



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

Presentado por

Sanchis García, David

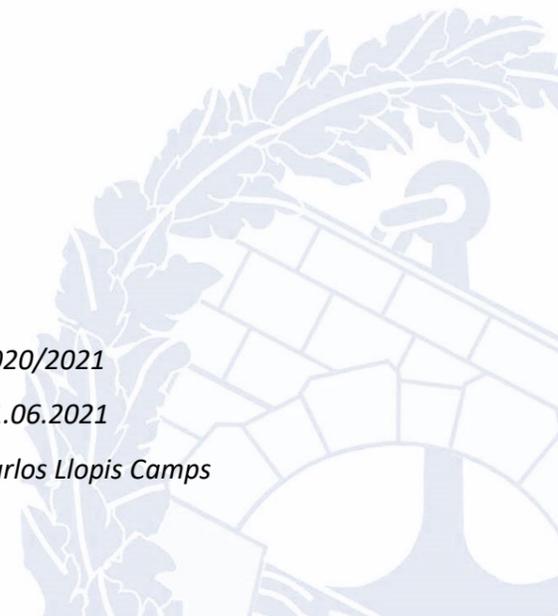
Para la obtención del

Master Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Curso: 2020/2021

Fecha: 01.06.2021

Tutor: Carlos Llopis Camps



ÍNDICE GENERAL

MEMORIA

PLANOS

ANEJO Nº1: CUBIERTA LIGERA OBSERVATORIO. ANÁLISIS CONCEPTUAL.

ANEJO Nº2: ESTUDIO DE SOLUCIONES: DISEÑO DE LA CUBIERTA DE MADERA

ANEJO Nº3: DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL. CUBIERTA DE MADERA

ANEJO Nº4: ESTUDIO COMPARATIVO. RESPUESTA FRENTE A SISMO

ANEJO Nº5: ESTUDIO COMPARATIVO. ANÁLISIS ECONÓMICO.

ANEJO Nº6: ESTUDIO COMPARATIVO. IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO.

ANEJO Nº7: GRADO DE RELACIÓN DEL TFM CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En los últimos años la madera ha ganado mucha popularidad gracias a su trabajabilidad, frente a las alternativas convencionales de acero y hormigón. Los nuevos avances tecnológicos desarrollados en este campo han vuelto a posicionar a este material entre los favoritos de los proyectistas europeos.

A pesar de que la madera está ganando cada vez más y más adeptos, sigue siendo un material muy desconocido para la mayoría de los proyectistas españoles y tan solo goza de cierto protagonismo en ámbitos como la edificación o la rehabilitación de edificios históricos. El presente trabajo pretende servir como caso de estudio para futuros proyectos. De manera que permita a proyectistas valorar la posibilidad de ejecutar cubiertas de grandes luces en madera.

La transición hacia la madera va a ser uno de los primeros pasos a seguir para que nuestra construcción sea capaz de cumplir con los nuevos objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030. Por eso, es tarea de todos empezar a introducir la madera en España en ámbitos de la ingeniería civil en los que todavía no hay tanta tradición como en otros países.

A pesar de todo, en este trabajo se evita hacer apología de la madera y busca realizar un análisis lo más objetivo posible de ambas alternativas. Se van a ofrecer datos concretos sobre los resultados de este estudio comparativo, para que sea el futuro proyectista quien emita un juicio de valor sobre los mismos, en el caso de estar considerando la madera como elemento estructural para su cubierta.

MEMORIA

TRABAJO FINAL DE MÁSTER.
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

TITULACIÓN: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR: David Sanchis García

TUTOR: Carlos Llopis Camps

CURSO: 2020-2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. OBJETO Y ALCANCE DEL DOCUMENTO	3
1.1. Objeto	3
1.2. Alcance	3
2. ANTECEDENTES	4
2.1. La Estación Observatorio del tren interurbano México – Toluca	4
2.2. La Estación Observatorio del tren interurbano	4
3. LIMITACIONES Y CONDICIONANTES	6
3.1. Limitaciones	6
3.2. Condicionantes Estéticos	6
3.3. Condicionantes Climáticos	6
3.4. Condicionantes Constructivos	6
3.5. Acciones	6
3.6. Resumen de las condiciones de contorno geométricas	7
4. NORMATIVA	8
5. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE REFERENCIA	8
5.1. Materiales	8
5.2. Descripción general de la estructura	9
6. ESTUDIO DE SOLUCIONES DE LA ALTERNATIVA EN MADERA	10
6.1. Análisis preliminar	10
6.2. Descripción de los modelos simplificados	10
6.3. Descripción de las alternativas propuestas	11
6.4. Solución adoptada	12
7. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN EN MADERA ADOPTADA	12
7.1. Materiales	12
7.2. Descripción general de la estructura	13
8. ANÁLISIS COMPARATIVO	14
8.1. Peso de los elementos estructurales	14
8.2. Respuesta frente a sismo	14
8.2.1 Descripción de los modelos	14
8.2.2 Resultados del análisis	15
8.3. Impacto sobre la huella de carbono	16
8.4. Viabilidad económica	17
8.4.1. Resumen de presupuestos	17
8.4.2. Oportunidades de financiación	17
9. CONCLUSIÓN	18
10. REFERENCIAS	19
10.1. Normativas y guías de diseño	19
10.2. Revistas y conferencias técnicas	19
10.3. Catálogos	19

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Recorrido de la Línea 3 del tren interurbano México-Toluca	4
Imagen 2. Emplazamiento de la Estación Observatorio dentro del complejo intermodal	4
Imagen 3. Sección transversal de la Estación Observatorio	5
Imagen 4. Alzado lateral de la Estación Observatorio	5
Imagen 5. Sección transversal, alzado lateral y vista 3D de las condiciones de contorno	7
Imagen 6. Modelo Extruido de la cubierta ligera de la Estación Observatorio	9
Imagen 7. Diseño conceptual de la alternativa 1: Cercha unidireccional	11
Imagen 8. Diseño conceptual de la alternativa 2: Cubierta espacial	11
Imagen 9. Diseño conceptual de la alternativa 3: Vigas de gran canto	11
Imagen 10. Diseño conceptual de la alternativa 4: Vigas de canto variable	11
Imagen 11. Cubierta espacial con forjado mixto convencional de viguetas	12
Imagen 12. Propuesta en madera para la cubierta ligera de la Estación Observatorio	13
Imagen 13. Modelo simplificado de la cubierta de madera	14
Imagen 14. Deformada de la cubierta de madera	15
Imagen 15. Deformada de la cubierta de metálica	15

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de resultados del estudio frente a sismo	15
Tabla 2. Comparación de presupuestos	17
Tabla 3. Resumen de Resultados	18

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resumen de pesos	14
Gráfica 2: Comparación del impacto de la huella de carbono	16

1. OBJETO Y ALCANCE DEL DOCUMENTO

A continuación, se describe el objeto y alcance del presente Trabajo Final de Máster.

1.1. Objeto

El presente trabajo Fin de Máster pretende evaluar la idoneidad de la madera como material estructural para cubiertas de grandes luces. Se empleará como caso de estudio la cubierta metálica ligera de la estación Observatorio del Tren interurbano México-Toluca desarrollada por SENER.

La estructura de referencia de SENER consiste en una malla espacial octaédrica con perfiles tubulares de acero. La superficie en planta de la cubierta es de 10.000m² de superficie. La cubierta se apoya sobre una plataforma elevada de hormigón y debe salvar luces de 33 metros en la dirección transversal y 25 metros en dirección longitudinal. La estructura debe además guardar un galibo de 7 metros para permitir el paso de los ferrocarriles y el encaje de los soportes de la catenaria.

A lo largo de su desarrollo se pretende acercar al alumno tanto al diseño de cubiertas para estaciones de ferrocarril, como al uso de la madera como material estructural. Servirá para explorar las diferentes tecnologías existentes en este ámbito.

Para ello, primero se analiza en detalle la solución propuesta por SENER de manera que se obtienen los condicionantes de diseño para cubiertas de ferrocarril elevadas. Una vez analizado el problema el alumno debe realizar un encaje inicial de la estructura y desarrollar la documentación suficiente que justifique la viabilidad técnica de la solución. Una vez determinada la tipología estructural, se realizará un encaje de la nueva cubierta en madera y se comparará con la estructura metálica de referencia. Los criterios que se emplearán para llevar a cabo en análisis comparativo será el comportamiento estructural frente a sismo, el económico y el de sostenibilidad.

1.2. Alcance

El trabajo consta de 4 partes diferenciadas que siguen un claro hilo conductor: un análisis conceptual de la estructura de referencia, un estudio de soluciones para determinar la tipología estructural de madera, un encaje de la estructura a nivel de anteproyecto y un análisis comparativo que permita comparar ambas soluciones.

1. Análisis conceptual de la estructura de referencia metálica

En esta parte del trabajo el alumno analiza la estación elevada objeto de estudio con el propósito de determinar cuales son los diferentes condicionantes de diseño de esta, así como el funcionamiento estructural de la cubierta en detalle. Para ello, se realiza una labor de documentación sobre el proyecto y se crea un modelo estructural de la cubierta empleando el software comercial RFEM de Dlubal.

Con los resultados del modelo se determina el comportamiento general de la estación, así como cada una de las unidades estructurales que componen la estación. En este apartado se pretende entender la razón y ser de la tipología estructural empleada.

2. Estudio de soluciones en madera

Es posible que, al tratarse de un material diferente con distintas características mecánicas, la tipología estructural ideal no coincida para el acero y la madera. En esta parte, se explora la madera estructural y las diferentes tecnologías que hay en el mercado. En ella, se analizan por separado las diferentes tipologías habituales para cubiertas planas de grandes luces de madera y se escoge aquella que mejor se adapte a las condiciones particulares de la estación elevada objeto de estudio.

Para llevar a cabo este análisis se crean 4 modelos estructurales simplificados con RFEM, y se comparan el comportamiento de cada uno de ellos. Los criterios empleados son el peso, la respuesta estructural y la economía.

3. Diseño de una alternativa con estructura de madera

Una vez determinada la tipología estructural idónea, se definen cada una de las unidades estructurales que componen la alternativa propuesta en madera y se dimensionan los perfiles. El alcance del diseño de la cubierta de madera es a nivel de anteproyecto; es decir, se dimensionan y justifican tan solo los elementos principales que conforman la estructura de manera que se proporcionan una primera imagen global de la misma y establecer un avance de presupuesto.

Tan solo se desarrolla la suficiente documentación que permita justificar la viabilidad técnica de la solución. De igual manera que en los anteriores apartados, se generará un modelo estructural más preciso y detallado empleando el software comercial RFEM de Dlubal.

4. Análisis comparativo de ambas alternativas

Finalmente se compara ambas estructuras, de madera y de metal, y se evalúa cada una atendiendo a diferentes criterios. Los diferentes criterios empleados son: El peso, la respuesta estructural frente a sismo, el impacto de la estructura sobre la huella de carbono y el precio.

Para evaluar la respuesta estructural frente a sismo es necesario realizar un análisis dinámico de ambas estructuras.

2. ANTECEDENTES

Para entender la razón de ser del diseño de la propuesta metálica de referencia y su análoga en madera, es necesario dar a conocer la Estación Observatorio en México, así como el proyecto de ferrocarril en la que está incluida. Desde su situación y emplazamiento, hasta la descripción de la cubierta finalmente ejecutada.

En este apartado se persigue poner en contexto la estructura en cuestión. Por ello, primero se describe el proyecto de infraestructura de la línea 3 del tren interurbano México Toluca, en el que se engloba la estación Observatorio. Después, se muestra el emplazamiento de esta y se identifican las diferentes partes de la subestructura y superestructura que conforman la estación. Por último, se muestra la estructura finalmente proyectada, que, aunque no coincide con el modelo de referencia que se mostrará en posteriores apartados, sirve para entender el diseño de esta.

2.1. La Estación Observatorio del tren interurbano México – Toluca

A continuación, se ofrece una visión general del proyecto de la línea 3 y se explica la importancia relativa de la estación Observatorio dentro del marco urbano mexicano. En el ANEJO Nº1: CUBIERTA LIGERA OBSERVATORIO. ANALISIS CONCEPTUAL se desarrolla más en detalle los aspectos técnicos de este proyecto.

El tren Interurbano México – Toluca¹ es un proyecto de ferrocarril de larga y media distancia que conecta la Zona metropolitana del Valle de Toluca con la Zona Metropolitana del Valle de México. Tiene una longitud de 57 Km y un total de 6 estaciones elevadas, 2 terminales y 4 intermedias: Zinacantepec, Terminal de autobuses, Metepec, Lerma, Santa Fe y Observatorio. La línea conecta toda la zona metropolitana de Toluca con México DF.

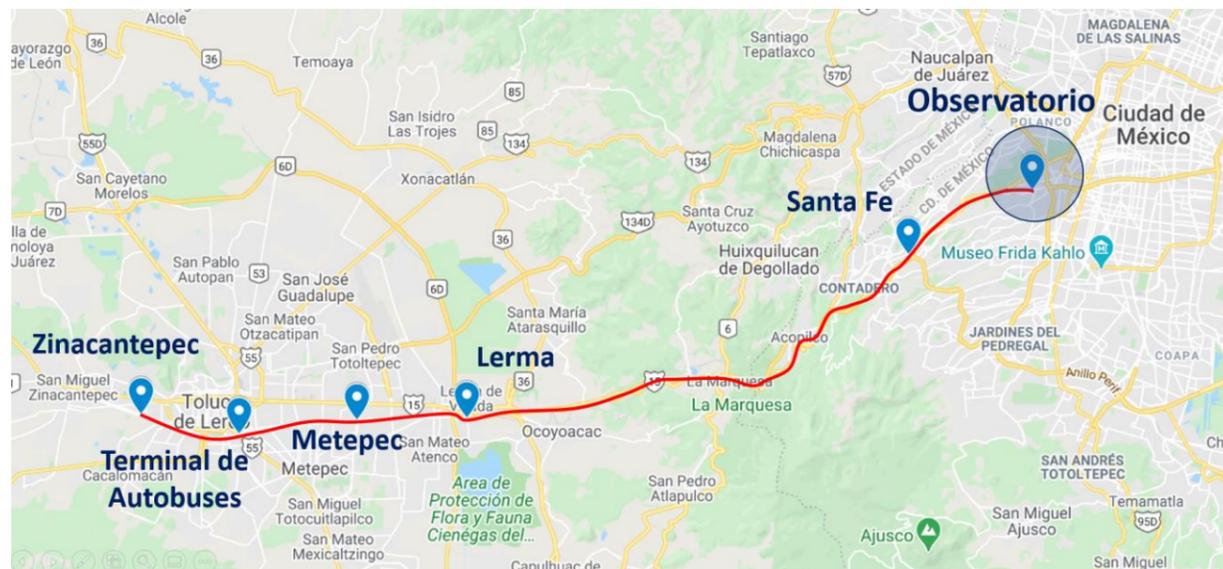
Se trata de un trazado total de 57,8 km, del cual, al recorrer una orografía extremadamente abrupta el 92% del recorrido está proyectado con viaductos o túneles. Es decir, hay un total de casi 49 km de viaductos y un túnel de 4,7km. La velocidad de diseño máxima es de 160km/h y la velocidad comercial de 90km/h, que permiten realizar el recorrido entero en tan solo 39 minutos. Es un tiempo muy competitivo frente al transporte en carretera privado de 55 minutos o público (autobús) de 2,5 horas.

2.2. La Estación Observatorio del tren interurbano

Dentro del proyecto de la línea 6, encontramos la estación objeto de estudio de este trabajo: La estación Observatorio. Se encuentra en el territorio que colinda con el antiguo pueblo de Tacubaya. Este proyecto se encontraba enmarcado en el pasado Programa Nacional de Infraestructuras del Gobierno Mexicano de 2014-2018², sin embargo, el proyecto sigue en construcción. Se prevé que las obras civiles de la estación observatorio terminen a finales de 2022 y se inauguren a finales de 2023³.

La estación está al final de la línea 1 de Metro, es decir al final del alcance de la red urbana de la ciudad. También comparte su espacio junto con una de las cuatro terminales de autobuses de la capital, por lo que el conjunto actúa de intercambiador. Como su nombre indica, sirve para conectar las zonas urbanas de la Capital, Ciudad de México, con la zona urbana de la Ciudad de Toluca de Lerma.

Imagen 1. Recorrido de la Línea 3 del tren interurbano México-Toluca



Fuente: Elaboración propia. Google Maps

Imagen 2. Emplazamiento de la Estación Observatorio dentro del complejo intermodal



Fuente: Elaboración propia. Google Maps

¹ Fuente: www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/transporte-ferroviario-y-multimodal/tren-interurbano-mexico-toluca

² Fuente: www.fonadin.gob.mx/acerca-del-fonadin/programa-nacional-de-infraestructura/

³ Fuente: www.economista.com.mx/empresas/Tren-Mexico-Toluca-sumara-al-menos-siete-anos-de-retrazo-20191113-0024.html

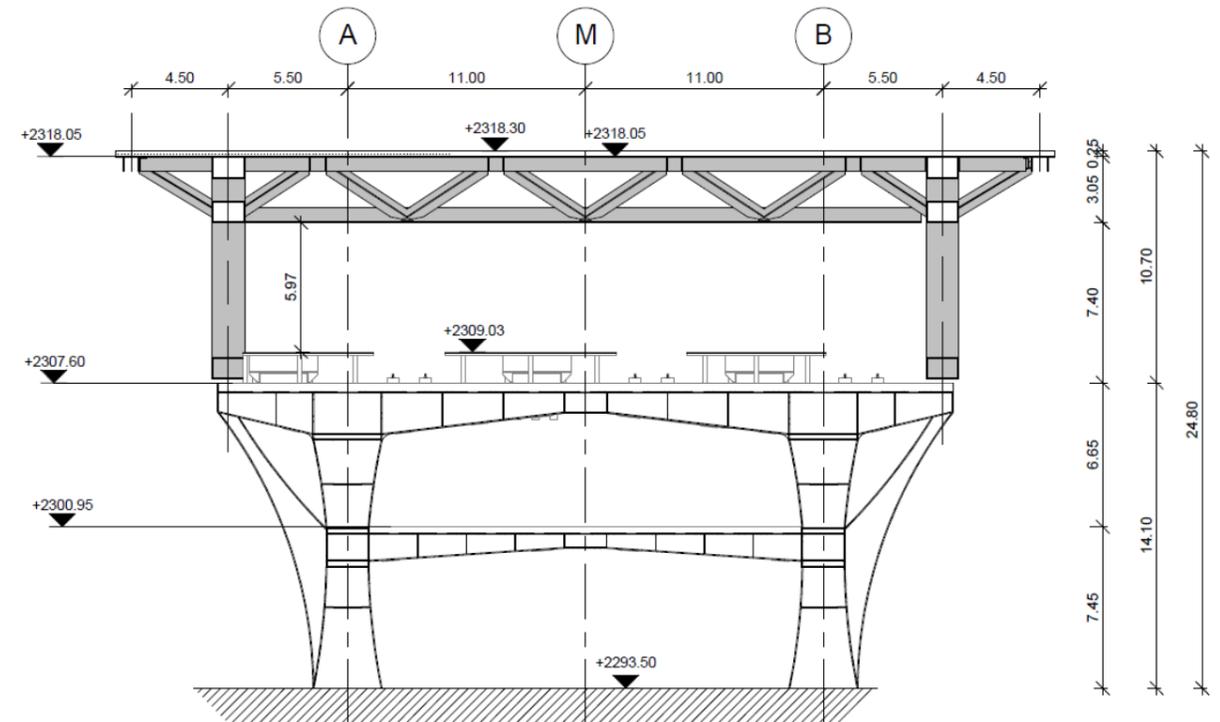
La estación de Observatorio es una estación elevada, sobre la que circulan 3 vías de tren. La infraestructura cuenta con una plataforma de hormigón de 14,1 metros de altura sobre la que descansa una cubierta de estructura metálica, que será en nuestro caso la cubierta objeto de estudio.

En el primer nivel, a la altura del terreno, se espera que circulen autobuses y vehículos privados. El segundo nivel, sirve de vestíbulo para acceder a los diferentes andenes, presumiblemente con comercios y zonas de espera. El tercer nivel, como se puede ver en el perfil, circula un total de tres vías de ferrocarril y cuenta con 3 andenes. La cubierta de la estación observatorio del tren interurbano fue proyectada para ser transitable y soportar el peso de jardineras.

Los arquitectos que diseñaron la cubierta esperaban que la superficie que quedaba al aire libre pudiera ser accesible por los usuarios de las vías y permitiera el paso entre los diferentes edificios del complejo. Querían crear un espacio verde, que minimizara el impacto ambiental, y que sustituyera la vegetación que iba a perderse al ejecutar la obra. Por ello, la cubierta debía ser plana y ser capaz de resistir una sobrecarga permanente de uso de 5kN/m^2 .

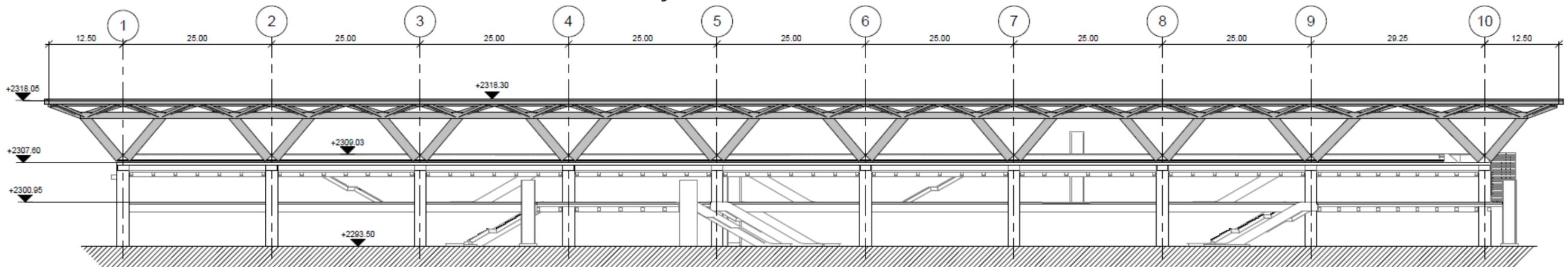
Se trata por lo tanto de una cubierta espacial que, en vez de estar configurada con los perfiles tubulares habituales, han debido configurarse con perfiles en I compuestos —formando perfiles de sección rectangular—. Las luces que deben salvarse son de 33 metros en la dirección principal, y 25 metros entre apoyos. Los apoyos de la cubierta deben descansar sobre las costillas de la estación, para dar continuidad a los apoyos de la plataforma.

Imagen 3. Sección transversal de la Estación Observatorio



Fuente: Documentación facilitada por SENER del proyecto ejecutivo del tren interurbano México

Imagen 4. Alzado lateral de la Estación Observatorio



ALZADO LATERAL

Fuente: Documentación facilitada por SENER del proyecto ejecutivo del tren interurbano México

Cabe recalcar que esta no es la cubierta metálica que se ha servido de referencia para el estudio comparativo. No obstante, esta explicación se considera relevante para entender el contexto de partida del presente estudio comparativo. La estructura metálica de referencia se desarrolla más adelante en el apartado 6. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE REFERENCIA.

3. LIMITACIONES Y CONDICIONANTES

En el siguiente apartado se describen las limitaciones y condicionantes con las que fue diseñada la estructura de referencia metálica y que se han respetado para encajar la propuesta alternativa en madera.

Se han tenido en consideración tanto las limitaciones geométricas impuestas por el proyecto, como las de cargas definidas tanto por las peticiones del cliente como de la zona. También se recogen los diferentes condicionantes estéticos, climáticos y constructivos que caracterizan la obra.

3.1. Limitaciones

A continuación, se describen las condiciones de contorno de esta:

- La cubierta descansa sobre una plataforma elevada de hormigón, cimentada al terreno por pilotes y su geometría y transmisión de las cargas deberá ajustarse a la misma.
- La estructura deberá cubrir como mínimo el área total de la plataforma de forma que proteja a los usuarios de la estación.
- La cubierta deberá ser plana y no transitable. Deberá permitir una sobrecarga de uso para el paso de usuarios de 1 kN/m², tan solo para labores de mantenimiento.
- La superficie transitable debe quedar a 10,7m de altura sobre la plataforma.
- Para evitar la interferencia de la cubierta con las estructuras de soporte de la catenaria, se tiene que respetar una altura mínima entre la superficie de la plataforma y la cubierta de 7m.
- La luz entre pilares (de 33m) en la dirección principal de los pórticos debe salvarse sin elementos intermedios, tanto para crear un espacio diáfano para los usuarios, como para permitir la libre disposición de equipamientos e instalaciones industriales propios del ferrocarril.
- Los apoyos de la cubierta sobre la plataforma deben coincidir en los extremos de la plataforma con las costillas de refuerzo que sustentan la plataforma. La distancia longitudinal entre estos elementos auxiliares de refuerzo es de 25m en los tramos 1 a 8; y 29,25m en el último tramo.
- La dirección de la reacción sobre los apoyos deberá ser eminentemente horizontal, para evitar comportamientos indeseados de la losa de hormigón ya proyectada y ejecutada.

3.2. Condicionantes Estéticos

Cabe recordar que la estación de Observatorio se trata de una obra de gran envergadura. No solo tiene el propósito de servir como intercambiador entre la Ciudad de México y su periferia metropolitana, sino que sirve de imagen de bienvenida a la capital. La gran afluencia de viajeros y el tamaño de esta exigen que la estructura responda a ciertos mínimos estéticos por su importancia simbólica.

3.3. Condicionantes Climáticos

La temperatura⁴ en la región a lo largo del año varía de media entre 6 °C y 27 °C. La temperatura mínima no baja menos de los 3 °C y la máxima no supera los 30°C. El grado de humedad relativa⁵ medio varía a lo largo del año entre el 41% y el 70%.

3.4. Condicionantes Constructivos

La estructura deberá construirse sobre la ya ejecutada plataforma de hormigón a más de 14 metros de altura sobre el nivel del terreno. Ello implica la necesidad de disponer de grúas con suficiente alcance.

En el perímetro que configura la zona de obra hay suficiente espacio para disponer de grúas perimetrales, realizar acopios o incluso realizar montajes parciales de la estructura, si fuera necesario. La obra está muy bien comunicada a través de carreteras principales, sin embargo, al tratarse de un punto estratégico logístico junto a una importante estación de autobuses, estas carreteras tendrán una gran afluencia de tráfico, que no podrá detenerse.

Que la estructura sea modular y que los elementos sean de dimensiones moderadas, será particularmente decisivo en este caso concreto, tanto para el montaje como para la gestión logística de las mismas por carretera.

3.5. Acciones

Las acciones que se han tenido en cuenta para el análisis estructural de ambas cubiertas, de metal y madera han sido:

- Peso propio de cada una de las unidades que configuran la cubierta
- Cargas muertas
- Sobrecargas de uso para cubiertas no transitables de 1 kN/m²
- Sobrecargas de viento
- Acción Sísmica

En los ANEJOS N°1 y N°3 se describe más en detalle el valor y disposición de las diferentes cargas y sobrecargas para la cubierta metálica y de madera respectivamente. En el ANEJO N°4 ESTUDIO COMPARATIVO. LA RESPUESTA FRENTE A SISMO, se explica el proceso de diseño y obtención de las cargas equivalentes de sismo.

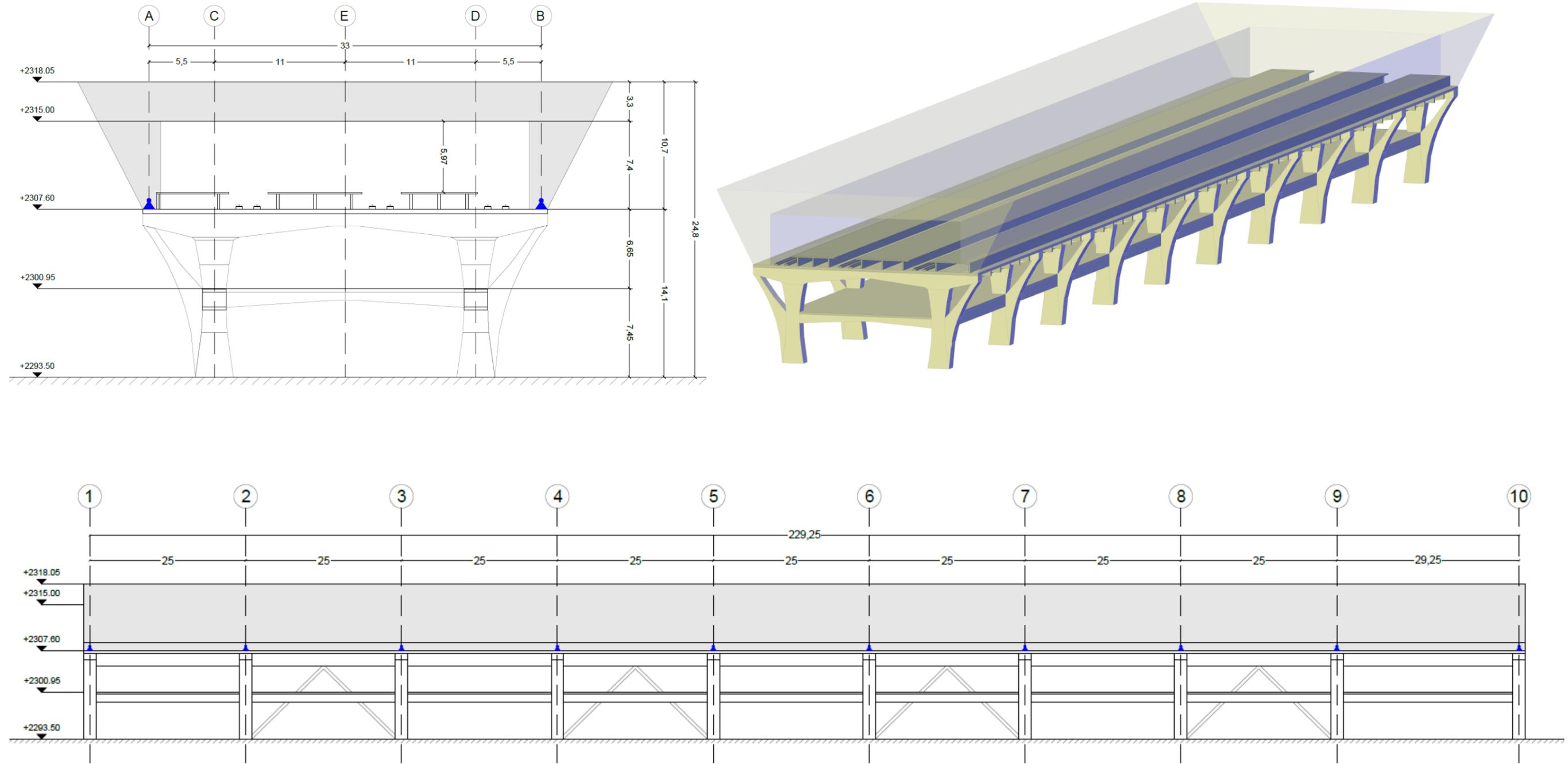
⁴ Fuente: <https://es.weatherspark.com/y/5674/Clima-promedio-en-Ciudad-de-M%C3%A9xico-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

⁵ Fuente: https://www.weather-mx.com/es/mexico/ciudad-de-mexico-clima#humidity_relative

3.6. Resumen de las condiciones de contorno geométricas

A continuación, se representa el volumen disponible para encajar la estructura. Los marcadores en azul representan los puntos en los que deberá apoyar los soportes de la cubierta para dar continuidad a las columnas de la plataforma.

Imagen 5. Sección transversal, alzado lateral y vista 3D de las condiciones de contorno



Fuente: Elaboración propia.

4. NORMATIVA

Aunque la colección de normas habituales para el diseño de estructuras en México son normas técnicas complementarias, en adelante NTC; también se utilizan, aunque en menor medida las americanas —AISC y ACI— o las europeas.

Dado el carácter académico de este trabajo se trabajará principalmente con las normativa y filosofía de cálculo europeas, que son con las que está más familiarizado el alumno. Por otra parte, la normativa mexicana se ha usado para caracterizar los aspectos locales de la obra, tales como las acciones de sismo o el viento.

En este apartado se recogen las diferentes normativas aplicadas para realizar en análisis estructural tanto de la estructura de referencia metálica como de la alternativa en madera propuesta.

- UNE-EN 1991-1: Eurocódigo 1: Acciones en estructuras

Esta norma se ha empleado para determinar los factores de carga, la combinación de acciones, y para caracterizar el valor de los estados límite de servicio.

- UNE-EN 1992-1: Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón

Esta norma se ha utilizado como referencia para caracterizar y dimensionar la capa de hormigón de compresión, dispuesta sobre ambas cubiertas.

- UNE-EN 1995-1: Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero

Esta norma se ha utilizado como referencia para caracterizar y dimensionar los diferentes elementos estructurales de la alternativa de referencia de acero estructural. Es decir, los perfiles laminados, la chapa grecada y el mallazo de la capa de compresión.

- UNE-EN 1995-1: Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera estructural

Esta norma se ha utilizado como referencia para caracterizar y dimensionar los diferentes elementos estructurales de madera laminada que conforman la propuesta alternativa en madera elaborada por el alumno.

- NTC: Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones.

Esta norma se ha empleado para calcular el valor y disposición de las cargas de viento que actúan sobre la cubierta.

- NTC: Normas técnicas complementarias para diseño por viento

Esta norma se ha empleado para calcular el valor y disposición de las cargas de viento que actúan sobre la cubierta.

- NTC: Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo

Esta norma se ha utilizado para caracterizar las acciones de sismo, y determinar los métodos de análisis necesarios frente al mismo.

5. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA METÁLICA DE REFERENCIA

En este apartado se describe la alternativa metálica que servirá de referencia para comparar los resultados de la cubierta de madera planteada por el alumno.

En el ANEJO Nº1: CUBIERTA LIGERA OBSERVATORIO. ANÁLISIS CONCEPTUAL se analiza en detalle el comportamiento estructural de la cubierta metálica ligera de la estación Observatorio, a partir de la documentación facilitada por el departamento de estructuras de SENER. En él se ha desarrollado un modelo propio a el propósito de entender en detalle el funcionamiento de la estructura, y ser, además, capaz de realizar posteriormente el modelo de una estructura alternativa de madera que sea lo más comparable posible.

A continuación, se describen las propiedades de los diferentes materiales empleados, así como una descripción general de las diferentes unidades que componen la estructura.

5.1. Materiales

Al tratarse de una estructura proyectada en México, los estándares reales con los que estaba proyectada la estructura eran los ASTM americanos. Sin embargo, por tratarse de un trabajo académico se han sustituido el acero por su homólogo en la normativa europea.

La estructura consta de perfiles de acero laminado y un forjado mixto hormigón-acero de chapa colaborante. Los perfiles metálicos están conformados con los siguientes aceros.

Acero estructural S 355: EN 10025-2:2004-11

$E = 210000 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad
$G = 80769,2 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\nu = 0,3$	Coefficiente de Poisson
$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$	Densidad

Los elementos que componen el forjado de chapa colaborante mixto cuentan con:

Acero estructural B 500 S: EN 10025-2:2004-11 para la malla electrosoldada.

$E = 200000 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad
$G = 80769,2 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\nu = 0,3$	Coefficiente de Poisson
$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$	Densidad

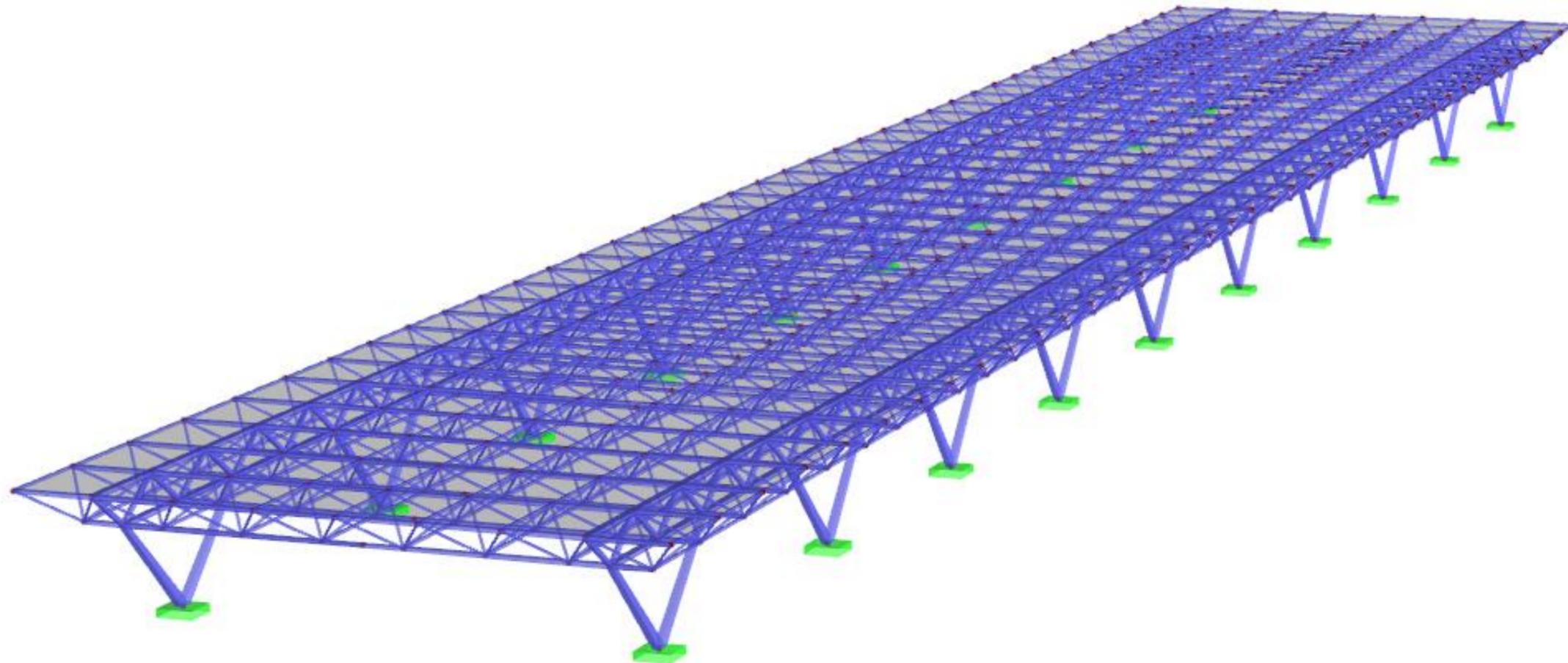
Hormigón aligerado C35/3: EN 1992-1-1:2004/A 1:2014 para la capa de compresión.

$E_{cm} = 18000 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad
$G = 7500 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\nu = 0,2$	Coefficiente de Poisson
$\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$	Densidad

5.2. Descripción general de la estructura

A continuación, se muestra el modelo extruido de la estructura. Se trata de una cubierta espacial, de planta rectangular y biaportada.

Imagen 6. Modelo Extruido de la cubierta ligera de la Estación Observatorio.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

La estructura está claramente diferenciada en dos partes, por una parte, la malla espacial; y por otra, los pórticos laterales sobre los que apoya.

La malla espacial consta de dos entramados rectangulares de vigas separados, que se unen a través de diagonales de con perfiles huecos circulares. La separación entre las directrices de los cordones superior e inferior de la malla es de 2,7 metros. La malla salva en la dirección transversal una luz de 33 metros entre apoyos y un total de 5,5m en los voladizos extremos. Estos entramados, superior e inferior cuentan con perfiles IPE. El gálibo entre la base de los soportes y la cara inferior del cordón inferior de la cubierta es de 7,4 metros.

Los pórticos laterales a su vez están configurados por dos elementos, los soportes inclinados, y la cercha unidireccional. La cercha de fachada permite atar todos los apoyos de manera que la cubierta apoye de forma continua en la dirección longitudinal de la estación.

Los 10 apoyos dispuestos a cada uno de los lados longitudinales de la estación están separados entre sí a una distancia de 25 metros en casi todos los vanos — excepto en el último que la distancia es de 29,25 metros —.

Los apoyos inclinados están dispuestos de manera que la cercha del pórtico lateral salva luces de 12,5 metros en todos sus tramos excepto el último que es más irregular.

6. ESTUDIO DE SOLUCIONES DE LA ALTERNATIVA EN MADERA

Una vez conocido en detalle el problema en cuestión y el comportamiento de la estructura metálica de referencia, es hora de explorar las alternativas que ofrece la madera.

Cuando se plantea la utilización de un material diferente para dar una solución alternativa a una estructura es posible que, por sus cualidades mecánicas, la tipología estructural que mejor se adapte a las cargas varíe de un material a otro.

Este apartado se busca contestar a la pregunta de qué tecnologías de madera y tipologías estructurales son las que mejor se ajustan a las necesidades de nuestro proyecto. Se ha pretendido analizar de la forma más objetiva posible la idoneidad de diferentes alternativas atendiendo a criterios tales como el peso, el coste, la estética y el comportamiento estructural frente a situaciones extraordinarias.

Para ello, primero se ha realizado un análisis preliminar para identificar el tipo de madera estructural, el sistema de forjado y la tipología estructural. Más adelante, se han elaborado modelos estructurales simplificados, de aquellas alternativas más viables. El Estudio de soluciones completo se ha desarrollado con más detalle en el ANEJO Nº2: ESTUDIO DE SOLUCIONES. DISEÑO DE LA CUBIERTA DE MADERA.

6.1. Análisis preliminar

En el análisis preliminar se han recogido los diferentes tipos de maderas comerciales disponibles en el mercado. Más adelante, se han listado las distintas tipologías estructurales más habituales que se ajustan a las necesidades de la cubierta objeto de estudio, así como los sistemas de forjado más habituales en estructuras de madera.

A partir de las conclusiones de este análisis preliminar se han elaborado los diferentes modelos simplificados.

6.1.1. Tipo de Madera

A la hora de definir el tipo de madera que se va a emplear en el proyecto de estructuras, es necesario identificar la clase de servicio, en función del tipo de exposición y humedad a la que está sometida; la clase de uso, que varía dependiendo del tipo de protección que necesite; la clase resistente necesaria, según las solicitaciones a las que esté sujeta; y la especie, que dependerá de su disponibilidad en el mercado.

En nuestro caso será:

Clase de Servicio 1	por estar sometida a una temperatura media de 20 °C y una humedad relativa del aire que solo excede el 65% unas pocas semanas al año.
Clase de uso 2 y 3	los elementos portantes y de fachada serán de clase 3 por estar completamente a la intemperie, mientras que los elementos de la malla se considerarán tan solo de clase 2 por estar parcialmente cubiertos.
Eucalipto <i>uro-grandis</i>	se empleará esta especie, principalmente por su disponibilidad comercial en la zona.
Madera laminada	cada material tiene su uso, en este caso, dadas las grandes luces y la necesidad de disponer de piezas excepcionalmente grandes se recurrirá a la madera laminada con una clase resistente GL24h.

6.1.2. Tipología Estructural

Dada la necesidad por cuestiones arquitectónicas de ser plana, aquellas soluciones estructurales que se consideran candidatas son.

- Cercha unidireccional
- Cubierta espacial
- Viga uniforme de gran canto
- Viga de canto variable

Tan solo se han planteado, aquellas soluciones puramente de madera. Las soluciones mixtas con acero pretensado pueden ser objeto de otros trabajos futuros.

También se ha obviado el empleo de soluciones con elementos curvos de grandes dimensiones, por diversos motivos. Entre ellos, la dificultad adicional de transportar elementos curvos de dimensiones tan grandes, o la dificultad para encontrar talleres especializados capaces de fabricar dichas piezas en México.

6.1.3. Sistemas de forjado

Dentro del estudio se han considerado varios sistemas de forjados habituales en madera que permiten dejar a la superficie a la intemperie.

- Forjados mixto convencional con viguetas de madera
- Forjado mixto con sistema prefabricado de CLT (Capa de compresión de 50mm y una lámina de CLT 4/3/4/3/4 de 180mm de espesor)

6.2. Descripción de los modelos simplificados

A partir de las conclusiones del análisis preliminar se han elaborado un total de 8 soluciones, 2 por cada tipología estructural descrita en el apartado anterior. Cada tipología estructural se ha modelado 2 veces, tanto con un sistema de forjado mixto convencional como con un sistema prefabricado de CLT.

- Alternativa 1. Cercha unidireccional
- Alternativa 2. Cubierta Espacial
- Alternativa 3. Vigas de gran canto
- Alternativa 4. Vigas de canto variable

Para cada alternativa se ha realizado un modelo estructural simplificado y se ha realizado un cálculo elástico lineal para dimensionar cada uno de los elementos principales.

La principal carga impuesta a las estructuras ha sido una sobrecarga ficticia de 1,5 kN/m² sobre toda la cubierta. Con ella, se pretende representar de forma aproximada la combinación de cargas de sobrecarga de uso y viento de presión sobre la cubierta. Para el caso del forjado mixto convencional con viguetas, se ha incluido una carga muerta adicional de 0.15kN/m² que representa el peso de las láminas de madera que actúan como encofrado perdido.

Para considerar la viabilidad estructural de cada uno de los diseños se han fijado 2 criterios diseño: El agotamiento de las secciones siguiendo los criterios de diseño del *Eurocódigo 5* en Estado Límite Último; y el límite de flecha, de 95 mm (33/350), para la combinación cuasi-permanente.

6.3. Descripción de las alternativas propuestas

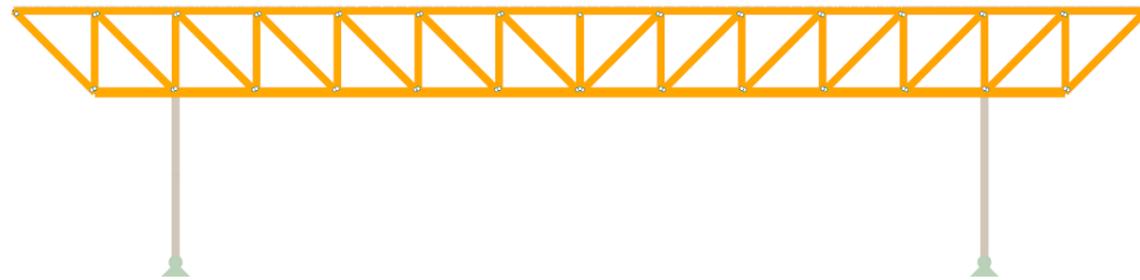
En el siguiente apartado, se describen cada una de las alternativas escogidas.

Alternativa 1: Cercha Unidireccional

Esta solución se compone de cerchas planas sucesivas tipo Pratt, en las que las diagonales trabajan a compresión. Los montantes están separados entre sí a una distancia de 3.3 metros. La distancia entre las directrices del cordón superior e inferior es de 3.3 metros, de manera que las diagonales forman un ángulo de 45° con la horizontal siempre y miden 4.67 metros.

Cada una de las cerchas está dispuesta separada a una distancia de 5,55 metros de la inmediatamente posterior. Están unidas por correas de atado superiores e inferiores. Todos los perfiles son piezas de madera rectangulares no esbeltas.

Imagen 7. Diseño conceptual de la alternativa 1: Cercha unidireccional



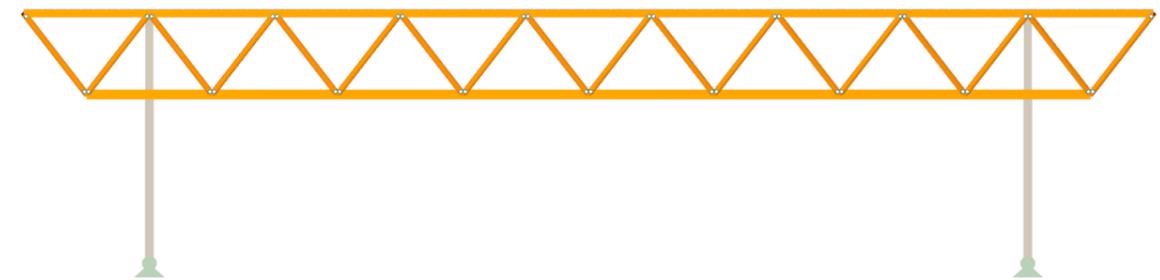
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

Alternativa 2: Cubierta Espacial

En este caso, la cubierta está compuesta por una malla bidimensional. Las diagonales conectan nudos del cordón inferior con el nudo del cordón superior inmediatamente anterior y posterior al mismo. La separación entre cordones inferiores es de 5,55 metros, y la separación de entre los sucesivos nudos de un mismo cordón es de 4,74 metros. Por ello la longitud total de los elementos que conforman las diagonales es de 4.96 metros.

Los perfiles que conforman los cordones y las correas de atado, tanto inferior y superior, están conformados por perfiles de madera rectangulares. Las diagonales por el contrario al estar solicitadas a flexión esviada se han escogido perfiles de sección circular.

Imagen 8. Diseño conceptual de la alternativa 2: Cubierta espacial



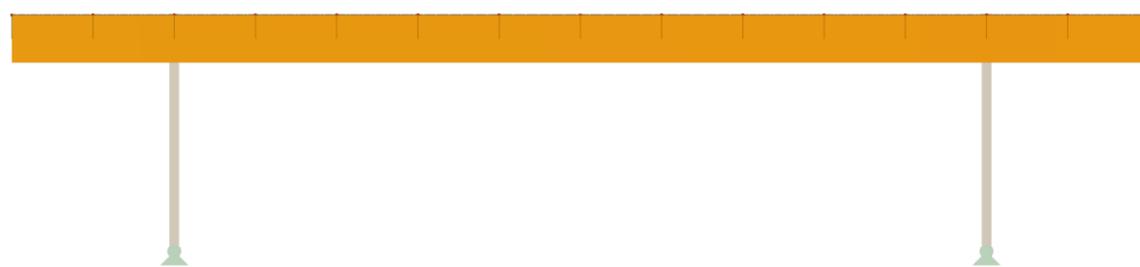
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

Alternativa 3: Vigas de Gran Canto

Esta alternativa emplea vigas de gran canto simplemente apoyadas sobre las fachadas longitudinales. Se trata de un entramado de vigas ortogonales. Las vigas que conforman el pórtico principal de la estructura tienen un canto de 2,04 metros. Las correas de atado por otra parte tienen unas dimensiones más estándar. Ambas tienen una sección rectangular.

La separación entre piezas de gran canto en la dirección longitudinal es de 5 metros. En la otra dirección, la separación entre correas es de 3.3 metros.

Imagen 9. Diseño conceptual de la alternativa 3: Vigas de gran canto



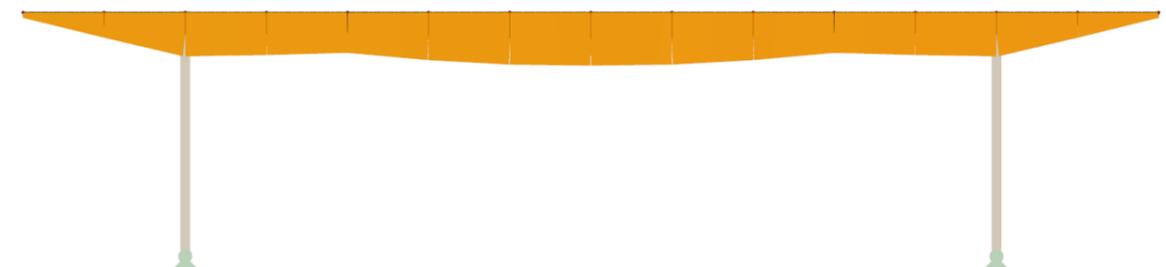
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

Alternativa 4: Vigas de Canto Variable

La última de las soluciones propuestas es similar a la alternativa 3 de vigas de gran canto, con la misma separación y disposición entre vigas y correas. La única diferencia que hay es que el canto de las vigas varía a lo largo de la directriz.

El canto de la viga varía siguiendo el antifunicular de las cargas. En la sección en el centro de luz la sección del perfil tiene un canto de 2,3 metros, mientras que en el extremo tan solo es de 220 metros.

Imagen 10. Diseño conceptual de la alternativa 4: Vigas de canto variable



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

6.4. Solución adoptada

Con los resultados de los diferentes modelos se ha realizado un análisis multicriterio para determinar cuál será la tipología estructural para emplear, así como el sistema de forjado. En el análisis multicriterio ha considerado factores tales como el peso, el precio, la estética o el comportamiento estructural.

En cuanto a los **sistemas de forjados**, está claro que los forjados convencionales, a pesar de requerir un esfuerzo adicional durante su ejecución, son más baratos que los forjados mixtos de CLT. Además, no presentan ningún tipo de ventaja significativa en términos estructurales o visuales, aunque sean una solución prefabricada fácil de ejecutar en obra.

Si bien por **criterios económicos** la solución más interesante podría parecer la cercha unidireccional convencional, sin embargo, la diferencia en términos económicos tan solo asciende a un 16%.

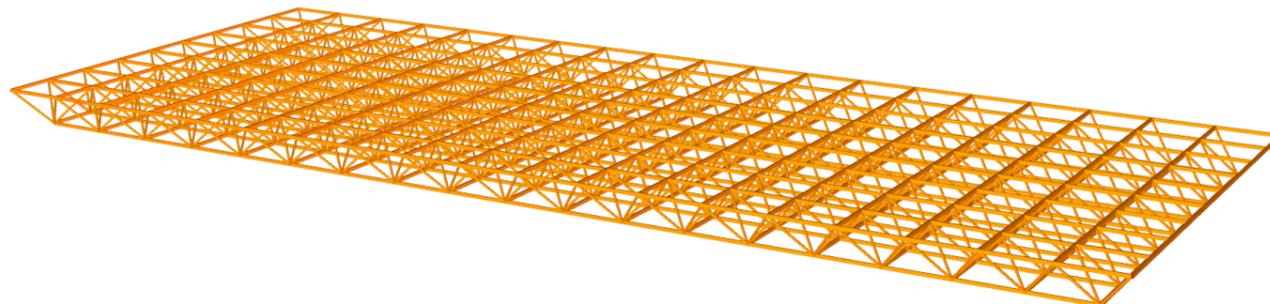
En cuanto al **criterio estructural**, Las tipologías de cerchas, tanto unidireccional como espacial, aprovechan mejor los materiales. Es por eso, que la ratio de diseño de la estructura ronda el 100% en ambas alternativas. Por otro lado, las flechas se encuentran siempre en valores muy por debajo de los máximos permitidos, por lo que la deformación no será un problema. No obstante, hay una diferencia significativa entre el comportamiento estructural de una cercha unidireccional y una cubierta espacial. Estas últimas, está comprobado, tienen un comportamiento global mucho más dúctil, que las cerchas unidireccionales, debido a su hiperestaticidad. Estas estructuras aprovechan la bidireccionalidad para redistribuir los esfuerzos, en caso de que algún elemento o unión falle, cualidad muy deseable en aquellas estructuras sometidas a situaciones accidentales de sismo.

Si nos centramos en las alternativas en **términos de peso**, las alternativas de gran canto son entre un 8 y un 15% más pesadas. Una estructura más liviana reduce las cargas transmitidas a la plataforma y al terreno, por lo que se han favorecido las alternativas tipo cercha y malla.

En cuanto a la **percepción visual**, las cerchas espaciales, quizás por ser menos frecuentes suelen llamar más la atención del usuario y sin embargo sigue siendo una solución tan diáfana como la cercha unidireccional. Las soluciones de gran canto suelen también ser muy atractivas por la simplicidad de los elementos que los componen.

Finalmente, **la solución adoptada ha sido la alternativa 2.a Cubierta Espacial** —es decir, la solución de cubierta espacial con forjado mixto convencional de viguetas de madera y capa de compresión de hormigón—.

Imagen 11. Cubierta espacial con forjado mixto convencional de viguetas



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

Aunque las soluciones en cercha parezcan igualmente competitivas y más baratas que la malla octaédrica, la mayor hiperestaticidad de esta última, ha cobrado mucho peso por tratarse de una estructura solicitada a acciones importantes de sismo.

7. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN EN MADERA ADOPTADA

La solución adoptada es una malla espacial octaédrica plana con elementos de madera, que describe una geometría análoga a la cubierta metálica de referencia. La cubierta se ha diseñado partiendo de las conclusiones obtenidos del estudio de soluciones. Para cerrar la superficie cuenta con un forjado mixto de madera y hormigón que protege a los usuarios de la intemperie.

El encaje de la estructura, así como la descripción de cada una de las unidades estructurales que la componen se explica en detalle en el **ANEJO Nº3: DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL. CUBIERTA DE MADERA**. En él también se muestran las comprobaciones realizadas para dimensionar cada uno de los componentes.

7.1. Materiales

La estructura consta de perfiles de madera laminada y un forjado mixto convencional madera-hormigón. Los elementos de madera laminada se han diseñado con las siguientes características mecánicas.

Madera Laminada GL24h: EN 14080:2013-08

$E = 11500 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad paralelo a las fibras
$E = 300 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras
$G = 650 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 420 \text{ kg/m}^3$	Densidad

$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a flexión
$f_{t,0,k} = 19.2 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión
$f_{t,90,k} = 0.5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión perpendicular
$f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a compresión
$f_{c,90,k} = 2.5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a compresión perpendicular
$f_{c,90,k} = 2.5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a cortante

Los elementos que componen el forjado de chapa colaborante mixto cuentan con:

Acero estructural B 500 S: EN 10025-2:2004-11 para la malla electrosoldada.

$E = 200000 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad
$G = 80769,2 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\nu = 0,3$	Coefficiente de Poisson
$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$	Densidad

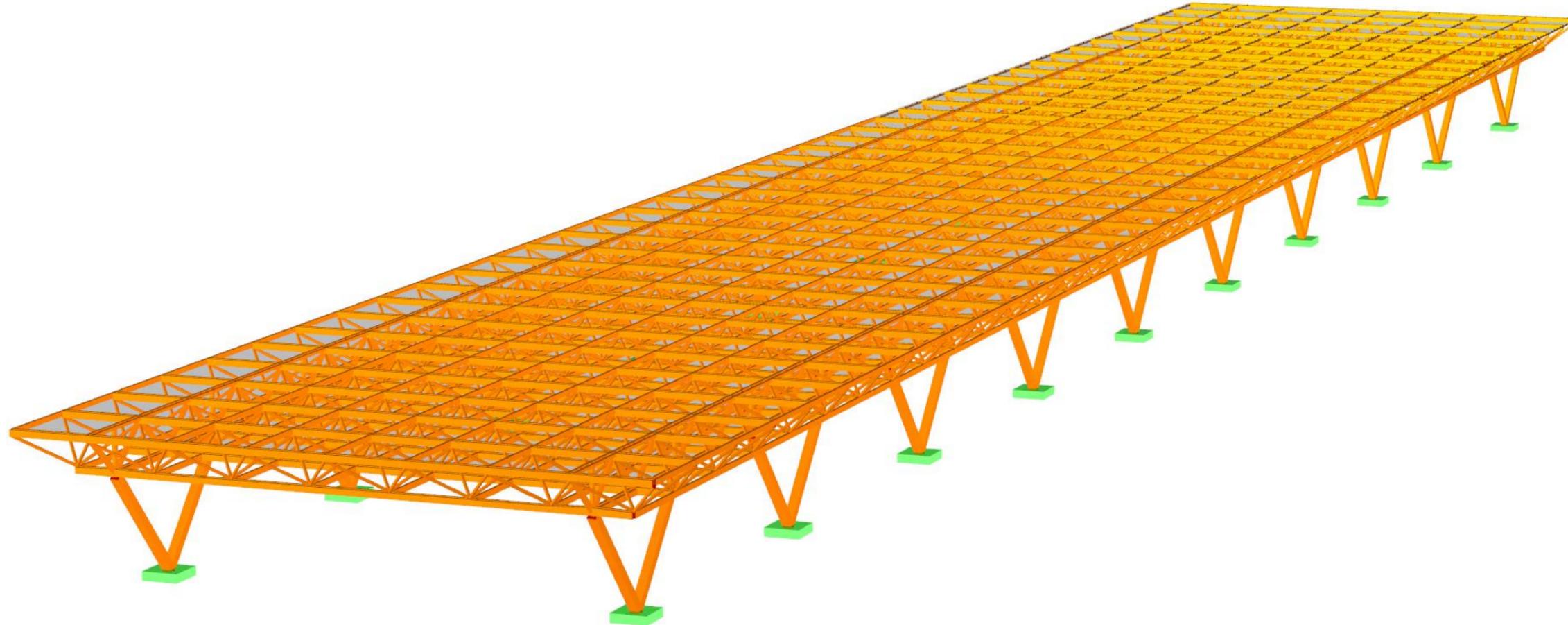
Hormigón aligerado C35/3: EN 1992-1-1:2004/A 1:2014 para la capa de compresión.

$E_{cm} = 18000 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad
$G = 7500 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\nu = 0,2$	Coefficiente de Poisson
$\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$	Densidad

7.2. Descripción general de la estructura

A continuación, se muestra el modelo extruido de la estructura finalmente proyectada.

Imagen 12. Propuesta en madera para la cubierta ligera de la Estación Observatorio.



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

La estructura sigue el mismo esquema de funcionamiento que la cubierta ligera metálica diseñada por SENER. De la misma manera que la anterior, se diferencian dos partes, una cercha espacial y un pórtico lateral, sobre la que apoya.

La cercha espacial consiste en una malla de dos capas octaédrica, en el que el entramado superior e inferior está conformado por vigas rectangulares, mientras que las diagonales tienen un perfil circular. El ancho útil de la malla espacial entre la cara inferior del entramado y la cara superior del entramado de vigas superior es de 3,3m.

Los pórticos laterales constan de unos soportes inclinados que convergen en cada uno de los puntos de apoyo disponibles en la plataforma. Los puntos de apoyo están separados a una distancia de 25 metros cada uno en la dirección longitudinal y coinciden con las costillas de hormigón de la plataforma —Excepto el último que está separado a una distancia de 29,25 metros—.

Los soportes inclinados de la fachada están atados mediante una cercha, que solidarizan el conjunto la fachada y permiten un apoyo continuo de la cubierta.

Los pórticos transversales salvan una luz de 33 metros y se extienden 5,5 metros, en cada extremo. Los voladizos no solo ofrecen una mayor superficie de cobertura, sino que además cumplen una función estructural importante, centrando los esfuerzos sobre los pilares y compensando la flecha total en el centro de luz.

El gálibo entre la base de los soportes y la cara inferior del cordón inferior de la cubierta es de 7,4 metros. El material empleado para la estructura es la madera laminada GL24h. Aunque se podría haber resuelto con calidades de maderas más competentes, para asegurar su suministro se ha utilizado esta resistencia característica tan habitual en el ámbito comercial. Además, por el tamaño de la mayoría de los perfiles se descarta el uso de madera aserrada.

8. ANÁLISIS COMPARATIVO

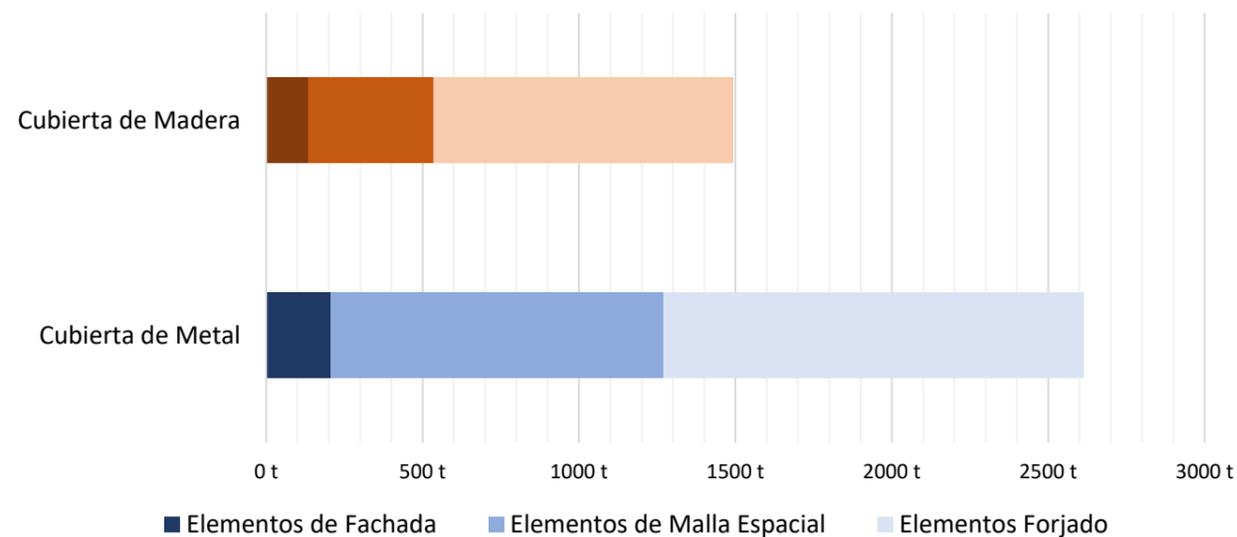
Una vez descritas cada una de las soluciones, con sus respectivos modelos estructurales, se ha procedido a comparar su respuesta atendiendo a diferentes criterios. Los aspectos para considerar han sido la respuesta estructural frente a sismo, el impacto sobre la huella de carbono, así como la viabilidad económica de cada una de las propuestas. Aunque se van a considerar otros aspectos como la estética, van a quedar fuera de este análisis comparativo por estar sujetos a cierto subjetivismo por parte del cliente o proyectista.

Para abordar este apartado primero se va a comparar el peso de ambas estructuras y más adelante se analizará cada uno de los criterios considerados determinantes —Respuesta frente a sismo, impacto de la huella de carbono y economía.

8.1. Peso de los elementos estructurales

Un primer criterio para obtener una visión comparativa global es el peso. Si bien el peso de una estructura no va a influir en sí no va a ser determinante, el peso tiene una influencia significativa en el resto de los criterios que se van a considerar.

Gráfica 1. Resumen de pesos (t)



Fuente: Elaboración propia.

Tal y como arrojan los resultados, la cubierta de madera es más 1 vez y media más liviana que la de metal. Se puede ver que la mayor reducción de peso se encuentra en los elementos que conforman la malla. Al emplear elementos de madera el peso global de la estructura disminuye considerablemente.

8.2. Respuesta frente a sismo

En el siguiente apartado se describen y comparan los resultados obtenidos del análisis sísmico de ambas estructuras. El cálculo frente a sismo de la estructura se ha desarrollado en detalle en el ANEJO N°4: ESTUDIO COMPARATIVO. LA RESPUESTA FRENTE A SISMO.

Para comparar la respuesta frente a sismo se van a comparar las fuerzas equivalentes resultantes, los desplazamientos máximos, los cortantes basales y las reacciones en los apoyos que provoca cada espectro de diseño. En el análisis se han calculado los resultados para todos los espectros de diseño —para los diferentes coeficientes sísmicos—, sin embargo, los resultados de referencia que se utilizarán serán los de Q=2.

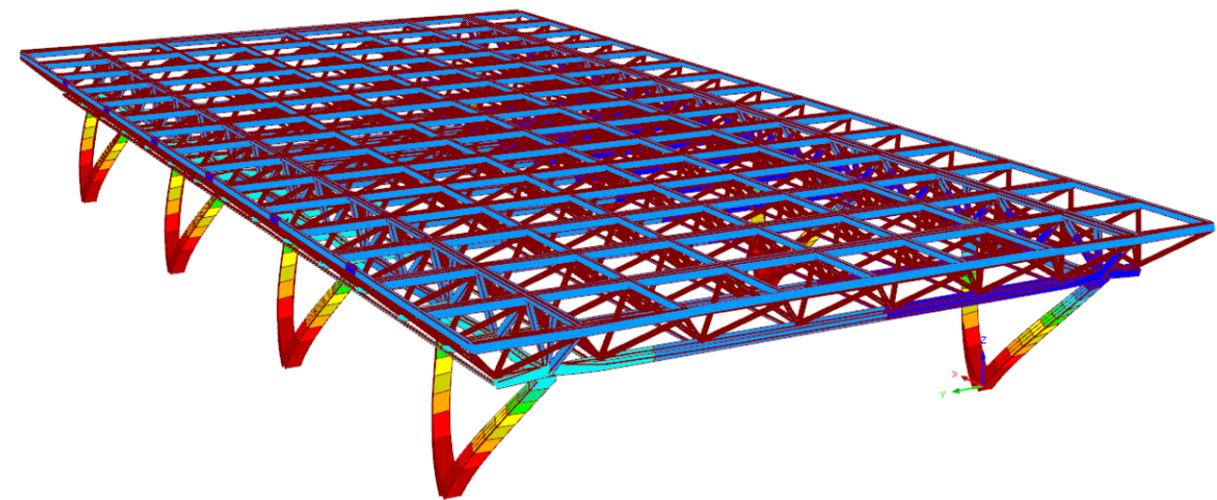
8.2.1 Descripción de los modelos

Para realizar el análisis de respuesta frente a sismo, se han elaborado dos modelos simplificados con RFEM de cada una de las estructuras, de madera y de metal, y se ha llevado a cabo un análisis dinámico multimodal.

