



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS**



Anejo Nº2- Análisis y cálculos estructurales.

Parte 2 – Análisis y dimensionamiento de la estructura

Diseño y análisis estructural de helipuerto de aluminio sobre la cubierta de un buque de apoyo marítimo en alta mar.

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Trabajo Final de Máster

ANEJO Nº2

ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y CÁLCULOS ESTRUCTURALES.

PARTE 2- ANÁLISIS Y DIMENSIONAMIENTO DE LA ESTRUCTURA

ÍNDICE

1. OBJETO DEL DOCUMENTO.....	3
2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA	3
3. PROGRAMA DE CÁLCULO EMPLEADO	3
4. COMBINACIÓN DE ACCIONES	4
4.1. COMBINACIONES PARA ESTADO LIMITE ÚLTIMO.....	4
4.2. COMBINACIONES PARA ESTADO LIMITE DE SERVICIO	4
5. MODELIZACIÓN ESTRUCTURAL.....	4
6. CASOS DE CARGA	6
7. ENVOLVENTE DE ESFUERZOS Y REACCIONES	7
7.1. ESTRUCTURA SOPORTE	7
7.2. ESTRUCTURA EN CELOSÍA	9
8. COMPROBACIONES Y DIMENSIONAMIENTO	10
8.1. PERFIL IPE 450 DE LA ESTRUCTURA SOPORTE	10
8.2. PERFIL IPE 300 DEL CORDÓN SUPERIOR DE LA CELOSÍA.....	14
8.3. PERFIL IPE 300 DEL CORDÓN INFERIOR DE LA CELOSÍA.....	23
8.4. TUBO RECTANDULAR 150X150X8 MM DE LAS DIAGONALES Y MONTANTES	23
9. COMPROBACIÓN DE DEFORMACIONES.....	33
10. UNIONES	34
10.1. ESPECIFICACIONES PARA UNIONES ATORNILLADAS	34
10.2. UNIÓN VIGAS IPE 450 INTERIORES CON VIGAS IPE 450 PERIMETRALES TIPO 1.....	35
10.3. UNION HEB 260 – HEB 260.....	35
10.4. UNIÓN VIGAS IPE 450 INTERIORES CON VIGAS IPE 450 PERIMETRALES TIPO 2	36
10.5. ESPECIFICACIONES PARA UNIONES SOLDADAS	36
10.6. UNIÓN SOLDADA CELOSÍA.....	36

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Estructura soporte para panel de aluminio. Fuente: Propia.	3
Figura 2 - Estructura tridimensional formada por celosías. Fuente: Propia.....	3
Figura 3 - Celosía tipo Warren con montantes central. Fuente: Propia.	3
Figura 4 - Modelo estructural estructura soporte. Fuente: Propia.	4
Figura 5 - Modelo estructural Estructura de celosías. Fuente: Propia.	5
Figura 6 - Asignación de coeficientes de pandeo en Cype 3D. Fuente: CYPE 2016.....	5
Figura 7 - Modelo 3D conjunto. Fuente: Propia.	6
Figura 8 - Distintos casos de carga del helicóptero de diseño. Fuente: Propia.	6
Figura 9 - Deformaciones de la celosía cargada. Fuente: Propia.....	33

1. Objeto del documento

Este documento tiene como objetivo principal analizar estructuralmente y dimensionar la estructura del helipuerto, teniendo en cuenta las bases de cálculo y acciones establecidas en el anejo Nº2 – Análisis y cálculos estructurales. Parte 1.

A lo largo del anejo se describirá la estructura y el modelo estructural empleado para el cálculo resistente, y con los resultados obtenidos se procederá a dimensionar las barras que conforman las diferentes partes, así como cada una de las uniones, tanto soldadas en el caso de la celosía, como atornilladas.

2. Descripción de la estructura

La solución adoptada se trata de una estructura conformada por perfiles metálicos de aluminio EW 7020 T6. Se puede diferenciar una estructura soporte, donde ira empresillado un panel de aluminio donde aterrizará el helipuerto, que actuará de correas, transmitiendo las cargas a la estructura en celosía.

La estructura soporte se trata de una estructura octogonal con una circunferencia inscrita de 20 metros, formada por ocho perfiles de IPE450 de aluminio extruido unidos rígidamente mediante unas placas de unión. En su interior se disponen perfiles IPE450 cada 1,66 metros unidos mediante una unión rígida al octógono perimetral.

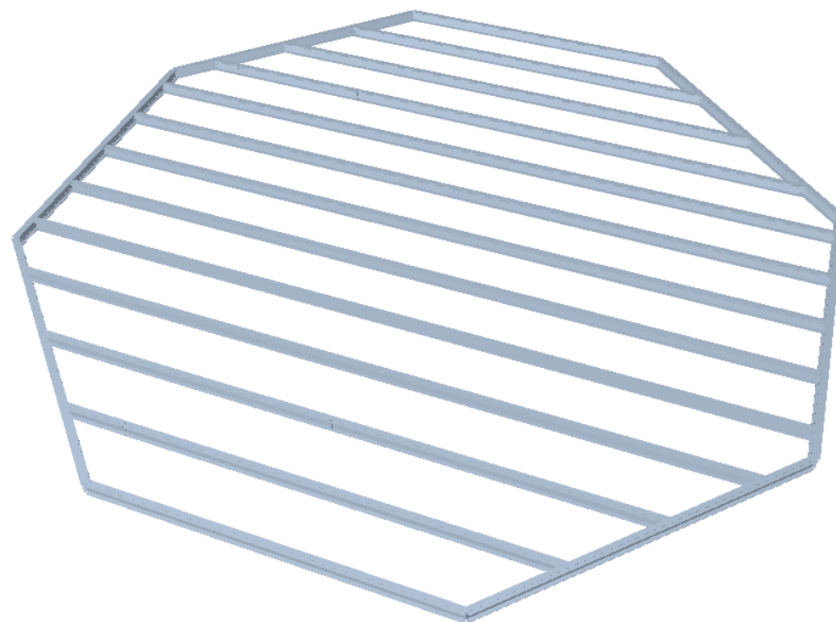


Figura 1 - Estructura soporte para panel de aluminio. Fuente: Propia.

La estructura soporte tal y como se explica detalladamente en el proceso constructivo se une a la estructura en celosía por medio de una unión empresillada entre las almas de los perfiles IPE450. La estructura en celosía está formada por 10 celosías tipo Warren con montantes entrelazadas ortogonalmente, es decir, 5 en cada sentido, con una separación entre ejes de 4 metros. En lo que se refiere a las dimensiones, se puede observar 6 celosías de 20 metros de longitud, y 4 celosías de 12,28 metros, siendo el canto de todas ellas, continuo e igual a 2,15 metros.

El cordón superior de la celosía se trata de un perfil de aluminio IPE300 al igual que el cordón inferior y las diagonales exteriores. En cuanto a las diagonales interiores de las celosías y los montantes se tratan de perfiles

cerrados de aluminio de dimensiones 150x150x10 milímetros, los cuales van soldados a las alas del cordón superior e inferior.

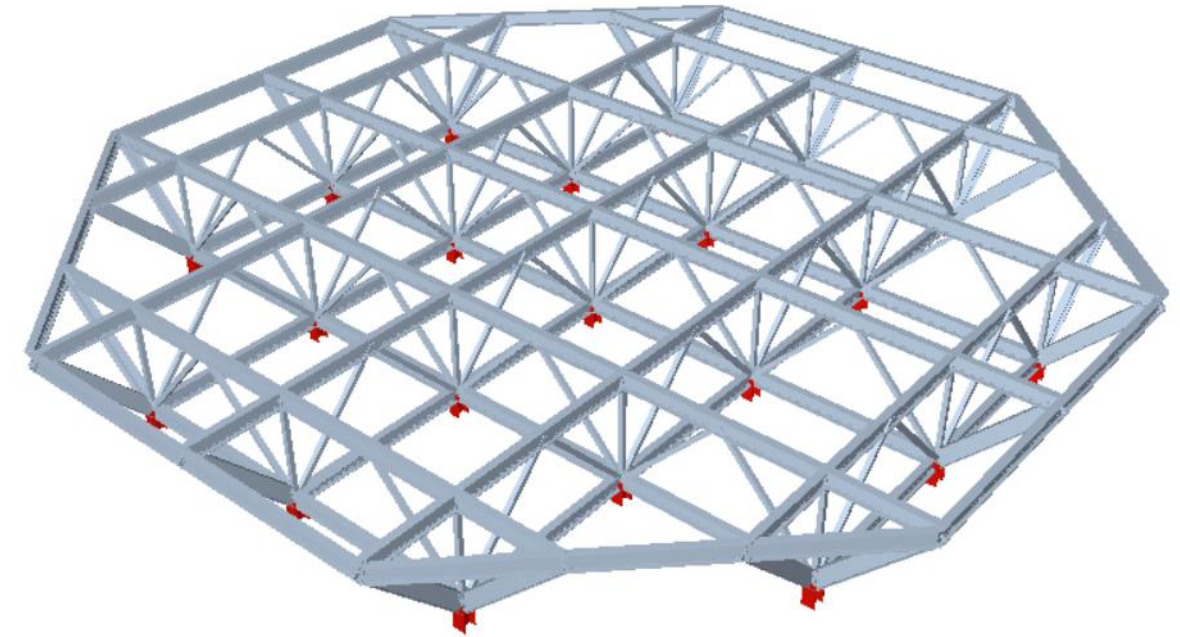


Figura 2 - Estructura tridimensional formada por celosías. Fuente: Propia.

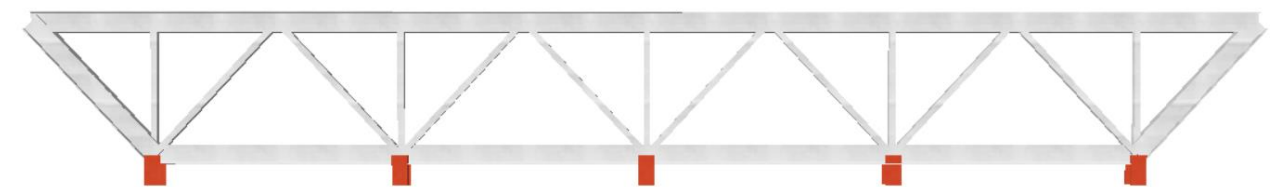


Figura 3 - Celosía tipo Warren con montantes central. Fuente: Propia.

En las figuras anteriores, se pueden observar en rojo los 21 pilares HEB260 de acero estructural S275 unidos al cordón inferior de las celosías, con el fin de conectar el helipuerto con los 21 pilares existentes en la cubierta del buque tal y como se explico en la primera parte de este anejo, en la sección de condicionantes. Para asegurar una correcta unión tal y como se mostrará en el apartado de uniones de este mismo documento, los perfiles tienen una longitud de 0.5 metros.

3. Programa de cálculo empleado

La geometría de la estructura se ha definido con el programa de diseño asistido por computadora Autodesk Autocad 2018. Se ha optado por un modelo en tres dimensiones, en el que primero se ha definido una estructura plana formada por vigas de tramos rectos que constituye el soporte donde se instalará el panel de aluminio para las maniobras de aterrizaje y despegue. Posteriormente se ha definido otro modelo tridimensional formado por las celosías mencionadas.

