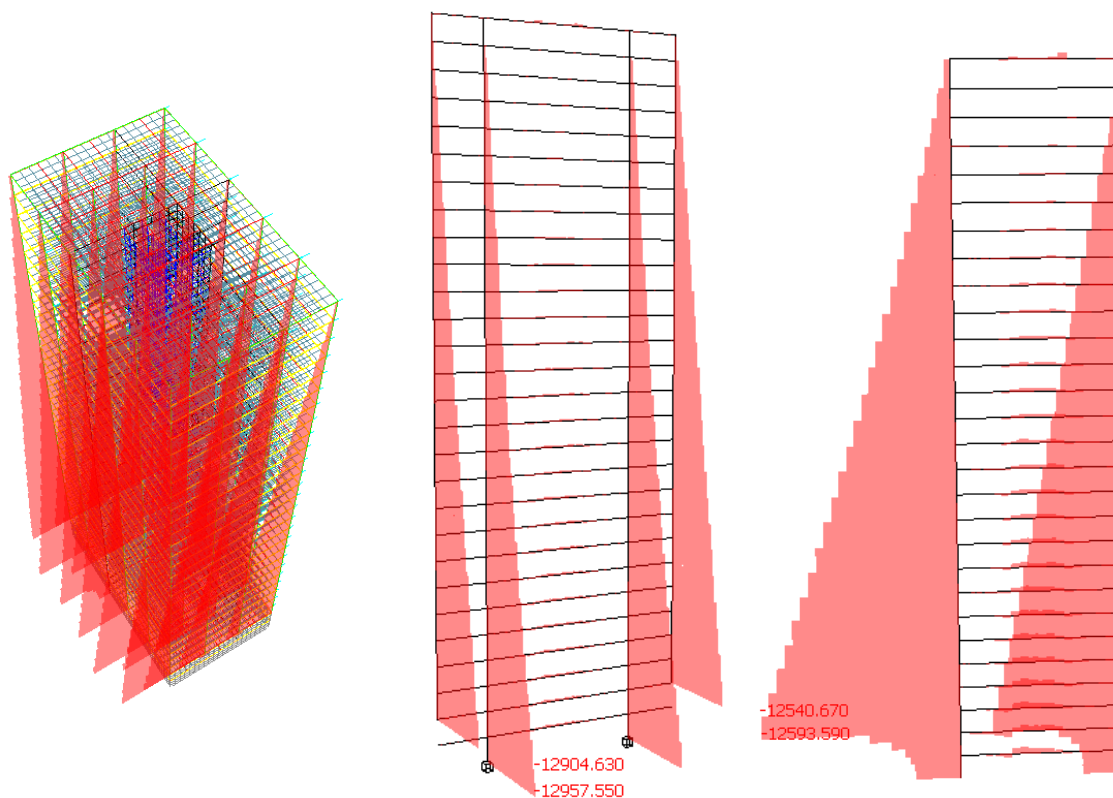


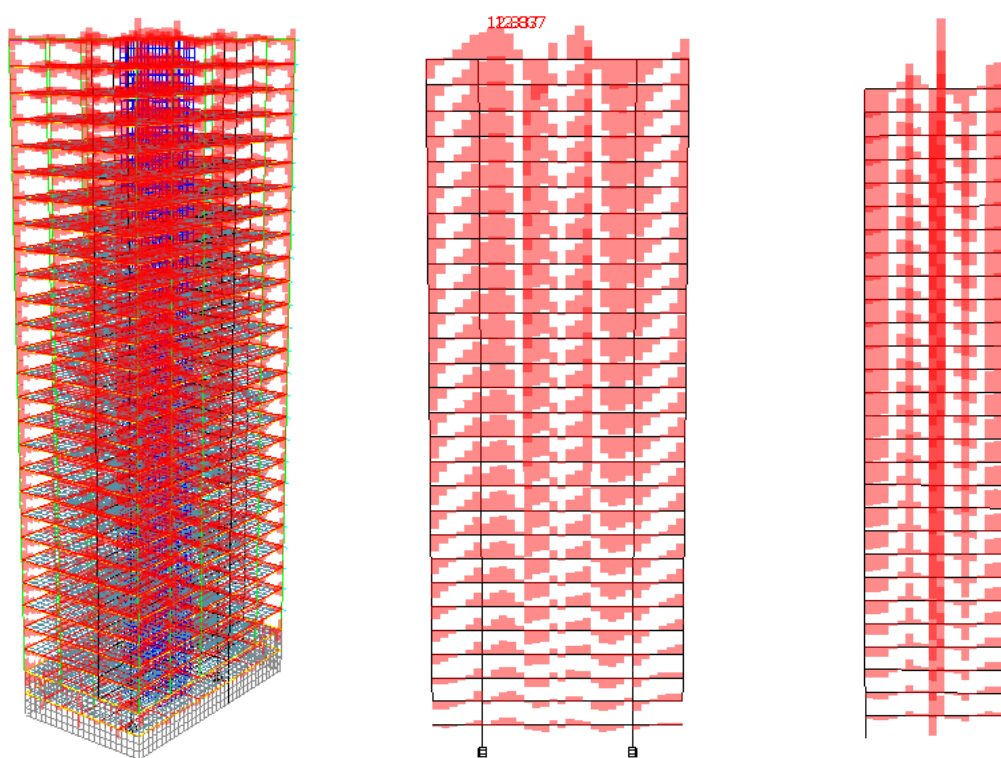
Diagrama de deformación por hipótesis de viento estructura de acero.