Cada uno de los modelos en vez de salvar 9 vanos se ha reducido a tan solo 3 de ellos, de esta manera se ha reducido considerablemente el esfuerzo computacional. Se va a considerar como válida esta simplificación, porque los periodos fundamentales más relevantes que provocan inestabilidades en la estructura actúan en dirección transversal de la misma. Las oscilaciones en la dirección longitudinal de la estructura no se van a considerar críticas, por lo que no serán objeto de este análisis.

Primero, se ha caracterizado el sismo y se han obtenido cada uno de los espectros de diseño. Para ello, se ha utilizado la base de datos del SASID⁶ (Sistema de Acciones de Sísmicas de Diseño). Más adelante se han obtenido los modos de vibración de cada modelo y se ha identificado aquel que más masa moviliza en la dirección transversal. Por último, se han obtenido las combinaciones de fuerzas equivalentes y se ha realizado un cálculo no lineal de la estructura con las mismas.

Imagen 13. Modelo simplificado de la cubierta de madera



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

⁶ Fuente: <https://saside.unam.mx/webNormasCDMX/default.aspx>

8.2.2 Resultados del análisis

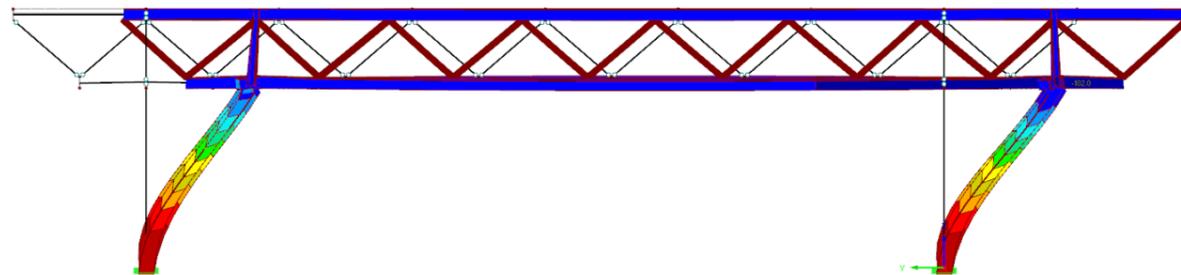
A continuación, se muestran los resultados del análisis comparativo, para un espectro sísmico de diseño $Q=2$.

Tabla 1. Resumen de resultados del estudio frente a sismo

	Cubierta de Madera	Cubierta Metálica	Variación %
Periodo Natural	1,25 s	1,48 s	-
Pseudo-aceleraciones	1,62 m/s ²	1,62 m/s ²	-
Masas Movilizadas	575.610,06 kg	1.383.281,21 kg	140%
Fuerzas Equivalentes	934,22 kN	2942,24 kN	215%
Desplazamientos Máximos	57,8 mm	81,8 mm	42%
Cortante Basal	850,88 kN	1.251,55 kN	47%
Reacciones Máximas Py máx	238,28 kN	373,69 kN	57%
Reacciones Máximas Mx co	583,6 kN.m	612,37 kN.m	5%

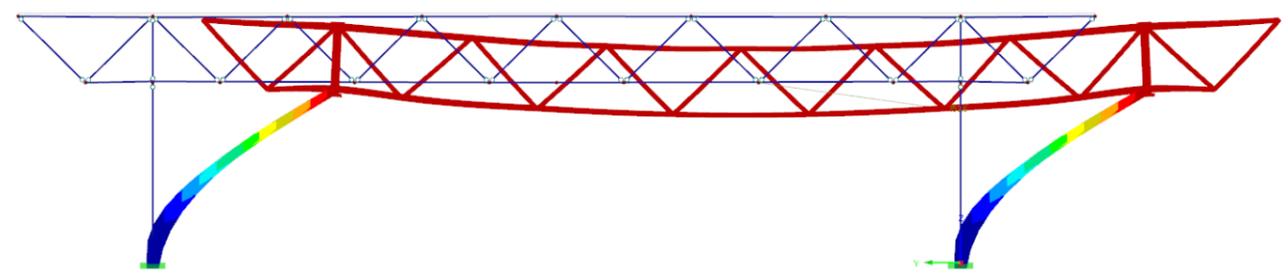
Fuente: Elaboración propia

Imagen 14. Deformada de la cubierta de madera



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

Imagen 15. Deformada de la cubierta de metálica



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

En el evento de un sismo:

- Las fuerzas en las que se traducirán las sacudidas sobre la cubierta son alrededor de 3 veces mayores en el caso de la cubierta metálica.
- Los desplazamientos transversales son del orden de un 40% más que en el caso de la estructura de madera.
- El cortante basal es un 47% mayor en el caso de la cubierta metálica.
- Los esfuerzos en los apoyos de la cubierta son un 67% menores en el caso de la cubierta de madera.
- Las combinaciones accidentales de sismo condicionan el diseño de los soportes inclinados de la estructura metálica, al contrario de la alternativa propuesta de madera.

Los resultados muestran que la estructura de madera tiene un comportamiento objetivamente mejor que la estructura metálica frente al evento de un sismo. Si bien ambas estructuras cuentan con periodos tipo muy parecidos, el mayor peso de los elementos que configuran la malla de la cubierta y que son movilizados durante el sismo penalizan mucho a la estructura metálica.

En conclusión, **la madera laminada como material estructural para estructuras de cubiertas no transitables de grandes luces (33m), presenta un comportamiento estructural mejor que el acero.**

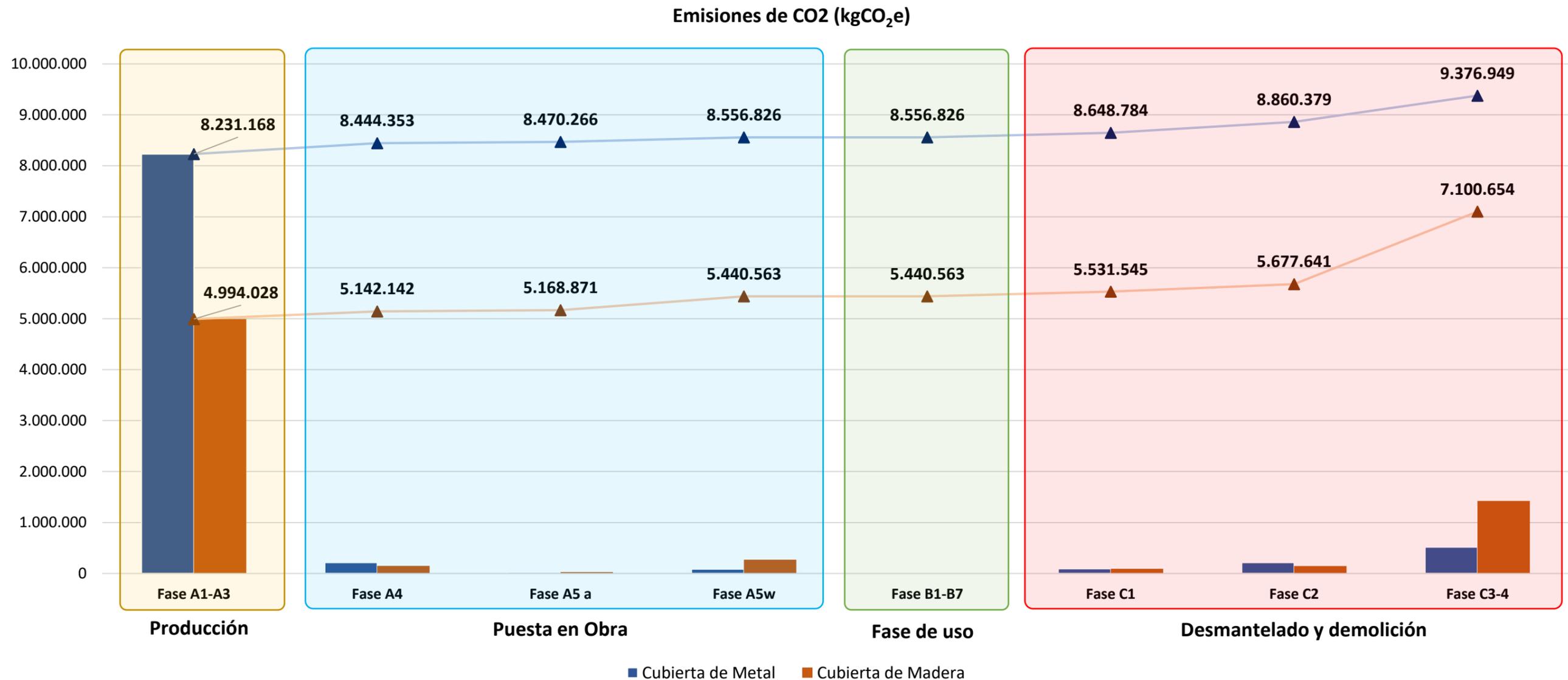
8.3. Impacto sobre la huella de carbono

El criterio empleado para comparar el impacto medioambiental entre la estructural de referencia metálica y la propuesta alternativa en madera serán los kg de dióxido de carbono emitido a la atmósfera. Para su determinación de forma objetiva se empleará el método descrito en la guía *How to Calculate Embodied Carbon* publicada por el organismo profesional de ingeniería estructural *The Institution of Structural Engineers*.

Los cálculos y metodología empleados están desarrollados en el ANEJO N°6: ESTUDIO COMPARATIVO. IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO. A continuación, se muestran los resultados.

A continuación, se muestran los resultados comparativos de ambas estructuras.

Gráfica 2: Comparación del impacto de la huella de carbono



Fuente: Elaboración propia

Al final de la vida útil la alternativa estructural en madera supone un impacto menor sobre la huella de carbono que la metálica. Emplear perfiles de madera para estructuras de grandes luces de madera reducen en un 25% las emisiones de dióxido de carbono emitidas a la atmósfera.

8.4. Viabilidad económica

Por último, se evaluará la economía de cada una de las propuestas, para ello se ha realizado unos presupuestos orientativos de cada propuesta. También se van a considerar otros aspectos como la financiación, ya que las estructuras con un cierto componente ecológico son cada vez más susceptibles de contar con ayudas por parte de diferentes organismos.

En el ANEJO Nº5: ESTUDIO COMPARATIVO. ANÁLISIS ECONÓMICO se han elaborado unos presupuestos aproximados. En él se definen cada una de las unidades de obra, se muestran las mediciones y se ha estimado el precio total de cada una de las propuestas.

8.4.1. Resumen de presupuestos

Los precios tipo se han obtenido a partir del generador de precios de Cype⁷. Esta base de datos de precios para la realización de presupuestos está principalmente preparada para analizar el mercado español y europeo de la construcción. Como nuestras alternativas están en México han debido realizarse ciertos ajustes para que los precios sean representativos de la realidad local.

A continuación, se muestran los resultados de la valoración de ambas estructuras, con ciertas consideraciones.

Tabla 2. Comparación de presupuestos

	Cubierta de Metal	Cubierta de Madera	Δ%
Transporte a Obra	7.920,00 €	3.465,00 €	-56%
Elementos de Fachada	372.771,46 €	353.450,84 €	-5%
Elementos de Malla Espacial	1.891.453,42 €	1.081.208,07 €	-43%
Elementos Forjado	1.992.875,41 €	2.956.532,96 €	48%
TOTAL:	4.265.020,28 €	4.394.656,86 €	3%

Fuente: Elaboración propia

En términos económicos, en lo que se refiere al coste de los materiales ambas estructuras son igualmente competitivas. La solución óptima, en términos de precio, vendrá determinada por decisiones en el diseño a un nivel de arquitectura o por cuestiones comerciales — por la posible variación en el precio de una unidad de obra en un determinado momento—.

8.4.2. Oportunidades de financiación

Teniendo en cuenta el actual contexto de emergencia climática y la agenda 2030 de desarrollo sostenible firmada por 193 miembros — entre los que se encuentra España y México— cabe preguntarse si no existen productos financieros para promover infraestructuras de transporte sostenible.

Se han revisado las diferentes fuentes de financiación de proyectos de infraestructuras que actúan en México. Primero se han mirado aquellos productos de organismos multilaterales como el Banco mundial a través de la Corporación Financiera Internacional (CFI), el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), a través de BID Invest, el Banco Europeo de Inversiones (BEI), el Banco de Desarrollo de América Latina (CAF), el Banco de Desarrollo de América del Norte (BDAN) o la Corporación Interamericana de Inversiones (CII) Banco Mundial.

Después se han revisado aquellos organismos nacionales que pueden proporcionar financiación a través fondos públicos nacionales del Gobierno Federal a través del Presupuesto de Egresos de la Federación (PEF), bancos de desarrollo como BANOBRAS, BANCOMEXT, NAFIN, FOCIR

Por último, se han revisado los productos de organismos españoles que ofrecen ayudas bilaterales para proyectos de infraestructuras como el Fondo para la Internacionalización de la Empresa (FIEM), la Compañía Española de Financiación del Desarrollo (COFIDES), la Compañía Española de Seguros de Crédito a la Exportación (CESCE)

Aunque muchos de ellos tienen cuentan con ayudas que incentivan la construcción sostenible, tanto reembolsables como no reembolsables, para proyectos de infraestructuras, no son aplicables a nuestro caso. Aunque casi todas las organizaciones cuentan con fondos verdes, hoy, todas estas ayudas están enfocadas a la mejora de la eficiencia energética durante la vida útil del edificio — es decir inversiones en sistemas de aislamiento, de eficiencia logística, de mejora del mantenimiento, etc.—. También hay ayudas dedicadas a promover una tala sostenible, pero no incluyen entre sus proyectos elegibles la promoción de infraestructuras de madera.

No obstante, en Europa ya están empezado a salir ayudas para la financiación de edificación de madera como sistema para combatir el cambio climático, y es cuestión de tiempo que estos productos alcancen el sector de las infraestructuras. Si hoy no existen ayudas para tal fin, se debe a que no existe todavía una base de datos suficientemente grande y fiable que permita servir de métrica para futuros proyectos y exigir unos niveles máximos de emisiones por proyecto. Sin embargo, los mecanismos ya están en marcha y seguramente veamos alguna cláusula parecida en un futuro no tan lejano.

En el momento en el que los organismos de financiación empiecen a incluir este máximo de emisiones generadas, los ayuntamientos empezarán a incluirlo en sus pliegos. Será en este momento que la madera comenzará a ser una alternativa atractiva en términos económicos. Hasta entonces será tan competitiva o incluso menos que el metal, para el caso de cubiertas de grandes luces.

⁷ Fuente: <http://www.generadordeprecios.info>

9. CONCLUSIONES

Tras realizar una evaluación comparativa, es fácil ver que ambas alternativas presentan un comportamiento muy parecido. A continuación, se muestra un resumen de los datos más representativos del estudio

Tabla 3. Resumen de Resultados

	<i>Alternativa Metálica</i>	<i>Alternativa de Madera</i>	<i>Comentarios</i>	
	Peso total	2614,2 t	1491 t	<i>La cubierta de madera es 1,75 veces más liviana</i>
Respuesta frente a sismo	Desplazamientos Máximos	81,8 mm	57,8 mm	<i>Frente a un evento de sismo los desplazamientos de la cubierta de madera son un 42% menores</i>
	Cortante Basal	1.251,55 kN	850,88 kN	<i>El cortante basal de la estructura de madera es un 53% menor</i>
	Reacciones Máximas Py máx	373,69 kN	238,28 kN	<i>Las reacciones máximas en los apoyos de la alternativa de madera son un 43% menores</i>
	Sostenibilidad	9.376.949 kgCO ₂ e	7.100.654 kgCO ₂ e	<i>El empleo de perfiles de madera reduciría hasta en un 24% la emisión de gases de efecto invernadero</i>
	Valoración Económica	4.265.020,28 €	4.394.656,86 €	<i>Ambas soluciones son igualmente competitivas en términos de precio.</i>
	Aspectos estéticos	-	-	<i>La alternativa metálica, a pesar de ser más pesada da una sensación de ser más diáfana y esbelta.</i>

Fuente: Elaboración propia

Si bien la alternativa propuesta en madera presenta un comportamiento significativamente mejor en cuanto a su respuesta estructural se refiere, en el resto de los ámbitos se mantienen en igualdad de condiciones.

Aunque la respuesta estructural sea mucho mejor la de madera, la falta de un histórico amplio de esta clase de estructuras espaciales en madera para grandes luces, nos impide evaluar con precisión los riesgos de ejecutar este tipo de estructuras. Por ello, y a pesar de ser teóricamente viable, la decisión de emplear un material u otro deberá decidirse a juicio del proyectista según su nivel de confianza.

En términos económicos, ambas estructuras son igualmente competitivas, la decisión de optar por una alternativa u otra atendiendo a este criterio va a depender de variables externas. Por un lado, de la oferta de materiales del mercado en un momento dado; y por otro, de aspectos estéticos, los cuales suele fijar el cliente.

Si bien puede parecer que una reducción del 24% de emisiones de CO₂ es un logro, cabe poner en contexto cada una de las cifras. Al fin y al cabo, un automóvil particular genera al año un equivalente de 7 toneladas de CO₂, un ahorro de 2 toneladas no debería considerarse significativo. El impacto relativo de la construcción de ambas estructuras es relativamente bajo, ya que generalmente el uso y explotación de un edificio lo que genera mayores emisiones de CO₂. Las cubiertas proyectadas no son más que un esqueleto estructural que permanecerá a la intemperie, sin más funciones que las de proteger al usuario de las inclemencias del tiempo y el sol.

El impacto ecológico de realizar una obra de esta envergadura en madera no debería cuantificarse por las toneladas de CO₂ que emite, sino por el efecto que tiene sobre el mercado. Al emplear la madera para una construcción tan icónica como es una estación de tren de una capital tan importante a nivel mundial como es México, comenzamos a normalizar el empleo de la madera no solo en edificación sino también en obra civil. Si se empieza a crear una *moda* de la madera y se empieza a trasladar la demanda de acero y hormigón por madera, es cuando verdaderamente estamos creando un impacto positivo sobre el medio ambiente. Después de todo vale más la pena plantar árboles que destruir montañas.

Si se crea una tendencia de construcción que fomenta la explotación forestal responsable y se incentiva la producción maderera, se está contribuyendo a la transición ecológica.

Además, y a propósito de lo mencionado anteriormente no hay que olvidar que lo ecológico vende. Hoy en día la responsabilidad corporativa de las empresas es algo que debe tenerse muy en cuenta y aunque el impacto ecológico real no sea mayor, la propaganda, el marketing si puede aprovecharse. Si en igualdad de condiciones una empresa va a poder obtener reconocimiento medioambiental de algún tipo, la balanza puede inclinarse sobre las elecciones en madera.

El trabajo devuelve una conclusión muy valiosa, el avance de la tecnología de las construcciones en madera ha hecho posible que para el caso de estructuras para grandes luces este material sea tan competitivo como el acero en este ámbito. Más competitivo si cabe, si esta estructura se encuentra solicitada a cargas de sismo significativas.

Por todo eso, la madera debería de dejar de considerarse como un material no convencional y alternativo, y empezar a considerarse en los estudios de viabilidad económica de las futuras grandes infraestructuras.

10. REFERENCIAS

10.1. Normativas y guías de diseño

- UNE-EN 1991-1. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras
- UNE-EN 1992-1: Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón
- UNE-EN 1995-1: Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero
- UNE-EN 1995-1: Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera estructural
- NTC: Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones.
- NTC: Normas técnicas complementarias para diseño por viento
- NTC: Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo
- How to Calculate Embodied Carbon publicada por el organismo profesional de ingeniería estructural *The Institution of Structural Engineers*
- *Design of timber structures Volume 1: Structural aspects of timber construction*. Edición 2:2016 publicada por Swedish Forest Industries Federation. Swedish Wood.
- *Design of timber structures Volume 2: Rules and Formulas*. Edición 2:2016 publicada por Swedish Forest Industries Federation. Swedish Wood.
- *Design of timber structures Volume 3: Examples*. Edición 2:2016 publicada por Swedish Forest Industries Federation. Swedish Wood.

10.2. Revistas y conferencias técnicas

- CAVIA SORRET, Pedro. *Las mallas espaciales y su aplicación en cubiertas de grandes luces*. Revista de edificación RE, número 15, septiembre de 1993.
- MAKOWSKI, Zygmunt Stanislaw. *Estructuras espaciales de acero*. Segunda edición. Editorial Gustavo Gili S.A. Barcelona. 1972. 208 páginas. ISBN 8425200806. Título original: *Steel space structures*. Verlag Stahliesen. Dusseldorf.
- MARTÍNEZ AZPETEGUIA, Juan. *Las mallas espaciales y su aplicación en cubiertas para estadios*. Informes de la construcción, volumen 33, número 333-334-335-336, 1981.
- UNIONES: UN RETO PARA CONSTRUIR CON MADERA. Discurso del Académico EXCMO. SR. D. Ramón Argüelles Álvarez. Leído en la sesión inaugural del año académico del día 26 de enero de 2010.
- GAYO CALO, Laura. *TFG Estudio comparativo de sistemas de rehabilitación en forjados de madera*. Universidad da Coruña. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. Departamento de Tecnología de la Construcción. Trabajo Final de Grado dirigido por M. Dolores Otero Chans. Julio 2015.

10.3. Catálogos

- *Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. TOMO I*. Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos. Comisión Nacional Forestal.
- *Fichas técnicas sobre características tecnológicas y usos de maderas comercializadas en México. TOMO II*. Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos. Comisión Nacional Forestal.
- *Madera contralaminada*, versión 12/2019. Editor y responsable del contenido: © KLH Massivholz GmbH
- *Building Physics*, versión 12/2019. Editor y responsable del contenido: © KLH Massivholz GmbH
- *Catálogo de elementos para la Industria de la construcción*, versión 12/2019. Editor y responsable del contenido: © KLH Massivholz GmbH
- *Forjados mixtos Madera-Hormigón*, versión 12/2019. Editor y responsable del contenido: © KLH Massivholz GmbH
- *Conexiones y fijaciones para Uniones CLT*. D/G-CLT ESP 20. SIMPSON Strong-Tie
- *Ficha Sector. Infraestructuras en México*. Oficina Económica y Comercial de España en Ciudad de México. ICEX España Exportación e Inversiones. Fecha de publicación 24/12/2020.

PLANOS

TRABAJO FINAL DE MÁSTER.
Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

TITULACIÓN: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR: David Sanchis García

TUTOR: Carlos Llopis Camps

CURSO: 2020-2021

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1. Condiciones de contorno. Sección transversal y alzado

PLANO 2. Cubierta de Madera. Encaje: Sección transversal y alzado

PLANO 3. Cubierta de Madera. Descripción general de la estructura

PLANO 4. Cubierta de Madera. Sección transversal

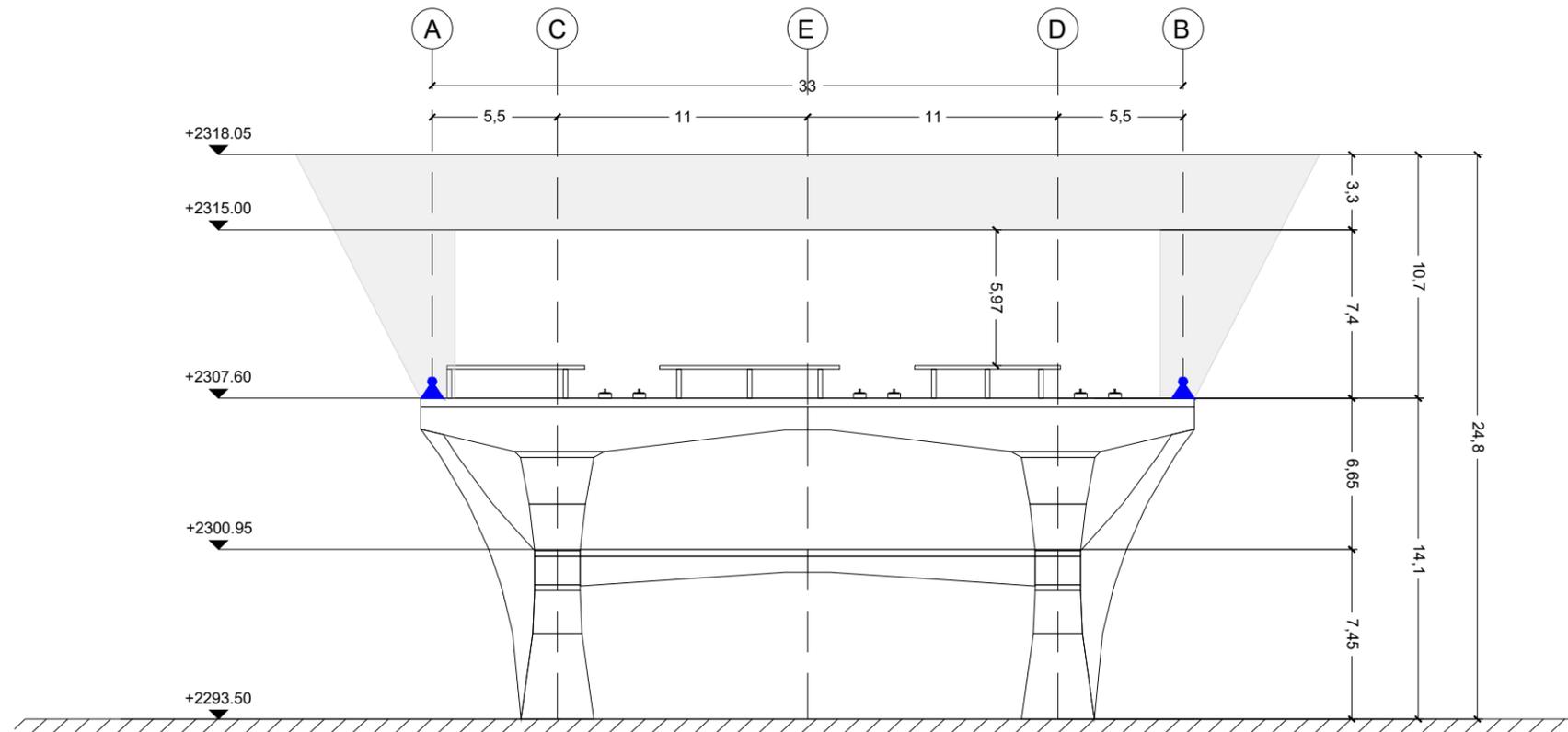
PLANO 5. Cubierta de Madera. Elementos de fachada. Alzado longitudinal

PLANO 6. Cubierta de Madera. Malla espacial. Alzado longitudinal

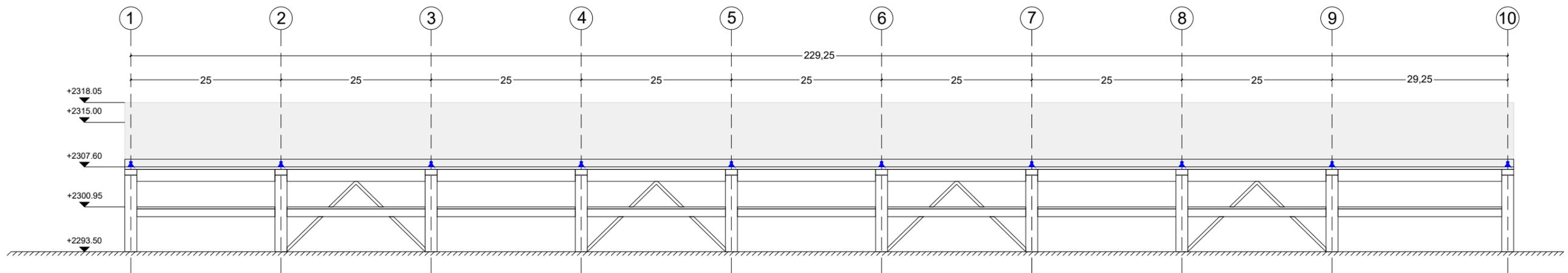
PLANO 7. Cubierta de Madera. Malla espacial. Entramado inferior.

PLANO 8. Cubierta de Madera. Malla espacial. Entramado superior

PLANO 9. Cubierta de Madera. Distribución de viguetas de forjado



1. Sección Transversal



2. Alzado Lateral

TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

TÍTULO DEL PLANO: Condiciones de contorno. Sección transversal y alzado

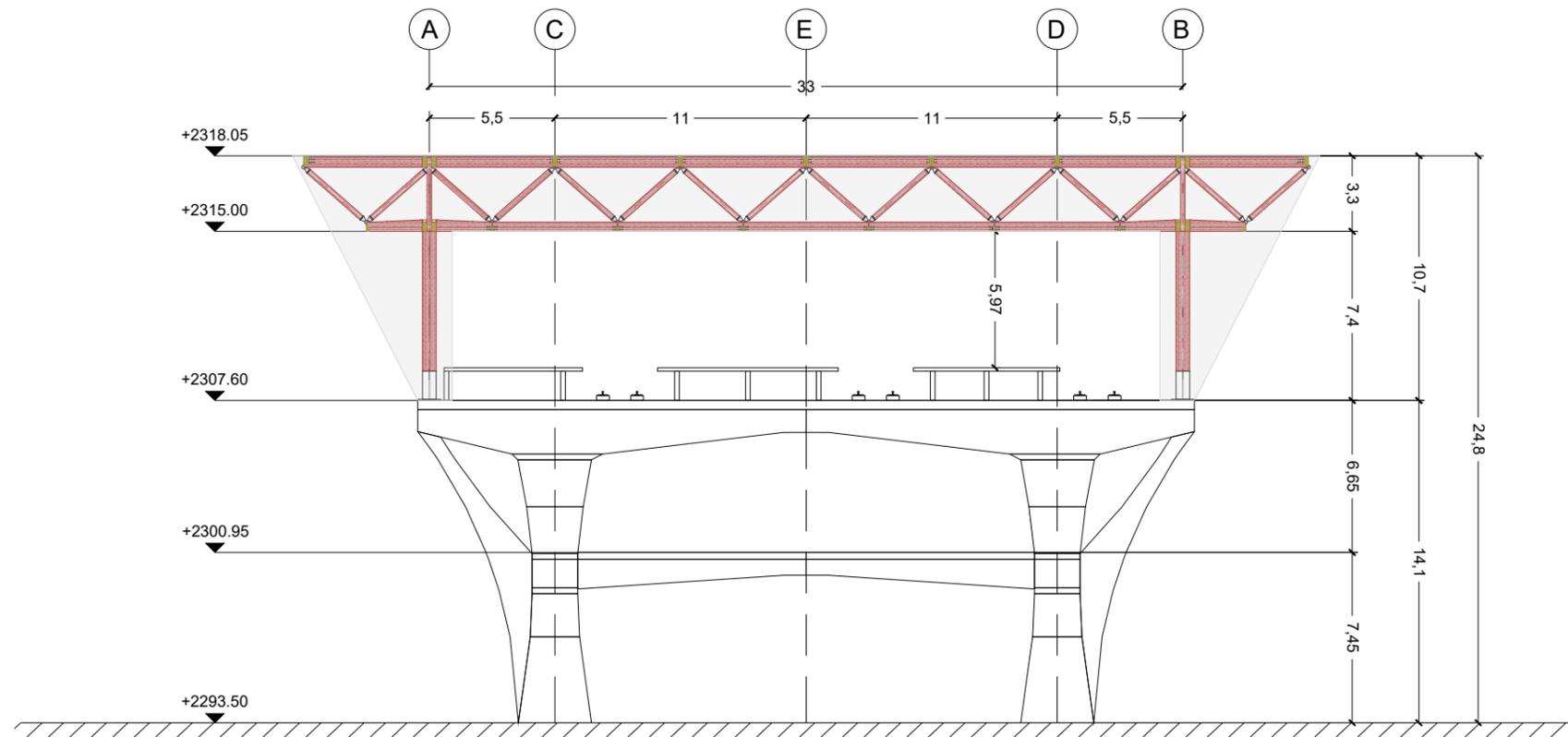
AUTOR: David Sanchis García

FIRMA:

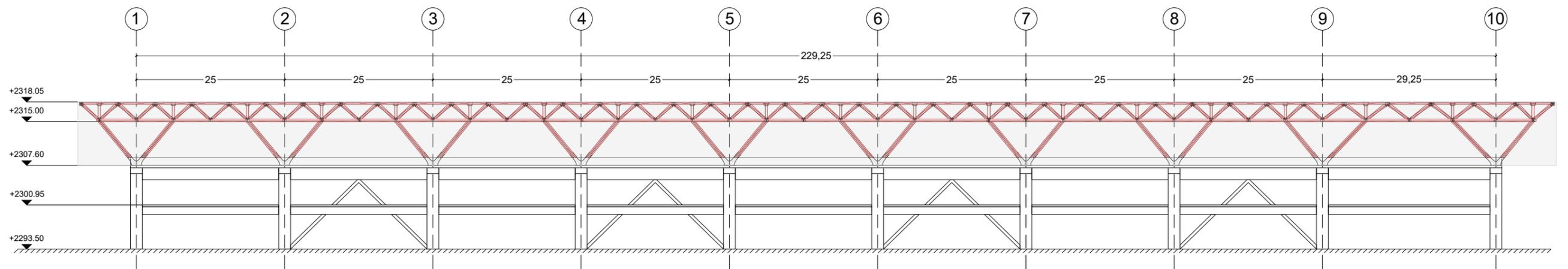
Nº PLANO: 1

FECHA: 05/05/2021





1. Sección Transversal



2. Alzado Lateral

TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

TÍTULO DEL PLANO: Cubierta de madera. Encaje: Sección transversal y alzado

AUTOR: David Sanchis García

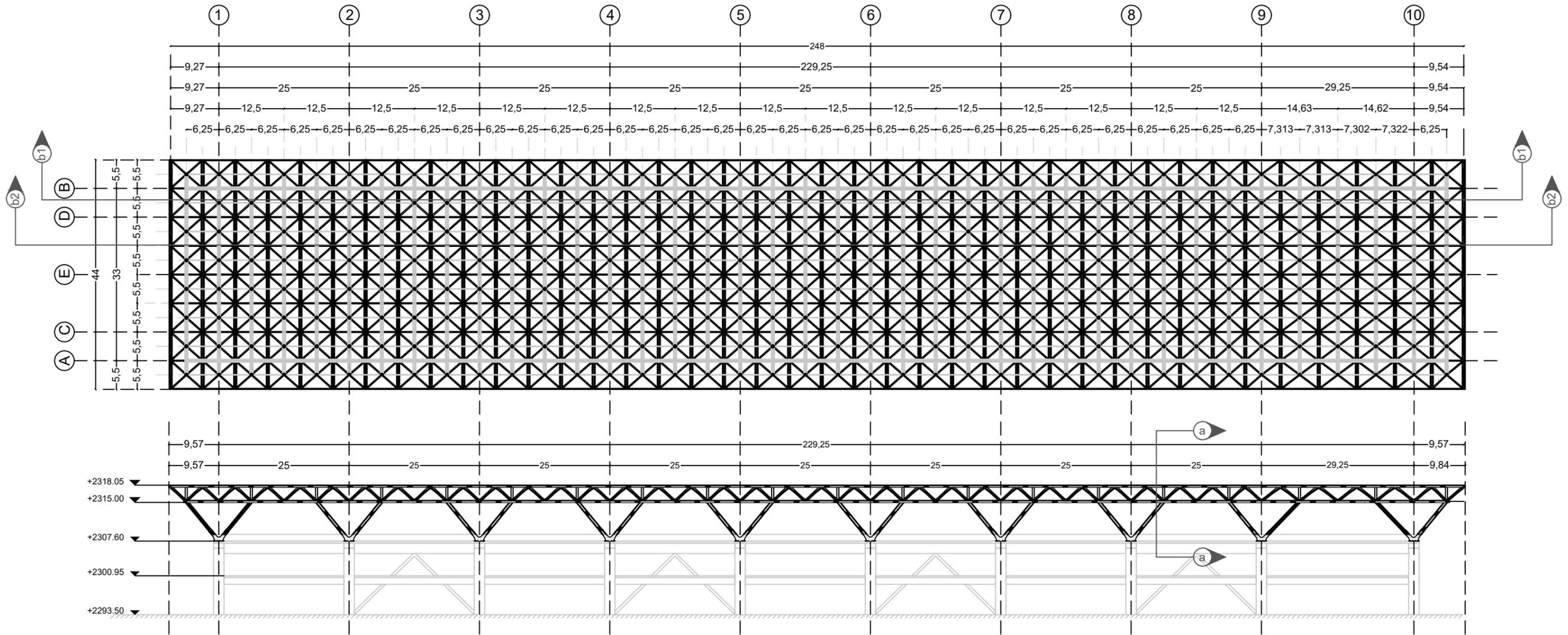
FIRMA:

Nº PLANO: 2

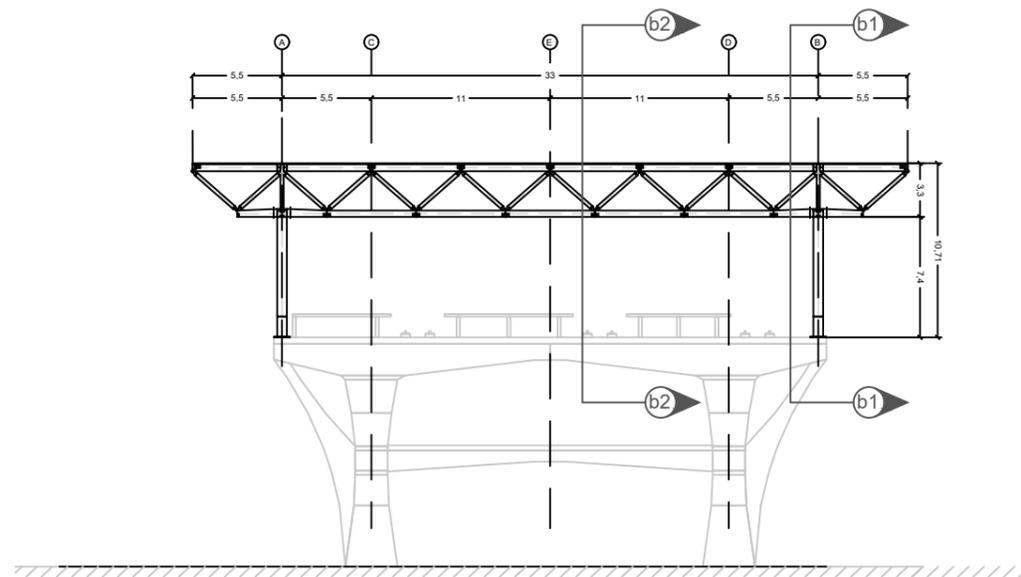
FECHA: 05/05/2021



Planta de Cubierta y Alzado Lateral 1:400



Sección Transversal 1:200



TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

TÍTULO DEL PLANO: Cubierta de madera. Descripción general de la estructura

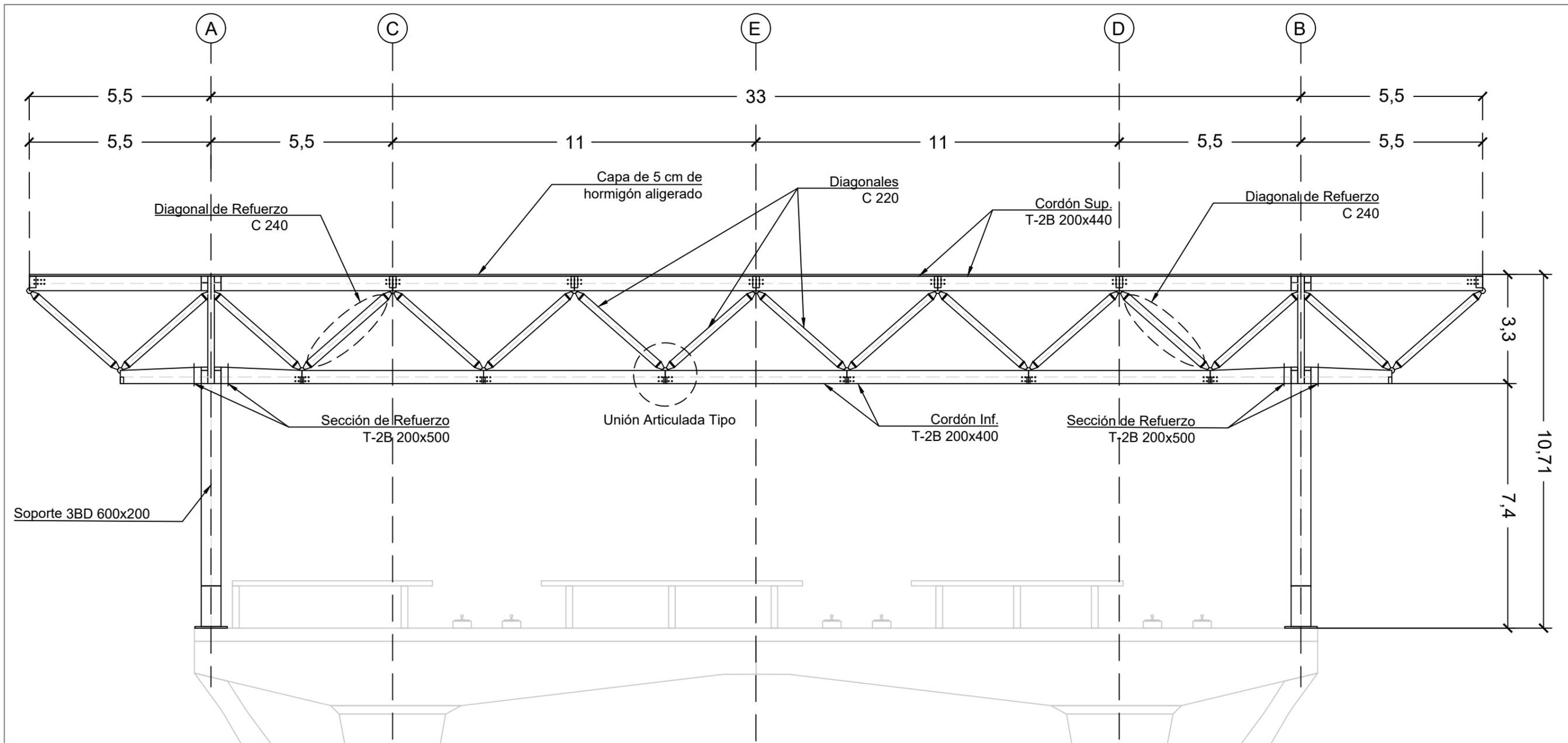
AUTOR: David Sanchis García

FIRMA:

Nº PLANO: 3

FECHA: 05/05/2021





Madera Laminada GL24h: EN 14080:2013-08

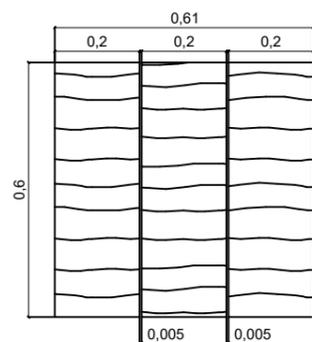
- E = 11500 N/mm² Módulo de elasticidad paralelo a las fibras
- E = 300 N/mm² Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras
- G = 650 N/mm² Módulo de elasticidad transversal

- $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ Coeficiente de dilatación lineal
- $\rho = 420 \text{ kg/m}^3$ Densidad

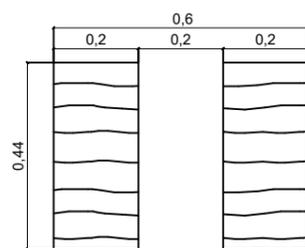
- $f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a flexión
- $f_{t,0,k} = 19,2 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a tensión
- $f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a tensión perpendicular
- $f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a compresión
- $f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ Resistencia caract. a compresión perpendicular
- $f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a cortante

Perfiles de Madera

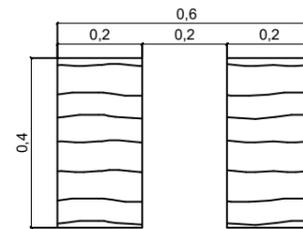
Perfiles Soportes de Fachada 3BD 600X200 1:10



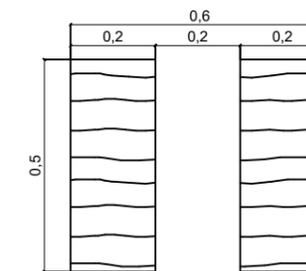
Cordón Superior de la Malla T2-B 200x440 1:10



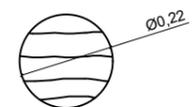
Cordón Inferior de la Malla T2-B 200x400 1:10



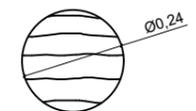
Cordón Inferior de la Malla Ref. T2-B 200x500 1:10



Diagonales de Cubierta C 220 1:10



Diagonales de Refuerzo C 240 1:10



TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

TÍTULO DEL PLANO: Cubierta de Madera. Sección transversal

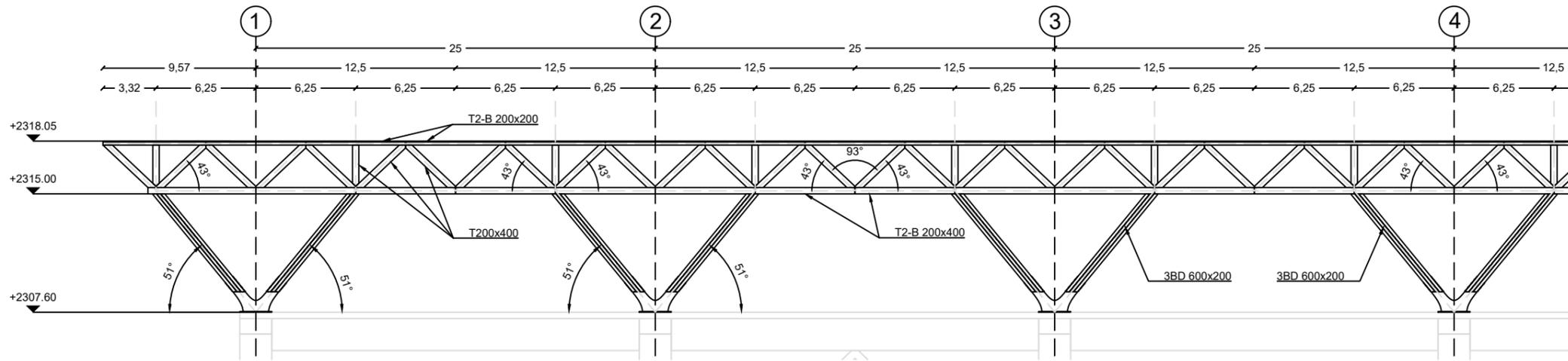
AUTOR: David Sanchis García

FIRMA:

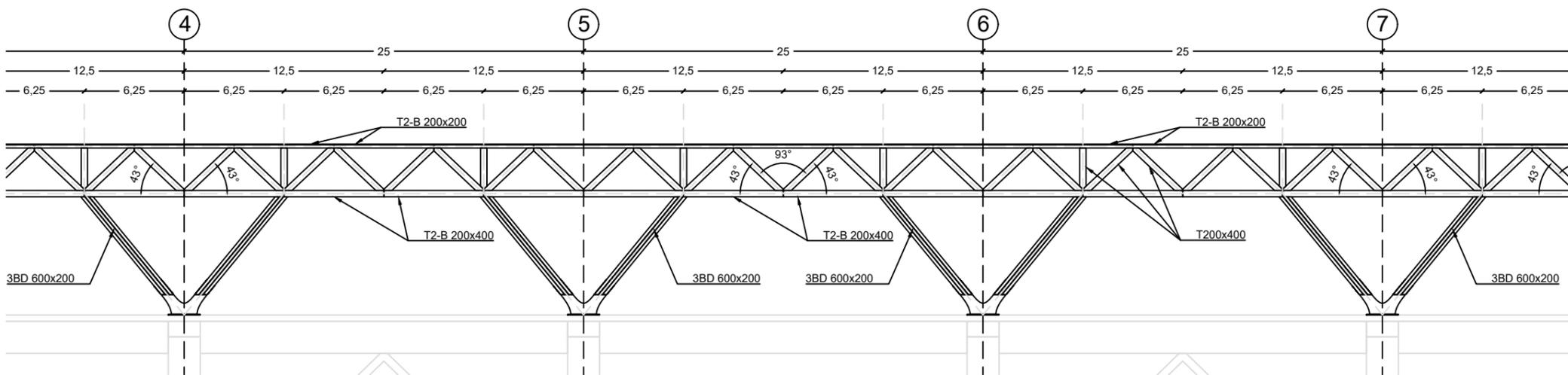
Nº PLANO: 4

FECHA: 05/05/2021

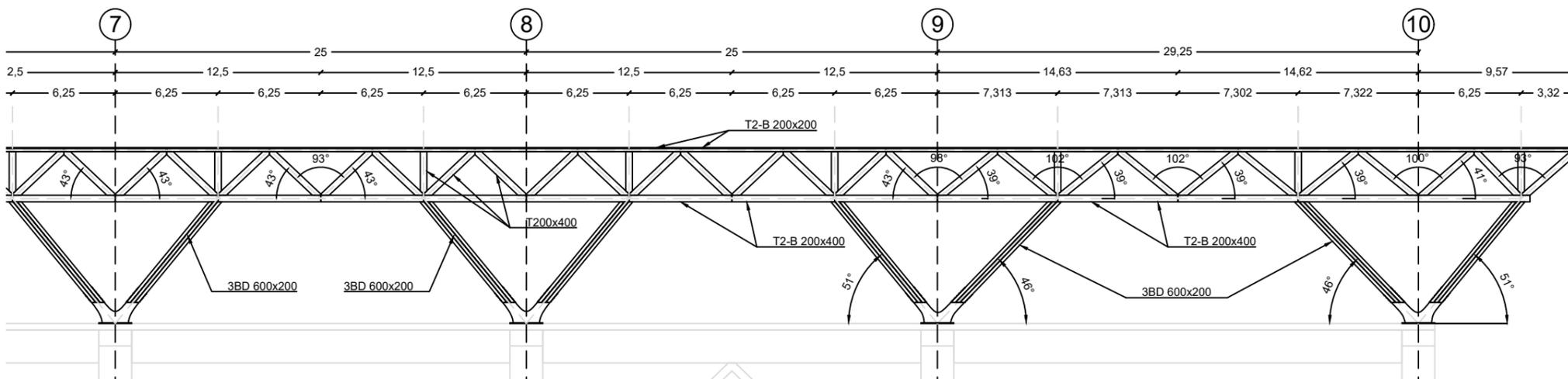




b1.1 Elementos de Fachada. Tramos Extremos Izquierdo 1 - 3 1:200



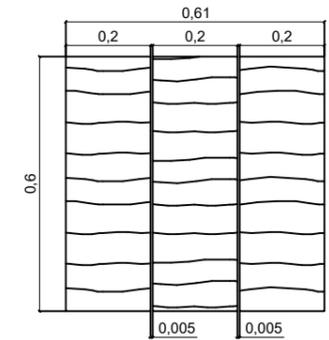
b1.2 Elementos de Fachada. Tramos Izquierdo 4 - 6 1:200



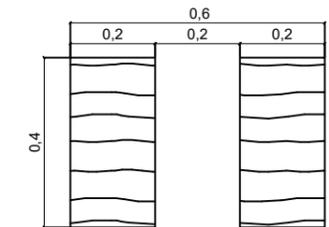
b1.3 Elementos de Fachada. Tramos Extremos Izquierdo 7 - 10 1:200

Perfiles de Madera

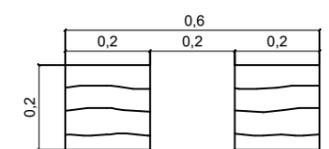
Perfiles Soportes de Fachada 3BD 600X200 1:10



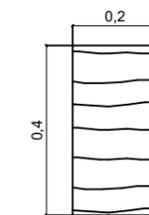
Cordones Inferiores de Fachada T2-B 200x400 1:10



Cordones Superiores de Fachada T2-B 200x200 1:10



Diagonales y montantes de Fachada T200x400 1:10



Madera Laminada GL24h: EN 14080:2013-08

$E = 11500 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad paralelo a las fibras
$E = 300 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras
$G = 650 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 420 \text{ kg/m}^3$	Densidad
$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a flexión
$f_{t,0,k} = 19,2 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión
$f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión perpendicular
$f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a compresión
$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia caract. a compresión perpendicular
$f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a cortante

TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

TÍTULO DEL PLANO: Cubierta de madera. Elementos de fachada. Alzado longitudinal

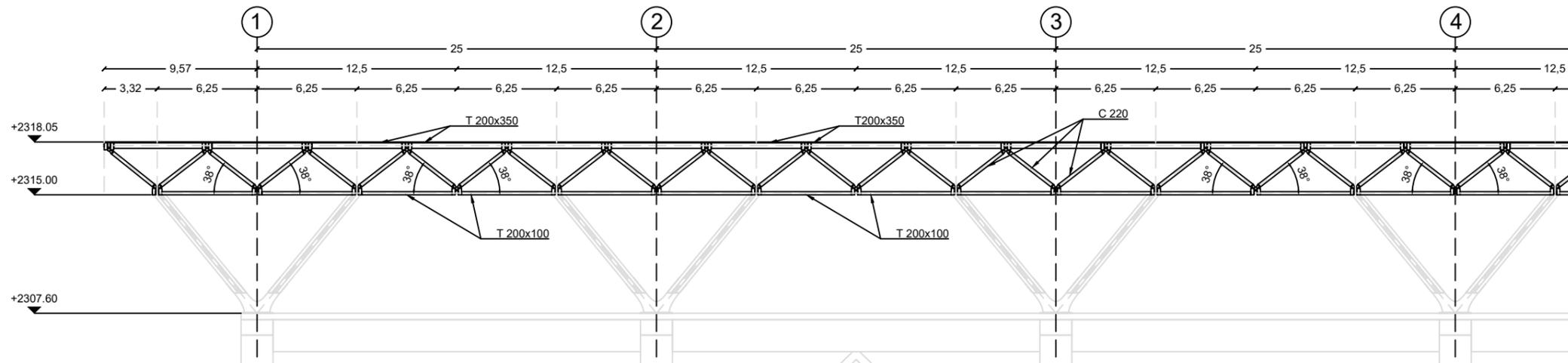
AUTOR: David Sanchis García

FIRMA:

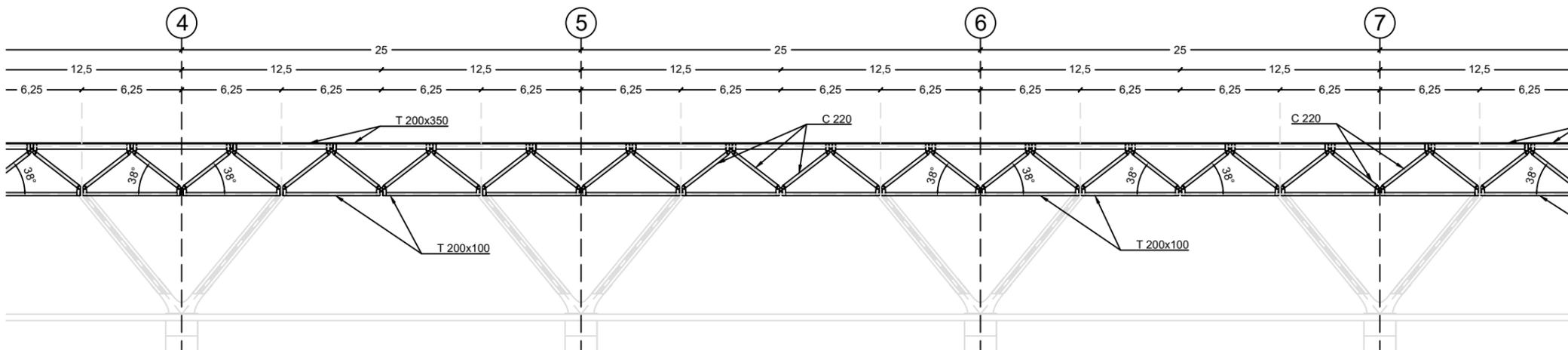
Nº PLANO: 5

FECHA: 05/05/2021

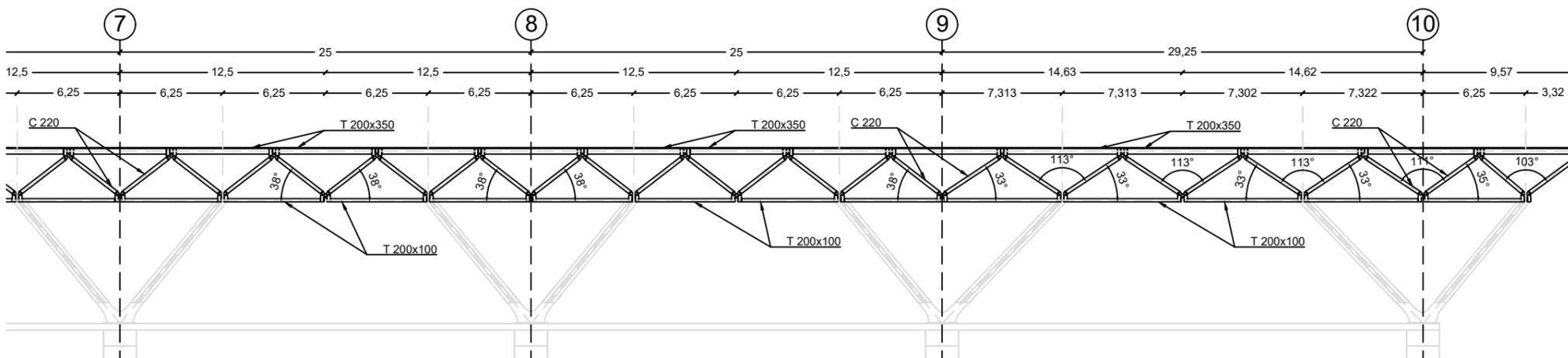




b2.1 Elementos de Cubierta. Tramos Extremos Izquierdo 1 - 3 1:200



b2.2 Elementos de Cubierta. Tramos Intermedios 4 - 6 1:200



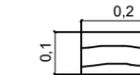
b2.3 Elementos de Cubierta. Tramos Extremos Izquierdo 7 - 10 1:200

Perfiles de Madera

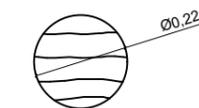
Perfiles Trabe Superior Malla Espacial T 200x350 1:10



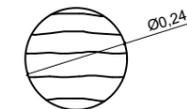
Perfiles Trabe Inferior Malla Espacial T 200x100 1:10



Diagonales de la Malla Espacial C 220 1:10



Diagonales de refuerzo de la Malla Espacial C 240 1:10



Madera Laminada GL24h: EN 14080:2013-08

- E = 11500 N/mm² Módulo de elasticidad paralelo a las fibras
- E = 300 N/mm² Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras
- G = 650 N/mm² Módulo de elasticidad transversal
- α = 1,2 · 10⁻⁵ °C⁻¹ Coeficiente de dilatación lineal
- ρ = 420 kg/m³ Densidad
- f_{m,k} = 24 N/mm² Resistencia característica a flexión
- f_{t,0,k} = 19.2 N/mm² Resistencia característica a tensión
- f_{t,90,k} = 0.5 N/mm² Resistencia característica a tensión perpendicular
- f_{c,0,k} = 24 N/mm² Resistencia característica a compresión
- f_{c,90,k} = 2.5 N/mm² Resistencia caract. a compresión perpendicular
- f_{v,k} = 3.5 N/mm² Resistencia característica a cortante

TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

TÍTULO DEL PLANO: Cubierta de madera. Malla espacial. Alzado longitudinal

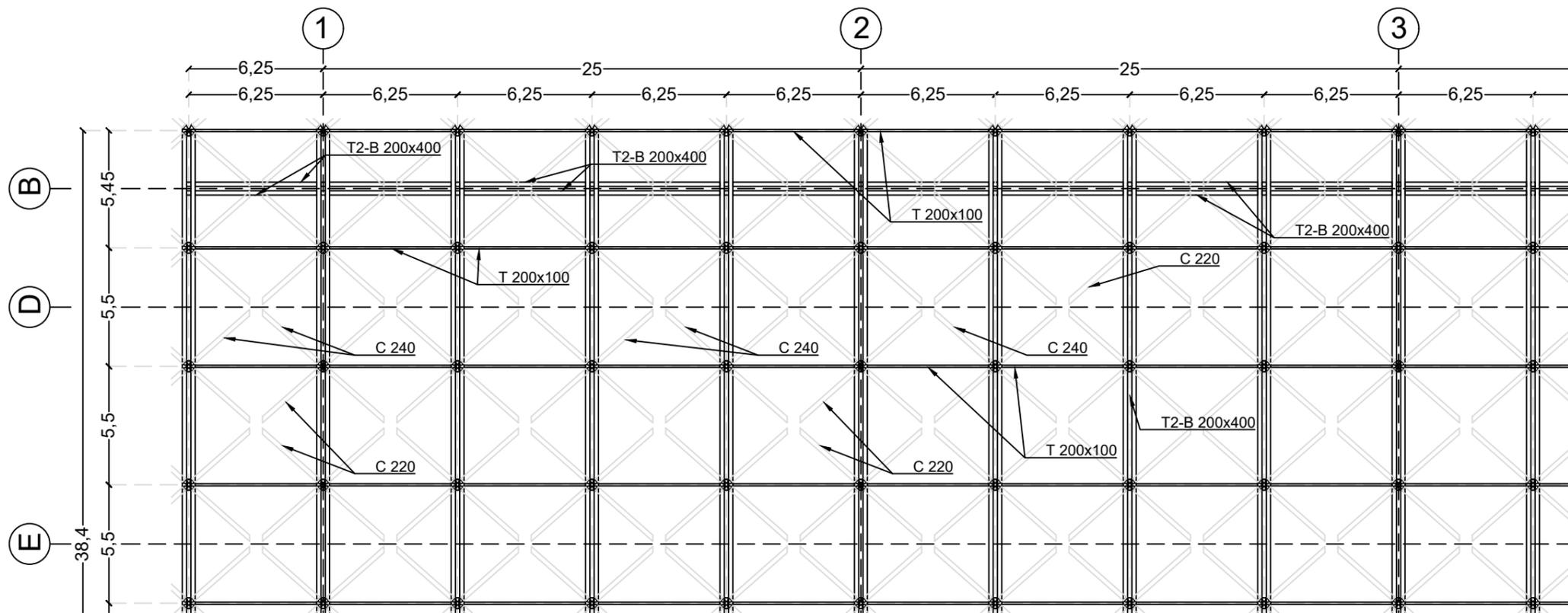
AUTOR: David Sanchis García

FIRMA:

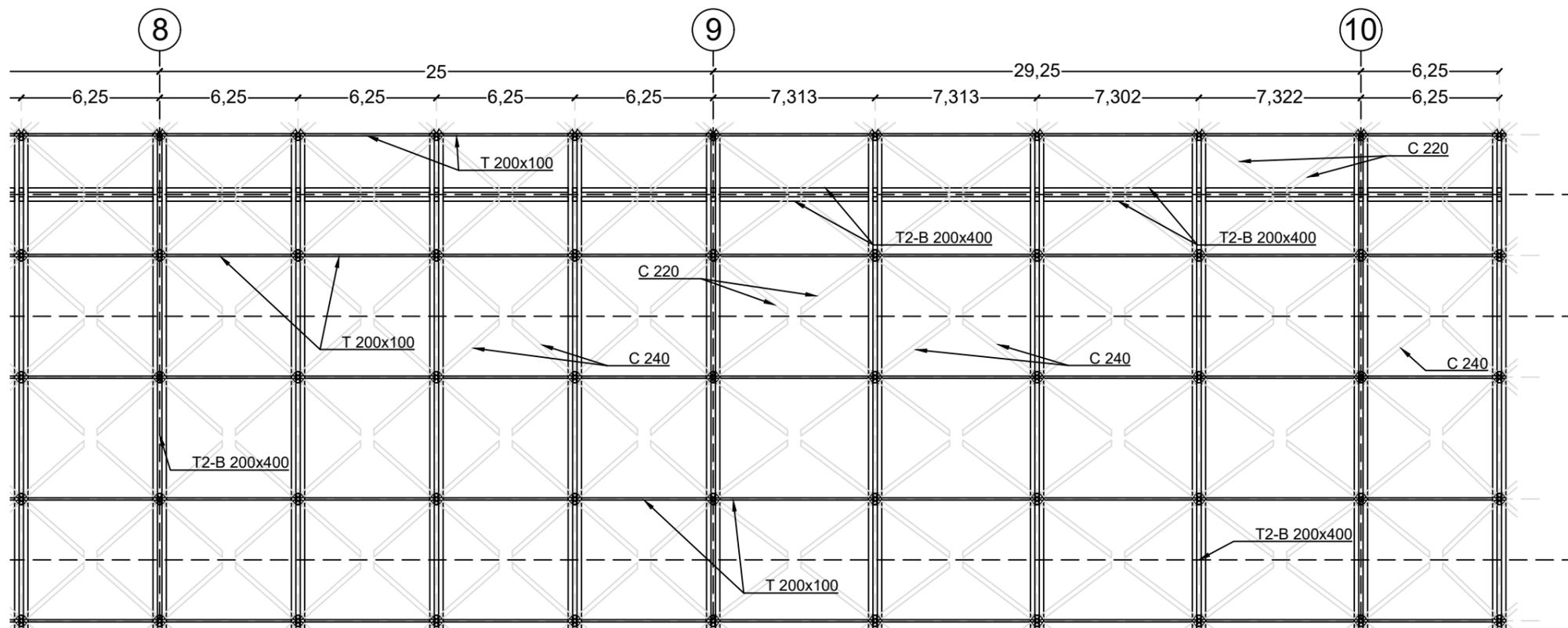
Nº PLANO: 6

FECHA: 05/05/2021





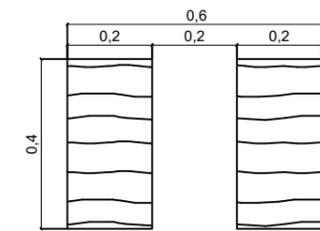
1. Detalle Entramado Inferior de Malla. Tramos Izquierdos 1 - 3 1:200



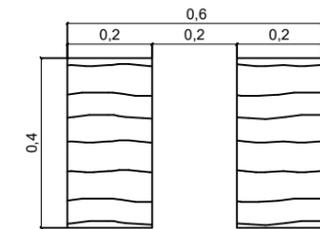
2. Detalle Entramado Inferior de Malla. Tramos Derechos 8 - 10 1:200

Perfiles de Madera

Cordones Superiores de Fachada T2-B 200x200 1:10



Cordones Inferiores de la Malla T2-B 200x400 1:10



Perfiles Trabe Inferior Malla Espacial T 200x100 1:10



Diagonales de la Malla Espacial C 220 y C 240 1:10



Madera Laminada GL24h: EN 14080:2013-08

$E = 11500 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad paralelo a las fibras
$E = 300 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras
$G = 650 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 420 \text{ kg/m}^3$	Densidad
$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a flexión
$f_{t,0,k} = 19.2 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión
$f_{t,90,k} = 0.5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión perpendicular
$f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a compresión
$f_{c,90,k} = 2.5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia caract. a compresión perpendicular
$f_{v,k} = 3.5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a cortante

TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

TÍTULO DEL PLANO: Cubierta de madera. Malla espacial. Entramado inferior

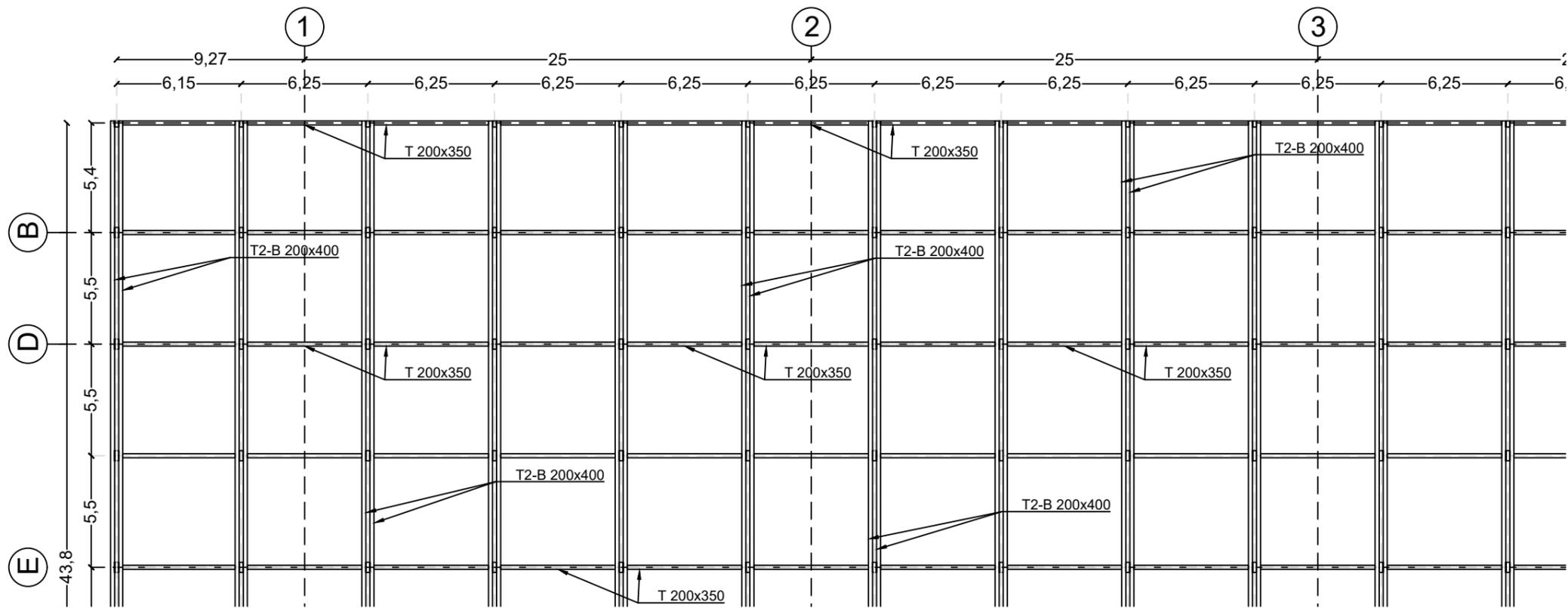
AUTOR: David Sanchis García

FIRMA:

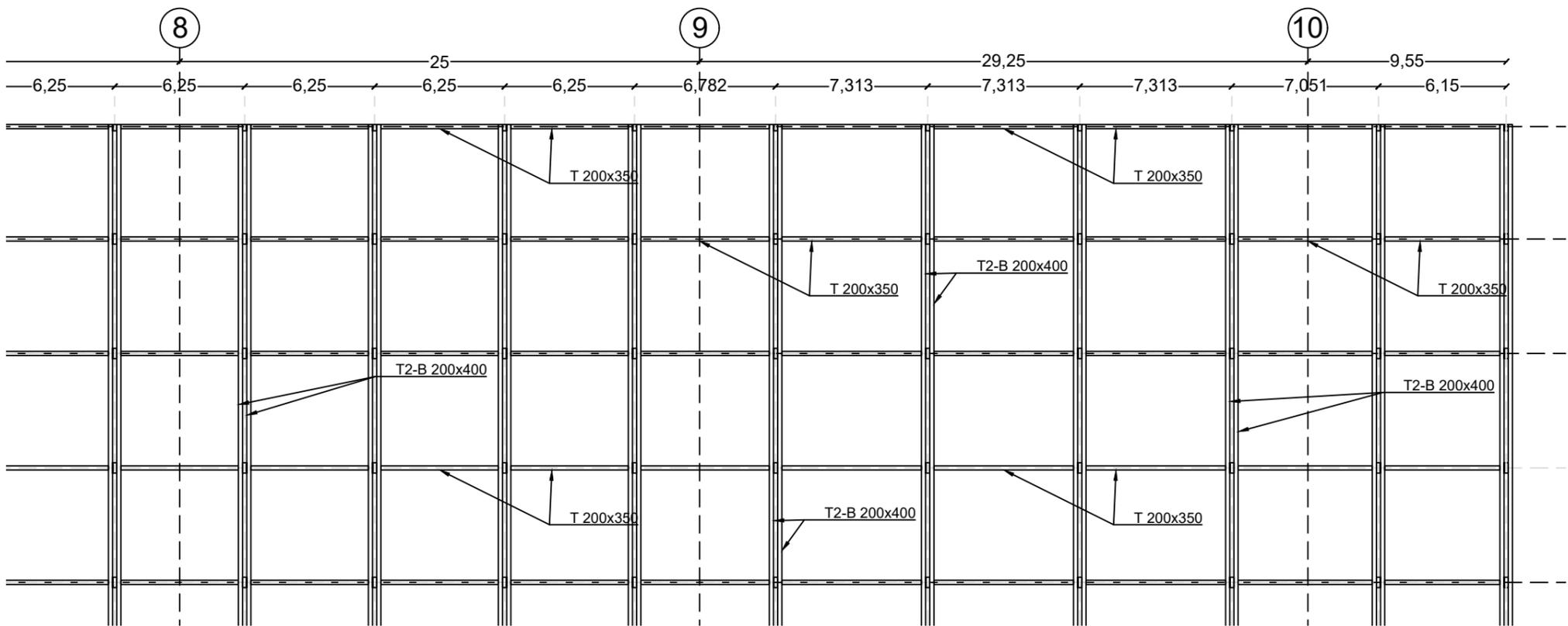
Nº PLANO: 7

FECHA: 05/05/2021





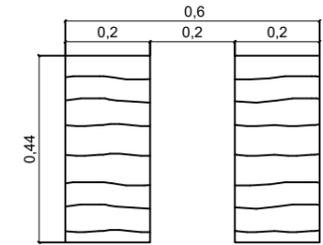
1. Detalle Entramado Superior de Malla. Tramos Izquierdos 1 - 3 1:200



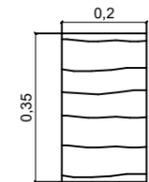
2. Detalle Entramado Superior de Malla. Tramos Derechos 8 - 10 1:200

Perfiles de Madera

Cordón Superior de la Malla T2-B 200x440 1:10



Perfiles Trabe Superior Malla Espacial T 200x350 1:10



Madera Laminada GL24h: EN 14080:2013-08

E = 11500 N/mm ²	Módulo de elasticidad paralelo a las fibras
E = 300 N/mm ²	Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras
G = 650 N/mm ²	Módulo de elasticidad transversal
$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 420 \text{ kg/m}^3$	Densidad
$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a flexión
$f_{t,0,k} = 19.2 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión
$f_{t,90,k} = 0.5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión perpendicular
$f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a compresión
$f_{c,90,k} = 2.5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia caract. a compresión perpendicular
$f_{v,k} = 3.5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a cortante

TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

TÍTULO DEL PLANO: Cubierta de madera. Malla espacial. Entramado superior.