El siguiente paso es exportar la estructura ya definida geométricamente al programa de cálculo CYPE 2016, al módulo Metal 3D. El análisis de las solicitaciones se realiza mediante un cálculo en tres dimensiones, por métodos matriciales de rigidez.

El proceso que se ha llevado a cabo en el programa hasta alcanzar la solución definitiva es el siguiente:

En primer lugar, se han definido las normativas que se han aplicado, tal y como se ha indicado en su respectivo apartado. Seguidamente, se han modificado los estados límite de acuerdo con nuestra actuación.

A continuación, se han añadido las hipótesis adicionales pertinentes, como son las debidas a cargas muertas, a la sobrecarga de uso, la hipótesis de viento y la carga de nieve. El peso propio lo tiene en cuenta por defecto el programa cuando se describen los perfiles que se vayan a utilizar en cada tipo de elemento estructural.

El último paso para concretar la introducción de los datos es definir las características de los materiales que ya se han mencionado anteriormente en el apartado bases de cálculo.

4. Combinación de acciones

A continuación, se muestran todas las combinaciones posibles de cargas que pueden ocurrir para los Estados límite últimos de resistencia y estabilidad.

4.1. Combinaciones para Estado Límite Último

Comb.	PP	CM 1	Q 1 (1)	Q 1 (2)	V 1	N 1
1	1.000	1.000				
2	1.350	1.000				
3	1.000	1.350				
4	1.350	1.350				
5	1.000	1.000	1.500			
6	1.350	1.000	1.500			
7	1.000	1.350	1.500			
8	1.350	1.350	1.500			
9	1.000	1.000		1.500		
10	1.350	1.000		1.500		
11	1.000	1.350		1.500		
12	1.350	1.350		1.500		
13	1.000	1.000			1.500	
14	1.350	1.000			1.500	
15	1.000	1.350			1.500	
16	1.350	1.350			1.500	
17	1.000	1.000	1.500		0.900	
18	1.350	1.000	1.500		0.900	
19	1.000	1.350	1.500		0.900	
20	1.350	1.350	1.500		0.900	
21	1.000	1.000		1.500	0.900	
22	1.350	1.000		1.500	0.900	
23	1.000	1.350		1.500	0.900	
24	1.350	1.350		1.500	0.900	
25	1.000	1.000				1.500
26	1.350	1.000				1.500
27	1.000	1.350				1.500
28	1.350	1.350				1.500
29	1.000	1.000			0.900	1.500
30	1.350	1.000			0.900	1.500
31	1.000	1.350			0.900	1.500
32	1.350	1.350			0.900	1.500
33	1.000	1.000	1.500			0.750
34	1.350	1.000	1.500			0.750
35	1.000	1.350	1.500			0.750
36	1.350	1.350	1.500			0.750
37	1.000	1.000		1.500		0.750
38	1.350	1.000		1.500		0.750
39	1.000	1.350		1.500		0.750
40	1.350	1.350		1.500		0.750
41	1.000	1.000			1.500	0.750
42	1.350	1.000			1.500	0.750
43	1.000	1.350			1.500	0.750
44	1.350	1.350			1.500	0.750
45	1.000	1.000	1.500		0.900	0.750
46	1.350	1.000	1.500		0.900	0.750
47	1.000	1.350	1.500		0.900	0.750
48	1.350	1.350	1.500		0.900	0.750
49	1.000	1.000		1.500	0.900	0.750
50	1.350	1.000		1.500	0.900	0.750
51	1.000	1.350		1.500	0.900	0.750
52	1.350	1.350		1.500	0.900	0.750

4.2. Combinaciones para Estado Límite de Servicio

Comb.	PP	CM 1	Q 1 (1)	Q 1 (2)	V 1	N 1
1	1.000	1.000				
2	1.000	1.000	1.000			
3	1.000	1.000		1.000		
4	1.000	1.000			1.000	
5	1.000	1.000	1.000		1.000	
6	1.000	1.000		1.000	1.000	
7	1.000	1.000				1.000
8	1.000	1.000	1.000			1.000
9	1.000	1.000		1.000		1.000
10	1.000	1.000			1.000	1.000
11	1.000	1.000	1.000		1.000	1.000
12	1.000	1.000		1.000	1.000	1.000

5. Modelización estructural

Tal y como se ha mencionado anteriormente se han realizado dos modelos tridimensionales para modelizar de una manera sencilla el comportamiento de la estructura del helipuerto bajo un caso de cargas del aterrizaje de emergencia del helicóptero, siendo este el caso más desfavorable. En este apartado se describirá el proceso seguido con el programa hasta la obtención de los esfuerzos en cada barra para el posterior dimensionamiento de la estructura.

En primer lugar, se ha importado un archivo *.dxf con la geometría de la estructura soporte definida en AutoCAD 2018. Se han descrito todos los nudos de la estructura, distinguiendo entre vinculaciones interiores y exteriores. Se han dispuesto 47 vinculaciones exteriores, a modo de apoyo fijo, que serán los puntos de contacto entre la estructura soporte y la celosía por los cuales se transmitirán las cargas a la estructura. Se disponen apoyos fijos con el fin de no transmitir momento y modelar lo mas fiel a la realidad ese nudo, al tratarse de una unión atornillada. En una cubierta tridimensional podría asemejarse a la articulación que se dispondría entre las correas y el cordón superior de la celosía. Seguidamente, se procede del mismo modo con las vinculaciones interiores, estando toda la estructura soporte empotrada.

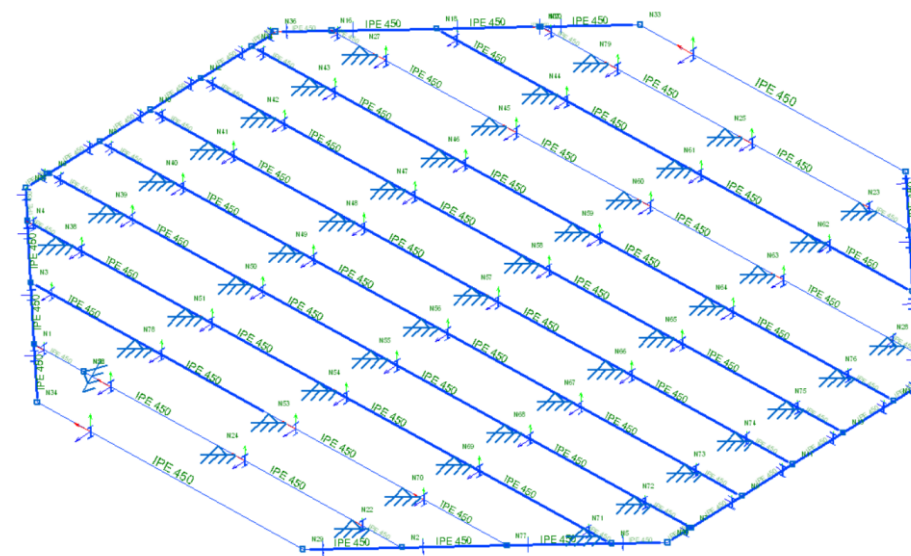


Figura 4 - Modelo estructural estructura soporte. Fuente: Propia.

Paralelamente en otro archivo, se ha procedido del mismo modo con la estructura en celosía. Los pilares metálicos se han considerado empotrados a los pilares metálicos de la cubierta del buque. Esto significa que en estos nudos los desplazamientos son nulos en los tres ejes al igual que los giros alrededor de cada eje. Todas las vinculaciones interiores entre las diagonales, montantes y diagonales de las celosías Warren con montantes, se han considerado que se encuentran empotradas.

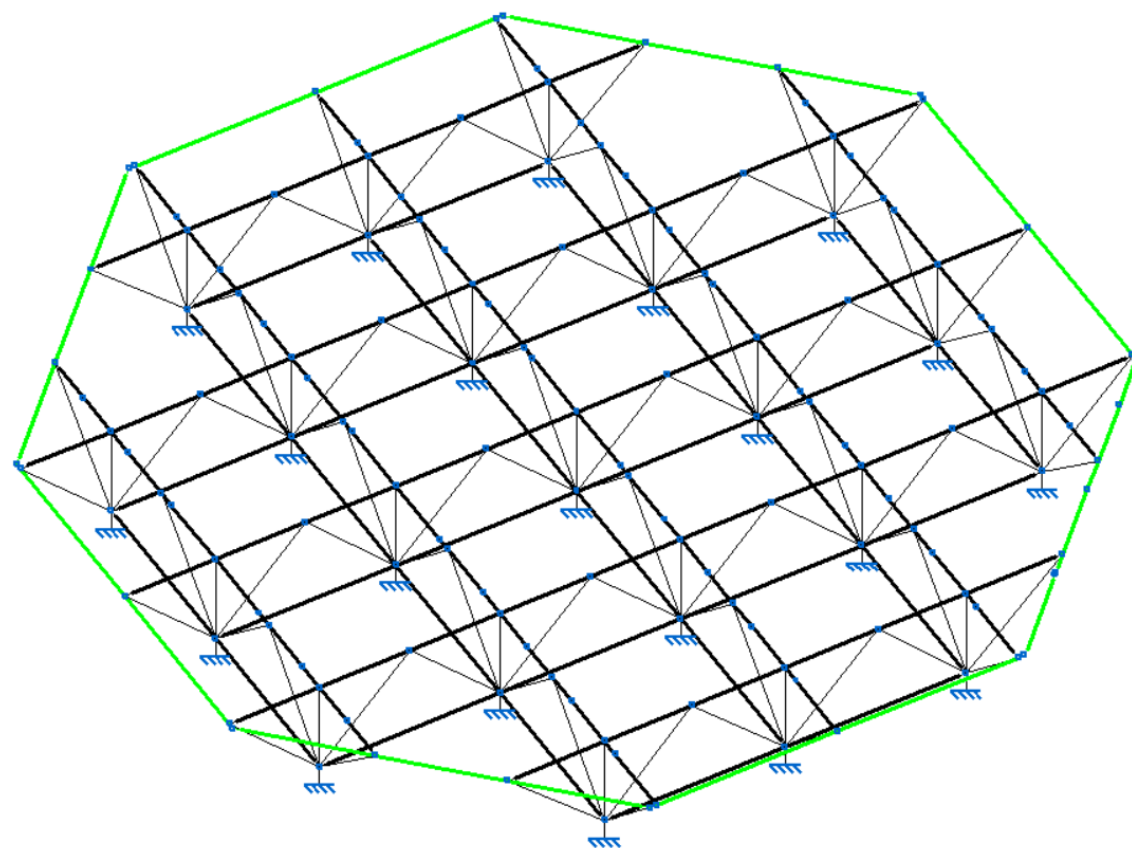


Figura 5 - Modelo estructural Estructura de celosías. Fuente: Propia.