Diagrama de deformación por hipótesis de sismo estructura de acero.

### Estructura de hormigón armado



Esfuerzo Axil en ELU persistente 1.

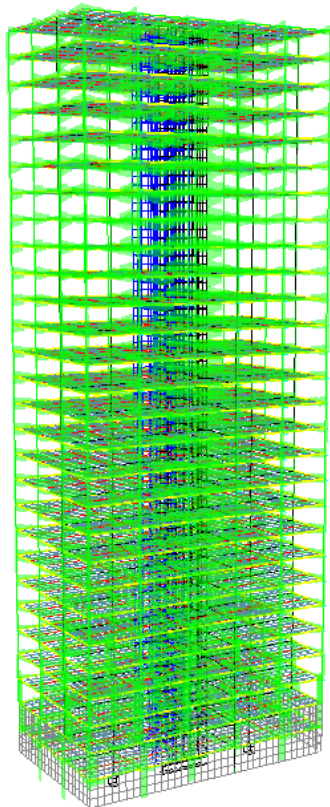


Momento torsor

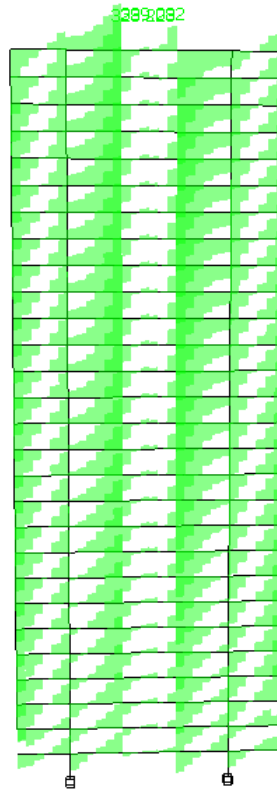
Isométrica

Pórtico C

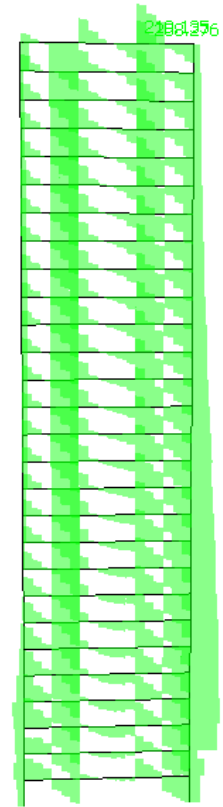
Pórtico 4