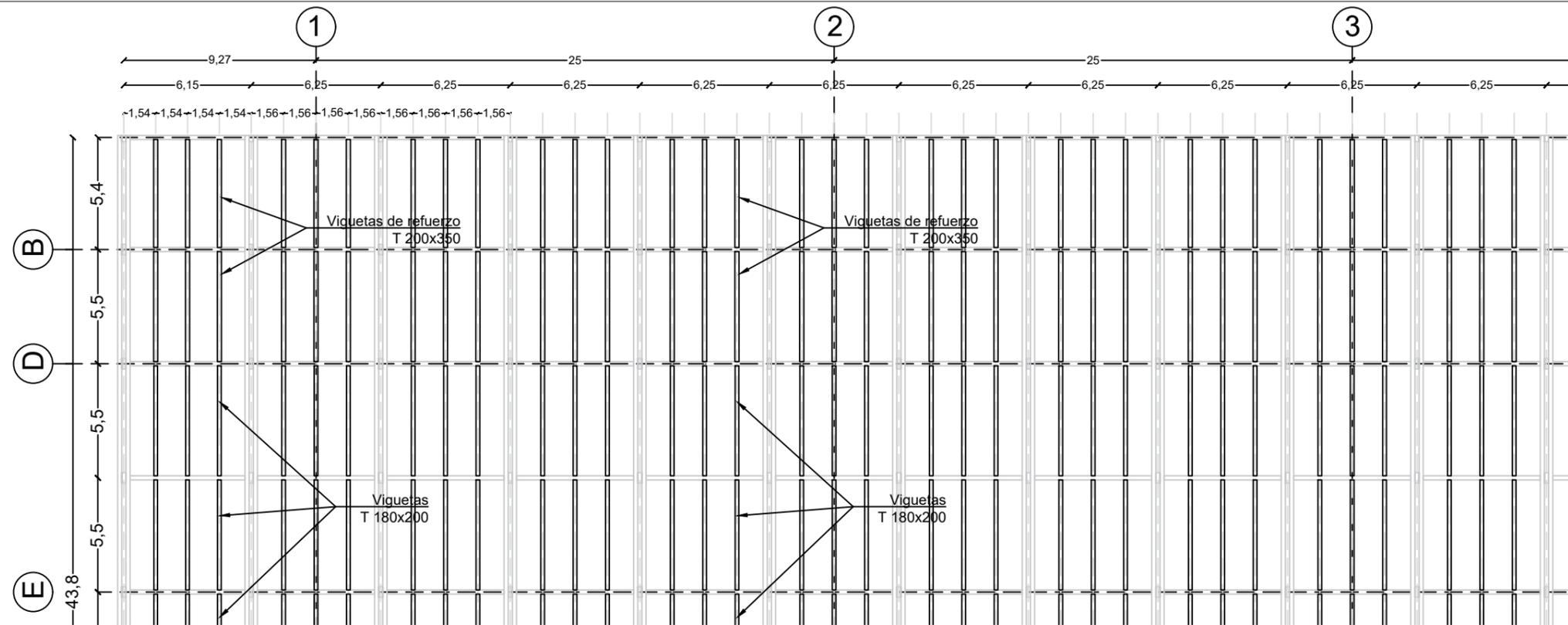
AUTOR: David Sanchis García

FIRMA:

Nº PLANO: 8

FECHA: 05/05/2021

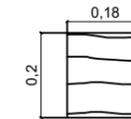




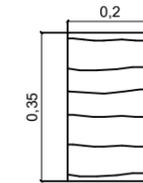
1. Distribución de viguetas. Forjado Mixto 1 - 3 1:200

Perfiles de Madera

Viguetas T180x200 1:10



Viguetas en tramos de refuerzo T200x350 1:10



Hormigón Aligerado C35/38: EN 1992-1-1:2004

$E_{cm} = 18000 \text{ N/mm}^2$ Módulo de elasticidad
 $\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$ Densidad

$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$ Resistencia característica a compresión
 $f_{cm} = 43 \text{ MPa}$ Resistencia a compresión media
 $f_{tm} = 2.7 \text{ MPa}$ Resistencia a tracción media
 $f_{ctk,0.05} = 1.8 \text{ MPa}$ Resistencia a tracción característica 5%

Acero Armaduras B 500 S: EN 10025-2:2004-11

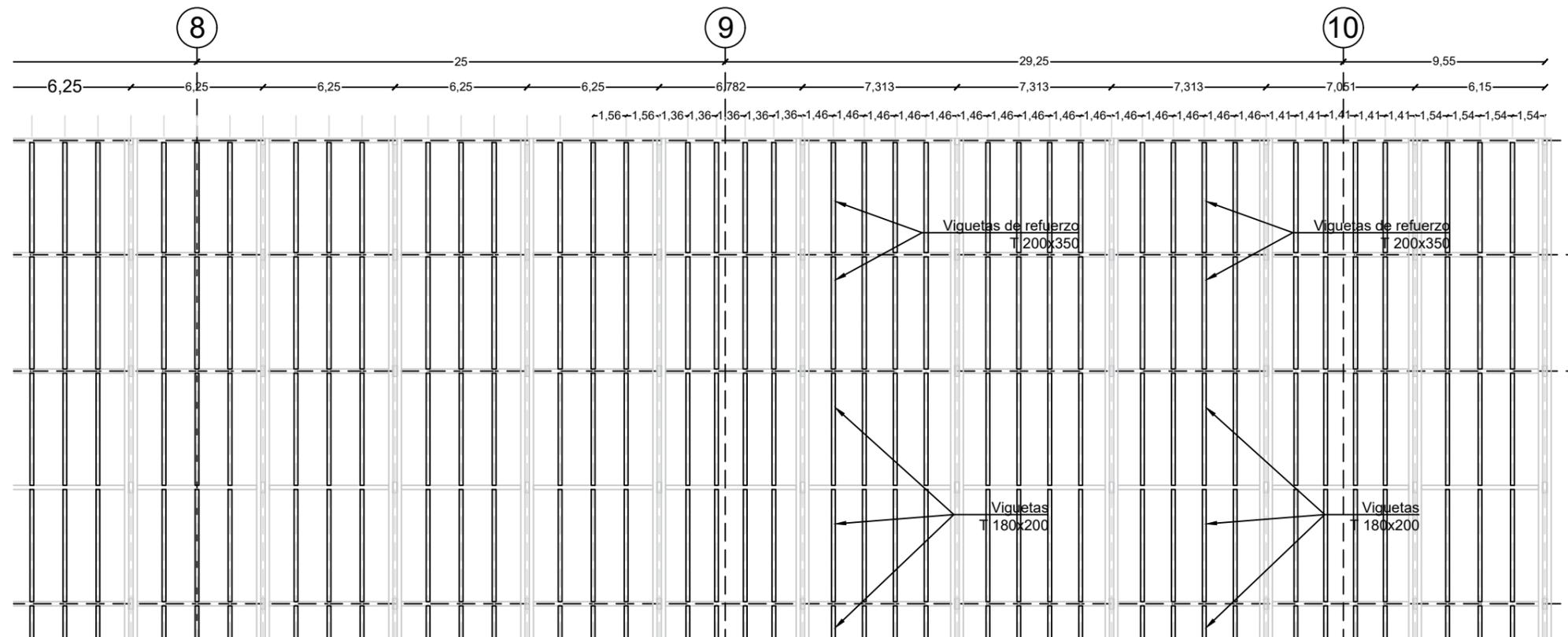
$E = 200000 \text{ N/mm}^2$ Módulo de elasticidad
 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ Densidad

$f_y = 500 \text{ N/mm}^2$ Límite elástico: para espesores menores de 3 mm
 $f_u = 550 \text{ N/mm}^2$ Tensión de rotura: para espesores menores de 3 mm

Madera Laminada GL24h: EN 14080:2013-08

$E = 11500 \text{ N/mm}^2$ Módulo de elasticidad paralelo a las fibras
 $\rho = 420 \text{ kg/m}^3$ Densidad

$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a flexión
 $f_{t,0,k} = 19.2 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a tensión
 $f_{t,90,k} = 0.5 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a tensión perpendicular
 $f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a compresión
 $f_{c,90,k} = 2.5 \text{ N/mm}^2$ Resistencia caract. a compresión perpendicular
 $f_{v,k} = 3.5 \text{ N/mm}^2$ Resistencia característica a cortante



2. Distribución de viguetas. Forjado Mixto 8 - 10 1:200

TÍTULO DEL TRABAJO FINAL DE MÁSTER:

Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca.

TÍTULO DEL PLANO: Cubierta de madera. Distribución de viguetas de forjado

AUTOR: David Sanchis García

FIRMA:

Nº PLANO: 9

FECHA: 05/05/2021



ANEJO Nº1: CUBIERTA LIGERA OBSERVATORIO. ANÁLISIS CONCEPTUAL.

TITULACIÓN: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR: David Sanchis García

TUTOR: Carlos Llopis Camps

CURSO: 2020-2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. OBJETO.....	3
2. ANTECEDENTES. LA CUBIERTA DE LA ESTACIÓN DE OBSERVATORIO EN MÉXICO.....	3
2.1 La línea 3 del tren interurbano México – Toluca	3
2.2 La Estación Observatorio del tren interurbano	4
2.3 La cubierta de la estación Observatorio en México.....	6
3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA. LA CUBIERTA LIGERA DE LA ESTACIÓN DE OBSERVATORIO EN MÉXICO.....	7
3.1. Introducción y condiciones de contorno	7
3.2. Materiales	7
3.3. Descripción general de la estructura	8
3.4. Elementos de la fachada transversal	9
3.4.1. Soportes inclinados	9
3.4.2. Cercha de atado	10
3.5. Elementos de la cubierta espacial	10
3.5.1. Cordones superior e inferior	11
3.5.2. Trabes de atado	11
3.5.3. Diagonales.....	12
3.6. Elementos del forjado mixto colaborante	12
4. BASES DE CÁLCULO	13
4.1. Normativa	13
4.2. Acciones permanentes.....	13
4.2.1. Peso propio	13
4.2.2. Carga muerta	13
4.3. Acciones Variables	13
4.3.1 Sobrecarga de uso.....	13
4.3.2. Acciones térmicas	14
4.3.3 Viento	14
4.3.4. Sismo	14
4.3.5. Acciones accidentales adicionales	14
4.4 Combinaciones de Acciones.....	14
4.4.1 Estados Límite Último	14
4.4.2 Estados Límite de Servicios	15
4.4.3 Combinaciones de carga	15
5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO	15
5.1. Programa Cálculo	15
5.2. Modelo de cálculo.....	15
6. RESULTADO DEL MODELO.....	15
6.1. Ratio de diseño de la estructura	16
6.2. Deformaciones.....	17
6.2.1 Comprobación de límites de flechas verticales	17
6.2.2 Comprobación de límites de flechas horizontales.....	17
7. CONCLUSIONES.....	18

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Modelo Extruido de la cubierta ligera de la Estación Observatorio.....	3
Imagen 2. Recorrido de la Línea 3 del tren interurbano México-Toluca.....	3
Imagen 3. Sección transversal tipo.....	4
Imagen 4. Emplazamiento de la Estación Observatorio dentro del complejo intermodal	4
Imagen 5. Modelo tridimensional de la Estación Observatorio	5
Imagen 6. Sección transversal de la Estación Observatorio.....	5
Imagen 7 y 8. Renders de arquitectura de Ten-Arquitectos de la solución proyectada.....	5
Imagen 9. Vista 3D del forjado	6
Imagen 10. Alzado lateral de la Estación Observatorio.....	6
Imagen 11. Modelo Extruido de la cubierta ligera de la Estación Observatorio.....	8
Imágenes 12,13 y 14. Descripción de los elementos de Fachada	9
Imágenes 15 y 16. Secciones transversales de los soportes inclinados	9
Imágenes 17 y 18. Secciones transversales de diagonales y cordones de la cercha de fachada.....	10
Imagen 19. Vista en planta. Distribución de elementos de la malla espacial.	10
Imágenes 20 y 21. Secciones transversales de diagonales y cordones de la cercha de fachada.....	11
Imagen 22. Detalle de los cordones de la malla espacial.....	11
Imagen 23. Sección Transversal de la trabe de atado.....	11
Imagen 24. Detalle de la intersección de diagonales de la malla espacial.....	12
Imagen 25. Detalle de la intersección de diagonales de la malla espacial.....	12
Imagen 26. Detalle de la intersección de diagonales de la malla espacial.....	12
Imagen 27. Detalle de la intersección de diagonales de la malla espacial.....	12
Imagen 28. Agotamiento de los perfiles que componen la malla espacial.....	16
Imagen 29. Agotamiento de los perfiles de los elementos de Fachada.....	16

1. OBJETO

En el presente anejo se describe en detalle el modelo de referencia empleado, facilitado por el departamento de estructuras de SENER. El diseño fue elaborado por la empresa y servirá para comparar la alternativa de madera desarrollada por el alumno. Se ha desarrollado un modelo propio a partir de la documentación facilitada por la empresa, con el propósito de entender en detalle el funcionamiento de la estructura y ser, además capaz de realizar posteriormente el modelo de una estructura alternativa de madera que sea lo más comparable posible.

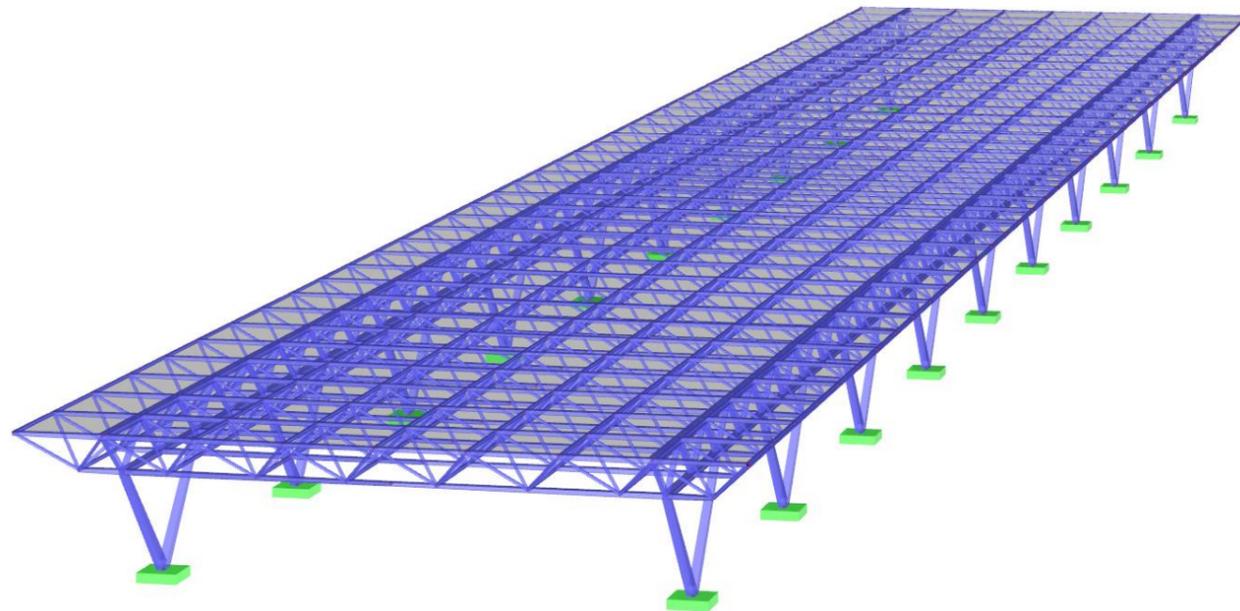
Para entender la estructura es preciso poner en contexto el proyecto global del que forma parte. Por eso se desarrollan los antecedentes de la estructura. En el apartado de antecedentes se habla del proyecto de la línea 3 del tren interurbano México-Toluca, en el que se encuentra la estación Observatorio. Es en esta estación elevada dónde se encuentra la cubierta diseñada. También se da un breve resumen de las distintas fases por las que ha pasado el diseño de la cubierta que explica el diseño arquitectónico y los condicionantes de diseño.

Es importante tener en cuenta desde el principio de este ANEJO, que la **estructura de referencia empleada no fue la finalmente proyectada y ejecutada por SENER**. Pero sí fue una de las estructuras que desarrolló el departamento de estructuras mientras realizaban el estudio de soluciones.

Más adelante se da una descripción general de la estructura finalmente empleada y se definen las condiciones de contorno de esta. También se muestra el modelo empleado, con las cargas y combinaciones de diseño empleadas.

Finalmente, se muestran los resultados del diseño y se ofrecen conclusiones sobre el diseño de la estructura. Cómo no es un diseño propio del alumno tan solo se muestran las verificaciones necesarias para validar el modelo, tanto por criterios de agotamiento como de deformaciones.

Imagen 1. Modelo Extruido de la cubierta ligera de la Estación Observatorio.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

2. ANTECEDENTES. LA CUBIERTA DE LA ESTACIÓN DE OBSERVATORIO EN MÉXICO.

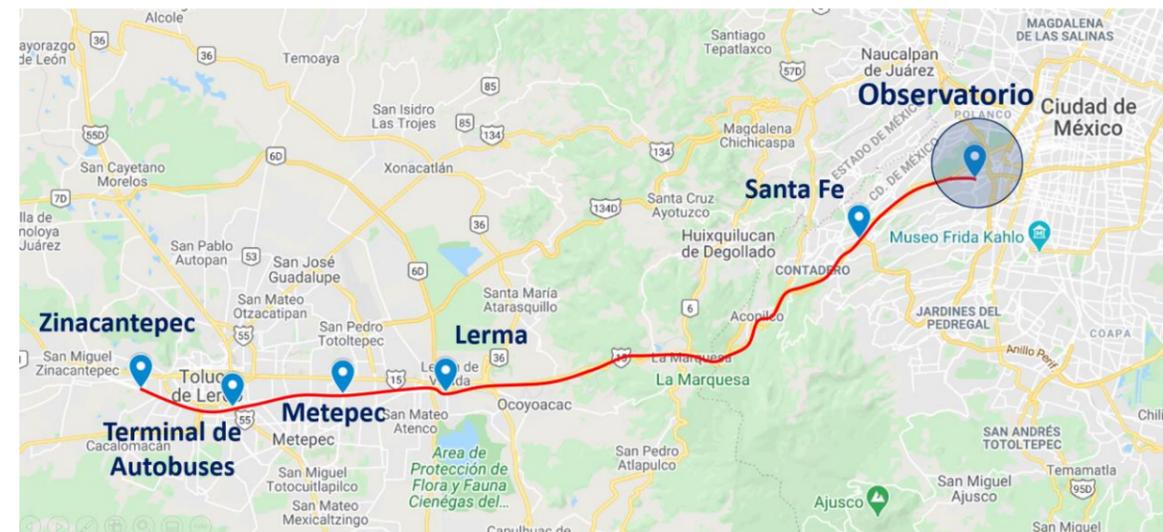
Antes de comenzar con la explicación particular es imprescindible poner en contexto el proyecto ferroviario de forma global. Por ello se va a describir en términos globales el tren interurbano México-Toluca. Más adelante se describirán los estadios de diseño que siguió la estructura, y finalmente el resultado final.

2.1 La línea 3 del tren interurbano México – Toluca

El tren Interurbano México – Toluca¹ es un proyecto de ferrocarril de larga y media distancia que conecta la Zona metropolitana del Valle de Toluca con la Zona Metropolitana del Valle de México. Tiene una longitud de 57 Km y un total de 6 estaciones elevadas, 2 terminales y 4 intermedias: Zinacantepec, Terminal de autobuses, Metepec, Lerma, Santa Fe y Observatorio.

La nueva línea conectará toda la zona metropolitana de Toluca con México DF. Este proyecto se encontraba enmarcado en el pasado Programa Nacional de Infraestructuras del Gobierno Mexicano de 2014-2018², sin embargo, el proyecto sigue en construcción. Se prevé que las obras civiles de la estación observatorio terminarán a finales de 2022 y se inaugurará a línea a finales de 2023³. La red dará un servicio diario a más de 230.000 pasajeros, aunque ha sido diseñado para atender la demanda de transporte de hasta 540.000 usuarios diarios para 2047.

Imagen 2. Recorrido de la Línea 3 del tren interurbano México-Toluca



Fuente: Elaboración propia. Google Maps

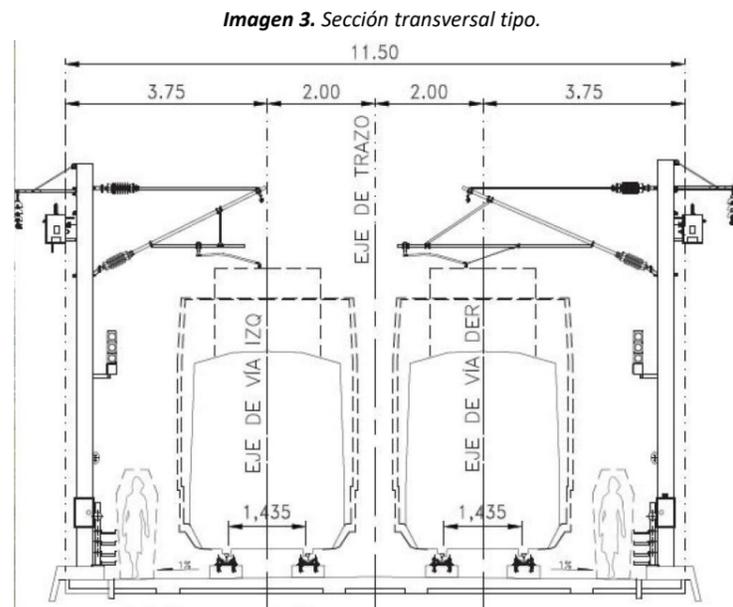
Se trata de un trazado total de 57,8 km, del cual, al recorrer una orografía extremadamente abrupta el 92% del recorrido está proyectado con viaductos o túneles. Es decir, hay un total de casi 49 km de viaductos y un túnel de 4,7km. La velocidad de diseño máxima es de 160km/h y la velocidad comercial de 90km/h, que permiten realizar el recorrido entero en tan solo 39 minutos. Es un tiempo muy competitivo frente al transporte en carretera privado de 55 minutos o público (autobús) de 2,5 horas.

¹ Fuente: www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/transporte-ferroviario-y-multimodal/tren-interurbano-mexico-toluca

² Fuente: <https://www.fonadin.gob.mx/acerca-del-fonadin/programa-nacional-de-infraestructura/>

³ Fuente: <https://www.economista.com.mx/empresas/Tren-Mexico-Toluca-sumara-al-menos-siete-anos-de-retraso-20191113-0024.html>

Entre las características de la vía vale la pena destacar que cuenta con el ancho de vía internacional, con dos líneas que ocupan un ancho de sección estándar en la mayoría de su recorrido de 11,50m. Cuenta, además, con un sistema de señalización ERTMS (European Rail Traffic Management System) de nivel 2. Sobre las vías circularán un total de 30 trenes eléctricos de 5 coches cada uno fabricados por CAF.



Fuente: SENER. Información del proyecto en la web⁴

Este proyecto, sigue siendo todavía uno de los contratos de mayor volumen adjudicados a SENER en el sector del ferrocarril⁵. La empresa multinacional resultó adjudicataria de la redacción del proyecto de construcción, después de haber llevado a cabo el anteproyecto ejecutivo de la línea. Dentro de esta adjudicación se incluyeron todas las tareas necesarias para definir el proyecto de ejecución y puesta en marcha de la línea de metro ligero. Se trataba de un trabajo integral. Se enumeran a continuación todas ellas:

1. Estudios previos al proyecto de ejecución:
 - 1.1. Estudio para la definición del modelo operativo
 - 1.2. Estudio para la definición de la solución tecnológica
 - 1.3. Simulación de la operación de la red
2. Estudios de definición constructiva:
 - 2.1. Trabajos de cartografía y topografía
 - 2.2. Estudios geotécnicos y de trazado
 - 2.3. Estudios de hidrología y drenaje
 - 2.4. Estudio para la definición de sistemas de estaciones
 - 2.5. Cálculo de viaductos y túneles
 - 2.6. Proyectos de arquitectura y estructura de las estaciones, talleres y cocheras
 - 2.7. Estudios de mitigación ambiental y urbanísticos
3. Estudios de Interfaces
 - 3.1. Estudio de RAM y Safety
 - 3.2. Estudios sobre las instalaciones ferroviarias y electromecánicas
4. Estudios para la definición del material rodante

⁴ Fuente: <https://www.infraestructura.sener.es/proyecto/tren-interurbano-valle-de-mexico-toluca>

⁵ Fuente: <https://web.archive.org/web/20151017054523/http://www.cnnexpansion.com/economia/2015/10/14/sct-cambia-43-kilometros-del-tren-interurbano-mexicotoluca%26sj%3DALT001>

2.2 La Estación Observatorio del tren interurbano

Dentro del proyecto de la línea 6, encontramos la estación objeto de estudio de este trabajo: La estación Observatorio. Se encuentra en el territorio que colinda con el antiguo pueblo de Tacubaya.

La elección de este emplazamiento no es arbitraria, ya que es el punto de conexión en los límites en el que transporte urbano de México alcanza. En estos momentos, la zona ya cuenta con una de las cuatro terminales de autobuses de CDMX, además de la última parada del metro de la ciudad, junto con las cocheras. El conjunto ya actúa de intercambiador y se espera que ampliar la oferta de servicios de este, para dar un servicio de transporte integral interurbano que conecte la capital con la siguiente gran ciudad más próxima, Toluca.

Los cambios de gobierno han creado mucha incertidumbre acerca de qué proyectos iban a formar parte del nuevo intercambiador modal de la terminal de Poniente. Muchas han sido las alternativas que se han ido descartando, entre las que destaca el conocido proyecto CETRAM. Sin embargo, las variaciones circunstanciales del trazado y diseño de la estación derivadas de decisiones políticas no son parte del trabajo, por lo que no se comentarán todas las variantes de este mismo proyecto. Si fuera de interés hay un video explicativo⁶ muy completo que resume todas las fases de aprobación que ha recorrido este proyecto desde 2014.

Sí va a interesar, sin embargo, conocer cuál es la última versión que ha sido proyectada y se encuentra actualmente en construcción.

Imagen 4. Emplazamiento de la Estación Observatorio dentro del complejo intermodal



Fuente: Elaboración propia. Google Maps

⁶ Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=pcOewxQUUbk>

Imagen 5. Modelo tridimensional de la Estación Observatorio



Fuente: Video explicativo de Archivo Sofree³

En el primer nivel, a la altura del terreno, en él se espera que circulen autobuses y vehículos privados. El segundo nivel, sirve de vestíbulo para acceder a los diferentes andenes, presumiblemente con comercios y zonas de espera. El tercer nivel, como se puede ver en el perfil, circulará un total de tres vías de ferrocarril y contará con 3 andenes. A nivel de cubierta, los arquitectos diseñaron zonas verdes de esparcimiento, siendo esta por lo tanto transitable. Sobre las cargas de diseño de la cubierta metálica se habla más en detalle en el siguiente apartado.

En las siguientes imágenes se muestran dos renders. Son una de las propuestas ganadoras de uno de los concursos de arquitecta que se presentaron a la administración para el proyecto CETRAM de TEN Arquitectos

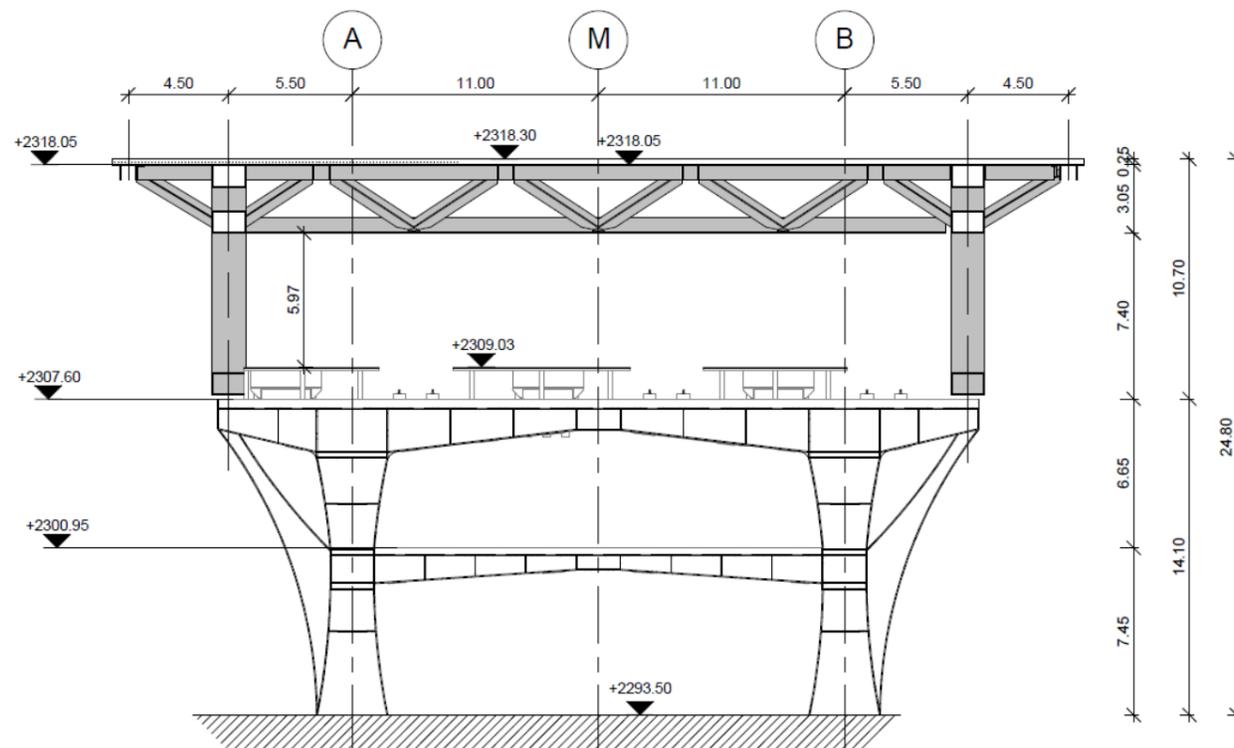
Imagen 7 y 8. Renders de arquitectura de Ten-Arquitectos de la solución proyectada.



Fuente: Web del Estudio de Arquitectura que se presentó a concurso: <https://www.ten-arquitectos.com/cetram-observatorio>

Se trata por lo tanto de una estación elevada, sobre la que circulan 3 vías de tren. La infraestructura cuenta con una plataforma de hormigón de 14.1 metros de altura sobre la que descansa una cubierta de estructura metálica, que será en nuestro caso la cubierta objeto de estudio. A continuación, se muestra la sección transversal de la estación, elaborada por SENER, en una de las fases tempranas de diseño. Se ven los diferentes niveles de los que consta la estación.

Imagen 6. Sección transversal de la Estación Observatorio



Fuente: Documentación facilitada por SENER del proyecto ejecutivo del tren interurbano México

2.3 La cubierta de la estación Observatorio en México

La cubierta de la estación observatorio del tren interurbano fue proyectada inicialmente para ser transitable y soportar el peso de jardineras. Los arquitectos que diseñaron la cubierta esperaban que la superficie que quedaba al aire libre pudiera ser accesible por los usuarios de las vías y permitiera el paso entre los diferentes edificios del complejo. Querían crear un espacio verde, que minimizara el impacto ambiental, y que sustituyera la vegetación que iba a perderse al ejecutar la obra.

Por ello, la cubierta debía ser plana y ser capaz de resistir una sobrecarga permanente de uso de 5kN/m^2 . Ello exigía que la cubierta contara con grandes perfiles metálicos compuestos, que permitiera salvar las luces proyectadas sin elementos intermedios. Se trata de una cubierta espacial que, en vez de estar configurada con los perfiles tubulares habituales, han debido configurarse con perfiles en I compuestos —formando perfiles de sección rectangular—. Las luces que deben salvarse son de 33 metros en la dirección principal, y 25 metros entre apoyos. Los apoyos de la cubierta deben descansar sobre las costillas de la estación, para dar continuidad a los apoyos de la plataforma.

A pesar de que finalmente no se proyectaron el resto de los edificios del complejo CETRAM y no era necesario que la cubierta fuera transitable, el diseño final ha conservado la forma y tipología estructural. De esta forma, si en un futuro se aprueba la realización del proyecto CETRAM, podrá soportar las cargas previstas.

Cabe aclarar que esta no es la cubierta que se ha desarrollado en apartados posteriores de este anejo. No obstante, esta explicación se considera relevante para entender el contexto de partida de este TFM. A continuación, se muestran los planos del diseño preliminar de la estación para este esquema de cargas proyectada por SENER.

Imagen 9. Vista 3D del forjado

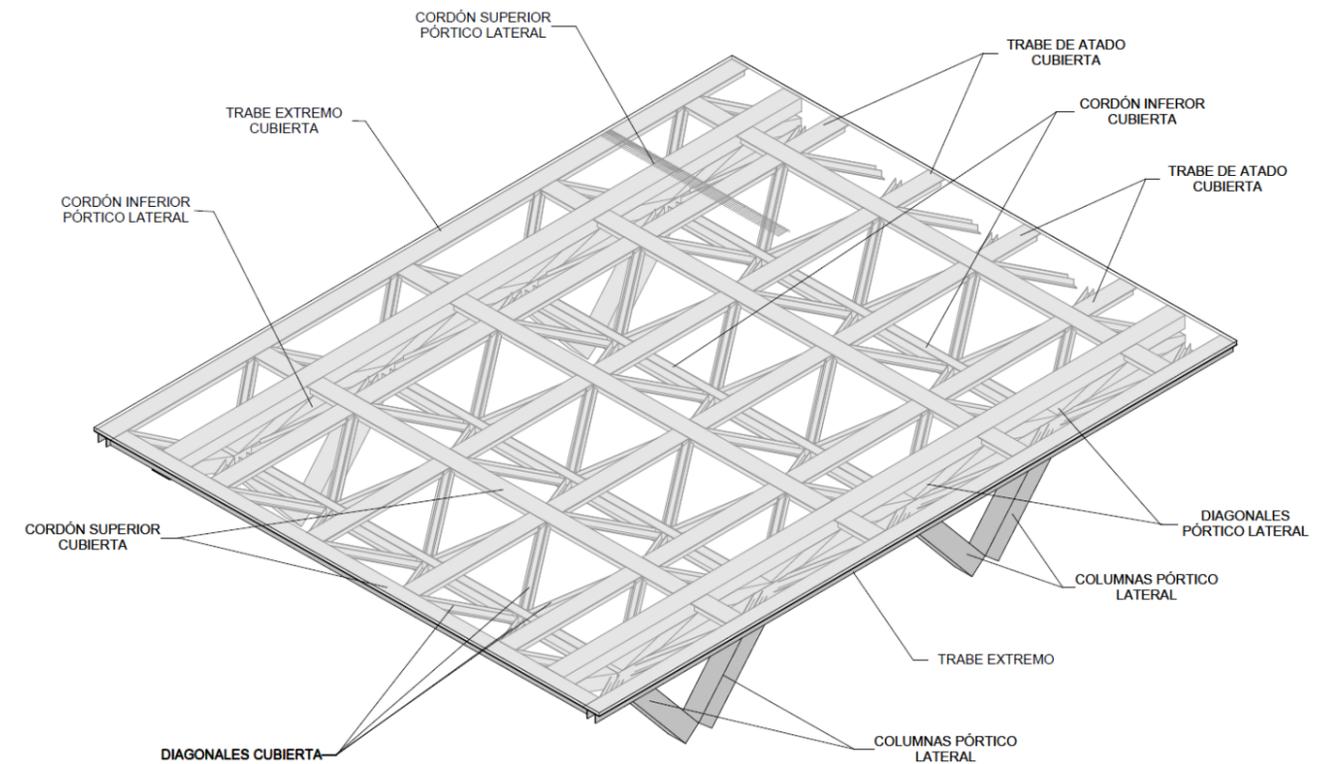
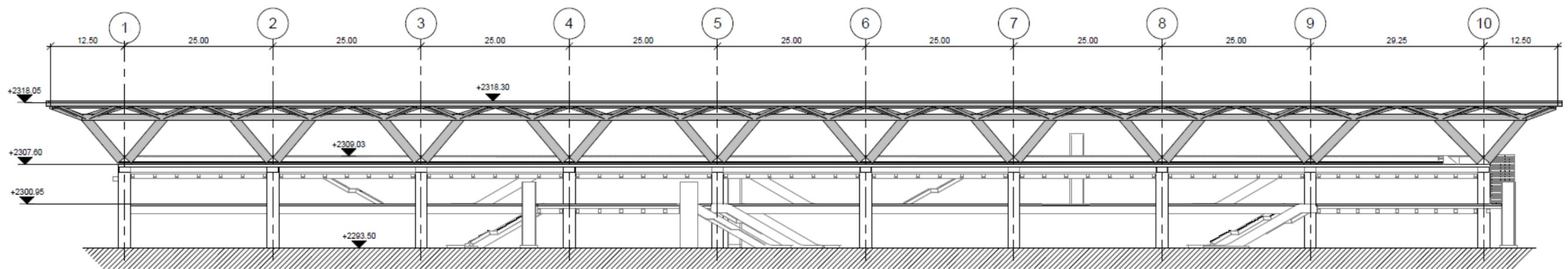


Imagen 10. Alzado lateral de la Estación Observatorio



ALZADO LATERAL

Fuentes: Documentación facilitada por SENER del proyecto ejecutivo del tren interurbano México

3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA. LA CUBIERTA LIGERA DE LA ESTACIÓN DE OBSERVATORIO EN MÉXICO.

A pesar de que el diseño final proyectado tuvo que incluir las elevadas cargas, que permitieran ser transitable y soportar cargas, desde SENER trabajaron en diferentes alternativas. Una de las alternativas que se barajó, adelantándose a la nueva realidad del proyecto, fue la de proponer una cubierta que mantuviera la tipología estructural pero que no fuese transitable, con cargas más moderadas. De esta forma se reducían considerablemente los kilos de acero y su precio, adelantándose a la posible petición del cliente.

Esta alternativa, que también se desarrolló por SENER, será la que se emplee como objeto de estudio de los siguientes apartados de este anejo, y como referente comparativo de estructura metálica a lo largo del TFM.

Mantiene todas las condiciones de contorno de la cubierta descrita en el anterior apartado, pero con unas sobrecargas más moderadas de 1kN/m², tratándose en este caso de una cubierta no transitable al público, es decir tan solo para labores puntuales de mantenimiento. Al verse vistas las cargas de diseño a lo largo de este trabajo nos referiremos a esta estructura como "la cubierta *ligera* de la Estación Observatorio México".

3.1. Introducción y condiciones de contorno

A continuación, se describen las condiciones de contorno de esta:

- La cubierta descansa sobre una plataforma elevada de hormigón, cimentada al terreno por pilotes y su geometría y transmisión de las cargas deberá ajustarse a la misma.
- La estructura deberá cubrir como mínimo el área total de la plataforma de forma que proteja a los usuarios de la estación.
- La cubierta deberá ser plana y no transitable. Deberá permitir una sobrecarga de uso para el paso de usuarios de 1 kN/m², tan solo para labores de mantenimiento.
- La superficie debe quedar a 10,7m de altura sobre la plataforma.
- Para evitar la interferencia de la cubierta con las estructuras de soporte de la catenaria, se tiene que respetar una altura mínima entre la superficie de la plataforma y la cubierta de 7m.
- La luz entre pilares (de 33m) en la dirección principal de los pórticos debe salvarse sin elementos intermedios, tanto para crear un espacio diáfano para los usuarios, como para permitir la libre disposición de equipamientos e instalaciones industriales propios del ferrocarril.
- Los apoyos de la cubierta sobre la plataforma deben coincidir en los extremos de la plataforma con las costillas de refuerzo que sustentan la plataforma. La distancia longitudinal entre estos elementos auxiliares de refuerzo es de 25m en los tramos 1 a 8; y 29,25m en el último tramo.
- La dirección de la reacción sobre los apoyos deberá ser eminentemente horizontal, para evitar comportamientos indeseados de la losa de hormigón ya proyectada y ejecutada.

3.2. Materiales

Al tratarse de una estructura proyectada en México, los estándares reales con los que estaba proyectada la estructura eran los ASTM americanos. Sin embargo, por tratarse de un trabajo académico se han sustituido el acero por su homólogo en la normativa europea.

La estructura consta de perfiles de acero laminado y un forjado mixto hormigón-acero de chapa colaborante.

Acero estructural S 355: EN 10025-2:2004-11

E = 210000 N/mm ²	Módulo de elasticidad
G = 80769,2 N/mm ²	Módulo de elasticidad transversal
v = 0,3	Coefficiente de Poisson
α = 1,2 · 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	Coefficiente de dilatación lineal
ρ = 7850 kg/m ³	Densidad
fy = 355 N/mm ²	Límite elástico: para espesores menores de 3 mm
fu = 510 N/mm ²	Tensión de rotura: para espesores menores de 3 mm
fy = 355 N/mm ²	Límite elástico: para espesores comprendidos entre 3 y 16 mm
fu = 470 N/mm ²	Tensión de rotura: para espesores comprendidos entre 3 y 16 mm
fy = 335 N/mm ²	Límite elástico: para espesores comprendidos entre 16 y 40 mm
fu = 470 N/mm ²	Tensión de rotura: para espesores comprendidos entre 16 y 40 mm

Acero estructural B 500 S: EN 10025-2:2004-11

E = 200000 N/mm ²	Módulo de elasticidad
G = 80769,2 N/mm ²	Módulo de elasticidad transversal
v = 0,3	Coefficiente de Poisson
α = 1,2 · 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	Coefficiente de dilatación lineal
ρ = 7850 kg/m ³	Densidad
fy = 500 N/mm ²	Límite elástico: para espesores menores de 3 mm
fu = 550 N/mm ²	Tensión de rotura: para espesores menores de 3 mm

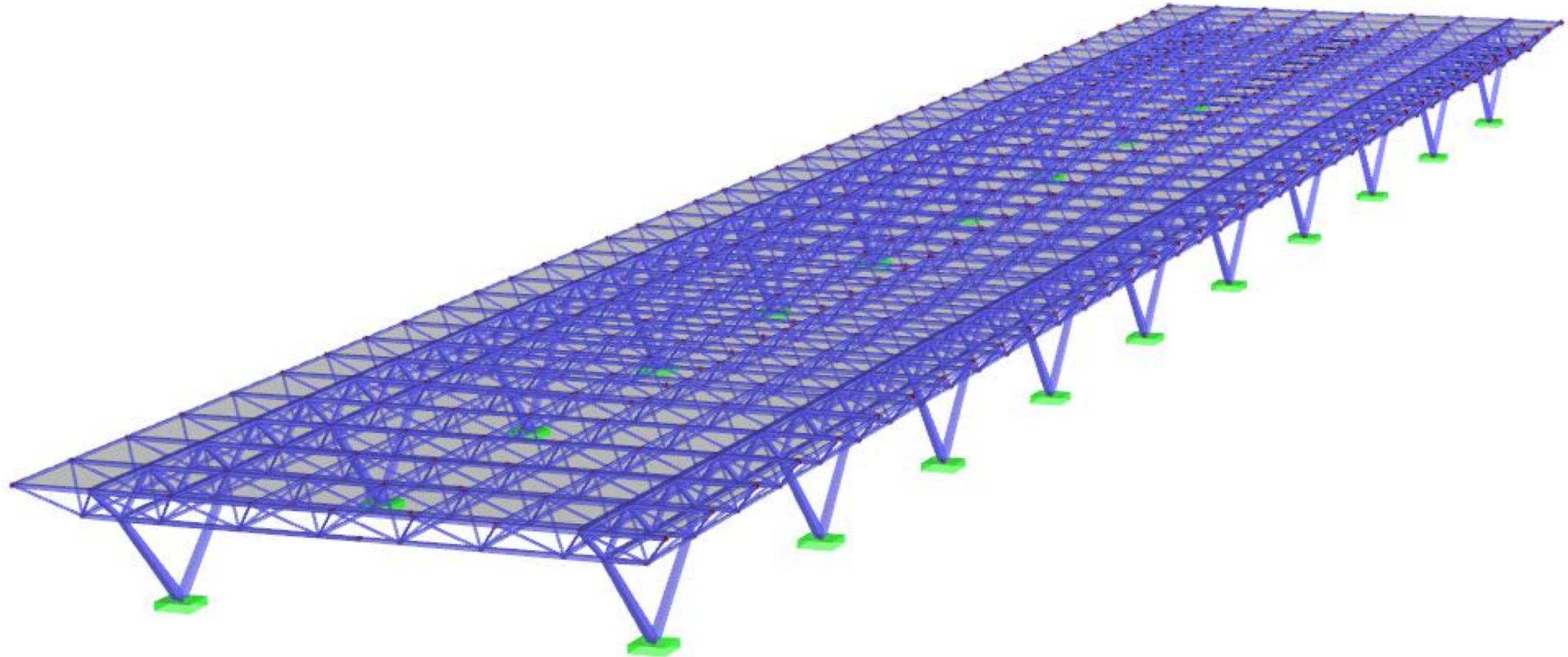
Hormigón aligerado C35/3: En 1992-1-1:2004/A 1:2014

E _{cm} = 18000 N/mm ²	Módulo de elasticidad
G = 7500 N/mm ²	Módulo de elasticidad transversal
v = 0,2	Coefficiente de Poisson
α = 1 · 10 ⁻⁵ °C ⁻¹	Coefficiente de dilatación lineal
ρ = 1750 kg/m ³	Densidad
f _{ck} = 35 MPa	Resistencia característica a compresión simple en probeta cilíndrica a 28 días
f _{cu,k} = 38 MPa	Resistencia característica a compresión simple en probeta cúbica
f _{cm} = 43 MPa	Resistencia a compresión media
f _{tm} = 2.7 MPa	Resistencia a tracción media
f _{ctk,0.05} = 1.8 MPa	Resistencia a tracción característica 5%

3.3. Descripción general de la estructura

A continuación, se muestra el modelo extruido de la estructura. Se trata de una cubierta espacial, de planta rectangular y biaportada.

Imagen 11. Modelo Extruido de la cubierta ligera de la Estación Observatorio.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

La estructura está claramente diferenciada en dos partes, por una parte, la cercha espacial; y por otra, los pórticos laterales sobre los que apoya.

La cercha consta de dos entramados rectangulares de vigas separados. Estos entramados, superior e inferior cuentan con perfiles IPE. La separación de 2,7 metros entre las directrices de los cordones superior e inferior.

Los pórticos laterales a su vez están configurados por dos elementos, los soportes inclinados, y la cercha unidireccional. La cercha permite atar todos los apoyos, de manera que la cubierta apoye de forma continua en la dirección longitudinal de la estación.

los pórticos transversales salvan una luz de 33 metros y los voladizos de 5,5 metros. Cada uno de los dos pórticos laterales consta de 10 apoyos, separados entre sí a una distancia de 25 metros en casi todos los vanos, menos el último que salva una distancia de 29,25 metros. Los apoyos inclinados están dispuestos de manera que la cercha del pórtico lateral salva luces de 12,5 metros en todos sus tramos excepto el último que es más irregular.

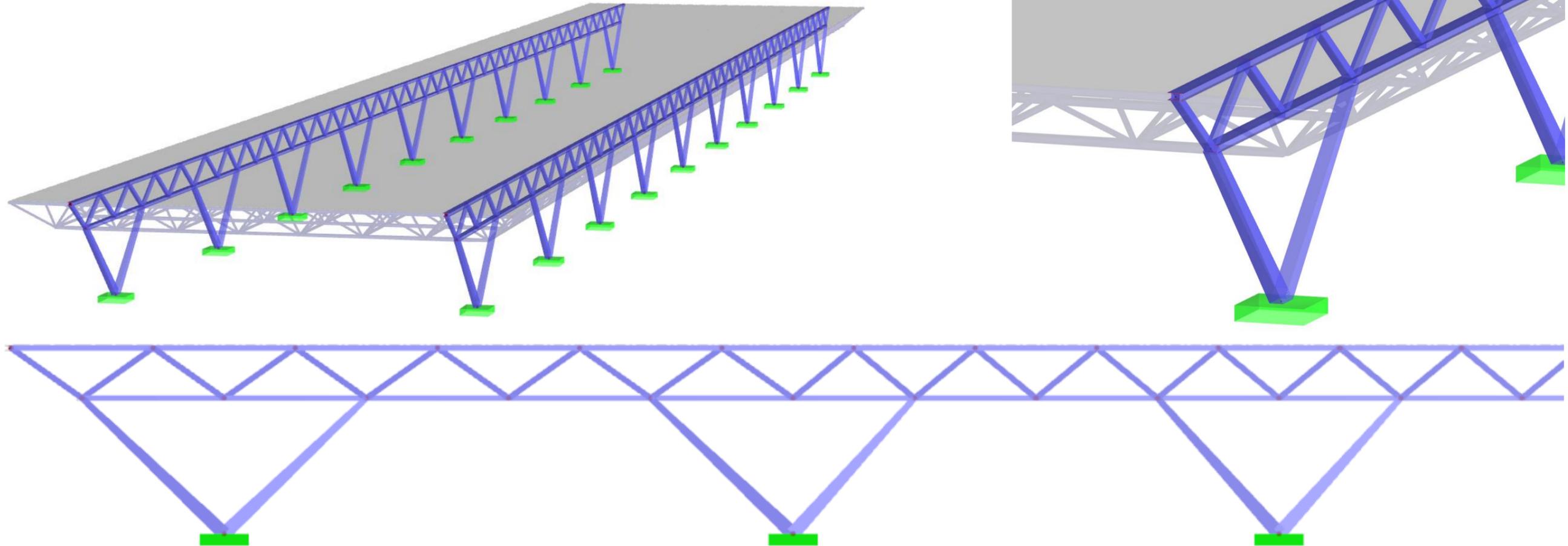
El gálibo entre la base de los soportes y la cara inferior del cordón inferior de la cubierta es de 7,4 metros.

En los siguientes epígrafes se describirá más en detalle cada una de las partes y su modo de funcionamiento.

3.4. Elementos de la fachada transversal

La fachada transversal está compuesta tanto por los soportes inclinados, que anclan la estructura a la plataforma de hormigón, como por la cercha de atado, que garantiza un apoyo más o menos continuo de la cubierta.

Imágenes 12,13 y 14. Descripción de los elementos de Fachada



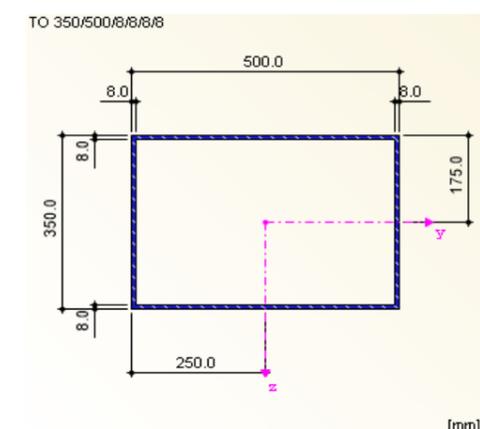
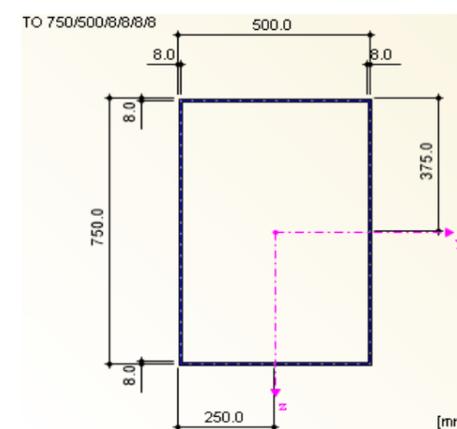
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

3.4.1. Soportes inclinados

Los soportes unen cada una de las placas base con la cercha de atado. Los puntos de apoyo con la plataforma de hormigón están separados por una distancia de 25m (excepto el último tramo que tiene una separación de 29.25 metros). Los soportes unen cada una de las bases con un punto intermedio del cordón inferior de la cercha de atado de forma que se garantiza una separación entre puntos de apoyo de la cercha de 12,5 metros. Por ello, están inclinados exactamente $49,4^\circ$ sobre la horizontal. La unión entre los soportes y la plataforma es fija en ambas direcciones, al igual que la unión entre los soportes y la cercha de atado.

Las vigas de los soportes inclinados son vigas de canto variable, conformadas por perfiles rectangulares huecos de alma variable y tienen una longitud de 9,61m. En la base, el perfil tiene unas dimensiones exteriores mayores de 750x500 mm y se reduce linealmente hasta que conecta con el cordón inferior de la cercha donde tiene unas dimensiones de 350x500 mm. El espesor de las chapas de todo el elemento es de 8 mm.

Imágenes 15 y 16. Secciones transversales de los soportes inclinados



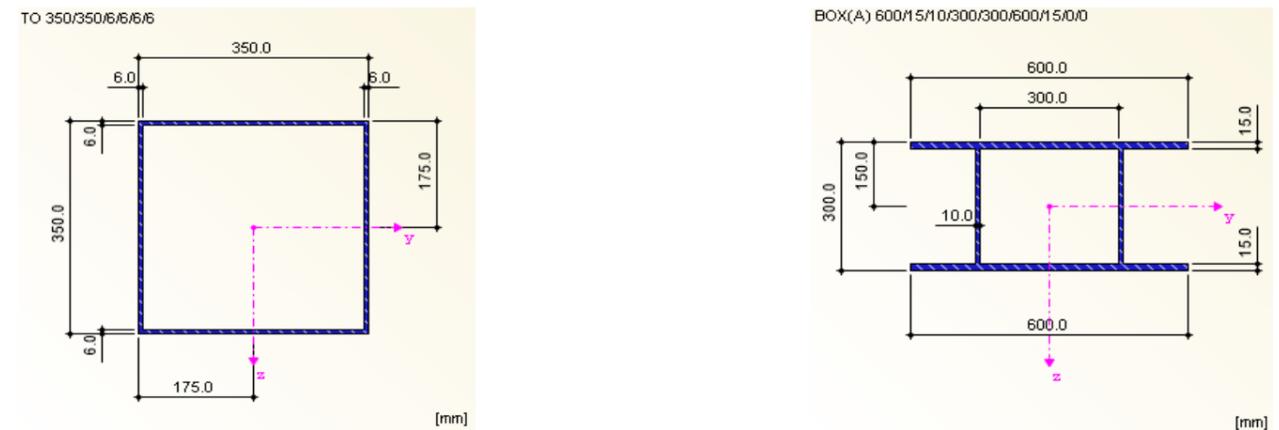
3.4.2. Cercha de atado

La cercha de atado está compuesta por un cordón superior, un cordón inferior y las diagonales.

Tanto el cordón inferior como el cordón superior comparten el mismo perfil acero laminado. Este es un perfil compuesto de sección en la caja. Los cordones de atado tendrán una longitud superior a 6 metros, sin embargo, estarán unidos entre sí mediante soldaduras, comportándose como una viga continua a lo largo de la cercha.

En cuanto a las diagonales, estas unen los cordones en puntos intermedios de los mismos, equidistantes de 6,25m (excepto en el último tramo). Están conformadas por perfiles huecos de sección cuadrada con 0,35m de lado entre caras exteriores y un espesor de 6mm. La longitud total de cada diagonal es de 4,13m. Las diagonales conectan con los cordones permitiendo el giro en ambas direcciones, se trata de conexiones articuladas, propias de una cercha.

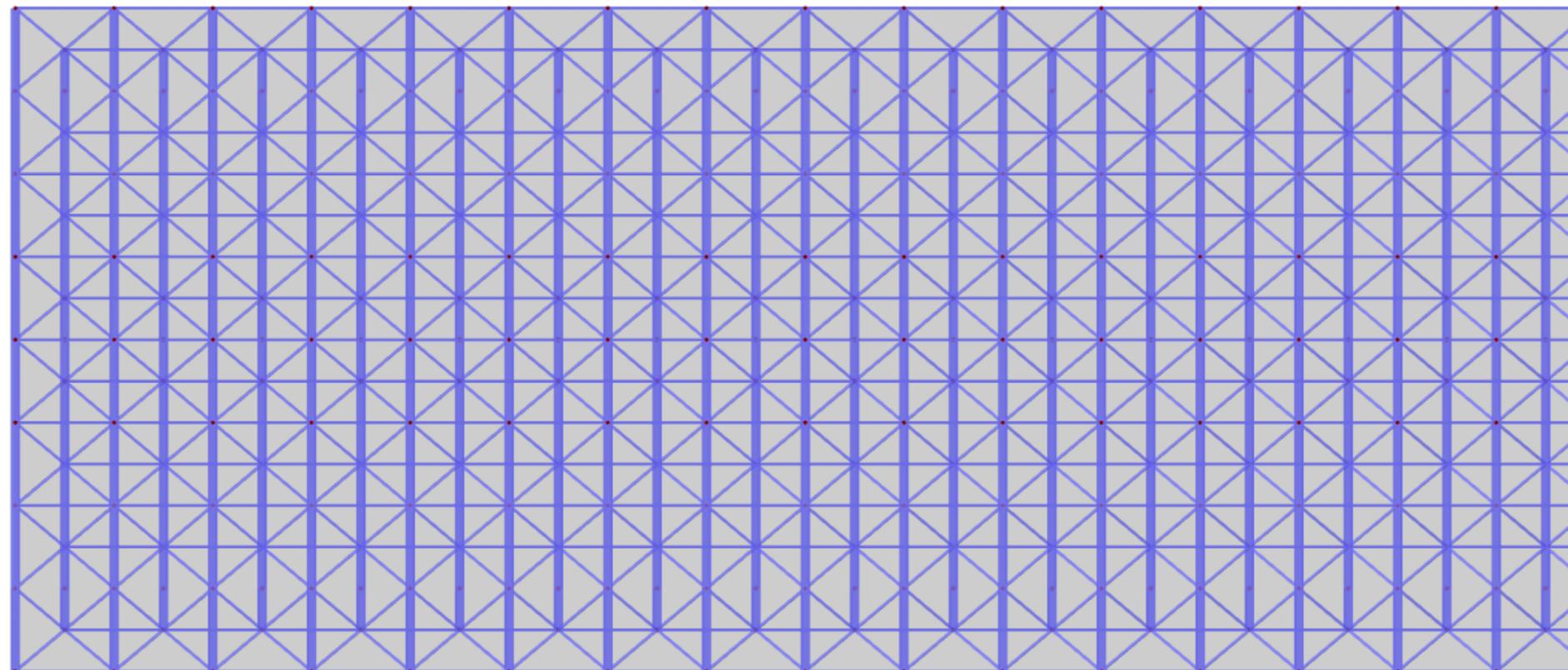
Imágenes 17 y 18. Secciones transversales de diagonales y cordones de la cercha de fachada



3.5. Elementos de la cubierta espacial

La cubierta espacial está formada por dos conjuntos de cordones transversales, superior e inferior; dos conjuntos de traves de atado, que conectan los elementos del cordón superior e inferior, respectivamente; y las diagonales, que unen cada uno de los entramados de barras superior e inferior. En la siguiente vista en planta se pueden ver cada uno de los elementos. Los elementos verticales son los cordones superiores e inferiores, los elementos horizontales son las traves de atado, y el resto de los elementos que forman 45º grados son las diagonales.

Imagen 19. Vista en planta. Distribución de elementos de la malla espacial.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

3.5.1. Cordones superior e inferior

Los cordones superior e inferior responden al esquema estructural de vigas continuas simplemente apoyadas, con dos tramos extremos en voladizo. El cordón superior es más largo que el inferior. Ambos están formados por perfiles compuestos de acero laminado de sección en caja.

Se trata de elementos tipo viga cuya sección varía de forma lineal. En ambos casos, la sección de mayor tamaño se encuentra en la unión con la cercha del pórtico lateral, y los puntos de menor sección están en los extremos del voladizo y en el centro de luz de la cubierta.

La distancia de separación entre las directrices de ambos cordones es de 2,7m. A continuación, se muestra las secciones intermedias de mayor y menor tamaño.

Imágenes 20 y 21. Secciones transversales de diagonales y cordones de la cercha de fachada

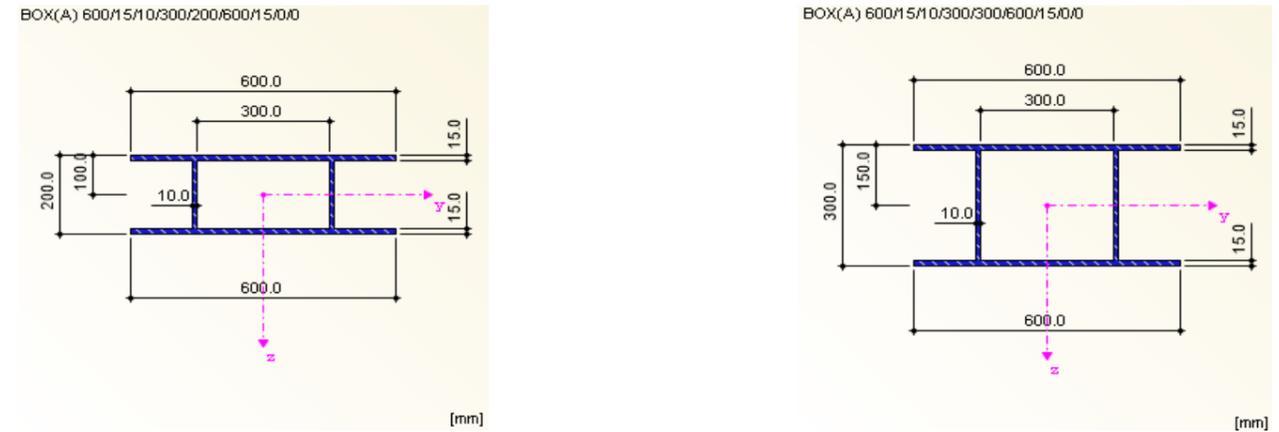
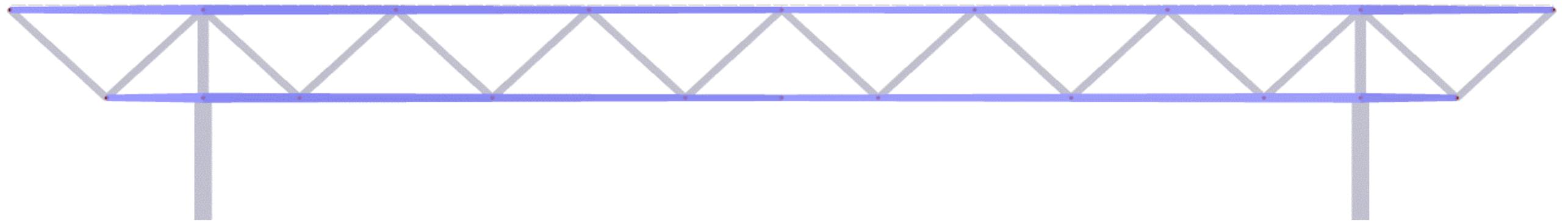


Imagen 22. Detalle de los cordones de la malla espacial.