A continuación, se han agrupado las barras de ambos modelos, según su disposición y función, no solo a la hora del cálculo estructural, sino también a la hora del proceso constructivo para poder materializar en la realidad el anclaje y las uniones, como por ejemplo de la red de seguridad. Se ha optado por las siguientes secciones:

- Cordón Superior: IPE 300
- Cordón Inferior: IPE 300
- Perfiles estructura soporte: IPE450
- Diagonales y montantes: Tubo rectangular TC- 100x100x5 mm
- Pilares metálicos: HEB 260

Una vez descritos todos los perfiles de ambos modelos, y establecerle la orientación correcta se aplican los coeficientes de pandeo en cada plano principal de la barra.

Por defecto el programa tiene establecido que cada barra tiene un coeficiente de pandeo $\beta_{xy} = \beta_{xz} = 1$, por lo que los coeficientes que no se muestren a continuación, se dará por hecho que el coeficiente de pandeo en cada plano será igual a la unidad.

Antes de nada, se aclara que la asignación de los coeficientes de pandeo, en todo momento se hace referencia a los ejes locales para cada barra, y no a los ejes globales de la estructura; y que el plano débil de las barras es el paralelo a las alas que equidista de ellas, es decir, que pasa por el eje de gravedad del perfil, y es llamado plano xy según los ejes locales como se muestra en la siguiente imagen. Por el contrario, el plano fuerte de las barras es el plano xz, coincidente con el plano del alma del perfil.

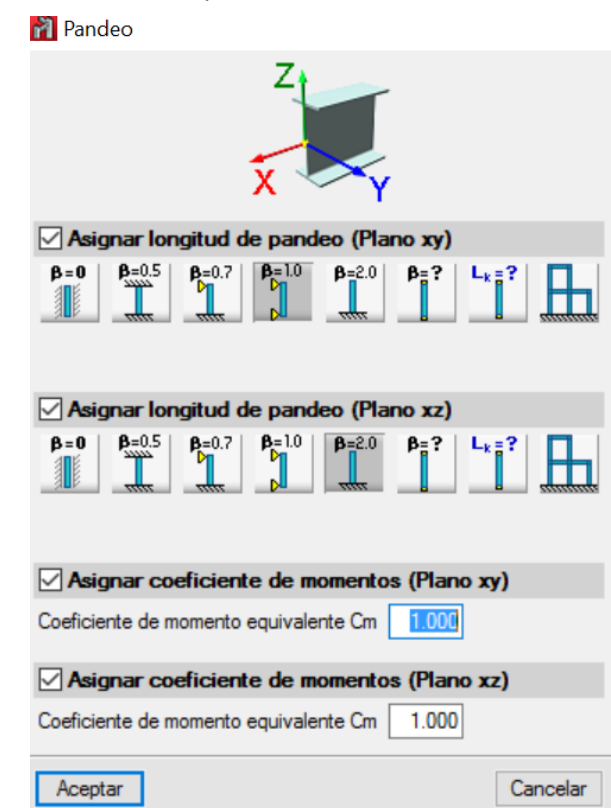


Figura 6 - Asignación de coeficientes de pandeo en Cype 3D. Fuente: CYPE 2016.

Una vez se selecciona la barra, se abre el cuadro de diálogo en el que se tienen que configurar los coeficientes de pandeo e cada planos, así como sus coeficientes de momentos. El coeficiente de momentos depende de cada norma y de la carga de la barra. Para su obtención se ha de estimar y calcular y en función de su diagrama de momentos flectores en cada plano se calcula el coeficiente de momentos correcto. El proceso iterativo terminaría, cuando los valores convergiesen a unos momentos estabilizados. No obstante, como los resultados de estas expresiones suelen ser cercanos y menores que 1, y como mínimo 0,4, el programa toma por defecto el valor unidad para cada plano principal, se pueden aceptar estos valores por defecto, quedando ligeramente del lado de la seguridad.

En primer lugar, se establece los coeficientes de pandeo en el cordón superior de las celosías. En el plano de inercia débil de estas barras, coinciden con los pandeos en el plano de cada alero para cada pieza. En estos planos están dispuestas las vigas de la estructura soporte cada 1,66 metros. Estas vigas arriostrarán en este plano a las barras que conforman el cordón superior haciendo que cuando pandee lo haga serpenteando por todos los puntos de contacto con las vigas, siendo estos, los puntos de inflexión de la deformada. En este caso se indica la longitud de pandeo de la barra, que es la distancia a la que se han dispuesto las correas. Por lo que el coeficiente de pandeo se deduce de la expresión $l_k = \beta \cdot l$, siendo $\beta = 1,667/1,667 = 1$.

Por otra parte, el plano de inercia fuerte, las barras están arriostradas cada 4 metros ya que se disponen dos barras entre diagonales por lo que el coeficiente de pandeo $\beta_{xz} = 2$.

El coeficiente de pandeo β_{xz} en el cordón inferior para el plano xz es igual a 1 al igual que ocurre con el coeficiente de pandeo en el plano xy es igual a 1.

Tanto en el plano de inercia fuerte como en el débil los pilares de los pórticos intermedios se ha considerado un coeficiente de pandeo igual a la unidad.

Las vigas de la estructura soporte están arriostradas en el eje fuerte cada 4 metros por las celosías por lo que su coeficiente de pandeo en el eje fuerte es igual a la unidad. Ocurre lo mismo en el plano xy, dado que no se disponen barras a modo de tirantillas que arriostren estas vigas, por lo que el coeficiente de pandeo es 1.

En cuanto al pandeo lateral se han escogido los mismos coeficientes que para el pandeo, tanto para el ala superior como para el ala inferior, estando así del lado de la seguridad.

Para concluir solo queda introducir las acciones, las cuales han quedado ya lo suficientemente detalladas en su respectivo apartado, y la limitación de flechas. Se ha introducido una limitación de flecha en aquellas barras que se han considerado que pueden sufrir una deformación que produjese una sensación desagradable debido a la flexión, y que no presentan una adecuada aptitud al servicio.

La limitación de flecha considerada es la flecha total o máxima, que es la que se produce ante la combinación pésima de acciones cuasi-permanentes. Es la suma de la flecha activa más la que ya tenía el elemento debido a su peso propio, medida justo antes del momento de construirse el elemento dañable; o lo que es lo mismo, la suma de todas las flechas instantáneas producidas por todas las cargas más sus correspondientes diferidas.

Los elementos en los que se ha considerado una limitación de flecha son el cordón superior de la celosía con una limitación de flecha máxima en los planos xy y xz de 1/300; y en las vigas de la estructura soporte donde la flecha límite relativa es de 1/250 en ambos planos.

Merece la pena comentar, que, durante el proceso previo al modelado estructural, se ha barajado la opción entre realizar un único modelo 3D que incluyese la estructura soporte en la estructura en celosía, la cual iría en el mismo plano. Finalmente, tal y como se observa en la siguiente imagen se ha realizado un único modelo conjunto con la intención de ver como se comporta en comparación con los dos modelos por separado, comprobando que los diagramas de esfuerzos en cuanto a forma y magnitud son prácticamente similares, aunque finalmente se ha decidido trabajar con dos modelos simples para trabajar de una manera mas cómoda y menos tediosa a la hora de introducir los diferentes parámetros sobre las barras.

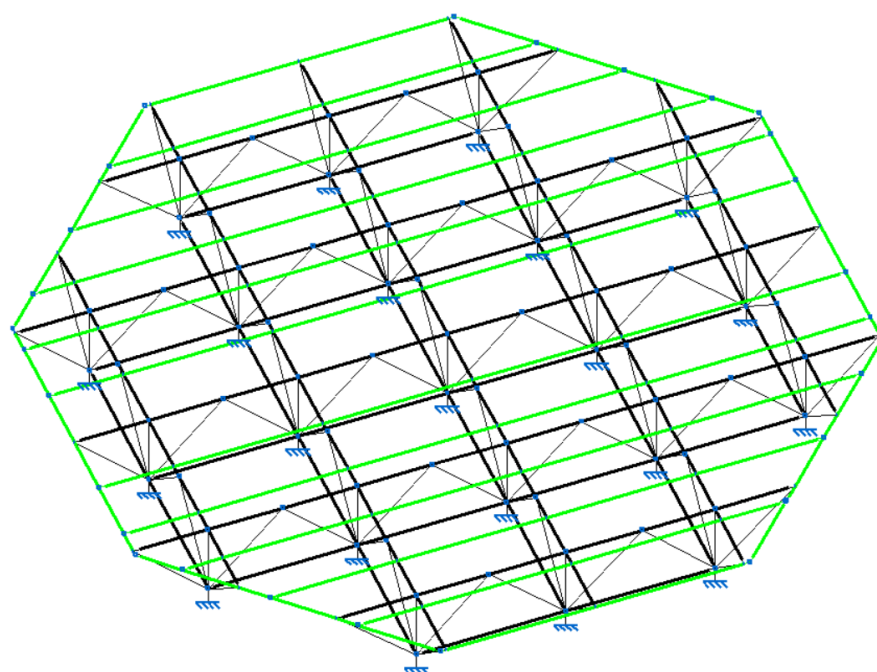


Figura 7 - Modelo 3D conjunto. Fuente: Propia.

6. Casos de carga

A continuación, se muestra una imagen en planta de la estructura soporte con 4 casos de carga distintos en función de donde se produzca el aterrizaje del helicóptero con el fin de seleccionar el caso mas desfavorable para la estructura.

Entre los casos de carga tenemos:

- **CASO H1:** El helicóptero aterriza en una misma viga con cada una de las ruedas en el centro de vano que forma con la celosía.
- **CASO H2:** El aterrizaje se produce en el perímetro del helipuerto, con las cargas puntuales aplicadas en los nudos entre las vigas interiores y la perimetral.
- **CASO H3:** En este caso, las cargas se aplican en el centro de vano de dos vigas interiores de la estructura soporte.
- **CASO H4:** Se trata de un caso de cargas en el perímetro, pero esta vez recayendo las cargas entre nudos de las vigas interiores.