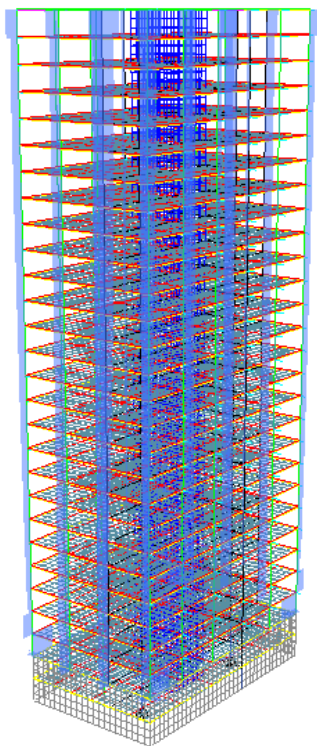
Esfuerzo cortante en Y



Pórtico C

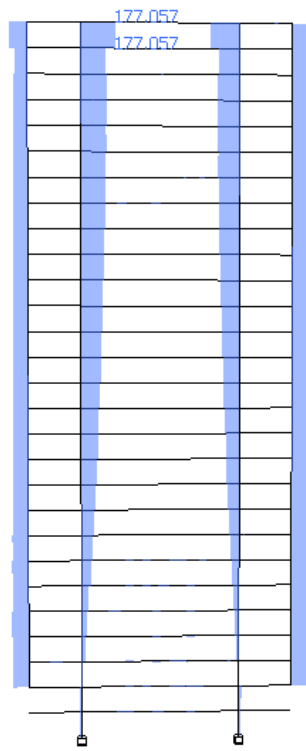


Pórtico 4

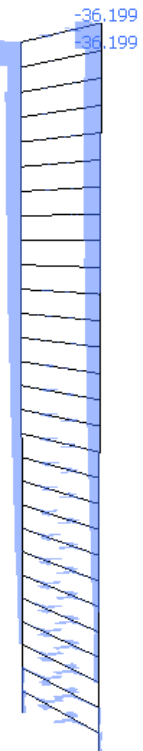


Esfuerzo cortante en Z

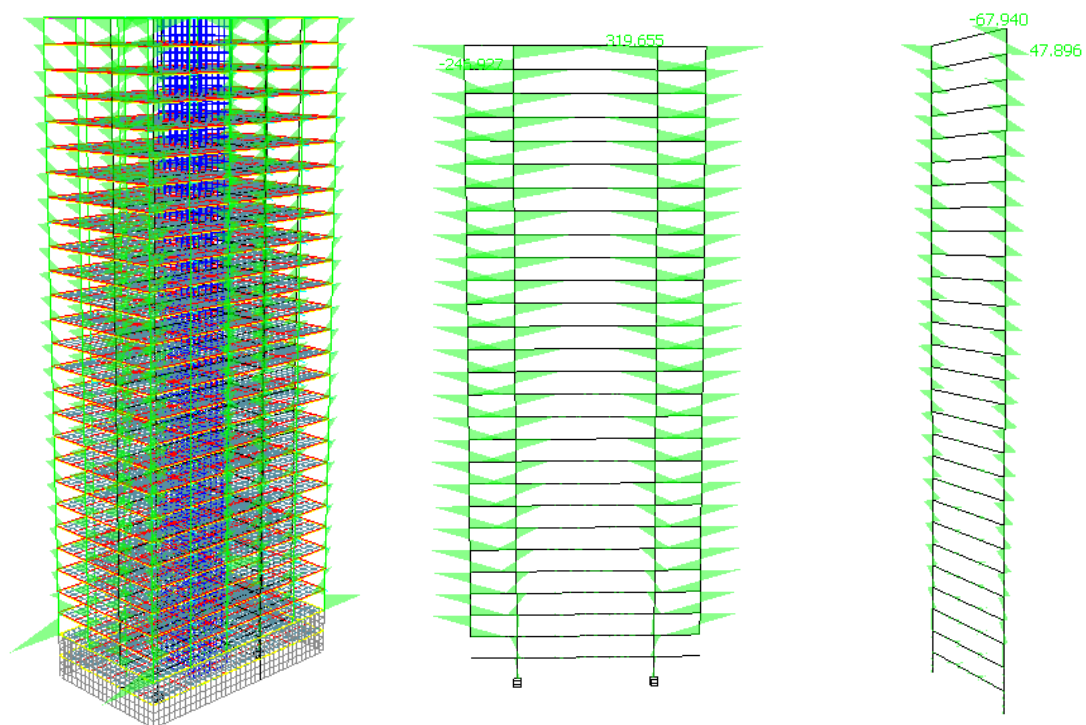
Isométrica



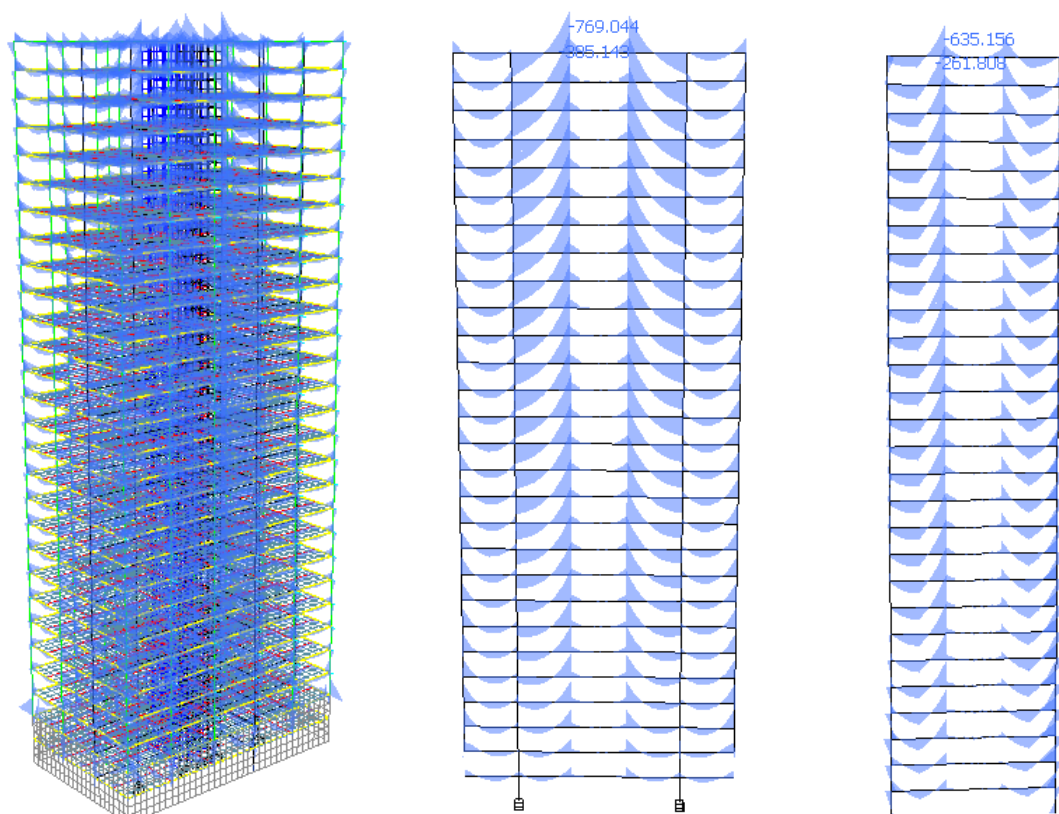
Pórtico C



Pórtico 4



