

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO Y ANÁLISIS RESISTENTE DE UNA
ESTRUCTURA METÁLICA DE GRANDES
DIMENSIONES PARA INSTALACIÓN DE LOGÍSTICA

DESIGN AND STRENGTH ANALYSIS OF A LONG SPANS
STEEL STRUCTURE FOR A LOGISTICS INSTALLATION

Autora

Laura Gómez Navarro

Directores

Elena Ibarz Montaner
Luis Gracia Villa

Diseño y análisis resistente de una estructura metálica de grandes dimensiones para instalación de logística.

RESUMEN

Se plantea el diseño y análisis estructural completo de una estructura metálica de grandes luces para instalación de logística de cable estructurado y fibra óptica localizada en Malpica, Zaragoza. Dicha estructura se encontrará anexa a una nave existente dónde la empresa desarrolla actualmente su actividad productiva. Para su desarrollo, se tendrá en cuenta la normativa de aplicación para esta tipología de estructuras.

Se trata de una estructura metálica de 2772 m² distribuidos en 15 pórticos con modulación de 6 metros, con 33 metros de luz. La altura libre dentro de la nave es de 7 metros con 9.7 metros hasta la cumbrera (pendiente = 7%). Dispone de una puerta de grandes dimensiones (30x6 metros) total y permanentemente abierta, destinada al tránsito de camiones. El diseño y análisis de la estructura, se adaptará a las exigencias del cliente y al entorno en el que estará situada.

Se emplea una distribución porticada a base de cerchas de estructura metálica (tanto para la estructura principal, como para la puerta que permite el acceso de camiones). Durante su dimensión se estudiarán diversas opciones, eligiendo la más favorable considerando diversos criterios.

Además del cálculo de la estructura, también se incluye el diseño y cálculo de la cubierta, columnas y cimentación, así como de todos los detalles constructivos singulares, como uniones o anclajes.

Para el cálculo se han empleado el software *RFEM* de *Dlubal*. Las acciones que actúan sobre la estructura y las comprobaciones necesarias se han extraído del “*Documento Básico de Seguridad Estructural*”

ÍNDICE

CAPÍTULO 0. INTRODUCCIÓN.....	2
0.1. Objeto.....	2
0.2. Alcance	3
0.3. Metodología	3
0.4. Normativa	4
0.5. Software	4
0.6. Contenido de las secciones del documento.....	4
CAPÍTULO 1. PREDISEÑO DE LA ESTRUCTURA COMPLETA.....	6
1.1. Descripción de la instalación	8
1.1.1. Cerramientos y correas.....	8
1.1.2. Pórticos principales	8
1.1.3. Pórticos de cierre.....	9
1.1.4. Fachadas laterales.....	10
1.1.5. Puerta para camiones.....	11
CAPÍTULO 2. GENERACIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO	12
2.1. Predimensión de los perfiles	12
2.1.1. Correas	12
2.1.2. Cercha	13
2.1.3. Pilares principales	13
2.1.4. Pórtico de cierre	13
2.1.5. Puerta.....	14
2.1.6. Arriostramientos.....	15
2.2. Generación del modelo de elementos finitos 3D	15
2.3. Casos de carga individuales	19
2.3.1. Carga Permanente	19
2.3.2. Nieve	21
2.3.3. Viento.....	21
2.4. Hipótesis de carga consideradas	27
2.5. Condiciones de apoyo en pilares y uniones internas.....	29
2.5.1. Condiciones de apoyo externas	29
2.5.2. Conexiones entre los elementos	30
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y VERIFICACIONES RESISTENTES.....	31
3.1. Desplazamientos	31
3.2. Tensiones	33
CAPÍTULO 4. DISEÑO UNIONES	38
4.1. Uniones Cordón – Cordón cercha.....	38
4.2. Uniones Cercha – Pilar	38

4.3. Uniones Puerta – Pilar	39
4.4. Uniones Puerta – Cerchas	39
4.5. Uniones Pilar Hastial Extremo – Dintel.....	40
4.6. Uniones Pilar Hastial Central – Dintel.....	41
4.7. Uniones Tubos Arriostramiento.....	41
4.8. Uniones Redondos Arriostramiento.....	42
CAPÍTULO 5. DISEÑO PLACAS DE ANCLAJE	43
5.1. Grupo 1 (HEB 300).....	43
5.2. Grupo 2 (HEB 280).....	44
5.3. Grupo 3 (HEA 240)	44
5.4. Grupo 4 (IPE 270).....	44
5.5. Grupo 5 (IPE 240).....	45
5.6. Grupo 6 (IPE 200).....	45
CAPÍTULO 6. COMPROBACIÓN DE ZAPATAS.....	46
6.1. Dimensiones.....	46
6.2. Armaduras.....	47
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	49
ANEXO I. Predimensión de los perfiles	50
a) Diseño de la cercha	50
b) Diseño celosía de la puerta.....	51
ANEXO II. Generación del modelo de cálculo.....	53
ANEXO III. Acciones	58
a) Carga Permanente	58
b) Nieve	61
c) Viento.....	61
ANEXO IV. Comprobaciones estructura.....	72
a) Cambios sobre el modelo inicial	72
b) Comprobaciones Estado Límite Último (ELU).....	73
1) Correas	74
2) Cercha	74
3) Celosía puerta.....	75
4) Dintel.....	75
5) Pilares principales	76
6) Pilares hastiales	76
7) Arriostramientos.....	77
c) Comprobaciones Estado Límite de Servicio (ELS)	77
d) Desplazamientos.....	78
e) Tensiones.....	80

ANEXO V. Comprobaciones uniones	91
a) Uniones Cordón – Cordón cercha	91
b) Uniones Cercha – Pilar.....	92
c) Uniones Puerta – Pilar.....	93
d) Uniones Puerta – Cercha.....	94
e) Uniones Pilar Hastial Extremo – Dintel	96
f) Uniones Pilar Hastial Central – Dintel	98
g) Uniones Tubos Arriostramiento	99
h) Uniones Redondos Arriostramiento	101
ANEXO VI. Comprobaciones placas anclaje	103
a) Grupo 1 (HEB 300).....	104
b) Grupo 2 (HEB 280).....	105
c) Grupo 3 (HEA 240).....	107
d) Grupo 4 (IPE 270).....	108
e) Grupo 5 (IPE 240).....	109
f) Grupo 6 (IPE 200).....	110
ANEXO VII. Comprobaciones cimentaciones	113
a) Equilibrio zapata	113
1) Vuelco	113
2) Deslizamiento.....	114
3) Hundimiento.....	114
b) Armaduras	114
c) Cálculo y comprobaciones	116
1) Grupo 1 (HEB)	116
2) Grupo 2 (IPE 270, IPE 240).....	116
3) Grupo 3 (HEA 240).....	117
4) Grupo 4 (IPE 200).....	118
ANEXO VIII. Índice de Imágenes	119
ANEXO IX. Índice de Tablas	123

CAPÍTULO 0. INTRODUCCIÓN

0.1. Objeto

El objeto de este trabajo es el diseño y análisis estructural completo de una nave a dos aguas de estructura metálica, ubicada en el polígono industrial de Malpica, Zaragoza.

La estructura es parte de un encargo por parte de una empresa dedicada a la instalación de logística de cable estructurado y fibra óptica: “Keynet Systems”. Dicha empresa desea ampliar sus instalaciones, con vistas a incrementar su actividad productiva. Es con este objetivo en mente que decide encargar el cálculo y construcción de una nave de estructura metálica. La estructura se encontrará anexa a una nave ya existente, en la cual se desarrolla actualmente toda la actividad productiva de la empresa.



Imagen 0.1 Localización I

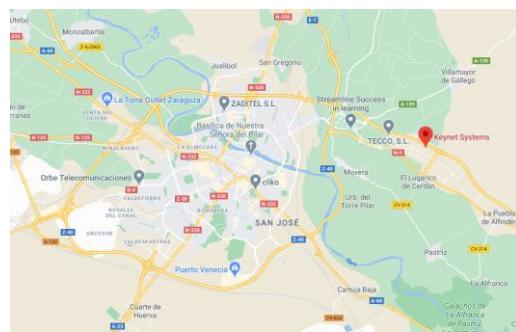


Imagen 0.2 Localización II

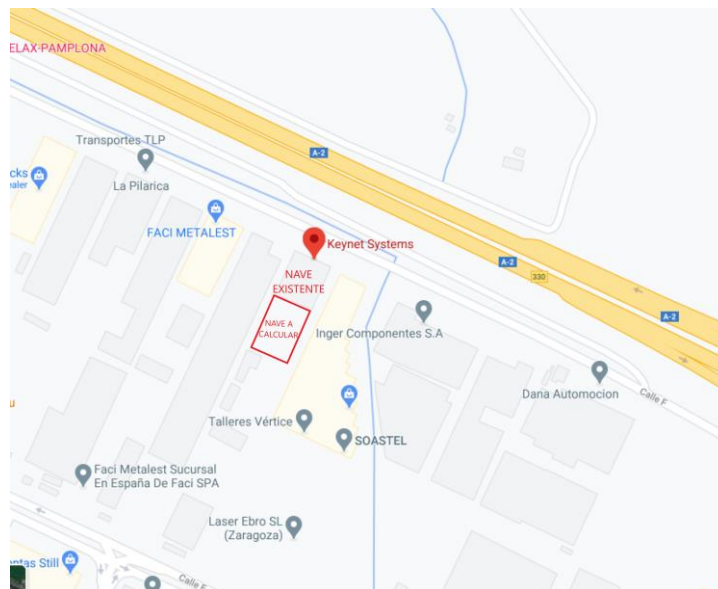


Imagen 0.3 Situación Parcela

0.2. Alcance

El alcance del proyecto abarca el cálculo de la estructura metálica de la nave. Las características de esta construcción se ven definidas por la empresa contratante. Estas incluyen:

- Luz libre de 33 metros
- Longitud de 84 metros.
- Altura libre de 7 metros.
- No se exige pendiente ni altura mínima o máxima de cubierta.
- La nave se encuentra anexa, mediante uno de los pórticos de cierre, a otra nave de estructura de hormigón ya existente y perteneciente a la misma empresa.
- Se debe facilitar la comunicación entre la nave existente y la nave a diseñar. Preferiblemente con las fachadas anexas totalmente abiertas.
- Debe disponer de una abertura en fachada completamente abierta (sin pilares intermedios) de 30 metros de longitud que facilite el acceso de camiones. Por tanto, la altura mínima del hueco ha de ser de 4.5 metros.
- La localización de la puerta para camiones se encontrará lo más cercana posible a la nave existente.

Además de la estructura, también se incluye el diseño, cálculo y selección de los cerramientos de cubierta y fachada y cimentación; así como de todos los detalles constructivos singulares (uniones o anclajes).

0.3. Metodología

Para realizar el diseño, en primer lugar, se procederá al prediseño de la geometría de la estructura a partir de la distribución en planta del espacio a cubrir. Se definen la disposición constructiva de pilares y cerchas.

Posteriormente, se procederá a una predimensión aproximada de los perfiles que cumplan la normativa y se ajusten a la disposición constructiva de la nave. A continuación, se deben conocer las acciones, que actúan sobre la estructura, en función de su localización y características de uso; así como sus combinaciones para Estado Límite Último y Estado Límite de Servicio. El objetivo de esta predimensión es tener una elección orientativa de los perfiles que constituirán la estructura, disminuyendo así el número de iteraciones necesarias para obtener la solución final.

Después, se generará un modelo de elementos finitos 3D de toda la estructura. Este modelo aborda el cálculo estructural y tiene en consideración la interacción entre los distintos elementos integrados. En él, se analizarán distintas disposiciones constructivas tanto de los elementos como la tipología de las uniones entre los mismos. Este proceso, se enfoca en optimizar la estructura y adoptar la solución más favorable, considerando los distintos factores que generen beneficios a la empresa.

Finalmente, se procede al cálculo de las uniones que conectan la estructura. Entre ellos podemos encontrar, la unión entre pilares y cerchas; las uniones entre los pilares hastiales y

los dinteles de cierre; o las uniones de los arriostramientos con los elementos de la estructura principal. Además, se realizará el cálculo de los anclajes y zapatas que constituyen la unión entre estructura y terreno.

Durante todo este proceso, se tendrá en consideración la normativa vigente para estructuras metálicas y elementos de hormigón, además de las características que definen la construcción. También se busca facilitar la fabricación y el montaje de la estructura. Se quiere diseñar, no únicamente una estructura que cumpla con la normativa, sino una cuya fabricación, transporte, montaje y posterior uso sea lo más funcional posible.

0.4. Normativa

La normativa empleada para el diseño y cálculo del proyecto es:

- Código Técnico de la Edificación (CTE)
 - ~ Documento Básico de Seguridad Estructural (DBSE)
 - ~ Documento Básico de Seguridad Estructural – Acero (DBSE-A)
 - ~ Documento Básico de Seguridad Estructural – Acciones en la Edificación (DBSE-AE)
 - ~ Documento Básico de Seguridad Estructural – Cimientos (DBSE-C)
- Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08)

0.5. Software

El software empleado en el trabajo comprende:

- *RFEM*: generación de un modelo de cálculo de elementos finitos 3D, para abordar el cálculo estructural y ajustar los perfiles necesarios.

0.6. Contenido de las secciones del documento

A continuación, en las diferentes secciones del documento se describirán el cronograma que se sigue para el desarrollo de este trabajo. Se diferencia entre las siguientes fases:

1. *PREDISEÑO DE LA ESTRUCTURA COMPLETA*: elección de la geometría de la estructura a partir de la distribución en planta del espacio a cubrir, definiendo la disposición constructiva de pilares y cerchas.
2. *GENERACIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO*: obtención de las acciones que actúan sobre la estructura, prediseño de la estructura y modelización mediante elementos finitos 3D de la estructura completa para su estudio.
3. *RESULTADOS Y VERIFICACIONES RESISTENTES*: a partir del modelo de cálculo, se seleccionarán los perfiles necesarios para cumplir la normativa.
4. *DISEÑO UNIONES*: diseño de las conexiones, articuladas o rígidas, consideradas entre los distintos elementos que componen la estructura.
5. *DISEÑO PLACAS DE ANCLAJE*: diseño de las placas de anclaje de los pilares, que se ajusten con los considerados durante el cálculo de la estructura.

6. COMPROBACIÓN DE ZAPATAS: diseño de la cimentación a partir de los esfuerzos transmitidos por la estructura y en base al informe geotécnico.

CAPÍTULO 1. PREDISEÑO DE LA ESTRUCTURA COMPLETA

Desde la revolución industrial que resultó en grandes avances económicos, sociales y tecnológicos se ha ido sustituyendo la forma de vida rural por la vida urbana e industrializada. Este fue el punto de inflexión en la historia de la industria; sin embargo, desde entonces esta ha ido creciendo a pasos agigantados multiplicándose la producción y con ello las demandas que esto conlleva. No es solo el crecimiento de la producción y la demanda lo que ha derivado en la industrialización actual, sino que también se generó un aumento de la riqueza que permitió a las empresas invertir progresivamente mayores cantidades de dinero con vistas de aumentar sus beneficios; por ejemplo, comprando maquinaria más avanzada o empleando espacios de trabajo de mayores dimensiones.

Dicho aumento de la demanda junto con la globalización en la que se ve inmersa la sociedad actualmente ha generado a su vez una gran industria, la logística. La necesidad de transportar, gestionar y controlar la cadena de suministros ha derivado también en la búsqueda de su mayor automatización y optimización y, con ello, a la demanda por parte de las corporaciones empresariales de grandes superficies diáfanas con accesos de grandes dimensiones. Es, en este último aspecto, donde las capacidades de los ingenieros para diseñar instalaciones cada vez de mayores dimensiones se ven solicitadas.

A lo largo del crecimiento de la industrialización, los ingenieros han ido desarrollando diferentes metodologías empleado diversos materiales y disposiciones constructivas que permiten solucionar este problema. No obstante, dos de ellas son las que destacan sin ninguna duda sobre las demás: las naves logísticas de estructura metálica y las de estructura de hormigón prefabricado. Ambas son soluciones que destacan por resolver de una manera simple y óptima las necesidades de las empresas logísticas, empleando geometrías regulares y modulares.

Ninguna de las dos soluciones es más válida que la otra, sino que cada una de ellas se adapta mejor a la actividad que se desarrolle en su interior y las necesidades de la empresa.

Las naves de estructura de hormigón destacan por ser capaces de cubrir distancias entre pórticos y luces mayores. Es ya para grandes luces, en las que la estructura metálica dependería del diseño de cerchas, que para una misma altura libre la estructura de prefabricado reduce la altura total y la superficie de los cerramientos. También caben destacar tanto la sencilla y rápida ejecución de este tipo de estructuras, pues se diseñan para ser colocadas como si fuesen un puzle; como la fácil disponibilidad del hormigón. Cuando la actividad desarrollada requiera de una alta protección contra el fuego, estas son la mejor opción.



Imagen 1.1. Nave Hormigón Prefabricado (Tornaria construye naves ganaderas, agrícolas y movimiento de tierras)

Las naves de estructura metálica han demostrado ser la mejor solución para edificaciones que demandan menores luces. Además, ante la necesidad de diseñar estructuras con geometrías irregulares o de realizar cambios imprevistos en obra, la estructura metálica se adapta más óptimamente generando menores costes. La alta resistencia y la máxima seguridad con un mantenimiento mínimo son otros aspectos para destacar en estas estructuras.



Imagen 1.2. Nave Metálica (ARQUESTIL / Proyecto nave)

En el caso de las naves de estructura metálica, es habitual diseñar celosías cuando se desea ampliar el espacio libre de la edificación. Una de las diferencias entre la disposición de dinteles y de cerchas es que para estructuras de tipo dintel este trabaja principalmente a esfuerzo cortante y flector y la cercha a esfuerzo axil. Otra gran diferencia es la mayor rigidez de las cerchas, derivando en menores desplazamientos y una estructura más ligera para cumplir las comprobaciones de desplazamientos.

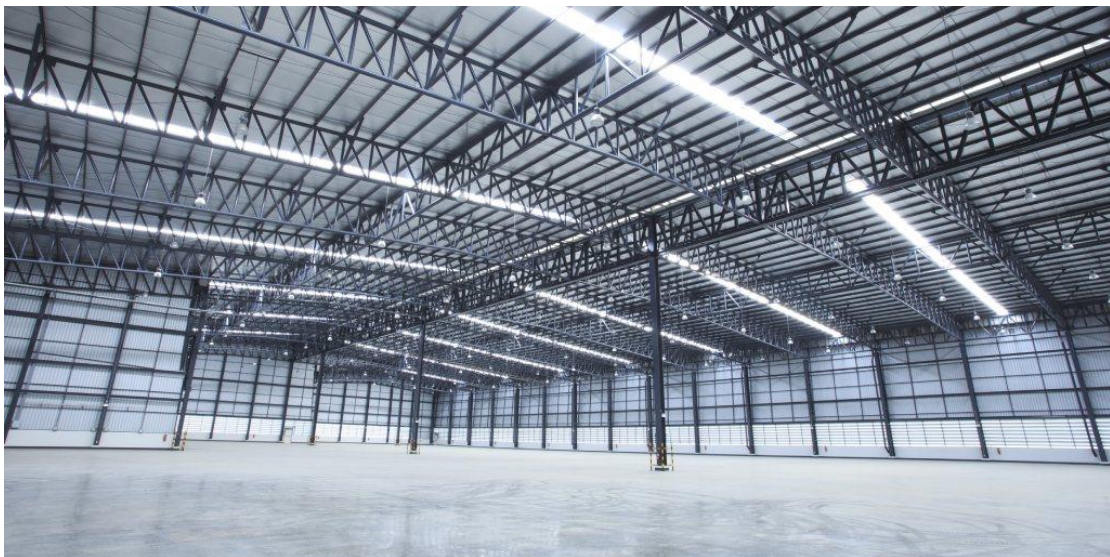


Imagen 1.3. Nave metálica con cerchas (<https://www.dippanel.com>)

Cuando la actividad lo requiere y considerando las ventajas de ambos tipos de edificación industrial, se emplean estructuras mixtas de acero y hormigón. Estas construcciones aúnan lo mejor de ambos mundos buscando solventar las desventajas de un material con las fortalezas del otro.



Imagen 1.4. Nave Mixta (Construcción de naves industriales / Ingenieros Asesores)

1.1. Descripción de la instalación

A continuación, se van a describir las características geométricas y la distribución en planta de la construcción.

Se emplea una distribución porticada a base de cerchas de estructura metálica (tanto para la estructura principal, como para la puerta que permite el acceso de camiones).

La estructura metálica estudiada está formada por 15 pórticos de 33 metros de luz, abarcando una longitud perpendicular a los pórticos de 84 metros (2772 m^2). La pendiente descrita en la cubierta es del 7% (4.004°).

Se construirá un muro de 1 metro de altura y 0.35 de ancho en las fachadas de la nave.

1.1.1. Cerramientos y correas

Los cerramientos elegidos para la estructura son panel sándwich en cubierta y chapa grecada de 6 mm tanto para las fachadas lateral como hastial. Ambos se encuentran unidos a la estructura mediante correas de tipo C, a través de las cuales se transmiten las sobrecargas de viento y nieve. Las separaciones entre correas son de 1.5 metros en cubierta (12 correas/faldón) y de 1.26 metros en fachadas lateral (7 correas/fachada) y hastial (7 correas/fachada).

1.1.2. Pórticos principales

Los pórticos principales los constituyen pilares de perfil HEA de longitud igual a la altura libre necesaria (7 metros) más la pata de la cercha. La pendiente de cubierta es del 7%.