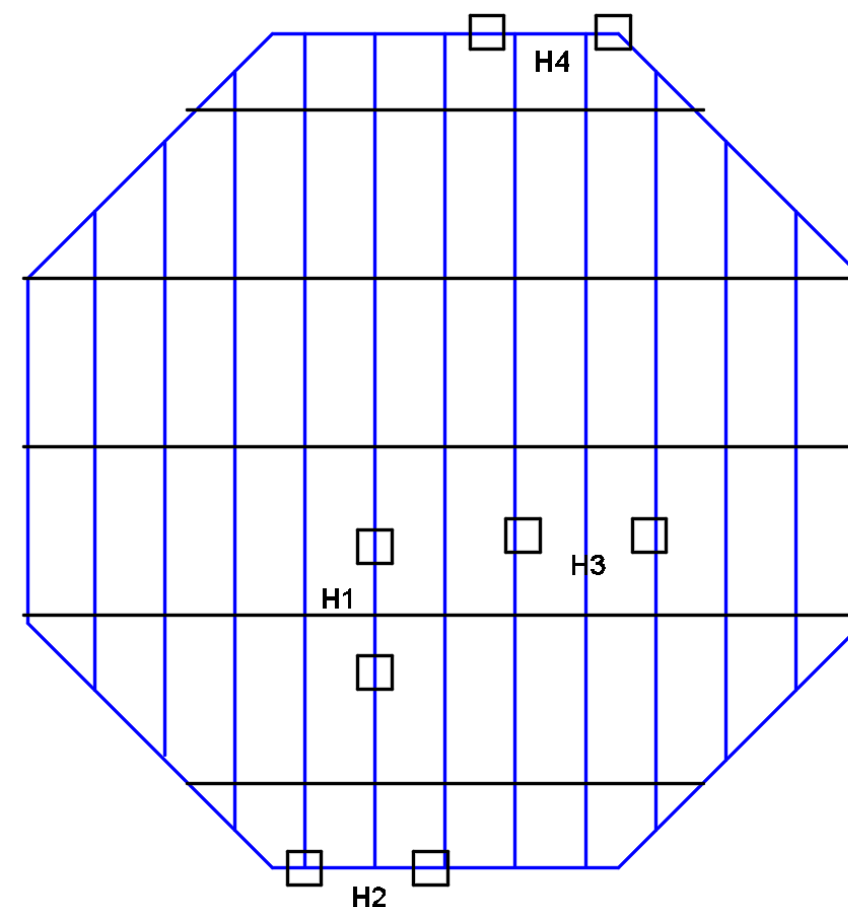


Figura 8 - Distintos casos de carga del helicóptero de diseño. Fuente: Propia.

Tras analizar, los esfuerzos, deformaciones y flechas, se ha considerado tener en cuenta para el calculo de esfuerzos en la celosía el caso de carga H1, al producirse resultados más desfavorables considerando la envolvente de acciones. Independientemente de los resultados, tiene cierto sentido dimensionar la estructura con los valores de este caso de carga dado que se encuentra cerca de la parte central del helipuerto, es decir, en la zona FATO/TLOF, lugar donde se realizarán prácticamente todas las maniobras.

7. Envolvente de esfuerzos y reacciones

A continuación, se pueden observar una serie de tablas que muestran los esfuerzos máximos y mínimos. Dichos esfuerzos son los más desfavorables para cada grupo de barras, y se han obtenido a partir de los listados que nos permite imprimir el Cype 3D una vez calculada la estructura. También se muestran las reacciones de la estructura soporte, que son las que se introducirán en la estructura en celosía a modo de cargas para representar el comportamiento del aterrizaje de emergencia del helicóptero.

7.1. Estructura soporte

Reacciones

Envolventes de las reacciones en nudos								
Referencia	Combinación		Reacciones en ejes globales					
	Tipo	Descripción	Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)	Mx (kN-m)	My (kN-m)	Mz (kN-m)
N22	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	7.704	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.007	0.083	10.405	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	7.704	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.006	0.072	7.708	0.00	0.00	0.00
N23	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-0.112	14.594	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.029	0.000	19.867	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-0.097	14.594	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.025	0.000	14.737	0.00	0.00	0.00
N24	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	10.940	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.002	0.000	14.773	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	10.941	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.002	0.000	10.943	0.00	0.00	0.00
N25	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.100	0.000	-4.148	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	-2.488	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.086	0.000	-3.153	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	-2.506	0.00	0.00	0.00
N27	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-1.032	-3.656	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	1.862	0.000	6.428	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-0.895	-2.534	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	1.613	0.000	4.762	0.00	0.00	0.00
N28	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.101	-0.087	4.165	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	6.015	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.087	-0.075	4.204	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	4.456	0.00	0.00	0.00
N38	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	11.110	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	1.736	0.843	17.534	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	11.110	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	1.504	0.730	13.307	0.00	0.00	0.00
N39	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-1.519	-4.124	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.785	0.000	-2.385	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-1.316	-2.843	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.680	0.000	-2.699	0.00	0.00	0.00
N40	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	-5.025	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.646	0.473	3.752	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	-3.984	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.560	0.410	2.779	0.00	0.00	0.00
N41	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-1.455	-12.330	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.488	0.000	7.286	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-1.261	-9.967	0.00	0.00	0.00

Envolventes de las reacciones en nudos								
Referencia	Combinación		Reacciones en ejes globales					
	Tipo	Descripción	Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)	Mx (kN-m)	My (kN-m)	Mz (kN-m)
N42	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	0.423	0.000	5.397	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	-14.851	-0.248	5.747	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	139.258	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	-12.871	-0.215	5.747	0.00	0.00	0.00
N43	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	-9.718	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.654	3.174	6.578	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	-7.773	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.567	2.751	4.872	0.00	0.00	0.00
N44	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-0.429	5.158	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.174	0.000	7.649	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-0.371	5.158	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.150	0.000	5.752	0.00	0.00	0.00
N45	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.202	0.000	4.679	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	8.500	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.175	0.000	4.679	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	6.571	0.00	0.00	0.00
N46	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.128	0.000	4.488	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	12.447	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.111	0.000	4.488	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	10.025	0.00	0.00	0.00
N47	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-77.066	0.000	4.084	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	391.150	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-66.791	0.000	4.084	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	338.303	0.00	0.00	0.00
N48	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.113	0.000	4.236	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	13.558	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.098	0.000	4.236	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	11.030	0.00	0.00	0.00
N49	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.127	0.000	5.407	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	10.770	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.110	0.000	5.407	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	8.415	0.00	0.00	0.00
N50	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.139	0.000	7.937	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	10.752	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.120	0.000	7.937	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	7.969	0.00	0.00	0.00
N51	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.192	0.000	2.389	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	4.226	0.00	0.00	0.00

Envolventes de las reacciones en nudos								
Referencia	Combinación		Reacciones en ejes globales					
	Tipo	Descripción	Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)	Mx (kN-m)	My (kN-m)	Mz (kN-m)
N52	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.166	0.000	2.488	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	3.131	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	1.934	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.216	0.312	2.708	0.00	0.00	0.00
N53	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	1.943	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.188	0.270	2.006	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.049	0.000	-3.109	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	-0.920	0.00	0.00	0.00
N54	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.042	0.000	-1.911	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	-1.511	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	5.362	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.047	0.000	7.429	0.00	0.00	0.00
N55	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	5.362	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.040	0.000	5.527	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	4.105	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.034	0.000	5.555	0.00	0.00	0.00
N56	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	4.106	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.029	0.000	4.115	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	3.947	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.031	0.000	6.519	0.00	0.00	0.00
N57	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	4.065	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.027	0.000	4.829	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	3.158	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.027	0.000	6.953	0.00	0.00	0.00
N58	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	3.423	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.024	0.000	5.150	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	5.165	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	5.889	0.000	54.349	0.00	0.00	0.00
N59	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	5.165	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	5.104	0.000	46.224	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	3.372	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.031	0.000	6.742	0.00	0.00	0.00
N60	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	3.588	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.027	0.000	4.994	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	4.376	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.049	0.000	6.654	0.00	0.00	0.00
N61	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	4.450	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.043	0.000	4.929	0.00	0.00	0.00
N61	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.051	0.000	3.954	0.00	0.00	0.00

Envolventes de las reacciones en nudos								
Referencia	Combinación		Reacciones en ejes globales					
	Tipo	Descripción	Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)	Mx (kN-m)	My (kN-m)	Mz (kN-m)
N62	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	5.904	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	-0.044	0.000	4.010	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	4.373	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	5.263	0.00	0.00	0.00
N63	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	0.003	0.033	7.215	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	5.263	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	0.003	0.029	5.358	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	-0.003	0.000	4.755	0.00	0.00	0.00
N64	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	6.618	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	-0.002	0.000	4.755	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	4.927	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	-0.002	0.000	4.667	0.00	0.00	0.00
N65	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	6.898	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	-0.002	0.000	4.667	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	-1.625	0.000	-6.924	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	5.839	0.00	0.00	0.00
N66	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	-1.409	0.000	-5.424	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	4.326	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	-0.002	0.000	4.236	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	6.462	0.00	0.00	0.00
N67	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	-0.001	0.000	4.236	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	4.881	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	-0.002	0.000	4.451	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	6.334	0.00	0.00	0.00
N68	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	-0.002	0.000	4.451	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	4.733	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	-0.002	0.000	4.994	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	6.749	0.00	0.00	0.00
N69	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	-0.002	0.000	4.994	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	5.000	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	-0.003	0.000	4.350	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	5.979	0.00	0.00	0.00
N70	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	-0.002	0.000	4.360	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	4.429	0.00	0.00	0.00
	Hormigón en cimentaciones	Valor máximo de la envolvente	0.000	-0.011	7.026	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.004	0.000	9.644	0.00	0.00	0.00
N70	Tensiones sobre el terreno	Valor máximo de la envolvente	0.000	-0.009	7.042	0.00	0.00	0.00
		Valor mínimo de la envolvente	0.004	0.000	7.144	0.00	0.00	0.00

Envolventes de las reacciones en nudos								
Referencia	Combinación		Reacciones en ejes globales					
	Tipo	Descripción	Rx (kN)	Ry (kN)	Rz (kN)	Mx (kN-m)	My (kN-m)	Mz (kN-m)
N71	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.094	0.000	5.357	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.068	7.366	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.082	0.000	5.357	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.059	5.473	0.00	0.00	0.00
N72	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.039	-0.070	4.126	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	5.587	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.033	-0.061	4.128	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	4.138	0.00	0.00	0.00
N73	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.032	0.000	4.747	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.022	6.815	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.028	0.000	4.787	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.019	5.048	0.00	0.00	0.00
N74	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.026	-0.065	4.685	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	7.273	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.022	-0.057	4.779	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.000	5.387	0.00	0.00	0.00
N75	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-0.011	5.165	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.658	0.000	10.296	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-0.010	5.165	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.570	0.000	8.045	0.00	0.00	0.00
N76	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	-0.033	0.000	3.882	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.139	5.994	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	-0.028	0.000	3.957	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.000	0.121	4.440	0.00	0.00	0.00
N78	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	14.118	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.164	0.459	20.059	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	0.000	14.217	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.142	0.398	14.858	0.00	0.00	0.00
N79	Hormigón en cimentaciones	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-0.567	14.586	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.519	0.000	21.639	0.00	0.00	0.00
	Tensiones sobre el terreno	Valor mínimo de la envolvente	0.000	-0.492	14.586	0.00	0.00	0.00
		Valor máximo de la envolvente	0.450	0.000	16.274	0.00	0.00	0.00

Envolvente de esfuerzos

Envolventes de los esfuerzos en barras											
Barra	Tipo de combinación	Esfuerzo	Posiciones en la barra								
			0.000 m	0.501 m	1.000 m	1.400 m	2.000 m	2.600 m	3.000 m	3.600 m	4.000 m
N47/N42	Aluminio extruido	N _{min}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		N _{max}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		Vy _{min}	-72.426	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		Vy _{max}	0.000	8.499	8.499	8.499	8.499	8.499	8.499	8.499	8.499
		Vz _{min}	-163.534	-162.741	-161.989	-161.403	-160.550	1.223	1.692	2.395	2.864
		Vz _{max}	-1.826	-1.238	-0.614	-0.097	0.701	103.612	104.246	105.194	105.828
		Mt _{min}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mt _{max}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		My _{min}	-172.01	-90.27	-9.30	0.20	0.02	-0.61	-1.31	-14.39	-56.59
		My _{max}	-1.17	-0.40	0.10	55.43	152.01	90.24	48.78	-2.20	-3.25
		Mz _{min}	-15.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.21	-5.31	-8.71
		Mz _{max}	0.00	21.03	16.79	13.39	8.29	3.19	0.00	0.00	0.00