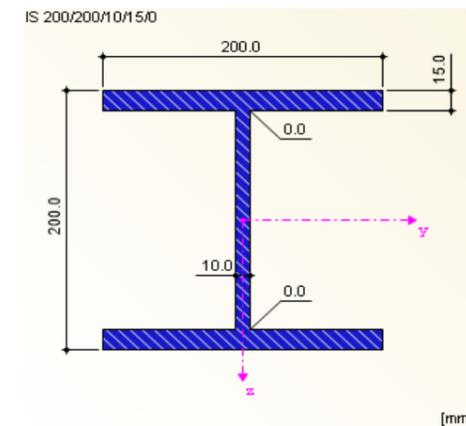
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

3.5.2. Trabes de atado

Las trabes de atado están formadas por perfiles IPE, y conectan los conjuntos de cordones superior e inferior respectivamente. La conexión es articulada y por lo tanto se comportan como vigas simplemente apoyadas.

Las dimensiones y espesores del perfil son los que se muestran en la figura adjunta. Están separadas a una distancia equidistante de 5,5 metros y tienen una longitud de 6,25 (excepto en el último tramo, que miden 7,32 metros).

Imagen 23. Sección Transversal de la trabe de atado.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

3.5.3. Diagonales

Las diagonales atan cada uno de los cordones superior e inferior. Transmiten los esfuerzos de la cubierta a los elementos inferiores de la cubierta, y permiten un reparto tridimensional de los esfuerzos. Es esta tridimensionalidad la que permite aprovechar el efecto de la doble curvatura y redistribuir esfuerzos no uniformes de manera más eficiente.

Las diagonales están conformadas por perfiles tubulares de 200mm de diámetro exterior y 8mm de espesor. La longitud de cada una de las diagonales es de 4,962 m.

La unión entre todos los elementos de la cubierta, con las 4 diagonales el cordón, superior o inferior, y las traves de atado es articulada.

Imagen 25. Detalle de la intersección de diagonales de la malla espacial.

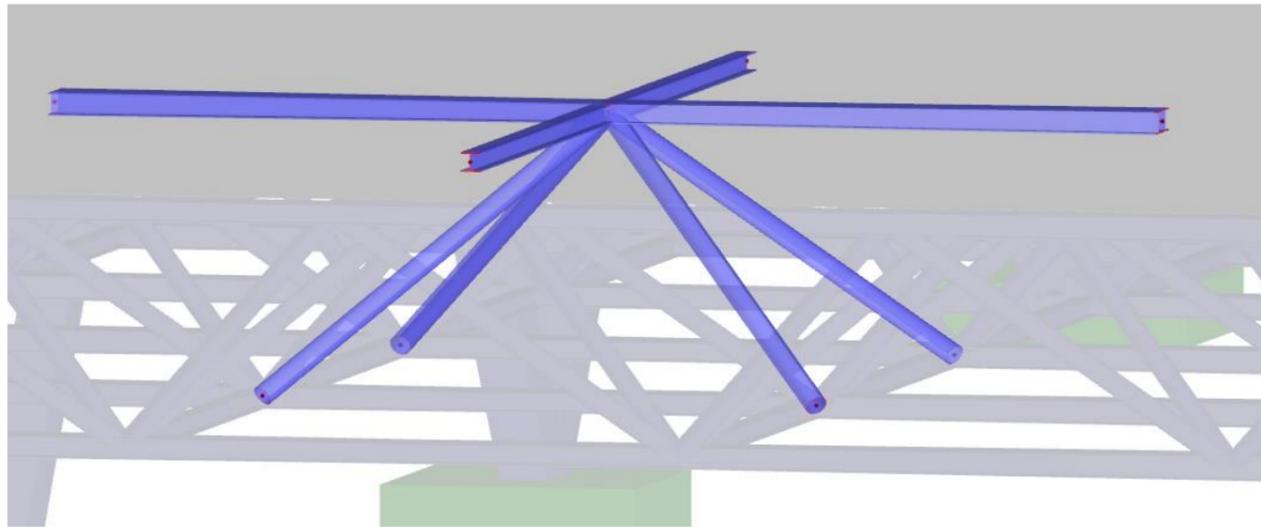


Imagen 24. Detalle de la intersección de diagonales de la malla espacial.

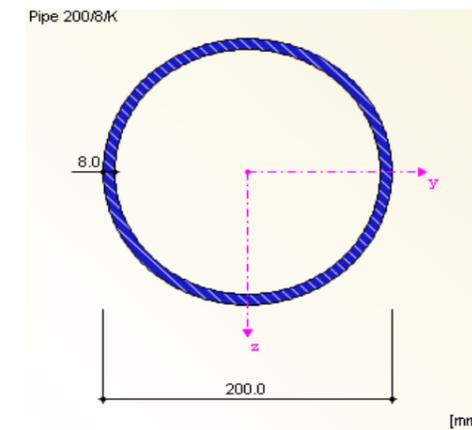
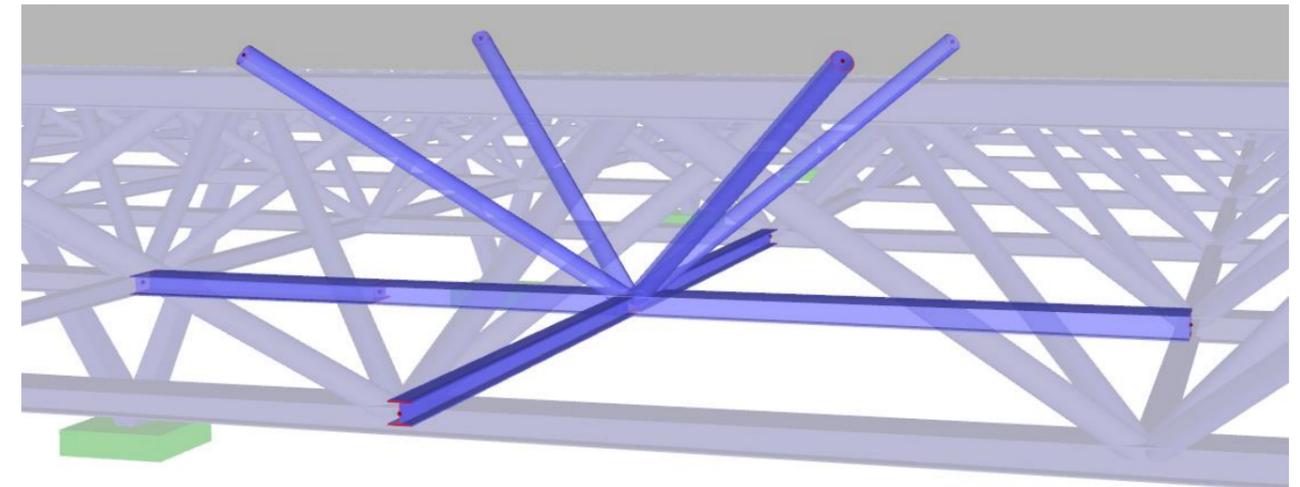


Imagen 26. Detalle de la intersección de diagonales de la malla espacial.

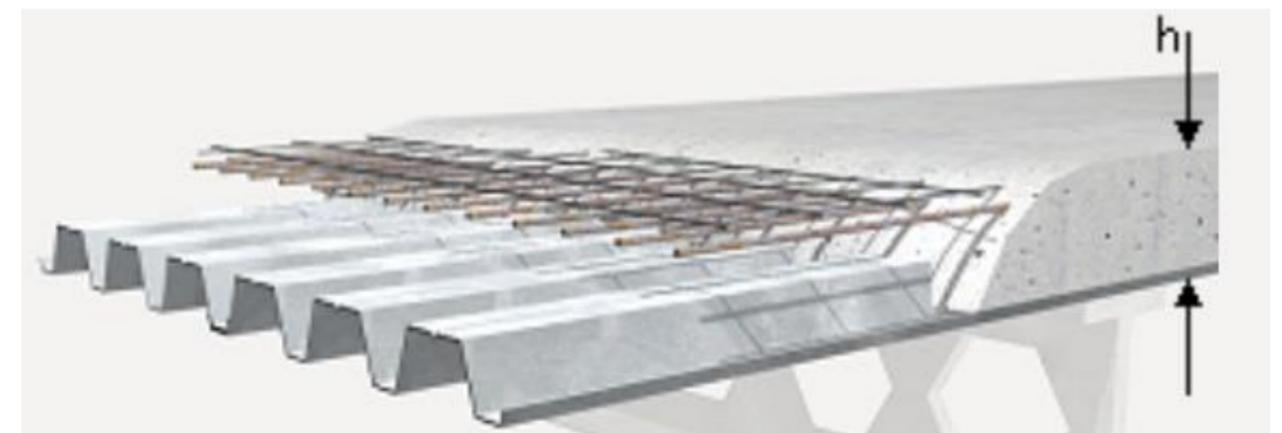


3.6. Elementos del forjado mixto colaborante

Sobre el entramado metálico de la cercha espacial, apoyado sobre los cordones y las traves de atado, se dispone un forjado mixto colaborante. Consiste en una chapa grecada con una altura de greca de 44mm, un Inter-eje de 172 mm y un espesor de la capa de hormigón de 5cm.

La capa de compresión de hormigón aligerado cuenta con un mallazo de acero B 500 S, con un diámetro de 6mm dispuesto con una separación de 15x15 mm entre barras.

Imagen 27. Detalle de la intersección de diagonales de la malla espacial.



Fuente: Imagen del catálogo del fabricante. Masters® Builders Solutions

4. BASES DE CÁLCULO

Aunque para el diseño de la estación de observatorio se han tenido muchas otras acciones en cuenta, a efectos de este trabajo tan solo se considerarán las más relevantes. Las cargas empleadas para el modelo conceptual de esta estructura serán las mismas que para la estructura de madera, de manera que sean comparables.

4.1. Normativa

Aunque la colección de normas habituales para el diseño de estructuras en México son normas técnicas complementarias, en adelante NTC; también se utilizan, aunque en menor medida las normas americanas, AISC y ACI, o las europeas.

Dado el carácter académico de este trabajo se trabajará principalmente con las normativa y filosofía de cálculo europeas, que son con las que está más familiarizado el alumno. Por otra parte, la normativa mexicana se ha mantenido para caracterizar los aspectos locales de la obra, tales como las acciones de sismo o el viento.

- UNE-EN 1991-1. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras

Esta norma se ha empleado en la determinación de los factores de carga, combinación de acciones, para el cálculo de las acciones introducidas en el dimensionamiento de la estructura (a excepción de las acciones de viento y sismo), y para establecer los valores límite en Estado Límite de servicio.

- UNE-EN 1995-1: Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero

Esta norma se ha utilizado como referencia para caracterizar y dimensionar los diferentes elementos estructurales de acero estructural. Los perfiles laminados, la chapa grecada y el mallazo de la capa de compresión.

- UNE-EN 1992-1: Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón

Esta norma se ha utilizado como referencia para caracterizar y dimensionar la capa de hormigón de compresión, dispuesta sobre la cubierta.

- NTC: Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones.

Esta norma se ha empleado para calcular el valor y disposición de las cargas de viento que actúan sobre la cubierta.

- NTC: Normas técnicas complementarias para diseño por viento

Esta norma se ha empleado para calcular el valor y disposición de las cargas de viento que actúan sobre la cubierta.

- NTC: Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo

Esta norma se ha utilizado para caracterizar las acciones de sismo, y determinar los métodos de análisis necesarios frente al mismo.

4.2. Acciones permanentes

Los valores característicos de las acciones contempladas en el cálculo de la estructura han sido recogidos de las Normas Técnicas Complementarias, en adelante NTC. Más en concreto se han empleado: *la NTC sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones.*

4.2.1. Peso propio

Esta acción corresponde al peso de los elementos estructurales. Los materiales utilizados en los elementos de la estructura son:

- Acero estructural S355: 78,50 kN/m³
- Hormigón aligerado C35/38: 17,5 kN/m³

4.2.2. Carga muerta

Son las debidas a los elementos no estructurales que gravitan sobre los estructurales. Las cargas muertas en la cubierta son:

- Elementos aislantes de la cubierta: 0.15 kN/m²

4.3. Acciones Variables

Los valores característicos de las acciones contempladas en el cálculo de la estructura han sido recogidos de las Normas Técnicas Complementarias, en adelante NTC. Más en concreto se han empleado: *la NTC sobre diseño por viento y la NTC para diseño por sismo.*

4.3.1 Sobrecarga de uso

La sobrecarga de uso viene impuesta como criterio arquitectónico y es de 1 kN/m².

Esta sobrecarga debe permitir que la cubierta sea transitable en toda su superficie, tan solo para labores puntuales de inspección y mantenimiento. Como se trata de la principal carga horizontal sobre la cubierta se crearán tres disposiciones diferentes, que recojan las distintas casuísticas:

- Sobrecarga de uso 1: dispuesta sobre toda el área de la cubierta
- Sobrecarga de uso 2: dispuesta tan solo en el vano intermedio, sin cargar los voladizos extremos.
- Sobrecarga de uso 3: dispuesta de forma alternativa entre los diferentes vanos, siguiendo una disposición en "damero"

4.3.2. Acciones térmicas

La acción térmica sobre la madera es muy importante. Conlleva variaciones de volumen, así como variaciones de su humedad y la humedad higroscópica del ambiente.

4.3.3 Viento

Como era de esperar la normativa europea no establece criterios para la definición de cargas de viento fuera de su territorio. Por ello, se van a emplear los valores de presión de diseño marcados por la *NTC para diseño por viento*, ya que estos si caracterizan de forma más precisa la realidad local en México de estas acciones.

Según el artículo 3.2 de dicha norma, la presión sobre las diferentes superficies que configuran la cubierta se calcula como:

$$P_z = 0.048 * C_p * V_D^2$$

Dónde:

C_p Coeficiente local de presión, que depende de la forma de la estructura

V_d Velocidad de diseño a la altura Z. Cuyo valor justificado más adelante corresponde con 1.77m/s

Los diferentes valores de las cargas que deberán aplicarse en la estructura son:

	C_p	V_d	p_z (kg/m ²)	q_z (kN/m ²)
Presión de diseño sobre fachadas	1,45	39,544	108,836	1,07
Presión de diseño sobre elementos de cubierta	2,1	39,544	157,625	1,55
Presión de diseño sobre bordes de cubierta	3,4	39,544	255,202	2,50

En total habrá 6 casos de carga diferentes en función de la dirección del Viento, y de si ejercen presión o succión sobre los diferentes elementos de la cubierta.

Viento X++	Viento X--
Viento X+-	Viento Y++
Viento X-+	Viento Y--

Para determinar V_d se ha seguido el apartado 3.1 de la *NTC-Acciones*.

$$V_d = F_{TR} \cdot F_\alpha \cdot V_R = 0,88 \cdot 1,152 \cdot 39 = 39,54 \text{ m/s}$$

Donde

F_{TR} factor correctivo por topografía. En este caso se trata de un terreno R3 con una topografía T3 (prácticamente plano). Por ello su valor es de 0,88.

F_α factor que toma en cuenta la variación de la velocidad con la altura. Al tratarse de un terreno R3 con una altura gradiente $\delta = 390\text{m}$ y un exponente $\alpha = 0.156$, el valor del factor para una altura de 24,8 m es de 1,152.

V_R velocidad regional según la zona que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura. Por encontrarse la cubierta en la Zona I: Delegación de Alvaro Obregón, con una importancia A (200años) de la construcción el valor será de 39.

4.3.4. Sismo

Se han tomado en cuenta las acciones de sismo para los distintos espectros de respuesta. El análisis dinámico y los resultados de estas cargas se han desarrollado más en detalle en el ANEJO Nº4. ESTUDIO COMPARATIVO. LA RESPUESTA FRENTE A SISMO.

4.3.5. Acciones accidentales adicionales

Además del sismo, por tratarse de una estructura de ferrocarril, también sería conveniente estudiar las acciones accidentales debidas por incendio, cuando la locomotora de ferrocarril queda estacionada y desalojada en la estación, o por impacto por descarrilamiento.

Se trata de acciones cuya probabilidad de ocurrencia es pequeña, pero de gran importancia. Sin embargo, en este trabajo debido a su carácter académico, no se tomarán en cuenta.

4.4 Combinaciones de Acciones

Para la combinación de acciones en Estado Límite Último y de Servicio se empleará la formulación del *Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero*. Los **coeficientes de combinación** se obtendrán a partir de la Tabla A1.1 Valores recomendados de los factores ψ para edificios.

- Para las sobrecargas en edificios de cubiertas, Categoría H: $\psi_0 = 0; \psi_1 = 0; \psi_2 = 0$
- Para las sobrecargas de viento en edificios: $\psi_0 = 0,6; \psi_1 = 0,2; \psi_2 = 0$

4.4.1 Estados Límite Último

Se considerará la combinación fundamental. Las combinaciones para situaciones de proyecto sísmicas por sismo se desarrollan en el ANEJO Nº4. Como no se han definido más acciones accidentales no se considerarán estas situaciones de proyecto.

- Combinación Fundamental: $\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,j} \Psi_{0,i} Q_{k,i}$

Donde:

$G_{k,j}$ es el valor característico de las acciones permanentes.

$Q_{k,i}$ es el valor característico de la acción variable determinante.

$\Psi_{0,i} Q_{k,i}$ es el valor representativo de la combinación de las acciones variables concomitantes.

$\Psi_{1,1} Q_{k,i}$ es el valor representativo frecuente de la acción variable determinante.

$\Psi_{2,1} Q_{k,i}$ son los valores representativos cuasi-permanentes de las acciones variables con la acción determinante.

4.4.2 Estados Límite de Servicios

Se considerará la combinación característica como la cuasi-permanente.

- Combinación Característica: $\sum G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum \Psi_{0,i} Q_{k,i}$
- Combinación Cuasi-permanente: $\sum G_{k,j} + \sum \Psi_{2,i} Q_{k,i}$

4.4.3 Combinaciones de carga

Si consideramos los coeficientes de seguridad de las acciones marcadas por el Eurocódigo 3. Obtenemos un total de 38 combinaciones de acciones, de las cuales tan solo son objeto de estudio 26. Se citan a continuación:

Combinaciones Fundamentales en ELU:

- **ELU 1:** 1,35G
- **ELU 2:** 1,35G + 1,35Gq
- **ELU 3:** 1,35G + 1,50QiH
- **ELU 4:** 1,35G + 1,35Gq + 1,50QiH
- **ELU 5:** 1,35G + 1,35Gq + 1,50QiH + 0,90Qw
- **ELU 6:** 1,35G + 1,50QiH + 0,90Qw
- **ELU 7:** 1,35G + 1,50Qw
- **ELU 8:** 1,35G + 1,35Gq + 1,50Qw
- **ELU 9:** 1,00G
- **ELU 10:** 1,00G + 1,35Gq
- **ELU 11:** 1,00G + 1,50QiH
- **ELU 12:** 1,00G + 1,35Gq + 1,50QiH
- **ELU 13:** 1,00G + 1,35Gq + 1,50QiH + 0,90Qw
- **ELU 14:** 1,00G + 1,50QiH + 0,90Qw
- **ELU 15:** 1,00G + 1,50Qw
- **ELU 16:** 1,00G + 1,35Gq + 1,50Qw

Combinaciones Características en ELS:

- **ELS Ch 1:** 1,00G
- **ELS Ch 2:** 1,00G + 1,00Gq
- **ELS Ch 3:** 1,00G + 1,00QiH
- **ELS Ch 4:** 1,00G + 1,00Gq + 1,00QiH
- **ELS Ch 5:** 1,00G + 1,00Gq + 1,00QiH + 0,60Qw
- **ELS Ch 6:** 1,00G + 1,00QiH + 0,60Qw
- **ELS Ch 7:** 1,00G + 1,00Qw
- **ELS Ch 8:** 1,00G + 1,00Gq + 1,00Qw

Combinaciones Cuasi-permanentes en ELS:

- **ELS Qp 1:** 1,00G
- **ELS Qp 2:** 1,00G + 1,00Gq

5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

En este apartado primero se especifica el programa comercial y sus diferentes módulos empleados para el cálculo de la cubierta. Mas tarde en este apartado se describe el modelo de cálculo empleado, la geometría y tipos de elementos empleados para obtener los resultados.

5.1. Programa Cálculo

El programa empleado para el cálculo de la cubierta ha sido **Dlubal RFEM 5**. Se ha trabajado con licencia de estudiantes otorgada tan solo para el desarrollo de este trabajo final de máster. Se trata de un software comercial desarrollado por la empresa alemana Dlubal Software.

RFEM es un software potente de elementos finitos que permite modelar, calcular y dimensionar modelos estructurales 2D y 3D compuestos de elementos tipo barra, placas, muros, láminas y sólidos. RFEM proporciona deformaciones, esfuerzos internos, esfuerzos en los apoyos, así como también las tensiones de contacto del suelo.

Es un programa de estructura modular especializado en el cálculo de estructuras civiles y de edificación. Los módulos adicionales correspondientes facilitan la introducción de datos con la generación automática de estructuras y uniones, o también se puede realizar análisis y diseños avanzados según varias normas. Para el desarrollo de este anejo se han empleado el módulo de **RF-/STEEL EC3**, el cual realiza todos los cálculos característicos de los estados límite últimos, así como también los análisis de estabilidad y de deformaciones según la normativa EN 1993-1-1:2005.

5.2. Modelo de cálculo

Se ha modelizado la estructura con elementos tipo barra y un elemento tipo placa.

Los elementos tipo barra se han empleado para todos los perfiles metálicos de la estructura. En el apartado de descripción de la estructura se puede ver el modelo extruido de todas las barras empleadas.

Para el modelado del forjado mixto colaborante, se ha empleado un elemento tipo placa. El programa incorpora un módulo para insertar la rigidez de elementos híbridos, tales como chapas colaborantes.

Las comprobaciones estructurales se han realizado rápido empleando el módulo adicional.

6. RESULTADO DEL MODELO

En este apartado se presentan los resultados obtenidos por RFEM. Cómo no es objeto de este trabajo el cálculo de la estructura, ya que esta ya fue diseñada y validada por SENER, tan solo se presentarán los resultados para validar el modelo del alumno.

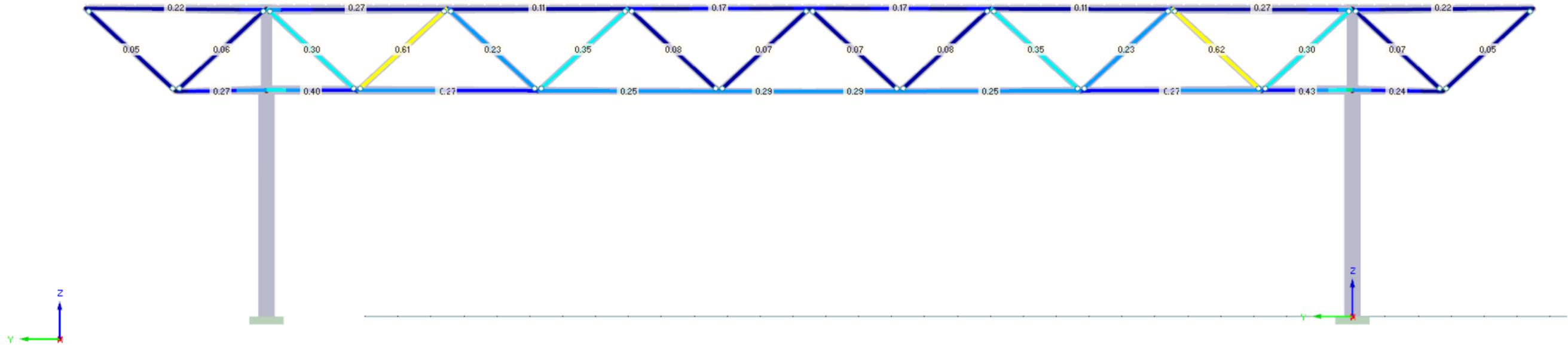
Los resultados sirven para tener unos valores de primera mano, con los que comparar la estructura de madera alternativa, desarrollada en los apartados siguientes. También sirven para entender más en detalle el comportamiento estructural de la cubierta diseñada por SENER.

Las comprobaciones estructurales se han realizado rápido empleando el módulo adicional **RF-/STEEL EC3**. A continuación se muestra el aprovechamiento máximo de los diferentes elementos de la cubierta, así como las deformaciones más limitantes.

6.1. Ratio de diseño de la estructura

A continuación, se muestra el aprovechamiento máximo de cada uno de los perfiles de la estructura para la **envolvente de las cargas en ELU**. El agotamiento máximo se produce en las diagonales para la combinación fundamental en ELU 5: $1,35G + 1,35Gq + 1,50Q_{iH} + 0,90Q_w$, que es la que actúa con una sobrecarga repartida sobre toda la superficie (Sobrecarga de uso 1) y con la carga de viento repartida a presión en toda la superficie (Viento X+++).

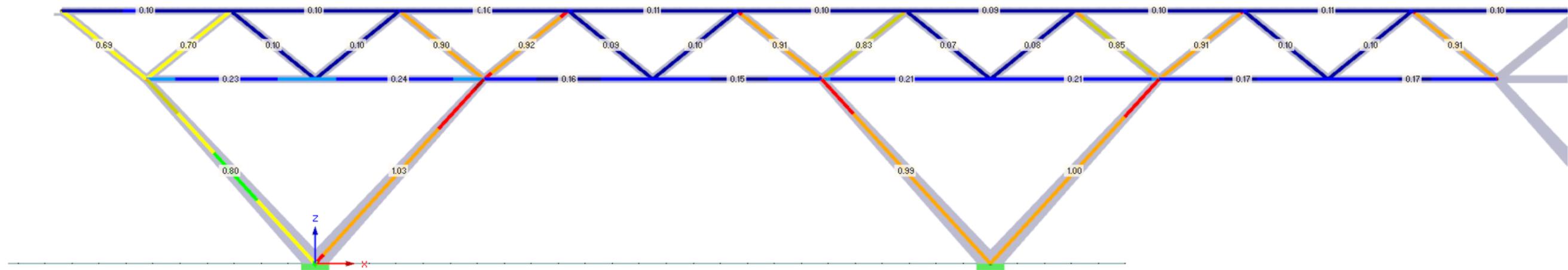
Imagen 28. Agotamiento de los perfiles que componen la malla espacial



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de RF-Steel/EC3 de Dlubal.

En cuanto al pórtico lateral, la situación más desfavorable se produce para la misma combinación de acciones. Los elementos que más sufren son los soportes y las diagonales de la cercha de atado.

Imagen 29. Agotamiento de los elementos de Fachada



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de RF-Steel/EC3 de Dlubal.

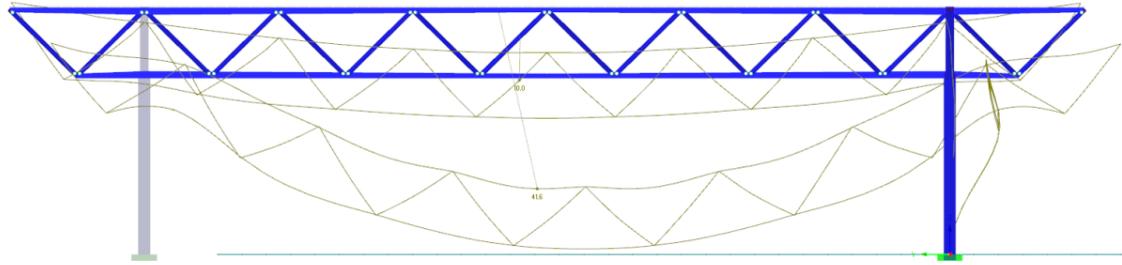
Los soportes sufren por la combinación de flexión es viada y compresión. Son especialmente vulnerables por estar inclinados y flectan tanto por la acción del viento en una dirección, como por la acción de peso propio de la estructura en la otra.

Todos los perfiles cumplen las limitaciones por agotamiento. aquellos más solicitados cumplen las condiciones de diseño con un aprovechamiento de alrededor del 100%.

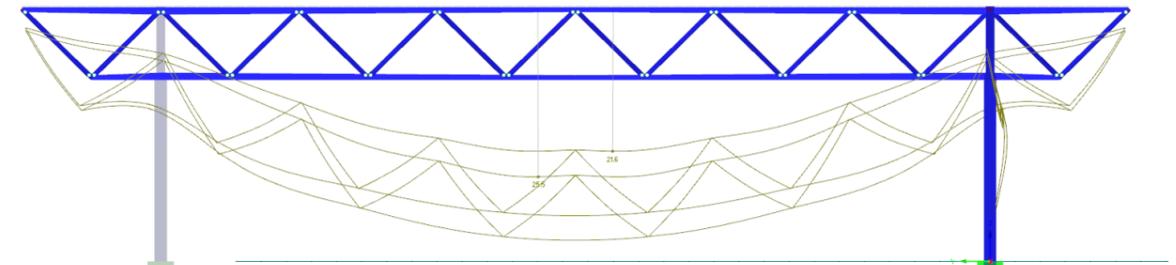
6.2. Deformaciones

En el siguiente apartado se muestran la envolvente de deformaciones para las combinaciones característica y cuasi-permanente.

Deformaciones: envolvente de acciones característica (41,6mm)



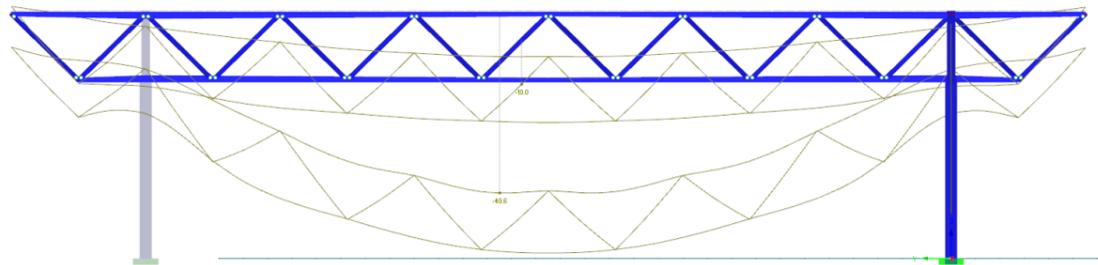
Deformaciones: envolvente de acciones cuasi permanente (25,5mm)



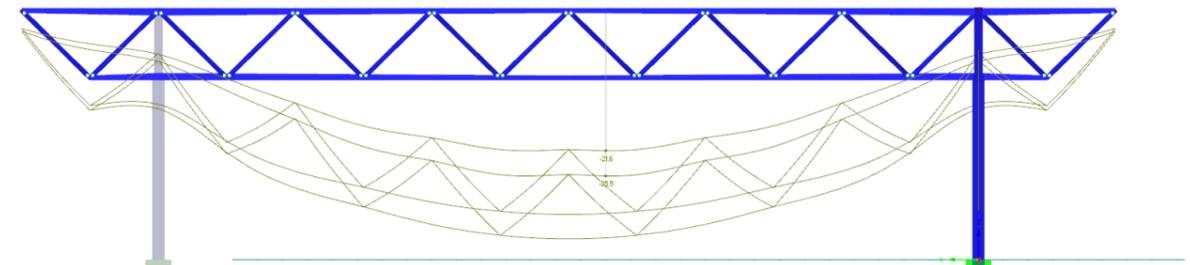
6.2.1 Comprobación de límites de flechas verticales

El límite de flechas verticales para cualquier combinación característica, a la hora de considerar la integridad de los elementos constructivos es de 1/300; y para tener en cuenta confort de los usuarios es de 1/350. Por otro lado, para considerar la apariencia de la obra habrá el límite de flecha que se empleará es de 1/300. Es decir, para que cumpla nuestra estructura —con una luz de 33 metros—, el desplazamiento vertical máximo para la combinación característica será de 95 mm, y para la combinación cuasi-permanente de 110 mm. Podemos ver que cumple en ambos casos.

Desplazamientos en Z: Envolvente de acciones característica (40,6 mm)



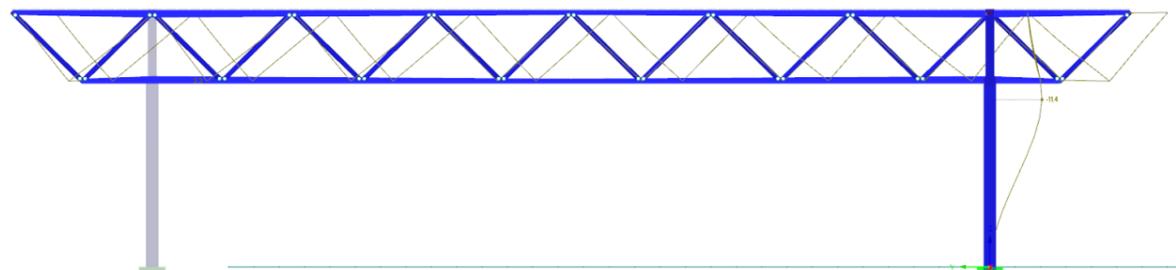
Desplazamientos en Z: envolvente de acciones cuasi-permanente (25,5 mm)



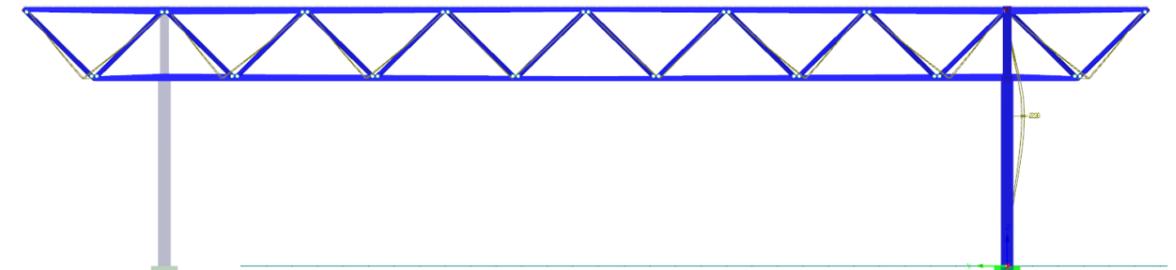
6.2.2 Comprobación de límites de flechas horizontales

El límite de flechas horizontales será de 1/250, de la altura de la planta, es decir de 29,2 mm. Tanto para considerar la integridad de los elementos estructurales para cualquier la combinación característica, como para considerar la apariencia de la obra para cualquier combinación cuasi-permanente. Se puede ver que ambas cumplen.

Desplazamientos en Y: Envolvente de acciones característica (11,4 mm)



Desplazamientos en Y: envolvente de acciones cuasi-permanente (2,6 mm)



7. CONCLUSIONES

La estructura proyectada por SENER cumple todos criterios de diseño esperados para una estructura de estas características, tanto los de agotamiento como los de deformaciones.

La estructura es una cubierta espacial con voladizos extremos. La cual, consiste en dos pórticos dispuestos en las dos direcciones ortonormales de forma que se consigue salvar las grandes luces necesarias en ambos sentidos.

El diseño permite a la estructura utilizar todo el canto útil disponible, sin invadir el gálibo necesario para la circulación del tren, y sin sobrepasar la altura límite. A pesar de ocupar todo el canto útil los elementos que lo conforman son suficientemente esbeltos como para dar al usuario la sensación diáfana al mirar al entramado de vigas.

La tipología de cercha espacial permite además aprovechar el efecto de la bidireccionalidad. Es decir, en el caso de eventos extraordinarios —como sismos, colisiones por impacto del tren o incluso explosiones— permite una redistribución rápida de esfuerzos lo que confiere a la estructura de una gran ductilidad global. Esta propiedad, en el caso de la ocurrencia de un evento, dará a los usuarios el tiempo suficiente para abandonar la estación.

Los voladizos extremos de la estructura cumplen una función estructural importante, además de aumentar la funcionalidad de la estructura —al aumentar superficie útil para proteger a los usuarios—. Si bien estos no eran exigidos en un primer momento por los pliegos, se ha decidido incorporarlos. Los voladizos mejoran el comportamiento global de la cubierta, por una parte, y de los soportes por otra. Por un lado, en la cubierta, los voladizos ayudan a compensar el momento máximo en el centro de vano, reduciendo considerablemente la flecha y los esfuerzos en ese punto; por otro lado, y a pesar de ser contraintuitivo, también mejora el comportamiento de los soportes inclinados, aunque suponga una mayor carga horizontal. Esto último, se debe a que la carga en los voladizos permite centrar los esfuerzos, y como los soportes se encuentran principalmente sometidos a flexión esviada, estos reducen los momentos considerablemente.

La estructura se puede considerar optimizada en términos económicos, aunque no todos los elementos se encuentran al límite de su agotamiento. Esto es, porque se ha buscado en la medida de lo posible, por una parte, repetir al máximo el número de materiales y perfiles; y por otra, se ha evitado proyectar elementos con una longitud mayor a 6 metros.

Aunque no se consiga una reducción óptima en términos de peso, si se puede considerar una buena solución en términos económicos ya que las condiciones fijadas, facilitan el montaje en obra —muy importante en este caso al tratarse de una obra en altura sobre una plataforma elevada—.

La repetición de elementos, del mismo perfil y longitud, supone una reducción de los tiempos de fabricación, reduce los errores durante la ejecución, y facilita la gestión del suministro. También supone en sí una reducción de los costes de fabricación, al tratarse de productos industriales y al acumular tanta demanda de un solo componente, la producción automatizada de los mismos en una cadena de montaje es más eficiente.

Cabe destacar también que, al evitar trabajar con elementos de longitudes mayores a 6 metros, se facilita el suministro por carretera y supone un ahorro considerable de los costes de transporte.

ANEJO Nº2: ESTUDIO DE SOLUCIONES: DISEÑO DE LA CUBIERTA DE MADERA

TITULACIÓN: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR: David Sanchis García

TUTOR: Carlos Llopis Camps

CURSO: 2020-2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. OBJETO Y ALCANCE DEL ESTUDIO	3
2. CONDICIONANTES	3
2.1. Geométricos y funcionales.....	3
2.2. Estéticos	3
2.3. Climáticos.....	3
2.4. Constructivos	3
2.5. Recapitulación de las condiciones de contorno	4
3. ANÁLISIS PRELIMINAR DEL PROBLEMA	5
3.1. Tipos de madera.....	5
3.1.1. Clase de servicio y de uso	5
3.1.2. Especie	5
3.1.3. Clase Resistente	5
3.2. Tipologías estructurales.....	7
3.2.1 Cercha plana unidireccional.....	7
3.2.2 Cubierta espacial.....	7
3.2.3 Viga uniforme de gran canto	7
3.2.4 Viga de canto variable.....	7
3.3. Sistemas para cubiertas planas en estructuras de madera.....	8
3.3.1 Forjado mixtos convencionales.....	8
3.3.2 Sistemas prefabricados de madera.....	8
3.3.3 Elección y diseño de los sistemas de forjado.....	9
4. ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS	10
4.1. Alternativa 1: Cercha Unidireccional	11
4.2. Alternativa 2: Cubierta espacial	12
4.3. Alternativa 3: Vigas de gran canto	13
4.4. Alternativa 4: Viga de canto variable	14
4.5. Comparación de Resultados.	15
4.5.1 Criterio de peso.....	15
4.5.2 Criterio económico.....	15
4.5.3 Criterio de percepción visual	16
4.5.4 Criterio de comportamiento estructural.	16
5. SOLUCIÓN ADOPTADA	16
6. CONCLUSIONES	16

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Emplazamiento de la Cubierta Observatorio	3
Imagen 2. Sección transversal, alzado lateral y vista 3D de las condiciones de contorno.....	4
Imagen 3. Cuadro de cortes de Madera.....	6
Imagen 4. Colocación de paneles de CLT	6
Imagen 5. Detalle unión Articulada de malla espacial de madera	7
Imagen 6. Detalle unión Articulada de malla espacial de madera	7
Imagen 7. Forjado mixto convencional sobre viguetas.....	8
Imagen 8. Sistemas prefabricados de madera	8
Imagen 9. Forjado mixto con sistema prefabricado de CLT	8
Imágenes 10 y 11. Diseño conceptual de la alternativa 1: Cercha unidireccional	11
Imágenes 12 y 13. Diseño conceptual de la alternativa 2: Cubierta espacial.....	12
Imágenes 14 y 15. Diseño conceptual de la alternativa 3: Vigas de gran canto	13
Imágenes 16 y 17. Diseño conceptual de la alternativa 4: Vigas de canto variable.....	14
Imagen 18. Cubierta espacial con forjado mixto convencional de viguetas	16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especies de Madera Estructural en el mercado mexicano	5
Tabla 2. Tabla de dimensiones normalizadas de madera laminada	6
Tabla 3. Resultados del estudio del espesor para el forjado de CLT	9
Tablas 4 y 5. Alternativa 1.a. Forjado mixto convencional de viguetas	11
Tablas 6 y 7. Alternativa 1.b. Forjado mixto con Lámina de CLT.....	11
Tablas 8 y 9. Alternativa 2.a. Forjado mixto convencional de viguetas	12
Tablas 10 y 11. Alternativa 2.b. Forjado mixto con Lámina de CLT	12
Tablas 12 y 13. Alternativa 3.a. Forjado mixto convencional de viguetas	13
Tablas 14 y 15. Alternativa 3.b. Forjado mixto con Lámina de CLT	13
Tablas 16 y 17. Alternativa 4.a. Forjado mixto convencional de viguetas	14
Tablas 18 y 19. Alternativa 4.b. Forjado mixto con Lámina de CLT	14
Tabla 20. Ranking de soluciones por peso.....	15
Tabla 21. Ranking de soluciones por precio	15
Tabla 22. Ranking de soluciones por percepción visual.....	16
Tabla 23. Ranking de soluciones por comportamiento estructural	16

1. OBJETO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

El objeto del presente anejo es el de analizar las diferentes soluciones estructurales en madera para grandes luces. Se escogerán aquellas tipologías que permitan encajar una solución estructural sin alterar la funcionalidad de la estructura metálica de referencia. Se pretende garantizar que ambas soluciones sean comparables.

Primero, se definen las condiciones generales de diseño de la estructura. Después, se analizan los diferentes sistemas estructurales que se ajustan a los requerimientos del proyecto. En este sentido, se estudiará el tipo y clase de madera, el sistema de forjado y la tipología estructural.

A partir de este análisis preliminar, se identificarán las principales soluciones objeto de estudio. Cada una de ellas, se someterá a una evaluación de aquellos aspectos que se consideran importantes, como son, la durabilidad, la estética y la economía. Finalmente se desarrollará más en detalle la solución adoptada.

2. CONDICIONANTES

2.1. Geométricos y funcionales

La cubierta descansa sobre una plataforma elevada de hormigón, cimentada al terreno por pilotes. La geometría y transmisión de las cargas deberá ajustarse a la misma.

- La estructura deberá cubrir como mínimo el área total de la plataforma de forma que proteja a los usuarios de la estación.
- La cubierta deberá ser plana por imposición arquitectónica. También deberá ser transitable para labores de reparación e inspección. Deberá permitir una sobrecarga de uso de 1 kN/m^2 .
- La superficie transitable debe quedar a 10,7m de altura sobre la plataforma.
- Para evitar la interferencia de la cubierta con las estructuras de soporte de la catenaria, se tiene que respetar una altura mínima entre la superficie de la plataforma y la cubierta de 7m.
- La luz entre pilares (de 33m) en la dirección principal de los pórticos debe salvarse sin elementos intermedios, tanto para crear un espacio diáfano para los usuarios, como para permitir la libre disposición de equipamientos e instalaciones industriales propios del ferrocarril.
- Los apoyos de la cubierta sobre la plataforma deben coincidir en los extremos de la plataforma con las costillas de refuerzo que sustentan la plataforma. La distancia longitudinal entre estos elementos auxiliares de refuerzo es de 25m en los tramos 1 a 8; y 29,25m en el último tramo.
- La dirección de la reacción sobre los apoyos deberá ser eminentemente horizontal, para evitar comportamientos indeseados de la losa de hormigón ya proyectada y ejecutada.

2.2. Estéticos

Cabe recordar que la estación de Observatorio se trata de una obra de gran envergadura. No solo tiene el propósito de servir como intercambiador entre la Ciudad de México y su periferia metropolitana, sino que sirve de imagen de bienvenida a la capital. La gran afluencia de viajeros y el tamaño de esta exigen que la estructura responda a ciertos mínimos estéticos por su importancia simbólica.

2.3. Climáticos

La temperatura¹ en la región a lo largo del año varía de media entre $6 \text{ }^\circ\text{C}$ y $27 \text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura mínima no baja menos de los $3 \text{ }^\circ\text{C}$ y la máxima no supera los $30 \text{ }^\circ\text{C}$. El grado de humedad relativa² medio varía a lo largo del año entre el 41% y el 70%.

2.4. Constructivos

La estructura deberá construirse sobre la ya ejecutada plataforma de hormigón a más de 14 metros de altura sobre el nivel del terreno. Ello implica la necesidad de disponer de grúas con suficiente alcance.

En el perímetro que configura la zona de obra hay suficiente espacio para disponer de grúas perimetrales, realizar acopios o incluso realizar montajes parciales de la estructura, si fuera necesario. La obra está muy bien comunicada a través de carreteras principales, sin embargo, al tratarse de un punto estratégico logístico junto a una importante estación de autobuses, estas carreteras tendrán una gran afluencia de tráfico, que no podrá detenerse.

Que la estructura sea modular y que los elementos sean de dimensiones moderadas, será particularmente decisivo en este caso concreto, tanto para el montaje como para la gestión logística de las mismas por carretera.

Imagen 1. Emplazamiento de la Cubierta Observatorio



Fuente: Elaboración propia. Google Maps

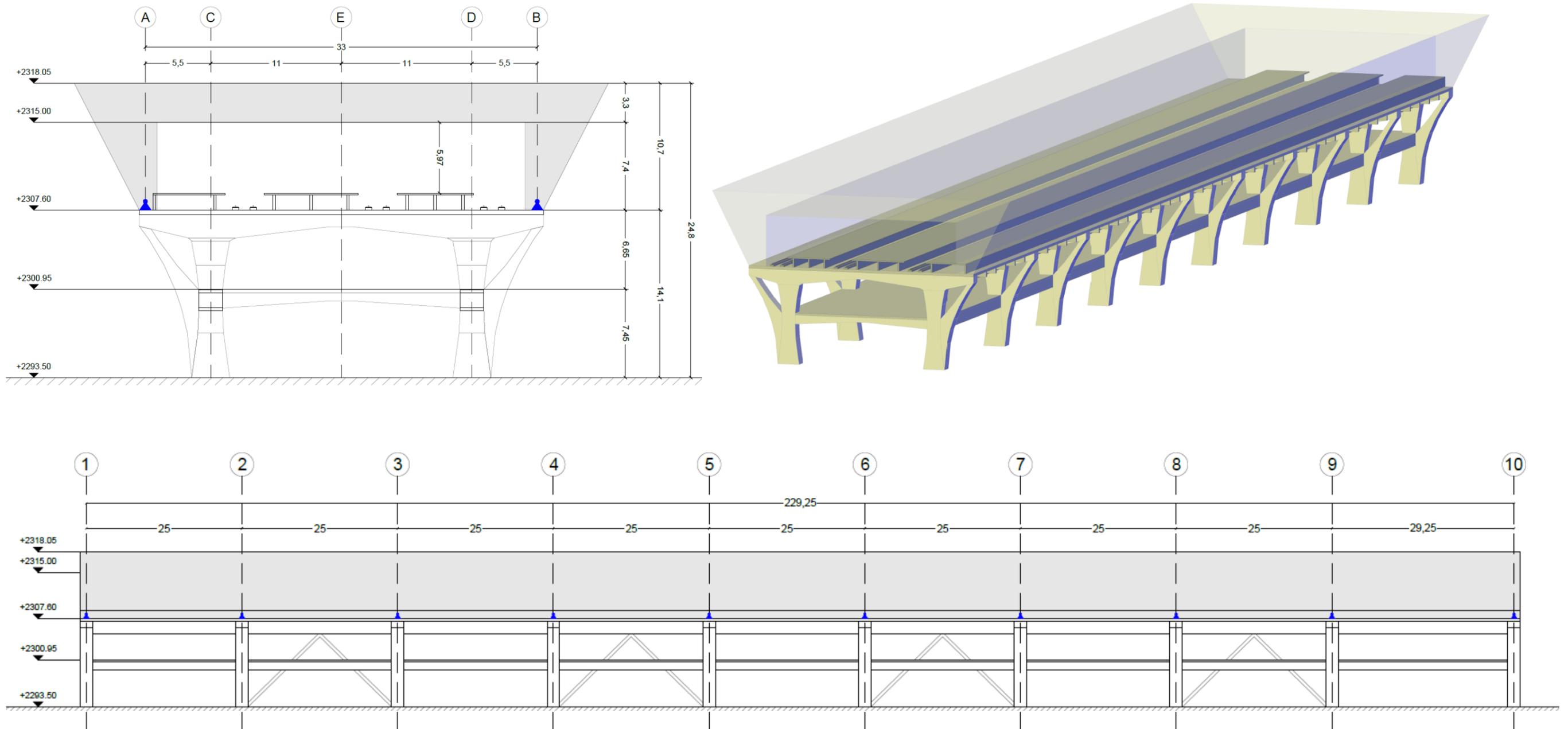
¹ Fuente: <https://es.weatherspark.com/y/5674/Clima-promedio-en-Ciudad-de-M%C3%A9xico-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>

² Fuente: https://www.weather-mx.com/es/mexico/ciudad-de-mexico-clima#humidity_relative

2.5. Recapitulación de las condiciones de contorno

A continuación, se representa el volumen disponible para encajar la estructura. Los marcadores en azul representan los puntos en los que deberá apoyar los soportes de la cubierta para dar continuidad a las columnas de la plataforma.

Imagen 2. Sección transversal, alzado lateral y vista 3D de las condiciones de contorno



Fuente: Elaboración propia.

3. ANÁLISIS PRELIMINAR DEL PROBLEMA

En este apartado se va a realizar un planteamiento inicial del problema, en él se van a discutir los siguientes aspectos relativos al encaje de la estructura:

- Tipos de madera de los que se van a disponer
- Tipología estructural
- Sistemas de forjados para estructuras de madera

3.1. Tipos de madera

A la hora de definir el tipo de madera que se va a emplear en el proyecto de estructuras, es necesario identificar la **clase de servicio**, en función del tipo de exposición y humedad a la que está sometida; la **clase de uso**, que varía dependiendo del tipo de protección que necesite; la **clase resistente necesaria**, según las solicitudes a las que esté sujeta; y la **especie**, que dependerá de su disponibilidad en el mercado.

Para cada una de las categorías descritas en el siguiente apartado, se empleará como referencia el sistema de clasificación europeo, aunque se hará referencia a los formatos y particularidades locales de México.

3.1.1. Clase de servicio y de uso

Primero de todo se ha identificado por separado la clase de servicio y la clase de uso a la que va a estar sujeta la madera:

a. Clase de servicio:

Es aquella que se asigna a cada elemento estructural y que depende de las condiciones ambientales previstas. El contenido de humedad de la madera reduce sus propiedades mecánicas, a medida que aumenta la concentración. Para considerar dicho efecto se establecen tres clases de servicio según el nivel y el tiempo al que está expuesto el elemento a una determinada humedad.

Las piezas de la cubierta que configura la estación de Observatorio México estarán sometidas a una temperatura³ media de 20 °C y una humedad relativa del aire que solo excede el 65% unas pocas semanas al año. Por ello, se asignan como **clase de servicio 1**.

b. Clase de uso:

La clase de uso⁴, por otro lado, considera la degradación de la madera ocasionada por los organismos xilófagos. Esta clasificación se emplea para definir el tipo de protección que se debe aplicar a la madera por criterios de durabilidad.

En este caso diferenciaremos entre los elementos portantes y de fachada y el resto de los elementos que configuran la cubierta. Los primeros, se encuentran totalmente a la intemperie y sometidos a la lluvia por lo que se les asignará una **clase de uso 3**; los segundos, al estar sometidos tan solo a la humedad ocasional por efecto de la lluvia horizontal, se considerarán como **clase de uso 2**.

³ Fuente: <https://www.weather-mx.com/es/mexico/ciudad-de-mexico-clima#temperature>

⁴ Fuente: <http://aitinforma.blogspot.com/2016/08/clases-de-servicio-y-clases-de-uso.html>

3.1.2. Especie

Para escoger la especie⁵ se ha prestado atención a su disponibilidad comercial en México. Por ello, se ha acudido a los catálogos de "FICHAS TÉCNICAS SOBRE CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS Y USOS DE MADERAS COMERCIALIZADAS EN MÉXICO" de la Comisión Nacional Forestal. En ellos, se han identificado las diferentes maderas, disponibles en el mercado mexicano, empleadas para la fabricación de vigas laminadas estructurales.

Tabla 1. Especies de Madera Estructural en el mercado mexicano

Madera	Peso [Kg/m ³]	Clase de uso	Módulo de Elasticidad E [N/mm ²]	Resistencia a compresión fc,0,d [N/mm ²]	Resistencia a flexión fm,k [N/mm ²]
Eucalipto E. x uro-grandis	900	II-III	13700-15700	46-66	72-120
Eucalipto E. globulus Labill	1300	II-III	12000-14000- 20000	41-66-71	90-107-130
Eucalipto E. Saligna Smith	950-1100	III-IV	11000-16500	39-66	80-120
Pino Ocote Pinus oocarpa	900-1000	III-IV	8600-14000- 15500	23-38-53	69-117-142
Pino Oregon Pseudotsuga menziesii	800-1000	III-IV	7400-10250- 13420	31-43-51	57-65-82

Fuente: Catálogos de fichas técnicas sobre Maderas comercializadas en México. Comisión Nacional Federal del Gobierno de México

Todas las maderas descritas podrán emplearse de forma indiferente tanto en los elementos portantes, como en la fachada. La decisión sobre que madera se terminará empleando en proyecto se tomará en función de la disponibilidad comercial de cada una y por su economía.

3.1.3. Clase Resistente

La madera de uso estructural se divide según la forma en la que se presenta y se trata. La clase resistente será diferente según se trate de:

- Madera aserrada,
- Madera laminada encolada, o
- Madera contralimanada.

a. Madera aserrada:

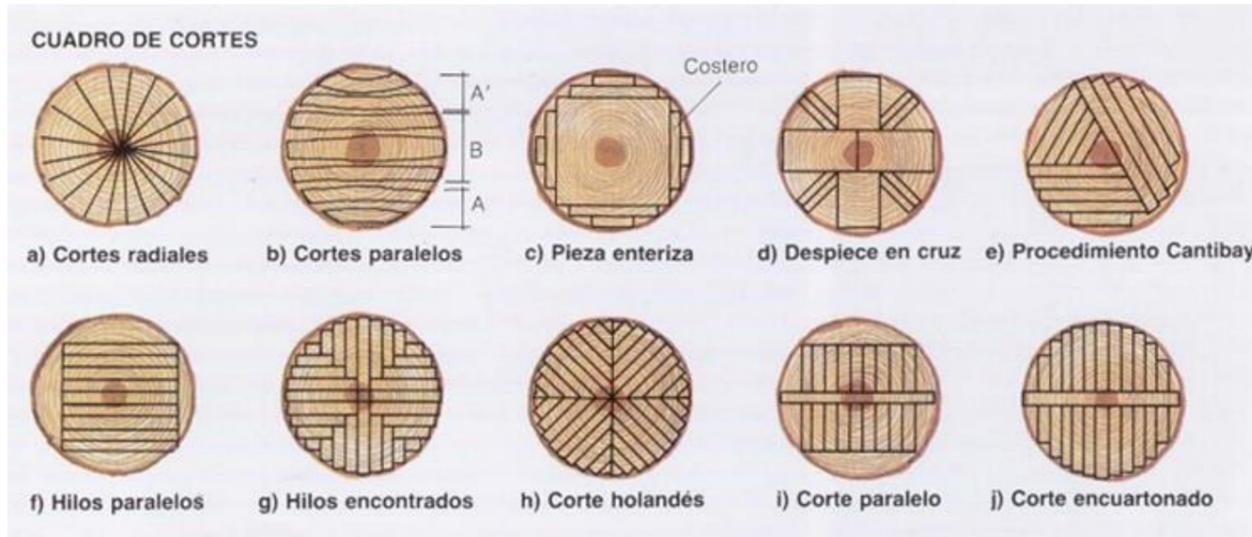
Es aquella en la que el tronco se despieza y se corta longitudinalmente, sin sufrir mayores manipulaciones. Se clasifican por su naturaleza en coníferas o frondosas (latifoliadas, según la norma mexicana); y por su valor característico de resistencia a flexión. Dentro del catálogo anterior se clasifican como coníferas las variedades de pino y como frondosas las variedades de eucalipto.

⁵ Fuente: <https://www.maderea.es/consideraciones-antes-de-comprar-vigas-de-madera/>

Cómo apenas sufren manipulaciones, el rango de longitudes y espesores de las piezas viene limitado por el tamaño del tronco del que proceden. La longitud de estos elementos no suele superar los 6,5m de longitud ni los 20cm de espesor. Suelen emplearse estructuras de edificación convencionales con luces limitadas.

Para aquellos elementos cuya longitud no supere los 6,5 metros y espesores superiores a 280mm, se van a emplear maderas aserradas, pues suponen un ahorro significativo frente a las encoladas. Para el cálculo preliminar van a emplearse las variedades de pino, con **características resistentes C24**, por ser la más común y económica.

Imagen 3. Cuadro de cortes de Madera



Fuente: www.maderayconstruccion.com/construir-con-madera-breve-guia-de-supervivencia-ii/

b. Madera laminada encolada

Permite formar elementos estructurales de grandes dimensiones, a partir de la superposición de láminas de madera, unidas de forma solidaria mediante algún adhesivo. Se pueden encontrar piezas formadas por un solo tipo de madera -homogéneas- o combinadas. Esta forma permite obtener piezas de dimensiones mucho mayores.

La longitud y forma de estos elementos es muy variada, permite la elaboración de vigas curvas o de canto variable de hasta 40m de longitud. Los perfiles estándar de estas piezas van variando, en espesor desde 9 hasta 22 cm, y en altura desde 6 hasta 40 cm. Es por ello, que se emplean para proyectar estructuras de grandes luces de madera.⁶

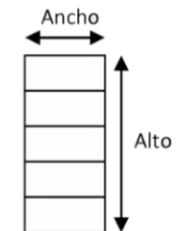
Las Normas Técnicas Complementarias (NTC) mexicanas no contemplan la clasificación de estas últimas, a pesar de su uso extendido en el país, y especifican que estos deberán ser aprobados por la administración. En este sentido propondremos la clasificación resistente que proponen las normas europeas (UNE-EN 14080 y UNE-EN 386) que son ampliamente reconocidas en el país.

Dada la singularidad de nuestra obra y la necesidad de salvar grandes luces, se va a recurrir también a la madera laminada encolada, para aquellos elementos que superen las dimensiones normalizadas. En este sentido, para realizar un cálculo preliminar, se van a usar las propiedades resistentes características de la madera **GL24h** por ser la más empleada hoy en día. De esta forma se garantiza su disponibilidad comercial.

⁶ Fuente: www.maderea.es/madera-maciza-y-madera-laminada/

Tabla 2. Tabla de dimensiones normalizadas de madera laminada

Ancho (mm)	Alto (mm)												
	80	100	120	140	160	180	200	240	280	300	320	360	400
70		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
80	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
100		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
120			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
140				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
160					•	•	•	•	•	•	•	•	•
180						•	•	•	•	•	•	•	•
200							•	•	•	•	•	•	•
220								•	•	•	•	•	•



Fuente: <https://www.maderascasais.com/madera-estructural/vigas-laminadas>

c. Madera Contra-laminada

Son básicamente paneles prefabricados, elaborados a partir de la unión de varias capas en direcciones alternas, mediante la aplicación de adhesivos, como la cola, y tratamientos de presión.⁷

Las posibilidades son variadas, dependiendo de los espesores y el número de capas. Estas deben tener un número impar y como mínimo 3. Con mayor frecuencia los encontramos de 3, 5 o 7 capas. Los espesores varían desde los 80 milímetros hasta superar los 200. Espesores mayores son posibles, pero no frecuentes.

Por lo ello, para aquellos elementos que sobrepasen los espesores normalizados para maderas laminadas, (más de 40 cm) se exigirá el diseño con perfiles contrachapados de CLT. Estos serán principalmente los elementos de soporte y se diseñarán con láminas de 20, 30 o 40 mm madera C24 dispuestas alternativamente en direcciones ortogonales a 90º entre ellas.

Imagen 4. Colocación de paneles de CLT



Fuente: www.madera21.cl/que-pasa-con-el-clt-en-chile/

⁷ Fuente: www.maderame.com/paneles-madera-contralaminada/

3.2. Tipologías estructurales

Dada la necesidad por cuestiones arquitectónicas de ser plana, aquellas soluciones estructurales que se plantean son las siguientes:

- Cercha unidireccional
- Cubierta espacial
- Viga uniforme de gran canto
- Viga de canto variable

Tan solo se han planteado, aquellas soluciones puramente de madera. Las soluciones mixtas con acero pretensado pueden ser objeto de otros trabajos futuros.

También se ha obviado el empleo de soluciones con elementos curvos de grandes dimensiones, por diversos motivos. Entre ellos, la dificultad adicional de transportar elementos curvos de dimensiones tan grandes, o la dificultad para encontrar talleres especializados capaces de fabricar dichas piezas en México.

3.2.1 Cercha plana unidireccional

Las estructuras en celosía son las más habituales en el diseño de estructuras de madera. Permiten salvar grandes luces y su diseño está ampliamente estudiado. Suelen emplearse en estructuras aporricadas con una dirección principal definida. Dado su extendido uso de forma histórica, el diseño de las uniones está probado y no será complicado encontrar estudios de carpintería profesional capaces de ejecutarlas en obra fácilmente.

Para evitar el pandeo de las diagonales, va a escogerse una celosía tipo Pratt, de forma que estas estén solicitadas a tracción.

3.2.2 Cubierta espacial

Con cubierta espacial, nos referimos a mallas tridimensionales. Dada la naturaleza de nuestra cubierta y la necesidad de cubrir grandes luces en dos direcciones, esta clase de estructuras se adapta muy bien a las necesidades estructurales que buscamos.

Además, esta clase de estructuras actúan mucho mejor que cualquier otra tipología frente a acciones destructivas como el sismo, ya que es capaz de evitar el derrumbamiento frente a daños locales de la misma. Las mallas espaciales permiten una muy buena redistribución de los esfuerzos frente a fallo.

Por otro lado, si bien estas estructuras son muy comunes en el ámbito del acero, su uso no está tan extendido en las estructuras de madera. En el caso del acero existen patentes, como la de Lanik®, que permiten ejecutar en obra o en fábrica las uniones articuladas de estas estructuras de forma sencilla. Sin embargo, en el caso de la madera, aunque también existen patentes su uso es más desconocido y es posible que no se puedan encontrar en México. En este caso, la materialización de las uniones con esta clase de estructuras sería muy complicado.

Imagen 5. Detalle unión Articulada de malla espacial de madera



Fuente: docplayer.es/53481468-Editado-por-la-real-academia-de-ingenieria-2010-real-academia-de-ingenieria-2009-del-texto-ramon-arguelles-alvarez-isbn-deposito.html

3.2.3 Viga uniforme de gran canto

Se trata de pórticos simples con vigas de gran canto, este sistema es muy sencillo de construir, el principal problema reside en transportar elementos de grandes envergaduras hasta el lugar en el que se ejecuta la obra. Las piezas empleadas como vigas en esta clase de obras deberán ser necesariamente Madera laminada encolada o incluso CLT si supera ciertos límites de tamaño.

Imagen 6. Detalle unión Articulada de malla espacial de madera



Fuente: <https://eqoin.com/leroy-merlin-almeria-madera-laminada-espana/>

3.2.4 Viga de canto variable

Es una variante de la solución anterior de vigas, pero modificando el canto a lo largo de la directriz para optimizar la respuesta estructural y reducir el peso propio de la estructura. Una solución habitual son las vigas en panza de pez en soluciones biarticuladas. Como se dispondrán voladizos se buscará la forma análoga que mejor se ajuste.

Este caso, es igual de fácil de ejecutar en obra que la solución con vigas de gran canto, y presenta el mismo inconveniente logístico. Sin embargo, y aunque mejore la respuesta estructural y se reduzca la cantidad de madera a emplear, el coste adicional por solicitar piezas tan particulares, Suele equiparar en términos económicos la anterior solución.

3.3. Sistemas para cubiertas planas en estructuras de madera

Dada la necesidad de que la cubierta sea plana y transitable para operaciones de mantenimiento, se va a recurrir forjados de grandes luces para cubrir la estación. Como no es posible dejar la madera cara vista a la intemperie sin que se deteriore por acción de la lluvia, será necesario extender al menos una fina capa de hormigón. Por ello se va a recurrir a forjados mixtos madera-hormigón que contribuyan a la resistencia estructural de la cubierta.

En este apartado se presentan los tipos de cubiertas mixtos hormigón madera disponibles:

- Forjado mixto convencional con viguetas
- Sistemas prefabricados de madera

Este sistema con viguetas y encofrado perdido es el más habitual, por lo que objeto de análisis en el siguiente apartado. Se han descartado del estudio aquellos forjados convencionales mixtos madera-hormigón con aligeramientos cerámicos, por su elevado peso. Estos últimos suelen emplearse para forjados transitables en edificaciones y no a cubiertas.

3.3.1 Forjado mixtos convencionales

El sistema de forjado más común en el ámbito de las construcciones de madera⁸ es aquel en el que se extiende una capa de al menos 5 cm de hormigón sobre unas viguetas de madera. La losa suele contar con una capa única de malla electrosoldada y debe prestarse especial atención a la disposición de conectores, que deberán asegurar un comportamiento solidario entre las correas de madera y la losa. Suele disponerse también un encofrado perdido y una capa de aislante termoacústica e hidrófuga, que aumenta la durabilidad y funcionalidad de la estructura.

Imagen 7. Forjado mixto convencional sobre viguetas



Fuente: Catálogo de soluciones de Tecnaría S.p.A

3.3.2 Sistemas prefabricados de madera

Existen una gran variedad de forjados prefabricados de madera, se han estudiado las alternativas más empleadas.

a. Forjados de Madera contra-laminada (CLT).

Cómo ya se ha explicado en el apartado anterior, es un sistema que emplea láminas contrachapadas encoladas en dos direcciones con prestaciones similares a los sistemas modulares anteriores.

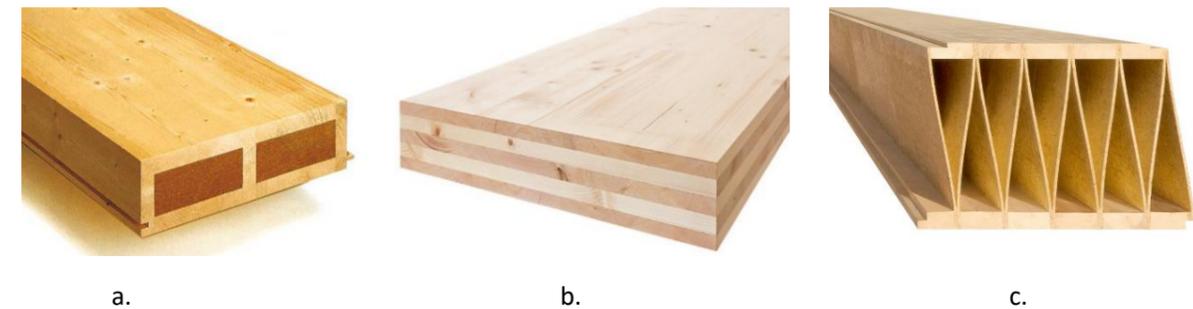
b. Sistemas modulares en forma de cajón.

Son muy livianos y permiten salvar luces de hasta 16 metros. Destacan por sus propiedades aislantes y su facilidad de montaje. Aunque estos sistemas tienen prestaciones similares o mejores a los forjados de CLT su uso está menos extendido que estos últimos.

c. Sistema Keilsteg.

Es mucho más sofisticado que los anteriores y permite luces de hasta 30m con un peso propio muy reducido. Aunque parece una solución muy interesante su fabricación es muy elaborada y no va a ser posible encontrarlo en el mercado maderero americano.

Imagen 8. Sistemas prefabricados de madera

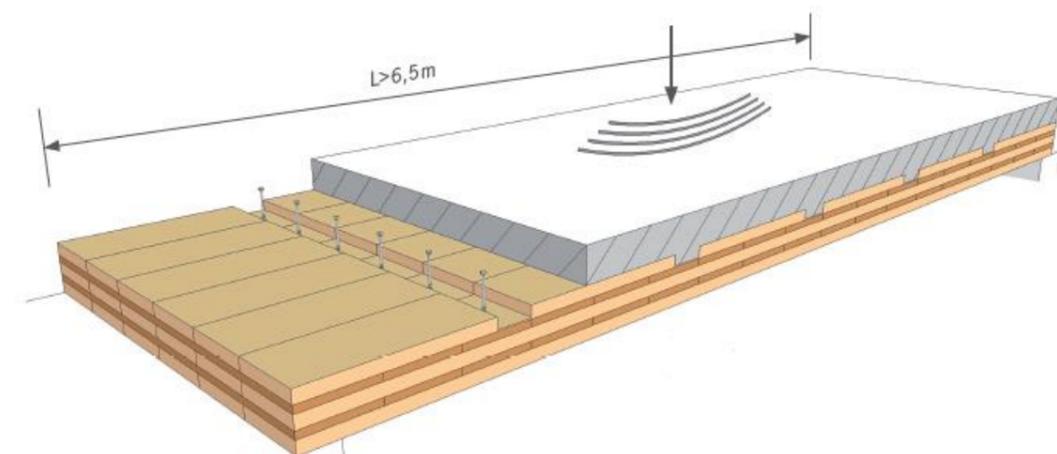


Fuentes: <https://www.lignatur.ch/>; <https://www.klh.at>; <https://kielsteg.de>

De los tres sistemas de forjados prefabricados presentados, se va a utilizar en el análisis comparativo el CLT, por ser el sistema más popular del mercado.