Las cerchas están configuradas por perfiles HEA en su cordón superior, cordón inferior y en las dos primeras diagonales de cada extremo. Se buscan perfiles con mayor rigidez, capaces de resistir con mayor eficiencia los esfuerzos de flexión y salvar los 33 metros de luz con el menor peso posible. Debido a que los cordones son perfiles abiertos, se dispondrán rigidizadores como prolongación de los perfiles de montantes y diagonales, reforzando la sección del alma que recibe los esfuerzos. Montantes y diagonales son perfiles cerrados rectangulares con su lado mayor orientado perpendicularmente al plano del pórtico. Se busca reducir la abolladura del cordón inferior. La separación entre

diagonales es de 1.5 metros y de 3 metros entre montantes. Gracias a este diseño, las correas de cubierta descansan alternativamente sobre las uniones de los montantes y diagonales con el cordón superior. No se generan flexiones localizadas a lo largo de este cordón.

Las uniones entre montantes y diagonales con ambos cordones son rígidas. Las cerchas se encuentran unidas rígidamente a los pilares mediante los cordones superior e inferior. Se diseña la cercha sin montantes en los extremos y se acopla en esa posición a los pilares.

Con el objetivo de reducir la longitud de pandeo del cordón inferior, se orienta el eje fuerte de la sección en la dirección perpendicular al pórtico y se emplean 4 filas perfiles cerrados cuadrados que arriostran las cerchas en el plano perpendicular al pórtico. Dichos tubos están distribuidos de forma simétrica. La primera y cuarta fila conectan las cerchas en el montante segundo (longitud de pandeo = 6 metros) y terminan en el segundo pilar intermedio de los pórticos hastiales. Análogamente, la segunda y tercera fila comienzan en el montante cuatro (longitud de pandeo = 6 metros) hasta el pilar hastial central. Por tanto, resta un espacio intermedio de tres vanos de diagonales en el centro de la cercha (longitud de pandeo = 9 metros). Todas las uniones de estos tubos serán rígidas.

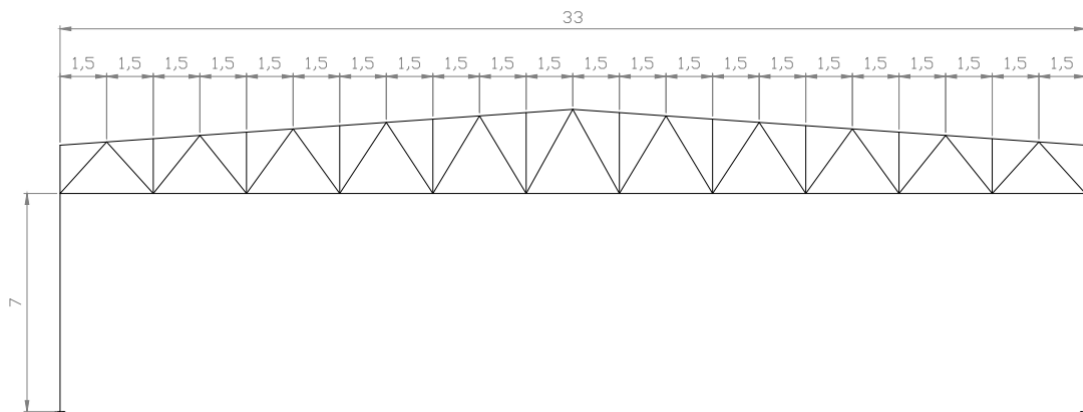


Imagen 1.5 Esquema Pórtico Principal

1.1.3. Pórticos de cierre

Los pórticos de cierre están formados por un dintel que sigue una pendiente del 7%; dos pilares en los extremos de 8.545 metros de altura; y cinco pilares intermedios, distribuidos simétricamente 6 - 6 - 4.5 metros en el plano del pórtico coincidiendo sus cabezas con el apoyo de correas de cubierta. Además, su separación es análoga a los tubos que arriostran el cordón inferior de la cercha que terminan en estos pilares.

Los perfiles empleados para los pilares intermedios (con el eje fuerte perpendicular al plano) y el dintel son IPE y para los pilares de los extremos (con el eje fuerte paralelo al plano) son de tipo HEA.

Las uniones de los pilares hastiales con el dintel son de tipo articulado y los pilares se encuentran empotrados en sus extremos inferiores.

Como la fachada anexa a la nave existente se encuentra abierta (sin cerramientos ni correas que arriostran en el eje débil), se colocan tubos cuadrados entre los pilares para

reducir la longitud de pandeo en el plano del pórtico. Estos coinciden con la tercera y la sexta correa de fachada.

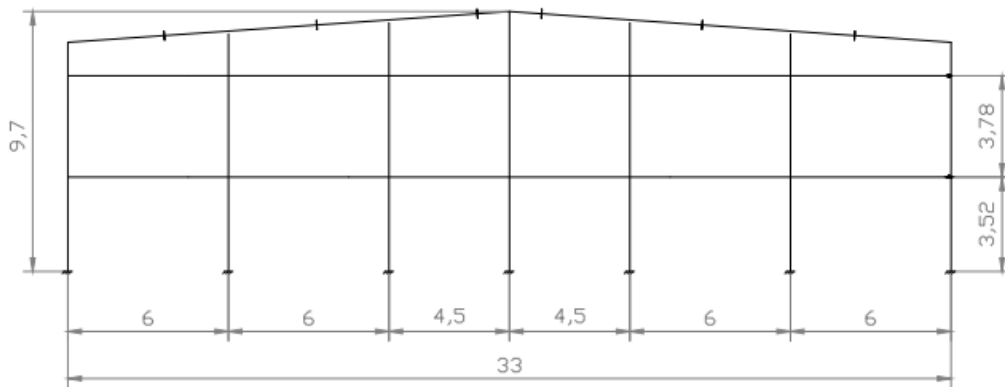


Imagen 1.6 Esquema Pórtico Cierre (sin viento)

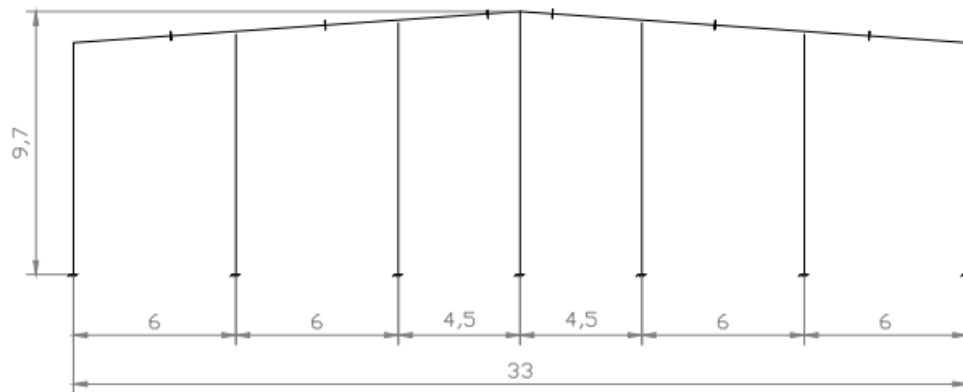


Imagen 1.7 Esquema Pórtico Cierre (con viento)

1.1.4. Fachadas laterales

Las fachadas laterales se ven definidas por una distribución de 15 pórticos separados una modulación de 6 metros. Los pórticos centrales se corresponden con el pórtico tipo y los de los extremos con el pórtico hastial (ambos descritos anteriormente). En una de las ellas, se debe diseñar una puerta de 30 metros libres de luz.

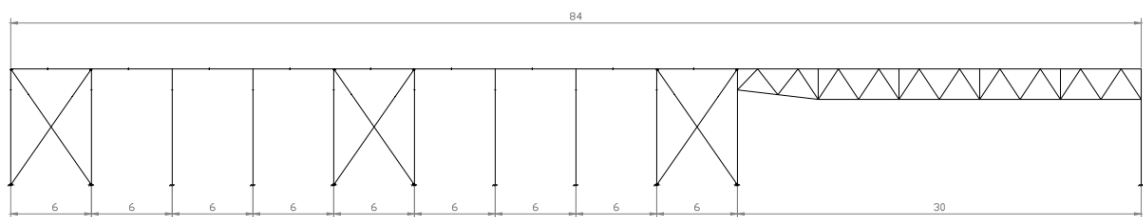


Imagen 1.8 Fachada A

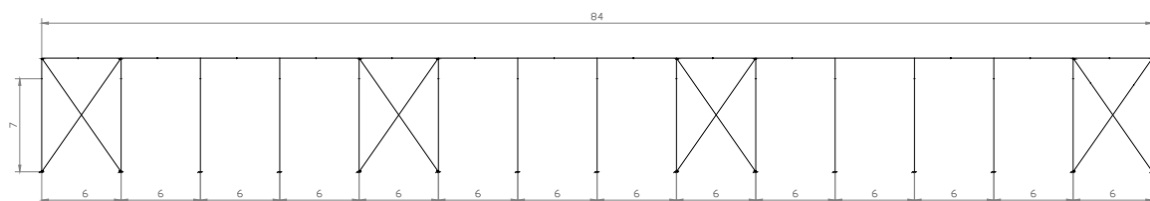


Imagen 1.9 Fachada B

Se disponen 4 arriostramientos con cruces de San Andrés. Dos de ellos en los extremos y los restantes en el quinto y noveno vano. Los arriostramientos de cubierta se sitúan en los mismos vanos y se dividen en 3 cruces/faldón, que coinciden con la disposición de pilares hastiales. Los perfiles que conforman ambos arriostramientos son redondos articulados para la cruz y tubos cuadrados con unión rígida.

Además, se unen las cabezas de todos los pilares principales de la misma fachada con el mismo perfil de tubos. Su unión es rígida.

1.1.5. Puerta para camiones

Como se ha indicado en el apartado anterior, una de las fachadas lateral dispone de una abertura de 30 metros de longitud, lo que representa un 26% del área lateral. Por ello, a la hora de realizar el análisis de la estructura, se deberá considerar los efectos de las presiones interiores generados.

Para salvar la luz, se diseñará una celosía triangulada haciendo coincidir los montantes extremos de la cercha del pórtico principal con los de la celosía de la puerta. También, sabiendo que por esta puerta van a acceder camiones, el hueco se dimensiona con una altura mínima de 5 metros.

Las secciones empleadas en la celosía son HEA (con su eje fuerte perpendicular al pórtico) tanto en los cordones superior e inferior como en las diagonales y montantes. Además, al haber eliminado cuatro pilares principales, se refuerzan los pilares de los extremos, seleccionando un perfil HEB de un orden mayor que el HEA del resto de pilares principales.

En el apartado “2.1 Predimensión de los perfiles”, se describirá la configuración más apropiada para esta celosía.

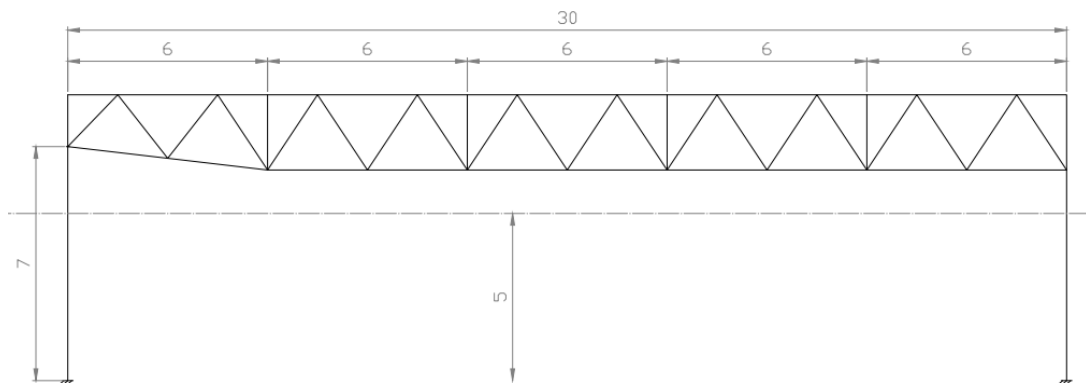


Imagen 1.10 Puerta Camiones

CAPÍTULO 2. GENERACIÓN DEL MODELO DE CÁLCULO

En esta fase se procede al prediseño de la estructura, seleccionando unos perfiles iniciales que servirán de base para posteriormente estudiar la estructura y analizar distintas alternativas de disposición. Con esto, se continuará con la obtención de las acciones que actúan sobre la estructura y que, por tanto, deberá ser capaz de soportar. Finalmente, se puede proceder a la modelización de la estructura completa con un software de elementos finitos 3D en el que se realizará el estudio y optimización.

2.1. Predimensión de los perfiles

El objetivo es, partiendo de las acciones obtenidas, realizar una preselección de los perfiles que compondrán la estructura; en base a la geometría descrita anteriormente en: “*CAPÍTULO 1. PREDISEÑO DE LA ESTRUCTURA COMPLETA*”.

2.1.1. Correas

Las correas, sobre las que apoyan los cerramientos, son perfiles C conformados en caliente. Para su selección, se define una separación de 1.5 metros en cubierta y 1.26 metros en fachadas frontales y laterales. Para ambos casos se emplean correas continuas entre dos vanos ($L=12$ metros), imponiendo una flecha máxima $L/250$.

- Correas de cubierta: CC 250x2.0
- Correas de fachada lateral: CC 180x2.0
- Correas de fachada frontal: CC 200x2.0
- Tubos fachada sin viento: tubo cuadrado 80x80x3 (sustituyen a las correas)

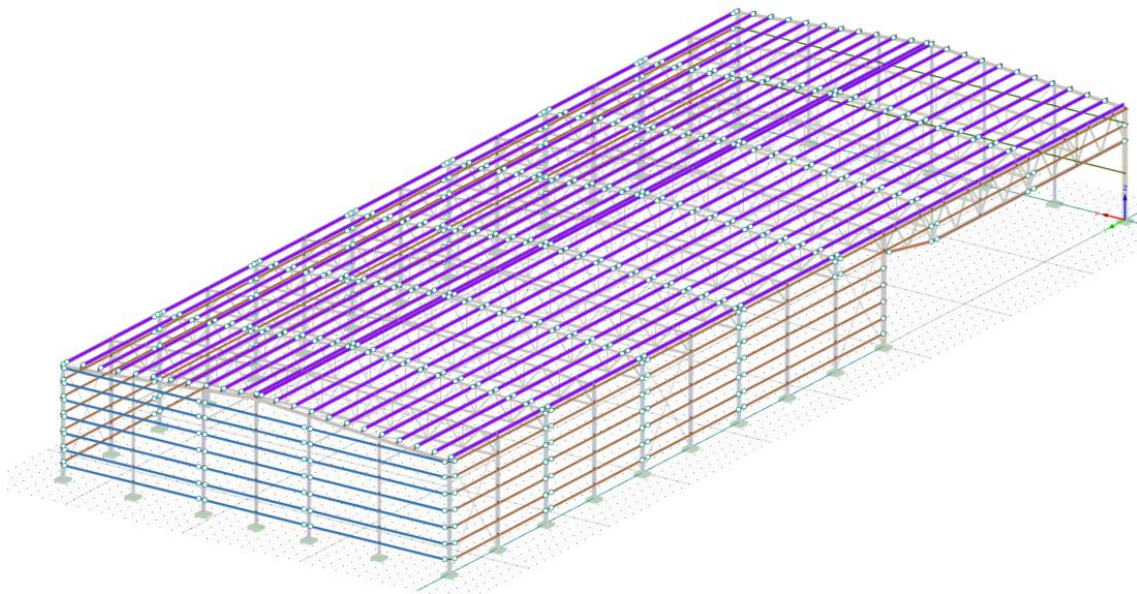


Imagen 2.1. Correas: Predimensión perfiles

2.1.2. Cercha

Primero estudiaremos la cercha del pórtico principal y la disposición de sus cordones, diagonales y montantes. Para ello, se ha realizado un análisis detallado de tres configuraciones diferentes de cerchas (ver *ANEXO I. Predimensión de los perfiles*).

Finalmente, debido a todas las ventajas que presenta frente a las demás, se ha optado por diseñar una configuración de cercha inglesa. A partir del modelo generado anteriormente, se simulan diferentes cerchas inglesas variando su geometría. Tras varias iteraciones se ha diseñado una cercha con la geometría de la *Imagen 2.2*.

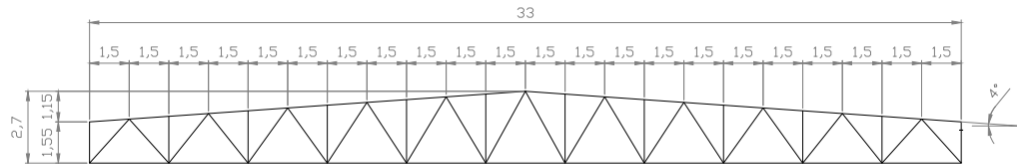


Imagen 2.2 Cercha. Geometría

Con esta disposición obtenemos, tanto un buen aprovechamiento de las diagonales (ángulos entre 30° y 60°), como una flecha y una capacidad resistente óptima. Además, no excede los 3 metros de altura (incluyendo ejiones), lo cual facilitará su posterior transporte. La pendiente de cubierta es del 7%, el mínimo establecido por el fabricante para poder instalar el panel sándwich.

Los perfiles seleccionados son los marcados en la *Imagen 2.3*:

- Cordon superior: HEA 140
- Cordon inferior: HEA 140
- Diagonales grupo I: HEA 100
- Diagonales grupo II: Tubo cuadrado 80x80x3
- Diagonales grupo III: Tubo rectangular 70x50x3
- Montantes: Tubo rectangular 70x40x3

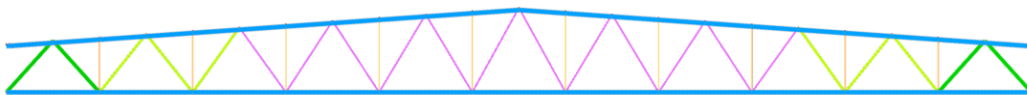


Imagen 2.3 Cercha. Predimensión perfiles

2.1.3. Pilares principales

Se predimensionan los pilares principales con un perfil HEA 240, excepto los pilares de los extremos de la puerta para camiones, para los que se selecciona HEB 260.

2.1.4. Pórtico de cierre

Se predimensiona el pórtico de cierre con los perfiles reflejados en la *Imagen 2.4*:

- Pilares principales: HEA 240
- Pilares hastiales fachada con viento: IPE 270
- Pilares hastiales fachada sin viento: IPE 240
- Dintel: IPE 220

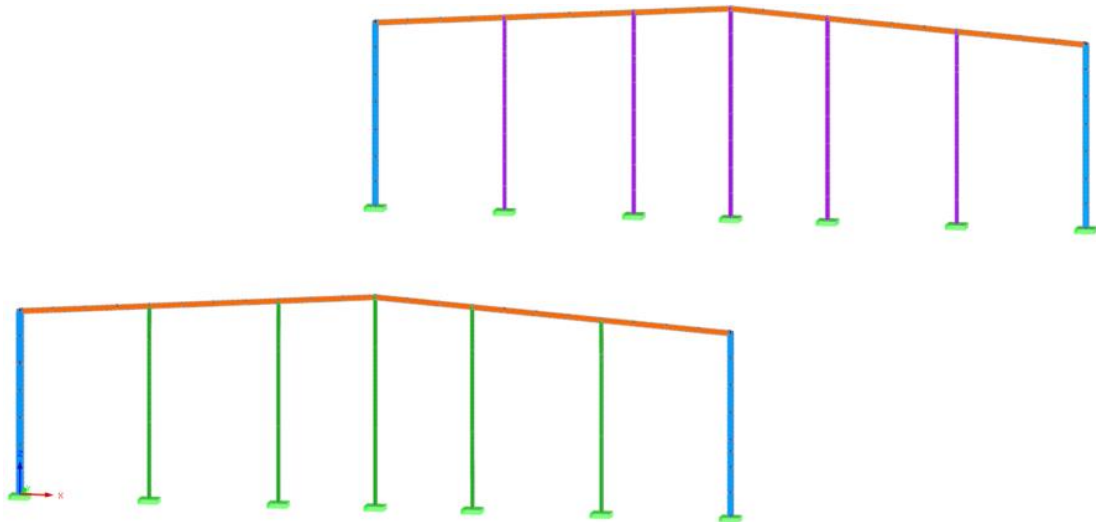


Imagen 2.4. Pórticos de Cierre. Predimensión perfiles

2.1.5. Puerta

La longitud de la puerta exigida por el cliente es de 30 metros y la altura del hueco debe ser de un mínimo de 5 metros de altura, pues debe poder acceder un camión a través de ella. Para cumplir con estas demandas, se decide diseñar una celosía entre los dos pilares extremos de la puerta.

Por criterios, tanto estéticos como resistentes, se emplea una configuración de cercha inglesa, análogo a los pórticos principales. Al fin y al cabo, se ha comprobado en el apartado “2.1.2 Cercha” que para esta estructura y con luces de 30 metros es la más interesante.

La configuración definitiva diseñada, se muestra en la Imagen 2.5.

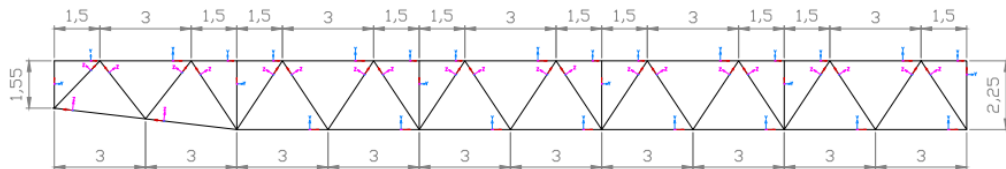


Imagen 2.5 Puerta para Camiones. Geometría

Los perfiles seleccionados inicialmente para la celosía y los pilares de la puerta son:

- Cordón superior: HEA 220
- Cordón inferior: HEA 220
- Diagonales: HEA 100
- Montantes: HEA 140 (igual que cordón superior cercha que une)

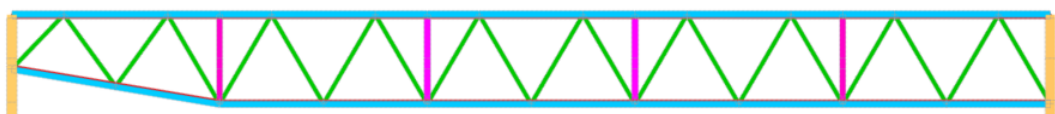


Imagen 2.6. Puerta para Camiones. Predimensión perfiles

2.1.6. Arriostramientos

Los tubos de compresión que unen los cordones inferiores de la cercha se predimensionan para que no excedan una esbeltez reducida de 2. Se emplea un perfil de tubo hueco cuadrado 80x80x3.