7.2. Estructura en celosía

Cordón superior

Envolventes de los esfuerzos en barras											
Barra	Tipo de combinación	Esfuerzo	Posiciones en la barra								
			0.000 m	0.210 m	0.420 m	0.631 m	0.841 m	1.051 m	1.261 m	1.472 m	1.682 m
N79/N156	Aluminio extruido	N _{min}	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805
		N _{max}	52.206	52.206	52.206	52.206	52.206	52.206	52.206	52.206	52.206
		Vy _{min}	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003	-0.003
		Vy _{max}	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
		Vz _{min}	-116.598	-116.242	-115.886	-115.530	-115.173	-114.880	-114.616	-114.352	-114.089
		Vz _{max}	-1.139	-0.875	-0.612	-0.348	-0.084	0.243	0.599	0.955	1.312
		Mt _{min}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mt _{max}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		My _{min}	-56.22	-31.75	-7.37	0.17	0.21	0.20	0.14	0.01	-0.22
		My _{max}	-0.30	-0.09	0.09	16.98	41.23	65.40	89.50	113.53	137.53
		Mz _{min}	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01
		Mz _{max}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Cordón inferior

Envolventes de los esfuerzos en barras											
Barra	Tipo de combinación	Esfuerzo	Posiciones en la barra								
			0.000 m	0.500 m	1.000 m	1.500 m	2.000 m	2.500 m	3.000 m	3.500 m	4.000 m
N65/N63	Aluminio extruido	N _{min}	-37.993	-37.993	-37.993	-37.993	-37.993	-37.993	-37.993	-37.993	-37.993
		N _{max}	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062	-0.062
		Vy _{min}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		Vy _{max}	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
		Vz _{min}	-0.694	-0.521	-0.349	-0.177	-0.005	0.128	0.256	0.383	0.511
		Vz _{max}	3.126	3.254	3.382	3.509	3.637	3.804	3.976	4.148	4.320
		Mt _{min}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mt _{max}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		My _{min}	-0.46	-0.16	0.05	0.14	0.17	-0.61	-2.53	-4.53	-6.65
		My _{max}	8.00	6.41	4.76	3.08	1.30	0.20	0.07	-0.12	-0.34
		Mz _{min}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.02
		Mz _{max}	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00

Diagonales y montantes

Envolventes de los esfuerzos en barras											
Barra	Tipo de combinación	Esfuerzo	Posiciones en la barra								
			0.000 m	0.419 m	0.629 m	1.049 m	1.468 m	1.888 m	2.307 m	2.517 m	2.936 m
N67/N66	Aluminio extruido	N _{min}	-290.310	-290.278	-290.263	-290.231	-290.199	-290.167	-290.135	-290.119	-290.087
		N _{max}	-2.047	-2.024	-2.012	-1.988	-1.965	-1.941	-1.918	-1.906	-1.882
		Vy _{min}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
		Vy _{max}	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
		Vz _{min}	-3.736	-3.707	-3.692	-3.662	-3.633	-3.610	-3.588	-3.577	-3.555
		Vz _{max}	-0.086	-0.064	-0.053	-0.031	-0.009	0.019	0.049	0.064	0.093
		Mt _{min}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Mt _{max}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		My _{min}	-4.55	-2.99	-2.21	-0.67	0.02	0.02	0.01	0.00	-0.04
		My _{max}	-0.05	-0.02	-0.01	0.01	0.86	2.38	3.88	4.63	6.13
		Mz _{min}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.01	-0.01
		Mz _{max}	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Pilares HEB

Envoltures de los esfuerzos en barras					
Barra	Tipo de combinaci3n	Esfuerzo	Posiciones en la barra		
			0.000 m	0.250 m	0.500 m
N75/N65	Acero laminado	N _{mín}	-297.507	-297.200	-296.892
		N _{máx}	-13.262	-13.034	-12.806
		V _y _{mín}	0.032	0.032	0.032
		V _y _{máx}	116.028	116.028	116.028
		V _z _{mín}	-1.592	-1.592	-1.592
		V _z _{máx}	0.066	0.066	0.066
		M _t _{mín}	-0.01	-0.01	-0.01
		M _t _{máx}	0.00	0.00	0.00
		M _y _{mín}	-0.63	-0.24	0.00
		M _y _{máx}	0.03	0.02	0.16
		M _z _{mín}	0.02	0.01	-15.39
		M _z _{máx}	42.63	13.62	0.01

Resistencia a tracci3n (Euroc3digo 9 EN 1999-1-1: 2007, art3culo 6.2.3)

La comprobaci3n no procede, ya que no hay axil de tracci3n.

Resistencia a compresi3n (Euroc3digo 9 EN 1999-1-1: 2007, art3culos 6.2.4 - 6.3.1)

La comprobaci3n no procede, ya que no hay axil de compresi3n.

Resistencia a flexi3n en el eje Y (Euroc3digo 9 EN 1999-1-1: 2007, art3culos 6.2.5 - 6.3.2)

Se debe satisfacer:

$\eta :$ 0.632 ✓

8. Comprobaciones y dimensionamiento

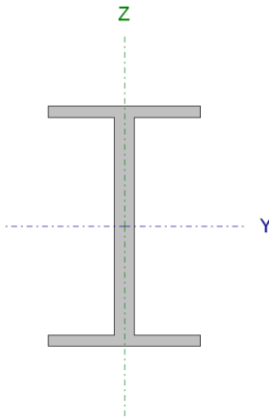
A continuaci3n, se procederá al dimensionamiento y comprobaci3n de las barras mas desfavorables de cada grupo de barras mencionados anteriormente, en concordancia con las envoltures de esfuerzos del apartado anterior. Se ha estudiado la resistencia y la inestabilidad de los perfiles. Los cálculos se han realizado aplicando el Eurocodigo 9: Diseño de estructuras de aluminio.

El dimensionamiento de los perfiles se va a relaizar mediante un cálculo elástico debido a que los perfiles escogidos, son de clase 3 por su geometría y las características mecánicas que presenta el aluminio, por lo que se considera que el material agotara cuando supere el limite elástico en un punto, quedando asi del lado de seguridad, tal y como se establece en la normativa.

8.1. Perfil IPE 450 de la estructura soporte

Perfil: IPE 450

Material: Aluminio (EN AW-7020)



Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
Inicial	Final		Área (cm²)	I _y ⁽¹⁾ (cm4)	I _z ⁽¹⁾ (cm4)	I _t ⁽²⁾ (cm4)
N47	N42	4.000	128.29	16329.26	1761.68	318.80
Notas: ⁽¹⁾ Inercia respecto al eje indicado ⁽²⁾ Momento de inercia a torsión uniforme						
	Pandeo		Pandeo lateral			
	Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
β	1.00	1.00	0.00	0.00		
L _K	4.000	4.000	0.000	0.000		
C ₁	-		1.000			
Notación: β: Coeficiente de pandeo L _K : Longitud de pandeo (m) C ₁ : Factor de modificación para el momento critico						

Flexi3n negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N47, para la combinaci3n de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1(1).

Donde:

M_{Ed}: es el momento flector solicitante de cálculo.

M_{Ed}⁺ : 0.00 kN·m

M_{Ed}⁻ : 172.01 kN·m

M_{c,Rd}: es la resistencia de cálculo a flexi3n uniaxial.

M_{c,Rd} : 272.15 kN·m

Clase: la clasificaci3n de la secci3n transversal depende de las dimensiones de sus elementos comprimidos, dado el momento flector, para la combinaci3n de acciones considerada.

Clase : 3

M_{c,Rd}: es la resistencia de cálculo a flexi3n uniaxial.

M_{c,Rd} : 272.15 kN·m

Donde:

α: es el factor de forma.

α : 1.000

W_{el}: es el módulo elástico de la secci3n bruta.

W_{el} : 1088.62 cm³

f_o: es el límite elástico para el 0,2% de deformaci3n.

f_o : 275.00 MPa

γ_{M1}: es el coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M1} : 1.10

α: es el factor de forma obtenido de la tabla 6.4. (Uni3n sin soldadura).

α : 1.000

Resistencia a flexión en el eje Z (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.5 - 6.3.2)

Se debe satisfacer:

η : 0.454 ✓

Flexión positiva:
El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.501 m del nudo N47, para la combinación de acciones PP+CM1+1.5·Q1(1).

Donde:

M_{Ed} : es el momento flector solicitante de cálculo.

M_{Ed}^+ : 21.03 kN·m

M_{Ed}^- : 0.00 kN·m

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$M_{c,Rd}$: 46.36 kN·m

Clase: la clasificación de la sección transversal depende de las dimensiones de sus elementos comprimidos, dado el momento flector, para la combinación de acciones considerada.

Clase : 3

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$M_{c,Rd}$: 46.36 kN·m

Donde:

α : es el factor de forma.

α : 1.000

W_{el} : es el módulo elástico de la sección bruta.

W_{el} : 185.44 cm³

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

f_o : 275.00 MPa

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M1} : 1.10

α : es el factor de forma obtenido de la tabla 6.4. (Unión sin soldadura).

α : 1.000

Resistencia a cortante en el eje Y (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.6 - 6.5.5)

Se debe satisfacer:

η : 0.101 ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N47, para la combinación de acciones PP+CM1+1.5·Q1(1).

Donde:

V_{Ed} : es el esfuerzo cortante solicitante de cálculo.

V_{Ed} : 72.43 kN

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal.

V_{Rd} : 714.47 kN

La obtención de la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal se realiza suponiendo una distribución de tensiones tangenciales uniforme sobre cada elemento plano de pared delgada que la compone, de tal forma que no se sobrepasa en ninguno de ellos la tensión de plastificación y se equilibra el esfuerzo cortante solicitante de cálculo. En su cálculo se considera tanto el pandeo local por cortante como la presencia de zonas HAZ.

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal. Se estima igual a la suma de las resistencias a cortante de cada una de las cuatro semialas.

V_{Rd} : 714.47 kN

Donde:

$V_{Rd,f}$: es la resistencia a cortante de cada semiala.

$V_{Rd,f}$: 178.62 kN

Clase: es la clasificación de cada semiala a cortante, considerando como tal una placa rectangular sin rigidizar sometida a esfuerzos cortantes uniformes.

Clase : no esbelta

Se considera la semiala como no esbelta, ya que se satisface la siguiente desigualdad:

5.50 ≤ 37.19 ✓

Donde:

β_f : es el parámetro de esbeltez de la semiala.

β_f : 5.50

$39 \cdot e$: es el límite de esbeltez.

$39 \cdot e$: 37.19

β_f : es el parámetro de esbeltez de la semiala.