A pesar de que todas estas soluciones parecen ideales por ser tan livianas, no pueden estar sometidas a la intemperie. Es por eso, que se suele extender una fina capa de compresión de hormigón, configurando otro tipo de forjado mixto alternativo al visto en los apartados anteriores⁹.

Imagen 9. Forjado mixto con sistema prefabricado de CLT



Fuente: Catálogo KLH

⁸ Fuente: www.tecnaria.com/es/restauracion-de-forjados-de-madera/forjados-de-madera-los-dos-tipos/

⁹ Fuente: www.maderayconstruccion.com/las-diez-claves-para-dominar-el-diseno-de-edificios-de-clt/

3.3.3 Elección y diseño de los sistemas de forjado

Los sistemas de forjados mixtos hormigón-madera habituales, para cubiertas planas transitables para operaciones de mantenimiento, varían en función del sistema de soporte de la madera. En nuestro caso se ha decidido escoger entre los siguientes dos sistemas para comparar su viabilidad.

- Forjados mixto convencional con viguetas de madera
- Forjado mixto con sistema prefabricado de CLT

A continuación, se describe más en detalle los criterios empleados para dimensionar cada uno de los métodos y su respuesta estructural. Se debe tener en cuenta que estamos diseñando elementos capaces de cubrir flechas de hasta 3,3 metros. A continuación, se expone el resultado de dimensionar cada elemento.

a. Forjados mixto convencional con viguetas de madera

Tras el dimensionamiento, se han dispuesto las viguetas de 3,3m separadas entre ellas una distancia de alrededor de 1m. Estas apoyan sobre las trabes de atados superior, permitiendo el giro.

Aunque suele usarse en esta clase de aplicaciones hormigón aligerado, para asegurar su disponibilidad se empleará hormigón corriente C30/37. Se ha dimensionado comenzando con el espesor mínimo de 50mm y se ha ido incrementando para ver su respuesta estructural. Se ha visto que en este caso el espesor mínimo es que mejor se ajusta, por tratarse una estructura tan liviana.

Las dimensiones de las viguetas de madera aserrada, para un espesor de 50mm de capa de compresión, es de 130x260mm. Se han diseñado teniendo en cuenta la flecha para la combinación tanto característica como permanente, así como el agotamiento de la sección. También se ha comprobado que el año es suficiente para disponer los conectadores.

b. Forjado mixto con sistema prefabricado de CLT

Un forjado mixto con sistema prefabricado de CLT está configurado por dos elementos, por una parte, por el elemento prefabricado de madera, que se encola en fábrica, y por otra la losa de compresión de hormigón armado. Para determinar el espesor del forjado óptimo de esta clase de elementos hay que combinar los diferentes espesores posibles de ambos elementos.

Las chapas de madera CLT se realizan superponiendo láminas de madera de espesores normalizados de entre 20, 30 o 40 mm. La combinación de capas viene fijada por el fabricante y suele estar estandarizada. Como se trata de elementos orto-trópicos —presentan propiedades mecánicas diferentes según la dirección en la que actúe el momento—. Las composiciones escogidas, con entre 3 y 5 capas e intercaladas 90° la dirección de cada capa, son las que siguen:

- 60 mm 20/20/20
- 100 mm 20/20/20/20/20
- 120 mm 40/40/40
- 140 mm 40/20/20/20/40
- 180 mm 40/30/40/30/40
- 200 mm 40/40/40/40/40

A su vez cada una de estas combinaciones de espesores de chapa de CLT se ha combinado con diferentes espesores de hormigón: 50 mm, 80 mm y 100 mm.

Después de combinar cada uno de los espesores, con las diferentes combinaciones de chapas se han extraído una serie de conclusiones.

Dada la grande separación entre las correas y cordones de la cubierta, las luces que deben cubrir son demasiado grandes para un forjado mixto de CLT. A medida que aumenta el espesor de la capa de hormigón, el peso propio del elemento aumenta más de que puede resistir, por ello el único espesor admisible de hormigón es el mínimo de 5cm. Suficiente para aislar la madera de la intemperie.

De entre los diferentes espesores, se muestra la relación de resultados obtenidos, para un espesor de hormigón de 50 mm. Se muestran los resultados:

Tabla 3. Resultados del estudio del espesor para el forjado de CLT

Capa de compresión 50 mm	-	4/4/4	4/2/2/2/4	4/2/4/2/4	4/3/4/3/4	4/4/4/4
	Ref	120mm	140mm	160mm	180mm	200mm
Flecha máxima [mm] =	84,5	109	109,4	110	111,3	111,6
Ratio de diseño Cubierta [%] =	1	1,72	1,75	1,77	1,8	1,96
Ratio de diseño CLT [%] =	0	2,38	2,11	1,49	1,00	0,84

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver que a medida que aumenta el espesor de la lámina de CLT aumenta también el peso, las flechas y es necesario aumentar la sección de los elementos de la cubierta. Para realizar el estudio comparativo con láminas de CLT se ha empleado por lo tanto un forjado mixto con las siguientes capacidades.

El forjado mixto constará de una capa de compresión de 50mm y una lámina de CLT de 180mm de espesor. La capa de compresión se ejecutará con un hormigón C30/37 y una malla electrosoldada, con barras de 4mm de diámetro, repartidas sobre el forjado con una separación en las dos direcciones de 15x15 mm. La lámina de CLT estará formada por cinco capas 4/3/4/3/4. Las capas de 40 mm estarán encoladas de manera que proporcionen una mayor resistencia frente a la flexión del forjado en el pórtico principal. Las capas intermedias de 30mm de espesor estarán encoladas en la otra dirección ortogonal.

4. ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS

Para estudiar de forma cuantitativa la viabilidad económica, y el peso de cada una de las estructuras propuestas, se han elaborado una serie de modelos simplificados. Con el propósito de analizar las 4 tipologías estructurales propuestas y comparar la adecuación de los sistemas de forjados propuestos para cada una de ellas, se han elaborado un total de 8 modelos diferentes. En el estudio se ha excluido el diseño de la fachada, este problema se ha abordado tras concluir el estudio de soluciones.

Las alternativas estudiadas son:

- Alternativa 1.a. Cercha unidireccional con forjado mixto convencional de viguetas
- Alternativa 1.b. Cercha unidireccional con forjado mixto de CLT
- Alternativa 2.a. Cubierta Espacial con forjado mixto convencional de viguetas
- Alternativa 2.b. Cubierta Espacial con forjado mixto de CLT
- Alternativa 3.a. Vigas de gran canto con forjado mixto convencional de viguetas
- Alternativa 3.b. Vigas de gran canto con forjado mixto de CLT
- Alternativa 4.a. Vigas de canto variable con forjado mixto convencional de viguetas
- Alternativa 4.b. Vigas de canto variable con forjado mixto de CLT

Para considerar la viabilidad estructural de cada uno de los diseños se han fijado 2 criterios diseño: El agotamiento de las secciones siguiendo los criterios de diseño del *Eurocódigo 5* en Estado Límite Último; y el límite de flecha, de 95 mm (33/350), para la combinación cuasi-permanente.

Las alternativas se han modelado con el software de elementos finitos *R-FEM* de *Dlubal*, que incorpora módulos que automatizan la comprobación seccional de estructuras de madera. Más en concreto el módulo *TimberPro*. Se ha realizado un análisis elástico lineal de los componentes.

La principal carga impuesta a las estructuras ha sido una sobrecarga ficticia de 1,5 kN/m² sobre toda la cubierta. Con ella, se pretende representar de forma aproximada la combinación de cargas de sobrecarga de uso y viento de presión sobre la cubierta. Para el caso del forjado mixto convencional con viguetas, se ha incluido una carga muerta adicional de 0.15kN/m² que representa el peso de las láminas de madera que actúan como encofrado perdido.

En los siguientes apartados 4.1. a 4.2. se muestran cada uno de los modelos estructurales y los resultados obtenidos. Se muestran los criterios de diseño antes descritos, y la valoración económica. Para el análisis económico, se han obtenido los precios unitarios aproximados del generador de precios de CYPE. Por último, en el apartado 4.5 se realiza un análisis comparativo mediante tablas multicriterio, para evaluar de la forma más objetiva posible la idoneidad de cada estructura.

Antes de mostrar los resultados obtenidos del estudio de soluciones se da una breve descripción de los modelos empleados para llevar a cabo el estudio de soluciones.

Alternativa 1: Cercha Unidireccional

Esta solución se compone de cerchas planas sucesivas tipo Pratt, en las que las diagonales trabajan a compresión. Los montantes están separados entre sí a una distancia de 3.3 metros. La distancia entre las directrices del cordón superior e inferior es de 3.3 metros, de manera que las diagonales forman un ángulo de 45° con la horizontal siempre y miden 4.67 metros.

Cada una de las cerchas están dispuestas de forma sucesiva separadas a una distancia de 5,55 metros cada una. Están unidas por correas de atado superiores e inferiores. Todos los perfiles son piezas de madera rectangulares no esbeltas.

Alternativa 2: Cubierta Espacial

En este caso, la cubierta está compuesta por una cercha bidimensional, de forma que las diagonales no están contenidas en tan solo uno de los planos transversales paralelos de la cubierta. Las diagonales conectan nudos del cordón inferior con el nudo del cordón superior inmediatamente anterior y posterior al mismo.

La separación entre cordones inferiores es de 5,55 metros, y la separación de entre los sucesivos nudos de un mismo cordón es de 4,74 metros. Por ello la longitud total de los elementos que conforman las diagonales es de 4.96 metros.

Los perfiles que conforman los cordones y las correas de atado, tanto inferior y superior, están conformados por perfiles de madera rectangulares. Las diagonales por el contrario al estar solicitadas a flexión esviada se han escogido perfiles de sección circular.

Alternativa 3: Vigas de Gran Canto

Esta alternativa emplea vigas de gran canto simplemente apoyadas sobre las fachadas longitudinales. Se trata de un entramado de vigas ortogonales. Las vigas que conforman el pórtico principal de la estructura tienen un canto de más de 2 metros. Las correas de atado por otra parte tienen unas dimensiones más estándar. Ambas tienen una sección rectangular.

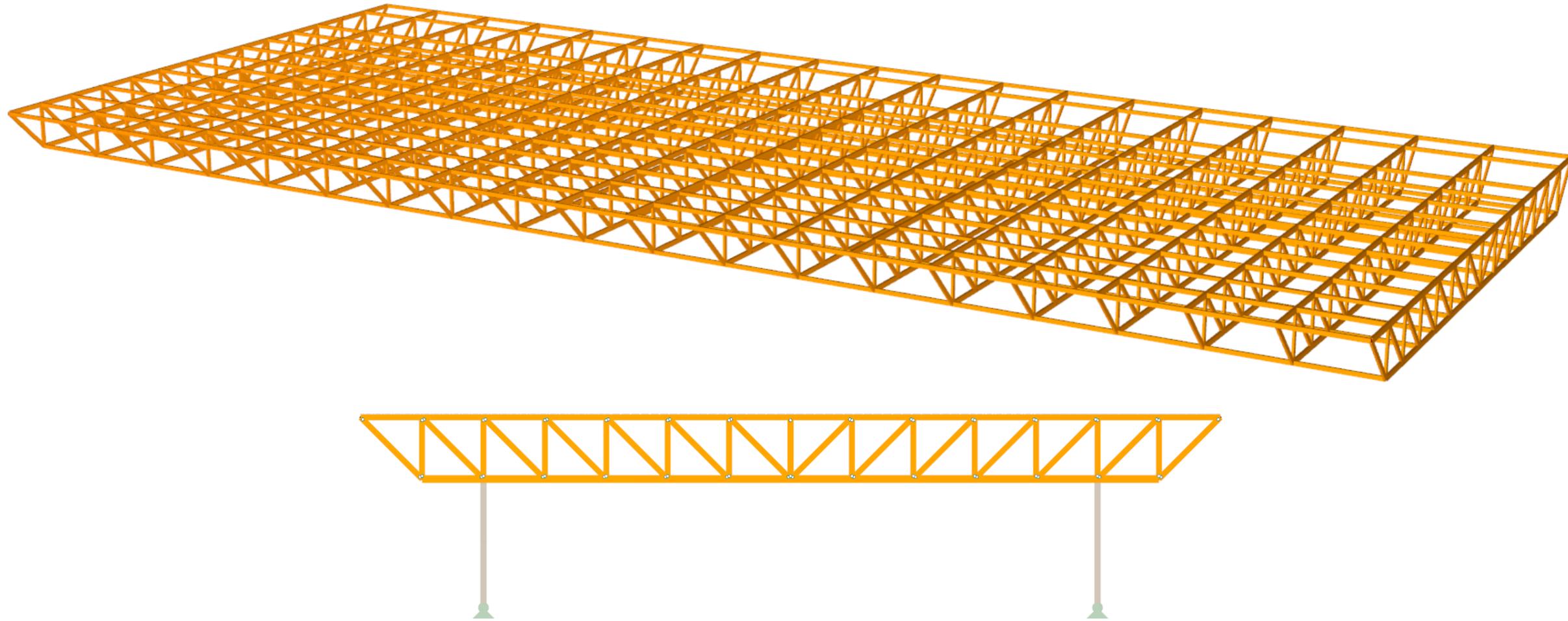
La separación entre piezas de gran canto en la dirección longitudinal es de 5 metros. En la otra dirección, la separación entre correas de 3.3 metros.

Alternativa 4: Vigas de Canto Variable

La última de las soluciones propuestas es similar a la alternativa 3 de vigas de gran canto, con la misma separación y disposición entre vigas y correas. La única diferencia que hay es que el canto de las vigas varía a lo largo de la directriz. El canto de la viga varía siguiendo el antifunicular de las cargas.

4.1. Alternativa 1: Cercha unidireccional

Imágenes 10 y 11. Diseño conceptual de la alternativa 1: Cercha unidireccional



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

Alternativa 1.a. Forjado mixto convencional de viguetas

Criterios de Diseño

Flecha máxima =	70,80	mm
Ratio de diseño Cubierta =	100	%

Valoración Económica

		Peso	Volumen	Precio Unit.	Importe
Forjado de Viguetas	Hormigón =	609.584 kg	243,83 m3	76,88 €/m3	18.745,93 €
	Madera Aserrada =	49.845 kg	2.093,49 m3	535 €/m3	1.120.017,15 €
Cubierta	Madera Aserrada =	151.633 kg	6.368,586 m3	535 €/m3	3.407.193,51 €
	Madera Laminada =	0 kg	0 m3	847,3 €/m3	0 €
Total Madera =		201.478 kg	8.462,076 m3		4.527.210,66 €
Total =		811.062 kg	160.858,076 m3		4.545.956,59 €

Alternativa 1.b. Forjado mixto con Lámina de CLT

Criterios de Diseño

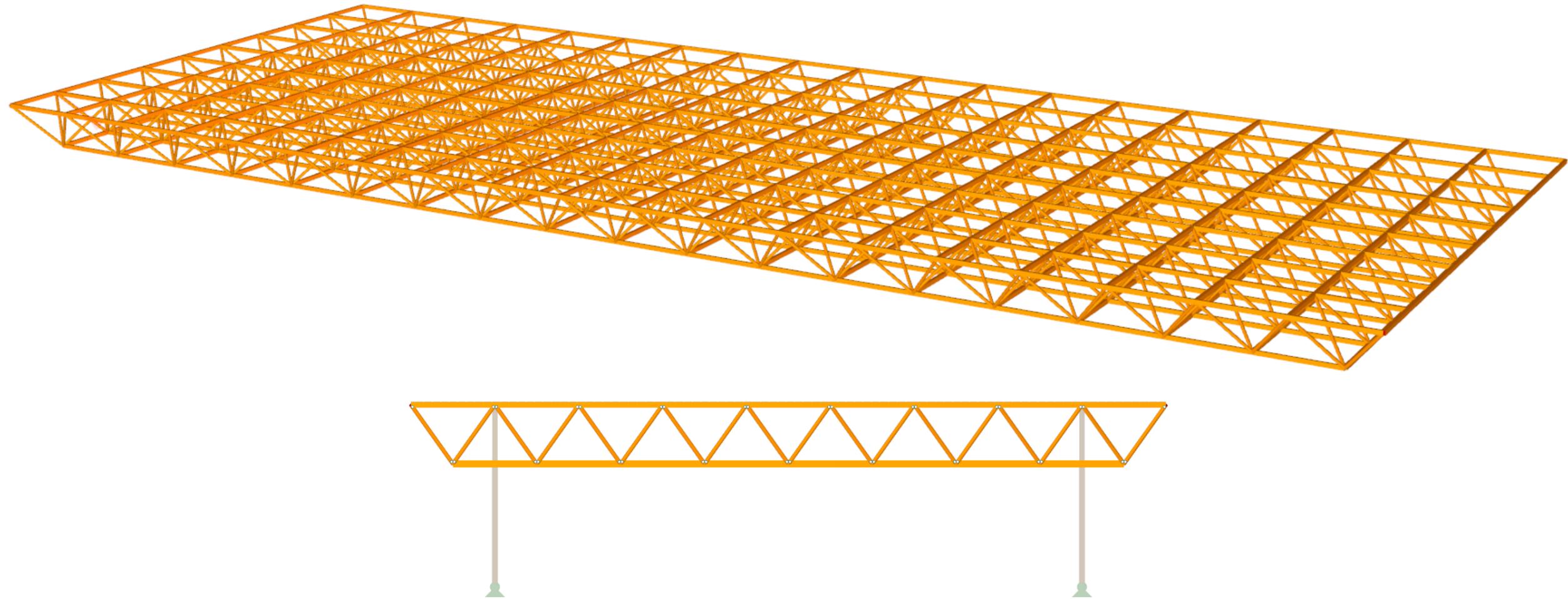
Flecha máxima =	76,10	mm
Ratio de diseño Cubierta =	100	%

Valoración Económica

		Peso	Volumen	Precio Unit.	Importe
Forjado CLT	Hormigón =	609.584 kg	243,83 m3	76,88 €/m3	18.745,93 €
	Lamina CLT =	368.676 kg	15.484,39 m3	535 €/m3	8.284.149,72 €
Cubierta	Madera Aserrada =	120.897 kg	5.077,67 m3	535 €/m3	2.716.555,59 €
	Madera Laminada =	26.611 kg	1.117,67 m3	847,3 €/m3	947.002,12 €
Total Madera =		516.184 kg	21.679,73 m3		1.1947.707,43 €
Total =		1.125.768 kg	174.075,73 m3		11.966.453,37 €

4.2. Alternativa 2: Cubierta espacial

Imágenes 12 y 13. Diseño conceptual de la alternativa 2: Cubierta espacial



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

Alternativa 2.a. Forjado mixto convencional de viguetas

Criterios de Diseño

Flecha máxima =	74,20	mm
Ratio de diseño Cubierta =	100	%

Valoración Económica

		Peso	Volumen	Precio Unit.	Importe
Forjado de Viguetas	Hormigón =	609.584 kg	243,83 m3	76,88 €/m3	18.745,93 €
	Madera Aserrada =	69.341,2 kg	2.912,3304 m3	535 €/m3	1.558.096,76 €
Cubierta	Madera Aserrada =	96.853,1 kg	4.067,8302 m3	535 €/m3	2.176.289,15 €
	Madera Laminada =	42.324,5 kg	1.777,629 m3	847,3 €/m3	1.506.185,05 €
	Total Madera =	208.518,8 kg	8.757,7896 m3		5.240.570,97 €
	Total =	818.102,8 kg	161.153,79 m3		5.259.316,45 €

Alternativa 2.b. Forjado mixto con Lámina de CLT

Criterios de Diseño

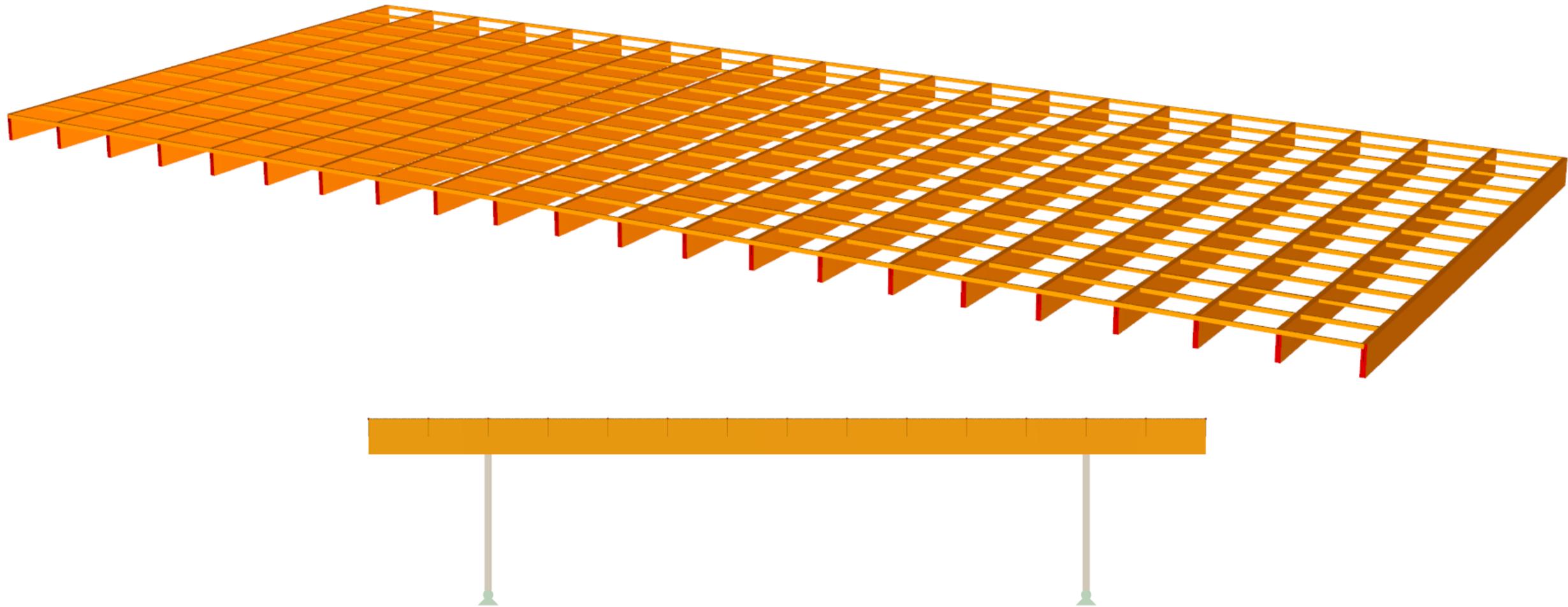
Flecha máxima =	78,50	mm
Ratio de diseño Cubierta =	100	%

Valoración Económica

		Peso	Volumen	Precio Unit.	Importe
Forjado CLT	Hormigón =	609.584 kg	243,83 m3	76,88 €/m3	18.745,93 €
	Lamina CLT =	338.580 kg	14.220,36 m3	535 €/m3	7.607.892,6 €
Cubierta	Madera Aserrada =	102.288 kg	4.296,096 m3	535 €/m3	2.298.411,36 €
	Madera Laminada =	44.035 kg	1.849,47 m3	847,3 €/m3	1.567.055,93 €
	Total Madera =	484.903 kg	20.365,926 m3		11.473.359,89 €
	Total =	1.044.724 kg	172.761,176 m3		11.492.105,82 €

4.3. Alternativa 3: Vigas de gran canto

Imágenes 14 y 15. Diseño conceptual de la alternativa 3: Vigas de gran canto



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

Alternativa 3.a. Forjado mixto convencional de viguetas

Criterios de Diseño

Flecha máxima =	95	mm
Ratio de diseño Cubierta =	70	%

Valoración Económica

		Peso	Volumen	Precio Unit.	Importe
Forjado de Viguetas	Hormigón =	606.375 kg	242,55 m3	76,88 €/m3	18.647,5 €
	Madera Aserrada =	55.092 kg	2.313,864 m3	535 €/m3	1.237.917,24 €
Cubierta	Madera Aserrada =	19.377,5 kg	813,855 m3	535 €/m3	435.412,425 €
	Madera Laminada =	251.010 kg	10.542,42 m3	847,3 €/m3	8.932.592,46 €
Total Madera =		325.479,5 kg	13.670,139 m3		10.605.922,13 €
Total =		931.854,5 kg	165.263,889 m3		10.624.569,38 €

Alternativa 3.b. Forjado mixto con Lámina de CLT

Criterios de Diseño

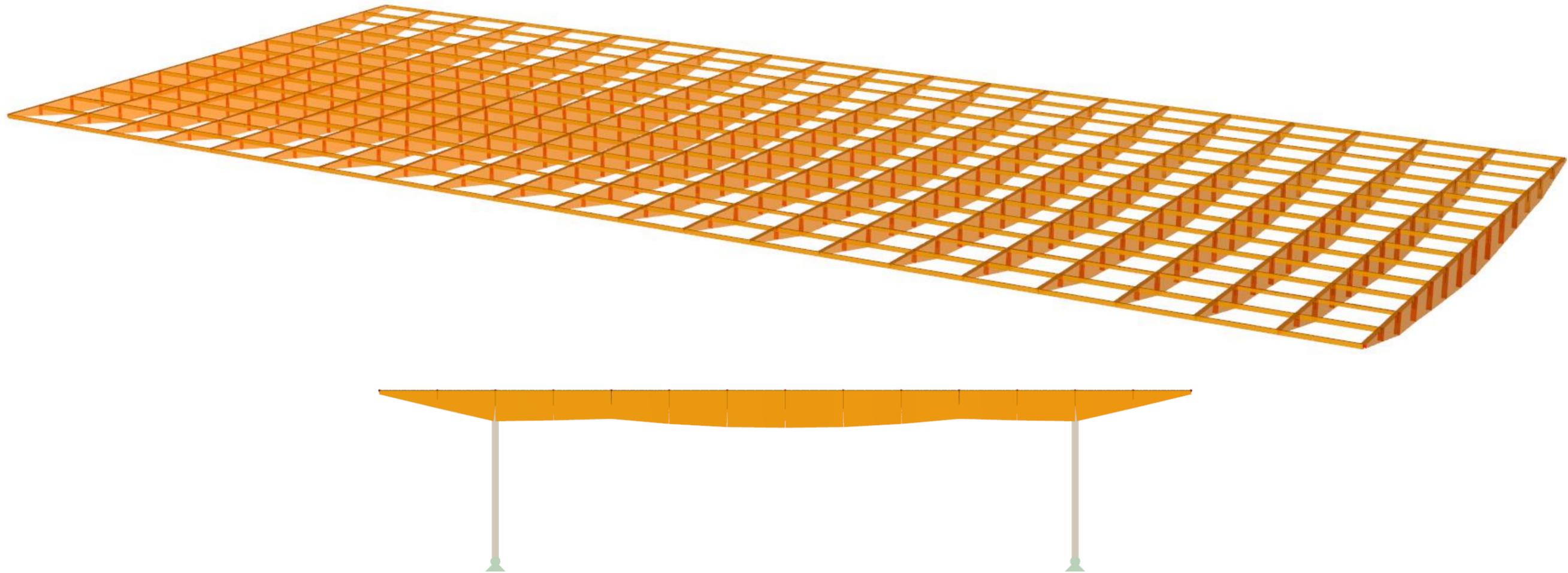
Flecha máxima =	95	mm
Ratio de diseño Cubierta =	75	%

Valoración Económica

		Peso	Volumen	Precio Unit.	Importe
Forjado CLT	Hormigón =	606.375 kg	242,55 m3	76,88 €/m3	18.647,5 €
	Lamina CLT =	366.736 kg	15.402,912 m3	535 €/m3	8.240.557,92 €
Cubierta	Madera Aserrada =	25.798 kg	1.083,516 m3	535 €/m3	579.681,06 €
	Madera Laminada =	236.923 kg	9.950,766 m3	847,3 €/m3	8.431.284,03 €
Total Madera =		629.457 kg	26.437,194 m3	-	17.251.523,01 €
Total =		1.235.832 kg	178.030,944 m3	-	17.270.170,26 €

4.4. Alternativa 4: Viga de canto variable

Imágenes 16 y 17. Diseño conceptual de la alternativa 4: Vigas de canto variable



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

Alternativa 4.a. Forjado mixto convencional de viguetas

Criterios de Diseño

Flecha máxima =	95	mm
Ratio de diseño Cubierta =	61	%

Valoración Económica

		Peso	Volumen	Precio Unit.	Importe
Forjado de Viguetas	Hormigón =	606.375 kg	242,55 m3	76,88 €/m3	18.647,5 €
	Madera Aserrada =	46.942,2 kg	1.971,5724 m3	535 €/m3	1.054.791,23 €
Cubierta	Madera Aserrada =	22.473 kg	943,866 m3	535 €/m3	504.968,31 €
	Madera Laminada =	204.138 kg	8.573,796 m3	847,3 €/m3	7.264.577,35 €
Total Madera =		273.553,2 kg	11.489,2344 m3		8.824.336,89 €
Total =		879.928,2 kg	163.082,9844 m3		8.842.984,14 €

Alternativa 4.b. Forjado mixto con Lámina de CLT

Criterios de Diseño

Flecha máxima =	95	mm
Ratio de diseño Cubierta =	75	%

Valoración Económica

		Peso	Volumen	Precio Unit.	Importe
Forjado CLT	Hormigón =	60.6375 kg	242,55 m3	76,88 €/m3	18.647,5 €
	Lamina CLT =	36.6736 kg	15.402,912 m3	535 €/m3	8.240.557,92 €
Cubierta	Madera Aserrada =	25.798,5 kg	1.083,537 m3	535 €/m3	5.79.692,29 €
	Madera Laminada =	208.263 kg	8.747,046 m3	847,3 €/m3	7.411.372,07 €
Total Madera =		600.797,5 kg	25.233,495 m3		16.231.622,29 €
Total =		1.207.172,5 kg	176.827,245 m3		16.250.269,53 €

4.5. Comparación de Resultados.

En el siguiente apartado se analizan los resultados obtenidos. Primero se va a comparar las estructuras en términos de peso, el cual se considera un indicador sencillo que arroja mucha información. Más adelante se comparan las soluciones en términos de precio, comportamiento estructural y percepción visual.

4.5.1 Criterio de peso

A continuación, se resumen los resultados en términos de peso. Comparar el peso de cada una de las soluciones va a ser interesante en este caso para valorar de forma cualitativa su comportamiento estructural.

Por una parte, un menor peso supondrá un mejor comportamiento frente a sismo —si las masas movilizadas son menores las fuerzas equivalentes que actuarán sobre la estructura serán menores—. Por otra parte, un menor peso también supondrá una reducción de las cargas que deberá soportar la plataforma. Además, si con una menor cantidad de material se pueden soportar las mismas cargas, ello indica un mejor aprovechamiento de cada uno de los elementos.

Se ve que las soluciones con el forjado convencional de viguetas de madera presentan un menor peso. Además, las soluciones con tipologías de cercha unidireccional y espacial son las que minimizan el peso, sin haber una diferencia significativa entre ambas soluciones.

A continuación, se muestran los resultados:

Tabla 20. Ranking de soluciones por peso

Ranking	Alternativa	Peso [kg]	Δ%
1	1.a Cercha	811.062,00	-
2	2.a Cubierta Espacial	818.102,80	1%
3	4.a Canto Variable	879.928,20	8%
4	3.a Gran Canto	931.854,50	15%
5	2.b Cubierta Espacial	1.094.487,00	35%
6	1.b Cercha	1.125.768,20	39%
7	4.b Canto Variable	1.207.172,50	49%
8	3.b Gran Canto	1.235.832,00	52%

Grafica 1. Distribución de pesos por elemento estructural de cada alternativa



Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Criterio económico

Para comparar las soluciones en términos económicos, no solo se van a tener en cuenta el coste de los materiales, además se valorará la complejidad para ejecutar cada solución en obra.

Se va a considerar que la ejecución de la construcción es un valor en el rango de entre el 10% y el 35% del importe medio de los materiales de todas las obras —10.781.478 €—.

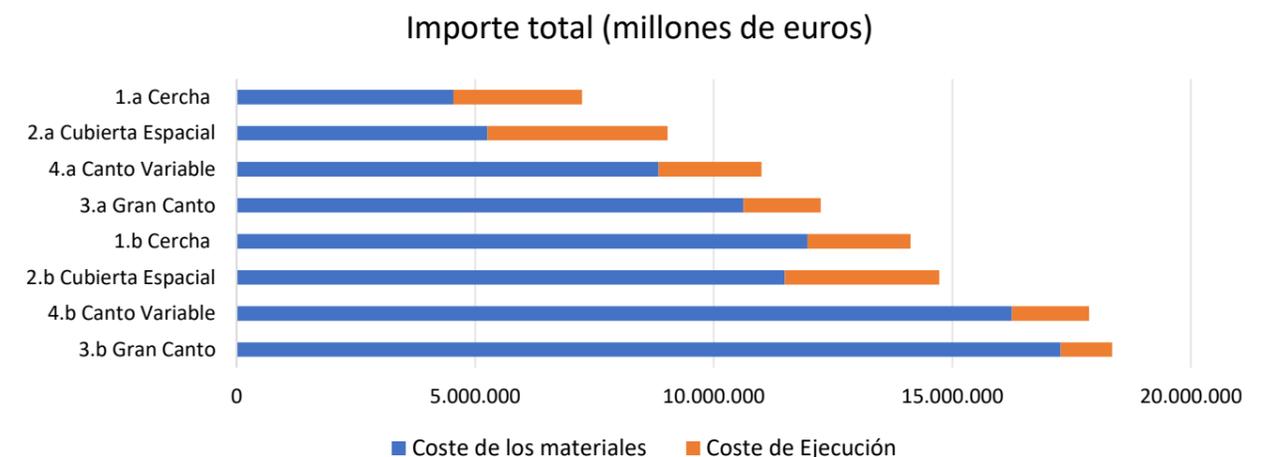
Para asignar los pesos se ha seguido el siguiente criterio:

- +5% Para las soluciones sin forjados industriales de CLT — un forjado mixto convencional supone la disposición de correas, conectadores y el hormigonado posterior en obra—.
- +10% Para las soluciones de gran canto —es el valor mínimo—.
- +15% Para las soluciones de canto variable —a pesar de ejecutarse de igual manera que las soluciones de gran canto, el canto variable requiere procesos y cortes adicionales para lograr esta forma particular—.
- +20% Para las soluciones con cerchas unidireccionales — por estar compuestas por muchas uniones que es necesario materializar en obra.
- +30% Para las soluciones de cubierta espacial —las uniones articuladas que unen hasta 6 barras en las 3 direcciones del espacio requieren un esfuerzo y coste adicional que debe tenerse en cuenta.

Tabla 21. Ranking de soluciones por precio

Ranking	Alternativa	Materiales [€]	% Obra	Importe [€]	Δ%
1	1.a Cercha	4.545.956,59	25	7.241.326,15	-
2	2.a Cubierta Espacial	5.259.316,90	35	9.032.834,29	16%
3	4.a Canto Variable	8.842.984,14	20	10.999.279,79	95%
4	3.a Gran Canto	10.624.569,38	15	12.241.791,11	134%
5	1.b Cercha	11.966.453,37	20	14.122.749,02	163%
6	2.b Cubierta Espacial	11.492.105,82	30	14.726.549,29	153%
7	4.b Canto Variable	16.250.269,53	15	17.867.491,27	257%
8	3.b Gran Canto	17.270.170,26	10	18.348.318,08	280%

Grafica 2. Distribución de importes por elemento estructural de cada alternativa



Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Criterio de percepción visual

Tabla 22. Ranking de soluciones por percepción visual

Ranking	Alternativa
1	2.a Cubierta Espacial
2	2.b Cubierta Espacial
3	3.a Gran Canto
4	3.b Gran Canto
5	4.a Canto Variable
6	4.b Canto Variable
7	1.a Cercha
8	1.b Cercha

Fuente: Elaboración propia

4.5.4 Criterio de comportamiento estructural.

En este subapartado se valorará el comportamiento estructural de las diferentes alternativas. Cada tipología estructural tiene sus mecanismos de fallo.

Tabla 23. Ranking de soluciones por comportamiento estructural

Ranking	Alternativa
1	2.a Cubierta Espacial
2	2.b Cubierta Espacial
3	1.a Cercha
4	1.b Cercha
5	4.a Canto Variable
6	4.b Canto Variable
7	3.a Gran Canto
8	3.b Gran Canto

Fuente: Elaboración propia

Las tipologías de cerchas, tanto unidireccional como espacial, aprovechan mejor los materiales. Es por eso, que la ratio de diseño de la estructura ronda el 100%. Por otro lado, las flechas se encuentran siempre en valores muy por debajo de los máximos permitidos, por lo que la deformación no es nunca un problema.

No obstante, hay una diferencia significativa entre el comportamiento estructural de una cercha unidireccional y una cubierta espacial. Estas últimas, está comprobado, tienen un comportamiento global mucho más dúctil, que las cerchas unidireccionales. Estas estructuras aprovechan la bidireccionalidad para redistribuir los esfuerzos, en caso de que algún elemento o unión falle.

Dada la naturaleza de nuestra cubierta, esta cualidad va a adquirir mucho peso, pues se trata de una cubierta que estará sometida a acciones extraordinarias, especialmente el sismo. Aunque también es interesante considerar otras acciones de impacto por parte del ferrocarril o incluso por explosiones ya sean provocadas o accidentales. Por tratarse de un edificio de importancia alta con una afluencia de usuarios importante, favoreceremos mucho la elección de una cercha espacial.

Por otro lado, las **tipologías de vigas de gran canto** dan problemas de deformaciones, los elementos no llegan nunca a aprovechar más del 70% de su límite de capacidad. Aunque los elementos en sí van a estar sobredimensionados, habrá que prestar especial atención a las uniones, pues serán puntos muy vulnerables en caso de fallo. Aunque las vigas de canto variable consigan un aprovechamiento mejor, se va a considerar que para esta clase de luces no se comportan tan bien como las cerchas.

5. SOLUCIÓN ADOPTADA

La solución adoptada por el alumno será la alternativa 2.a Cubierta Espacial —es decir, la solución de cubierta espacial con forjado mixto convencional de viguetas de madera y capa de compresión de hormigón—.

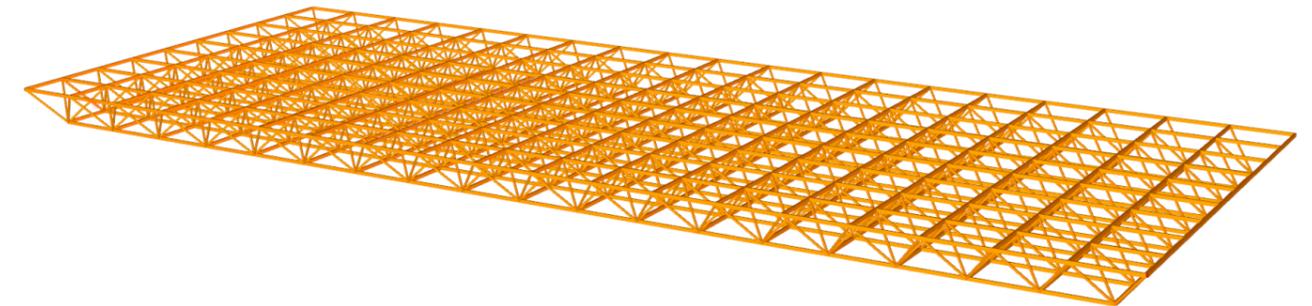
Si bien por criterios económicos la solución más interesante podría parecer la cercha unidireccional convencional, sin embargo, la diferencia en términos económicos tan solo asciende a un 16%. Por otro lado, hay que tener en cuenta que, en este estudio inicial, no se han considerado otras cargas excepcionales y adicionales como el sismo o el impacto.

Es muy posible que, si se hubieran incorporado el análisis de cargas sísmicas en el estudio, y se hubiera realizado un análisis no lineal *step-by-step* mostraría que la cercha convencional no cumple, y un dimensionamiento siguiendo estos criterios posiblemente obligara a incorporar mecanismos costosos para asegurar una ductilidad global de la estructura. De esta forma que en términos económicos estarían muy igualados.

En cuanto a la percepción visual, las cerchas espaciales, quizás por ser menos frecuentes suelen llamar más la atención del usuario y sin embargo sigue siendo una solución tan diáfana como la cercha unidireccional.

En cuanto a los sistemas de forjados, está claro que los forjados convencionales, a pesar de requerir un esfuerzo adicional durante su ejecución, son más baratos que los forjados mixtos de CLT.

Imagen 18. Cubierta espacial con forjado mixto convencional de viguetas



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

6. CONCLUSIONES

Cuando se plantea la utilización de un material diferente para dar una solución alternativa a una estructura es posible, que, por sus cualidades mecánicas, la tipología estructural que mejor se adapte a las cargas varíe de un material a otro. No obstante, este no es el caso.

En conclusión, en cubiertas no transitables de grandes luces en las dos direcciones —con luces de 33 y 25 metros—, cuando éstas son de una importancia alta y que además se encuentran en una región altamente sísmica, el empleo de una tipología de cercha espacial es óptimo tanto si se emplea la madera como si se utiliza el acero como material estructural.

ANEJO Nº3: DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL. CUBIERTA DE MADERA

TITULACIÓN: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR: David Sanchis García

TUTOR: Carlos Llopis Camps

CURSO: 2020-2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	4	4.2.2. Acciones térmicas	13
2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	4	4.2.3. Sismo	13
2.1. Introducción y condiciones de contorno	4	4.2.4. Acciones accidentales adicionales	13
2.2. Materiales	4	4.2.2. Viento.....	15
2.3. Descripción general de la estructura	5	5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO	17
2.4. Elementos de la fachada transversal	6	5.1. Programa informático.....	17
2.4.1. Soportes inclinados.....	6	5.2. Modelo de cálculo.....	17
2.4.2. Cercha de atado	7	6. COMPROBACIONES Y DIMENSIONAMIENTO	17
2.4.3. Placa de anclaje.....	7	6.1. Resultados generales del Modelo.....	18
2.4.4. Uniones de la cercha de fachada	7	6.1.1. Ratio de diseño de la estructura	18
2.5. Elementos de la cubierta espacial	8	6.1.2. Deformaciones.....	19
2.5.1. Trabes de atado	8	6.2. Comprobación de los elementos estructurales.....	20
2.5.2. Cordones superior e inferior.....	9	6.2.1. Soportes inclinados.....	20
2.5.3. Diagonales.....	9	6.2.2. Cercha de fachada: cordones inferiores	21
2.6. Elementos del forjado mixto.....	10	6.2.3. Cercha de fachada: cordones superiores.....	22
3. BASES DE CÁLCULO	11	6.2.4. Cercha de fachada: Diagonales y montantes.....	23
3.1. Normativa	11	6.2.5. Malla espacial: Cordones inferiores.....	24
3.2. Características de la madera.....	11	6.2.6. Malla espacial: Cordones superiores	25
3.2.1. Clase de servicio.....	11	6.2.7. Malla espacial: Diagonales circulares	26
3.2.2. Clase de uso	11	6.2.8. Malla espacial: Trabes de atado superiores	27
3.2.3. Especie	11	6.2.9. Malla espacial: Trabes de atado inferiores	28
3.3. Combinaciones de Acciones.....	12	6.2.10. Forjado: Viguetas	29
3.3.1. Estados Límite Último	12		
3.3.2. Estados Límite de Servicios.....	12		
3.3.3. Combinaciones de carga	12		
4. ACCIONES	13		
4.1. Acciones permanentes.....	13		
4.1.1. Peso propio	13		
4.1.2. Carga muerta	13		
4.2. Acciones variables.....	13		
4.2.1. Sobrecarga de uso.....	13		

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Modelo extruido de la alternativa propuesta en madera de la Estación Observatorio.	5	Imagen 33. Viento en X+	16
Imágenes 2,3 y 4. Descripción de los elementos de Fachada	6	Imagen 34. Viento en X-	16
Imagen 5. Sección transversal soportes inclinados	6	Imagen 35. Viento en Y++	16
Imágenes 6,7,8 y 9. Sección transversal de elementos cercha de atado	7	Imagen 36. Viento en Y-	16
Imagen 10. Placa de anclaje	7	Imagen 37. Agotamiento de los perfiles que componen la malla espacial	18
Imagen 11. Uniones articuladas de cercha	7	Imagen 38. Agotamiento de los elementos de Fachada	18
Imagen 12. Vista en planta. Distribución de elementos de la malla espacial.	8	Imagen 38. Deformaciones: envolvente de acciones característica (55,4mm)	19
Imagen 13. Sección Transversal de la trabe de atado.	8	Imagen 39. Deformaciones: envolvente de acciones cuasi permanente (73,3mm)	19
Imágenes 14,15 y 16. Sección transversal de los cordones de la malla	9	Imagen 40. Desplazamientos en Z: Envolvente de acciones característica (53,8 mm)	19
Imagen 17. Cordones de cubierta.....	9	Imagen 41. Desplazamientos en Z: envolvente de acciones cuasi-permanente (72,3 mm)	19
Imágenes 18, 19 y 20. Sección transversal de las diagonales de mallas	9	Imagen 42. Desplazamientos en Y: Envolvente de acciones característica (19,6 mm)	19
Imágenes 21, 22 y 23. Detalle de unión articulada.....	10	Imagen 43. Desplazamientos en Y: envolvente de acciones cuasi-permanente (22,7 mm)	19
Imagen 24. Forjado mixto tipo	10		
Imagen 25. Sobrecarga de uso 1.....	14		
Imagen 26. Sobrecarga de uso 2.....	14		
Imagen 27. Sobrecarga de uso 3.....	14		
Imagen 28. Presión en X sobre soportes	15		
Imagen 29. Presión en X sobre cercha de fachada	15		
Imagen 30. Distribución de presiones de viento	16		
Imagen 31. Viento en X++	16		
Imagen 32. Viento en X+-.....	16		

1. INTRODUCCIÓN

El objeto del presente Anejo es el de exponer describir la estructura en madera concebida por el alumno y detallar los cálculos realizados para encajar la misma y dimensionar todos sus perfiles. Por ello, se comprueba que se cumplen las condiciones de resistencia, durabilidad, rigidez y estabilidad, con el fin de garantizar un correcto comportamiento en servicio de la cubierta a lo largo de toda su vida útil.

El anejo incluye el dimensionamiento de los distintos elementos estructurales siguiendo la normativa y recomendaciones vigentes. También se describen los modelos estructurales que se han empleado como base para los cálculos.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La solución adoptada es una cubierta espacial plana con elementos de madera. La cubierta consta de una cercha espacial de 3 metros de separación entre el cordón superior e inferior, y diagonales que unen en las 3 direcciones del espacio los entramados superior e inferior. La cubierta salva una luz de 33 metros y cuenta con voladizos extremos que se extienden 5,5 metros en ambas direcciones. La estructura cuenta con un forjado mixto de madera y hormigón que protege a los usuarios de la intemperie.

2.1. Introducción y condiciones de contorno

A continuación, se describen las condiciones de contorno de esta:

- La cubierta descansa sobre una plataforma elevada de hormigón, cimentada al terreno por pilotes y su geometría y transmisión de las cargas deberá ajustarse a la misma.
- La estructura deberá cubrir como mínimo el área total de la plataforma de forma que proteja a los usuarios de la estación.
- La cubierta deberá ser plana y pero no transitable. Deberá permitir una sobrecarga de uso para el paso de usuarios de 1 kN/m², tan solo para labores de mantenimiento.
- La superficie debe quedar a 10,7m de altura sobre la plataforma.
- Para evitar la interferencia de la cubierta con las estructuras de soporte de la catenaria, se tiene que respetar una altura mínima entre la superficie de la plataforma y la cubierta de 7m.
- La luz entre pilares (de 33m) en la dirección principal de los pórticos debe salvarse sin elementos intermedios, tanto para crear un espacio diáfano para los usuarios, como para permitir la libre disposición de equipamientos e instalaciones industriales propios del ferrocarril.
- Los apoyos de la cubierta sobre la plataforma deben coincidir en los extremos de la plataforma con las costillas de refuerzo que sustentan la plataforma. La distancia longitudinal entre estos elementos auxiliares de refuerzo es de 25m en los tramos 1 a 8; y 29,25m en el último tramo.
- La dirección de la reacción sobre los apoyos deberá ser eminentemente horizontal, para evitar comportamientos indeseados de la losa de hormigón ya proyectada y ejecutada.

2.2. Materiales

La estructura consta de perfiles de madera laminada y un forjado mixto convencional madera-hormigón.

Madera Laminada GL24h: EN 14080:2013-08

$E = 11500 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad paralelo a las fibras
$E = 300 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad perpendicular a las fibras
$G = 650 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 420 \text{ kg/m}^3$	Densidad

$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a flexión
$f_{t,0,k} = 19,2 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión
$f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a tensión perpendicular
$f_{c,0,k} = 24 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a compresión
$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a compresión perpendicular
$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$	Resistencia característica a cortante

Hormigón aligerado C35/38: EN 1992-1-1:2004/A 1:2014

$E_{cm} = 18000 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad
$G = 7500 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\nu = 0,2$	Coefficiente de Poisson
$\alpha = 1 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$	Densidad

$f_{ck} = 35 \text{ MPa}$	Resistencia característica a compresión simple en probeta cilíndrica a 28 días
$f_{cu,k} = 38 \text{ MPa}$	Resistencia característica a compresión simple en probeta cúbica
$f_{cm} = 43 \text{ MPa}$	Resistencia a compresión media
$f_{tm} = 2,7 \text{ MPa}$	Resistencia a tracción media
$f_{ctk,0.05} = 1,8 \text{ MPa}$	Resistencia a tracción característica 5%

Acero estructural B 500 S: EN 10025-2:2004-11

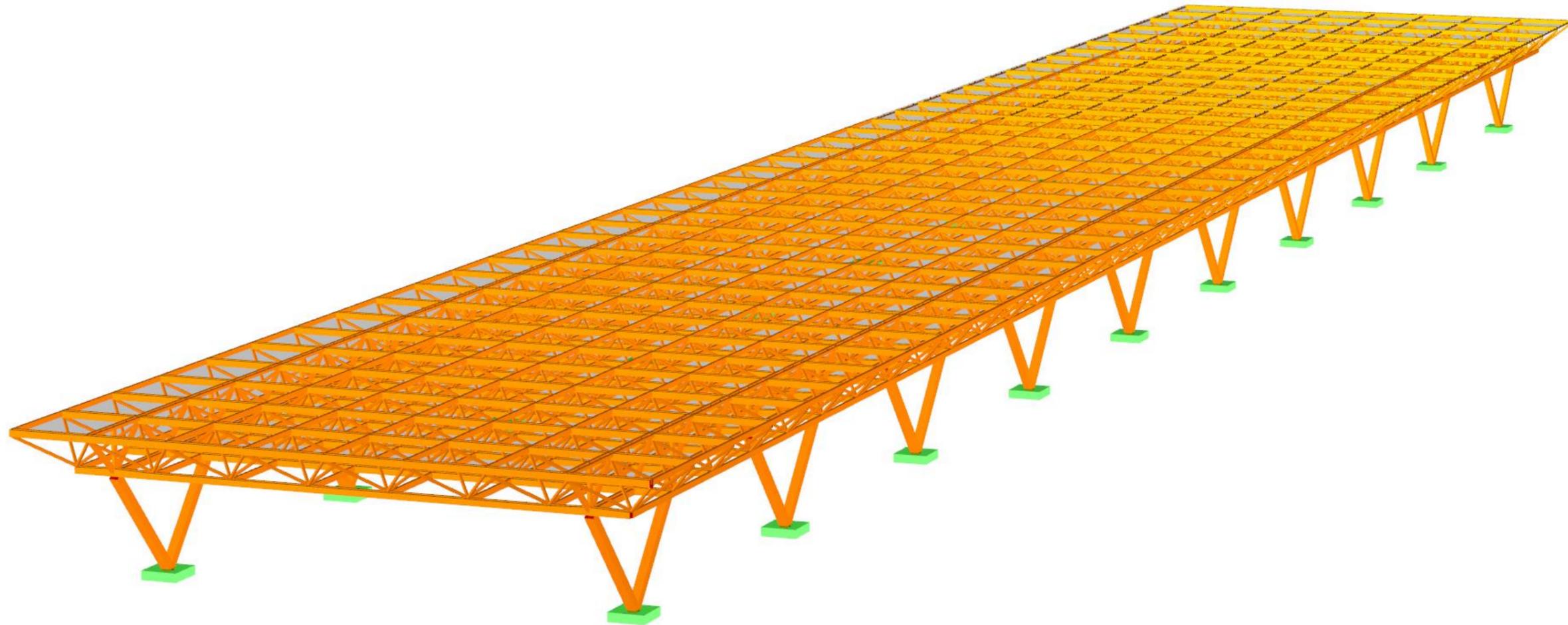
$E = 200000 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad
$G = 80769,2 \text{ N/mm}^2$	Módulo de elasticidad transversal
$\nu = 0,3$	Coefficiente de Poisson
$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficiente de dilatación lineal
$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$	Densidad

$f_y = 500 \text{ N/mm}^2$	Límite elástico: para espesores menores de 3 mm
$f_u = 550 \text{ N/mm}^2$	Tensión de rotura: para espesores menores de 3 mm

2.3. Descripción general de la estructura

A continuación, se muestra el modelo extruido de la estructura finalmente proyectada.

Imagen 1. Modelo extruido de la alternativa propuesta en madera de la Estación Observatorio.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

La estructura sigue el mismo esquema de funcionamiento que la cubierta ligera metálica diseñada por SENER. De la misma manera que la anterior, se diferencian dos partes, una cercha espacial y un pórtico lateral, sobre la que apoya.

La cercha espacial consiste en una malla de dos capas octaédrica, en el que el entramado superior e inferior está conformado por vigas rectangulares, mientras que las diagonales tienen un perfil circular. El ancho útil de la malla espacial entre la cara inferior del entramado y la cara superior del entramado de vigas superior es de 3,3m.

Los pórticos laterales constan de unos soportes inclinados que convergen en cada uno de los puntos de apoyo disponibles en la plataforma. Los puntos de apoyo están separados a una distancia de 25 metros cada uno en la dirección longitudinal y coinciden con las costillas de hormigón de la plataforma —Excepto el último que está separado a una distancia de 29,25 metros—. Sobre los soportes inclinados la fachada se ata mediante una cercha, que atan la fachada y permiten un apoyo continuo de la cubierta.

Los pórticos transversales salvan una luz de 33 metros y se extienden 5,5 metros, en cada extremo. Los voladizos no solo ofrecen una mayor superficie de cobertura, sino que además cumplen una función estructural importante, centrando los esfuerzos sobre los pilares y compensando la flecha total en el centro de luz.

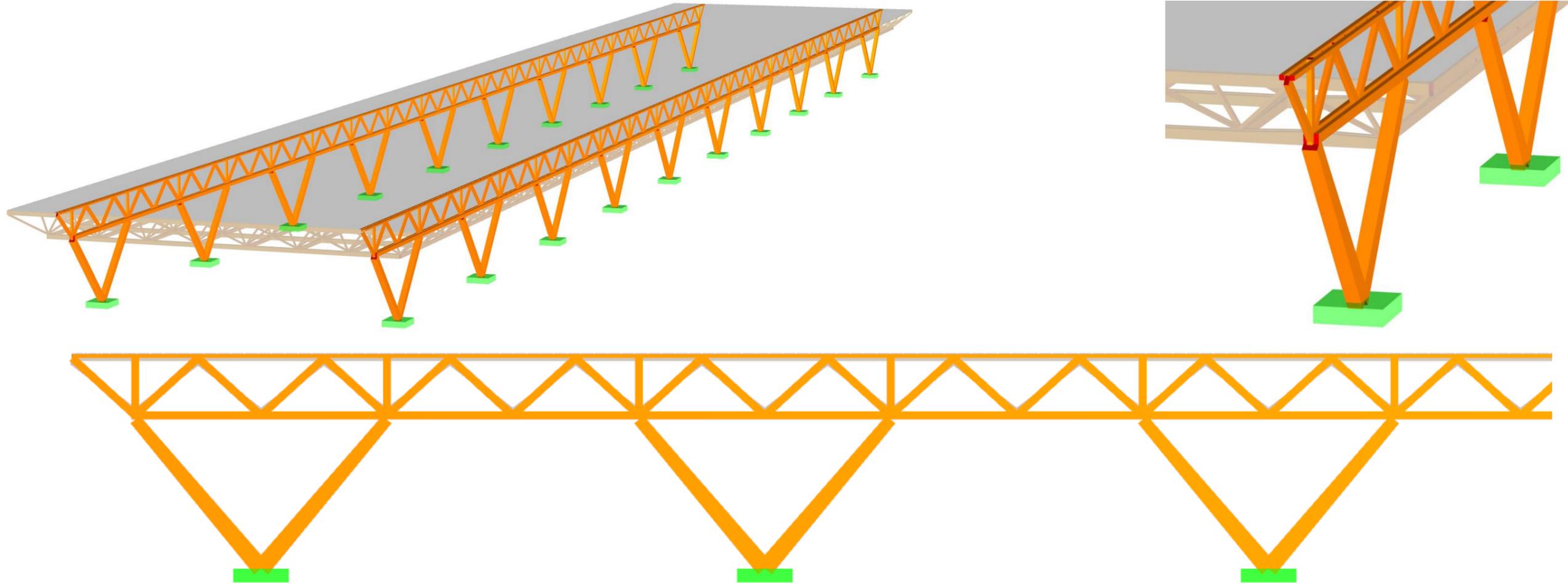
El gálibo entre la base de los soportes y la cara inferior del cordón inferior de la cubierta es de 7,4 metros. El material empleado para la estructura es la madera laminada GL24h. Aunque se podría haber resuelto con calidades de maderas más competentes, para asegurar su suministro se ha utilizado esta resistencia característica tan habitual en el ámbito comercial. Además, por el tamaño de la mayoría de los perfiles se descarta el uso de madera aserrada.

En los siguientes epígrafes se describirá más en detalle cada una de las partes y su modo de funcionamiento.

2.4. Elementos de la fachada transversal

La fachada transversal está compuesta tanto por los soportes inclinados, que anclan la estructura a la plataforma de hormigón, como por la cercha de atado, que garantiza un apoyo más o menos continuo de la cubierta.

Imágenes 2,3 y 4. Descripción de los elementos de Fachada



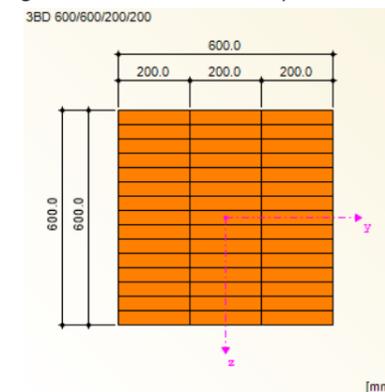
Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

2.4.1. Soportes inclinados

Los soportes inclinados reducen las luces entre puntos de apoyo de 25 metros, mediante vanos equidistantes de 12,5 metros—excepto el último tramo, que la separación entre apoyos es de 29,25—. Convergen en cada una de las placas base de la plataforma. Los soportes están inclinados $49,4^\circ$ sobre la horizontal. Los soportes apoyan sobre una placa base de manera que se impiden cualquier tipo de giro.

Cada uno de los soportes tiene una longitud de 9,7 metros y están conformados por 3 vigas de madera laminada de 200mm de espesor superpuestas. El canto de cada una de las tres laminas que componen la sección es de 0,6m y su ancho es de 0,2 metros.

Imagen 5. Sección transversal soportes inclinados



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

2.4.2. Cercha de atado

La cercha de atado consta de dos cordones, superior e inferior, diagonales y montantes.

Tanto el cordón superior como el inferior están conformados por pares de vigas de sección rectangular. El cordón superior tiene perfiles de 200x200mm de madera laminada, mientras que para el cordón inferior se han empleado perfiles de mayor canto, de 200x400mm. La separación entre los pares de vigas es igual al ancho de las diagonales y montantes de manera que puedan atraparse entre ambos perfiles y se facilite la ejecución de la unión.

Por otro lado, tanto los montantes como las diagonales están formadas por vigas de madera laminada de 200mm de ancho y 400mm de canto.

Las diagonales están dispuestas de manera que no rompen la línea estética de las diagonales de la cubierta, a la vez que se extienden en la dirección de los soportes. El ángulo que forman con la horizontal es de $47,64^\circ$ y tienen una longitud de 4,23 metros.

Los montantes sin embargo no están dispuestos a lo largo de toda la cercha, sino que tan solo se disponen en aquellos puntos en los que se unen los soportes inclinados a la cercha, con el propósito de servir de refuerzo y facilitar la transmisión de esfuerzos. Los montantes tienen una longitud de 3,25 metros.

2.4.3. Placa de anclaje

Con el propósito de fijar, impidiendo el giro en todas las direcciones, se utilizará una placa base de metal. La placa base se anclará mediante pernos a la plataforma de hormigón, a través de un macizo.

La placa base estará compuesta por varias chapas metálicas de manera que permita asegurar una correcta transmisión de esfuerzos a la base. La unión de la chapa metálica al macizo de hormigón se realizará con al menos 8 pernos de manera que se asegure que se coarten los giros en las dos direcciones ortogonales.

Para unir las piezas de los soportes inclinados con la placa de anclaje será necesario intercalar una lámina gruesa de acero que evite desgarros a tracción. La lámina se unirá a los perfiles de madera mediante tirafondos.

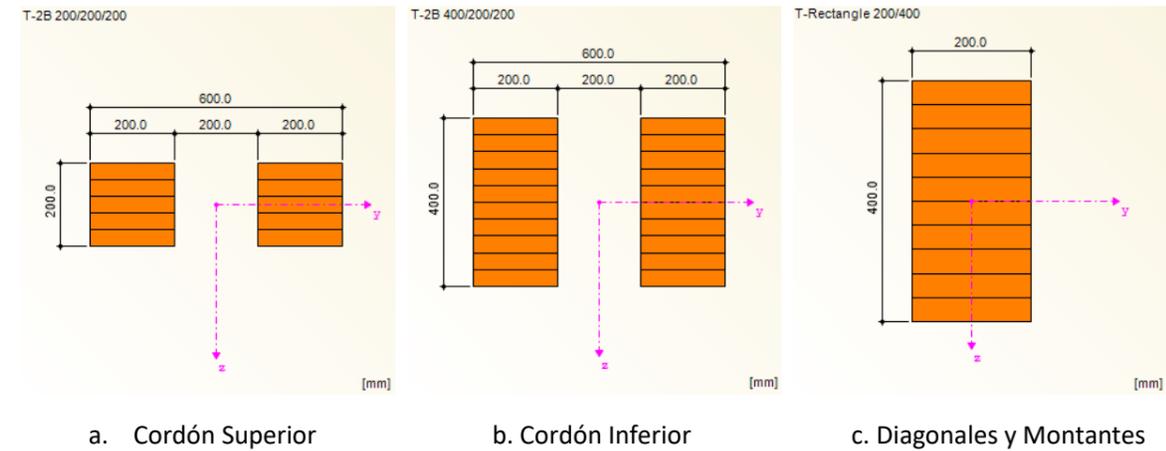
2.4.4. Uniones de la cercha de fachada

Las uniones de la cercha de la fachada deberán permitir los giros contenidos en el plano de la cercha.

Como los cordones superior e inferior están conformados por dos perfiles de canto 400mm y las diagonales están conformadas tan solo por unió, se unirán de manera que los cordones *grapen*. Los montantes y diagonales.

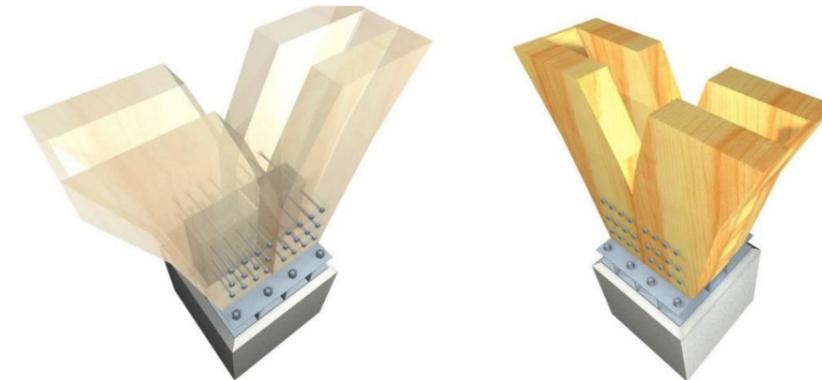
La unión se realizará mediante tirafondos y placas metálicas de refuerzo entre las caras de la madera, para proteger frente al desgarro. La unión se materializará de manera que los tirafondos formen el menor número de filas posible y así evitar coartar los momentos en el plano.

Imágenes 6,7,8 y 9. Sección transversal de elementos cercha de atado



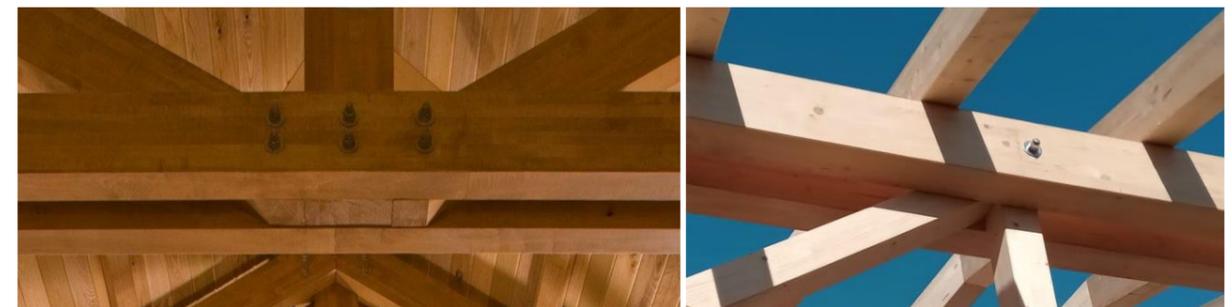
Fuente: Modelo de RFEM

Imagen 10. Placa de anclaje



Fuente: www.plataformaarquitectura.cl

Imagen 11. Uniones articuladas de cercha

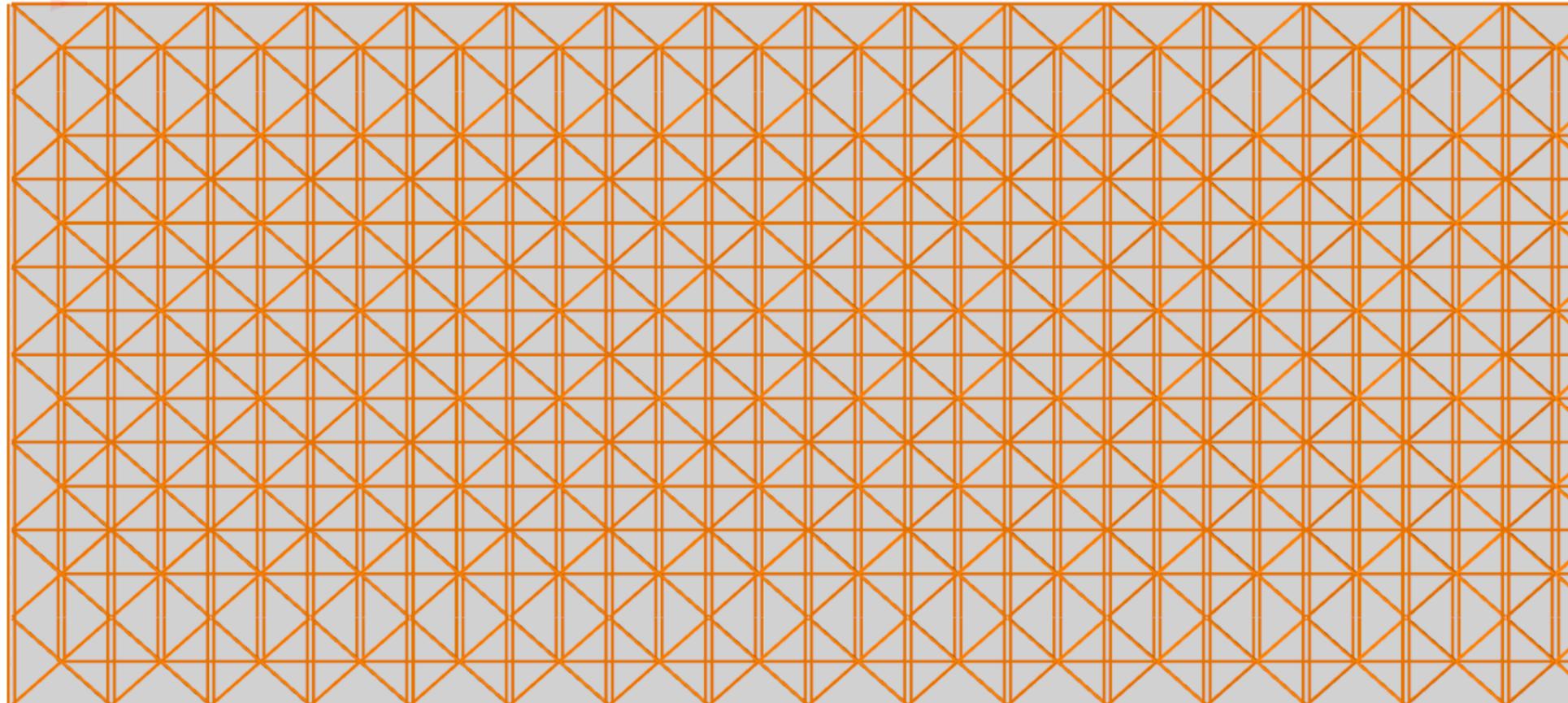


Fuente: timberhavenloghomes.com

2.5. Elementos de la cubierta espacial

La cubierta espacial está formada por dos conjuntos de entramados de vigas dispuestas en forma de rejilla rectangular. Cada uno cuenta con dos conjuntos de cordones transversales, superiores e inferiores; y dos conjuntos de traves de atado. Las diagonales, unen cada uno de los entramados de barras superior e inferior mediante una disposición de malla octaédrica. En la siguiente vista en planta se pueden ver cada uno de los elementos. Los elementos verticales son los cordones superiores e inferiores, los elementos horizontales son las traves de atado, y el resto de los elementos son las diagonales.