Momento flector en Y

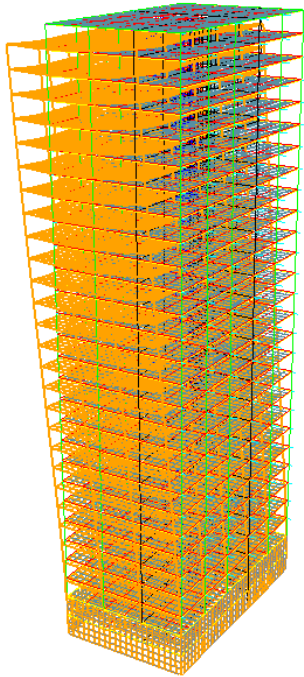


Momento flector en Z

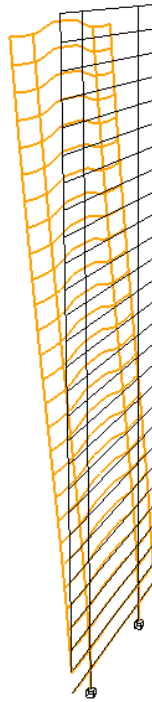
Isométrica

Pórtico C

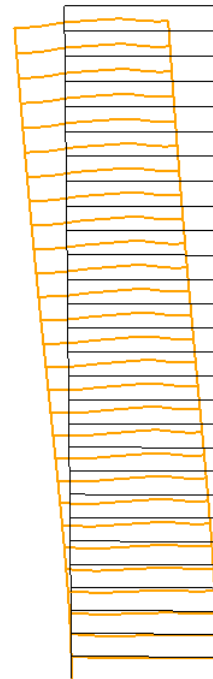
Pórtico 4



Deformación en ELs  
Isométrica



Pórtico C



Pórtico 4

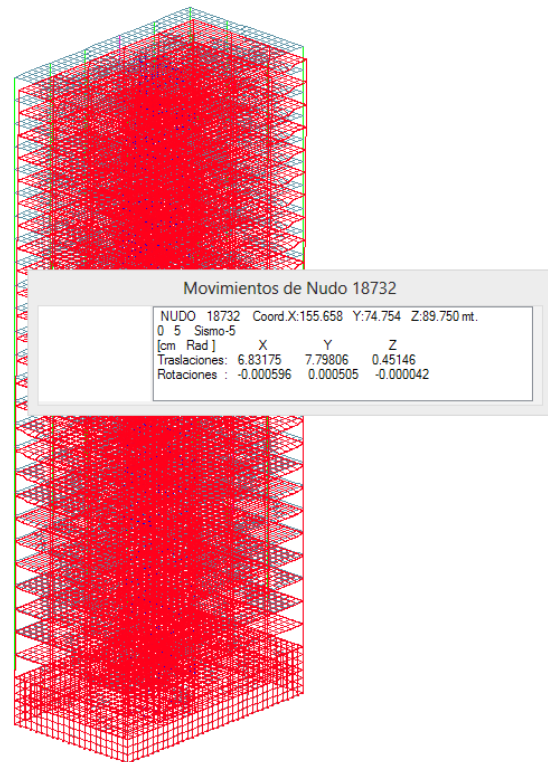
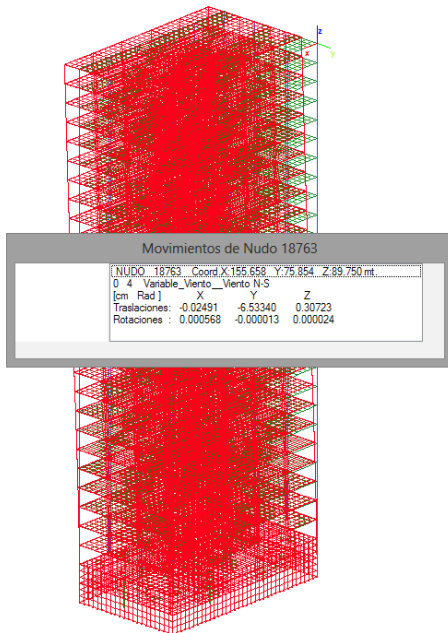