En el caso de los arriostramientos en fachada y cubierta, aplicando el mismo principio, se emplean:

- × Tubos compresión: Tubo hueco cuadrado 80x80x3
- × Cruz de San Andrés: Redondos macizos $\varnothing 30$

2.2. Generación del modelo de elementos finitos 3D

Una vez descritas las cargas y la geometría de la estructura; así como, la tipología y disposición de los perfiles, se puede proceder a su modelado tridimensional en un programa de simulación con elementos finitos.

El programa empleado es “*RFEM*” de *Dlubal*. Se trata de un software de análisis estructural por elementos finitos que permite modelar, calcular y dimensionar modelos estructurales 2D y 3D tanto de elementos tipo barra (que son los estudiados en este trabajo), como de tipo placa, muro, lámina o sólido. Además del programa principal, también se puede conectar con los distintos módulos adicionales con los que se realizan otras comprobaciones individuales. Concretamente en este trabajo, se realiza un análisis de estabilidad global con el módulo “*RF-STABILITY*”.

El modelo de cálculo consiste en una estructura modular de 15 pórticos separados 6 metros entre ellos. Se mantiene la luz de 33 metros, la pendiente del 7%, la altura libre de 7 metros y el hueco en la fachada con 30 metros libres de pilares.

Las correas, sobre las que apoyan los cerramientos, son perfiles C conformados en caliente con una separación de 1.5 metros en cubierta y 1.26 metros en fachadas frontales y laterales.

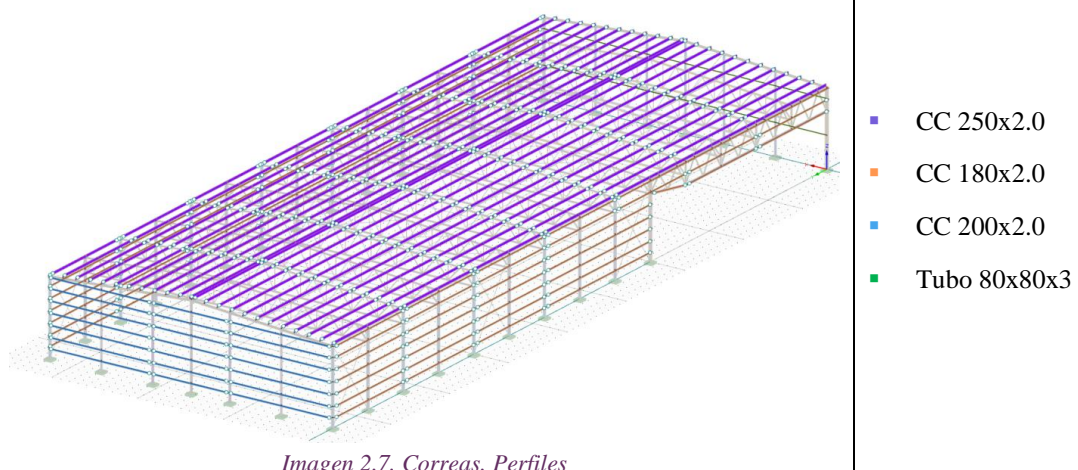


Imagen 2.7. Correas. Perfiles

Los pórticos principales están conformados por cerchas con perfiles HEA, orientados con su eje fuerte perpendicular al plano del pórtico, en sus cordones y primeras dos diagonales de cada extremo. Las diagonales que restan se dividen en dos grupos con perfiles de tubo cuadrado 80x80x3 y tubo rectangular 70x50x3, en función de los esfuerzos y las

comprobaciones resistentes. La totalidad de los montantes se definen con perfiles rectangulares 70x40x3. Buscando una mayor rigidez, se suben las cabezas de los pilares principales hasta el cordón superior de la cercha, eliminando el primer montante de las mismas. El perfil de dichos pilares es un perfil en I, el cual varía en función del grupo de pórticos que se considere.

Se diseñan tres grupos distintos de pórticos principales. Se diferencia son los perfiles empleados en los cordones de la cercha y en los pilares. Es en los pórticos en los cuales se eliminan los pilares para abrir el hueco en fachada, donde se deberán emplear perfiles de mayor rango.

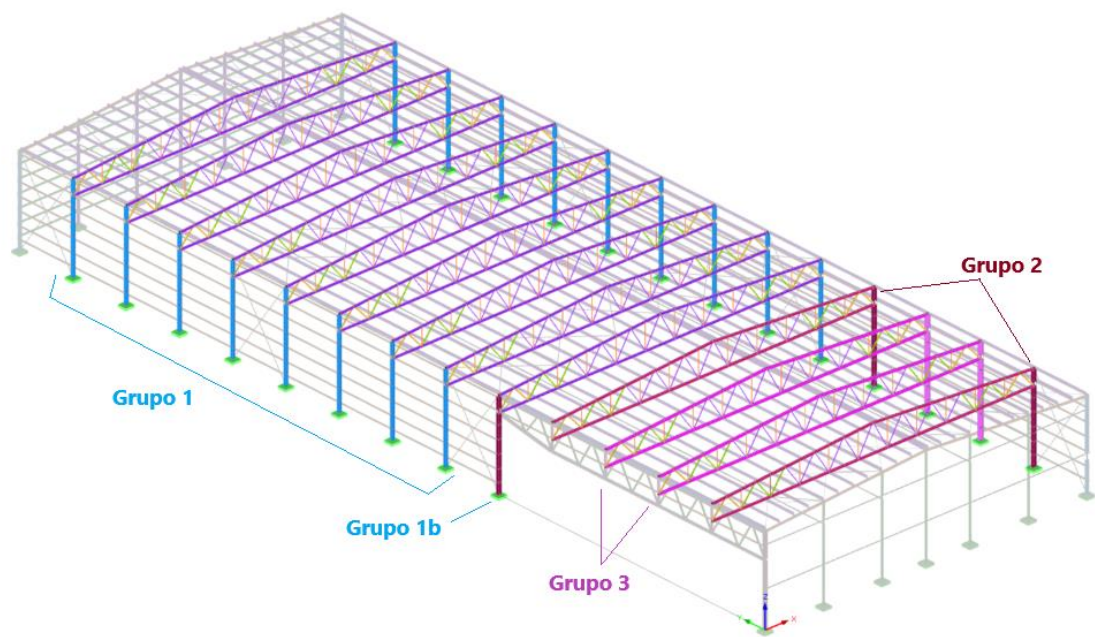


Imagen 2.8. Grupos pórticos principales. Perfiles

- **Grupo 1:** pórticos tipo. Lo conforman todos los pórticos que no están en la zona del hueco en fachada. Dentro de este grupo se define un subgrupo 1b en el cual la única divergencia es el perfil del pilar izquierdo: HEB 280

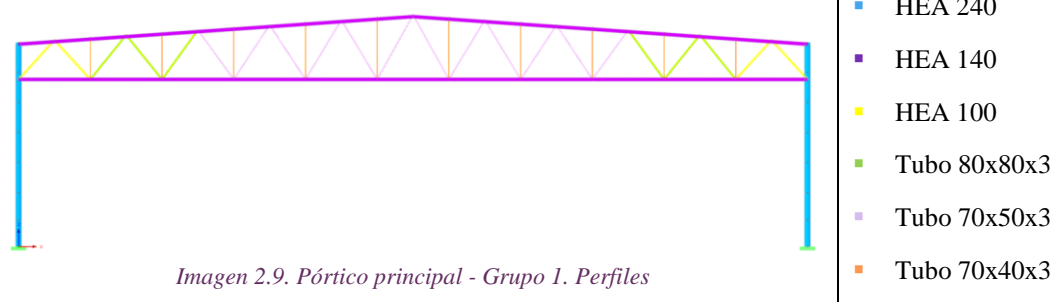
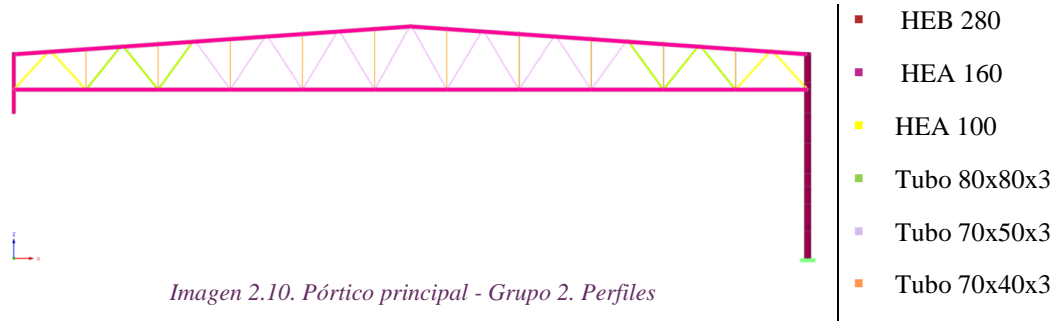
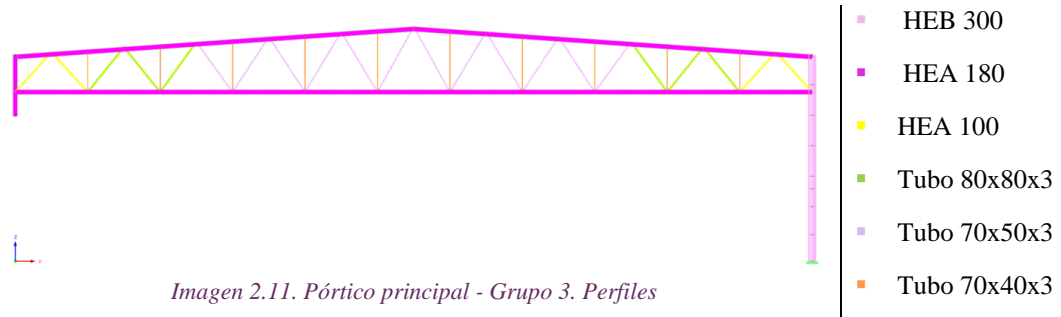


Imagen 2.9. Pórtico principal - Grupo 1. Perfiles

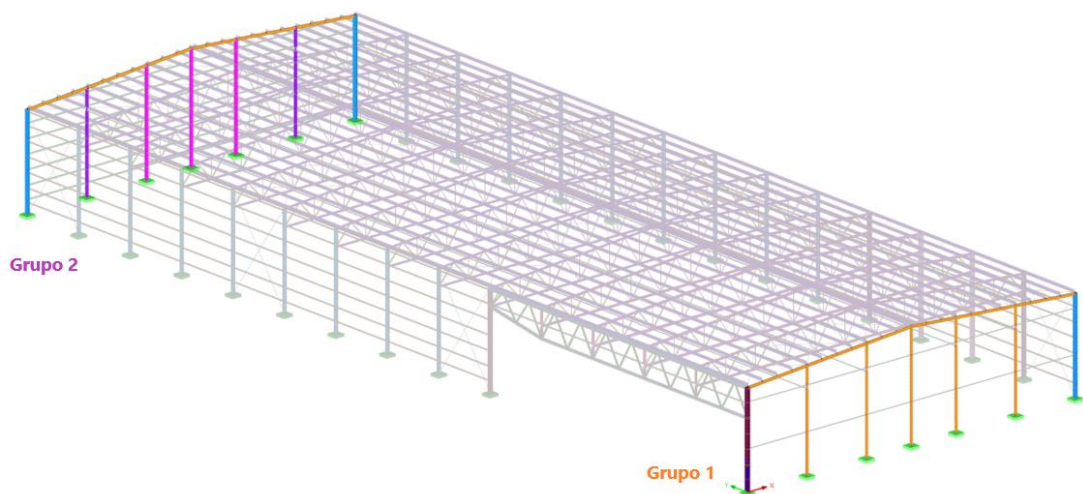
- **Grupo 2:** pórticos 2 y 5. Corresponde con las cerchas que descansan en las zonas de los extremos de la puerta y, al no haber pilares es su extremo izquierdo, la estructura demanda una mayor rigidez.



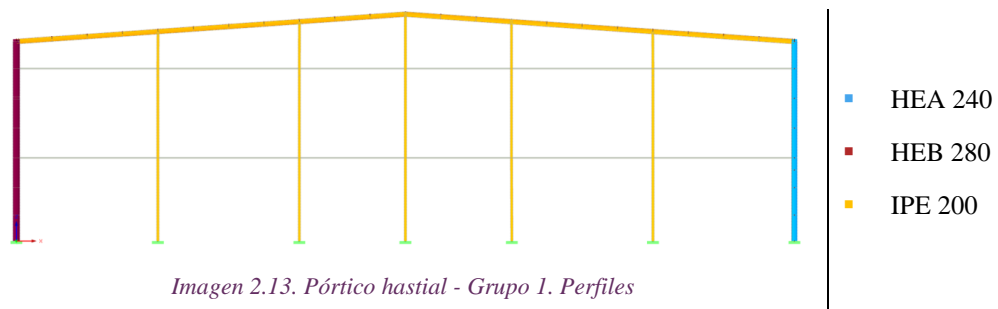
- **Grupo 3:** pórticos 3 y 4. Sus cerchas descansan en la zona central de la puerta. Son los pórticos en los cuales se registran mayores desplazamientos verticales; por tanto, serán los que estarán conformados por perfiles más rígidos.



En lo que respecta a los pórticos de cierre, tampoco son análogos entre ellos, al fin y al cabo, no están expuestos a solicitaciones del mismo orden.



- **Grupo 1:** fachada anexa a la nave existente



■ Grupo 2: fachada expuesta.

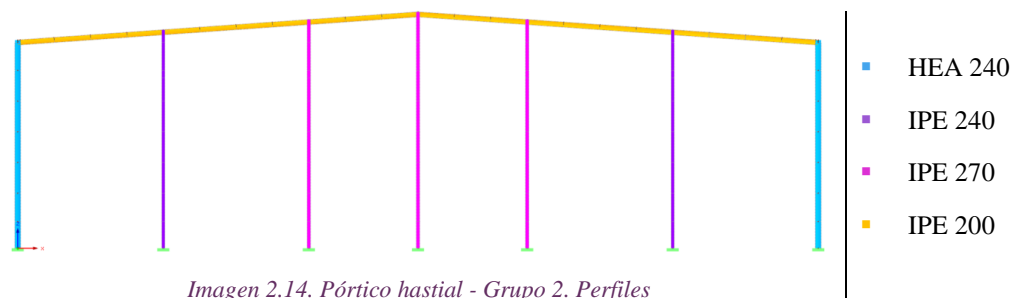


Imagen 2.14. Pórtico hastial - Grupo 2. Perfiles

La celosía de la puerta de camiones está compuesta por perfiles HEA con su eje fuerte perpendicular a este plano. Los pilares en sus extremos son perfiles HEB 280.

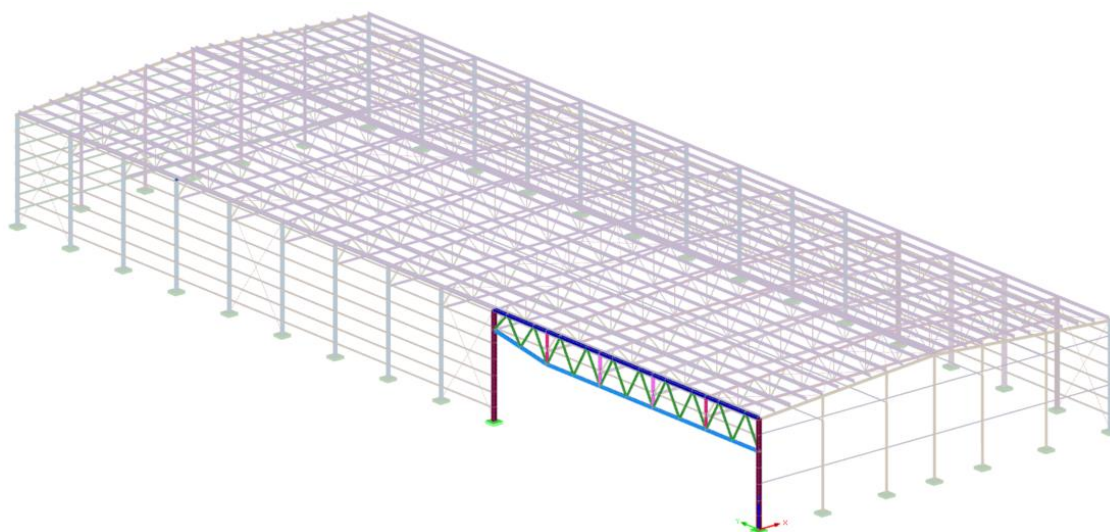


Imagen 2.15. Puerta camiones I. Perfiles

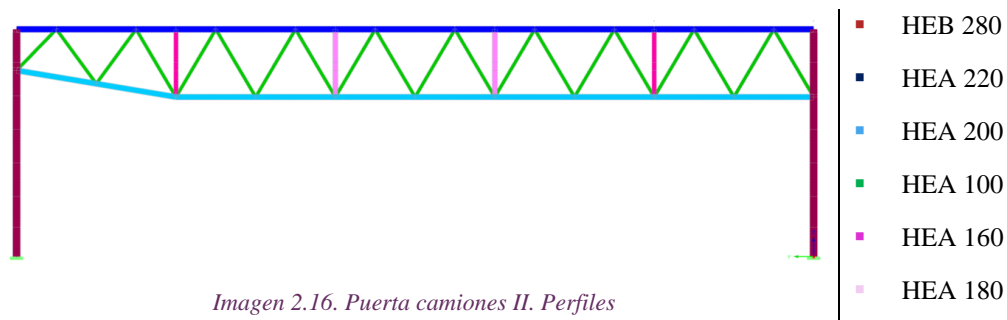


Imagen 2.16. Puerta camiones II. Perfiles

El arriostrado de la estructura y de los cordones inferiores de las cerchas se realiza con tubos 80x80x3 y las cruces de San Andrés con redondos de diámetro 30 mm.

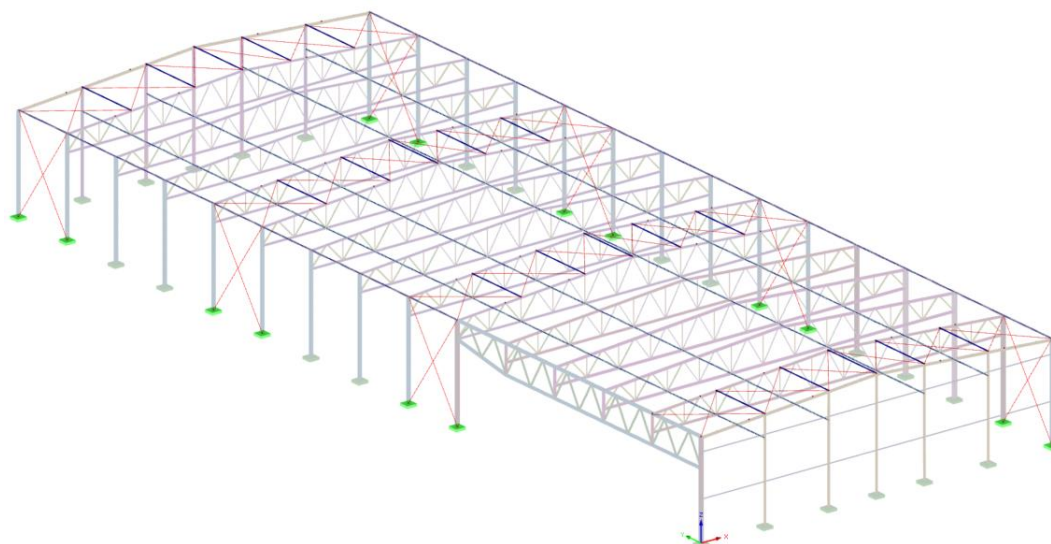


Imagen 2.17. Arriostramientos. Perfiles

2.3. Casos de carga individuales

Las acciones que actúan sobre la estructura se obtienen a partir del “Documento Básico de Seguridad Estructural. Acciones en la edificación” (DBSE-AE). Entre dichas acciones se contemplan las correspondientes a:

- Cargas Permanentes: propias de la estructura (perfiles, cerramientos, correas, ...).
- Sobrecarga de Uso: en la cubierta (cubierta de ligera no concomitante con el resto de las acciones).
- Nieve: en cubierta.
- Viento: sobre las fachas y en cada una de las direcciones características. También se tiene en cuenta el hueco de la puerta y sus dimensiones.

El procedimiento seguido para su obtención queda descrito en el “*ANEXO III. Acciones*”

2.3.1. Carga Permanente

La carga permanente es la aportada por los elementos que conforman la estructura. A parte de la estructura principal, también influyen otros elementos como son las correas y los cerramientos de fachada y cubierta.