Imagen 12. Vista en planta. Distribución de elementos de la malla espacial.



Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

2.5.1. Traves de atado

Las traves de atado superiores e inferiores están formadas por perfiles rectangulares normalizados. La conexión es articulada y por lo tanto se comportan como vigas simplemente apoyadas.

Las dimensiones y espesores del perfil son los que se muestran en la figura adjunta. Están separadas a una distancia equidistante de 5,5 metros y tienen una longitud de 6,25 (excepto en el último tramo, que miden 7,32 metros).

Las traves superiores tienen un perfil de 200mmx350mm y sobre ellos apoyan las viguetas del forjado mixto. Por otro lado, las traves inferiores también tienen un perfil de 100mmx200mm.

Imagen 13. Sección Transversal de la trave de atado.

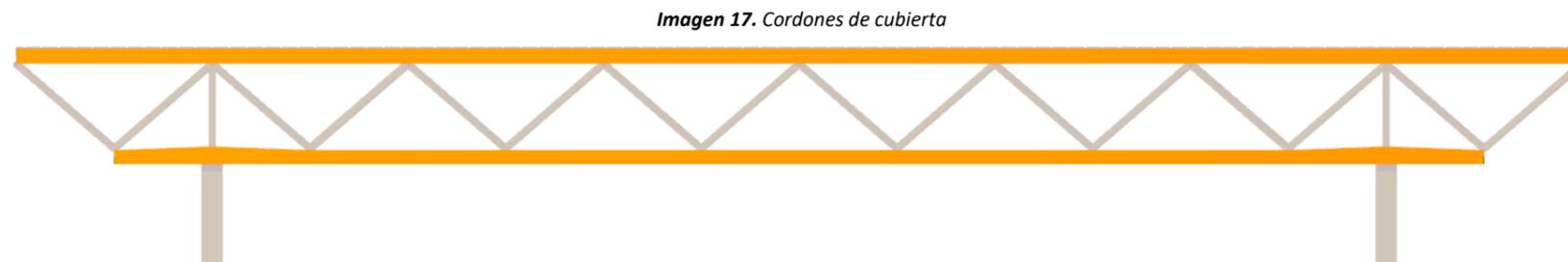
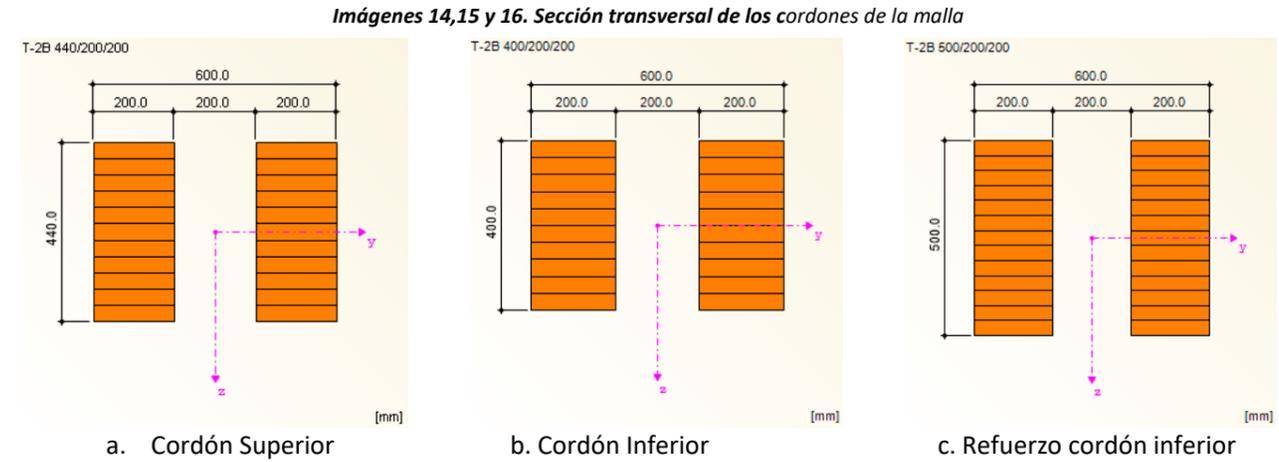


Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

2.5.2. Cordones superior e inferior

Los cordones superior e inferior responden al esquema estructural de vigas continuas simplemente apoyadas, con dos tramos extremos en voladizo. El cordón superior es más largo que el inferior y ambos están formados por perfiles compuestos mediante vigas de madera laminada. La distancia de separación entre las directrices de ambos cordones es de 2,9m.

El cordón superior está compuesto por 2 perfiles de 200mm de espesor y 440mm de canto. El cordón inferior por otra parte está conformado de igual manera por 2 perfiles, pero en este caso de 200mm de espesor y 440mm de canto. En el punto del entronque entre el cordón inferior de la cubierta y la fachada, es necesario reforzar la sección y por ello se aumenta el canto de los perfiles hasta alcanzar los 500mm de canto.

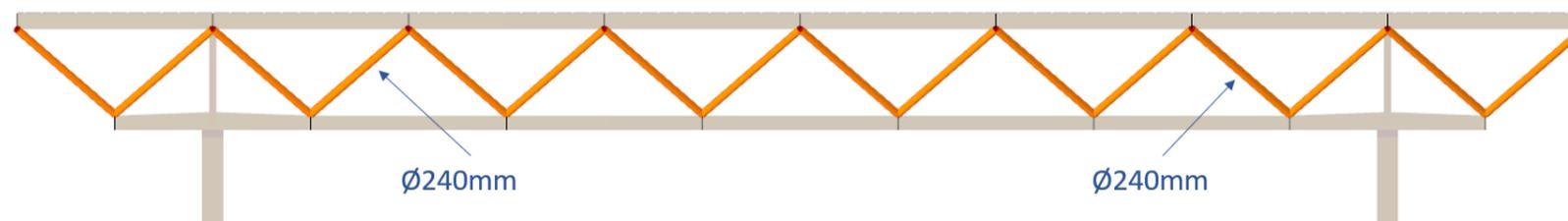
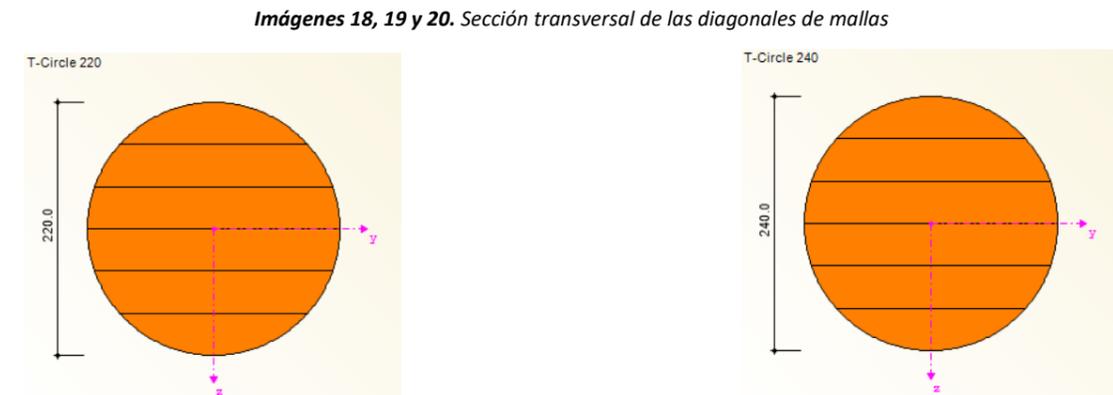


Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

2.5.3. Diagonales

Las diagonales atan cada uno de los cordones superior e inferior. Transmiten los esfuerzos de la cubierta a los elementos inferiores de la cubierta, y permiten un reparto tridimensional de los esfuerzos. Es esta tridimensionalidad la que permite aprovechar el efecto de la doble curvatura y redistribuir esfuerzos no uniformes de manera más eficiente.

La mayoría de las diagonales están conformadas por perfiles circulares de 220mm de diámetro exterior. Sin embargo, aquellas diagonales dispuestas a compresión inmediatamente siguientes a los apoyos tienen un diámetro exterior de 240mm. La longitud de cada una de las diagonales es de 4,79 m. La unión entre todos los elementos de la cubierta, con las 4 diagonales el cordón, superior o inferior, y las traveses de atado es articulada.

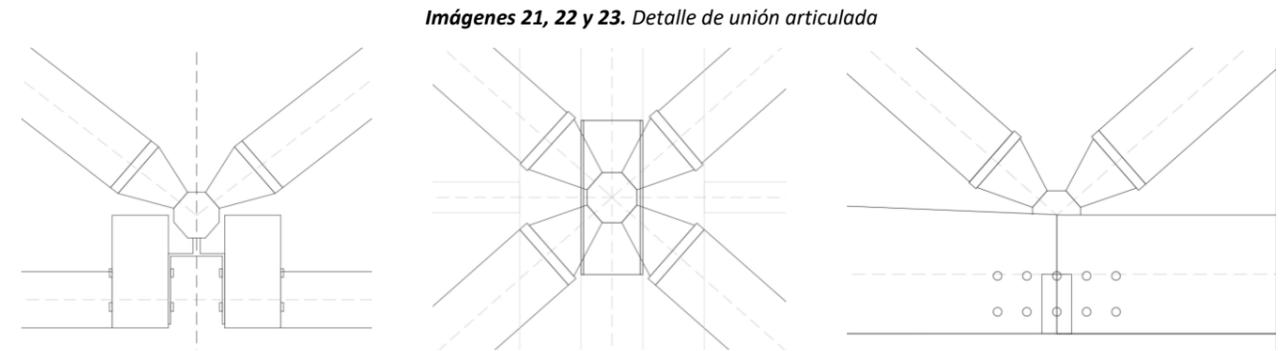


Fuente: Elaboración propia a partir del modelo de RFEM

2.5.4. Unión articulada espacial cordones-diagonales

Para materializar la unión, que permita una unión articulada y que una los cordones inferiores o superiores a las diagonales en las tres direcciones del espacio, se recurrirá a una solución industrial. Dado el número de veces que deberá materializarse esta unión, será viable solicitar un diseño personalizado y a medida que permita ajustarse a los ángulos precisos requeridos.

Se tratará de una chapa metálica que se unirá mediante tirafondos a los cordones superiores e inferiores. Sobre esta chapa se unirá una esfera o con una geometría análoga que permita la unión bien mediante rosca o bien mediante tornillos simples. La elección de esa unión vendrá condicionada por la disponibilidad y solución que el proveedor local de soluciones a medida nos proporcione.



Imágenes 21, 22 y 23. Detalle de unión articulada

Fuente: Elaboración propia

2.5.5. Uniones simples con estribos

Para aquellas uniones que se materialicen como simplemente apoyadas, pero que a la vez sean capaces de mantener la línea de rasante dónde se quiere, se emplearán estribos metálicos. En nuestro caso se ha optado por emplear los estribos que comercializa SIMPSON Strong-Tie®.

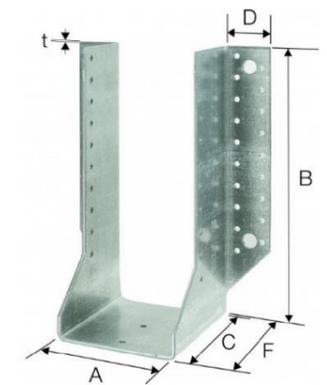
Tabla 1. Características uniones mediante estribos mecánicos

Estribo	Dimensiones de la Viga [mm]			Dimensiones del Estribo						Agujeros soporte	Agujeros viga	
	Anchura	Altura		A	B	C	D	F	t			
		min	max									
GSI500/100/2,5	100	210	300	100	200	110	42,5	115	2,5	28 de Ø5	4 de Ø13	14 de Ø5
GSI720/200/4	200	270	390	200	260	110	45,5	118	4	50 de Ø5	6 de Ø13	26 de Ø5

Tanto para el caso de la unión entre los traveses superiores e inferiores y los cordones, como para la unión entre las viguetas y las traveses superiores, se emplearán soluciones con alas interiores con el propósito reducir el impacto visual.

Como tanto las traveses superiores como las viguetas usan los mismos perfiles, el modelo de estribo que se utilizará es el GSI720/200/4.

Como las traveses inferiores tienen perfiles más reducidos de 100 x 200, se emplearán este modelo de estribos: GSI500/100/2,5



Fuente: Catálogo SIMPSON Strong-Tie®.

2.6. Elementos del forjado mixto

Sobre el entramado de la malla espacial se va a disponer un forjado mixto convencional de viguetas de madera.

El forjado consta de unas viguetas de madera, unidas a una chapa de madera que hace las veces de encofrado perdido. Sobre el encofrado se coloca una lámina de tela asfáltica impermeable, sobre la que descansa la capa de compresión.

Las viguetas de madera laminada son perfiles de 180x200mm y el tablero de madera de 16mm de espesor. Las viguetas que apoyan sobre las cerchas de las fachadas laterales cuentan con unas dimensiones mayores de 200x350mm. Cuenta con conectadores inclinados de 7,5mm de diámetro y 220mm de longitud.

La capa de compresión de 50mm de espesor es de hormigón aligerado C35/38 y cuenta con un armado de malla electrosoldada con barras de acero B500S, con un diámetro de 5mm y una separación de 10cm en cada dirección.

Imagen 24. Forjado mixto tipo



Fuente: Generador de precios de Cype

3. BASES DE CÁLCULO

Aunque para el diseño de la estación de observatorio se han tenido muchas otras acciones en cuenta, a efectos de este trabajo tan solo se considerarán las más relevantes. Las cargas empleadas para el modelo conceptual de esta estructura serán las mismas que para la estructura de madera, de manera que sean comparables.

3.1. Normativa

Aunque la colección de normas habituales para el diseño de estructuras en México son normas técnicas complementarias, en adelante NTC; también se utilizan, aunque en menor medida las normas americanas, AISC y ACI, o las europeas.

Dado el carácter académico de este trabajo se trabajará principalmente con las normativa y filosofía de cálculo europeas, que son con las que está más familiarizado el alumno. Por otra parte, la normativa mexicana se ha mantenido para caracterizar los aspectos locales de la obra, tales como las acciones de sismo o el viento.

- UNE-EN 1991-1. Eurocódigo 1: Acciones en estructuras

Esta norma se ha empleado en la determinación de los factores de carga, combinación de acciones, para el cálculo de las acciones introducidas en el dimensionamiento de la estructura (a excepción de las acciones de viento y sismo), y para establecer los valores límite en Estado Límite de servicio.

- UNE-EN 1992-1: Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón

Esta norma se ha utilizado como referencia para caracterizar y dimensionar la capa de hormigón de compresión, dispuesta sobre la cubierta.

- UNE-EN 1995-1: Eurocódigo 5: Proyecto de estructuras de madera estructural

Esta norma se ha utilizado como referencia para caracterizar y dimensionar los diferentes elementos estructurales de madera laminada.

- NTC: Normas técnicas complementarias sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones.

Esta norma se ha empleado para calcular el valor y disposición de las cargas de viento que actúan sobre la cubierta.

- NTC: Normas técnicas complementarias para diseño por viento

Esta norma se ha empleado para calcular el valor y disposición de las cargas de viento que actúan sobre la cubierta.

- NTC: Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo

Esta norma se ha utilizado para caracterizar las acciones de sismo, y determinar los métodos de análisis necesarios frente al mismo.

¹ Fuente: <https://www.weather-mx.com/es/mexico/ciudad-de-mexico-clima#temperature>

² Fuente: <http://aitinforma.blogspot.com/2016/08/clases-de-servicio-y-clases-de-uso.html>

3.2. Características de la madera

Se ha debido caracterizar la madera, según la clase de servicios de uso y su especie. Según la exposición que recibirá deberá tener las siguientes características.

3.2.1. Clase de servicio

Es aquella que se asigna a cada elemento estructural y que depende de las condiciones ambientales previstas. El contenido de humedad de la madera reduce sus propiedades mecánicas, a medida que aumenta la concentración. Para considerar dicho efecto se establecen tres clases de servicio según el nivel y el tiempo al que está expuesto el elemento a una determinada humedad.

Las piezas de la cubierta que configura la estación de Observatorio México estarán sometidas a una temperatura¹ media de 20 °C y una humedad relativa del aire que solo excede el 65% unas pocas semanas al año. Por ello, se asignan como **clase de servicio 1**.

3.2.2. Clase de uso

La clase de uso², por otro lado, considera la degradación de la madera ocasionada por los organismos xilófagos. Esta clasificación se emplea para definir el tipo de protección que se debe aplicar a la madera por criterios de durabilidad.

En este caso diferenciaremos entre los elementos portantes y de fachada y el resto de los elementos que configuran la cubierta. Los primeros, se encuentran totalmente a la intemperie y sometidos a la lluvia por lo que se les asignará una **clase de uso 3**; los segundos, al estar sometidos tan solo a la humedad ocasional por efecto de la lluvia horizontal, se considerarán como **clase de uso 2**.

3.2.3. Especie

Para escoger la especie³ se ha prestado atención a su disponibilidad comercial en México. Por ello, se ha acudido a los catálogos de "FICHAS TÉCNICAS SOBRE CARACTERÍSTICAS TECNOLÓGICAS Y USOS DE MADERAS COMERCIALIZADAS EN MÉXICO" de la Comisión Nacional Forestal. En ellos, se han identificado las diferentes maderas, disponibles en el mercado mexicano, empleadas para la fabricación de vigas laminadas estructurales.

Las maderas que se emplearán de forma predilecta son, de la familia de los eucaliptos el Eucalipto *E. x uro-grandis*, *E. globulus Labill* o el *E. Saligna Smith*; y de la familia de los pinos, el pino Ocote *Pinus aocarpa* o el Pino de Oregón o *Pseudotsuga menziesii*. Las características de cada uno pueden consultarse en la tabla 1 que aparece en el ANEJO 2. ESTUDIO DE SOLUCIONES. DISEÑO DE LA CUBIERTA DE MADERA.

Todas las maderas podrán emplearse de forma indiferente tanto en los elementos portantes, como en la fachada. La decisión sobre que madera se terminará empleando en proyecto se tomará en función de la disponibilidad comercial de cada una y por su economía.

³ Fuente: <https://www.maderea.es/consideraciones-antes-de-comprar-vigas-de-madera/>

3.3. Combinaciones de Acciones

Para la combinación de acciones en Estado Límite Último y de Servicio se empleará la formulación del Eurocódigo 5: *Proyecto de estructuras de madera*. Los **coeficientes de combinación** se obtendrán a partir de la Tabla A1.1 Valores recomendados de los factores ψ para edificios.

- Para las sobrecargas en edificios de cubiertas, Categoría H: $\psi_0 = 0; \psi_1 = 0; \psi_2 = 0$
- Para las sobrecargas de viento en edificios: $\psi_0 = 0,6; \psi_1 = 0,2; \psi_2 = 0$

3.3.1. Estados Límite Último

Se considerará la combinación fundamental. Las combinaciones para situaciones de proyecto sísmicas por sismo se desarrollan en el ANEJO Nº4. Como no se han definido más acciones accidentales no se considerarán estas situaciones de proyecto.

- Combinación Fundamental: $\sum \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$

Donde:

- $G_{k,j}$ es el valor característico de las acciones permanentes.
- $Q_{k,i}$ es el valor característico de la acción variable determinante.
- $\psi_{0,i} Q_{k,i}$ es el valor representativo de la combinación de las acciones variables concomitantes.
- $\psi_{1,1} Q_{k,i}$ es el valor representativo frecuente de la acción variable determinante.
- $\psi_{2,1} Q_{k,i}$ son los valores representativos cuasi-permanentes de las acciones variables con la acción determinante.

3.3.2. Estados Límite de Servicios

Se considerará la combinación característica como la cuasi-permanente.

- Combinación Característica: $\sum G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum \psi_{0,i} Q_{k,i}$
- Combinación Cuasi-permanente: $\sum G_{k,j} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i}$

Para considerar los estados límites de servicios a la hora de calcular los valores de desplazamientos límites admisibles, es necesario considerar el factor K_{def} .

Al tratarse de madera laminada, según la tabla 3.2 del Eurocódigo. Considerando secciones de clase 2

- $K_{def} = 0.8$

3.3.3. Combinaciones de carga

Si consideramos los coeficientes de seguridad de las acciones marcadas por el Eurocódigo 3. Obtenemos un total de 30 combinaciones de acciones, de las cuales tan solo son objeto de estudio 24. Se citan a continuación:

Combinaciones Fundamentales en ELU:

- **ELU 1:** 1,35G
- **ELU 2:** 1,35G + 1,35Gq
- **ELU 3:** 1,35G + 1,50QiH
- **ELU 4:** 1,35G + 1,35Gq + 1,50QiH
- **ELU 5:** 1,35G + 1,35Gq + 1,50QiH + 0,90Qw
- **ELU 6:** 1,35G + 1,50QiH + 0,90Qw
- **ELU 7:** 1,35G + 1,50Qw
- **ELU 8:** 1,35G + 1,35Gq + 1,50Qw

Combinaciones Características en ELS:

- **ELS Ch 1:** 1,00G
- **ELS Ch 2:** 1,00G + 1,00Gq
- **ELS Ch 3:** 1,00G + 1,00QiH
- **ELS Ch 4:** 1,00G + 1,00Gq + 1,00QiH
- **ELS Ch 5:** 1,00G + 1,00Gq + 1,00QiH + 0,60Qw
- **ELS Ch 6:** 1,00G + 1,00QiH + 0,60Qw
- **ELS Ch 7:** 1,00G + 1,00Qw
- **ELS Ch 8:** 1,00G + 1,00Gq + 1,00Qw

Combinaciones Cuasi-permanentes en ELS:

- **ELS Qp 1:** 1,80G
- **ELS Qp 2:** 1,80G + 1,80Gq
- **ELS Qp 3:** 1,80G + 1,00QiH
- **ELS Qp 4:** 1,80G + 1,80Gq + 1,00QiH
- **ELS Qp 5:** 1,80G + 1,80Gq + 1,00QiH + 0,60Qw
- **ELS Qp 6:** 1,80G + 1,80Gq + 0,60Qw
- **ELS Qp 7:** 1,80G + 1,00Gw
- **ELS Qp 8:** 1,80G + 1,00Gw + 1,00Qw

A partir de estas combinaciones de acciones, al combinar de forma alternativa las 3 disposiciones de sobrecargas de uso y las 6 disposiciones de viento, se obtienen un total de 168 combinaciones de carga: 56 combinaciones fundamentales de carga, 56 combinaciones características y 56 combinaciones Cuasi-permanentes. En el Apéndice A de este anejo se adjunta las combinaciones de carga.

4. ACCIONES

4.1. Acciones permanentes

Los valores característicos de las acciones contempladas en el cálculo de la estructura han sido recogidos de las Normas Técnicas Complementarias, en adelante NTC. Más en concreto se han empleado: *la NTC sobre criterios y acciones para el diseño estructural de las edificaciones*.

4.1.1. Peso propio

Esta acción corresponde al peso de los elementos estructurales. Los materiales utilizados en los dichos elementos es la madera y el hormigón armado, cuyos pesos específicos son:

- Acero estructural S355: 78,50 kN/m³
- Hormigón aligerado C35/38: 17,5 kN/m³

4.1.2. Carga muerta

Son las debidas a los elementos no estructurales que gravitan sobre los estructurales. Las cargas muertas en la cubierta son:

- Elementos aislantes de la cubierta: 0.15 kN/m²

4.2. Acciones variables

Los valores característicos de las acciones contempladas en el cálculo de la estructura han sido recogidos de las Normas Técnicas Complementarias, en adelante NTC. Más en concreto se han empleado: *la NTC sobre diseño por viento y la NTC para diseño por sismo*. Estas cargas, tanto las sobrecargas como las de viento se considerarán de **corta duración**.

4.2.1. Sobrecarga de uso

La sobrecarga de uso viene impuesta como criterio arquitectónico y es de 1 kN/m².

Esta sobrecarga debe permitir que la cubierta sea transitable en toda su superficie, tan solo para labores puntuales de inspección y mantenimiento. Como se trata de la principal carga horizontal sobre la cubierta se crearán tres disposiciones diferentes, que recojan las distintas casuísticas:

- Sobrecarga de uso 1: dispuesta sobre toda el área de la cubierta
- Sobrecarga de uso 2: dispuesta tan solo en el vano intermedio, sin cargar los voladizos extremos.
- Sobrecarga de uso 3: dispuesta de forma alternativa entre los diferentes vanos, siguiendo una disposición en “damero”

Se muestran gráficamente en la siguiente página.

4.2.2. Acciones térmicas

La acción térmica sobre la madera es muy importante. Conlleva variaciones de volumen, así como variaciones de su humedad y la humedad higroscópica del ambiente.

4.2.3. Sismo

Se han tomado en cuenta las acciones de sismo para los distintos espectros de respuesta. El análisis dinámico y los resultados de estas cargas se han desarrollado más en detalle en el ANEJO Nº4. ESTUDIO COMPARATIVO. LA RESPUESTA FRENTE A SISMO.

4.2.4. Acciones accidentales adicionales

Además del sismo, por tratarse de una estructura de ferrocarril, también sería conveniente estudiar las acciones accidentales debidas por incendio, cuando la locomotora de ferrocarril queda estacionada y desalojada en la estación, o por impacto por descarrilamiento.

Se trata de acciones cuya probabilidad de ocurrencia es pequeña, pero de gran importancia. Sin embargo, en este trabajo debido a su carácter académico, no se tomarán en cuenta.

A continuación, se muestra gráficamente la distribución de las sobrecargas sobre la cubierta.

Imagen 25. Sobrecarga de uso 1

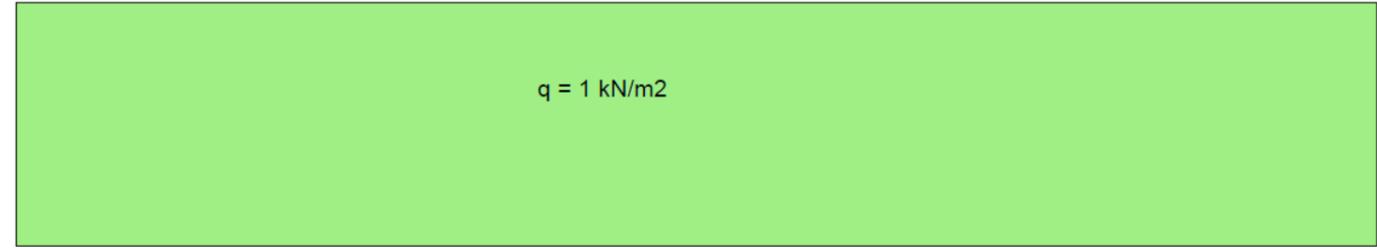
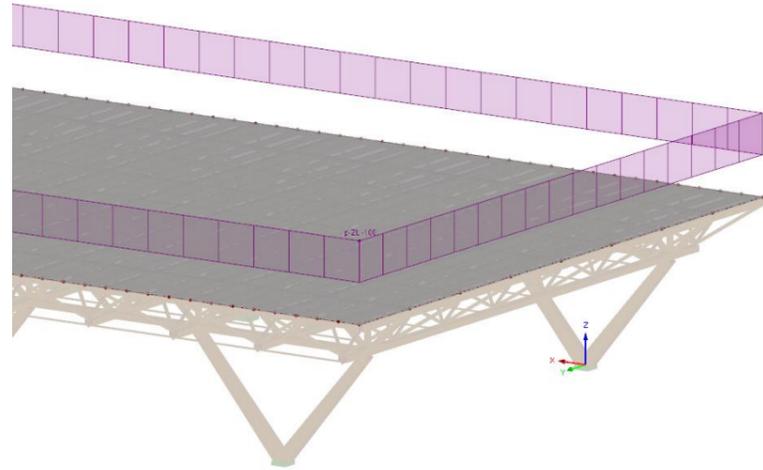


Imagen 26. Sobrecarga de uso 2

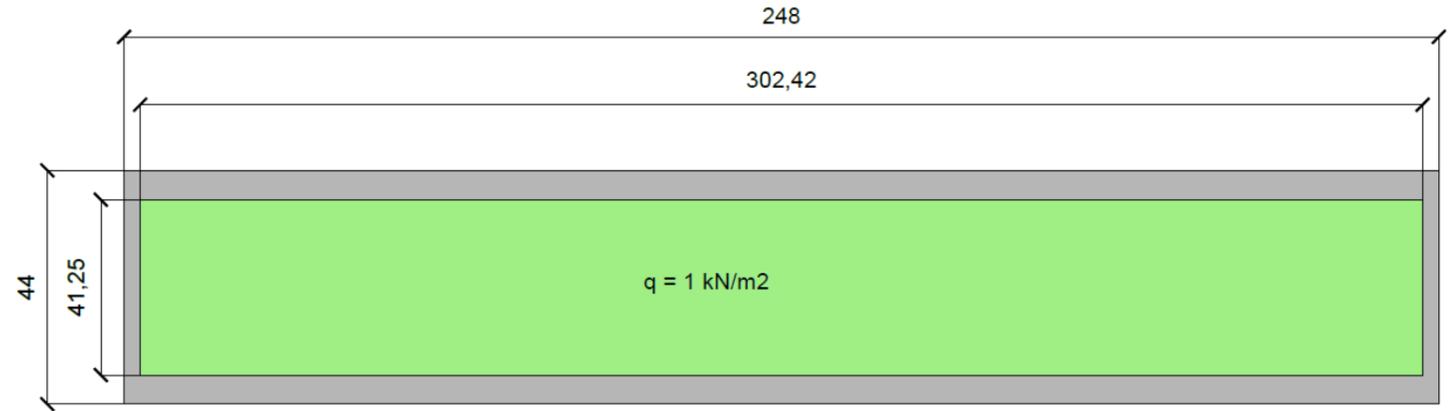
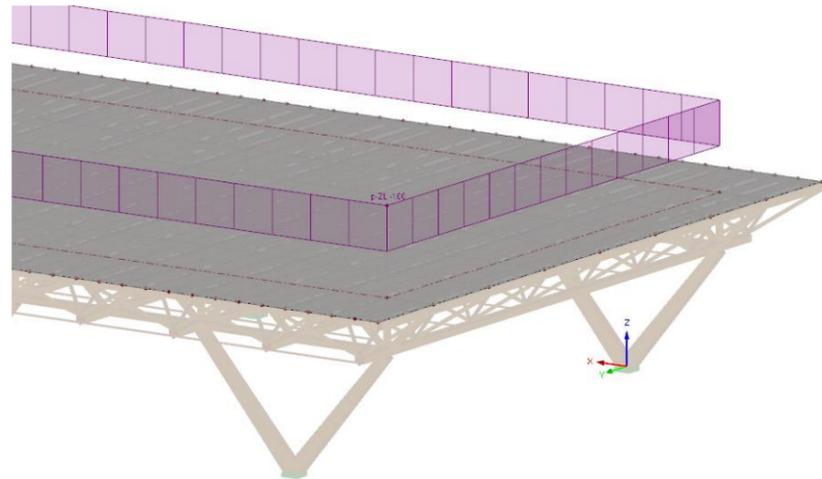
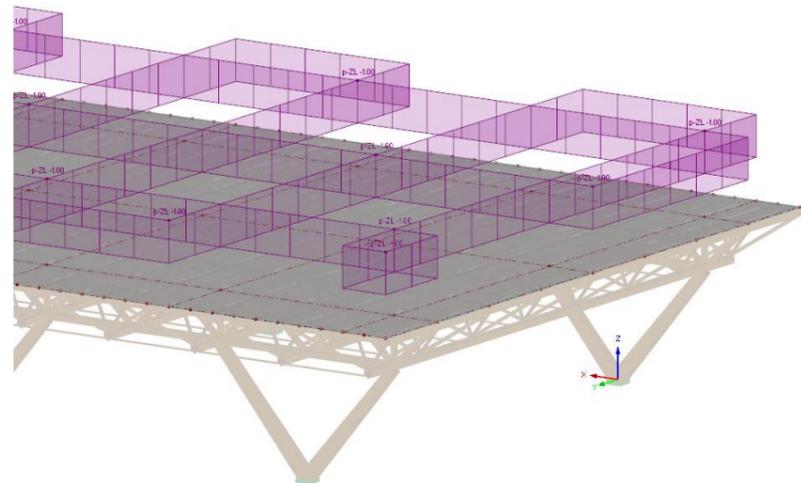


Imagen 27. Sobrecarga de uso 3



4.2.2. Viento

Como era de esperar la normativa europea no establece criterios para la definición de cargas de viento fuera de su territorio. Por ello, se van a emplear los valores de presión de diseño marcados por la *NTC para diseño por viento*, ya que estos si caracterizan de forma más precisa la realidad local en México de estas acciones.

Según el artículo 3.2 de dicha norma, la presión sobre las diferentes superficies que configuran la cubierta se calcula como:

$$P_z = 0.048 * C_p * V_D^2$$

Donde:

C_p Coeficiente local de presión, que depende de la forma de la estructura

V_d Velocidad de diseño a la altura Z. Cuyo valor justificado más adelante corresponde con 1.77m/s

Los diferentes valores de las cargas que deberán aplicarse en la estructura son:

	C_p	V_d	p_z (kg/m ²)	q_z (kN/m ²)
Presión de diseño sobre fachadas	1,45	39,544	108,836	1,07
Presión de diseño sobre elementos de cubierta	2,1	39,544	157,625	1,55
Presión de diseño sobre bordes de cubierta	3,4	39,544	255,202	2,50

En total habrá 6 casos de carga diferentes en función de la dirección del Viento, y de si ejercen presión o succión sobre los diferentes elementos de la cubierta.

- Viento X++
- Viento X+-
- Viento X-+
- Viento X--
- Viento Y++
- Viento Y--

Para determinar V_d se ha seguido el apartado 3.1 de la *NTC-Acciones*.

$$V_d = F_{TR} \cdot F_\alpha \cdot V_R = 0,88 \cdot 1,152 \cdot 39 = 39,54 \text{ m/s}$$

Donde:

F_{TR} factor correctivo que toma en cuenta las condiciones locales relativas a la topografía y a la rugosidad del terreno en los alrededores del sitio de desplante. En este caso se trata de un terreno R3 con una topografía T3 (prácticamente plano). Por ello su valor es de 0,88.

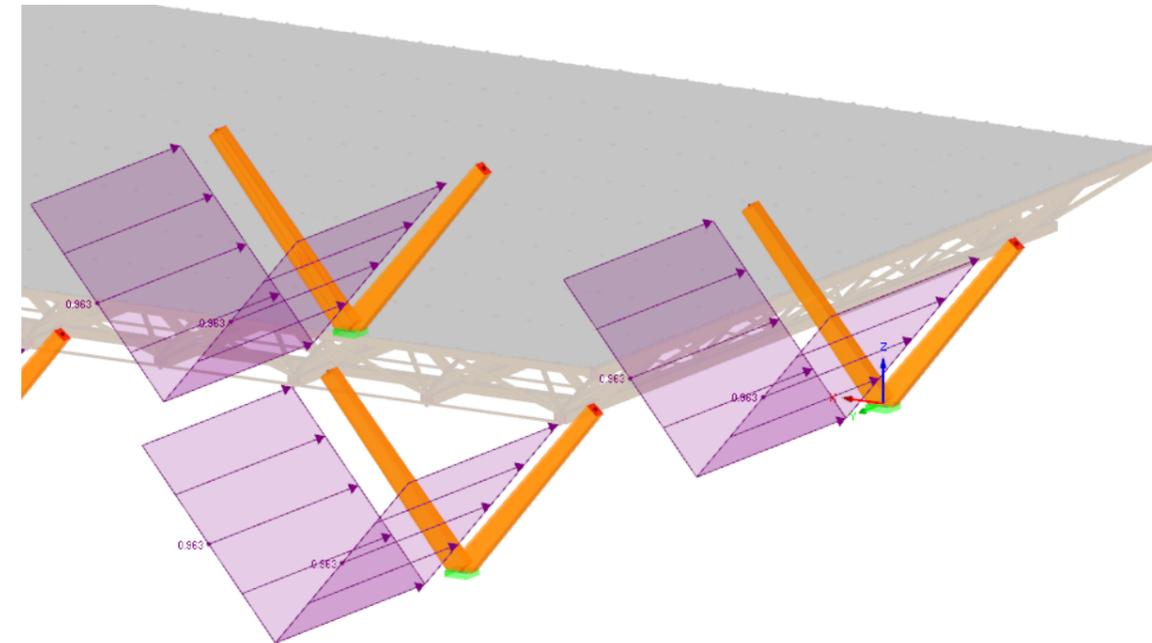
F_α factor que toma en cuenta la variación de la velocidad con la altura. Al tratarse de un terreno R3 con una altura gradiente $\delta = 390\text{m}$ y un exponente $\alpha = 0.156$, el valor del factor para una altura de 24,8 m es de 1,152.

V_R velocidad regional según la zona que le corresponde al sitio en donde se construirá la estructura. Por encontrarse la cubierta en la Zona I: Delegación de Alvaro Obregon, con una importancia A (200años) de la construcción el valor será de 39.

A continuación, se muestra la distribución de las cargas para cada uno de los casos de carga. Primero se muestran sobre los elementos de fachada, y más adelante sobre la cubierta.

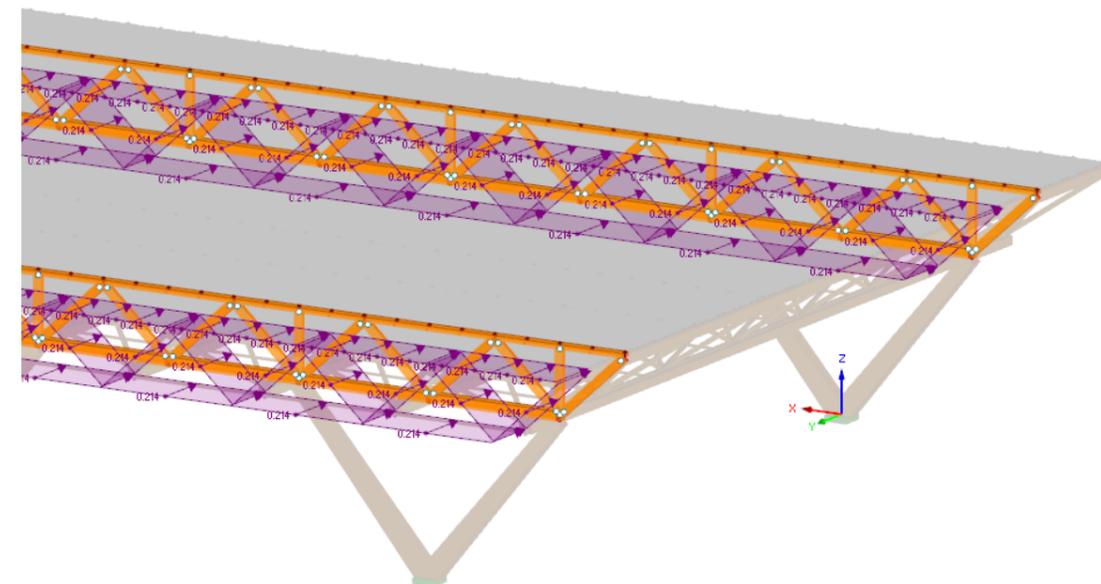
Presión en dirección X sobre los soportes inclinados: 0,963 kN/m

Imagen 28. Presión en X sobre soportes



Presión en dirección X sobre los diferentes elementos de la cercha de fachada: 0.214 kN/m

Imagen 29. Presión en X sobre cercha de fachada



Fuente: Elaboración propia mediante el modelo de RFEM

A continuación, se muestra la dirección que sigue el viento en cada caso de carga, a succión o a presión.

Imagen 30. Distribución de presiones de viento

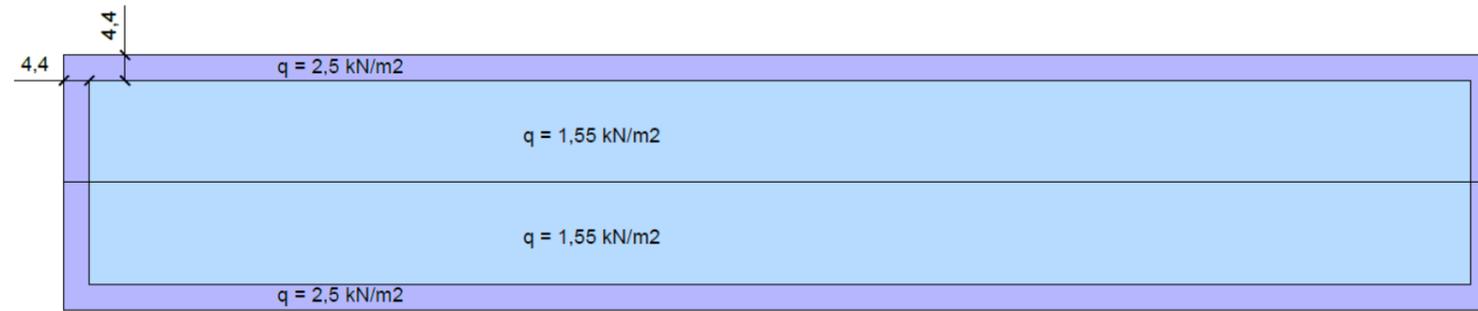


Imagen 31. Viento en X++

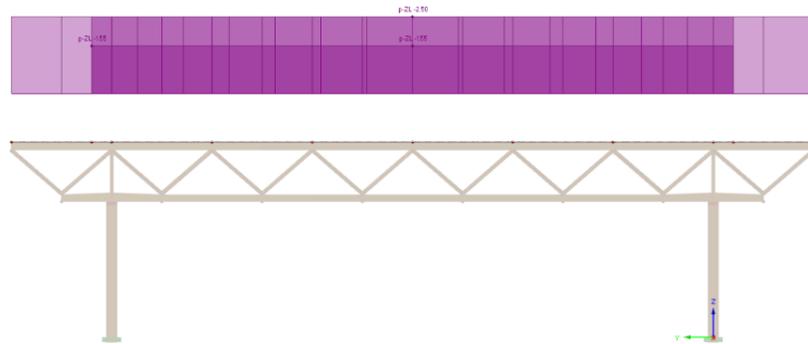


Imagen 32. Viento en X+-

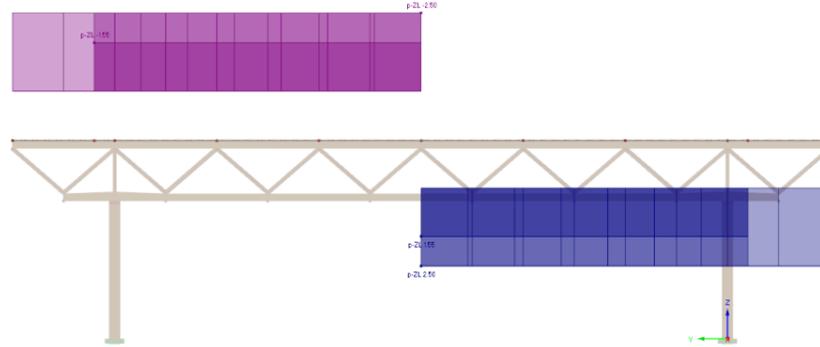


Imagen 33. Viento en X-+

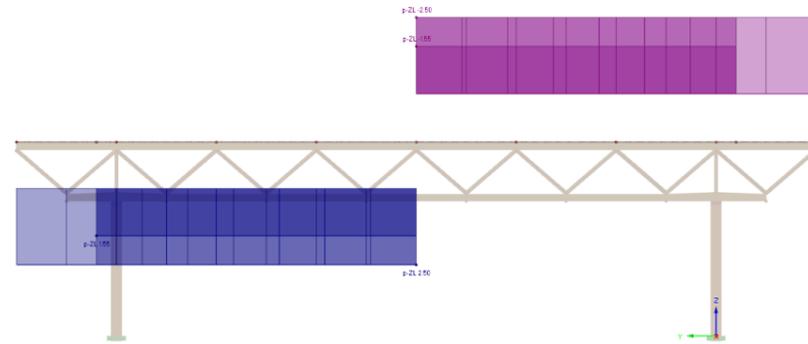


Imagen 34. Viento en X--

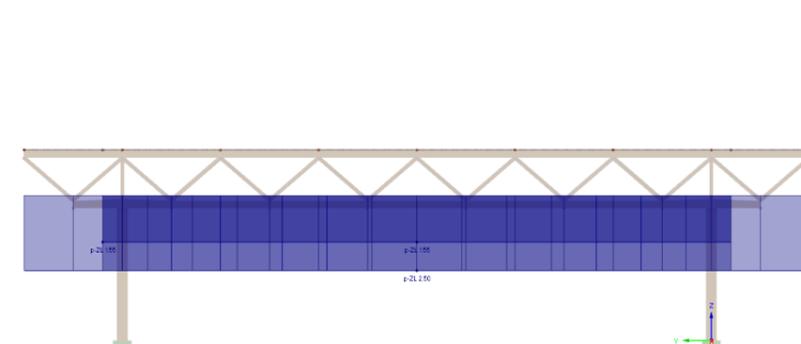


Imagen 35. Viento en Y++

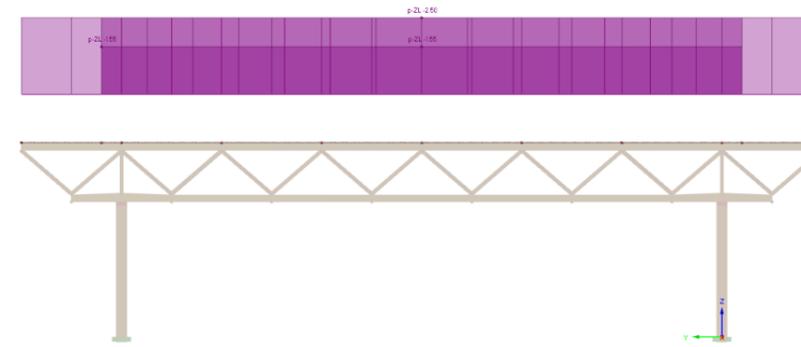
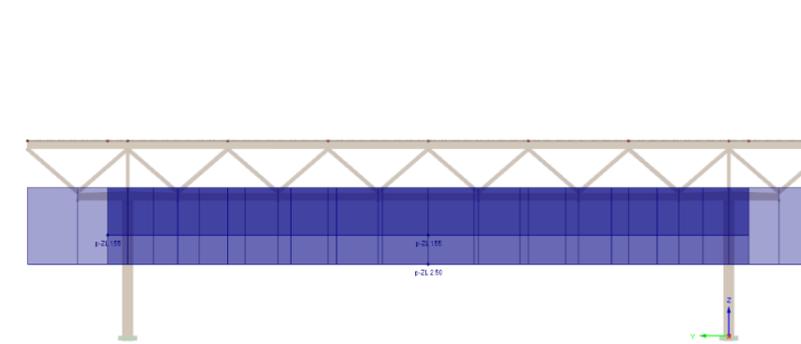


Imagen 36. Viento en Y--



Fuente: Elaboración propia

5. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

En este apartado primero se especifica el programa comercial y sus diferentes módulos empleados para el cálculo de la cubierta. Mas tarde en este apartado se describe el modelo de cálculo empleado, la geometría y tipos de elementos empleados para obtener los resultados.

5.1. Programa informático

El programa empleado para el cálculo de la cubierta ha sido **Dlubal RFEM 5**. Se ha trabajado con licencia de estudiantes otorgada tan solo para el desarrollo de este trabajo final de máster. Se trata de un software comercial desarrollado por la empresa alemana Dlubal Software.

RFEM es un software potente de elementos finitos que permite modelar, calcular y dimensionar modelos estructurales 2D y 3D compuestos de elementos tipo barra, placas, muros, láminas y sólidos. RFEM proporciona deformaciones, esfuerzos internos, esfuerzos en los apoyos, así como también las tensiones de contacto del suelo.

Es un programa de estructura modular especializado en el cálculo de estructuras civiles y de edificación. Los módulos adicionales correspondientes facilitan la introducción de datos con la generación automática de estructuras y uniones, o también se puede realizar análisis y diseños avanzados según varias normas. Para el desarrollo de este anejo se han empleado el módulo de **RF-Timber pro**, el cual realiza todos los cálculos característicos de los estados límite últimos, así como también los análisis de estabilidad y de deformaciones según la normativa EN 1995-1-1:2005.

5.2. Modelo de cálculo

Se ha modelizado la estructura con elementos tipo barra y un elemento tipo lámina.

Los elementos tipo barra se han empleado para todos los perfiles de madera laminada de la estructura. En el apartado de descripción de la estructura se puede ver el modelo extruido de todas las barras empleadas.

Para el modelado del forjado mixto, se ha empleado un elemento tipo placa. El programa incorpora un módulo para insertar la rigidez de elementos híbridos, tales como chapas colaborantes.

Las comprobaciones estructurales se han realizado rápido empleando el módulo adicional **RF-Timber pro**.

6. COMPROBACIONES Y DIMENSIONAMIENTO

En el siguiente apartado se muestran las diferentes comprobaciones realizadas, para asegurar el diseño de la cubierta cumple con todos los criterios estructurales y de servicio necesarios.

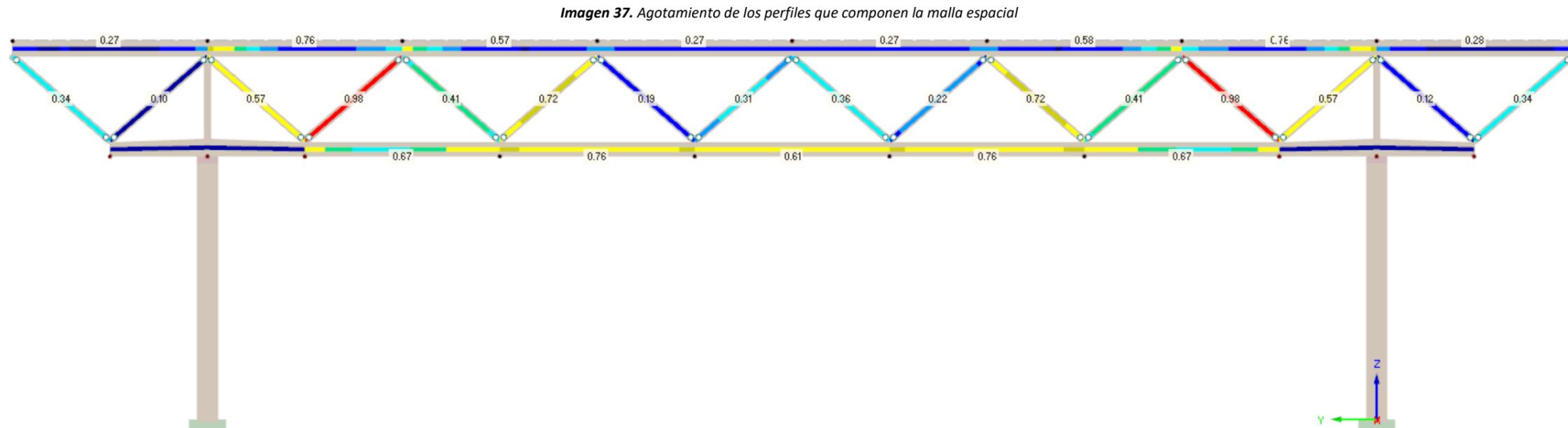
En primer lugar, se comprueba de manera general la estructura, para obtener una visión global del comportamiento de esta. Para ello, se muestra el aprovechamiento de todos los perfiles para la envolvente de todas las acciones en ELU, por un lado y por otro se muestran los desplomes y flechas máximos que sufre la estructura para los Estados Límite últimos.

En los siguientes apartados se analizan de forma individualizada cada uno de los elementos que conforman la estructura. Se ha analizado el elemento de cada familia que más solicitado está y se han reproducido las comprobaciones que ha condicionado su dimensionamiento.

6.1. Resultados generales del Modelo

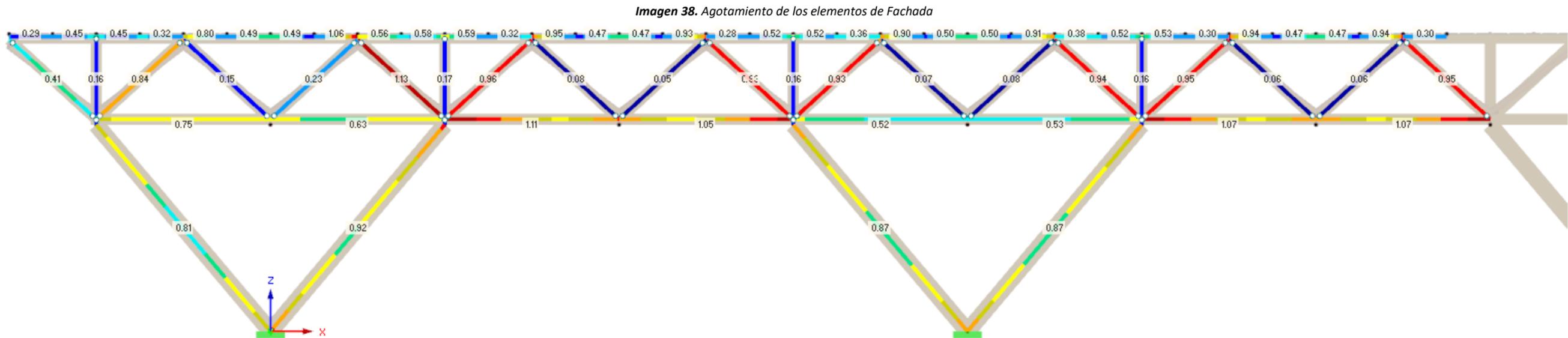
6.1.1. Ratio de diseño de la estructura

A continuación, se muestra el aprovechamiento máximo de cada uno de los perfiles de la estructura para la **envolvente de las cargas en ELU**. El agotamiento máximo se produce en las diagonales para la combinación fundamental en ELU 5: $1,35G + 1,35Gq + 1,50Q_iH + 0,90Q_w$, que es la que actúa con una sobrecarga repartida sobre toda la superficie (Sobrecarga de uso 1) y con la carga de viento repartida a presión en toda la superficie (Viento X+++).



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de RF-TimberPro de Dlubal.

En cuanto al pórtico lateral, la situación más desfavorable se produce para la misma combinación de acciones. Los elementos que más sufren son los soportes y las diagonales de la cercha de atado.



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de RF-TimberPro de Dlubal.

Los soportes sufren por la combinación de flexión es viada y compresión. Son especialmente vulnerables por estar inclinados y flectan tanto por la acción del viento en una dirección, como por la acción de peso propio de la estructura en la otra. **Todos los perfiles cumplen** las limitaciones por agotamiento. aquellos más solicitados cumplen las condiciones de diseño con un aprovechamiento de alrededor del 100%.

6.1.2. Deformaciones

En el siguiente apartado se muestran la envolvente de deformaciones para las combinaciones característica y cuasi-permanente.

Imagen 38. Deformaciones: envolvente de acciones característica (55,4mm)

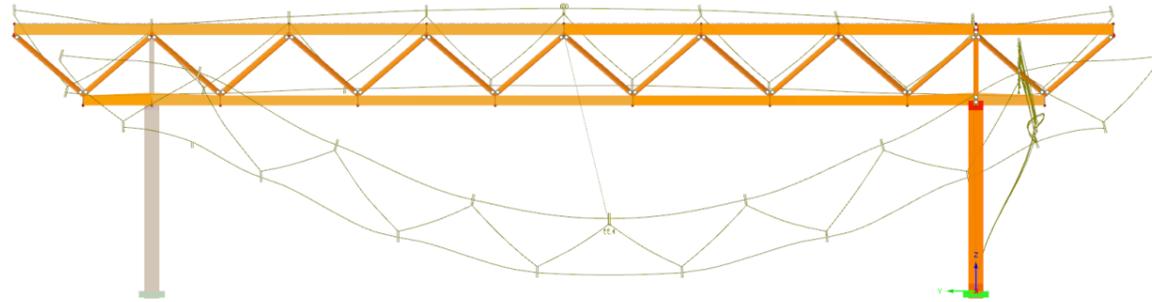
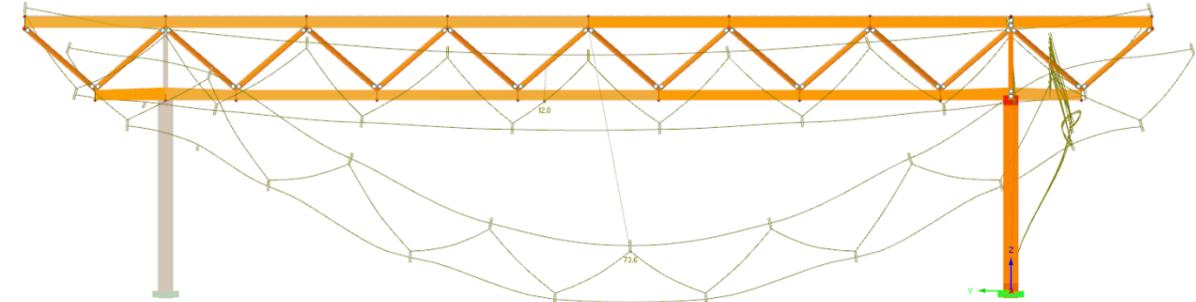


Imagen 39. Deformaciones: envolvente de acciones cuasi permanente (73,3mm)



Comprobación de límites de flechas verticales

El límite de flechas verticales para cualquier combinación característica, a la hora de considerar la integridad de los elementos constructivos es de 1/300; y para tener en cuenta confort de los usuarios es de 1/350. Por otro lado, para considerar la apariencia de la obra habrá el límite de flecha que se empleará es de 1/300. Es decir, para que cumpla nuestra estructura —con una luz de 33 metros—, el desplazamiento vertical máximo para la combinación característica será de 95 mm, y para la combinación cuasi-permanente de 110 mm. Podemos ver que cumple en ambos casos.

Imagen 40. Desplazamientos en Z: Envolvente de acciones característica (53,8 mm)

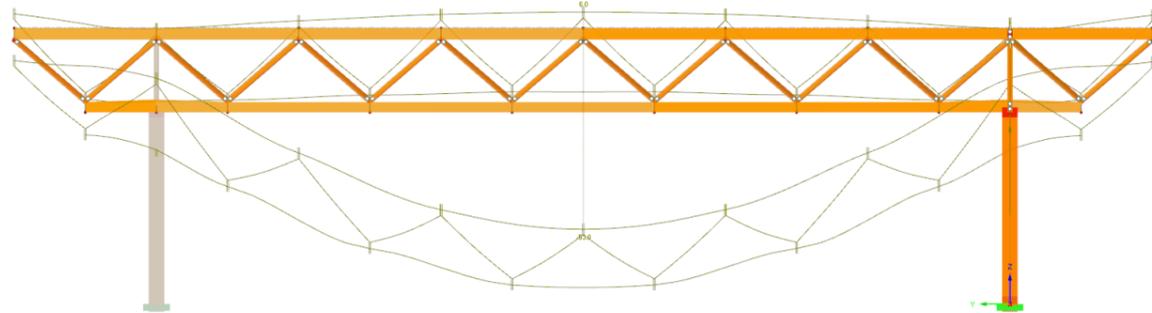
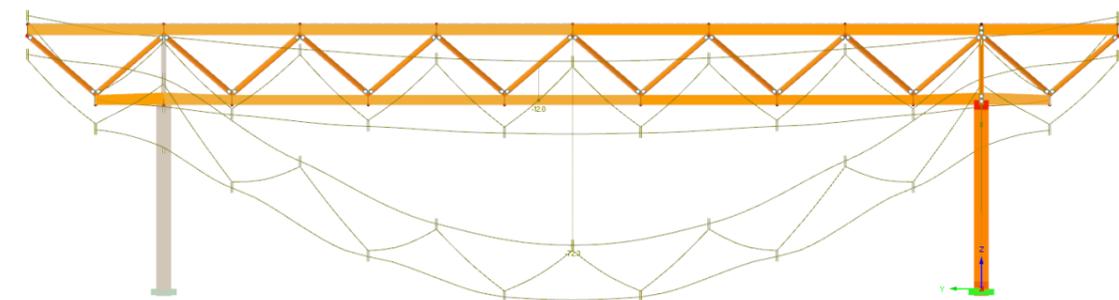


Imagen 41. Desplazamientos en Z: envolvente de acciones cuasi-permanente (72,3 mm)



Comprobación de límites de flechas horizontales

El límite de flechas horizontales será de 1/250, de la altura de la planta, es decir de 29,2 mm. Tanto para considerar la integridad de los elementos estructurales para cualquier la combinación característica, como para considerar la apariencia de la obra para cualquier combinación cuasi-permanente. Se puede ver que ambas cumplen.

Imagen 42. Desplazamientos en Y: Envolvente de acciones característica (19,6 mm)

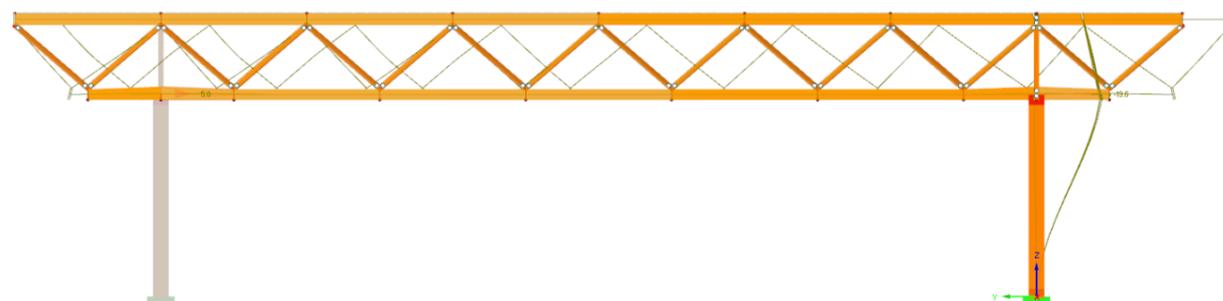
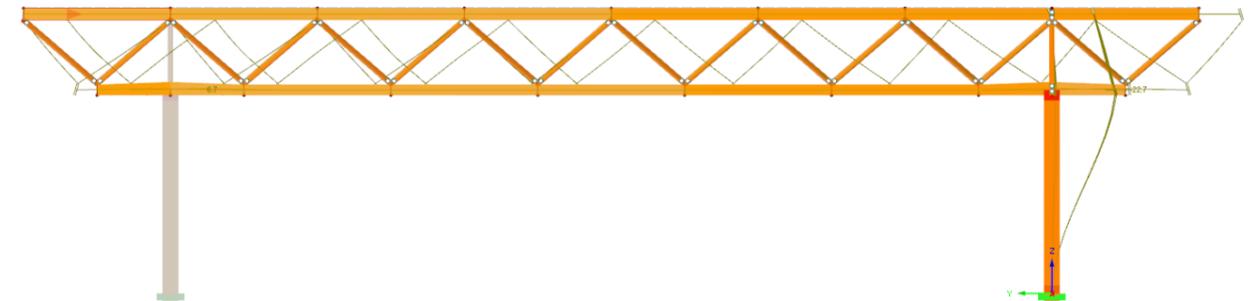


Imagen 43. Desplazamientos en Y: envolvente de acciones cuasi-permanente (22,7 mm)



6.2. Comprobación de los elementos estructurales

En este apartado se comprueban frente a esta límite último y estado límite de servicio cada uno de los elementos. Se reproducen las situaciones de carga y modos de fallo más restrictivos que han condicionado el diseño de cada elemento.

6.2.1. Soportes inclinados

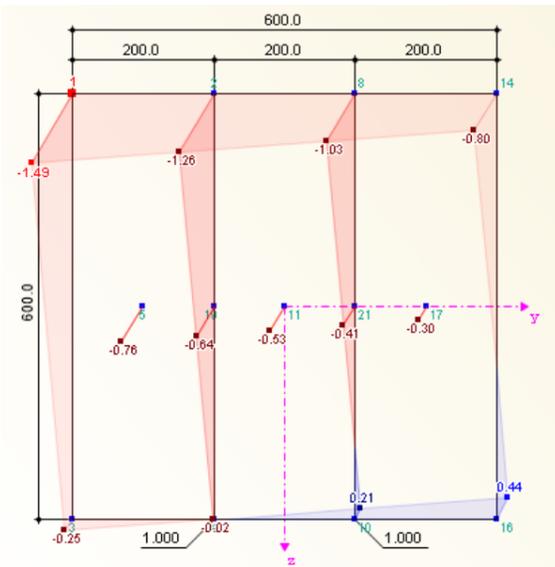
Características mecánicas de la sección: 3BD 900/200/200

$A = 3600 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 1000 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 3000 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 1080000 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 120000 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU

Los soportes inclinados se encuentran sometidos no solo a la compresión axial de las cargas verticales, sino que también están solicitados a flexión enviada. Por un lado, la flexión alrededor del eje y por tratarse de piezas inclinadas; y por otro, alrededor del eje z por estar unido de forma rígida a los cordones inferiores de la fachada.

La sección más desfavorable se produce en la base, punto en el que la sección de los soportes es mayor con un canto de 900mm. La combinación más desfavorable es: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VX++.



Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -1897,56 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$M_{y,d} = 223,32 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$M_{z,d} = 124,95 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje Z

$\sigma_{c,0,d} = -0,53 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a compresión
$\sigma_{m,y,d} = 0,62 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y
$\sigma_{m,z,d} = 0,35 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje z

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,z,d} = k_{mod} \frac{f_{m,z,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$K_m = 0,7$ Por tratarse de un perfil de sección rectangular

$$(6.19) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,65 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,52 \leq 1 \text{ Cumple}$$

La longitud de pandeo se reduce de cada uno de los tres elementos a 1m, ya que se dispondrán de forma intercalada chapas de madera de 4mm de espesor con el propósito de arriostrar frente al pandeo local de las piezas.

$K_{c,y} = 0,848$ Coeficiente de pandeo en alrededor del eje y

$K_{c,z} = 0,848$ Coeficiente de pandeo alrededor del eje z

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,75 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,92 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Comprobación desplome activo

La altura total en vertical de los soportes es de 7.3m, será necesario comprobar el desplome final de la estructura debido al desplazamiento instantáneo y diferido de las cargas permanentes y de las cargas variables.

Cada una de las respectivas cargas de corta duración son multiplicadas por el factor de deformación por fluencia $k_{def} = 0,8$ —por tratarse de vigas laminadas de clase de servicio 2—.

Como la flecha activa es menor que $7,3/250 = 29.2\text{mm}$, cumple.