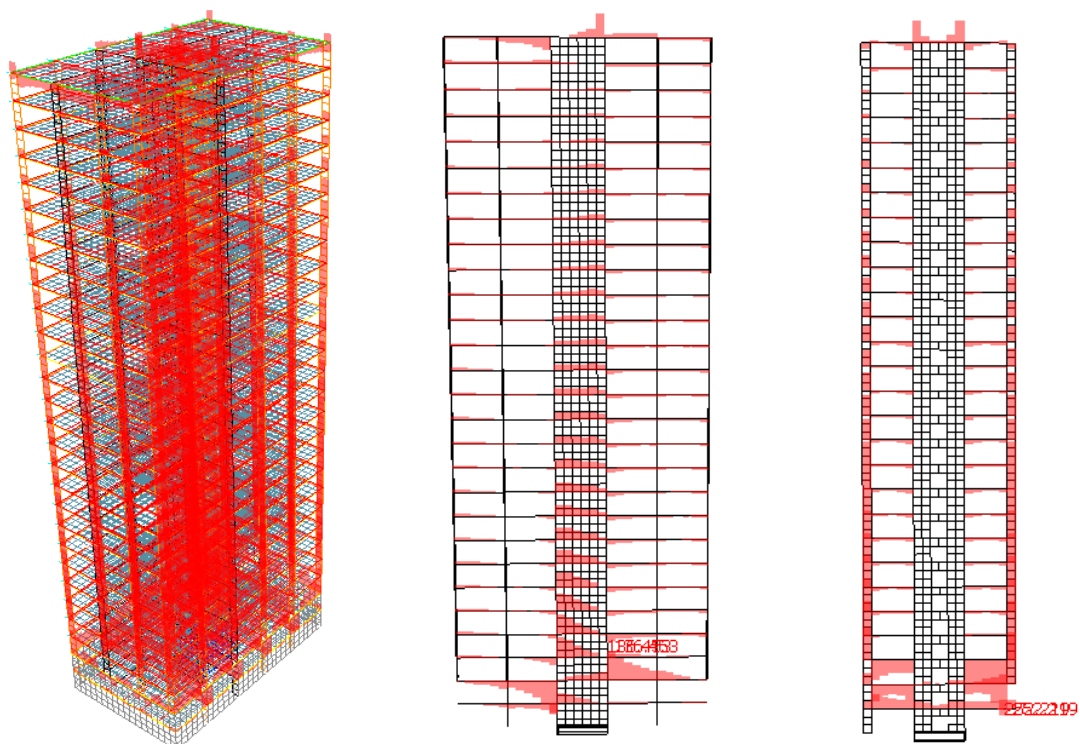
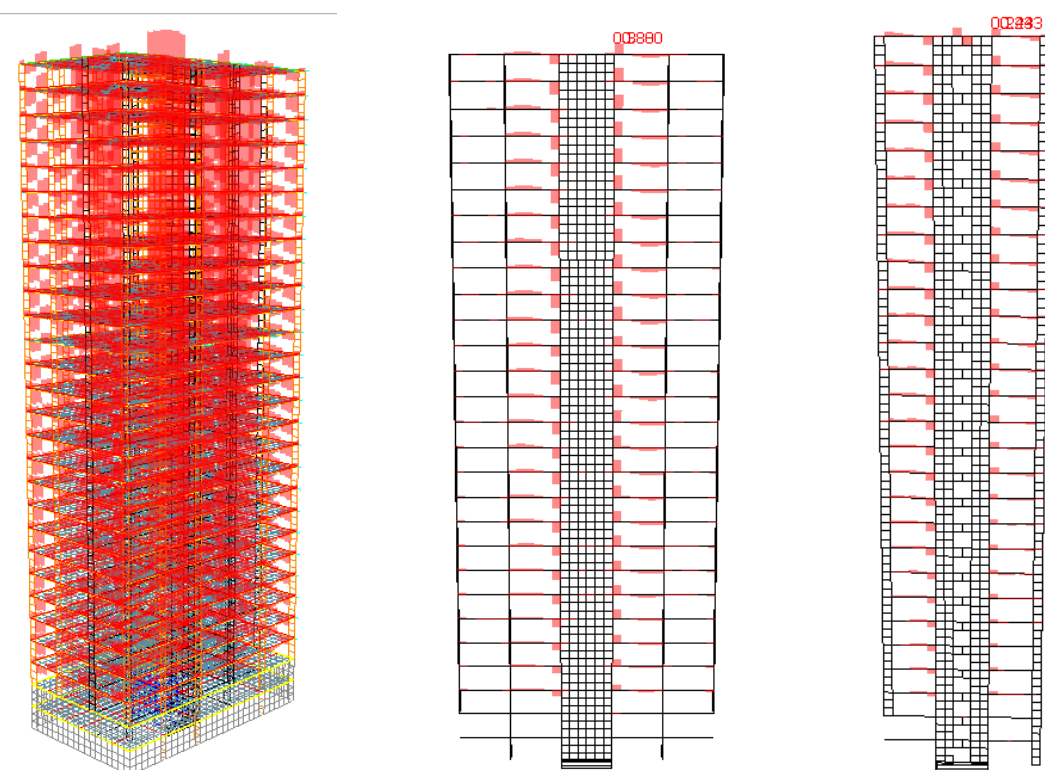


Diagrama de deformación por hipótesis de viento estructura de hormigón armado. Diagrama de deformación por hipótesis de sismo estructura hormigón armado.

### Estructura de madera laminada



Esfuerzo Axil en ELU persistente 11.