β_f : 5.50

Donde:			V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal. Se estima igual a la resistencia a cortante del alma.	
b_f : es el ancho de la semiala.	b_f :	82.50 mm		
t_f : es el espesor de la semiala.	t_f :	15.00 mm		
ε : es un parámetro dependiente de la resistencia característica del material.				V_{Rd} : 974.28 kN
	ε :	0.95	Donde:	
			$V_{Rd,w}$: es la resistencia a cortante del alma.	$V_{Rd,w}$: 974.28 kN
Donde:			Clase : es la clasificación del alma a cortante, considerándola como una placa rectangular sin rigidizar sometida a esfuerzos cortantes uniformes.	Clase : $no\ esbelta$
f_{ref} : es el límite elástico de referencia.	f_{ref} :	250.00 MPa	Se considera el alma como no esbelta, ya que se satisface la siguiente desigualdad:	
f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.	f_o :	275.00 MPa		$10.80 \leq 37.19$ ✓
$V_{Rd,f}$: es la resistencia a cortante de cada semiala. Se toma el valor correspondiente al de fluencia general a lo largo del elemento.			Donde:	
	$V_{Rd,f}$:	178.62 kN	β_w : es el parámetro de esbeltez del alma.	β_w : 10.80
			$39 \cdot \varepsilon$: es el límite de esbeltez.	$39 \cdot \varepsilon$: 37.19
Donde:				
b_f : es el ancho de la semiala.	b_f :	82.50 mm	β_w : es el parámetro de esbeltez del alma.	
t_f : es el espesor de la semiala.	t_f :	15.00 mm		β_w : 10.80
f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.	f_o :	275.00 MPa		
γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.	γ_{M1} :	1.10		
Resistencia a cortante en el eje Z (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.6 - 6.5.5)				
Se debe satisfacer:				
	η :	0.168 ✓	ε : es un parámetro dependiente de la resistencia característica del material.	
				ε : 0.95
Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N47, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1(1).			Donde:	
Donde:			f_{ref} : es el límite elástico de referencia.	f_{ref} : 250.00 MPa
V_{Ed} : es el esfuerzo cortante solicitante de cálculo.	V_{Ed} :	163.53 kN	f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.	f_o : 275.00 MPa
V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal.	V_{Rd} :	974.28 kN	$V_{Rd,w}$: es la resistencia a cortante del alma. Se toma el valor correspondiente al de fluencia general a lo largo del elemento.	
				$V_{Rd,w}$: 974.28 kN
La obtención de la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal se realiza suponiendo una distribución de tensiones tangenciales uniforme sobre cada elemento plano de pared delgada que la compone, de tal forma que no se sobrepasa en ninguno de ellos la tensión de plastificación y se equilibra el esfuerzo cortante solicitante de cálculo. En su cálculo se considera tanto el pandeo local por cortante como la presencia de zonas HAZ.			Donde:	
			b_w : es la altura del alma.	b_w : 270.00 mm
			t_w : es el espesor del alma.	t_w : 25.00 mm
			f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.	f_o : 275.00 MPa

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

Resistencia a torsión (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículo 6.2.7.1)

La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.

Resistencia a flexión en el eje Y y a cortante en el eje Z combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículo 6.2.8)

La comprobación no procede por coincidir con la de elementos a flexión, positiva o negativa dependiendo del signo del momento flector de cálculo, en el eje 'y', puesto que el efecto del esfuerzo cortante en el eje 'z' es despreciable para el cálculo del momento flector resistente.

No es necesario considerar el efecto del cortante en la dirección del eje 'z' para el cálculo de la resistencia a flexión, ya que se satisface la siguiente desigualdad:

$$0.17 \leq 0.50 \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1(1).

Donde:

V_{Ed} : es el cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Ed} : \underline{163.53} \text{ kN}$$

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante.

$$V_{Rd} : \underline{974.28} \text{ kN}$$

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante. Su valor coincide con el obtenido en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'z'.

$$V_{Rd} : \underline{974.28} \text{ kN}$$

Resistencia a flexión en el eje Z y a cortante en el eje Y combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículo 6.2.8)

No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a torsión y cortante en el eje Y combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.7.3)

No hay interacción entre torsión y cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a torsión y cortante en el eje Z combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.7.3)

No hay interacción entre torsión y cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a axil y flexión biaxial combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.9 - 6.3.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta : \underline{0.632} \quad \checkmark$$

$$\eta : \underline{0.959} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N47, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1(1).

Donde:

N_{Ed} : es el axil de tracción solicitante de cálculo.

$$N_{Ed} : \underline{0.00} \text{ kN}$$

$M_{y,Ed}$: es el momento flector solicitante de cálculo alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$$M_{y,Ed} : \underline{172.01} \text{ kN·m}$$

$M_{z,Ed}$: es el momento flector solicitante de cálculo alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$$M_{z,Ed} : \underline{15.17} \text{ kN·m}$$

N_{Rd} : es la resistencia de cálculo a tracción.

$$N_{Rd} : \underline{3207.14} \text{ kN}$$

$M_{y,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$$M_{y,Rd} : \underline{272.15} \text{ kN·m}$$

$M_{z,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$$M_{z,Rd} : \underline{46.36} \text{ kN·m}$$

η_0 : es un exponente calculado en función de los factores de forma para flexión en el eje 'z' e 'y'.

$$\eta_0 : \underline{1.00}$$

γ_0 : es un exponente calculado en función del factor de forma para flexión en el eje 'z'.

$$\gamma_0 : \underline{1.00}$$

ξ_0 : es un exponente calculado en función del factor de forma para flexión en el eje 'y'.

$$\xi_0 : \underline{1.00}$$

N_{Rd} : es la resistencia de cálculo a tracción.

$$N_{Rd} : \underline{3207.14} \text{ kN}$$

Donde:

A_g : es el área de la sección bruta o el área de la sección transversal reducida que tiene en cuenta el reblandecimiento HAZ debido a soldaduras longitudinales.

$$A_g : \underline{128.29} \text{ cm}^2$$

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$f_o : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

$M_{y,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$$M_{y,Rd} : \underline{272.15} \text{ kN·m}$$

Donde:

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$$\alpha_y : \underline{1.000}$$

$W_{y,el}$: es el módulo elástico de la sección bruta para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$$W_{y,el} : \underline{1088.62} \text{ cm}^3$$

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$f_o : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$$\alpha_y : \underline{1.000}$$

$M_{z,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

Donde:

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$W_{z,el}$: es el módulo elástico de la sección bruta para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$M_{z,Rd}$: 46.36 kN·m

α_z : 1.000

$W_{z,el}$: 185.44 cm³

f_o : 275.00 MPa

γ_{M1} : 1.10

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

η_o : es un exponente calculado en función de los factores de forma para flexión en el eje 'z' e 'y'.

Donde:

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

γ_o : es un exponente calculado en función del factor de forma para flexión en el eje 'z'.

Donde:

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

ξ_o : es un exponente calculado en función del factor de forma para flexión en el eje 'y'.

Donde:

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

α_z : 1.000

η_o : 1.00

α_y : 1.000

α_z : 1.000

γ_o : 1.00

α_z : 1.000

ξ_o : 1.00

α_y : 1.000

8.2. Perfil IPE 300 del cordón superior de la celosía

Los perfil de aluminio que comprende el cordón superior así como el resto de la celosía se une mediante soldadura por lo que según la normativa, la resistencia del perfil se ve disminuida en la zona HAZ alrededor de la unión, por lo que se proponen valores de la resistencia y factores a introducir en las expresiones con el fin de tener en cuenta este efecto. Los listados que se pueden extraer del programa de cálculo que siguen perfectamente el orden de las comprobaciones de la normativa, no tienen en cuenta dichos factores, por lo que basándonos en los mismos se introducirán y recalcularán para un correcto análisis de los perfiles. Esto ocurre en el cordón superior, en el cordón inferior y en los montantes y diagonales.

Perfil: IPE300						
Material: Aluminio (EN AW-7020)						
	Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas		
	Inicial	Final		Área (cm²)	I _y ⁽¹⁾ (cm⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm⁴)
						I _t ⁽²⁾ (cm⁴)
	N79	N156	1.682	96.31	16448.74	1135.41
Notas:						
(1) Inercia respecto al eje indicado						
(2) Momento de inercia a torsión uniforme						
	Pandeo		Pandeo lateral			
	Plano XY		Plano XZ		Ala sup.	Ala inf.
	β	1.00	2.00	1.00	1.00	1.00
	L _K	1.682	3.364	1.682	1.682	1.682
	C ₁	-	-	1.000	1.000	1.000
Notación:						
β: Coeficiente de pandeo						
L _K : Longitud de pandeo (m)						
C ₁ : Factor de modificación para el momento crítico						

Resistencia a tracción (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículo 6.2.3)

Se debe satisfacer:

η : 0.030 ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Donde:

N_{Ed} : es el axil de tracción solicitante de cálculo.

N_{Ed} : 52.21 kN

Resistencia a torsión, cortante, axil y flexión biaxial combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.9 - 6.2.10 - 6.3.3)

No hay interacción entre torsión, cortante, axil de compresión y momento flector para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

$N_{t,Rd}$: es la resistencia a tracción de cálculo de la sección transversal. Tomando el valor correspondiente a la fluencia general a lo largo del elemento $N_{o,Rd}$, teniendo en cuenta las conexiones de extremo, y las zonas HAZ localizadas.

$$N_{u,Rd} = A_{eff} f_{u,HAZ} / \gamma_{M2}$$

Donde:

A_{eff} : es el área eficaz, al existir reblandecimiento HAZ debido a soldaduras longitudinales.

$f_{u,HAZ}$: es el límite elástico para zonas HAZ.

γ_{M2} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$N_{t,Rd} : \underline{1725} \text{ kN}$$

$$N_{u,Rd} : \underline{1725.87} \text{ kN}$$

$$A_{eff} : \underline{77.048} \text{ cm}^2$$

$$f_{u,HAZ} : \underline{280.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M2} : \underline{1.25}$$

Resistencia a compresión (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.4 - 6.3.1)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de compresión.

Resistencia a flexión en el eje Y (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.5 - 6.3.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta_1 : \underline{0.552} \quad \checkmark$$

$$\eta_2 : \underline{0.623} \quad \checkmark$$

Flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N156, para la combinación de acciones PP+CM1+1.5·Q1.

Flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N156, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1.