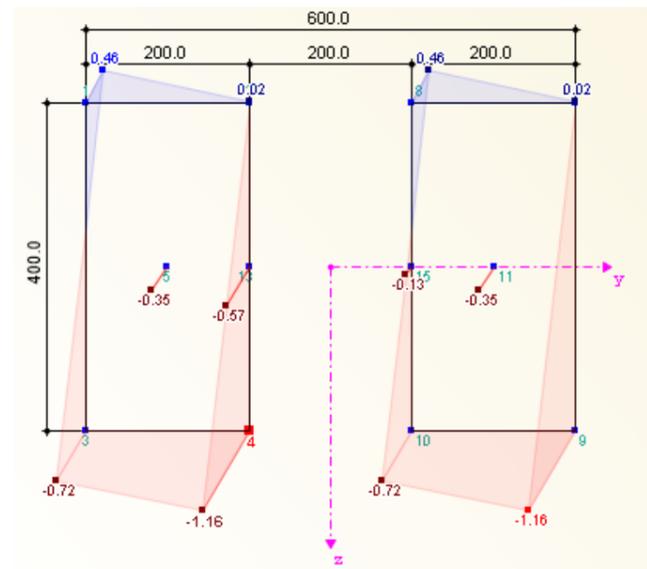
6.2.2. Cercha de fachada: cordones inferiores

Características mecánicas de la sección: T-2B 400/200/200

$A = 1600 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 666,67 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 1333,33 \text{ cm}^3$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 21333,33 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 53333,33 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU

Los cordones de fachada se comportan como vigas continuas a lo largo de toda la longitud. Las secciones más vulnerables son en el punto de unión entre los soportes, donde además también coinciden los montantes y diagonales de la fachada. En este punto la sección está sometida a esfuerzos cortantes muy altos. La combinación más desfavorable es para la carga vertical máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VX++.



Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -557,98 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$V_{z,d} = 15,36 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en z
$M_{y,d} = -62,80 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$M_{z,d} = -11,63 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje Z
$\sigma_{c,0,d} = -0,35 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a compresión
$\sigma_{m,y,d} = -0,59 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y
$\sigma_{m,z,d} = -0,22 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje z

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,z,d} = k_{mod} \frac{f_{m,z,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$K_m = 0,7$ Por tratarse de un perfil de sección rectangular

$$(6.19) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,51 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,51 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Y calculando los correspondientes coeficientes de pandeo según la norma:

$K_{c,y} = 0,865$ Coeficiente de pandeo en alrededor del eje y

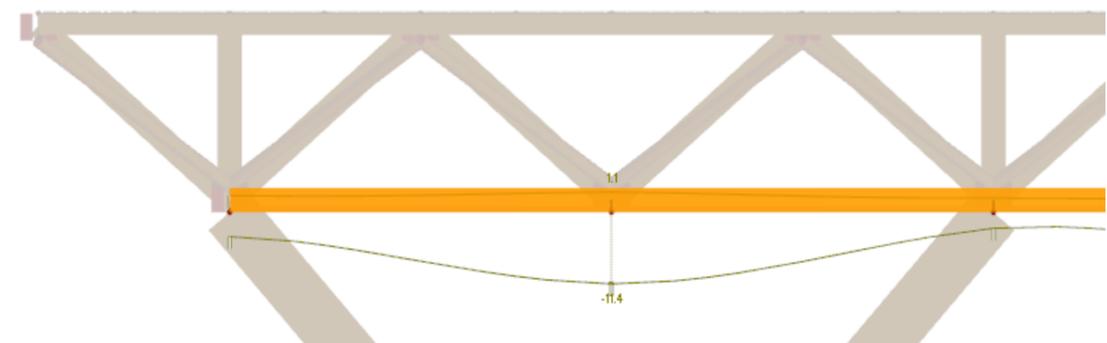
$K_{c,z} = 0,315$ Coeficiente de pandeo alrededor del eje z

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,70 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,98 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Comprobación flecha

El vano del cordón inferior que más flecha es en el vano extremo de 13.56m, para la combinación característica: 1,0 PP+1,0 CM + 1,0 SU1+ 0,6 V++ . La máxima flecha permitida es de 54mm (>11,4m), por lo que cumple.



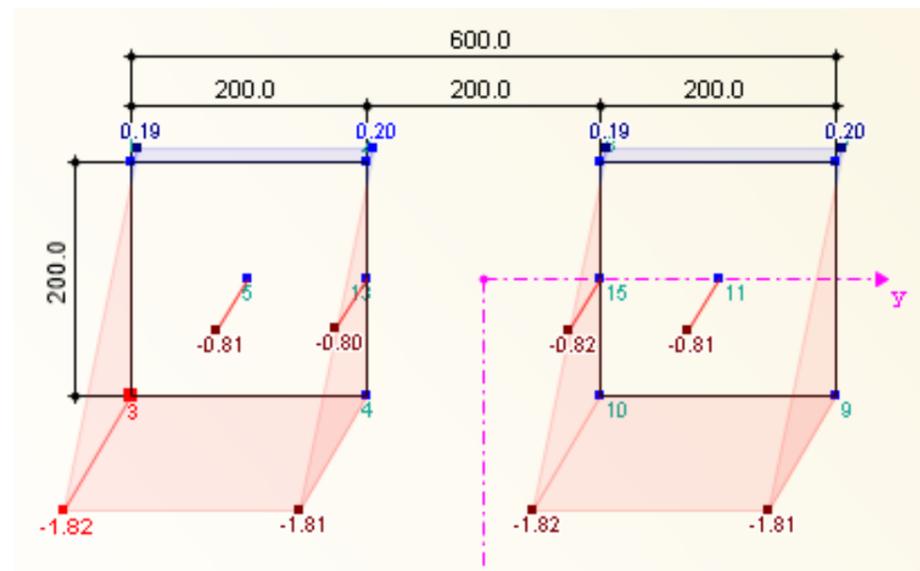
6.2.3. Cercha de fachada: cordones superiores

Características mecánicas de la sección: T-2B 200/200/200

$A = 800 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 333,33 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 666,67 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 26666,67 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 26666,67 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU

Los cordones de fachada se comportan como vigas continuas a lo largo de toda la longitud. Las secciones más vulnerables son en el punto de unión entre los soportes, donde además también coinciden los montantes y diagonales de la fachada. En este punto la sección está sometida a esfuerzos cortantes muy altos. La combinación más desfavorable es para la carga vertical máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VX++.



Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -647,91 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$V_{z,d} = 24,6 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en z
$M_{y,d} = -26,85 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$M_{z,d} = -0,17 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje Z

$\sigma_{c,0,d} = -0,81 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a compresión
$\sigma_{m,y,d} = -1,01 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y
$\sigma_{m,z,d} = -0,01 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje z

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,z,d} = k_{mod} \frac{f_{m,z,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$K_m = 0,7$ Por tratarse de un perfil de sección rectangular

$$(6.19) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,90 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,90 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Y calculando los correspondientes coeficientes de pandeo según la norma para una longitud de pandeo de 1.563m:

$K_{c,y} = 0,984$ Coeficiente de pandeo en alrededor del eje y

$K_{c,z} = 0,984$ Coeficiente de pandeo alrededor del eje z

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 1 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,9 \leq 1 \text{ Cumple}$$

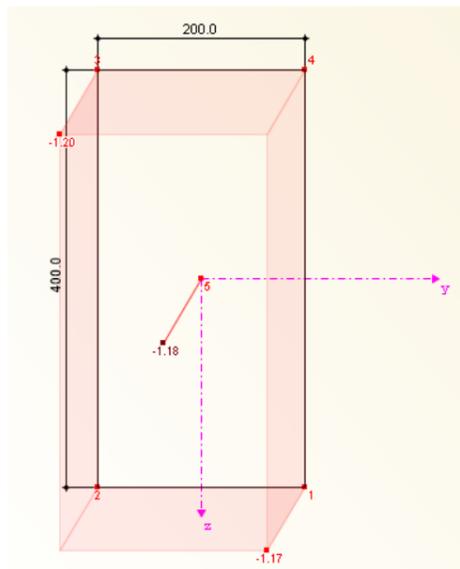
6.2.4. Cercha de fachada: Diagonales y montantes

Características mecánicas de la sección: T-200/400

$A = 800 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 666,67 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 666,67 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 106666,68 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 26666,67 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU

De entre los elementos intermedios de la cercha, los que más sufren son las diagonales cuyo nudo coincide con el apoyo de los soportes. Estos elementos se encuentran principalmente comprimidos, sometidos a pandeo. Los montantes por ser más cortos no sufren tanto como las diagonales. La combinación más desfavorable es para la carga vertical máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VX++.



Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -946,88 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$V_{z,d} = 0 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en z
$M_{y,d} = 0,94 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$M_{z,d} = 1,35 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje Z

$\sigma_{c,0,d} = -1,18 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a compresión
$\sigma_{m,y,d} = -0,02 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y
$\sigma_{m,z,d} = -0,05 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje z

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,z,d} = k_{mod} \frac{f_{m,z,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$K_m = 0,7$ Por tratarse de un perfil de sección rectangular

$$(6.19) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,50 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,51 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Y calculando los correspondientes coeficientes de pandeo según la norma para una longitud de pandeo de 4,229m:

$K_{c,y} = 0,960$ Coeficiente de pandeo en alrededor del eje y

$K_{c,z} = 0,628$ Coeficiente de pandeo alrededor del eje z

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,74 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 1 \leq 1 \text{ Cumple}$$

6.2.5. Malla espacial: Cordones inferiores

Los cordones de la malla van a comprobarse dos veces, una en el centro de vano donde el momento flector positivo es máximo, y otra en el punto de apoyo con la cercha, donde el momento flector de la cubierta es mínimo. Cabe destacar que en el punto de apoyo con la cercha de fachada la sección de los cordones aumenta. La combinación más desfavorable es para la carga vertical máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VX++.

a) En el centro de vano:

Características mecánicas de la sección: T-2B 400/200/200

$A = 1600 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 666,67 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 1333,33 \text{ cm}^3$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 21333,33 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 53333,33 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = 1122,75 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$V_{z,d} = 21,87 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en z
$M_{y,d} = -48,20 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$M_{z,d} = 0,62 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje z
$\sigma_{t,0,d} = -0,7 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a tracción
$\sigma_{m,y,d} = 0,45 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y
$\sigma_{m,z,d} = 0,01 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje z

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,d}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{1,92}{1,25} = 1,38 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,z,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$(6.19) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,78 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,78 \leq 1 \text{ Cumple}$$

b) En el apoyo entre el cordón inferior y la cercha de fachada:

Características mecánicas de la sección: T-2B 500/200/200

$A = 2000 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 833,33 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 1666,67 \text{ cm}^3$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 416666,66 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 66666,67 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -1897,56 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$V_{y,d} = 35,16 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en y
$V_{z,d} = -38,72 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en z
$M_{y,d} = 223,32 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$M_{z,d} = 124,95 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje z
$\sigma_{c,0,d} = -0,53 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a compresión
$\sigma_{m,y,d} = 0,45 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y
$\sigma_{m,z,d} = -0,35 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje z

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,d}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,z,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

Y calculando los correspondientes coeficientes de pandeo según la norma para una longitud de pandeo de 9.686m:

$$K_{c,y} = 0,848 \quad \text{Coeficiente de pandeo en alrededor del eje y}$$

$$K_{c,z} = 0,848 \quad \text{Coeficiente de pandeo alrededor del eje z}$$

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,92 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,92 \leq 1 \text{ Cumple}$$

6.2.6. Malla espacial: Cordones superiores

El cordón superior de fachada tiene su punto de concentración de mayor tensión en el punto de apoyo con la fachada. La combinación más desfavorable es para la carga vertical máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9V++.

Características mecánicas de la sección: T-2B 440/200/200

$A = 1760 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 733,33 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 1466,67 \text{ cm}^3$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 283946,67 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 58666,67 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU

El cordón superior de fachada tiene su punto de concentración de mayor tensión en el punto de apoyo con la fachada. La combinación más desfavorable es para la carga vertical máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9V++.

Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -567 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$V_{y,d} = 6,22 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en y
$V_{z,d} = 52,72 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en z
$M_{y,d} = -77,28 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$M_{z,d} = 2,11 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje Z
$\sigma_{c,0,d} = -0,32 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a compresión
$\sigma_{m,y,d} = -0,60 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y
$\sigma_{m,z,d} = -0,04 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje z

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,d}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,z,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$K_m = 0,7$$

Por tratarse de un perfil de sección rectangular

$$(6.19) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,50 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,51 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Y calculando los correspondientes coeficientes de pandeo según la norma para una longitud de pandeo de 5,5m:

$$K_{c,y} = 0,935 \quad \text{Coeficiente de pandeo en alrededor del eje y}$$

$$K_{c,z} = 0,4 \quad \text{Coeficiente de pandeo alrededor del eje z}$$

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,57 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 83 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Comprobación flecha

El límite de flechas verticales para cualquier combinación característica, a la hora de considerar la integridad de los elementos constructivos es de 1/300; y para tener en cuenta confort de los usuarios es de 1/350. Por otro lado, para considerar la apariencia de la obra habrá el límite de flecha que se empleará es de 1/300. Es decir, para que cumpla nuestra estructura —con una luz de 33 metros—, el desplazamiento vertical máximo para la combinación característica será de 95 mm, y para la combinación cuasi-permanente de 110 mm.

En ambos casos cumple.

Combinación Característica: 53,8 mm < 95mm;

Combinación cuasi-permanente: 72,3 < 110mm

6.2.7. Malla espacial: Diagonales circulares

Las diagonales circulares se separan en dos las que están sometidas a compresión, que son las que agotan por pandeo, y las que están sometidas a tracción. Además, hay unas diagonales las de refuerzo, que están sometidas a mayores esfuerzos de compresión y cuentan con un perfil de 20cm más de diámetro.

Características mecánicas de la sección: T-Circle 220

$A = 380,13 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 322,15 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 322,15 \text{ cm}^3$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 11499,01 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 11499,01 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU

La combinación más desfavorable es para la carga horizontal máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VY--.

Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = 249,31 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$V_d = 0,22 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en z
$M_d = 1,13 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$\sigma_{c,0,d} = 0,66 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a compresión
$\sigma_{m,d} = 0,11 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,d}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = 0,32 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Y calculando los correspondientes coeficientes de pandeo según la norma para una longitud de pandeo de 4,790m:

$$K_c = 0,547 \quad \text{Coeficiente de pandeo}$$

$$(6.23) \text{ y } (6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = 0,97 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Características mecánicas de la sección: T-Circle 240

$A = 452,39 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 383,38 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 383,38 \text{ cm}^3$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 16286,02 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 16286,02 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU

La combinación más desfavorable es para la carga horizontal máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VY--.

Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -393,42 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$V_d = 0,30 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en z
$M_d = 1,54 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$\sigma_{c,0,d} = -0,87 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a compresión
$\sigma_{m,d} = -0,02 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,d}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = 0,32 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Y calculando los correspondientes coeficientes de pandeo según la norma para una longitud de pandeo de 4,790m:

$$K_c = 0,547 \quad \text{Coeficiente de pandeo}$$

$$(6.23) \text{ y } (6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = 0,97 \leq 1 \text{ Cumple}$$

6.2.8. Malla espacial: Trabes de atado superiores

Características mecánicas de la sección: T-200/350

$A = 700 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 583,33 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 583,33 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 71458,34 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 23333,33 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU

La combinación más desfavorable es para la carga horizontal máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VY--.

Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -946,88 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$M_{y,d} = 0,94 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y
$M_{z,d} = 1,35 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje Z

$\sigma_{c,0,d} = 1,18 \text{ kN/cm}^2$ Tensión a compresión

$\sigma_{m,y,d} = 0,02 \text{ kN/cm}^2$ Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y

$\sigma_{m,z,d} = 0,05 \text{ kN/cm}^2$ Tensión a flexión de diseño alrededor del eje z

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,z,d} = k_{mod} \frac{f_{m,z,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$K_m = 0,7$ Por tratarse de un perfil de sección rectangular

$$(6.19) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,38 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,38 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Y calculando los correspondientes coeficientes de pandeo según la norma para una longitud de pandeo de 4,229m:

$K_{c,y} = 0,96$ Coeficiente de pandeo en alrededor del eje y

$K_{c,z} = 0,628$ Coeficiente de pandeo alrededor del eje z

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,57 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{K_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,83 \leq 1 \text{ Cumple}$$

6.2.9. Malla espacial: Trabes de atado inferiores

Características mecánicas de la sección: T-100/200

$A = 200 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 166,67 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 166,67 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 6666,67 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 23333,33 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU

La combinación más desfavorable es para la carga horizontal máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VX++.

Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -5,43 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$M_{y,d} = 0,39 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y

$\sigma_{c,0,d} = -0,05 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a compresión
$\sigma_{m,y,d} = -0,23 \text{ kN/cm}^2$	Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,d}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$K_m = 0,7$ Por tratarse de un perfil de sección rectangular

$$(6.19) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,24 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Y calculando los correspondientes coeficientes de pandeo según la norma para una longitud de pandeo de 6,25m:

$K_{c,y} = 0,163$ Coeficiente de pandeo en alrededor del eje y

$$(6.23) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,33 \leq 1 \text{ Cumple}$$

$$(6.24) \quad \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} = 0,47 \leq 1 \text{ Cumple}$$

6.2.10. Forjado: Viguetas

Las viguetas más solicitadas son aquellas que coinciden con la cerchad e fachada.

Características mecánicas de la sección: T-200/350

$A = 700 \text{ cm}^2$	Área
$A_{vy} = 583,33 \text{ cm}^2$	Área de Cortante respecto al eje y
$A_{vz} = 583,33 \text{ cm}^3$	Área de Cortante respecto al eje z
$I_y = 71458,34 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje y
$I_z = 23333,33 \text{ cm}^4$	Inercia respecto al eje z

Comprobación Agotamiento en ELU a flexión

La combinación más desfavorable es para la carga horizontal máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VY--. El punto de mayor flexión se produce en el centro de vano de la vigueta.

Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$N_d = -313,16 \text{ kN}$	Esfuerzo axial de diseño
$V_d = 4,07 \text{ kN}$	Esfuerzo cortante de diseño en z
$M_d = -9,88 \text{ kN}$	Esfuerzo de flexión alrededor del eje y

$$\sigma_{c,0,d} = 0,45 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Tensión a compresión}$$

$$\sigma_{m,d} = 0,02 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y}$$

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,d}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = 0,75 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Comprobación Agotamiento en ELU a cortante

La combinación más desfavorable es para la carga horizontal máxima: 1,35PP+1,35CM+1,5SU1+0,9VY--. Sin embargo, esta se produce en el punto de apoyo de la vigueta con el cordón superior de la cercha.

Donde los esfuerzos y tensiones de diseño:

$$N_d = -469,52 \text{ kN} \quad \text{Esfuerzo axial de diseño}$$

$$V_d = 14,97 \text{ kN} \quad \text{Esfuerzo cortante de diseño en z}$$

$$\sigma_{c,0,d} = 0,67 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Tensión a compresión}$$

$$\sigma_{m,d} = 0,24 \text{ kN/cm}^2 \quad \text{Tensión a flexión de diseño alrededor del eje y}$$

Considerando como valores de cálculo de resistencia:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \frac{f_{c,0,d}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{m,d} = k_{mod} \frac{f_{m,y,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,4}{1,25} = 1,73 \text{ kN/cm}^2$$

$$(6.20) \quad \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} = 0,866 \leq 1 \text{ Cumple}$$

Estado límite de servicio.

Para garantizar la apariencia de la obra debe cumplir el criterio límite de apariencia de la obra.

$$(1 + K_{def}) \cdot \delta_{pp} + (1 + \psi_2 \cdot K_{def}) \cdot \delta_{pp} \cdot \psi_2 < \frac{L}{300} = \frac{5,5}{300} = 18,3 \text{ cm}$$

$$(1 + K_{def}) \cdot \delta_{pp} + (1 + \psi_2 \cdot K_{def}) \cdot \delta_{pp} \cdot \psi_2 = 3,6 \text{ cm} < 18,3 \text{ Cumple}$$

ANEJO Nº4: ESTUDIO COMPARATIVO. RESPUESTA FRENTE A SISMO

TITULACIÓN: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR: David Sanchis García

TUTOR: Carlos Llopis Camps

CURSO: 2020-2021

INDICE DE CONTENIDO

1. OBJETO	3
2. BASES DE CÁLCULO Y MODELOS	3
2.1. Normativa y recomendaciones	3
2.2. Programa de cálculo empleado	3
2.3. Elección del modelo de análisis y consideraciones de cálculo	3
2.4. Espectro de diseño	4
3. ANÁLISIS DINÁMICO	5
3.1. Modelos de cálculo	5
3.2. Frecuencias propias y periodos naturales	5
3.3. Análisis del espectro de respuesta.....	5
4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DINÁMICO	6
4.1. Estimación de las fuerzas equivalentes.	6
4.3. Cortante basal y reacciones sobre los apoyos	8
4.3.1 Cortante Basal.....	8
4.3.2 Reacciones sobre los apoyos	8
5. CONCLUSIONES	9

INDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Modelo Simplificado frente a sismo	3
Imagen 2. Deformada de la cubierta de Madera.....	7
Imagen 3. Deformada de la cubierta de Metálica	7
Imagen 4. Modelo Simplificado frente a sismo	9

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Frecuencias propias y periodos naturales de cada alternativa	5
Tabla 2. Pseudo-aceleraciones y Fuerzas Equivalentes	6
Tabla 3. Desplazamientos máximos por sismo	7
Tabla 4. Cortantes basales	8
Tabla 5. Reacciones Máximas en los apoyos	8

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica 1. Espectros de diseño del sismo en el emplazamiento de la cubierta	4
Gráficas 2-7. Espectros de diseño del sismo en el emplazamiento de la cubierta.....	6

1. OBJETO

El siguiente Anejo tiene el propósito de determinar de manera cualitativa, qué material, madera o acero, presenta un comportamiento estructural mejor, frente al evento de un sismo, para el caso de la cubierta de la estación Observatorio del tren Interurbano México- Toluca.

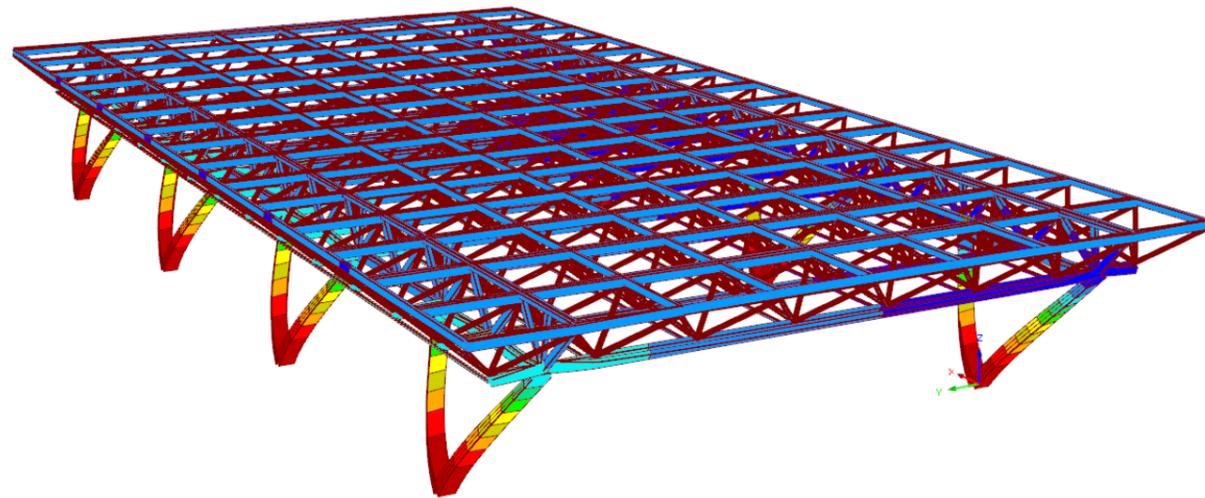
Para realizar el análisis comparativo se van a considerar los procedimientos de análisis de las euronormas, y se caracterizará el terreno y el sismo mediante tal y como describen las normas mexicanas. Mediante las últimas normas se definirá el espectro sísmico de diseño.

Mediante un software de cálculo con elementos finitos -RFEM— se analiza la respuesta estructural de ambas alternativas —en madera y en acero— en el caso de un evento de sismo. Para ello se ha realizado un análisis dinámico multimodal.

A partir de los resultados del análisis, los indicadores que van a utilizarse para comparar el comportamiento de cada estructura son:

- Las pseudo-aceleraciones y fuerzas estáticas equivalentes
- Los desplazamientos de las estructuras
- El cortante basal y las reacciones en los apoyos

Imagen 1. Modelo Simplificado frente a sismo



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

2. BASES DE CÁLCULO Y MODELOS

2.1. Normativa y recomendaciones

Para realizar el análisis de respuesta de la cubierta frente a sismo se ha empleado la normativa mexicana. Esta norma recoge la realidad regional y permite caracterizar el sismo con mucho detalle. Para determinar las combinaciones de acciones, y que estas sean consistentes con las comprobaciones estructurales empleadas se ha recurrido a las euronormas. Nos estamos refiriendo a:

- *NTC: Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo*
- *UNE EN1998-1: Eurocódigo 8: Proyecto de estructuras sismoresistentes*

2.2. Programa de cálculo empleado

El programa de cálculo empleado será el mismo que en el resto de los anejos anteriores R-FEM de Dlubal. Sin embargo, se empleará el paquete de módulos de análisis dinámico de RF-Dynam Pro para llevar a cabo el análisis. Este paquete incorpora una serie de módulos adicionales:

- *RF-DYNAM pro - Natural Vibrations.* Este módulo permite al usuario hacer un análisis rápido de las frecuencias propias y modos de vibración para modelos espaciales de barras, superficies y sólidos. Todos los valores de entrada requeridos se pueden importar directamente desde RFEM/RSTAB.
- *RF-DYNAM Pro - Equivalent Loads.* Este módulo permite al usuario realizar análisis sísmicos con el análisis del espectro de respuesta multimodal. Los espectros requeridos se pueden crear según las normas o definir por el usuario, a partir de los cuales se generan las cargas estáticas equivalentes.

2.3. Elección del modelo de análisis y consideraciones de cálculo

La elección del tipo de análisis depende de las características de la estructura. Para realizar el análisis de respuesta frente a sismo, se deberá recurrir a un **análisis dinámico multimodal**.

No se va a poder aplicar el método simplificado que propone la norma, por tratarse de una estructura sin muros capaces de contener los esfuerzos laterales de forma uniforme. Dada la singularidad de nuestro sistema de apoyo será conveniente proceder con análisis avanzados. Si bien la norma permite llevar a cabo un análisis estático, cómo en la práctica las estructuras tan singulares empleando la madera como material principal no son tan habituales, se considera una mejor opción emplear un análisis dinámico. Este método se encuentra recogido en el artículo 9.1 de la NTC.

Además, cabe considerar que la estructura tan solo tiene una planta y es doblemente simétrica, por lo que no presenta problemas de excentricidad torsional. Al ser tan solo una cubierta (en el análisis local) se tomará como una sola planta. Si bien también habría que considerar la subestructura masiva de hormigón, para efectos de este análisis comparativo, se analizará la cubierta de forma independiente.

2.4. Espectro de diseño

Se ha caracterizado el sismo, tal y como propone la normativa, con la base de datos del SASID¹ (Sistema de Acciones de Sísmicas de Diseño). La web permite obtener los coeficientes de la normativa mexicana, para cualquier punto del territorio. A continuación, se enumeran dichos factores que caracterizan el tipo estructura, la importancia y la zona en la que se encuentra la cubierta de observatorio:

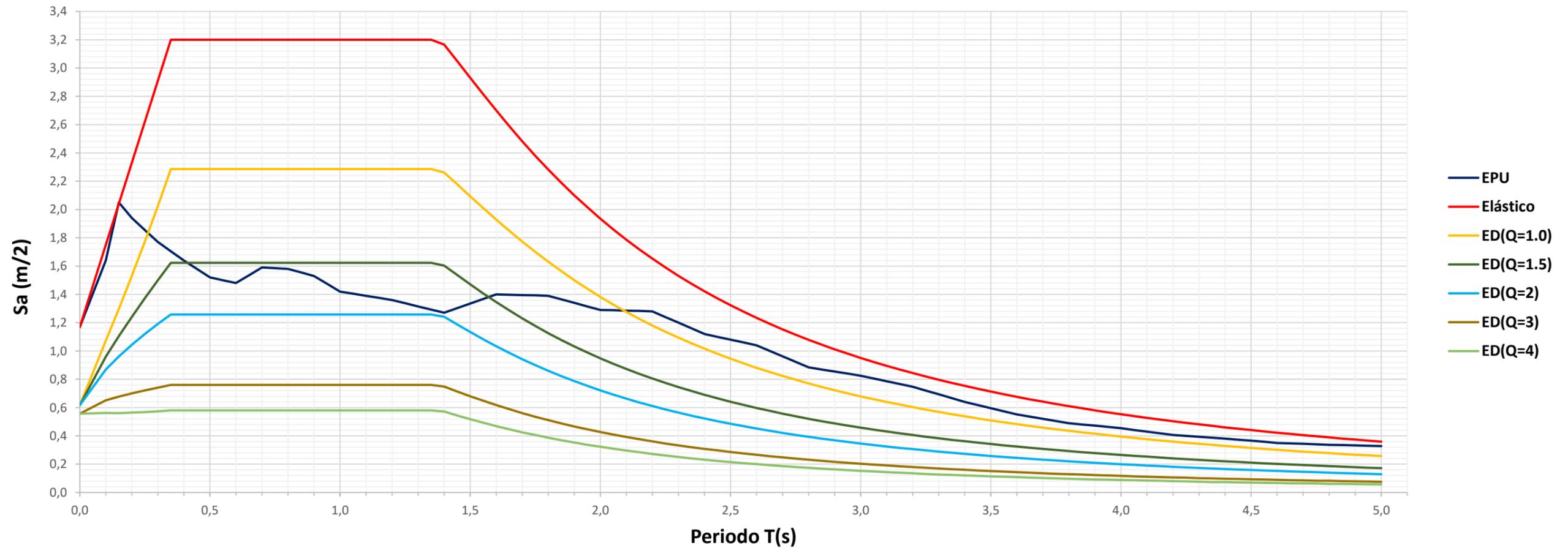
$k_1 = 0.8$	factor de hiperestaticidad
Grupo B	factor de importancia
1	factor de irregularidad
No	estructura de mampostería
III	caracterización de la zona

Teniendo en cuenta la caracterización anterior, los parámetros que propone la norma para definir los diferentes espectros de diseño son:

$\alpha_0 = 1,17$	pseudo aceleración base, valor que corresponde a $T = 0$, como fracción de la aceleración de la gravedad
$C = 320$	coeficiente sísmico.
$T_a = 0.4$	periodo característico a del espectro de diseño.
$T_b = 1.4$	periodo característico b del espectro de diseño.
$k = 1.500$	parámetro auxiliar para el cálculo de las curvas exponenciales de las ordenadas del espectro.

A continuación, se han grafado los distintos espectros de diseño elástico; uno por cada uno de los factores de comportamiento sísmico. Adicionalmente se ha incluido el espectro de peligro uniforme.

Gráfica 1. Espectros de diseño del sismo en el emplazamiento de la cubierta



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la base de datos del SASID

Por tratarse ambas de estructuras dúctiles, pero, con un sistema de columnas en voladizo, el diseño deberá elaborarse con un factor de comportamiento $Q=2$, tal como indica la norma por tratarse de marcos rígidos de acero o metal con ductilidad reducida. Además, presenta todas las condiciones de regularidad y una altura menor de 10m. No obstante, se analizarán todos los casos para tener una visión más global del problema.

¹ Fuente: <https://saside.unam.mx/webNormasCDMX/default.aspx>

3. ANÁLISIS DINÁMICO

Para el análisis comparativo, se deben conocer los desplazamientos máximos en la dirección transversal. Con ellos, se debe evaluar el desplome de la estructura. También conviene averiguar el cortante basal en esta dirección, pues será la que provoque mayores daños en los apoyos de la plataforma de hormigón en los puntos de anclaje.

Para obtener todos estos resultados primero se ha resuelto el problema de autovalores, para calcular diferentes modos de vibración de la estructura; y después, se ha realizado un análisis dinámico multimodal.

3.1. Modelos de cálculo

Dada la complejidad del modelo de barras, y dado que la estructura tiene una dirección principal de 229,25 metros se ha elaborado un modelo reducido a tan solo 100m de longitud. Se ha tomado esta decisión con el propósito de reducir el coste computacional. Se va a considerar como válida esta simplificación, porque los periodos fundamentales más relevantes que provocan inestabilidades en la estructura actúan en dirección transversal de la misma. En caso de que sí influyera, tendría un impacto positivo en ambas estructuras, por lo que nos quedamos del lado de la seguridad.

Para caracterizar cada una de las estructuras, se ha debido definir las masas. En este caso, y considerando la Combinación Accidental frente a sismo que proponen las *Euronomas*, tan solo incluiremos el peso propio de la estructura y las cargas muertas. No va a combinarse la acción del sismo con ninguna otra.

$$\sum G_{k,j} + \sum \psi_{E,i} \cdot Q_{k,i}$$

Es decir, se trata de un modelo análogo al empleado en el estudio de soluciones, pero tan solo cuentan con el **peso propio y cargas muertas** de la cubierta. Se combinarán las cargas permanentes con la acción sísmica y se llevará a cabo un **análisis de segundo orden no lineal**.

3.2. Frecuencias propias y periodos naturales

Con el módulo *RF-DYNAM pro - Natural Vibrations* se han obtenido los diferentes modos de vibración de ambos modelos estructurales.

En el apéndice A. aparecen los resultados de las diferentes frecuencias propias asociadas a cada uno de los periodos naturales de cada estructura. También se incluyen las masas movilizadas para cada una de ellas.

Por otra parte, interesa identificar cuál es el modo de vibración que más masa moviliza en la dirección transversal del pórtico. Este modo nos servirá para comparar el comportamiento más desfavorable de la estructura, y determinar los cortantes basales críticos. Además, este será el periodo que emplearemos como referencia de para cada estructura. Estos modos de vibración son el primero en ambas estructuras y se muestran a continuación.

Tabla 1. Frecuencias propias y periodos naturales de cada alternativa

Modelo	Modo	Autovalor	Frecuencia Natural	Periodo Natural	Masa Modal	Factor masa modal efectiva		
	No.	λ [1/s ²]	f [Hz]	T [s]	M _i [kg]	f _{mex} [-]	f _{meY} [-]	f _{mez} [-]
Madera	1	25,25	0,800	1,25	575.610,06	0	0,982	0
Metálica	1	18,012	0,675	1,48	1.383.281,21	0	0,995	0

Fuente: Elaboración propia mediante los datos obtenidos de la base de datos del SASID

² Fuente: <https://www.dlubal.com/es/soposte-y-formacion/soposte/faq/003413>

3.3. Análisis del espectro de respuesta.

Para llevar a cabo el análisis de espectro de respuesta multimodal se han obtenido tantos modos de vibración necesarios para cada estructura, como para conseguir que la suma de todos pueda movilizar al menos el 90% de la masa total en cada una de las direcciones. Este requisito es imprescindible si se quiere realizar un cálculo posterior multimodal y realizar combinaciones de los diferentes modos en una relación 100%/30% de cada una de las direcciones principales, tal y cómo exige la normativa.

Este análisis se ha realizado empleando el módulo *RF-DYNAM Pro - Equivalent Loads*. Cabe destacar ciertos aspectos sobre los cálculos realizados.

- **Combinación Modal:** Se van a superponer las respuestas modales siguiendo la regla estándar de la **Raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS)**². La forma estándar de la regla SRSS combina los resultados máximos y se pierden los signos algebraicos. La aplicación de esta regla resulta en una combinación lineal equivalente, que puede utilizarse para calcular los esfuerzos resultantes o los desplazamientos máximos.
- **Combinación de direcciones:** Para determinar los desplazamientos en cada dirección se aplica la **regla de 100%/30%**³, tal y como propone la norma. Esto significa que superpone los modos de vibración de manera que se moviliza el 100% de la masa en una dirección, en planta, junto con hasta un 30% en la otra. Es decir, se combinan las dos direcciones en planta de la forma: Y100%/X30%, y X100%/Y30%.

La dirección en sentido de la gravedad debería estudiarse dada la singularidad de las luces de la estructura, según las exigencias de la normativa. Sin embargo, no se consideran relevantes en este estudio, porque no se consideran determinantes.

Cómo resultado de estos análisis vamos a obtener las siguientes combinaciones de acciones, para cada uno de los espectros de diseño sísmicos propuestos: Q=0, Q=1, Q=1.5, Q=2, Q=3 y Q=4.

- Combinación modal SRSS Y100% / X30%
- Combinación modal SRSS X100% / Y30%
- Modo de vibración más desfavorable en la dirección Y

La última combinación, se incluye para poder determinar los esfuerzos más desfavorables sobre la placa de anclaje, que coinciden con los valores del cortante basal, repartido entre el número de apoyos de la estructura. Estos esfuerzos son los que van a provocar daños sobre la plataforma de hormigón. Cabe recordar que las combinaciones modales SRSS Y100% / X30% y SRSS X100% / Y30%, son representaciones ficticias de acciones accidentales, propuestas por la norma, para tener en cuenta el evento de aquellos sismos que no actúen en las direcciones ortonormales de la estructura.

En total habrá 18 combinaciones de acciones. Cada una de ellas se representa como una fuerza lineal equivalente sobre la estructura. Se combinarán las cargas permanentes con la acción sísmica y se llevará a cabo un **análisis de segundo orden no lineal**.

³ Fuente: <https://www.dlubal.com/en-US/support-and-learning/support/faq/002062>

4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DINÁMICO

En el siguiente apartado, se presentan los resultados relevantes de los análisis, que van a permitir evaluar posteriormente la respuesta estructural de la estructura. Primero se ha realizado una primera estimación numérica de las fuerzas equivalentes que actuarán sobre cada cubierta, las cuales servirán para comprobar que

los resultados obtenidos en el análisis posterior más refinado son correctos. En segundo lugar, se han comparado los desplazamientos que provoca sobre el pórtico principal la combinación lineal de sismo Y100%/X30%. Por último, se muestran los cortantes basales y las reacciones sobre los apoyos.

4.1. Estimación de las fuerzas equivalentes.

A continuación, se muestran las pseudo-aceleraciones de cada uno de los espectros de respuesta. Aunque el modelo de cálculo finalmente empleado es más avanzado, las conclusiones de estos gráficos van a proporcionarnos una primera estimación, para poder entender el comportamiento de ambos sistemas y poder validar los resultados finales del análisis del espectro de respuesta. En naranja la cubierta de madera y en azul la metálica.

Gráficas 2-7. Espectros de diseño del sismo en el emplazamiento de la cubierta Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la base de datos del SASID y los resultados del modelo

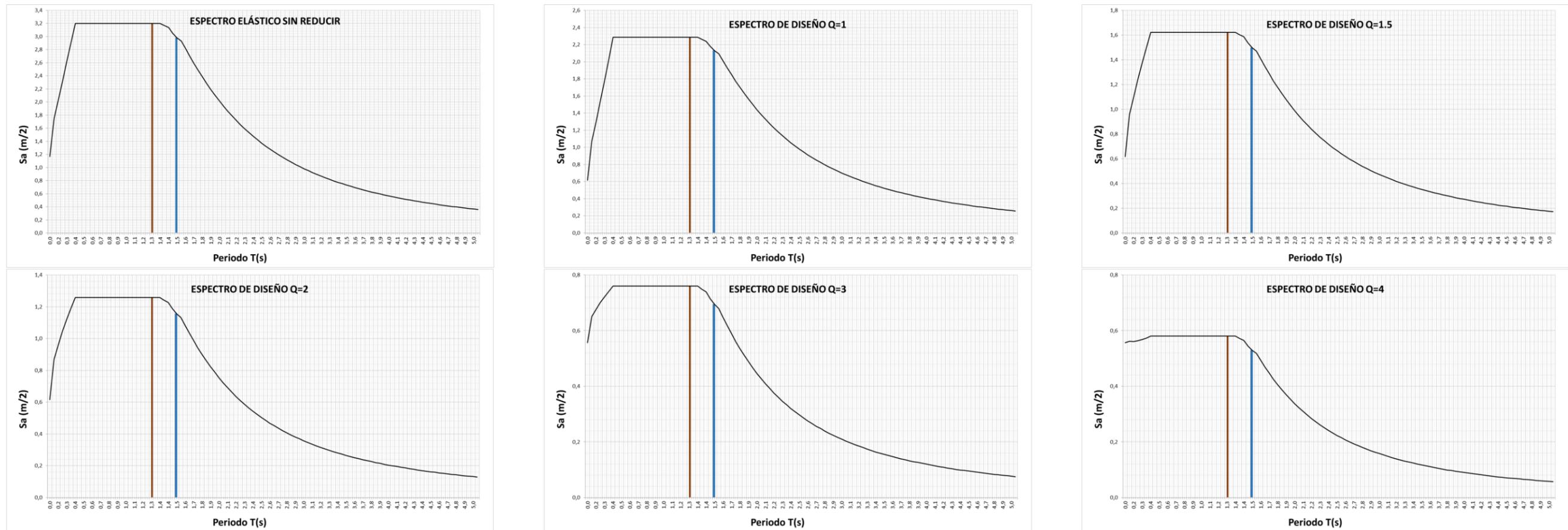


Tabla 2. Pseudo-aceleraciones y Fuerzas Equivalentes

	Pseudo-aceleraciones			Fuerzas Equivalentes		
	Madera (T= 1,25s)	Metálica (T=1,48s)	Var%	Madera (m= 575.610kg)	Metálica (m= 1.383.281kg)	Var%
Elástico	1,34 m/s ²	1,32 m/s ²	3%	770,17 kN	1828,97 kN	137%
ED(Q=1.0)	3,2 m/s ²	2,98 m/s ²	-5%	1841,95 kN	4119,69 kN	124%
ED(Q=1.5)	2,29 m/s ²	2,13 m/s ²	-5%	1315,84 kN	2942,24 kN	124%
ED(Q=2)	1,62 m/s ²	1,5 m/s ²	-6%	934,22 kN	2071,33 kN	122%
ED(Q=3)	1,26 m/s ²	1,16 m/s ²	-6%	724,12 kN	1597,97 kN	121%
ED(Q=4)	0,76 m/s ²	0,69 m/s ²	-6%	437,46 kN	959,44 kN	119%

Fuente: Elaboración propia

Se puede ver que los periodos de ambas estructuras son muy parecidos y arrojan resultados de las pseudo-aceleraciones muy parecidas. Más parecidas cuanto mayor es el coeficiente de amortiguamiento. La estructura de metal se encuentra en el llamado rango de velocidades constantes de los espectros de diseño, mientras que la alternativa en madera está en el rango de aceleraciones constantes.

Las fuerzas que van a actuar sobre el plano intermedio del forjado de cubierta pueden estimarse aplicando la 2ª ley de Newton: $F_{eq} = m_{movilizada} \times S_a$.

Aunque las aceleraciones sean parecidas, como la masa total de las cargas permanentes de la estructura de madera es significativamente menor, se puede prever que el sismo incidirá sobre la estructura metálica alrededor de un 120% más.

4.2. Desplazamientos

Es conveniente analizar los desplazamientos máximos que se producirán sobre el pórtico principal de las estructuras. Será necesario para comprobar que se cumple el criterio límite de desplazamientos horizontales.

A continuación, se muestra la deformada de ambas cubiertas. Las imágenes nos permiten comprobar que la forma que toma la deformación en ambas estructuras es similar.

Imagen 2. Deformada de la cubierta de Madera

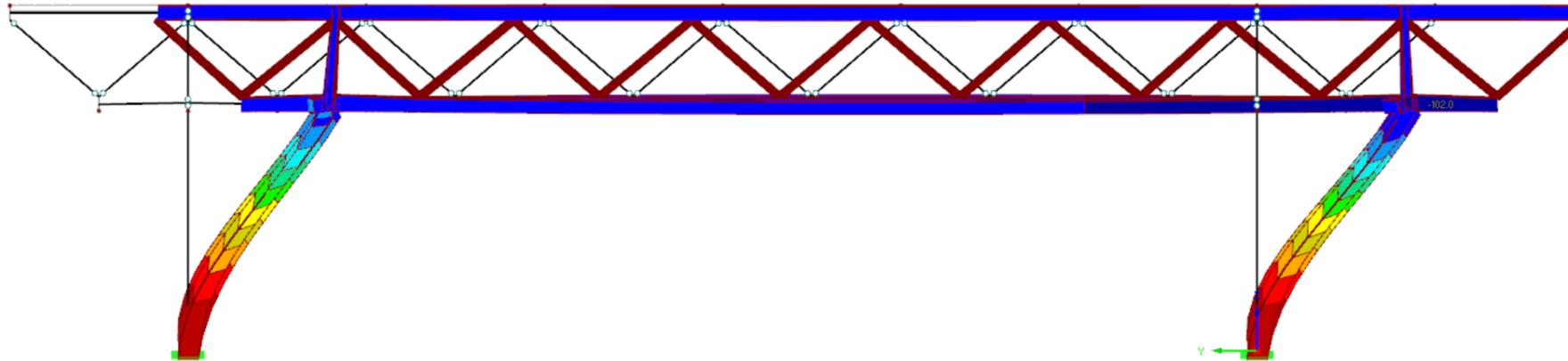
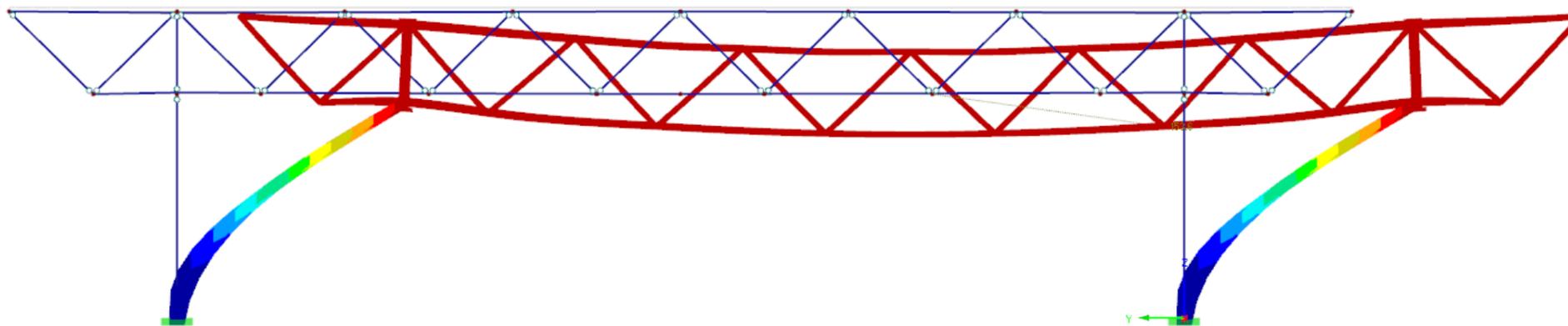


Imagen 3. Deformada de la cubierta de Metálica



Fuente: Elaboración Propia. Resultados del modelo RFEM

En la siguiente tabla se muestran los desplomes de cada tipología según el factor de comportamiento sísmico. Cabe recordar que los límites últimos de deformación sede deben comprobar para un espectro de diseño de $Q=2$. El resto de los valores se han obtenido para tener una visión general más completa del problema.

Cómo se preveía del apartado anterior, al ser menores las fuerzas sísmicas que actúan sobre el forjado de cubierta, las deformaciones son menores. Sin embargo, no hay una relación lineal entre las fuerzas y las deformaciones, por ser la madera un material menos rígido que el metal. Por ello, **los desplomes totales tan solo son un 41% mayores en la cubierta metálica.**

Tabla 3. Desplazamientos máximos por sismo

	Cubierta de Madera	Cubierta Metálica	Variación %
E. Elástico sin reducir	141,3 mm	213,4 mm	51,0%
Espectro Elástico $Q=1$	102 mm	153,6 mm	50,6%
Espectro Elástico $Q=1.5$	73,5 mm	105,9 mm	44,1%
Espectro Elástico $Q=2$	57,8 mm	81,8 mm	41,5%
Espectro Elástico $Q=3$	36,4 mm	52,4 mm	44,0%
Espectro Elástico $Q=4$	28,7 mm	43 mm	49,8%

Fuente: Elaboración Propia. Resultados del modelo RFEM

4.3. Cortante basal y reacciones sobre los apoyos

En este apartado se muestran los resultados del cortante basal y de los esfuerzos máximos sobre los apoyos, que serán transmitidos a la plataforma.

Cabe recordar que estos resultados de los siguientes apartados son los obtenidos de un modelo simplificado con tan solo 3 de los 9 vanos, de los que consta la estructura global. A pesar de ello, los resultados pueden extrapolarse, ya que el modo de vibración asociado a estos cortantes no está condicionado por la rigidez global de la estructura en la dirección longitudinal, tan solo importa la transaccionalidad del pórtico transversal.

4.3.1 Cortante Basal

A continuación, se muestran los resultados del cortante basal de los modelos simplificados, para ambas alternativas. Los valores del cortante basal se han calculado a partir del modo de vibración que más masa moviliza en el sentido Y, es decir, el modo de vibración que desplaza las masas dentro el plano que contiene el pórtico transversal y que salva una luz de 33 metros.

Tabla 4. Cortantes basales

	Cubierta de Madera	Cubierta Metálica	Variación %
<i>E. Elástico sin reducir</i>	2.164,39 kN	2.933,72 kN	35,5%
<i>Espectro Elástico Q=1</i>	1.546,19 kN	1.988,09 kN	28,6%
<i>Espectro Elástico Q=1.5</i>	1.097,75 kN	1.536,15 kN	39,9%
<i>Espectro Elástico Q=2</i>	850,88 kN	1.251,55 kN	47,1%
<i>Espectro Elástico Q=3</i>	514,04 kN	804,54 kN	56,5%
<i>Espectro Elástico Q=4</i>	392,3 kN	633,35 kN	61,4%

Fuente: Elaboración Propia. Resultados del modelo RFEM

Como era de esperar —después de los resultados aproximados de las fuerzas equivalentes, en el apartado 4.1— al movilizarse una masa sustancialmente menor, la reacción de la estructura sobre la plataforma es mucho menor en el caso de la alternativa de madera.

Para un coeficiente de amortiguamiento de Q=2 que es el que se considera para el diseño de ambas estructuras, el cortante basal es un 47% mayor en el caso de la estructura metálica.

Se puede ver que a medida que aumenta el coeficiente de amortiguamiento, —en el caso de que se aplicaran medidas adicionales para resistir el sismo, como disipadores, aisladores de base o mediante la aplicación de rótulas dúctiles— el comportamiento de la estructura de madera mejora incluso más con respecto a la de metal.

Cabe además añadir, que las medidas para disipar un sismo en la estructura de madera, dado su menor peso será más sencillo y barato que para el caso de la estructura metálica.

4.3.2 Reacciones sobre los apoyos

A continuación, se muestran las reacciones máximas sobre los apoyos. Aparecen los cortantes máximos junto con los momentos máximos concomitantes, los cuales coinciden también con los momentos máximos. Los esfuerzos máximos en los apoyos se han obtenido a partir de la combinación de modo de vibración de sismo Y100%/X30%.

Tabla 5. Reacciones Máximas en los apoyos

		Cubierta de Madera	Cubierta Metálica	Variación %
<i>E. Elástico sin reducir</i>	Py máx	282,6 kN	519,36 kN	83,8%
	Mx co	1401,31 kN.m	1661,95 kN.m	18,6%
<i>Espectro Elástico Q=1</i>	Py máx	257,93 kN	431,36 kN	67,2%
	Mx co	1016,38 kN.m	1188,91 kN.m	17,0%
<i>Espectro Elástico Q=1.5</i>	Py máx	245,81 kN	396 kN	61,1%
	Mx co	737,27 kN.m	808 kN.m	9,6%
<i>Espectro Elástico Q=2</i>	Py máx	238,28 kN	373,69 kN	56,8%
	Mx co	583,6 kN.m	612,37 kN.m	4,9%
<i>Espectro Elástico Q=3</i>	Py máx	226,55 kN	338,54 kN	49,4%
	Mx co	373,9 kN.m	362,35 kN.m	-3,1%
<i>Espectro Elástico Q=4</i>	Py máx	222,08 kN	325,07 kN	46,4%
	Mx co	298,1 kN.m	274,17 kN.m	-8,0%

Fuente: Elaboración Propia. Resultados del modelo RFEM

Para un evento de sismo de diseño con un coeficiente de amortiguamiento de Q=2, la estructura metálica debe resistir unas reacciones horizontales en los apoyos de casi un 57% mayores y unos momentos un 5% mayores también. Esto se traduce en la necesidad de mayores refuerzos en la conexión con la plataforma de hormigón.

En este caso, la diferencia entre el comportamiento en los apoyos de la estructura de madera y la estructura metálica es menor cuanto mayor el coeficiente de amortiguamiento; es decir, a medida que se aplican mayores medidas antisísmicas. Sin embargo, para todos los casos la madera sigue comportándose mejor.

Además, hay que tener en cuenta que son los esfuerzos en ese punto de los soportes inclinados de la fachada que condicionan el ancho del perfil en la estructura metálica, mientras que en la estructura de madera el sismo no condiciona el dimensionamiento de ningún perfil de la estructura. El agotamiento máximo en los perfiles que conforman los soportes de la estructura metálica se produce para la combinación accidental para sismo 100%Y/30%X en la base de los soportes. En el APENDICE C. se puede ver el aprovechamiento de los diferentes perfiles, para la envolvente de combinaciones sísmicas para un espectro de diseño Q=2.

5. CONCLUSIONES

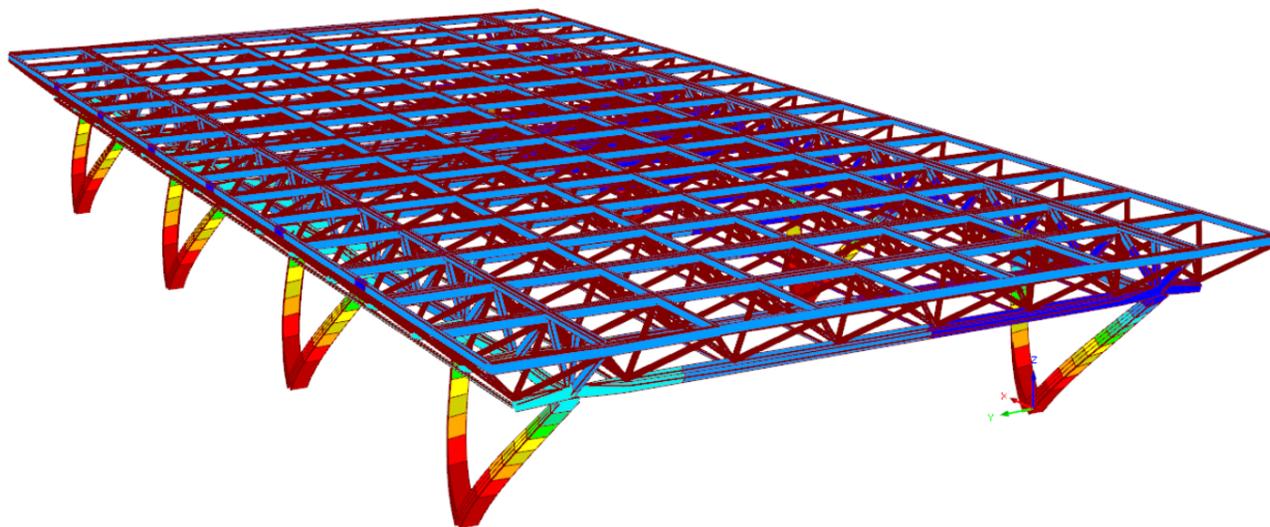
Los resultados de este análisis muestran que la estructura de madera tiene un comportamiento objetivamente mejor, que la estructura metálica, frente al evento de un sismo. Si bien ambas estructuras cuentan con periodos tipo muy parecidos, el mayor peso de los elementos que configuran la malla de la cubierta y que son movilizados durante el sismo penalizan mucho a la estructura metálica.

En evento de un sismo:

- Las fuerzas en las que se traducirán las sacudidas sobre la cubierta son tres veces mayores en el caso de la cubierta metálica.
- Los desplazamientos transversales son del orden de un 40% más que en el caso de la estructura de madera.
- El cortante basal es un 47% mayor en el caso de la cubierta metálica.
- Los esfuerzos en los apoyos de la cubierta son un 56% menores en el caso de la cubierta de madera.
- Las combinaciones accidentales de sismo condicionan el diseño de los soportes inclinados de la estructura metálica, al contrario de la alternativa propuesta de madera.

En conclusión, **la madera laminada como material estructural para estructuras de cubiertas no transitables de grandes luces (33m), presenta un comportamiento estructural mejor que el acero.**

Imagen 4. Modelo Simplificado frente a sismo



Fuente: Elaboración propia a partir de los modelos estructurales de RFEM.

ANEJO Nº5: ESTUDIO COMPARATIVO. ANÁLISIS ECONÓMICO.

TITULACIÓN: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR: David Sanchis García

TUTOR: Carlos Llopis Camps

CURSO: 2020-2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. OBJETO	3
2. RELACIÓN VALORADA DE UNIDADES DE OBRA	3
2.1 Alternativa metálica	3
2.2 Alternativa de madera	5
3. VALORACIÓN	7
3.1 Alternativa metálica	7
3.2. Alternativa de madera	8
4. ANÁLISIS COMPARATIVO	9
5. CONCLUSIONES	9

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de precios	9
----------------------------------------------	----------

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Comparación de precios	9
------------------------------------------------	----------

1. OBJETO

En este apartado se analiza el coste que supone la construcción de cada una de las dos alternativas, la cubierta metálica diseñada por SENER, y la alternativa en madera propuesta por el alumno.

Primero se definen cada una de las unidades de obra, para cada una de las alternativas. Más adelante se han realizado las diferentes mediciones y se ha estimado el precio total de cada una de las propuestas.

Por último, se hace una comparación entre ambos presupuestos y se determina cual es la solución más atractiva desde el punto de vista económico.

Los precios tipo se han obtenido a partir del generador de precios de Cype¹. Esta base de datos de precios para la realización de presupuestos está principalmente preparada para analizar el mercado español y europeo de la construcción. Como nuestras alternativas están en México han debido realizarse ciertos ajustes para que los precios sean representativos de la realidad local.

2. RELACIÓN VALORADA DE UNIDADES DE OBRA

En este apartado se definen cada una de las unidades de obra, tanto para la Alternativa de cubierta metálica, como para alternativa de madera.

2.1 Alternativa metálica

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	PRECIO
EA U01	kg	Acero en vigas. Soportes inclinados.	1,90 €
Acero UNE-EN 10025 S355JR, en vigas formadas por piezas compuestas de perfiles laminados en caliente de las series L, LD, T, redondo, cuadrado, rectangular o pletina, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			
UN EURO con NOVENTA CÉNTIMOS			
EA U02	kg	Acero en vigas. Diagonales cercha de fachada.	1,90 €
Acero UNE-EN 10025 S355JR, en vigas formadas por piezas compuestas de perfiles laminados en caliente de las series L, LD, T, redondo, cuadrado, rectangular o pletina, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			
UN EURO con NOVENTA CÉNTIMOS			

EA U03	kg	Acero en vigas. Cordones inferiores de fachada.	1,74 €
Acero UNE-EN 10025 S355JR, en vigas formadas por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			
UN EURO con SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS			

EA U04	kg	Acero en vigas. Cordones superiores de fachada.	1,74 €
Acero UNE-EN 10025 S355JR, en vigas formadas por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			
UN EURO con SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS			

EA U05	kg	Acero en vigas. Cordones inferiores cubierta.	1,74 €
Acero UNE-EN 10025 S355JR, en vigas formadas por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			
UN EURO con SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS			

EA U06	kg	Acero en vigas. Cordones superiores cubierta.	1,74 €
Acero UNE-EN 10025 S355JR, en vigas formadas por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			
UN EURO con SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS			

EA U07	kg	Acero en vigas. Diagonales de cubierta.	1,90 €
Acero UNE-EN 10025 S355JR, en vigas formadas por piezas compuestas de perfiles laminados en caliente de las series L, LD, T, redondo, cuadrado, rectangular o pletina, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			
UN EURO con NOVENTA CÉNTIMOS			

EA U08	kg	Acero en vigas. Trabes de atado inferiores.	1,74 €
Acero UNE-EN 10025 S355JR, en vigas formadas por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.			
UN EURO con SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS			

¹ Fuente: <http://www.generadordeprecios.info>

EA U09 kg Acero en vigas. Trabes de atado superiores. 1,74 €

Acero UNE-EN 10025 S355JR, en vigas formadas por piezas simples de perfiles laminados en caliente de las series IPN, IPE, HEB, HEA, HEM o UPN, acabado con imprimación antioxidante, con uniones soldadas en obra, a una altura de más de 3 m. El precio incluye las soldaduras, los cortes, los despuntes, las piezas especiales, los casquillos y los elementos auxiliares de montaje.

UN EURO con SETENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

EA U10 Ud Placa de anclaje de acero, con pernos atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca. 482,19 €

Placa de anclaje de acero UNE-EN 10025 S355JR en perfil plano, con taladro central, de 800x800 mm y espesor 30 mm, y montaje sobre 8 pernos de acero corrugado UNE-EN 10080 B 500 S de 25 mm de diámetro y 100 cm de longitud total, embutidos en el hormigón fresco, y atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca una vez endurecido el hormigón del cimiento. Incluso mortero autonivelante expansivo para relleno del espacio resultante entre el hormigón endurecido y la placa y protección anticorrosiva aplicada a las tuercas y extremos de los pernos. El precio incluye los cortes, los despuntes, las pletinas, las piezas especiales y los elementos auxiliares de montaje.

CUATROCIENTOS OCHENTA Y DOS EUROS con DIECINUEVE CÉNTIMOS

EA U11 m² Lámina asfáltica de impermeabilización. 4,64 €

Lámina de betún modificado con elastómero SBS, LBM(SBS)-40-FP, de 3,5 mm de espesor, masa nominal 4 kg/m², con armadura de fieltro de poliéster no tejido de 160 g/m², de superficie no protegida. Según UNE-EN 13707.

CUATRO EUROS con SESENTA Y CUATRO CÉNTIMOS

EA U12 m² Losa mixta con chapa colaborante. 85,37 €

Losa mixta de 50 cm de canto, con chapa colaborante de acero galvanizado con forma grecada, de 1,20 mm de espesor, 44 mm de altura de perfil y 172 mm de intereje, 10 conectores soldados de acero galvanizado, de 19 mm de diámetro y 157 mm de altura y hormigón armado realizado con hormigón C35/38 fabricado en central, y vertido con bomba, volumen total de hormigón 0,062 m³/m²; acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía total de 1 kg/m²; y malla electrosoldada ME 15x15 Ø4 B 500 S UNE-EN 10080; apoyado todo ello sobre estructura metálica. Incluso piezas angulares para remates perimetrales y de voladizos, tornillos para fijación de las chapas, alambre de atar, separadores y agente filmógeno, para el curado de hormigones y morteros. El precio incluye la elaboración de la ferralla (corte, doblado y conformado de elementos) en taller industrial y el montaje en el lugar definitivo de su colocación en obra

OCHENTA Y CINCO EUROS con TREINTAYSETE CÉNTIMOS

T U01 Ud Transporte a obra de cada una de las unidades estructurales 150,00 €

50 kilómetros de recorrido de camión articulado de 3 ejes con una capacidad técnica de carga de 3100kg. 7,100 kg en el eje delantero de y en los ejes traseros 13,000 kg + 13,000 kg = 26,000 kg. Remolcando dos semiremolques con unas dimensiones útiles de 6,55x2,55x2,60m.

CIENTO CINCUENTA EUROS

2.2 Alternativa de madera

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	PRECIO
EM U01	m	Madera laminada. Soportes inclinados.	123,20 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 200x600 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 3.1 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>CIENTO VEITITRÉS EUROS con VEINTE CÉNTIMOS</p>			
EM U02	m	Madera laminada. Diagonales cercha de fachada.	88,30 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 200x400 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 3.1 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>OCHENTA Y OCHO EUROS con TREINTA CÉNTIMOS</p>			
EM U03	m	Madera laminada. Cordones inferiores de fachada.	88,30 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 200x400 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 3.1 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>OCHENTA Y OCHO EUROS con TREINTA CÉNTIMOS</p>			
EM U04	m	Madera laminada. Cordones superiores de fachada.	44,20 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 200x200 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 3.1 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>CUARENTA Y CUATRO EUROS con VEINTE CÉNTIMOS</p>			
EM U05	m	Madera laminada. Cordones inferiores cubierta.	88,30 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 200x400 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 2 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>OCHENTA Y OCHO EUROS con TREINTA CÉNTIMOS</p>			

EM U06	m	Madera laminada. Cordones inferiores cubierta refuerzos.	97,20 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 200x500 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 2 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>NOVENTA Y SIETE EUROS con VEINTE CÉNTIMOS</p>			
EM U07	m	Madera laminada. Cordones superiores cubierta.	90,30 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 200x440 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 2 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>NOVENTA EUROS con TREINTA CÉNTIMOS</p>			
EM U08	m	Madera laminada. Diagonales de cubierta.	51,20 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 220x220 mm de sección, talladas con sección circular, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 2 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>CINCUNTA Y UN EUROS con VEINTE CÉNTIMOS</p>			
EM U09	m	Madera laminada. Diagonales cubierta refuerzo.	66,65 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 240x240 mm de sección, talladas con sección circular, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 2 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>SESENTA Y SEIS CÉNTIMOS con SESENTA Y CINCO CÉNTIMOS</p>			
EM U10	m	Madera laminada. Trabes de atado inferiores.	20,83 €
<p>Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto E. <i>x uro grandis</i> originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 100x200 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 3.1 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.</p> <p>VEINTE EUROS con OCHENTA Y TRES CÉNTIMOS</p>			

EM U11 **m** **Madera laminada. Trabes de atado superiores.** **74,98 €**

Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto *E. x uro grandis* originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 200x350 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 2 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.

SETENTA Y CUATRO EUROS con NOVENTA Y OCHO CÉNTIMOS

EM U12 **Ud** **Placa de anclaje de acero, con pernos atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca.** **482,19 €**

Viga de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto *E. x uro grandis* originario de Australia, plantado a gran escala en México. Con 40 mm de espesor de las láminas, de 200x400 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 3.1 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP2 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado.

CUATROCIENTOS OCHENTA Y DOS EUROS con DIECINUEVE CÉNTIMOS

EM U13 **m²** **Forjado de viguetas y tablero estructural de madera.** **125,29 €**

Forjado tradicional con un intereje de 60 cm, compuesto por viguetas de madera laminada encolada homogénea de Euclaipto *E. x uro grandis* procedente Australia (plantado en México), de 40 mm de espesor de las láminas, de 180x200 mm de sección, clase resistente GL-24h y clase E1 en emisión de formaldehído según UNE-EN 14080; para clase de uso 2 según UNE-EN 335, con protección frente a agentes bióticos que se corresponde con la clase de penetración NP1 según UNE-EN 351-1, con acabado cepillado colocadas mediante apoyo sobre elemento estructural; tablero estructural de madera, de 25 mm de espesor, fijado con clavos, de acero galvanizado de alta adherencia; membrana impermeabilizante bicapa de 5 mm de espesor, formada por una lámina superior bituminosa fonoabsorbente y una lámina inferior de fieltro de poliéster, sellada con cinta autoadhesiva, de polietileno, con adhesivo acrílico sin disolventes, armadura de polietileno y película de separación de papel siliconado, de 0,34 mm de espesor y 100 mm de anchura, desolidarización con banda perimetral autoadhesiva desolidarizante, de espuma de polietileno de celdas cerradas, de 4 mm de espesor y de 150 mm de anchura, de color gris, y malla electrosoldada ME 10x10 Ø 5-5 B 500 T 6x2,20 UNE-EN 10080, en capa de compresión de 4 cm de espesor de hormigón ligero C35/38, densidad entre 1200 y 1500 kg/m³, (cantidad mínima de cemento 275 kg/m³), fabricado en central, y vertido con bomba; apuntalamiento y desapuntalamiento de las viguetas. Incluso conectores para forjado de madera y hormigón, alambre de atar, separadores, elementos de atado de viguetas y zunchos perimetrales de planta y huecos.

CIENTO CINCUENTA Y CINCO EUROS con VEINTINUEVE CÉNTIMOS

T U01 **Ud** **Transporte a obra de cada una de las unidades estructurales** **150,00 €**

50 kilómetros de recorrido de camión articulado de 3 ejes con una capacidad técnica de carga de 3100kg. 7,100 kg en el eje delantero de y en los ejes traseros 13,000 kg + 13,000 kg = 26,000 kg. Remolcando dos semi-remolques con unas dimensiones útiles de 6,55x2,55x2,60m.

CIENTO CINCUENTA EUROS

3. VALORACIÓN

En el siguiente apartado se recogen las mediciones y se cálculo el precio total de cada unidad de obra. Se recogen primero las unidades de la propuesta de con estructura metálica y después la alternativa metálica.