Para los cerramientos se ha seleccionado los siguientes elementos del proveedor Europerfil que cumplen con las distancias y fuerzas máximas admisibles de nuestra edificación:

Zona	Cerramiento	Peso propio (kN/m ²)
Cubierta	Panel sándwich	0.101
Fachada lateral	Chapa grecada e = 6mm	0.06
Fachada Hastial	Chapa grecada e = 6mm	0.06

Tabla 2.1. Cargas - Cerramientos

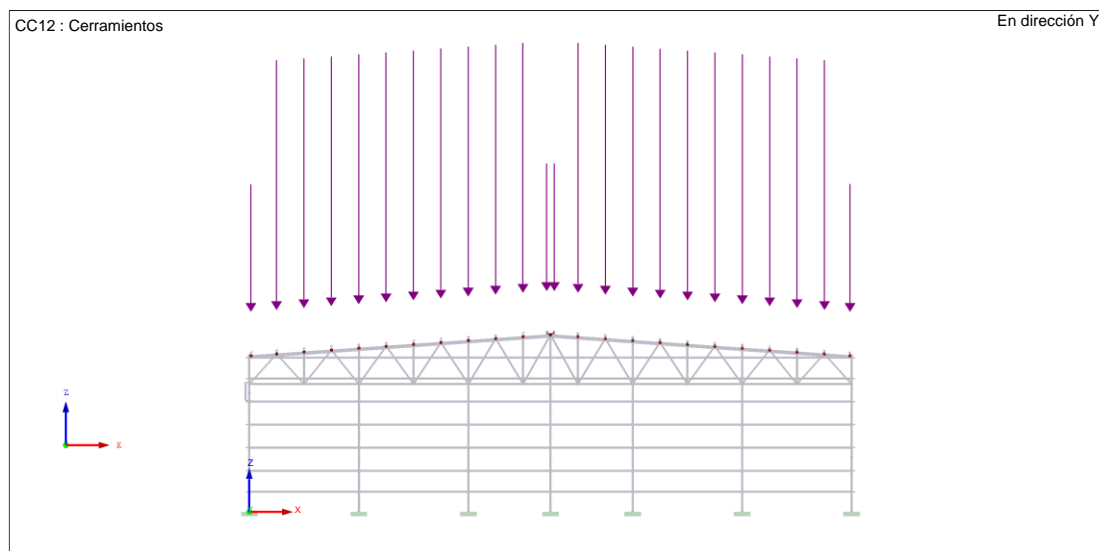


Imagen 2.18. Carga permanente - Cerramientos. Correas cubierta

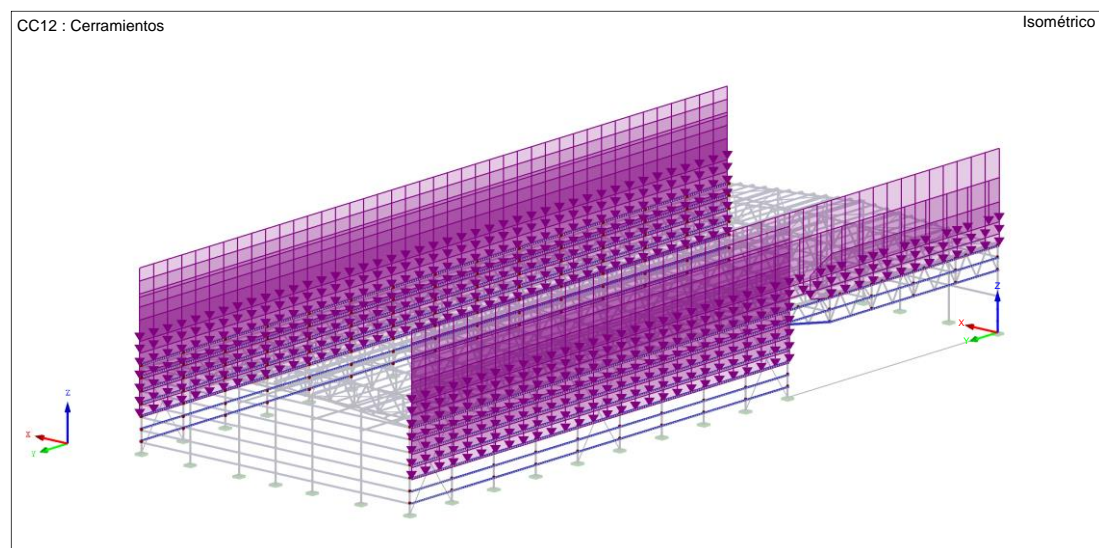


Imagen 2.19. Carga permanente - Cerramientos. Correas laterales

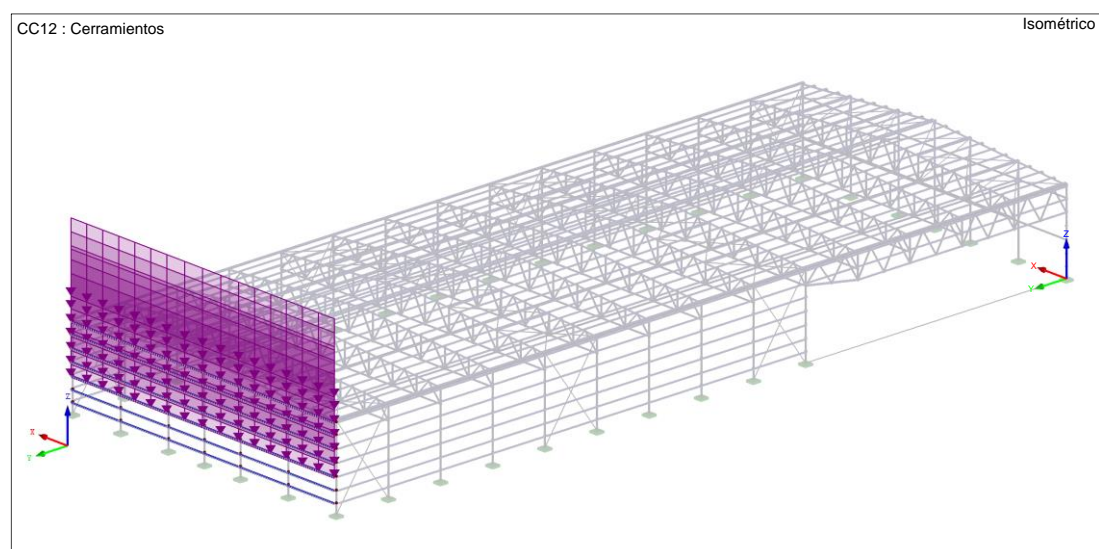


Imagen 2.20. Carga permanente - Cerramientos. Correas frontales

2.3.2. Nieve

- Malpica, Zaragoza (Altitud=221, Zona 2) = 0.5105 kN/m^2

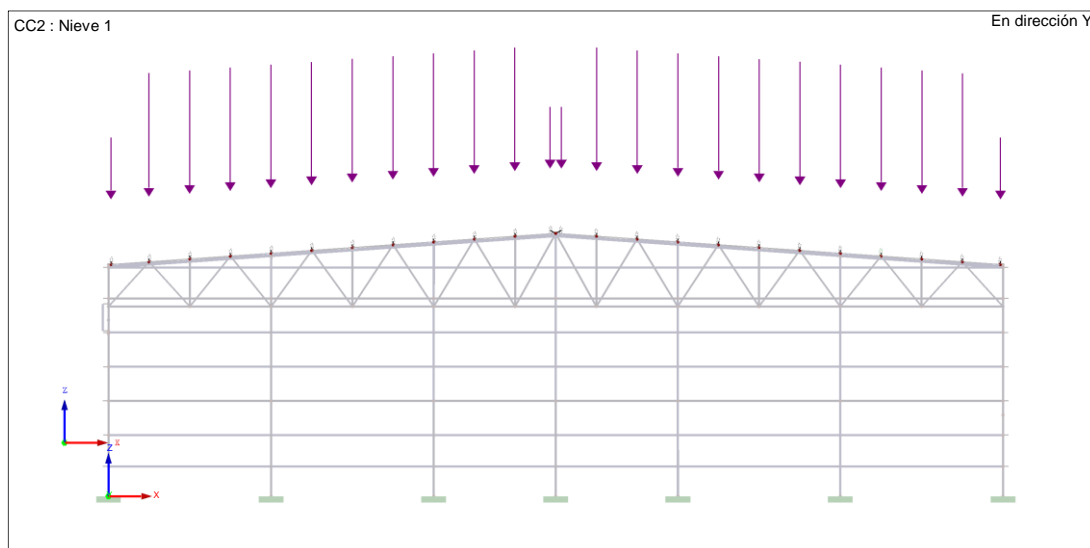


Imagen 2.21. Carga nieve

2.3.3. Viento

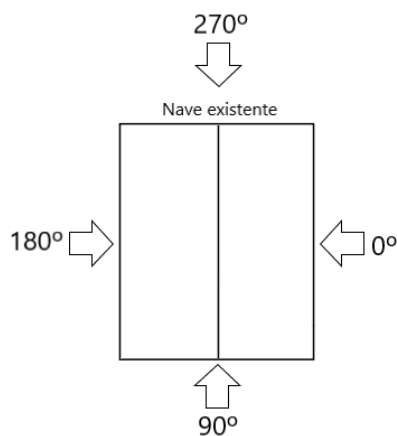


Imagen 2.22. Hipótesis Viento

- Presiones interiores [kN/m^2]

V1 (0°)	V2 (90°)	V3 (180°)	V4 (270°)
0.379	-0.271	-0.162	-0.271

Tabla 2.2. Cargas - Presiones interiores

- Hipótesis V1 (0°)

LATERAL [kN/m^2]					CUBIERTA [kN/m^2]			
A	B	C	D	E	F	G	H	I
-0.952	-0.635	-0.397	0.56	-0.247	-1.428	-0.952	-0.555	± 0.159

Tabla 2.3. Cargas - Hipótesis V1

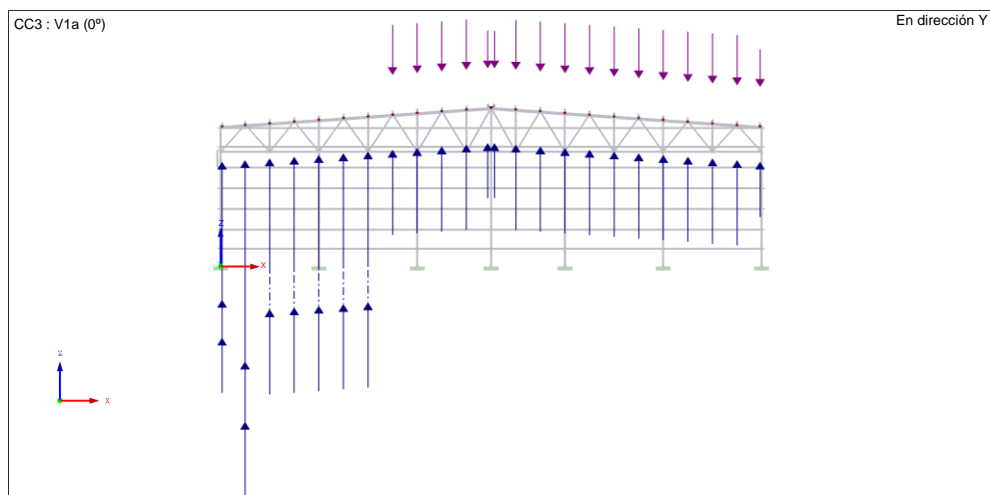


Imagen 2.23. Carga viento - V1a. Correas cubierta

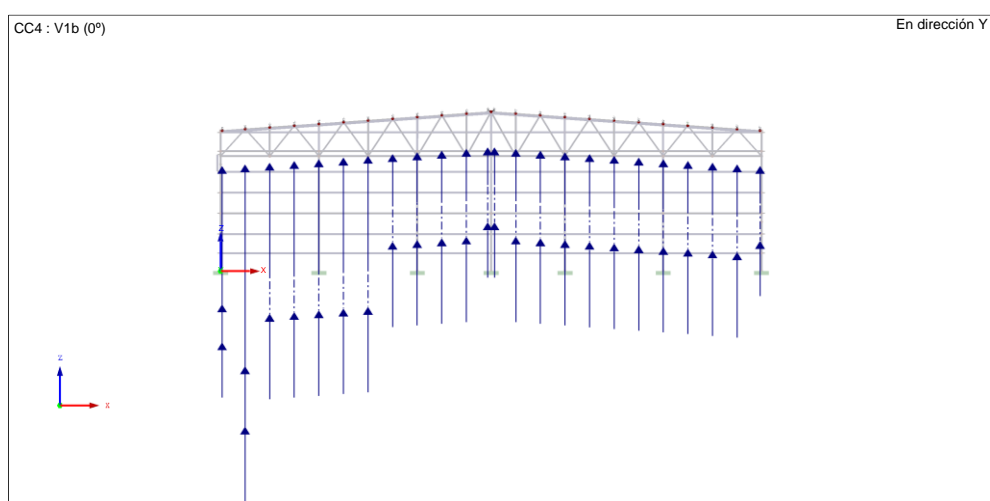


Imagen 2.24. Carga viento - V1b. Correas cubierta

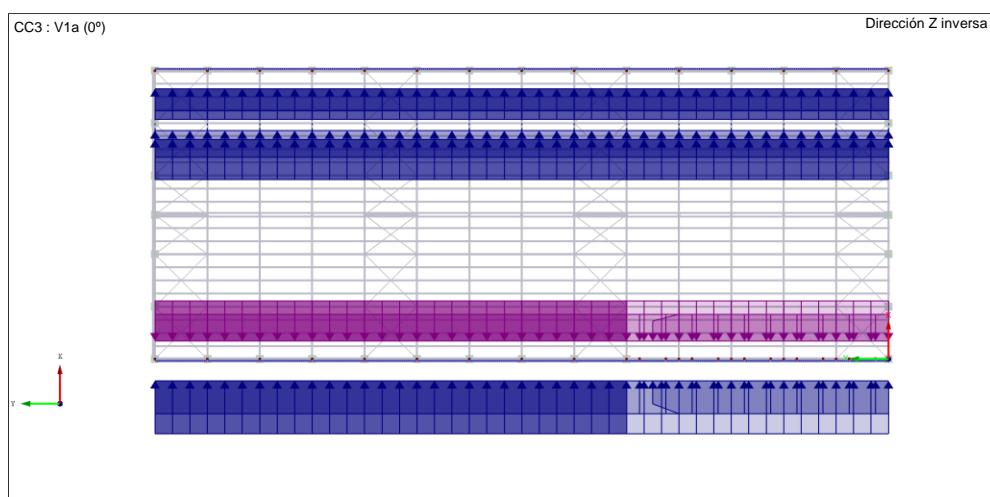


Imagen 2.25. Carga viento - V1. Correas laterales

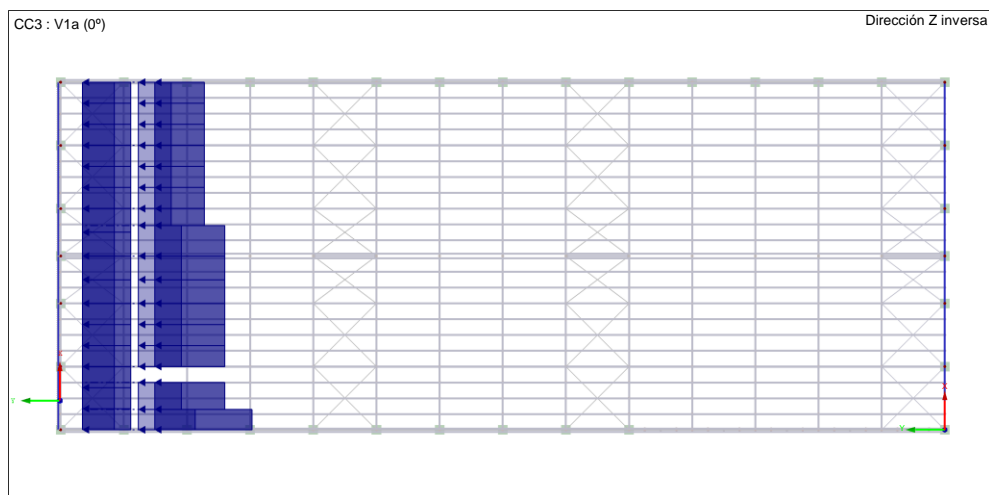


Imagen 2.26. Carga viento - V1. Correas frontales

– Hipótesis V2 (90°)

LATERAL [kN/m ²]					CUBIERTA [kN/m ²]			
A	B	C	D	E	F	G	H	I
-0.952	-0.635	-0.397	0.555	-0.238	-1.428	-0.952	-0.555	±0.159

Tabla 2.4. Cargas - Hipótesis V2

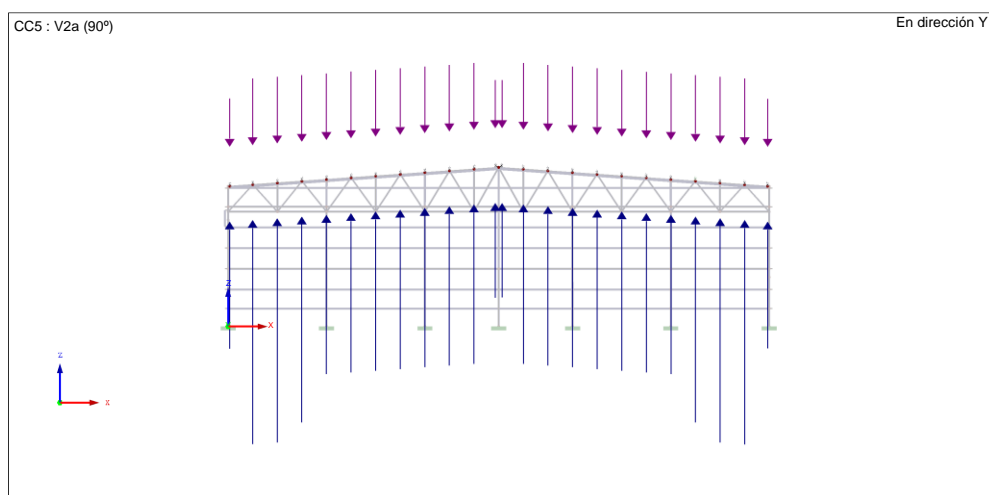


Imagen 2.27. Carga viento – V2a. Correas cubierta

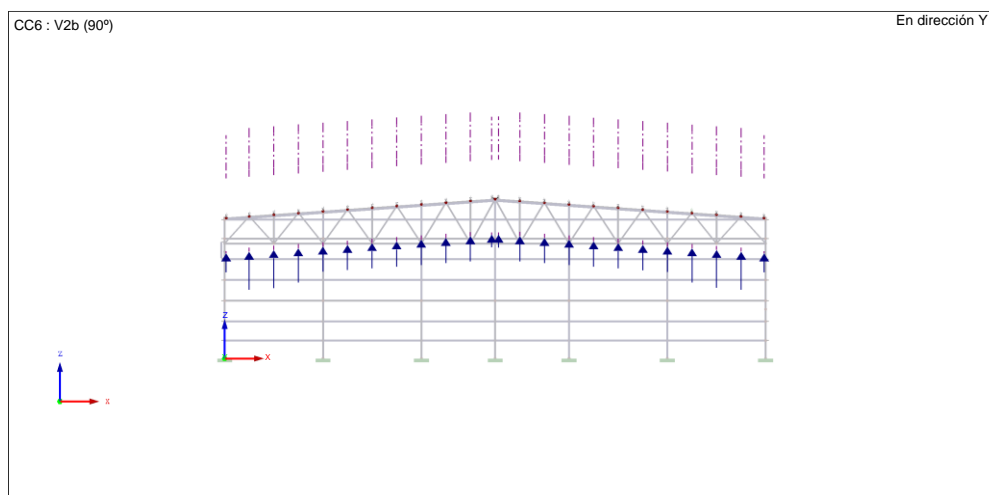


Imagen 2.28. Carga viento – V2b. Correas cubierta

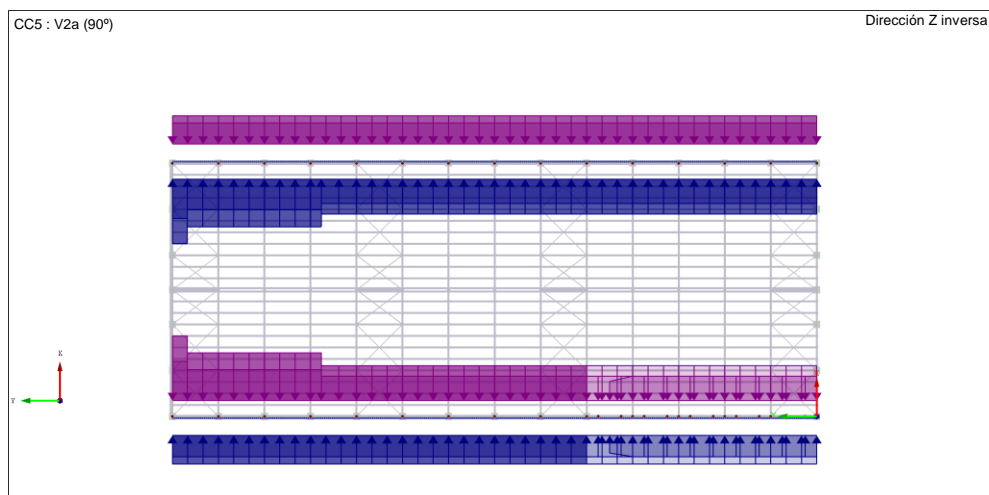


Imagen 2.29. Carga viento – V2. Correas laterales

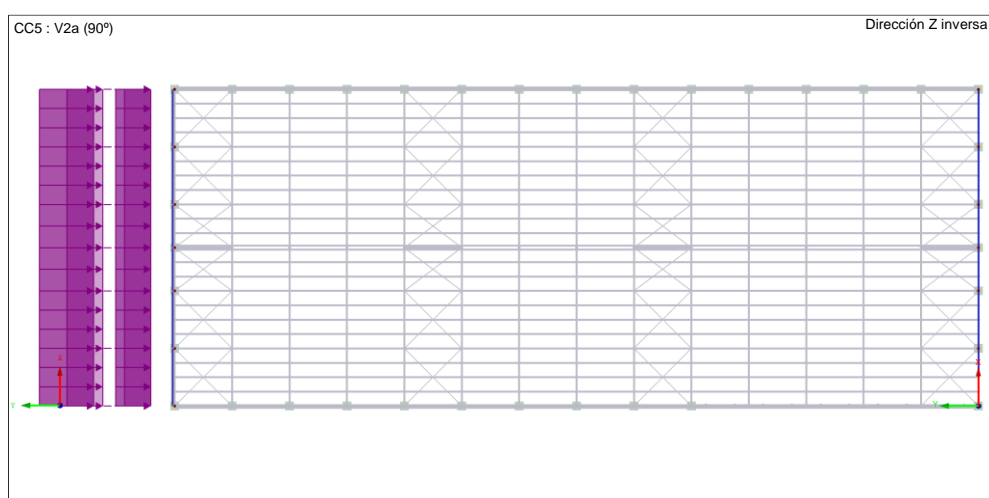


Imagen 2.30. Carga viento – V2. Correas frontales

– Hipótesis V3 (180°)