Donde:

M_{Ed} : es el momento flector solicitante de cálculo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{137.53} \text{ kN·m}$$

$$M_{Ed}^- : \underline{0.22} \text{ kN·m}$$

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$$M_{c,Rd} : \underline{249.22} \text{ kN·m}$$

$M_{b,Rd}$: es la resistencia de cálculo a pandeo lateral con torsión.

$$M_{b,Rd}^+ : \underline{220.90} \text{ kN·m}$$

Clase: la clasificación de la sección transversal depende de las dimensiones de sus elementos comprimidos, dado el momento flector, para la combinación de acciones considerada.

$$\text{Clase} : \underline{3}$$

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$$M_{c,Rd} : \underline{249.22} \text{ kN·m}$$

Donde:

α : es el factor de forma.

$$\alpha : \underline{1.000}$$

W_{el} : es el módulo elástico de la sección bruta.

$$W_{el} : \underline{996.89} \text{ cm}^3$$

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$f_o : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

α : es el factor de forma.

$$\alpha : \underline{1.000}$$

Cálculo del momento resistente a pandeo lateral con torsión para flexión positiva:

$M_{b,Rd}$: es la resistencia de cálculo a pandeo lateral con torsión.

$$M_{b,Rd} : \underline{220.90} \text{ kN·m}$$

Donde:

χ_{LT} : es el coeficiente de reducción por pandeo lateral con torsión.

$$\chi_{LT} : \underline{0.89}$$

α : es el factor de forma.

$$\alpha : \underline{1.000}$$

W_{el} : es el módulo elástico de la sección bruta.

$$W_{el} : \underline{996.89} \text{ cm}^3$$

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$f_o : \underline{275.00} \text{ MPa}$$

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

χ_{LT} : es el coeficiente de reducción por pandeo lateral con torsión.



	χ_{LT} : 0.89	I_z : es el momento de inercia de la sección bruta respecto al eje principal de inercia 'z'.	I_z : 1135.41 cm4
		G : es el módulo de elasticidad transversal.	G : 27000.00 MPa
		I_t : es el módulo de torsión de la sección bruta.	I_t : 92.96 cm4
		L : es la longitud del elemento.	L : 20.000 m
Donde:		μ_{cr} : es el momento crítico relativo adimensional.	
$\bar{\lambda}_{LT}$: es la esbeltez relativa para pandeo lateral con torsión.	$\bar{\lambda}_{LT}$: 0.73		
Φ_{LT} : es un factor relativo al cálculo del coeficiente de reducción por pandeo lateral con torsión.	Φ_{LT} : 0.80		
			μ_{cr} : 224.69 kN·m
Φ_{LT} : es un factor relativo al cálculo del coeficiente de reducción por pandeo lateral con torsión.		Donde:	
	Φ_{LT} : 0.80	$k_{z,LT}$: es el coeficiente que define la longitud de pandeo por flexión en el plano 'xz'.	$k_{z,LT}$: 0.08
Donde:		κ_{wt} : es el parámetro de torsión adimensional.	κ_{wt} : 1.65
α_{LT} : es un coeficiente de imperfección para pandeo lateral con torsión.	α_{LT} : 0.20	ζ_g : es la coordenada relativa adimensional del punto de aplicación de la carga respecto del centro de esfuerzos cortantes.	ζ_g : 0.00
$\bar{\lambda}_{LT}$: es la esbeltez relativa para pandeo lateral con torsión.	$\bar{\lambda}_{LT}$: 0.73	C_1 y C_2 : son coeficientes dependientes de las cargas aplicadas y de las condiciones de coacción en los extremos del elemento. Se estiman iguales a la unidad.	C_1 : 1.00
$\bar{\lambda}_{0,LT}$: es el límite de la meseta horizontal en la curva de pandeo lateral con torsión.	$\bar{\lambda}_{0,LT}$: 0.40		C_2 : 1.00
$\bar{\lambda}_{LT}$: es la esbeltez relativa para pandeo lateral con torsión.		κ_{wt} : es el parámetro de torsión adimensional.	
	$\bar{\lambda}_{LT}$: 0.73		κ_{wt} : 1.65
Donde:		Donde:	
f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.	f_o : 275.00 MPa	$k_{w,LT}$: es el coeficiente que define la longitud de pandeo por torsión.	$k_{w,LT}$: 0.08
α : es el factor de forma.	α : 1.000	L : es la longitud del elemento.	L : 20.000 m
W_{el} : es el módulo elástico de la sección bruta.	W_{el} : 996.89 cm ³	E : es el módulo de elasticidad longitudinal.	E : 70000.00 MPa
M_{cr} : es el momento crítico elástico para pandeo lateral con torsión.	M_{cr} : 508.15 kN·m	I_w : es el módulo de alabeo de la sección bruta.	I_w : 278431.50 cm6
		G : es el módulo de elasticidad transversal.	G : 27000.00 MPa
M_{cr} : es el momento crítico elástico para pandeo lateral con torsión.		I_t : es el módulo de torsión de la sección bruta.	I_t : 92.96 cm4
	M_{cr} : 508.15 kN·m	ζ_g : es la coordenada relativa adimensional del punto de aplicación de la carga respecto del centro de esfuerzos cortantes.	
Donde:			ζ_g : 0.00
μ_{cr} : es el momento crítico relativo adimensional.	μ_{cr} : 22.90		
E : es el módulo de elasticidad longitudinal.	E : 70000.00 MPa		

Donde:

z_g : es la coordenada en la dirección del eje 'z' del punto de aplicación de la carga respecto al centro de esfuerzos cortantes.

$k_{z,LT}$: es el coeficiente que define la longitud de pandeo por flexión en el plano 'xz'.

L : es la longitud del elemento.

E : es el módulo de elasticidad longitudinal.

I_z : es el momento de inercia de la sección bruta respecto al eje principal de inercia 'z'.

G : es el módulo de elasticidad transversal.

I_t : es el módulo de torsión de la sección bruta.

z_g	:	<u>0.00</u>	mm
$k_{z,LT}$:	<u>0.08</u>	
L	:	<u>20.000</u>	m
E	:	<u>70000.00</u>	MPa
I_z	:	<u>1135.41</u>	cm ⁴
G	:	<u>27000.00</u>	MPa
I_t	:	<u>92.96</u>	cm ⁴

z_g : es la coordenada en la dirección del eje 'z' del punto de aplicación de la carga respecto al centro de esfuerzos cortantes.

Donde:

z_a : es la coordenada en la dirección del eje 'z' del punto de aplicación de la carga respecto al centro de gravedad de la sección. Se estima que la carga está aplicada en el centro de esfuerzos cortantes.

z_s : es la coordenada en la dirección del eje 'z' del centro de esfuerzos cortantes respecto del centro de gravedad de la sección.

z_g	:	<u>0.00</u>	mm
z_a	:	<u>0.00</u>	mm
z_s	:	<u>0.00</u>	mm

No es necesaria la comprobación a pandeo lateral con torsión por flexión negativa alrededor del eje principal de inercia 'y', ya que se satisface al menos una de las siguientes desigualdades:

$$\begin{array}{lcl} 0.73 & \leq & 0.40 \\ 0.22 & \leq & 81.30 \end{array} \quad \checkmark$$

Donde:

$\bar{\lambda}_{LT}$: es la esbeltez relativa para pandeo lateral con torsión.

$\bar{\lambda}_{0,LT}$: es el límite de la meseta horizontal en la curva de pandeo lateral con torsión.

M_{Ed} : es el momento flector solicitante de cálculo.

M_{cr} : es el momento crítico elástico para pandeo lateral con torsión.

$\bar{\lambda}_{LT}$:	<u>0.73</u>	
$\bar{\lambda}_{0,LT}$:	<u>0.40</u>	
M_{Ed}	:	<u>0.22</u>	kN·m
M_{cr}	:	<u>508.15</u>	kN·m

$\bar{\lambda}_{LT}$: es la esbeltez relativa para pandeo lateral con torsión.

$$\bar{\lambda}_{LT} : \underline{0.73}$$

Donde:

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

α : es el factor de forma.

W_{el} : es el módulo elástico de la sección bruta.

M_{cr} : es el momento crítico elástico para pandeo lateral con torsión.

f_o	:	<u>275.00</u>	MPa
α	:	<u>1.000</u>	
W_{el}	:	<u>996.89</u>	cm ³
M_{cr}	:	<u>508.15</u>	kN·m

M_{cr} : es el momento crítico elástico para pandeo lateral con torsión.

$$M_{cr} : \underline{508.15} \quad \text{kN·m}$$

Donde:

μ_{cr} : es el momento crítico relativo adimensional.

E : es el módulo de elasticidad longitudinal.

I_z : es el momento de inercia de la sección bruta respecto al eje principal de inercia 'z'.

G : es el módulo de elasticidad transversal.

I_t : es el módulo de torsión de la sección bruta.

L : es la longitud del elemento.

μ_{cr}	:	<u>22.90</u>	
E	:	<u>70000.00</u>	MPa
I_z	:	<u>1135.41</u>	cm ⁴
G	:	<u>27000.00</u>	MPa
I_t	:	<u>92.96</u>	cm ⁴
L	:	<u>20.000</u>	m

μ_{cr} : es el momento crítico relativo adimensional.

$$\mu_{cr} : \underline{224.69} \quad \text{kN·m}$$

Donde:

$k_{z,LT}$: es el coeficiente que define la longitud de pandeo por flexión en el plano 'xz'.

κ_{wt} : es el parámetro de torsión adimensional.

ζ_g : es la coordenada relativa adimensional del punto de aplicación de la carga respecto del centro de esfuerzos cortantes.

C_1 y C_2 : son coeficientes dependientes de las cargas aplicadas y de las condiciones de coacción en los extremos del elemento. Se estiman iguales a la unidad.

$k_{z,LT}$:	<u>0.08</u>	
κ_{wt}	:	<u>1.65</u>	
ζ_g	:	<u>0.00</u>	
C_1	:	<u>1.00</u>	

κ_{wt} : es el parámetro de torsión adimensional.

$$C_2 : 1.00$$

$$\kappa_{wt} : 1.65$$

Donde:

$k_{w,LT}$: es el coeficiente que define la longitud de pandeo por torsión.

L : es la longitud del elemento.

E : es el módulo de elasticidad longitudinal.

I_w : es el módulo de alabeo de la sección bruta.

G : es el módulo de elasticidad transversal.

I_t : es el módulo de torsión de la sección bruta.

$$\begin{aligned} k_{w,LT} &: 0.08 \\ L &: 20.000 \text{ m} \\ E &: 70000.00 \text{ MPa} \\ I_w &: 278431.50 \text{ cm}^6 \\ G &: 27000.00 \text{ MPa} \\ I_t &: 92.96 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

ζ_g : es la coordenada relativa adimensional del punto de aplicación de la carga respecto del centro de esfuerzos cortantes.

$$\zeta_g : 0.00$$

Donde:

z_g : es la coordenada en la dirección del eje 'z' del punto de aplicación de la carga respecto al centro de esfuerzos cortantes.

$k_{z,LT}$: es el coeficiente que define la longitud de pandeo por flexión en el plano 'xz'.

L : es la longitud del elemento.

E : es el módulo de elasticidad longitudinal.

I_z : es el momento de inercia de la sección bruta respecto al eje principal de inercia 'z'.

G : es el módulo de elasticidad transversal.