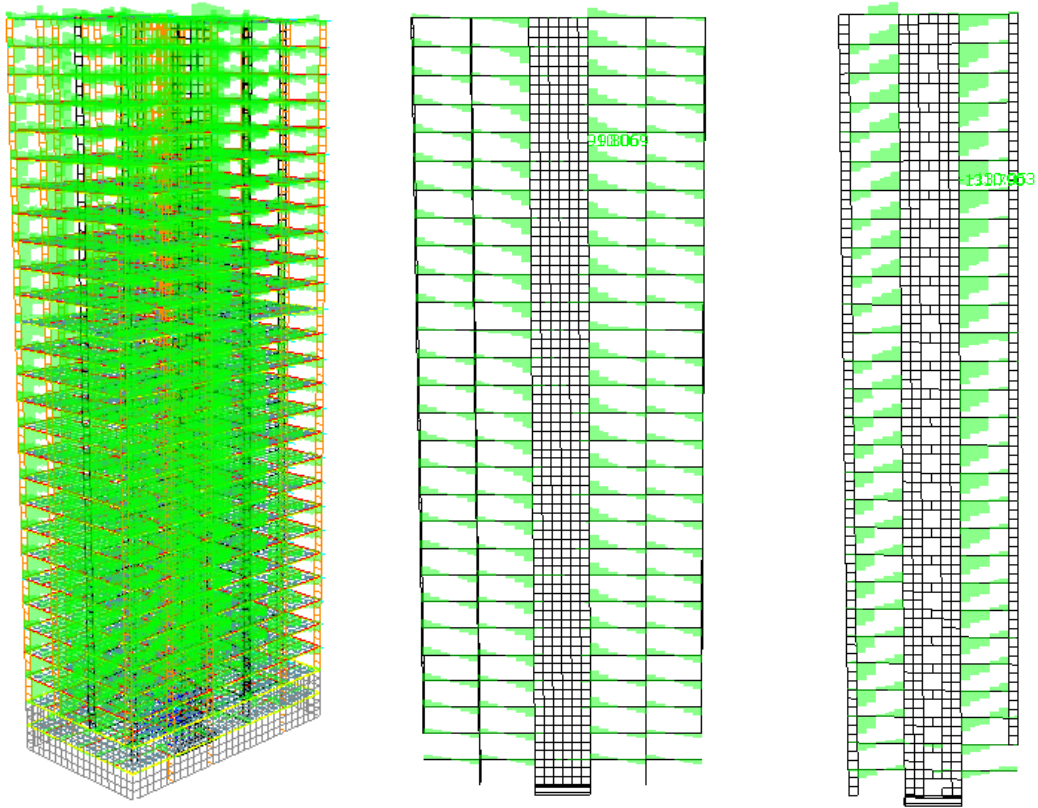


Momento torsor. ELU situación persistente 1.

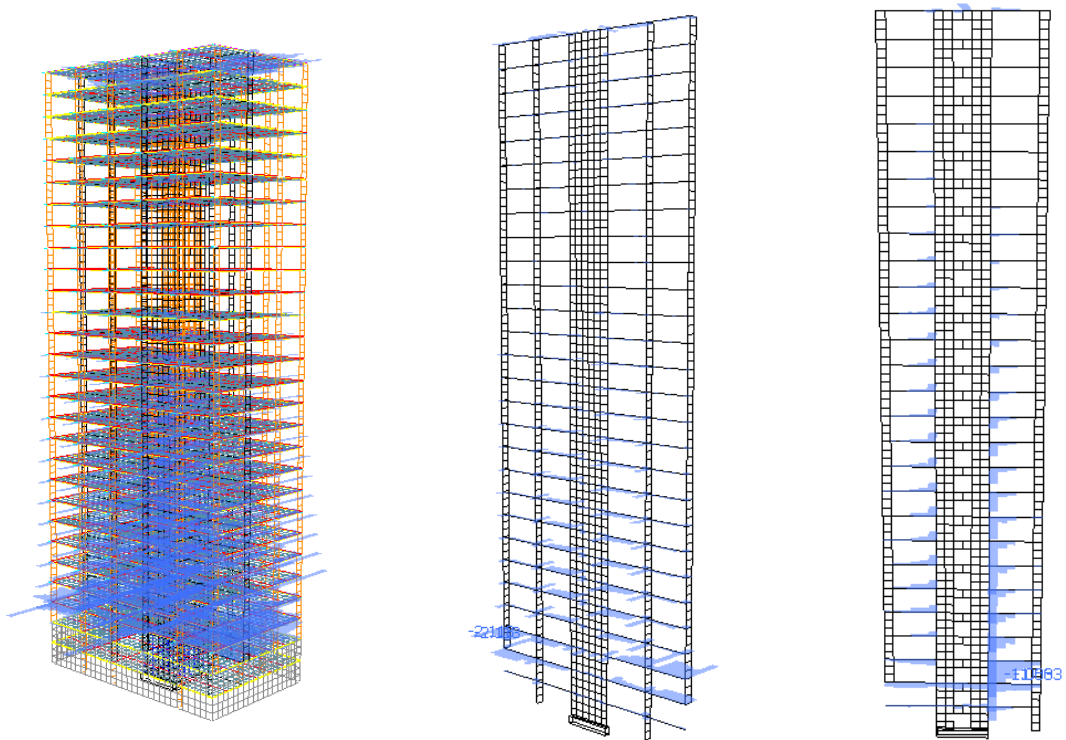
Isométrica

Pórtico C

Pórtico 4



Esfuerzo cortante en Y. ELU situación persistente 4.