LATERAL [kN/m ²]					CUBIERTA [kN/m ²]			
A	B	C	D	E	F	G	H	I
-0.952	-0.635	-0.397	0.560	-0.247	-1.428	-0.952	-0.555	±0.159

Tabla 2.5. Cargas - Hipótesis V3

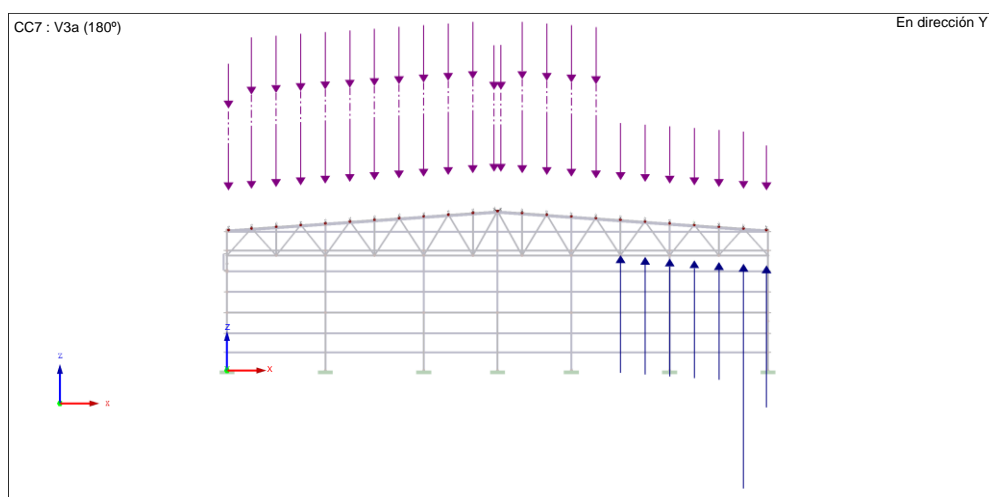


Imagen 2.31. Carga viento – V3a. Correas cubierta

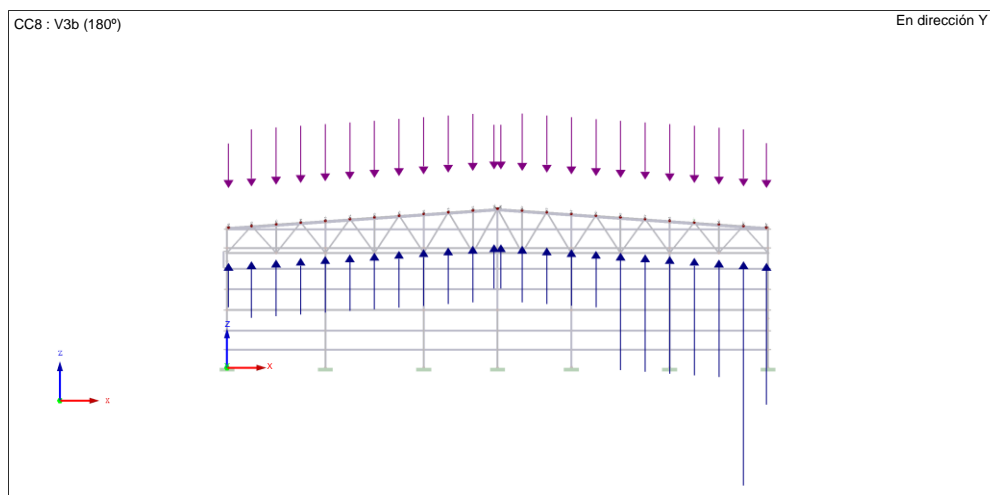


Imagen 2.32. Carga viento – V3b. Correas cubierta

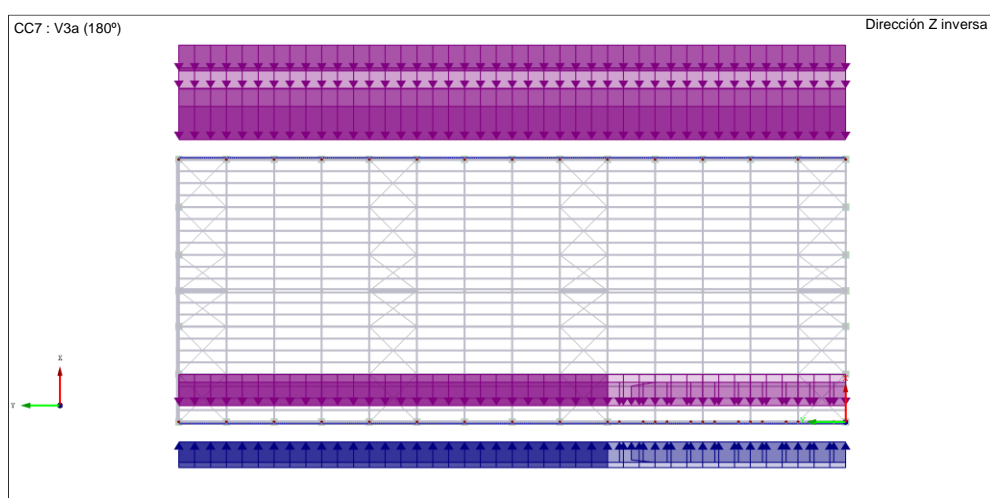


Imagen 2.33. Carga viento – V3. Correas laterales

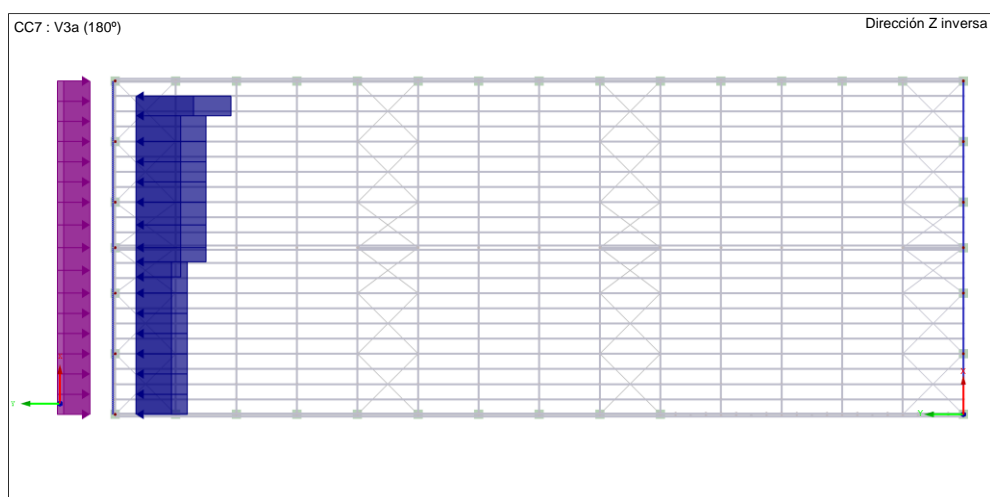


Imagen 2.34. Carga viento – V3. Correas frontales

– Hipótesis V4 (270°)

LATERAL [kN/m ²]					CUBIERTA [kN/m ²]			
A	B	C	D	E	F	G	H	I
	-0.397		0.555	-0.238	±0.159			

Tabla 2.6. Cargas - Hipótesis V4

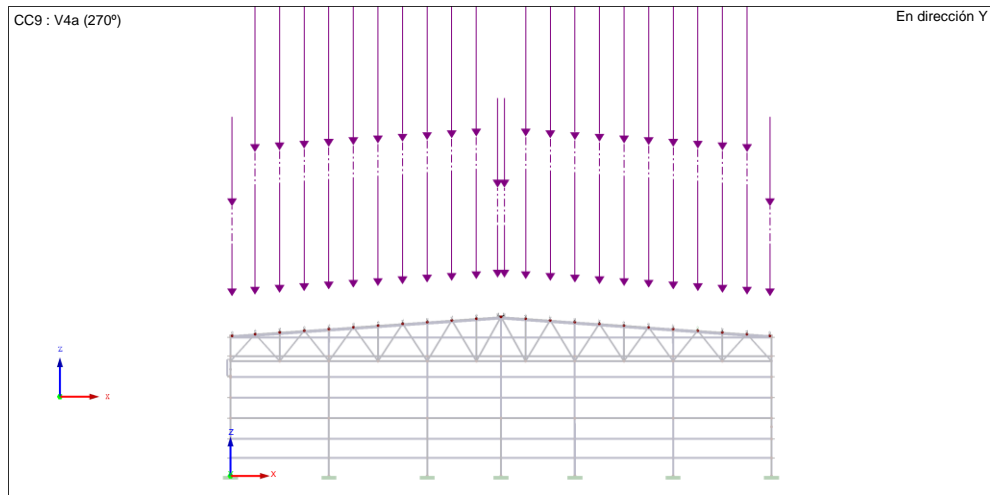


Imagen 2.35. Carga viento – V4a. Correas cubierta

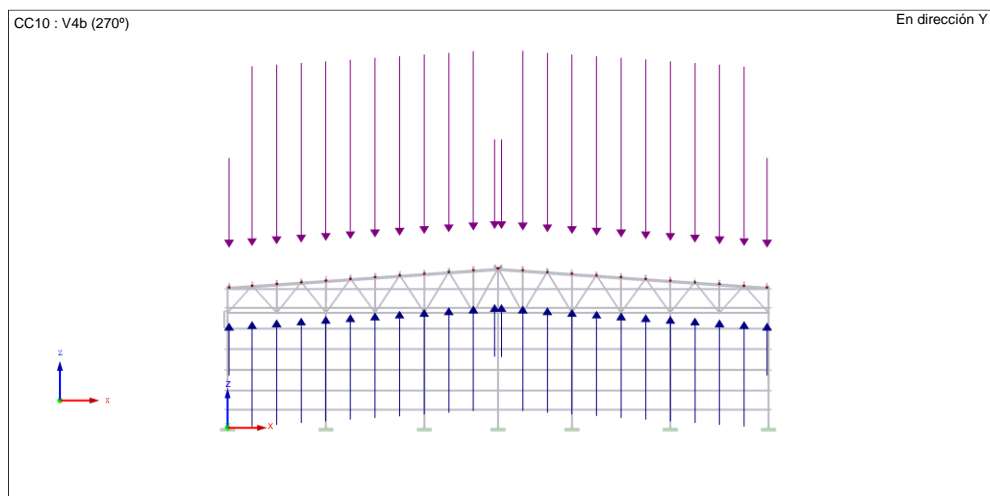


Imagen 2.36. Carga viento – V4b. Correas cubierta

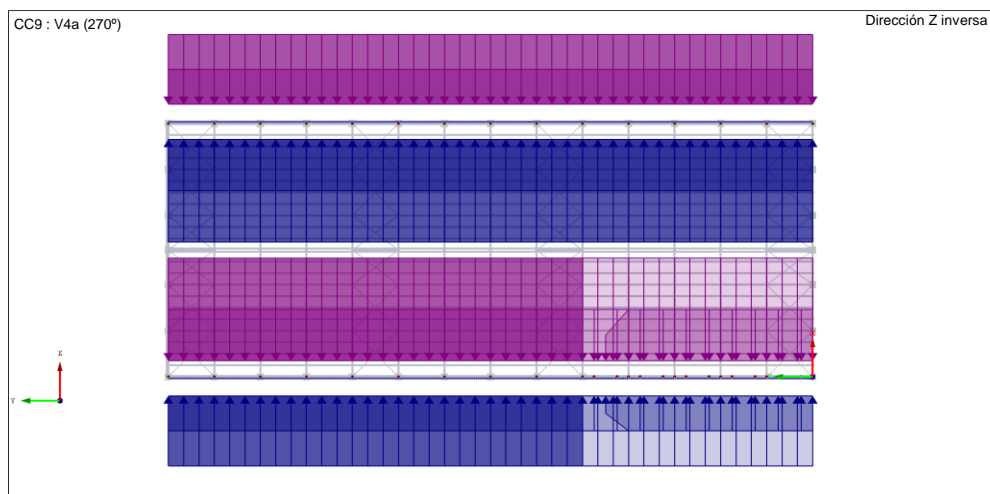


Imagen 2.37. Carga viento – V4. Correas laterales

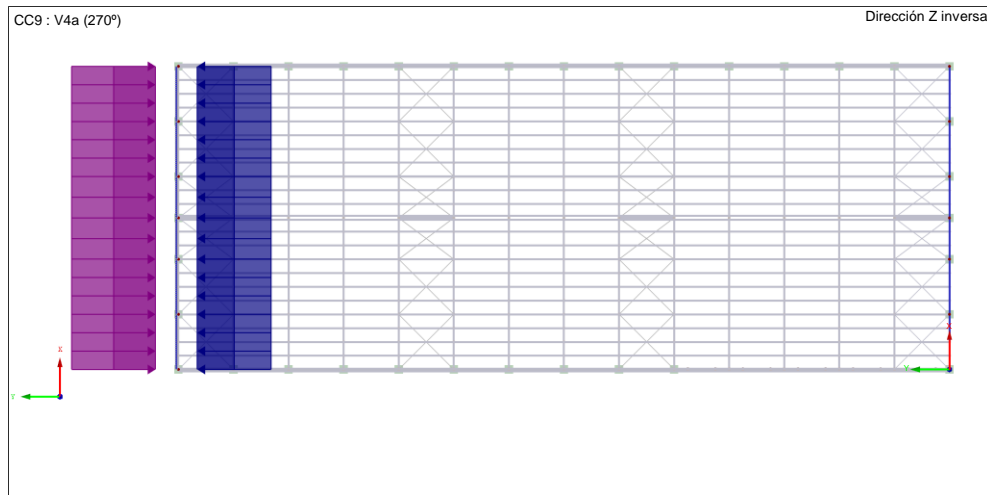


Imagen 2.38. Carga viento – V4. Correas frontales

2.4. Hipótesis de carga consideradas

Para realizar las comprobaciones necesarias sobre la estructura, se realiza el análisis de la respuesta estructural ante cada uno de los casos individuales de carga. Posteriormente, se busca la combinación de cargas más desfavorable, con su caso de carga variable dominante, para cada elemento.

En este caso se realizan las comprobaciones para las combinaciones de carga:

- Estado Límite Último: situación persistente
- Estado Límite de Servicio: combinación característica

Para cada una, se emplean los siguientes coeficientes:

	Carga Permanente	Nieve	Viento
Desfavorable (γ)	1.35	1.5	1.5
Favorable (γ)	0.8	0	0
Concomitancia (ψ_0)	-	0.5	0.6
ELU	$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$		
ELS	$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$		

Tabla 2.7. Coeficientes Estados Límite

La lista total de hipótesis considerada es la siguiente:

Comb. de carga	Descripción	CC.1		CC.2		CC.3		CC.4	
		Factor	Núm.	Factor	Núm.	Factor	Núm.	Factor	Núm.
CO1	1.35*CC1 + 1.35*CC12	1.35	CC1	1.35	CC12				
CO2	1.35*CC1 + 1.5*CC2 + 1.35*CC12	1.35	CC1	1.50	CC2	1.35	CC12		
CO3	1.35*CC1 + 1.5*CC2 + 0.9*CC3 + 1.35*CC12	1.35	CC1	1.50	CC2	0.90	CC3	1.350	CC12

CO4	$1.35*CC1 + 1.5*CC2 + 0.9*CC4 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC2	0.90	CC4	1.350	CC12
CO5	$1.35*CC1 + 1.5*CC2 + 0.9*CC5 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC2	0.90	CC5	1.350	CC12
CO6	$1.35*CC1 + 1.5*CC2 + 0.9*CC6 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC2	0.90	CC6	1.350	CC12
CO7	$1.35*CC1 + 1.5*CC2 + 0.9*CC7 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC2	0.90	CC7	1.350	CC12
CO8	$1.35*CC1 + 1.5*CC2 + 0.9*CC8 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC2	0.90	CC8	1.350	CC12
CO9	$1.35*CC1 + 1.5*CC2 + 0.9*CC9 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC2	0.90	CC9	1.350	CC12
CO10	$1.35*CC1 + 1.5*CC2 + 0.9*CC10 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC2	0.90	CC10	1.350	CC12
CO11	$1.35*CC1 + 1.5*CC3 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC3	1.35	CC12		
CO12	$1.35*CC1 + 1.5*CC4 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC4	1.35	CC12		
CO13	$1.35*CC1 + 1.5*CC5 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC5	1.35	CC12		
CO14	$1.35*CC1 + 1.5*CC6 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC6	1.35	CC12		
CO15	$1.35*CC1 + 1.5*CC7 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC7	1.35	CC12		
CO16	$1.35*CC1 + 1.5*CC8 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC8	1.35	CC12		
CO17	$1.35*CC1 + 1.5*CC9 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC9	1.35	CC12		
CO18	$1.35*CC1 + 1.5*CC10 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	1.50	CC10	1.35	CC12		
CO19	$1.35*CC1 + 0.75*CC2 + 1.5*CC3 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	0.75	CC2	1.50	CC3	1.350	CC12
CO20	$1.35*CC1 + 0.75*CC2 + 1.5*CC4 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	0.75	CC2	1.50	CC4	1.350	CC12
CO21	$1.35*CC1 + 0.75*CC2 + 1.5*CC5 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	0.75	CC2	1.50	CC5	1.350	CC12
CO22	$1.35*CC1 + 0.75*CC2 + 1.5*CC6 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	0.75	CC2	1.50	CC6	1.350	CC12
CO23	$1.35*CC1 + 0.75*CC2 + 1.5*CC7 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	0.75	CC2	1.50	CC7	1.350	CC12
CO24	$1.35*CC1 + 0.75*CC2 + 1.5*CC8 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	0.75	CC2	1.50	CC8	1.350	CC12
CO25	$1.35*CC1 + 0.75*CC2 + 1.5*CC9 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	0.75	CC2	1.50	CC9	1.350	CC12
CO26	$1.35*CC1 + 0.75*CC2 + 1.5*CC10 + 1.35*CC12$	1.35	CC1	0.75	CC2	1.50	CC10	1.350	CC12
CO27	$CC1 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC12				
CO28	$CC1 + CC2 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC2	1.00	CC12		
CO29	$CC1 + CC2 + 0.6*CC3 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC2	0.60	CC3	1.000	CC12
CO30	$CC1 + CC2 + 0.6*CC4 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC2	0.60	CC4	1.000	CC12
CO31	$CC1 + CC2 + 0.6*CC5 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC2	0.60	CC5	1.000	CC12
CO32	$CC1 + CC2 + 0.6*CC6 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC2	0.60	CC6	1.000	CC12
CO33	$CC1 + CC2 + 0.6*CC7 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC2	0.60	CC7	1.000	CC12
CO34	$CC1 + CC2 + 0.6*CC8 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC2	0.60	CC8	1.000	CC12
CO35	$CC1 + CC2 + 0.6*CC9 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC2	0.60	CC9	1.000	CC12
CO36	$CC1 + CC2 + 0.6*CC10 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC2	0.60	CC10	1.000	CC12
CO37	$CC1 + CC3 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC3	1.00	CC12		
CO38	$CC1 + CC4 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC4	1.00	CC12		
CO39	$CC1 + CC5 + CC12$	1.00	CC1	1.00	CC5	1.00	CC12		

CO40	CC1 + CC6 + CC12	1.00	CC1	1.00	CC6	1.00	CC12		
CO41	CC1 + CC7 + CC12	1.00	CC1	1.00	CC7	1.00	CC12		
CO42	CC1 + CC8 + CC12	1.00	CC1	1.00	CC8	1.00	CC12		
CO43	CC1 + CC9 + CC12	1.00	CC1	1.00	CC9	1.00	CC12		
CO44	CC1 + CC10 + CC12	1.00	CC1	1.00	CC10	1.00	CC12		
CO45	CC1 + 0.5*CC2 + CC3 + CC12	1.00	CC1	0.50	CC2	1.00	CC3	1.000	CC12
CO46	CC1 + 0.5*CC2 + CC4 + CC12	1.00	CC1	0.50	CC2	1.00	CC4	1.000	CC12
CO47	CC1 + 0.5*CC2 + CC5 + CC12	1.00	CC1	0.50	CC2	1.00	CC5	1.000	CC12
CO48	CC1 + 0.5*CC2 + CC6 + CC12	1.00	CC1	0.50	CC2	1.00	CC6	1.000	CC12
CO49	CC1 + 0.5*CC2 + CC7 + CC12	1.00	CC1	0.50	CC2	1.00	CC7	1.000	CC12
CO50	CC1 + 0.5*CC2 + CC8 + CC12	1.00	CC1	0.50	CC2	1.00	CC8	1.000	CC12
CO51	CC1 + 0.5*CC2 + CC9 + CC12	1.00	CC1	0.50	CC2	1.00	CC9	1.000	CC12
CO52	CC1 + 0.5*CC2 + CC10 + CC12	1.00	CC1	0.50	CC2	1.00	CC10	1.000	CC12

Tabla 2.8. Combinaciones de carga

2.5. Condiciones de apoyo en pilares y uniones internas

Por último, también se deben describir las conexiones tanto entre estructura y terreno (externas), como las que existen entre los diferentes elementos de la estructura (internas).