3.1 Alternativa metálica

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN	PRECIO UNIT.
EA U01	kg	Acero en vigas. Soportes inclinados.	18929,6	1,90 €
			Total:	35.966,24 €
EA U02	kg	Acero en vigas. Diagonales cercha de fachada.	6543,96	1,90 €
			Total:	12.433,52 €
EA U03	kg	Acero en vigas. Cordones inferiores de fachada.	89193,2	1,74 €
			Total:	155.196,17 €
EA U04	kg	Acero en vigas. Cordones superiores de fachada.	91684,9	1,74 €
			Total:	159.531,73 €
EA U05	kg	Acero en vigas. Cordones inferiores cubierta.	263990	1,74 €
			Total:	459.342,60 €
EA U06	kg	Acero en vigas. Cordones superiores cubierta.	309439	1,74 €
			Total:	538.423,86 €
EA U07	kg	Acero en vigas. Diagonales de cubierta.	266146	1,90 €
			Total:	505.677,40 €

EA U08	kg	Acero en vigas. Trabes de atado inferiores.	117400	1,74 €
			Total:	204.276,00 €
EA U09	kg	Acero en vigas. Trabes de atado superiores.	105594	1,74 €
			Total:	183.733,56 €
EA U10	Ud	Placa de anclaje de acero, con pernos atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca.	20	482,19 €
			Total:	9.643,80 €
EA U11	m ²	Lámina asfáltica de impermeabilización.	22140,6	4,64 €
			Total:	102.732,38 €
EA U12	m ²	Losa mixta con chapa colaborante.	22140,6	85,37 €
			Total:	1.890.143,02 €
T U01	Ud	Transporte a obra de cada una de las unidades estructurales	48	165,00 €
			<i>Acero en vigas. Soportes inclinados.</i>	<i>1 165,00 €</i>
			<i>Acero en vigas. Diagonales cercha de fachada.</i>	<i>1 165,00 €</i>
			<i>Acero en vigas. Cordones inferiores de fachada.</i>	<i>3 495,00 €</i>
			<i>Acero en vigas. Cordones superiores de fachada.</i>	<i>3 495,00 €</i>
			<i>Acero en vigas. Cordones inferiores cubierta.</i>	<i>8 1.320,00 €</i>
			<i>Acero en vigas. Cordones superiores cubierta.</i>	<i>10 1.650,00 €</i>
			<i>Acero en vigas. Diagonales de cubierta.</i>	<i>9 1.485,00 €</i>
			<i>Acero en vigas. Trabes de atado inferiores.</i>	<i>4 660,00 €</i>
			<i>Acero en vigas. Trabes de atado superiores.</i>	<i>4 660,00 €</i>
			<i>Planchas de placa grecada de acero forjado</i>	<i>5 825,00 €</i>
			Total:	7.920,00 €
			TOTAL:	4.265.020,28 €

3.2. Alternativa de madera

CÓDIGO	UD.	DESCRIPCIÓN	MEDICIÓN	PRECIO UNIT.					
EM U01	m	Madera laminada. Soportes inclinados.	1170,951	123,20 €	EM U10	m	Madera laminada. Trabes de atado inferiores.	1934,01	20,83 €
		Total:		144.261,16 €				Total:	40.285,43 €
EM U02	m	Madera laminada. Diagonales cercha de fachada.	796,295	88,30 €	EM U11	m	Madera laminada. Trabes de atado superiores.	1736,01	74,98 €
		Total:		70.312,85 €				Total:	130.166,03 €
EM U03	m	Madera laminada. Cordones inferiores de fachada.	967,004	88,30 €	EM U12	Ud	Placa de anclaje de acero, con pernos atornillados con arandelas, tuerca y contratuerca.	20	482,19 €
		Total:		85.386,45 €				Total:	9.643,80 €
EM U04	m	Madera laminada. Cordones superiores de fachada.	992,004	44,20 €	EM U13	m ²	Forjado de viguetas y tablero estructural de madera.	21853,3	135,29 €
		Total:		43.846,58 €				Total:	2.737.999,96 €
EM U05	m	Madera laminada. Cordones inferiores cubierta.	2145	88,30 €				TOTAL:	4.172.658,86 €
		Total:		189.403,50 €					
EM U06	m	Madera laminada. Cordones inferiores cubierta refuerzos.	858,142	97,20 €					
		Total:		83.411,40 €					
EM U07	m	Madera laminada. Cordones superiores cubierta.	3520	90,30 €					
		Total:		317.856,00 €					
EM U08	m	Madera laminada. Diagonales de cubierta.	5271,38	51,20 €					
		Total:		269.894,66 €					
EM U09	m	Madera laminada. Diagonales cubierta refuerzo.	753,054	66,65 €					
		Total:		50.191,05 €					

4. ANÁLISIS COMPARATIVO

A continuación, se muestran los resultados de la valoración de ambas estructuras, con ciertas consideraciones.

En este análisis no se ha tenido en cuenta la **puesta en obra en altura**. En otros casos no sería necesario considerarlo, pero al tratarse de una estación ejecutada sobre una plataforma a 14 metros de altura, la necesidad de maquinaria para elevar las piezas será necesaria. En el caso de los elementos metálicos al tratarse de piezas más densas, será necesaria la contratación de grúas con una capacidad portante mayor. En este caso el precio podría variar en hasta un 5% más del resultado.

Tabla 1. Comparación de precios

	Cubierta de Metal	Cubierta de Madera	Δ%
Transporte a Obra	7.920,00 €	3.465,00 €	-56%
Elementos de Fachada	372.771,46 €	353.450,84 €	-5%
Elementos de Malla Espacial	1.891.453,42 €	1.081.208,07 €	-43%
Elementos Forjado	1.992.875,41 €	2.956.532,96 €	48%
TOTAL:	4.265.020,28 €	4.394.656,86 €	3%

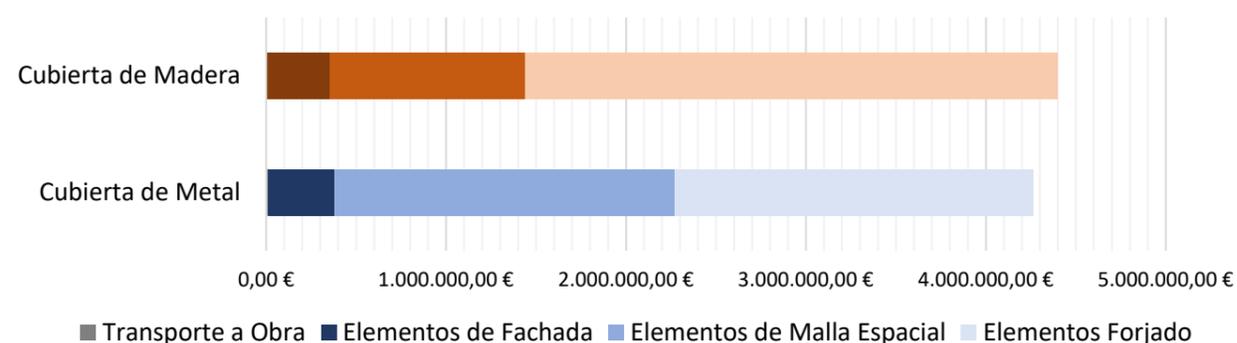
Fuente: Elaboración propia

En este análisis económico se han tenido en cuenta los **costes de transporte** de cada unidad de obra. En el caso de las piezas de madera el número de camiones viene condicionado por el volumen que ocupan las piezas, mientras que, en el caso de los elementos de la estructura metálica, vienen condicionados por peso.

Para los elementos de fachada, se puede ver que apenas difieren el precio de un material estructural a otro. Por otro lado, los elementos estructurales que conforman la malla espacial son mucho más económicos en el caso de la madera laminada, con una reducción en el coste de hasta un 40% más. Sin embargo, para el caso de los elementos que cierran la cubierta, el forjado mixto con chapa colaborante metálica supone un ahorro significativo respecto al forjado con viguetas de madera.

En definitiva, el coste de los materiales y puesta en obra de ambas alternativas es igual. El precio final de la obra variará en función de la oferta comercial de los distribuidores en el momento de la ejecución.

Gráfica 1: Comparación de precios



Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES

En términos económicos, en lo que se refiere al coste de los materiales ambas estructuras son igualmente competitivas. La solución óptima, en términos de precio, vendrá determinada por decisiones en el diseño a un nivel de arquitectura o por cuestiones comerciales — por la posible variación en el precio de una unidad de obra en un determinado momento—.

En una primera instancia la elección vendrá condicionada por las **decisiones del arquitecto**, a la hora de considerar su apariencia estética:

1. La decisión de revestir la estructura con una capa de pintura

Si el arquitecto tiene la intención o no de resistir el material con una capa de pintura convendrá considerar un material u otro. La belleza estética de la madera reside en dejar los elementos sin revestir. En el caso de las estructuras metálicas, es una práctica habitual colocar una imprimación y una capa de pintura, de algún color generalmente el blanco.

Si el arquitecto decide no revestir la estructura y considera que el acabado de la madera está en armonía con el conjunto global de elementos del proyecto más allá de la estructura, el empleo de madera será una mejor decisión, por ahorrar los costes adicionales de la pintura. Si, por el contrario, el arquitecto decide pintar, deberán considerarse otros factores en cuenta.

2. La decisión de considerar la esbeltez estética de los elementos estructurales.

A pesar de presentar un peso mucho menor, la estructura de madera por sus menores características mecánicas presenta un volumen mucho mayor. La alternativa de madera con perfiles de mayor tamaño presenta una apariencia más masiva y menos diáfana. Es posible que el arquitecto busque en la estructura una sensación de mayor ligereza descartando la alternativa de madera.

En segundo lugar, será pertinente considerar **aspectos comerciales** de los materiales. Como ambas alternativas presentan presupuestos tan ajustados, una ligera variación en el precio en alguna unidad de obra, podría decidir la balanza en el momento de la toma de decisión.

En conclusión, se van a considerar que ambas alternativas estructurales, de madera y metálica, son igualmente competitivas en términos de precio a efectos de este trabajo. Las variaciones del precio de mercado de los materiales y las decisiones arquitectónicas quedan fuera del alcance del ingeniero en esta fase preliminar de diseño.

Si se buscara una solución óptima, valdría la pena considerar un sistema mixto de madera y acero. Cada material se comporta mejor en ciertas situaciones. En este caso, se ha visto que la madera supone un ahorro significativo para los elementos que configuran la malla; y que, el forjado mixto convencional de madera incrementa mucho el coste de la estructura. Por eso, una buena solución — que valdría la pena analizar en posteriores análisis — sería aquella que empleara elementos de madera laminada para las fachadas laterales y la malla espacial, y que, para cerrar la cubierta, empleara un forjado mixto colaborante con chapa grecada de acero.

ANEJO Nº6: ESTUDIO COMPARATIVO. IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO.

TITULACIÓN: Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR: David Sanchis García

TUTOR: Carlos Llopis Camps

CURSO: 2020-2021

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO	3
2. MÉTODO EMPLEADO.....	3
3. CONSIDERACIONES DE CÁLCULO.....	4
3.1 Fase de producción del material.....	4
3.2. Transporte de material al emplazamiento	4
3.3. Fase de ejecución y colocación	4
3.4. Residuos generados en obra.....	5
3.5. Mantenimiento de uso y mantenimiento de la Infraestructura.....	5
3.6. Fin de vida de la estructura: desmantelamiento de la estructura.....	5
4. RELACIÓN DE TONELADAS DE CO₂	6
4.1 Alternativa metálica.....	6
4.2 Alternativa de madera	8
5. RESUMEN DE RESULTADOS.....	10
5.1. Alternativa de madera	10
5.2. Alternativa metálica.....	10
6. CONCLUSIONES	11

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1. Construcción Sostenible	3
------------------------------------------------	----------

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fase de producción del material	4
Tabla 2. Pesos fase de residuos generados.....	5

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Impacto de la huella de carbono a lo largo del ciclo de vida de la estructura	3
Gráfica 2. Impacto de la huella de carbono de la alternativa de madera	10
Gráfica 3. Impacto de la huella de carbono de la alternativa metálica	10
Gráfica 4: Comparación del impacto de la huella de carbono.....	11

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO

La construcción y uso de las edificaciones es actualmente responsable de la emisión de cerca del 40% de todas las emisiones de CO₂ relativas a energía. Bien por el coste de fabricación y ejecución de la obra, como por la falta de eficiencia en términos energéticos de las construcciones actuales, que exigen una mayor demanda de recursos energéticos para dar un uso.

Si se pretende alcanzar el objetivo europeo de emisiones cero antes de 2050 es preciso empezar a medir el impacto de los edificios sobre el medioambiente. Como bien dijo el físico y matemático británico William Thomson Kelvin “Lo que no se mide no se puede mejorar”. Por eso, se ha recurrido en este apartado a la guía *How to Calculate Embodied Carbon*.

La guía ofrece una serie de principios para calcular de manera sistemática el impacto de la huella de carbono para cada una de las fases de diseño de un proyecto. El propósito de esta es el de ofrecer una herramienta de referencia para obtener datos comparables del impacto de la construcción sobre el medioambiente. Con ella se pretende contribuir a alcanzar el objetivo europeo de emisiones cero antes de 2050, calcular el carbono emitido de todos los proyectos de construcción, reconocer la emisión de carbono como un elemento más para tener en cuenta contra el cambio climático, evaluar y condicionar las decisiones de diseño de los proyectos según criterios de sostenibilidad, y, por último, crear una base de datos abierta para toda la comunidad de ingenieros que permita la evaluación fácil de proyectos.

El objeto de este apartado por lo tanto es realizar una estimación de los Kg de CO₂ que serán emitidos durante las distintas fases de construcción uso y demolición de cada una de las propuestas. De esta manera se podrá determinar de manera objetiva y cuantificable cuál de las dos alternativas y por cuanto tiene un impacto menor sobre la huella de carbono del planeta.



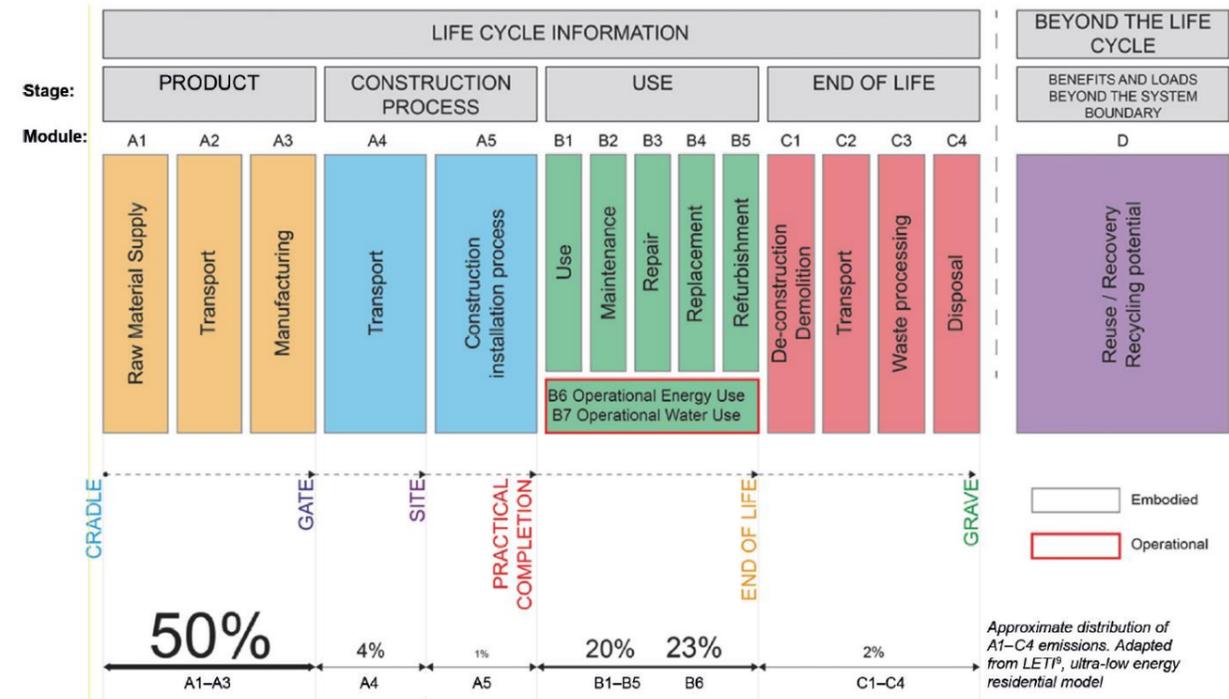
Fuente: www.circuloverde.com.mx

2. MÉTODO EMPLEADO

El criterio empleado para comparar el impacto medioambiental entre la estructural de referencia metálica y la propuesta alternativa en madera serán los kg de dióxido de carbono emitido a la atmósfera. Para su determinación de forma objetiva se empleará el método descrito en la guía *How to Calculate Embodied Carbon* publicada por el organismo profesional de ingeniería estructural *The Institution of Structural Engineers*.

El método descrito cuantifica las toneladas de CO₂ siguiendo el esquema del ciclo de vida de una construcción.

Gráfica 1. Impacto de la huella de carbono a lo largo del ciclo de vida de la estructura



Fuente: *How to Calculate Embodied Carbon*. Pág.8

El método describe 4 fases diferenciadas en el ciclo de vida de un proyecto:

- **Fase de producción del material (A1-A3):** En esta fase se contabiliza los kg de dióxido de carbono que emite la extracción, procesado, manufactura y transporte de las materias primas para transformarlas en los diferentes materiales y productos que serán ejecutados y colocados en obra. Por lo tanto, se contabiliza la emisión de dióxido de carbono hasta que es suministrado en obra.
- **Fase de construcción (A4 y A5):** En este estadio se contabiliza el dióxido de carbono emitido durante el transporte en obra de los materiales, el dióxido de carbono asociado a la energía empleada por parte de maquinaria y otros componentes —para la colocación de las diferentes unidades de obra— y también el dióxido de carbono procedente de materiales empleados y agotados durante el proceso constructivo.
- **Fase de uso (B1-B7):** En esta fase se cuantifica el CO₂ emitido debido al uso, mantenimiento y reparación del edificio y sus instalaciones, entre las que se incluye la energía y el agua que requiere.
- **Fin de vida útil de la construcción (C1-C4):** En esta última fase se cuantifica el dióxido de carbono que se emite por la demolición o desmantelamiento de la infraestructura, incluyendo el transporte de materiales al vertedero y posible reciclado posterior de los materiales.

3. CONSIDERACIONES DE CÁLCULO

Para valorar el impacto de la huella de carbono de cada alternativa estructural se va a emplear como indicador los Kg de CO₂

3.1 Fase de producción del material

Para calcular las toneladas de CO₂ emitidas durante la fase de producción de material, se van a emplear los valores incluidos en la tabla 2.1 de la misma guía, con ciertas adaptaciones. Al tratarse de una guía británica y seguir sus estándares, se ha buscado la nomenclatura homóloga que se adapta a los elementos que conforman nuestra estructura.

Las cantidades de dióxido de carbono asociadas a los diferentes materiales empleados en las dos alternativas son como siguen:

Tabla 1. Fase de producción del material

Nivel de Material A1-A3		
Hormigón in situ C35/38	0,12	kgCO ₂ e/kg
Barras de acero corrugado para armaduras	1,99	kgCO ₂ e/kg
Perfiles de acero normalizados abiertos	2,45	kgCO ₂ e/kg
Perfiles de acero normalizados huecos	2,5	kgCO ₂ e/kg
Chapas de acero laminado	2,46	kgCO ₂ e/kg
Madera laminada	2,152	kgCO ₂ e/kg
Dióxido de carbono secuestrado en piezas de madera	-1,64	kgCO ₂ e/kg

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar sin embargo el apartado del **carbono secuestrado**. Los árboles de los que procede la madera para las vigas tienen la capacidad de absorber el carbono presente en la atmósfera e incorporarlo a través de la fotosíntesis a su estructura. Este proceso de absorción se conoce como secuestro de carbono. El carbono secuestrado permanece en la pieza de madera hasta que esta se descompone o se incinera.

El carbono secuestrado por cada elemento de madera se ha calculado tal y como describe la guía en el apartado 2.2.2.1.5. El dióxido de carbono se obtiene como:

$$S_{CO_2} = \frac{44}{12} \times cf \times \frac{1}{1 + \frac{\omega}{100}} = \frac{44}{12} \times 0,5 \times \frac{1}{1 + \frac{12}{100}} = 1,64 \text{ kgCO}_2\text{e/kg}$$

Donde:

- S_{CO_2} carbono secuestrado de la atmosfera por kg de madera estructural producida.
- cf fracción de carbono de biomasa en la madera, puede considerarse 0,5 en caso de no disponer de ningún valor mejor.
- ω humedad relativa, la cual puede asumirse del 12% si no se tienen más datos.

3.2. Transporte de material al emplazamiento

Para calcular los inputs para el cálculo del impacto del transporte sobre el medioambiente de las unidades estructurales al emplazamiento, se ha seguido la fórmula descrita en el apartado 2.2.3.

$$ECF_{A4,i} = \sum_{mode} TD_{mode} \times TEF_{mode}$$

Donde:

$ECF_{A4,i}$ Es el valor en kgCO₂/kg emitido transporte al emplazamiento del elemento constructivo en cuestión

TD_{mode} Es la distancia que debe recorrer cada medio de transporte.

TEF_{mode} Es el factor de ponderación de emisiones de CO₂ por cada modo de transporte considerado.

Se va a considerar para ambas alternativas que los elementos lineales estructurales serán transportados por carretera. Las vigas se cargarán en camiones rígidos o articulados para transportarlos desde la fábrica, o punto en el que están acopiados por el distribuidor, hasta la obra.

Se han considerado **distancias diferentes** para los elementos de madera y los metálicos. Al ser la madera laminada un material relativamente nuevo, y dado el gran uso extendido del metal en la construcción, va a ser más fácil encontrar un distribuidor de vigas metálicas cerca del emplazamiento que de elementos de madera. La distancia que deberá recorrer el transportista para elementos de metal será de 60 km, mientras que para los elementos de madera será 100km. El recorrido que se tomará para el suministro de camiones hormigonera será de 30km.

Los factores de ponderación de cada modo de carga serán los que aparecen en la tabla 2.4: *Transport emissions factor* de la guía. Como los camiones que transportan elementos metálicos o los camiones hormigonera alcanzan su máxima capacidad por peso, emplearemos el factor de ponderación para 100% de carga. Para el caso de los elementos de madera se empleará el factor de 100% de carga.

$$TEF_{carretera\ 100\% \text{ carga}} = 0.1065 \frac{gCO_2e}{kg} / km$$

$$TEF_{carretera\ 50\% \text{ carga}} = 0.07524 \frac{gCO_2e}{kg} / km$$

3.3. Fase de ejecución y colocación

En esta fase se estiman las posibles emisiones generadas por la propia actividad de construcción, lo cual incluye el consumo de electricidad, o combustibles fósiles, para hacer funcionar toda la maquinaria necesaria.

Es fases tempranas de diseño, al no poderse monitorizar el consumo, la guía ofrece valores estimados. Para el caso de elementos de superestructura y subestructura, que es el caso que nos atañe — ya que nuestra cubierta apenas precisa de instalaciones auxiliares de MEP — La relación de las emisiones relacionadas consumo energético es proporcional al coste final de la obra. La guía propone una relación de 700kgCO₂ por cada 115.000€ (o £100.000).

$$EC_{A5a,i} = CAEF \times \frac{PC}{115.000}$$

3.4. Residuos generados en obra

También se han tenido en cuenta los residuos generados en obra y el impacto que estos tienen sobre la huella de carbono del edificio. El proceso de cálculo que describe la guía sigue la siguiente fórmula.

$$ECF_{A5W,i} = WF_i \times (ECF_{A13,i} + ECF_{C2,i} + ECF_{C34,i})$$

Donde:

$ECF_{A5W,i}$ Residuos generados en obra por cada material.

WF_i Factor asociado a los desechos generados en obra. $WF_i = \frac{1}{1-WR_i} - 1$

WR_i Cuota desperdicios por material ejecutado en obra. Cada material tiene asociado un porcentaje tal y como sigue en la tabla.

$ECF_{A13,i}$ Emisiones de dióxido de carbono generadas durante la fase de producción del material, incluyendo el carbono secuestrado en cualquier elemento de madera empleado.

$ECF_{A4,i}$ Emisiones de dióxido de carbono generadas durante la fase de transporte a obra del material

$ECF_{C2,i}$ Emisiones de dióxido de carbono generadas por transporte de los residuos a la planta de reciclado más cercana, se considerará un transporte de 50 km.

$ECF_{C34,i}$ Emisiones de dióxido de carbono generadas por otros desechos de obra.

Tabla 2. Pesos fase de residuos generados

Residuos de obra	WR	WF
Hormigón in situ C35/38	5%	0,053
Barras de acero corrugado para armaduras	5%	0,053
Perfiles de acero normalizados abiertos	1%	0,01
Perfiles de acero normalizados huecos	1%	0,01
Chapas de acero laminado	1%	0,01
Madera laminada	1%	0,01

Fuente: Elaboración propia

El componente $ECF_{C34,i}$ se refiere en nuestro caso a las emisiones producidas por aquellos marcos de encofrado de la losa de hormigón y la posible disposición y retirada de puntales necesarios para ejecutar la obra. También aquellas redes de seguridad y otros sistemas temporales como andamios, que sean necesarios durante el proceso constructivo de la obra. Al tener estos un peso despreciable en el cómputo total y cómo van a ser los mismos tanto para la construcción de la estructura metálica como la estructura de madera, se despreciarán en el cálculo.

3.5. Mantenimiento de uso y mantenimiento de la Infraestructura

En este módulo se tiene en cuenta todo el consumo de recursos que tiene la estructura durante su vida útil. Desde los costes de mantenimiento y reparación hasta el consumo de electricidad, gas o agua que requiere la estructura para dar servicio a los usuarios.

- El **módulo B1, sobre el uso habitual de la estructura**, es generalmente insignificante para materiales estructurales.
- Para los **módulos B2, de mantenimiento, y B3 de reparaciones**, existe muy poca información
- El módulo B5, de remodelación, no tiene sentido en este caso pues se espera que la estructura mantendrá el uso durante toda su vida útil.
- Los **módulos B6 y B7** son los relativos al **gasto habitual de electricidad, agua y gas** en una estructura de edificación. Sin embargo, en nuestro caso, estamos analizando la cubierta estructural con independencia de la infraestructura operativa de ferrocarril, por lo que los usos de electricidad y uso de la estación no se incluirán en este análisis.

Por todo ello, en nuestro caso vamos a considerar que, tanto para la alternativa de referencia metálica, como para la alternativa de madera el peso de las emisiones de carbono asociadas a estos módulos es 0.

3.6. Fin de vida de la estructura: desmantelamiento de la estructura

Esta fase apenas supone un incremento de las emisiones de CO2 a la atmósfera, a no ser que se trate de una estructura de madera. Por ello por lo que se analizará en detalle cada uno de los pasos de desmantelamiento de ambas estructuras.

- El **módulo C1**, hace referencia a los **m2 de estructura que deben ser desmantelados**. En nuestro caso se tomará la superficie total del forjado, así como de las dos fachadas, contando desde el entronque, hasta la cara superior de la cubierta. La relación que establece la guía en el apartado 2.2.5.2.1 es:

$$EC_{C1} = 3.4 \frac{kgCO_2e}{m^2}$$

- Para considerar el **módulo C2, de transporte de desechos a la planta de reciclado** se ha seguido el mismo criterio que en el apartado A5w. Se considera que la planta de reciclado se encuentra a 50 km.
- Los **módulos C3 y C4** cuantifican las emisiones de CO2 producidas por el procesado y desecho de los subproductos de la construcción una vez desmantelada. Si todos los elementos de esta construcción fueran reutilizados este componente sería 0. Sin embargo, vamos a considerar que los elementos han agotado su vida útil y su estado no les permite ser utilizados en obras posteriores.

Para los elementos de acero y hormigón se ha empleado un coeficiente estándar. Para el caso de la madera, se considera que el proveedor de madera cuenta con las pertinentes certificaciones forestales PEFC o análogas —es decir, que la madera proviene de un bosque gestionado de forma sostenible—.

$$ECF_{C34,i \text{ Acero y Hormigón}} = 0.013 \frac{kgCO_2e}{kg}$$

$$ECF_{C34,i \text{ Madera con PEFC}} = 1.77 \frac{kgCO_2e}{kg}$$

4. RELACIÓN DE TONELADAS DE CO₂

A continuación, se muestran la valoración de kilogramos de CO₂ emitidos a la atmósfera por cada una de las estructuras, siguiendo los criterios marcados en el apartado anterior.

4.1 Alternativa metálica

Emisiones de CO ₂ (A1-A3)	[kgCO ₂ /kg]	[kg]	[kgCO ₂]
Perfiles de acero normalizados abiertos	2,45	977301,1	2394387,7 kgCO₂
<i>Cordones superiores cercha de fachada</i>		91684,9	224628,0 kgCO ₂
<i>Cordones inferiores cercha de fachada</i>		89193,2	218523,3 kgCO ₂
<i>Cordones superiores malla espacial</i>		309439,0	758125,6 kgCO ₂
<i>Cordones inferiores malla espacial</i>		263990,0	646775,5 kgCO ₂
<i>Trabes de atado superiores malla espacial</i>		105594,0	258705,3 kgCO ₂
<i>Trabes de atado inferiores malla espacial</i>		117400,0	287630,0 kgCO ₂
Perfiles de acero normalizados huecos	2,5	291619,6	729048,9 kgCO₂
<i>Soportes Inclinaados de sección rectangular</i>		18929,6	47324,0 kgCO ₂
<i>Diagonales cuadradas de cercha de fachada</i>		6544,0	16359,9 kgCO ₂
<i>Diagonales tubulares de la malla espacial</i>		266146,0	665365,0 kgCO ₂
Chapas grecadas de acero laminado	2,46	154984,2	381261,1 kgCO₂
<i>Chapa de acero galvanizado de 0,75 mm de espesor</i>		154984,2	381261,1 kgCO ₂
Barras de acero corrugado armaduras	1,99	69890,6	137277,6 kgCO₂
<i>Malla electrosoldada forjado mixto colaborante</i>		68983,7	137277,6 kgCO ₂
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,12	38746050,0	4589193,0 kgCO₂
<i>Hormigón aligerado para forjado mixto colaborante</i>		38243275,0	4589193,0 kgCO ₂
		TOTAL (A1-A3) =	8231168,3 kgCO₂

Emisiones de CO ₂ (A4)	[gCO ₂ /kg/km]	[km]	[kg]	[kgCO ₂]
Perfiles de acero normalizados abiertos	0,1065	60	977301,1	6245,0 kgCO₂
<i>Cordones superiores cercha de fachada</i>		60	91684,9	585,9 kgCO ₂
<i>Cordones inferiores cercha de fachada</i>		60	89193,2	569,9 kgCO ₂
<i>Cordones superiores malla espacial</i>		60	309439,0	1977,3 kgCO ₂
<i>Cordones inferiores malla espacial</i>		60	263990,0	1686,9 kgCO ₂
<i>Trabes de atado superiores malla espacial</i>		60	105594,0	674,7 kgCO ₂
<i>Trabes de atado inferiores malla espacial</i>		60	117400,0	750,2 kgCO ₂
Perfiles de acero normalizados huecos	0,1065	60	291619,6	1863,4 kgCO₂
<i>Soportes Inclinaados de sección rectangular</i>		60	18929,6	121,0 kgCO ₂
<i>Diagonales cuadradas de cercha de fachada</i>		60	6544,0	41,8 kgCO ₂
<i>Diagonales tubulares de la malla espacial</i>		60	266146,0	1700,7 kgCO ₂
Chapas grecadas de acero laminado	0,1065	60	154984,2	990,3 kgCO₂
<i>Chapa de acero galvanizado de 0,75 mm de espesor</i>		60	154984,2	990,3 kgCO ₂
Barras de acero corrugado armaduras	0,1065	60	68983,7	440,8 kgCO₂
<i>Malla electrosoldada forjado mixto colaborante</i>		60	68983,7	440,8 kgCO ₂
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,1065	50	38243275,0	203645,4 kgCO₂
<i>Hormigón aligerado para forjado mixto colaborante</i>		50	38243275,0	203645,4 kgCO ₂
			TOTAL (A4) =	213185,0 kgCO₂

Emisiones de CO ₂ (A5a)	[CAEF/115.000]	[Valor Total PC €]	[kgCO ₂]	
Presupuesto de la obra	0,00608	4257100,3	25912,8 kgCO₂	
<i>Soportes inclinados</i>		35966,2	218,9 kgCO ₂	
<i>Diagonales cercha de fachada</i>		12433,5	75,7 kgCO ₂	
<i>Cordones inferiores de fachada</i>		155196,2	944,7 kgCO ₂	
<i>Cordones superiores de fachada</i>		159531,7	971,1 kgCO ₂	
<i>Cordones inferiores cubierta</i>		459342,6	2796,0 kgCO ₂	
<i>Cordones superiores cubierta</i>		538423,9	3277,4 kgCO ₂	
<i>Diagonales de cubierta</i>		505677,4	3078,0 kgCO ₂	
<i>Trabes de atado inferiores</i>		204276,0	1243,4 kgCO ₂	
<i>Trabes de atado superiores</i>		183733,6	1118,4 kgCO ₂	
<i>Placas de Anclaje</i>		9643,8	58,7 kgCO ₂	
<i>Lámina asfáltica de impermeabilización.</i>		102732,4	625,3 kgCO ₂	
<i>Losa mixta con chapa colaborante.</i>		1890143,0	11505,2 kgCO ₂	
			TOTAL (A5a) =	25912,8 kgCO₂

Emisiones de CO2 (A5w)	[WF]	[kgCO2 A1-A3]	[kgCO2 A4]	[kgCO2 C2]	[kgCO2]
Perfiles de acero normalizados abiertos	0,01	2394387,7	6245,0	5204,1	24058,4 kgCO2
Cordones superiores cercha de fachada		224628,0	585,9	488,2	2257,0 kgCO2
Cordones inferiores cercha de fachada		218523,3	569,9	475,0	2195,7 kgCO2
Cordones superiores malla espacial		758125,6	1977,3	1647,8	7617,5 kgCO2
Cordones inferiores malla espacial		646775,5	1686,9	1405,7	6498,7 kgCO2
Trabes de atado superiores malla espacial		258705,3	674,7	562,3	2599,4 kgCO2
Trabes de atado inferiores malla espacial		287630,0	750,2	625,2	2890,1 kgCO2
Perfiles de acero normalizados huecos	0,01	729048,9	1863,4	1552,9	7324,7 kgCO2
Soportes de sección rectangular		47324,0	121,0	100,8	475,5 kgCO2
Diagonales de cercha de fachada		16359,9	41,8	34,8	164,4 kgCO2
Diagonales de la malla espacial		665365,0	1700,7	1417,2	6684,8 kgCO2
Chapas grecadas de acero laminado	0,01	381261,1	990,3	825,3	3830,8 kgCO2
Chapa de acero galvanizado		381261,1	990,3	825,3	3830,8 kgCO2
Barras de acero corrugado armaduras	0,01	137277,6	440,8	367,3	1380,9 kgCO2
Armaduras malla electrosoldada		137277,6	440,8	367,3	1380,9 kgCO2
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,01	4589193,0	203645,4	203645,4	49964,8 kgCO2
Hormigón capa de compresión		4589193,0	203645,4	203645,4	49964,8 kgCO2
TOTAL (A5w) = 86559,5 kgCO2					

Emisiones de CO2 (C1)	[kgCO2/m2 GIA]	[GIA m2]	[kgCO2]
Superficie Interna de obra desmantelada	3,4	27046,6	91958,3 kgCO2
Forjado mixto colaborante		22140,6	75278,04 kgCO2
Fachada izquierda		2453,0	8340,115 kgCO2
Fachada derecha		2453,0	8340,115 kgCO2
TOTAL (C1) = 91958,3 kgCO2			

Emisiones de CO2 (C2)	[gCO2/kg/km]	[km]	[kg]	[kgCO2]
Perfiles de acero normalizados abiertos	0,1065	50	977301,1	5204,1 kgCO2
Cordones superiores cercha de fachada		50	91684,9	488,2 kgCO2
Cordones inferiores cercha de fachada		50	89193,2	475,0 kgCO2
Cordones superiores malla espacial		50	309439,0	1647,8 kgCO2
Cordones inferiores malla espacial		50	263990,0	1405,7 kgCO2

Trabes de atado superiores malla espacial	50	105594,0	562,3 kgCO2	
Trabes de atado inferiores malla espacial	50	117400,0	625,2 kgCO2	
Perfiles de acero normalizados huecos	0,1065	50	291619,6	1552,9 kgCO2
Soportes Inclinaados de sección rectangular	50	18929,6	100,8 kgCO2	
Diagonales cuadradas de cercha de fachada	50	6544,0	34,8 kgCO2	
Diagonales tubulares de la malla espacial	50	266146,0	1417,2 kgCO2	
Chapas grecadas de acero laminado	0,1065	50	154984,2	825,3 kgCO2
Chapa de acero galvanizado de 0,75 mm de espesor	50	154984,2	825,3 kgCO2	
Barras de acero corrugado armaduras	0,1065	50	68983,7	367,3 kgCO2
Malla electrosoldada forjado mixto colaborante	50	68983,7	367,3 kgCO2	
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,1065	50	38243275,0	203645,4 kgCO2
Hormigón aligerado para forjado mixto colaborante	50	38243275,0	203645,4 kgCO2	
TOTAL (C2) = 211595,1 kgCO2				

Emisiones de CO2 (C3-C4)	[gCO2/kg/km]	[kg]	[kgCO2]
Perfiles de acero normalizados abiertos	0,013	977301,1	12704,9 kgCO2
Cordones superiores cercha de fachada		91684,9	1191,9 kgCO2
Cordones inferiores cercha de fachada		89193,2	1159,5 kgCO2
Cordones superiores malla espacial		309439,0	4022,7 kgCO2
Cordones inferiores malla espacial		263990,0	3431,9 kgCO2
Trabes de atado superiores malla espacial		105594,0	1372,7 kgCO2
Trabes de atado inferiores malla espacial		117400,0	1526,2 kgCO2
Perfiles de acero normalizados huecos	0,013	291619,6	3791,1 kgCO2
Soportes Inclinaados de sección rectangular		18929,6	246,1 kgCO2
Diagonales cuadradas de cercha de fachada		6544,0	85,1 kgCO2
Diagonales tubulares de la malla espacial		266146,0	3459,9 kgCO2
Chapas grecadas de acero laminado	0,013	154984,2	2014,8 kgCO2
Chapa de acero galvanizado de 0,75 mm de espesor		154984,2	2014,8 kgCO2
Barras de acero corrugado armaduras	0,013	68983,7	896,8 kgCO2
Malla electrosoldada forjado mixto colaborante		68983,7	896,8 kgCO2
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,013	38243275,0	497162,6 kgCO2
Hormigón aligerado para forjado mixto colaborante		38243275,0	497162,6 kgCO2
TOTAL (C3-4) = 516570,1 kgCO2			

4.2 Alternativa de madera

Emisiones de CO2 (A1-A3)	[kgCO2/kg]	[kg]	[kgCO2]
Elementos lineales de madera laminada	2,152	522572,7	1124576,5 kgCO2
<i>Soportes inclinados</i>		59016	127002,4 kgCO2
<i>Diagonales y montantes de cercha de fachada</i>		26755,5	57577,8 kgCO2
<i>Cordones superiores cercha de fachada</i>		16665,7	35864,6 kgCO2
<i>Cordones inferiores cercha de fachada</i>		32491,3	69921,3 kgCO2
<i>Cordones superiores malla espacial</i>		130099	279973,0 kgCO2
<i>Cordones inferiores malla espacial</i>		104509,8	224905,1 kgCO2
<i>Diagonales circulares de la malla espacial</i>		84160	181112,3 kgCO2
<i>Trabes de atado superiores malla espacial</i>		51038,6	109835,1 kgCO2
<i>Trabes de atado inferiores malla espacial</i>		16245,7	34960,7 kgCO2
<i>Viguetas del forjado mixto</i>		1591,128	3424,1 kgCO3
Barras de acero corrugado armaduras	1,99	68983,7	137277,6 kgCO2
<i>Malla electrosoldada forjado mixto colaborante</i>		68983,7	137277,6 kgCO2
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,12	38243275,0	4589193,0 kgCO2
<i>Hormigón aligerado para forjado mixto colaborante</i>		38243275,0	4589193,0 kgCO2
TOTAL (A1-A3) sin contar el secuestro de carbono =			5851047,1 kgCO2
Secuestro de carbono en madera laminada	-1,64	522572,7	-857019,3 kgCO2
<i>Malla electrosoldada forjado mixto colaborante</i>		522572,7	-857019,3 kgCO2
TOTAL (A1-A3) incluyendo el secuestro de carbono =			4994027,8 kgCO2

Emisiones de CO2 (A4)	[gCO2/kg]	[km]	[kg]	[kgCO2]
Elementos lineales de madera laminada	0,07524	100	522572,7	3931,8 kgCO2
<i>Soportes inclinados</i>		100	59016	444,0 kgCO2
<i>Diagonales y montantes de cercha de fachada</i>		100	26755,5	201,3 kgCO2
<i>Cordones superiores cercha de fachada</i>		100	16665,7	125,4 kgCO2
<i>Cordones inferiores cercha de fachada</i>		100	32491,3	244,5 kgCO2
<i>Cordones superiores malla espacial</i>		100	130099	978,9 kgCO2
<i>Cordones inferiores malla espacial</i>		100	104509,8	786,3 kgCO2
<i>Diagonales circulares de la malla espacial</i>		100	84160	633,2 kgCO2
<i>Trabes de atado superiores malla espacial</i>		100	51038,6	384,0 kgCO2
<i>Trabes de atado inferiores malla espacial</i>		100	16245,7	122,2 kgCO2
<i>Viguetas del forjado mixto</i>		100	1591,128	12,0 kgCO3
Barras de acero corrugado armaduras	0,1065	60	68983,7	311,4 kgCO2
<i>Malla electrosoldada forjado mixto colaborante</i>		60	68983,7	311,4 kgCO2
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,1065	50	38243275,0	143871,2 kgCO2
<i>Hormigón aligerado para forjado mixto colaborante</i>		50	38243275,0	143871,2 kgCO2
TOTAL (A4) =			148114,5 kgCO2	

Emisiones de CO2 (A5a)	[CAEF/115.000]	[Valor Total PC €]	[kgCO2]
Presupuesto de la obra	0,006086957	4391191,86	26729,0 kgCO2
<i>Soportes inclinados</i>		144261,2	878,1 kgCO2
<i>Diagonales y montantes de cercha de fachada</i>		70312,8	428,0 kgCO2
<i>Cordones superiores cercha de fachada</i>		43846,6	266,9 kgCO2
<i>Cordones inferiores cercha de fachada</i>		85386,5	519,7 kgCO2
<i>Cordones superiores malla espacial</i>		317856,0	1934,8 kgCO2
<i>Cordones inferiores malla espacial</i>		272814,9	1660,6 kgCO2
<i>Diagonales circulares de la malla espacial</i>		320085,7	1948,3 kgCO2
<i>Trabes de atado superiores malla espacial</i>		130166,0	792,3 kgCO2
<i>Trabes de atado inferiores malla espacial</i>		40285,4	245,2 kgCO2
<i>Placas de Anclaje</i>		9643,8	58,7 kgCO2
<i>Forjado de viguetas y tablero estructural de madera.</i>		2956533,0	17996,3 kgCO2
TOTAL (A5a) =			26729,0 kgCO2

Emisiones de CO2 (A5w)	[WF]	[kgCO2 A1-A3]	[kgCO2 A4]	[kgCO2 C2]	[kgCO2]
Elementos lineales de madera laminada	0,01	267557,2	3931,8	1965,9	2734,5 kgCO2
<i>Soportes inclinados</i>		30216,2	444,0	222,0	308,8 kgCO2
<i>Diagonales y montantes de fachada</i>		13698,8	201,3	100,7	140,0 kgCO2
<i>Cordones superiores cercha de fachada</i>		8532,8	125,4	62,7	87,2 kgCO2
<i>Cordones inferiores cercha de fachada</i>		16635,5	244,5	122,2	170,0 kgCO2
<i>Cordones superiores malla espacial</i>		66610,7	978,9	489,4	680,8 kgCO2
<i>Cordones inferiores malla espacial</i>		53509,0	786,3	393,2	546,9 kgCO2
<i>Diagonales circulares de la malla espacial</i>		43089,9	633,2	316,6	440,4 kgCO2
<i>Trabes de atado superiores malla espacial</i>		26131,8	384,0	192,0	267,1 kgCO2
<i>Trabes de atado inferiores malla espacial</i>		8317,8	122,2	61,1	85,0 kgCO2
<i>Viguetas del forjado mixto</i>		814,7	12,0	6,0	8,3 kgCO3
Barras de acero corrugado armaduras	0,053	137277,6	311,4	367,3	7311,7 kgCO2
<i>Malla electrosoldada forjado mixto colaborante</i>		137277,6	311,4	367,3	7311,7 kgCO2
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,053	4589193,0	143871,2	203645,4	261645,6 kgCO2
<i>Hormigón aligerado para forjado mixto colaborante</i>		4589193,0	143871,2	203645,4	261645,6 kgCO2
TOTAL (A5w) = 271691,8 kgCO2					

Emisiones de CO2 (C1)	[kgCO2/m2 GIA]	[GIA m2]	[kgCO2]	[kgCO2]
Superficie Interna de obra desmantelada	3,4	26759,3	90981,5	kgCO2
<i>Forjado mixto colaborante</i>		21853,3	74301,22	kgCO2
<i>fachada izquierda</i>		2453,0	8340,115	kgCO2
<i>Fachada derecha</i>		2453,0	8340,115	kgCO2
TOTAL (C1) = 90981,5 kgCO2				

Emisiones de CO2 (C2)	[gCO2/kg]	[km]	[kg]	[kgCO2]
Elementos lineales de madera laminada	0,1065	50	522572,7	1965,9 kgCO2
<i>Soportes inclinados</i>		50	59016	222,0 kgCO2
<i>Diagonales y montantes de cercha de fachada</i>		50	26755,5	100,7 kgCO2
<i>Cordones superiores cercha de fachada</i>		50	16665,7	62,7 kgCO2
<i>Cordones inferiores cercha de fachada</i>		50	32491,3	122,2 kgCO2
<i>Cordones superiores malla espacial</i>		50	130099	489,4 kgCO2
<i>Cordones inferiores malla espacial</i>		50	104509,8	393,2 kgCO2
<i>Diagonales circulares de la malla espacial</i>		50	84160	316,6 kgCO2
<i>Trabes de atado superiores malla espacial</i>		50	51038,6	192,0 kgCO2
<i>Trabes de atado inferiores malla espacial</i>		50	16245,7	61,1 kgCO2
<i>Viguetas del forjado mixto</i>		50	1591,128	6,0 kgCO3
Barras de acero corrugado armaduras	0,1065	50	68983,7	259,5 kgCO2
<i>Malla electrosoldada forjado mixto colaborante</i>		50	68983,7	259,5 kgCO2
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,1065	50	38243275,0	143871,2 kgCO2
<i>Hormigón aligerado para forjado mixto colaborante</i>		50	38243275,0	143871,2 kgCO2
TOTAL (C2) =				146096,6 kgCO2

Emisiones de CO2 (C3-4)	[kgCO2/kg]	[kg]	[kgCO2]
Elementos lineales de madera laminada	1,77	522572,7	924953,7 kgCO2
<i>Soportes inclinados</i>		59016	104458,3 kgCO2
<i>Diagonales y montantes de cercha de fachada</i>		26755,5	47357,2 kgCO2
<i>Cordones superiores cercha de fachada</i>		16665,7	29498,3 kgCO2
<i>Cordones inferiores cercha de fachada</i>		32491,3	57509,6 kgCO2
<i>Cordones superiores malla espacial</i>		130099	230275,2 kgCO2
<i>Cordones inferiores malla espacial</i>		104509,8	184982,3 kgCO2
<i>Diagonales circulares de la malla espacial</i>		84160	148963,2 kgCO2
<i>Trabes de atado superiores malla espacial</i>		51038,6	90338,3 kgCO2
<i>Trabes de atado inferiores malla espacial</i>		16245,7	28754,9 kgCO2
<i>Viguetas del forjado mixto</i>		1591,128	2816,3 kgCO3
Barras de acero corrugado armaduras	0,013	68983,7	896,8 kgCO2
<i>Malla electrosoldada forjado mixto colaborante</i>		68983,7	896,8 kgCO2
Hormigón in situ de resistencia C35/38	0,013	38243275,0	497162,6 kgCO2
<i>Hormigón aligerado para forjado mixto colaborante</i>		38243275,0	497162,6 kgCO2
TOTAL (C3-4) =			1423013,1 kgCO2

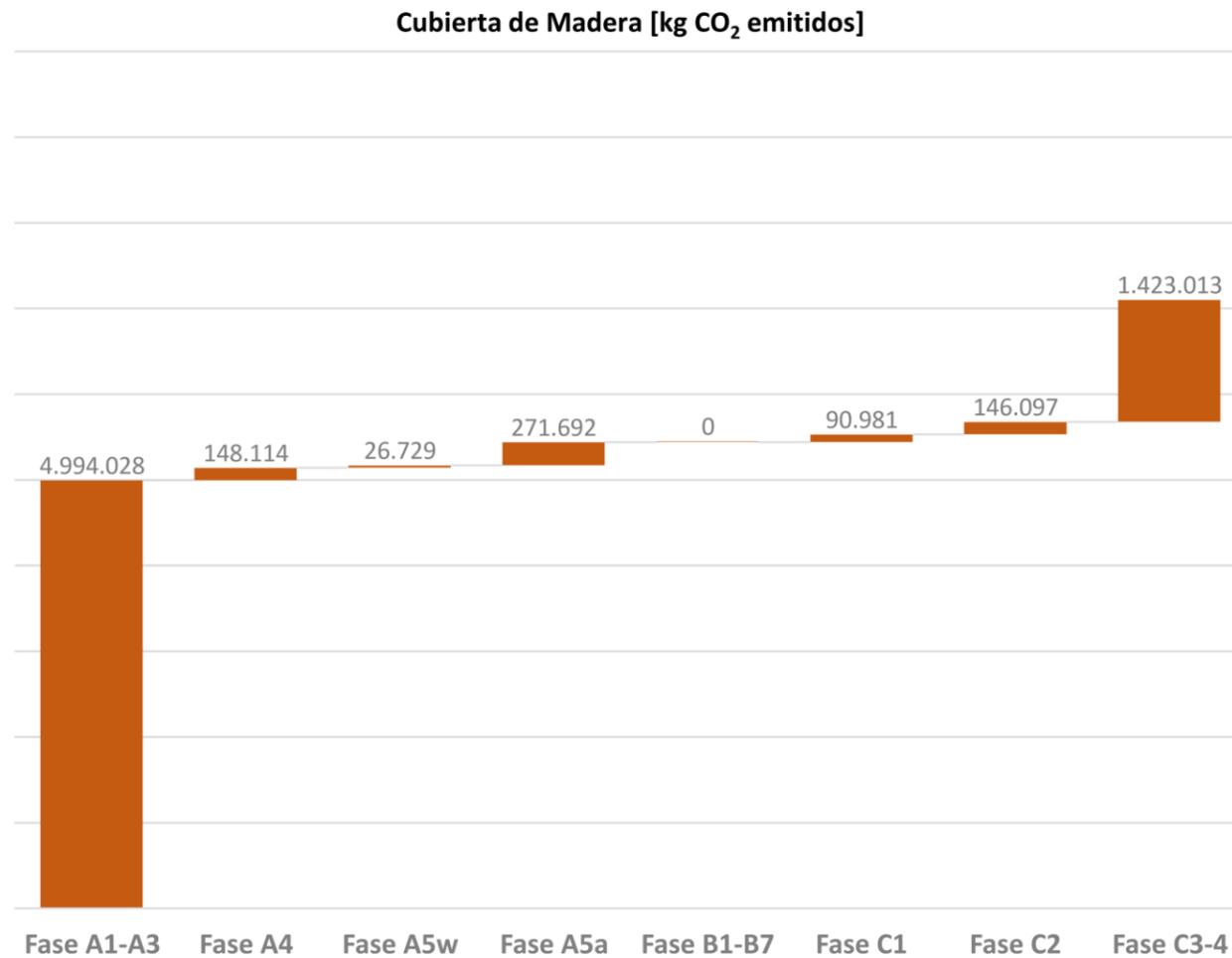
5. RESUMEN DE RESULTADOS

A continuación, se grafican los resultados obtenidos de los cálculos anteriores. Se muestran de forma acumulada las emisiones emitidas a la atmósfera en cada una de las fases del ciclo de vida del proyecto.

5.1. Alternativa de madera

En total de emisiones generadas durante todo el ciclo de vida de la alternativa de madera se estima en **7.100.654 Kg de CO₂**.

Gráfica 2. Impacto de la huella de carbono de la alternativa de madera



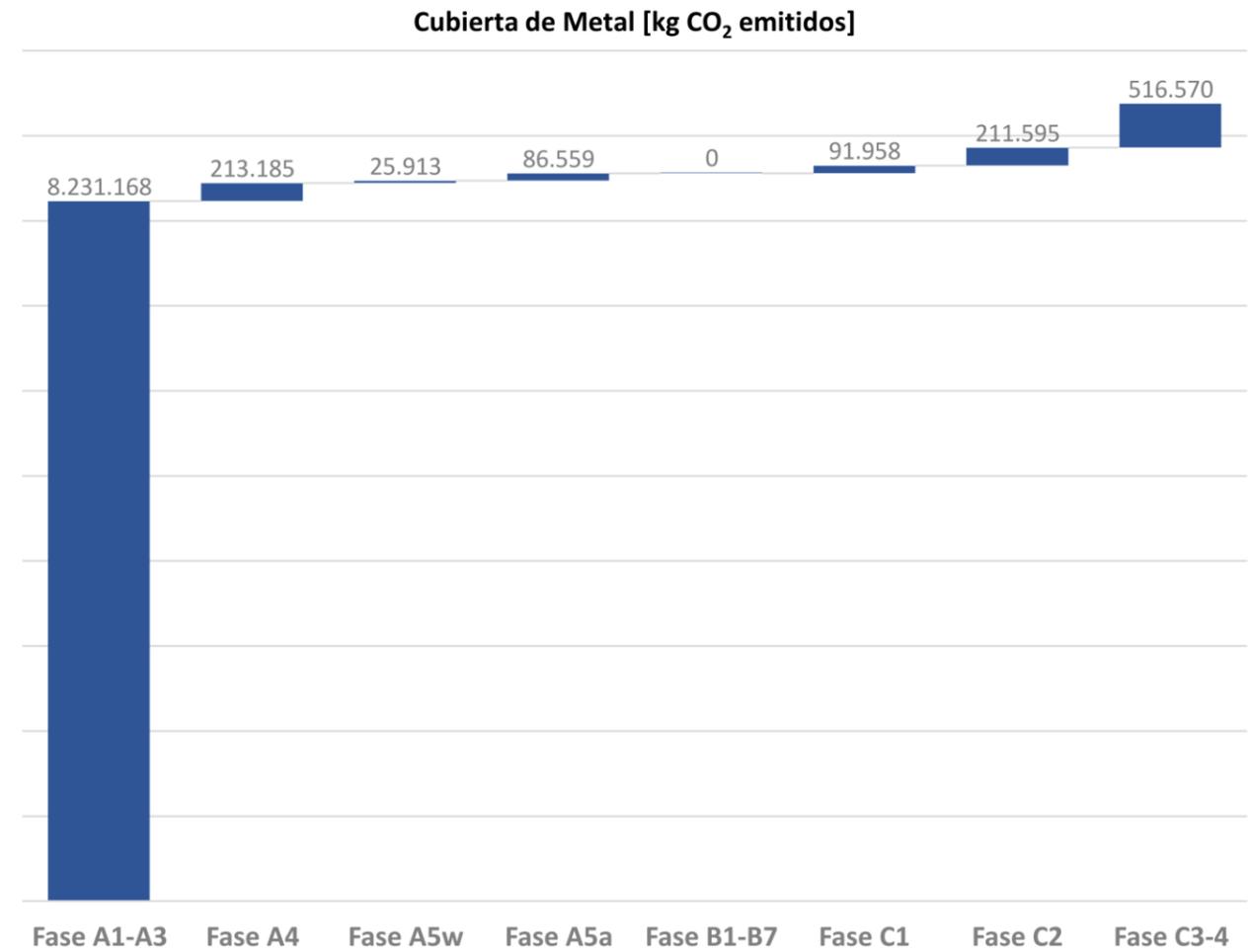
Fuente: Elaboración propia

La estructura de madera concentra la mayor parte de las emisiones durante la fase de fabricación de las vigas laminadas, con un valor de alrededor de un 70%. El otro 20% se acumula en la última fase de vida de desmantelamiento del edificio, donde los elementos van a vertedero o se incineran. Esta trasposición de emisiones de la primera fase a la última se produce por el efecto del secuestro de carbono que disminuye la carga de emisiones en las fases A1-A3, pero más tarde es devuelto a la atmósfera al ser incinerado.

5.2. Alternativa metálica

En total de emisiones generadas durante todo el ciclo de vida de la alternativa metálica se estima en **9.376.949 Kg de CO₂**.

Gráfica 3. Impacto de la huella de carbono de la alternativa metálica



Fuente: Elaboración propia

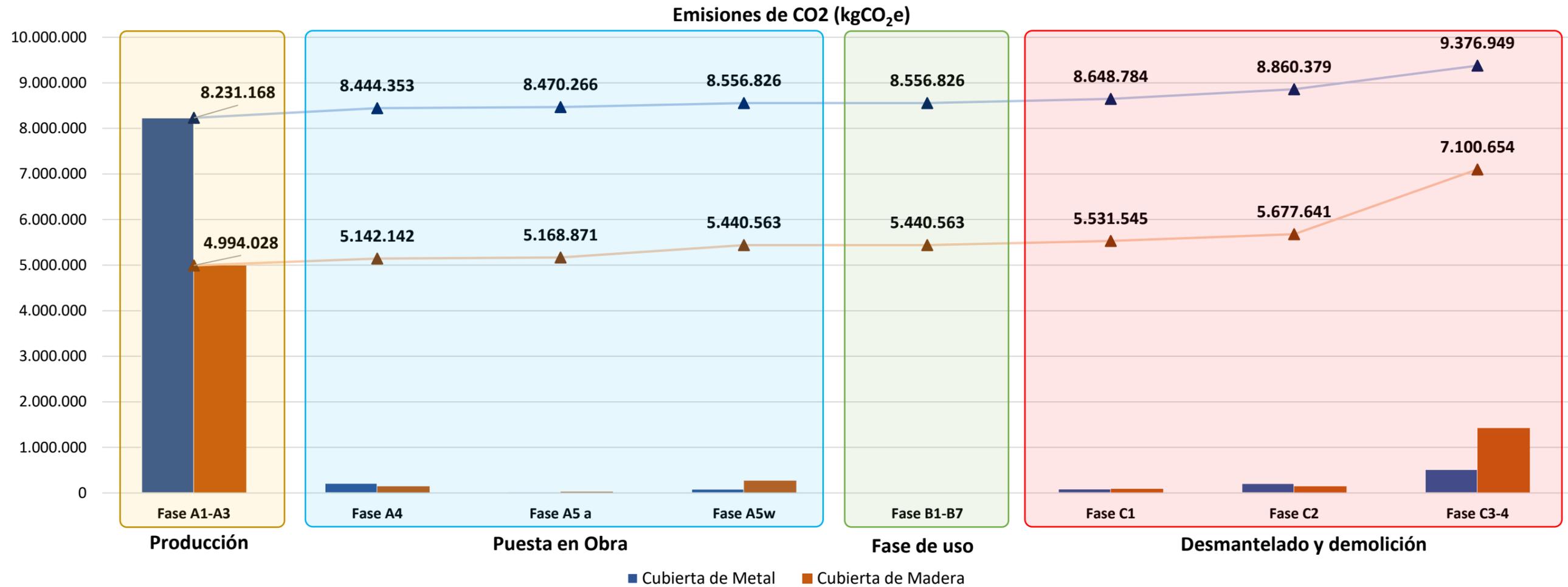
Casi el 90% de las emisiones de carbono se deben a los propios procesos de fabricación de los elementos metálicos, mientras que en el resto de las fases del ciclo de vida de la estructura metálica.

6. CONCLUSIONES

A continuación, se muestran los resultados comparativos de ambas estructuras.

Gráfica 4: Comparación del impacto de la huella de carbono

		Cubierta de Metal	Cubierta de Madera	Δ%
Producción	Fase A1-A3	8.231.168,30 kg CO ₂ e	4.994.027,81 kg CO ₂ e	-39%
	Fase A4	213.185,00 kg CO ₂ e	148.114,46 kg CO ₂ e	-31%
Puesta en Obra	Fase A5a	25.912,78 kg CO ₂ e	26.728,99 kg CO ₂ e	3%
	Fase A5w	86.559,48 kg CO ₂ e	271.691,85 kg CO ₂ e	214%
Fase de uso	Fase B1-B7	0,00 kg CO ₂ e	0,00 kg CO ₂ e	0%
Desmantelado y demolición	Fase C1	91.958,27 kg CO ₂ e	90.981,45 kg CO ₂ e	-1%
	Fase C2	211.595,07 kg CO ₂ e	146.096,64 kg CO ₂ e	-31%
	Fase C3-4	516.570,13 kg CO ₂ e	1.423.013,09 kg CO ₂ e	175%
TOTAL:		9.376.949,04 kg CO ₂ e	7.100.654,29 kg CO ₂ e	-24%



Fuente: Elaboración propia

Al final de la vida útil la alternativa estructural en madera supone un impacto menor sobre la huella de carbono que la metálica. Emplear perfiles de madera para estructuras de grandes luces de madera reducen en un 25% las emisiones de dióxido de carbono emitidas a la atmósfera.

Anexo al Trabajo Fin de Máster

Relación del TFM “Estudio comparativo de una propuesta de estructura de madera para la cubierta de la Estación Observatorio del Tren Interurbano de México-Toluca” con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

Grado de relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenibles	Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1. Fin de la pobreza.				X
ODS 2. Hambre cero.				X
ODS 3. Salud y bienestar.			X	
ODS 4. Educación de calidad.				X
ODS 5. Igualdad de género.				X
ODS 6. Agua limpia y saneamiento.				X
ODS 7. Energía asequible y no contaminante.			X	
ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico.			X	
ODS 9. Industria, innovación e infraestructuras.	X			
ODS 10. Reducción de las desigualdades.				X
ODS 11. Ciudades y comunidades sostenibles.		X		
ODS 12. Producción y consumo responsables.	X			
ODS 13. Acción por el clima.		X		
ODS 14. Vida submarina.				X
ODS 15. Vida de ecosistemas terrestres.	X			
ODS 16. Paz, justicia e instituciones sólidas.				X
ODS 17. Alianzas para lograr objetivos.		X		

Descripción de la alineación del TFM con los ODS con un grado de relación más alto.

Con el paso del tiempo la sociedad actual está cada vez más y más concienciada sobre el cambio climático y la necesidad de recurrir a economías circulares. Todavía queda mucho por hacer y la industria maderera va a jugar un papel fundamental para conseguir un futuro más verde. Todo ello va a llevarse a cabo a través de la divulgación de los beneficios de la madera, las plantaciones sostenibles y los bosques gestionados.

La madera tradicionalmente ha sido utilizada por la humanidad tanto para producir madera como para construir muebles o edificios. No obstante, desde la revolución industrial, y en especial la segunda mitad del siglo XX la madera fue sustituida de manera gradual por otros recursos no renovables como el hormigón y el acero como material de construcción. Desde entonces el desarrollo y la innovación tecnológica de la madera como elemento estructural se vio frenado a favor de los nuevos materiales.

A pesar de los grandes avances en las tecnologías del acero y el hormigón, la gestión de los residuos, reciclaje y reutilización de estos elementos todavía sigue siendo una asignatura pendiente de la que no se dispone una solución. Por ello, está en el interés de todos volver a reivindicar el papel de la madera en la construcción que no solo ofrece soluciones a este propósito. La madera no solo ofrece soluciones para su reutilización o reciclado, sino que además a través de su proceso de producción se consigue la absorción de CO₂ a la atmósfera.

A pesar de que no es un misterio, que la madera ofrece una solución sostenible a la construcción, y que, con los avances actuales en este sector, es posible construir con los mismos niveles de calidad que con el acero y el hormigón, los proyectistas todavía no consideran este material entre sus alternativas viables. Esto se debe principalmente a la pérdida de costumbre y experiencia a la hora de trabajar con este material, que hace resistente al sector de la construcción a cambiar de nuevo.

Por ello es nuestra tarea como ingenieros, divulgar el uso de este material, y así incentivar la investigación y el desarrollo en esta dirección.

El presente trabajo contribuye en mayor medida a alcanzar las metas fijadas por los Objetivos de Desarrollo Sostenible 9, 12 y 15 a través principalmente de la divulgación y promoción de la madera.

ODS Nº 9. Desarrollar infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación.

A través de este Trabajo Final de Máster se trata de introducir a la madera, como elemento constructivo viable para las grandes infraestructuras civiles. Hasta ahora la madera tan solo gozaba de algo de popularidad en el ámbito de e la edificación y rehabilitación de edificios. Para el caso de infraestructuras civiles, que presentan un mayor tamaño y luces, los proyectistas solían girar la mirada hacia materiales con propiedades mecánicas mayores como el acero y el hormigón.

La industria de la madera ha experimentado en los últimos años grandes avances tecnológicos — como es la supermadera, el CLT o la madera laminada— que han posicionado a este material al mismo nivel que el acero y el hormigón. No obstante, ya sea por falta de tradición o desconocimiento los diseñadores de infraestructuras todavía no consideran el material en sus estudios de viabilidad lo cual reduce su demanda significativamente y de frena su desarrollo.

Al dar visibilidad a la madera como material estructural, estaremos ampliando la demanda de estos productos incentivando de esta manera la innovación en el campo de la madera.

Con esta acción se contribuye a alcanzar las metas concretas 9.4, 9.5, 9.a y 9.b del Objetivo de desarrollo sostenible Nº9. (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>)

ODS Nº 12. Garantizar las pautas de consumo y de producción sostenibles.

Otro de los objetivos que persigue este trabajo es generar consciencia de cuanto contamina el sector de la construcción en la actualidad. Aunque se conocen los datos aproximados en términos globales, todavía no existen bancos de datos suficientes que nos permitan cuantificar cuánto se genera en la etapa de producción y ejecución de la obra.

Si bien es cierto que, en las últimas normativas de eficiencia energética — tanto a nivel nacional como europeo — ha habido grandes avances en cuanto a las pérdidas y emisiones producidas por los edificios durante las etapas de uso y mantenimiento, no se puede decir lo mismo de las etapas de producción y las de desmantelamiento de las obras.

La falta de esta información impide a los organismos licitantes elaborar estándares y criterios limitantes para garantizar la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales. Ya lo dijo el físico y matemático William Thomson Kelvin: “Lo que no se define no se puede medir. Lo que no se mide, no se puede mejorar. Lo que no se mejora, se degrada siempre.”

Cuanto más edificios evalúen el impacto sobre la huella de carbono de sus fases de producción y desmantelamiento, más fácil será definir el grado cuantificable de sostenibilidad de una estructura.

Con una definición y criterios concretos del grado de sostenibilidad, los organismos licitantes —incentivados generalmente por los organismos de financiación— podrán empezar a incluir en los pliegos exigencias relativas al impacto de la huella de carbono.

De esta manera se incentivará el uso de materiales biodegradables y sostenibles —producidos generalmente de manera local, para evitar emisiones por transporte— así como la planificación en la reutilización de estos una vez agotada su vida útil.

Con esta acción se contribuye a alcanzar las metas concretas 12.1, 12.2, 12.4, 12.5, 12.6, 12.7, 12.8, 12.a y 12.b del Objetivo de desarrollo sostenible Nº12. (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>)

ODS Nº 15. Proteger, restaurar y promover la utilización sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar de manera sostenible los bosques, combatir la desertificación y detener y revertir la degradación de la tierra, y frenar la pérdida de diversidad biológica.

Incentivando el uso de la madera con usos estructurales, fomentamos en general a la industria maderera. Si se consigue que este sector sea más rentable que otros que fomentan la deforestación masiva como la cárnica o láctea o incluso el cultivo de determinados productos agrícolas, no solo estaremos frenando la deforestación, sino además promocionando la tala responsable y la reforestación de zonas degradadas.

Al incentivar esta industria se está luchando de forma activa contra la desertificación, rehabilitándonos tierras y suelos degradados, para su aprovechamiento como zonas para el cultivo forestal.

Además, la silvicultura, aunque con fines comerciales, bien gestionada puede servir para frenar la pérdida de diversidad biológica si se introducen en el plan de explotación forestal especies no invasivas que permitan su integración en el ecosistema.

A la hora de buscar proveedores de madera se buscará siempre que esta cuente con una certificación FSC o PEFC de manera que se asegure una gestión sostenible de los bosques.

Con esta acción se contribuye a alcanzar las metas concretas 15.3, 15.4, 15.5, 15.a y 15.b del Objetivo de desarrollo sostenible Nº9. (<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/biodiversity/>)