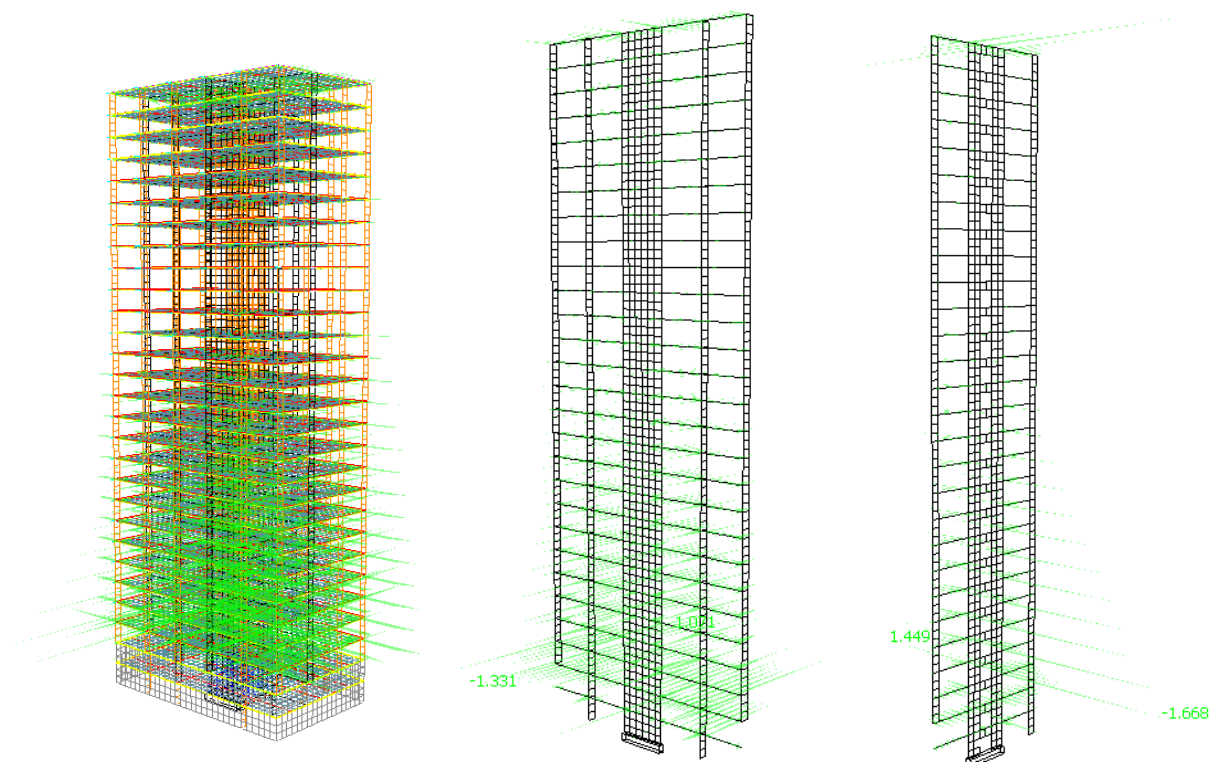


Esfuerzo cortante en Z

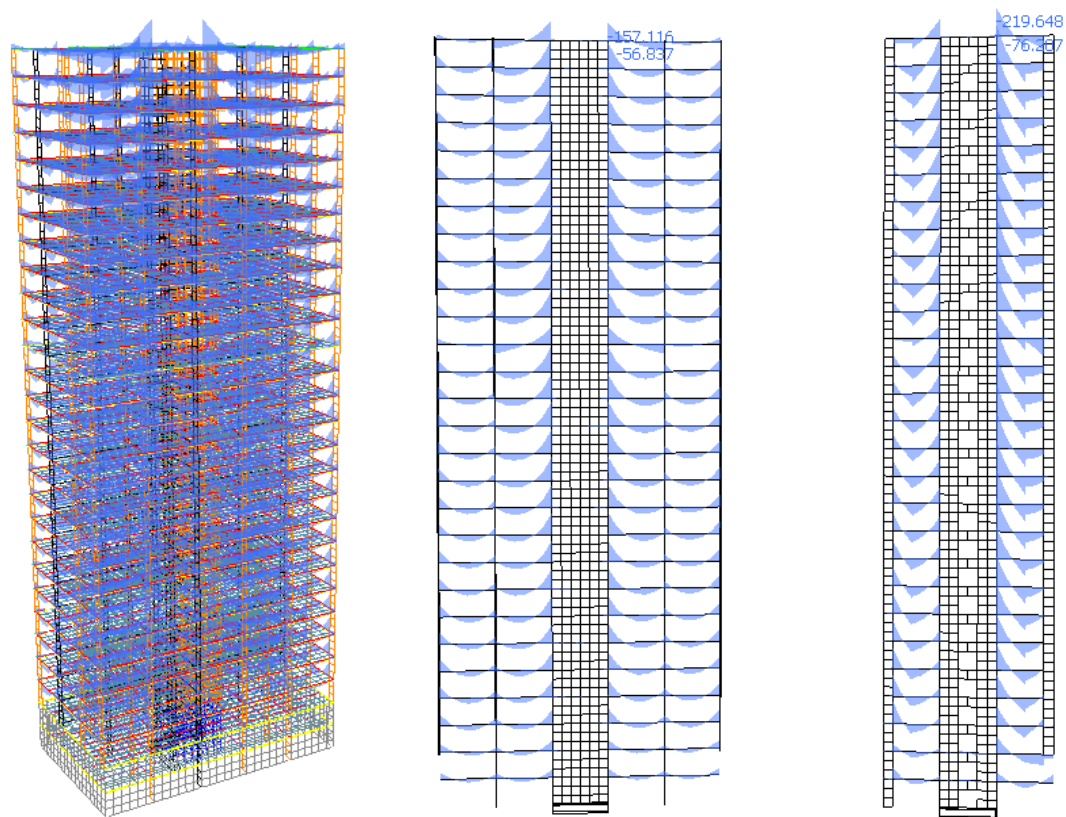
Isométrica

Pórtico C

Pórtico 4



Momento flector en Y



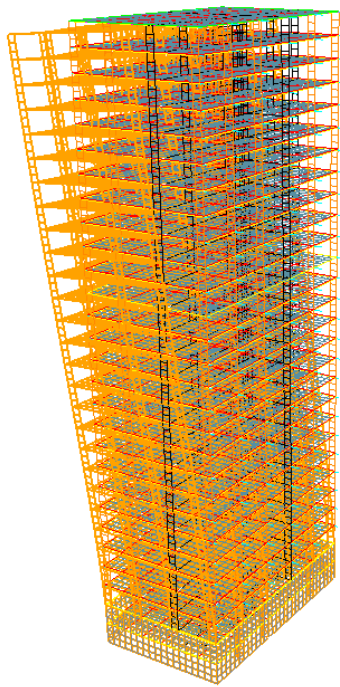
Momento flector en Z. ELU situación persistente 1.

Isométrica

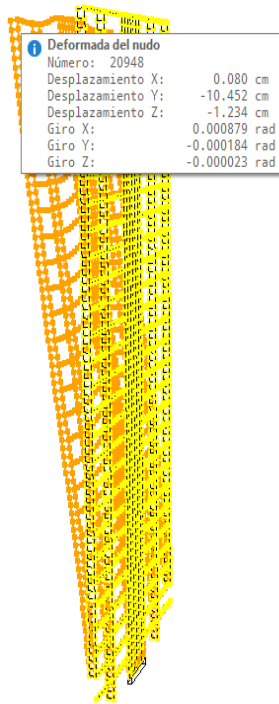
Pórtico C

Pórtico 4