Se han empleado dos tipologías de condiciones de apoyo en la estructura, diferenciadas por los esfuerzos que transmiten entre los elementos:

- Rígidas: transmiten esfuerzos axiales, cortantes y momentos.
- Articuladas: transmiten sólo esfuerzos axiales.

2.5.1. Condiciones de apoyo externas

La estructura está conectada con el terreno en la base de los pilares, sobre las zapatas de cimentación. La unión entre pilar – zapata es de tipo rígida.

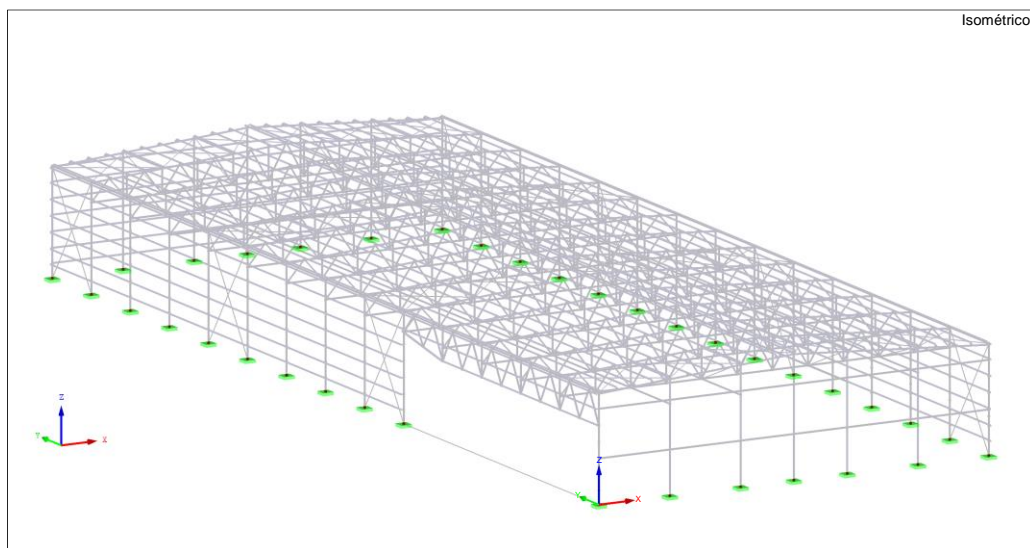


Imagen 2.39. Condiciones de apoyo externas

2.5.2. Conexiones entre los elementos

Las uniones entre los elementos de la estructura son principalmente rígidas pues, aunque los esfuerzos transmitidos sean mayores, estas conexiones reducen los desplazamientos.

Se diseñan uniones articuladas para los redondos que arriostran en cubierta y fachada y para los extremos de las correas.

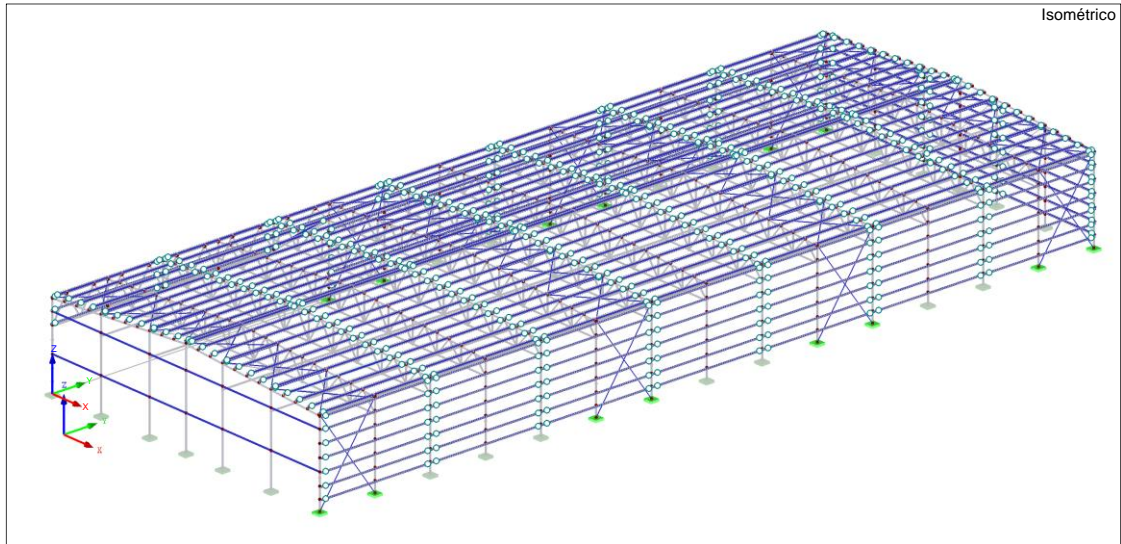


Imagen 2.40. Conexiones entre los elementos

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y VERIFICACIONES RESISTENTES

A continuación, se incluyen los resultados más significativos en cuanto a desplazamientos y tensiones en la estructura.

3.1. Desplazamientos

Eje x	Eje y	Eje z
CP + 0.5N + V3a	CP + 0.5N + V1a	CP + N + 0.6V4a
34.7 mm	22 mm	82.5 mm
Pilar principal	Pilar hastial	Cercha
L/246	L/440	L/360

Tabla 3.1. Desplazamientos máximos

El máximo desplazamiento horizontal en el eje x se da para la combinación CO₄₉ (CP + 0.5N + V3a) en el pilar principal 4º del lateral derecho.

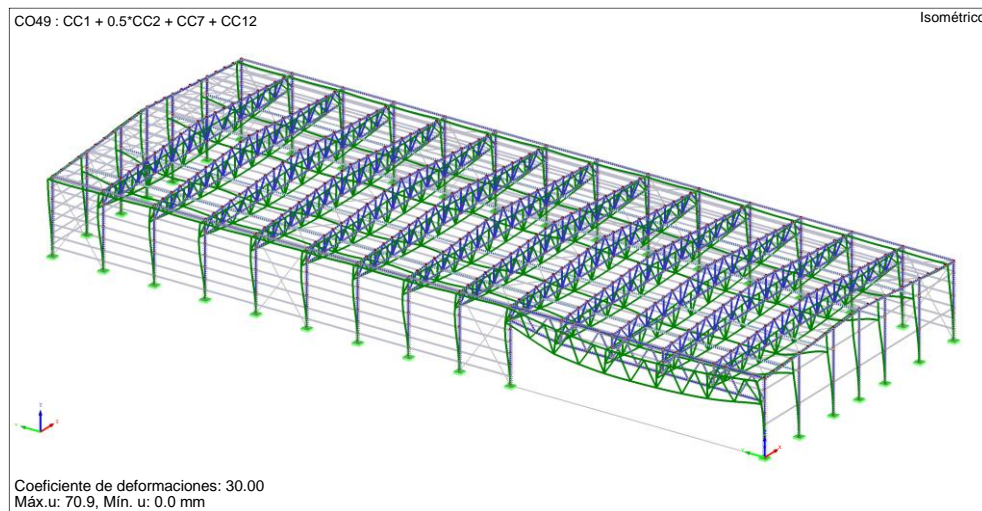


Imagen 3.1. Deformada - CO₄₉

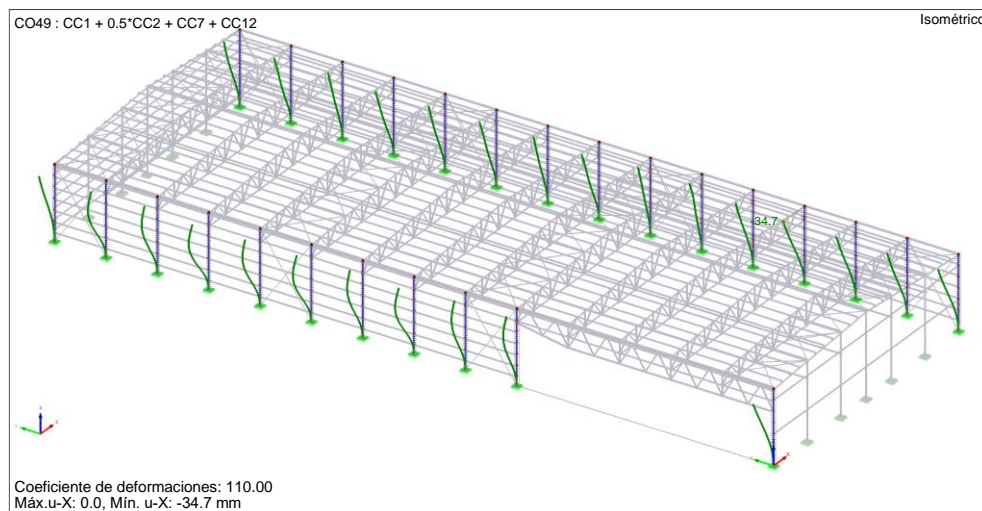


Imagen 3.2. Combinación desplazamiento máximo - Eje x

El máximo desplazamiento horizontal en el eje y se da para la combinación CO_{45} ($CP + 0.5N + V1a$) en el pilar hastial central de la fachada frontal expuesta al viento.

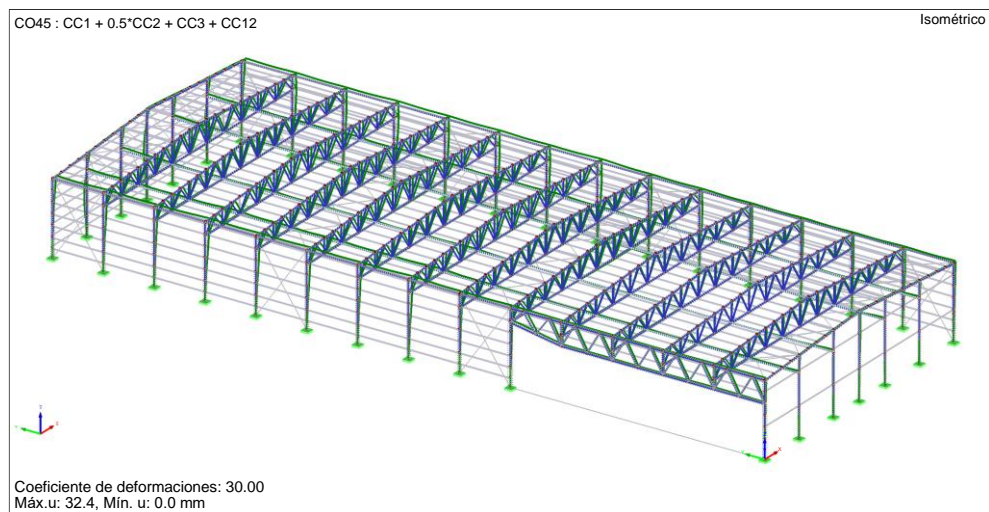


Imagen 3.3. Deformada - CO_{45}

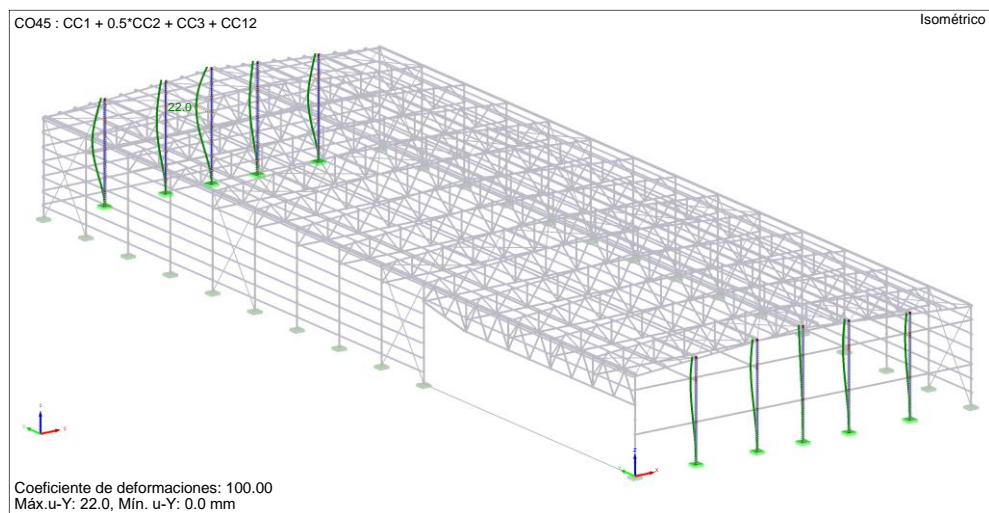


Imagen 3.4. Combinación desplazamiento máximo - Eje y

El máximo desplazamiento vertical (eje z) se da para la combinación CO_{35} ($CP + N + 0.6V4a$) en la tercera cercha.

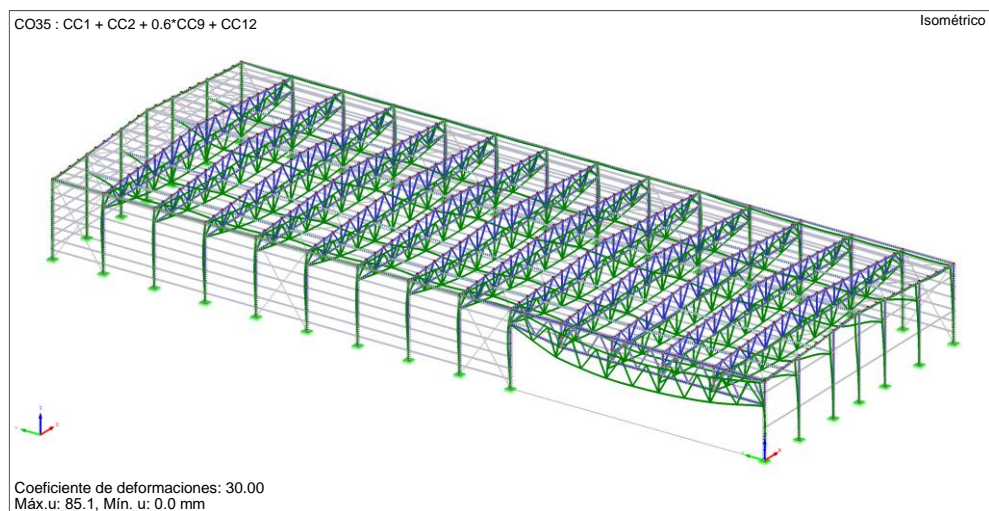


Imagen 3.5. Deformada - CO_{35}

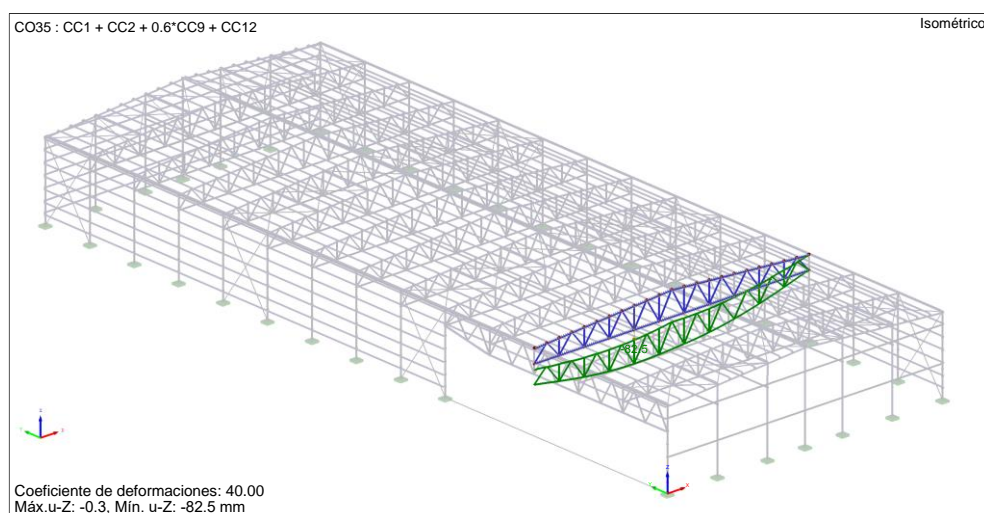


Imagen 3.6. Combinación desplazamiento máximo - Eje z

Los resultados completos de desplazamientos se recogen el “ANEXO I.d) Desplazamientos”

3.2. Tensiones

Por lo que respecta a las comprobaciones resistentes, se han obtenido las envolventes de esfuerzos para las hipótesis más desfavorables en cada elemento de la estructura.

CO ₁	77.7	CO ₁₄	171
CO ₂	184.5	CO ₁₅	170.2
CO ₃	143.5	CO ₁₆	149.2
CO ₄	129.4	CO ₁₇	167.4
CO ₅	202.3	CO ₁₈	100.7
CO ₆	247.8	CO ₁₉	169.4
CO ₇	223.4	CO ₂₀	146.1
CO ₈	185.7	CO ₂₁	156
CO ₉	242.5	CO ₂₂	231
CO ₁₀	198.4	CO ₂₃	207.5
CO ₁₁	146.1	CO ₂₄	167.8
CO ₁₂	162.4	CO ₂₅	222.8
CO ₁₃	101.1	CO ₂₆	154.1

Tabla 3.2. Tensiones máximas según combinación de resultados [MPa]

Las combinaciones de resultados más desfavorables son las correspondiente a CO₆, CO₉ y CO₂₂.

– $CO_6 (1.35CP + 1.5N + 0.9V2b)$

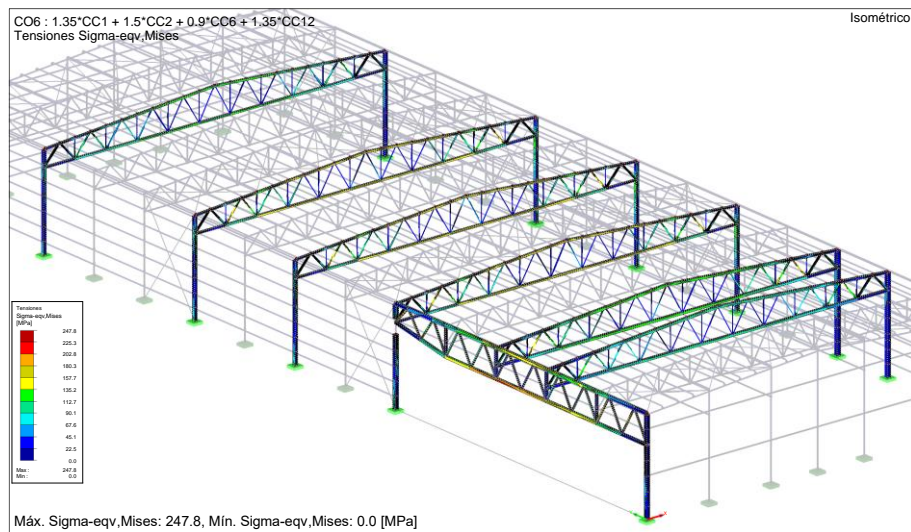


Imagen 3.7. Mapa de tensiones – CO₆

– $CO_9 (1.35CP + 1.5N + 0.9V4a)$

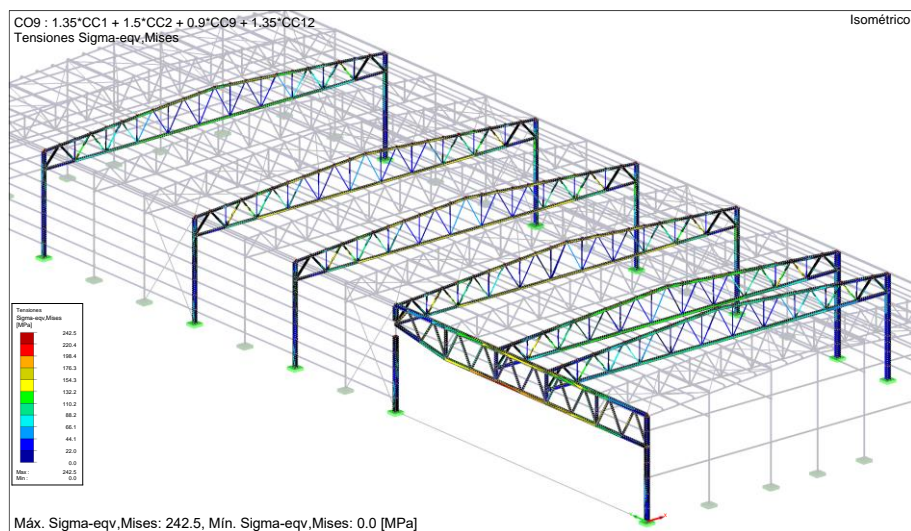


Imagen 3.8. Mapa de tensiones – CO₉

– $CO_{22} (1.35CP + 0.75N + 1.5V2b)$

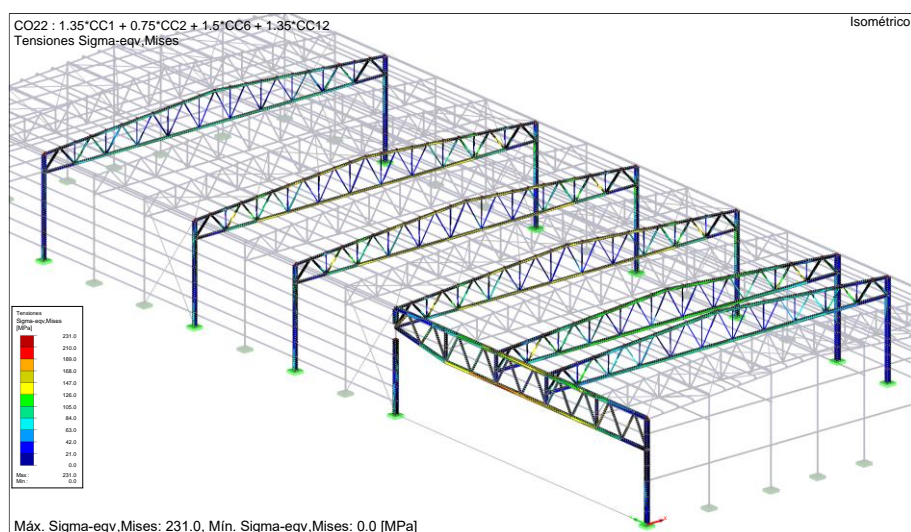


Imagen 3.9. Mapa de tensiones – CO₂₂

Los resultados completos de los mapas de tensiones para cada una de las combinaciones de resultados estudiadas están incluidos en el *ANEXO I.e).Tensiones* .

Observando los tres mapas de tensiones se hace obvio que la máxima concentración de tensiones para cada elemento se genera en:

- Cerchas: zona central de los cordones y diagonales de los extremos.

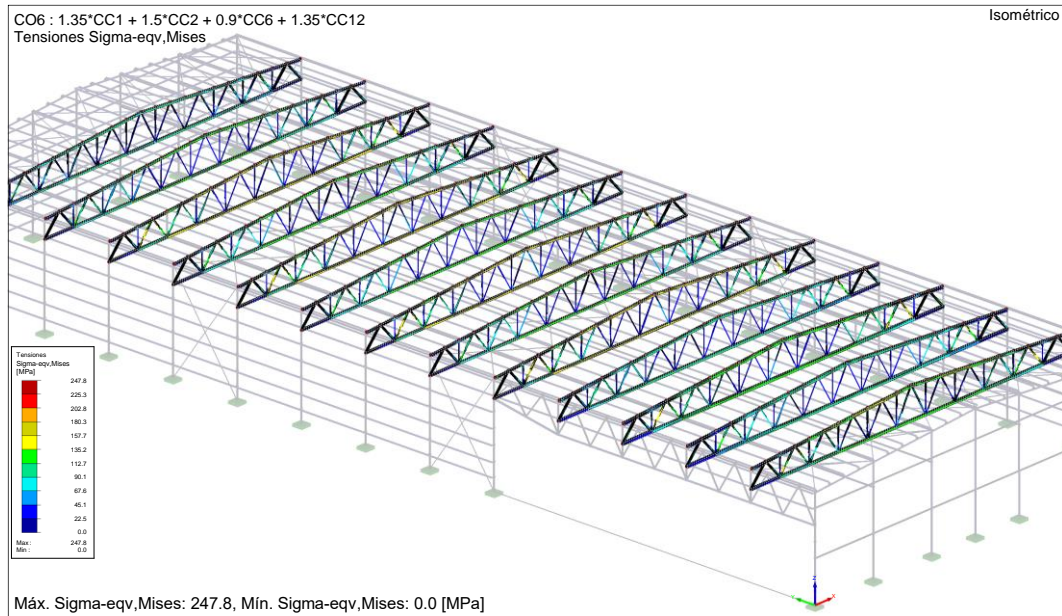


Imagen 3.10. Tensiones máximas – Cerchas

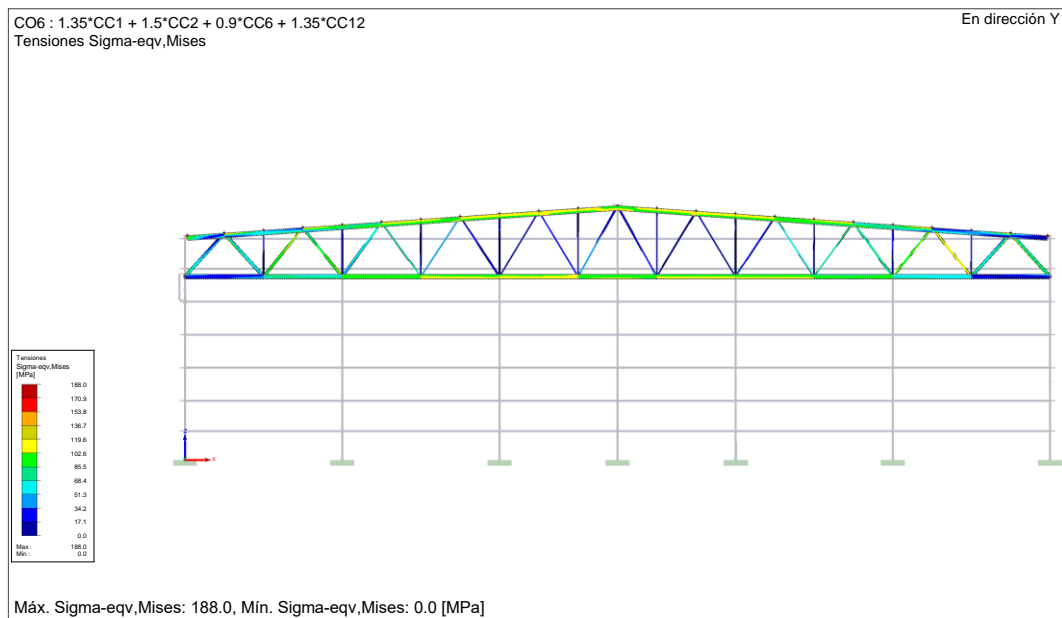


Imagen 3.11. Detalle tensiones máximas – Cerchas

- Celosía puerta: zona central de los cordones y diagonales de los extremos.

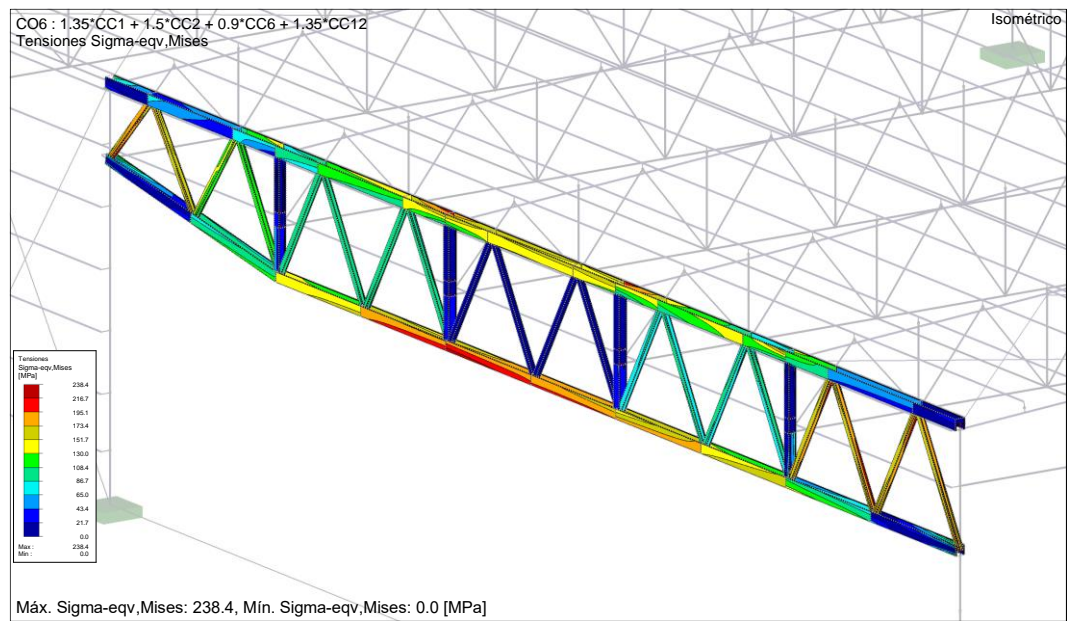


Imagen 3.12. Tensiones máximas – Celosía puerta



Imagen 3.13. Detalle tensiones máximas – Celosía puerta

- Pilares: zona de unión con las cerchas y en su base.

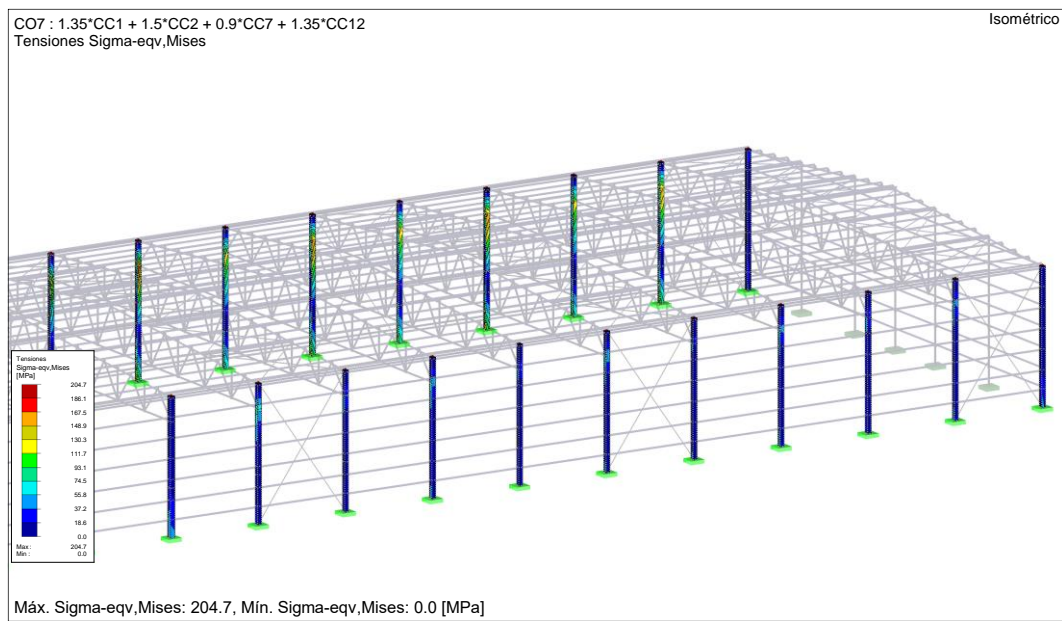


Imagen 3.14. Tensiones máximas – Pilares

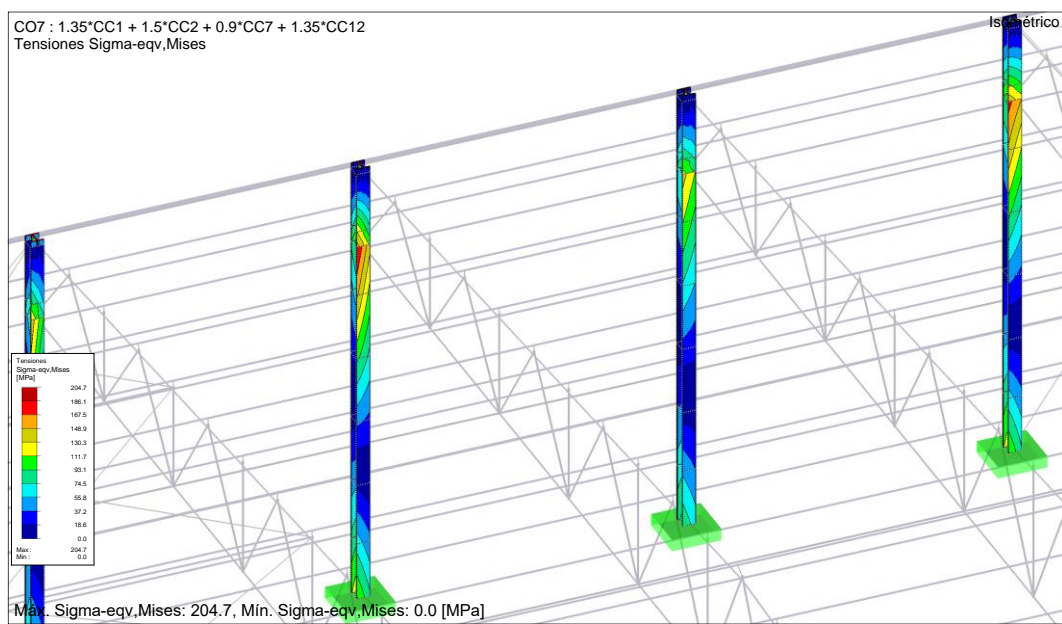


Imagen 3.15. Detalle tensiones máximas – Pilares

CAPÍTULO 4. DISEÑO UNIONES

Las comprobaciones de cada una de las uniones atornillas definidas a continuación se encuentran descritas en el “*ANEXO V. Comprobaciones uniones*”

4.1. Uniones Cordón – Cordón cercha

Para la unión entre los cordones de las cerchas se han diseñado y calculado las uniones que se muestran en la *Imagen 4.1*.

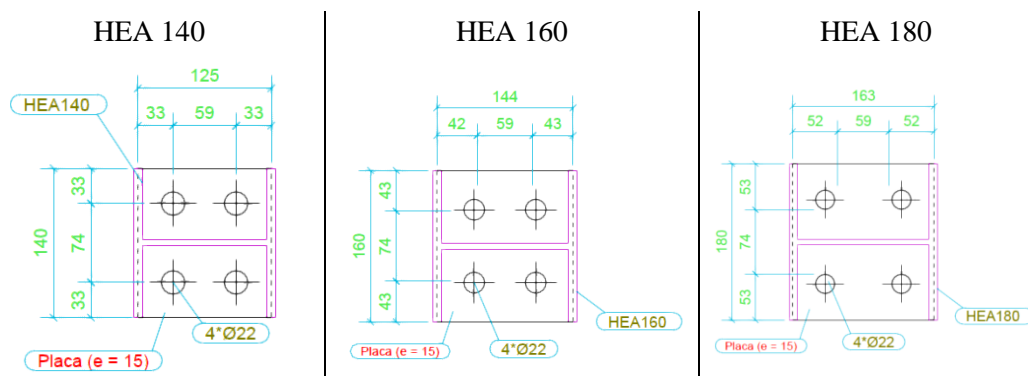


Imagen 4.1. Unión Cercha - Cercha

4.2. Uniones Cercha – Pilar

Para las uniones entre las cerchas y los pilares principales se han diseñado y calculado las uniones que se muestran en la *Imagen 4.2* para el cordón superior y en la *Imagen 4.3* el cordón inferior.

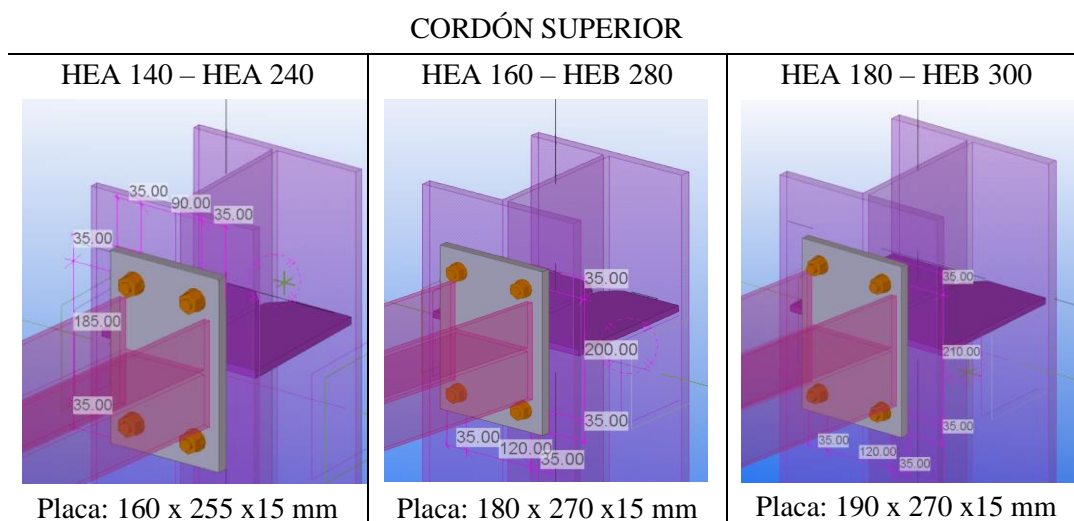


Imagen 4.2. Unión Cercha - Pilar. Cordón Superior

CORDÓN INFERIOR

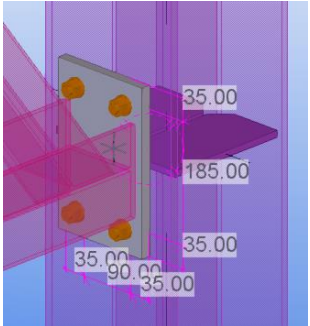
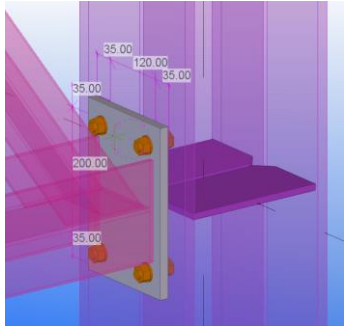
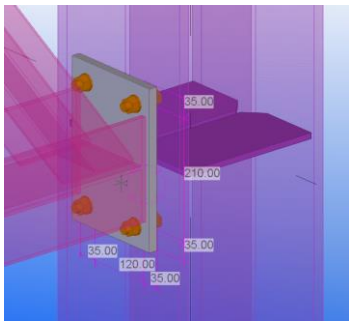
HEA 140 – HEA 240	HEA 160 – HEB 280	HEA 180 – HEB 300
		
Placa: 160 x 255 x 15 mm	Placa: 180 x 270 x 15 mm	Placa: 190 x 270 x 15 mm

Imagen 4.3. Unión Cercha - Pilar. Cordón Inferior

4.3. Uniones Puerta – Pilar

Para la unión entre los cordones de la celosía de la puerta con los pilares se han diseñado y calculado las uniones que se muestran en la *Imagen 4.4*.

CORDÓN SUPERIOR

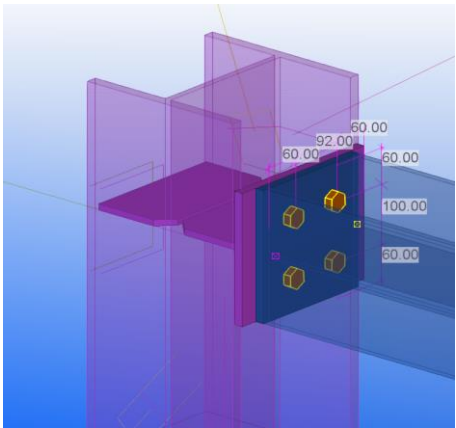
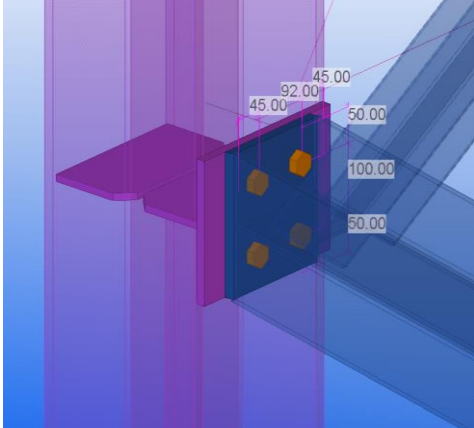
Cordón superior	Cordón inferior
	
Placa: 212 x 220 x 15 mm	Placa: 182 x 200 x 15 mm

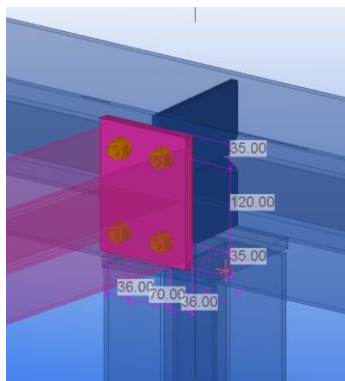
Imagen 4.4. Unión Puerta - Pilares

4.4. Uniones Puerta – Cerchas

Para la unión entre las cerchas principales y la celosía de la puerta se han diseñado y calculado las uniones que se muestran en la *Imagen 4.5* para el cordón superior y en la *Imagen 4.6* el cordón inferior.

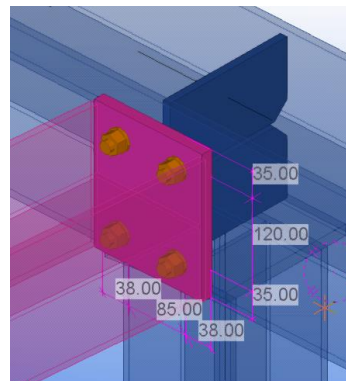
CORDÓN SUPERIOR

HEA 160 – HEA 200



Placa: 142 x 190 x 15 mm

HEA 180 – HEA 200

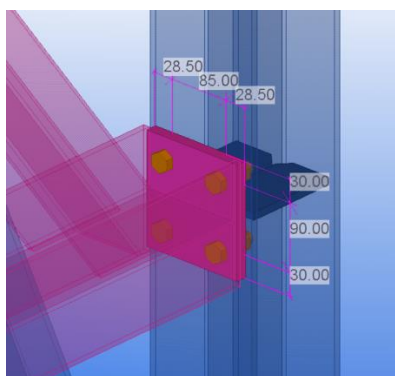


Placa: 161 x 190 x 15 mm

Imagen 4.5. Unión Cercha - Puerta. Cordón Superior

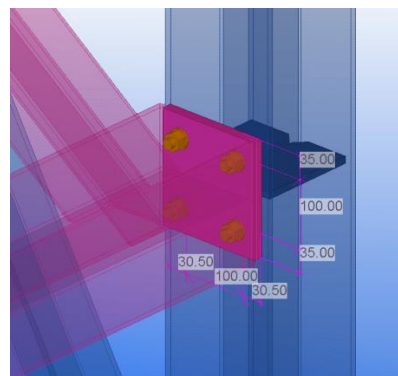
CORDÓN INFERIOR

HEA 160 – HEA 160



Placa: 142 x 150 x 15 mm

HEA 180 – HEA 180



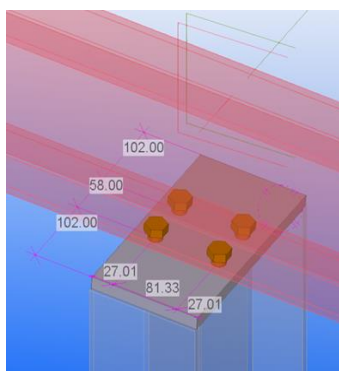
Placa: 161 x 170 x 15 mm

Imagen 4.6. Unión Cercha - Puerta. Cordón Inferior

4.5. Uniones Pilar Hastial Extremo – Dintel

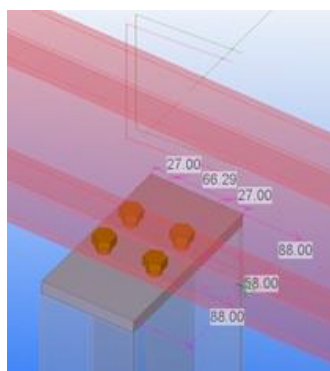
Para la unión de los dos pilares hastiales de cada extremo con los dinteles de cierre se han diseñado y calculado las uniones que se muestran en la *Imagen 4.7*.