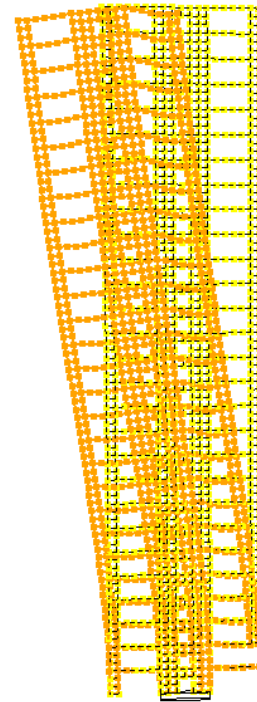




Deformación en ELS  
Isométrica



Pórtico C



Pórtico 4

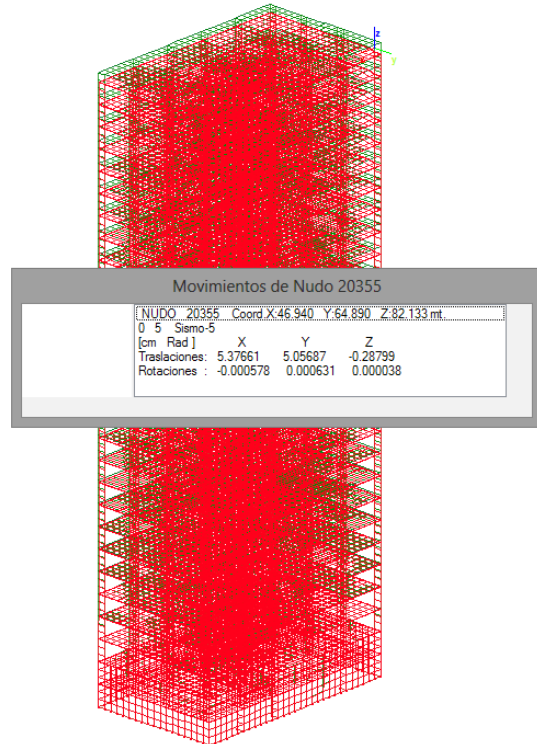
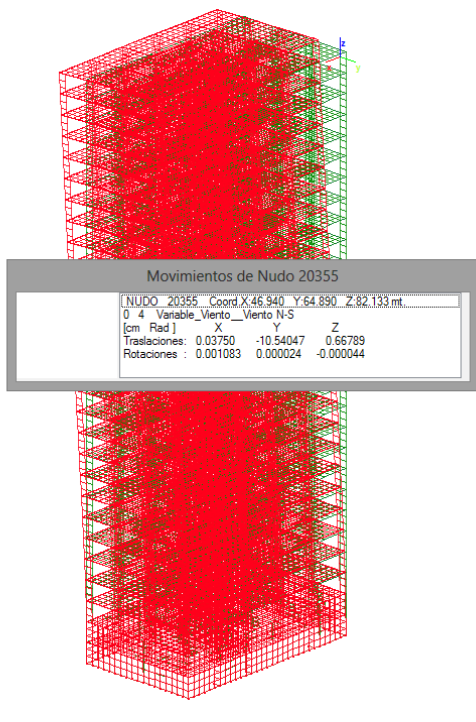


Diagrama de deformación por hipótesis de viento estructura madera laminada.

Diagrama de deformación por hipótesis de sismo estructura madera laminada.