IPE 270



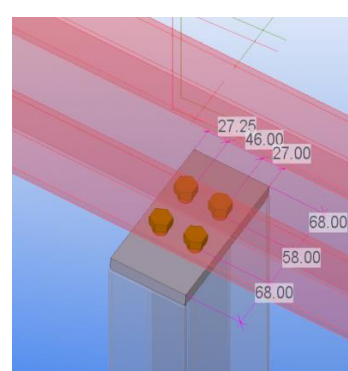
Placa: 135 x 262 x 15 mm

IPE 240



Placa: 120 x 234 x 15 mm

IPE 200



Placa: 100 x 194 x 15 mm

Imagen 4.7. Unión Pilares Hastiales Extremos - Dintel

4.6. Uniones Pilar Hastial Central – Dintel

Para la unión de los pilares hastiales centrales con los dinteles de cierre se han diseñado y calculado las uniones que se muestran en la *Imagen 4.8*.

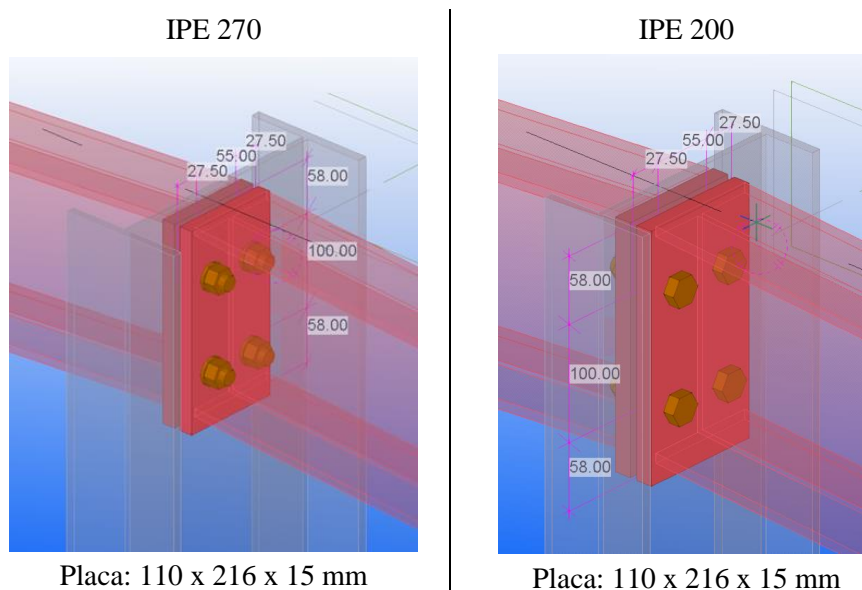


Imagen 4.8. Unión Pilares Hastiales Centrales - Dintel

4.7. Uniones Tubos Arriostramiento

Para los tubos de arriostramiento se han diseñado y calculado las uniones que se muestran en las *Imagen 4.9* e *Imagen 4.10*.

TUBOS ARRIOSTRAMIENTO - PILAR

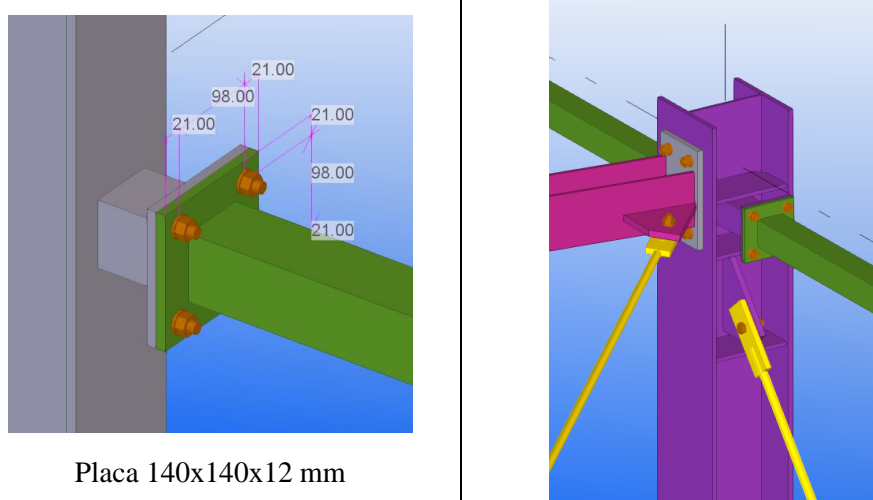


Imagen 4.9. Unión Tubos Arriostramiento - Pilar

TUBOS ARRIOSTRAMIENTO - CERCHA

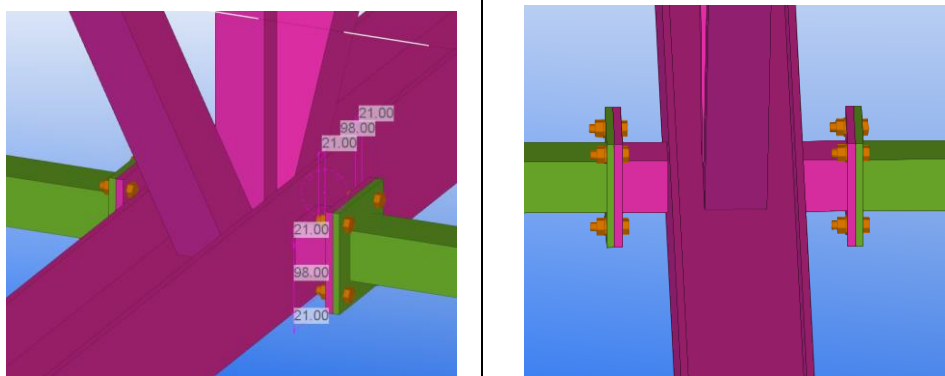


Imagen 4.10. Unión Tubos Arriostramiento - Cercha

4.8. Uniones Redondas Arriostramiento

Para los redondos de arriostramiento se han diseñado y calculado las uniones que se muestran en las *Imagen 4.11* e *Imagen 4.12*.

REDONDOS ARRIOSTRAMIENTO - PILAR

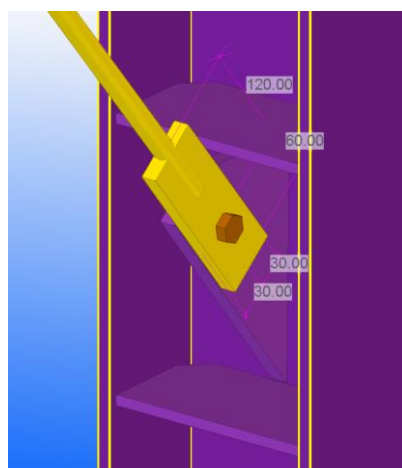


Imagen 4.11. Unión Redondos Arriostramiento - Pilar

REDONDOS ARRIOSTRAMIENTO - CERCHA

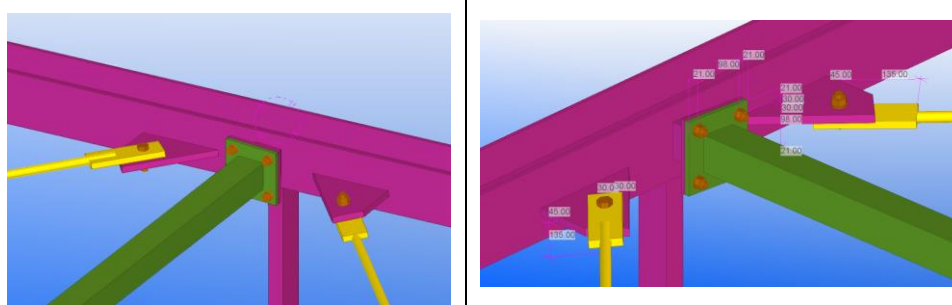


Imagen 4.12. Unión Redondos Arriostramiento - Cercha

CAPÍTULO 5. DISEÑO PLACAS DE ANCLAJE

Para el diseño de las placas de anclaje de los pilares, se analiza los esfuerzos en estado límite último en las bases de los pilares. Para realizar a cabo este diseño se distingue entre siete grupos basados en el tipo de perfil del pilar y en los esfuerzos en sus bases:

- Grupo 1: pilares HEB 300.
- Grupo 2: pilares HEB 280.
- Grupo 3: pilares tipo HEA 240. Son las correspondientes a los pilares principales de la estructura.
- Grupo 4: pilares IPE 270, pertenecientes a la fachada expuesta al viento.
- Grupo 5: pilares IPE 240, pertenecientes a la fachada expuesta al viento.
- Grupo 6: pilares IPE 200, pertenecientes a la fachada no expuesta al viento.

Las acciones para ELU que actuarán sobre las placas de anclaje son:

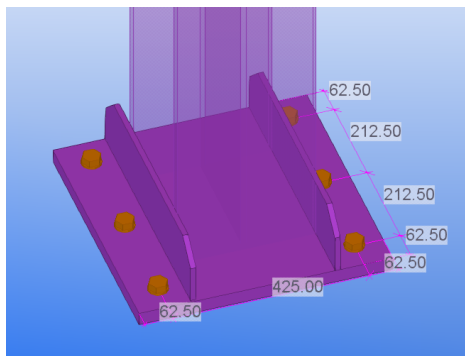
[kN, m]	N	V _z	M _y
Grupo 1	93.77	52.16	192.64
Grupo 2	419.61	55.33	180.45
Grupo 3	54.43	39.36	103.21
Grupo 4	21.79	38.88	87.3
Grupo 5	5.8	35.93	67.98
Grupo 6	25.8	0.28	7.12

Tabla 5.1. Placas de anclaje - Esfuerzos ELU

El diseño y las comprobaciones para cada grupo quedan recogidas en el “*ANEXO VI. Comprobaciones placas anclaje*”

5.1. Grupo 1 (HEB 300)

Para los pilares HEB 300 se han diseñado y calculado las placas de anclaje que se muestran en la *Imagen 5.1*.



Placa (S-275): 550x550x25 mm

Rigidizadores (S-275): 550x130x12 mm

Perno: Corrugado (B-500-SD) con patilla 90°

$\varnothing_P = 25 \text{ mm}$

Longitud de anclaje = 450 mm

Imagen 5.1. Placa de anclaje. Grupo 1

5.2. Grupo 2 (HEB 280)

Para los pilares HEB 300 se han diseñado y calculado las placas de anclaje que se muestran en la *Imagen 5.2*.

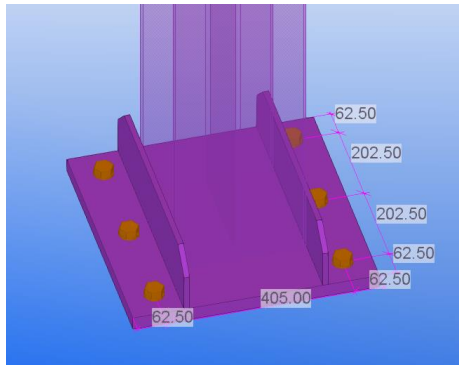


Imagen 5.2. Placa de anclaje. Grupo 2

Placa (S-275): 530x530x30 mm

Rigidizadores (S-275): 530x135x12 mm

Perno: Corrugado (B-500-SD) con patilla 90°

$\varnothing_P = 25$ mm

Longitud de anclaje = 300 mm

5.3. Grupo 3 (HEA 240)

Para los pilares HEA 240 se han diseñado y calculado las placas de anclaje que se muestran en la *Imagen 5.3*.

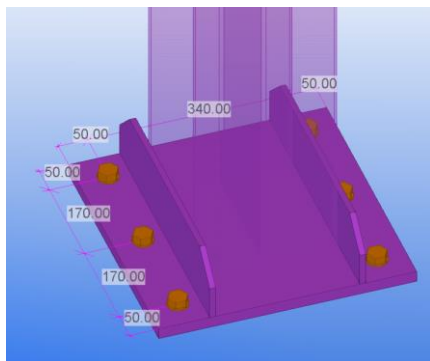


Imagen 5.3. Placa de anclaje. Grupo 3

Placa (S-275): 440x440x20 mm

Rigidizadores (S-275): 440x110x10 mm

Perno: Corrugado (B-500-SD) con patilla 90°

$\varnothing_P = 20$ mm

Longitud de anclaje = 400 mm

5.4. Grupo 4 (IPE 270)

Para los pilares IPE 270 se han diseñado y calculado las placas de anclaje que se muestran en la *Imagen 5.4*.

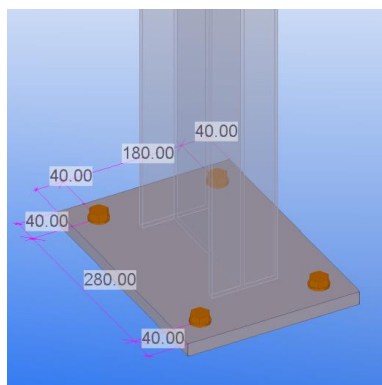


Imagen 5.4. Placa de anclaje. Grupo 4

Placa (S-275): 470x335x20 mm

Rigidizadores (S-275): 470x90x10 mm

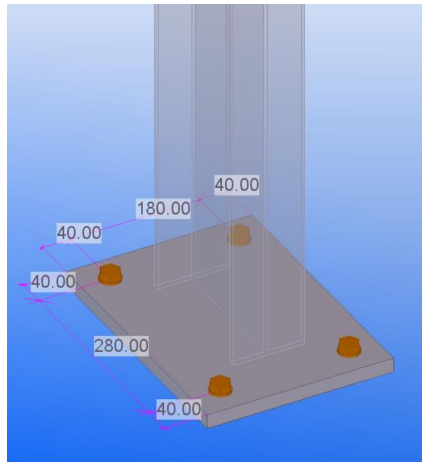
Perno: Corrugado (B-500-SD) con patilla 90°

$\varnothing_P = 20$ mm

Longitud de anclaje = 400 mm

5.5. Grupo 5 (IPE 240)

Para los pilares IPE 240 se han diseñado y calculado las placas de anclaje que se muestran en la *Imagen 5.5*.



Placa (S-275): 440x320x20 mm

Rigidizadores (S-275): 440x80x10 mm

Perno: Corrugado (B-500-SD) con patilla 90°

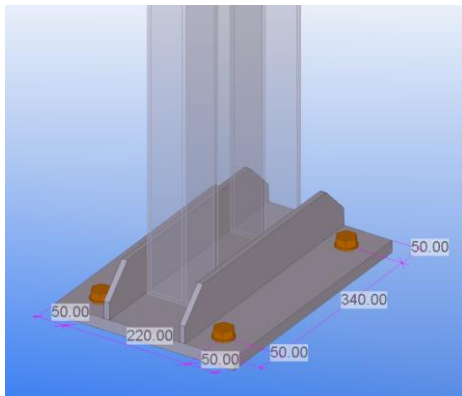
$\varnothing_P = 20$ mm

Longitud de anclaje = 400 mm

Imagen 5.5. Placa de anclaje. Grupo 5

5.6. Grupo 6 (IPE 200)

Para los pilares IPE 200 se han diseñado y calculado las placas de anclaje que se muestran en la *Imagen 5.6*.



Placa (S-275): 360x260x20 mm

Perno: liso (S-275) sin patilla

$\varnothing_P = 16$ mm

Longitud de anclaje = 300 mm

Imagen 5.6. Placa de anclaje. Grupo 6

CAPÍTULO 6. COMPROBACIÓN DE ZAPATAS

Para el diseño de las cimentaciones de la estructura, se observan los esfuerzos en estado límite de servicio (sin mayorar) en las bases de los pilares. Para llevar a cabo este diseño lo más óptimamente posible, se dividen las zapatas de la estructura en cuatro grupos distintos ordenados de más desfavorable a menos:

- Grupo 1: pilares HEB. Son los que se encuentran alrededor de la puerta y soportan mayores esfuerzos. Por tanto, necesitarán unas cimentaciones de dimensiones mayores.
- Grupo 2: pilares hastiales fachada con viento.
- Grupo 3: pilares tipo. Se corresponde con el resto de los pilares principales, cuyos esfuerzos son de rangos similares.
- Grupo 4: pilares hastiales fachada sin viento. No transmiten a penas esfuerzos al terreno.

Los esfuerzos en ELS en la base de los pilares de los 4 grupos están recogidos en la *Tabla 6.1*.

[kN, m]	N	V_z	M_y
Grupo 1	-16.5	33.43	-113.97
Grupo 2	-15.98	25.89	-58.2
Grupo 3	-40.78	27.27	-72.38
Grupo 4	-6.15	2.1	-7.45

Tabla 6.1. Cimentaciones - Esfuerzos ELS

6.1. Dimensiones

Las comprobaciones de equilibrio desglosadas para cada grupo de cimentaciones quedan recogidas en el “*ANEXO VII. Comprobaciones cimentaciones*”

Las dimensiones de cada una de las zapatas son las recogidas en la *Tabla 6.2*.

[m]	a	b	h
Grupo 1	2.5	2	1.1
Grupo 2	2.1	1.6	1.1
Grupo 3	2.1	1.6	0.9
Grupo 4	1.1	1	0.7

Tabla 6.2. Cimentaciones - Dimensiones

La *Tabla 6.3* recoge los coeficientes de aprovechamiento para cada una de las comprobaciones.

	Vuelco	Deslizamiento	Hundimiento
Grupo 1	99%	89%	34%
Grupo 2	82%	98%	29%
Grupo 3	99%	97%	38%
Grupo 4	97%	34%	26%

Tabla 6.3. Cimentaciones - Coeficientes de aprovechamiento comprobaciones de equilibrio

6.2. Armaduras

El dimensionado y cálculo desglosado para cada grupo de zapatas queda recogido en el “*ANEXO VII. Comprobaciones cimentaciones*”

Siguiendo este procedimiento, las armaduras de cada grupo de zapatas se definen en la *Tabla 6.4.*

[mm]	Ø	s	l_b
Grupo 1	20	250	840
Grupo 2	20	250	840
Grupo 3	16	200	572
Grupo 4	16	250	572

Tabla 6.4. Cimentaciones - Armaduras

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

Se ha realizado el diseño y análisis estructural completo de una estructura metálica de grandes luces para instalación de logística de cable estructurado y fibra óptica localizada en Malpica, Zaragoza. Para su desarrollo, se ha tenido en cuenta la normativa de aplicación para esta tipología de estructuras. Se ha verificado que se satisfacen todos los requerimientos de normativa tanto en lo referente a desplazamientos como a resistencia de los diferentes elementos de la estructura.

Se trata de una estructura metálica de 2772 m² distribuidos en 15 pórticos con modulación de 6 metros, con 33 metros de luz. La altura libre dentro de la nave es de 7 metros con 9.7 metros hasta la cumbrera (pendiente = 7%). Dispone de una puerta de grandes dimensiones (30x6 metros) total y permanentemente abierta, destinada al tránsito de camiones.

Además del cálculo de la estructura principal (pilares y cerchas), también se ha realizado el diseño y cálculo de la cubierta y cimentación, así como de todos los detalles constructivos singulares, como uniones y placas de anclaje. De esta manera, queda totalmente definida la estructura del proyecto.

La realización de este trabajo ha supuesto para mí una intensificación de la formación obtenida tras cursar las asignaturas de la vertiente de estructuras de ingeniería mecánica en la Universidad de Zaragoza.

Poder realizar e investigar un proyecto real y de esta magnitud, más allá de un trabajo de una asignatura universitaria, me ha permitido profundizar en el mundo de la ingeniería estructural desarrollando y ampliando mis conocimientos sobre esta. Además, hay que sumarle a todo esto el aprendizaje adquirido gracias al manejo de un software de uso profesional de análisis estructural.

Ha resultado a su vez en un reto, no solo de cálculo sino también de diseño y estudio de diferentes configuraciones. El probar críticamente y errar logrando obtener una solución óptima, ha puesto en práctica muchos de los conocimientos adquiridos estos últimos cuatro años, consiguiendo realmente comprenderlos y entenderlos gracias a esta puesta en práctica. Al fin y al cabo, en el mundo de la ingeniería es indispensable asentar los conceptos básicos firmemente y saber aplicarlos con criterio, el cual no se obtiene solo con los conocimientos teóricos sino con su aplicación en casos prácticos. Es pues en estos casos prácticos donde el ingeniero debe adaptarse y solucionar todos los problemas y divergencias que surgen en el proceso.

Poniéndola en valor, esta actividad formativa ha sido beneficiosa tanto personalmente como académicamente.

BIBLIOGRAFÍA

Código Técnico de la Edificación (CTE)

- Documento Básico de Seguridad Estructural (DBSE)
- Documento Básico de Seguridad Estructural – Acero (DBSE-A)
- Documento Básico de Seguridad Estructural – Acciones en la edificación (DBSE-AE)
- Documento Básico de Seguridad Estructural – Cimientos (DBSE-C)

Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08

Páginas web

- [ESTRUCTURA METÁLICA vs ESTRUCTURA DE HORMIGÓN PREFABRICADO - LA ingenieros](#)
- [La automatización: clave del éxito para la industria logística \(grupotatoma.com\)](#)
- [Ventajas: ¿Estructuras metálicas o de hormigón? | Edinalia](#)
- [Construcción de naves industriales | Ingenieros Asesores
https://www.dippanel.com](#)
- [ARQUESTIL | Proyecto nave](#)
- [Tornaria construye naves ganaderas, agrícolas y movimiento de tierras](#)