I_t : es el módulo de torsión de la sección bruta.

$$\begin{aligned} z_g &: 0.00 \text{ mm} \\ k_{z,LT} &: 0.08 \\ L &: 20.000 \text{ m} \\ E &: 70000.00 \text{ MPa} \\ I_z &: 1135.41 \text{ cm}^4 \\ G &: 27000.00 \text{ MPa} \\ I_t &: 92.96 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

z_g : es la coordenada en la dirección del eje 'z' del punto de aplicación de la carga respecto al centro de esfuerzos cortantes.

$$z_g : 0.00 \text{ mm}$$

Donde:

z_a : es la coordenada en la dirección del eje 'z' del punto de aplicación de la carga respecto al centro de gravedad de la sección. Se estima que la carga está aplicada en el centro de esfuerzos cortantes.

$$z_a : 0.00 \text{ mm}$$

z_s : es la coordenada en la dirección del eje 'z' del centro de esfuerzos cortantes respecto del centro de gravedad de la sección.

$$z_s : 0.00 \text{ mm}$$

Resistencia a flexión en el eje Z (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.5 - 6.3.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta < 0.001 \quad \checkmark$$

Flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N156, para la combinación de acciones PP+CM1+1.5·Q1.

Donde:

M_{Ed} : es el momento flector solicitante de cálculo.

$$M_{Ed}^+ : 0.00 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{Ed}^- : 0.01 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$$M_{c,Rd} : 35.48 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Clase: la clasificación de la sección transversal depende de las dimensiones de sus elementos comprimidos, dado el momento flector, para la combinación de acciones considerada.

$$\text{Clase} : 3$$

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$$M_{c,Rd} : 35.48 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

α : es el factor de forma.

$$\alpha : 1.000$$

W_{el} : es el módulo elástico de la sección bruta.

$$W_{el} : 141.93 \text{ cm}^3$$

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$f_o : 275.00 \text{ MPa}$$

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : 1.10$$

α : es el factor de forma.

$$\alpha : 1.000$$

Resistencia a cortante en el eje Y (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.6 - 6.5.5)

Se debe satisfacer:

$$\eta < \underline{0.001} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones PP+1.35·CM1.

Donde:

V_{Ed}: es el esfuerzo cortante solicitante de cálculo.

$$\mathbf{V_{Ed}} : \underline{0.00} \quad \text{kN}$$

V_{Rd}: es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal.

$$\mathbf{V_{Rd}} : \underline{695.42} \quad \text{kN}$$

La obtención de la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal se realiza suponiendo una distribución de tensiones tangenciales uniforme sobre cada elemento plano de pared delgada que la compone, de tal forma que no se sobrepasa en ninguno de ellos la tensión de plastificación y se equilibra el esfuerzo cortante solicitante de cálculo. En su cálculo se considera tanto el pandeo local por cortante como la presencia de zonas HAZ.

V_{Rd}: es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal. Se estima igual a la suma de las resistencias a cortante de cada una de las cuatro semialas.

$$\mathbf{V_{Rd}} : \underline{695.42} \quad \text{kN}$$

Donde:

V_{Rd,f}: es la resistencia a cortante de cada semiala.

$$\mathbf{V_{Rd,f}} : \underline{173.85} \quad \text{kN}$$

Clase: es la clasificación de cada semiala a cortante, considerando como tal una placa rectangular sin rigidizar sometida a esfuerzos cortantes uniformes.

$$\mathbf{Clase} : \underline{no\ esbelta}$$

Se considera la semiala como no esbelta, ya que se satisface la siguiente desigualdad:

$$\mathbf{4.42} \leq \mathbf{37.19} \quad \checkmark$$

Donde:

β_f: es el parámetro de esbeltez de la semiala.

$$\beta_f : \underline{4.42}$$

39·ε: es el límite de esbeltez.

$$\mathbf{39 \cdot \epsilon} : \underline{37.19}$$

β_f: es el parámetro de esbeltez de la semiala.

$$\beta_f : \underline{4.42}$$

Donde:

b_f: es el ancho de la semiala.

$$\mathbf{b_f} : \underline{73.00} \quad \text{mm}$$

t_f: es el espesor de la semiala.

$$\mathbf{t_f} : \underline{16.50} \quad \text{mm}$$

ε: es un parámetro dependiente de la resistencia característica del material.

$$\epsilon : \underline{0.95}$$

Donde:

f_{ref}: es el límite elástico de referencia.

$$\mathbf{f_{ref}} : \underline{250.00} \quad \text{MPa}$$

f_o: es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$\mathbf{f_o} : \underline{275.00} \quad \text{MPa}$$

V_{Rd,f}: es la resistencia a cortante de cada semiala. Se toma el valor correspondiente al de fluencia general a lo largo del elemento.

$$\mathbf{V_{Rd,f}} : \underline{173.85} \quad \text{kN}$$

Donde:

b_f: es el ancho de la semiala.

$$\mathbf{b_f} : \underline{73.00} \quad \text{mm}$$

t_f: es el espesor de la semiala.

$$\mathbf{t_f} : \underline{16.50} \quad \text{mm}$$

f_o: es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$\mathbf{f_o} : \underline{275.00} \quad \text{MPa}$$

γ_{M1}: es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

Resistencia a cortante en el eje Z (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.6 - 6.5.5)

Se debe satisfacer:

$$\eta : \underline{0.194} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N79, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Donde:				ε : es un parámetro dependiente de la resistencia característica del material.	
V_{Ed} : es el esfuerzo cortante solicitante de cálculo.	V_{Ed}	:	<u>116.60</u>	kN	
V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal.	V_{Rd}	:	<u>600.16</u>	kN	ε : <u>0.95</u>
La obtención de la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal se realiza suponiendo una distribución de tensiones tangenciales uniforme sobre cada elemento plano de pared delgada que la compone, de tal forma que no se sobrepasa en ninguno de ellos la tensión de plastificación y se equilibra el esfuerzo cortante solicitante de cálculo. En su cálculo se considera tanto el pandeo local por cortante como la presencia de zonas HAZ.					
V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal. Se estima igual a la resistencia a cortante del alma.					$V_{Rd,w}$: <u>600.16</u> kN
Donde:	V_{Rd}	:	<u>600.16</u>	kN	
$V_{Rd,w}$: es la resistencia a cortante del alma.	$V_{Rd,w}$:	<u>600.16</u>	kN	
Clase : es la clasificación del alma a cortante, considerándola como una placa rectangular sin rigidizar sometida a esfuerzos cortantes uniformes.	Clase	:	<u>no esbelta</u>		
Se considera el alma como no esbelta, ya que se satisface la siguiente desigualdad:					
	21.21	≤	37.19	✓	
Donde:					
β_w : es el parámetro de esbeltez del alma.	β_w	:	<u>21.21</u>		
39·ε : es el límite de esbeltez.	39·ε	:	<u>37.19</u>		
β_w : es el parámetro de esbeltez del alma.					
	β_w	:	<u>21.21</u>		
Donde:					
b_w : es la altura del alma.	b_w	:	<u>297.00</u>	mm	
t_w : es el espesor del alma.	t_w	:	<u>14.00</u>	mm	

Resistencia a flexión en el eje Z y a cortante en el eje Y combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículo 6.2.8)

La comprobación no procede por coincidir con la de elementos a flexión, positiva o negativa dependiendo del signo del momento flector de cálculo, en el eje 'z', puesto que el efecto del esfuerzo cortante en el eje 'y' es despreciable para el cálculo del momento flector resistente.

No es necesario considerar el efecto del cortante en la dirección del eje 'y' para el cálculo de la resistencia a flexión, ya que se satisface la siguiente desigualdad:

$0.00 \leq 0.50$ ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones PP+1.35·CM1.

Donde:

V_{Ed}: es el cortante solicitante de cálculo.

V_{Ed} : 0.00 kN

V_{Rd}: es la resistencia de cálculo a cortante.

V_{Rd} : 695.42 kN

V_{Rd}: es la resistencia de cálculo a cortante. Su valor coincide con el obtenido en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'y'.

V_{Rd} : 695.42 kN

Resistencia a torsión y cortante en el eje Y combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.7.3)

No hay interacción entre torsión y cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a torsión y cortante en el eje Z combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.7.3)

No hay interacción entre torsión y cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Resistencia a axil y flexión biaxial combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.9 - 6.3.3)

Se debe satisfacer:

$\eta : 0.573$ ✓

$\eta : 0.574$ ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N156, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1+1.5·Q1.

Donde:

N_{Ed}: es el axil de tracción solicitante de cálculo.

N_{Ed} : 52.06 kN

M_{y,Ed}: es el momento flector solicitante de cálculo alrededor del eje principal de inercia 'y'.

M_{y,Ed} : 137.53 kN·m

M_{z,Ed}: es el momento flector solicitante de cálculo alrededor del eje principal de inercia 'z'.

M_{z,Ed} : 0.01 kN·m

N_{Rd}: es la resistencia de cálculo a tracción.

N_{Rd} : 2407.79 kN

M_{y,Rd}: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

M_{y,Rd} : 249.22 kN·m

M_{z,Rd}: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

M_{z,Rd} : 35.48 kN·m

χ_{LT}: es el coeficiente de reducción por pandeo lateral con torsión, considerando que la flexión se produce alrededor del eje principal de inercia 'y'.

χ_{LT} : 0.89

η₀: es un exponente calculado en función de los factores de forma para flexión en el eje 'z' e 'y'.

η₀ : 1.00

γ₀: es un exponente calculado en función del factor de forma para flexión en el eje 'z'.

γ₀ : 1.00

ξ₀: es un exponente calculado en función del factor de forma para flexión en el eje 'y'.

ξ₀ : 1.00

N_{t,Rd}: es la resistencia a tracción de cálculo de la sección transversal. Tomando el valor correspondiente a la fluencia general a lo largo del elemento N_{0,Rd}, teniendo en cuenta las conexiones de extremo, y las zonas HAZ localizadas.

N_{t,Rd} : 1725 kN

$N_{u,Rd} = A_{eff} f_{u,HAZ} / \gamma_{M2}$

N_{u,Rd} : 1725.87 kN

Donde:

A_{eff}: es el área eficaz, al existir reblandecimiento HAZ debido a soldaduras longitudinales.

A_{eff} : 77.048 cm²

f_{u,HAZ}: es el límite elástico para zonas HAZ.

f_{u,HAZ} : 280.00 MPa

γ_{M2}: es el coeficiente parcial de seguridad del material.

γ_{M2} : 1.25

$M_{y,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$M_{y,Rd} : 249.22 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Donde:

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$W_{y,el}$: es el módulo elástico de la sección bruta para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$\alpha_y : 1.000$

$W_{y,el} : 996.89 \text{ cm}^3$

$f_o : 275.00 \text{ MPa}$

$\gamma_{M1} : 1.10$

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$\alpha_y : 1.000$

$M_{z,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$M_{z,Rd} : 35.48 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Donde:

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$W_{z,el}$: es el módulo elástico de la sección bruta para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$\alpha_z : 1.000$

$W_{z,el} : 141.93 \text{ cm}^3$

$f_o : 275.00 \text{ MPa}$

$\gamma_{M1} : 1.10$

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$\alpha_z : 1.000$

χ_{LT} : es el coeficiente de reducción por pandeo lateral con torsión. Su valor coincide con el obtenido en la comprobación de elementos a flexión positiva o negativa, dependiendo del signo del momento flector de cálculo, alrededor del eje 'y'.

$\chi_{LT} : 0.89$

η_o : es un exponente calculado en función de los factores de forma para flexión en el eje 'z' e 'y'.

$\eta_o : 1.00$

Donde:

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$\alpha_y : 1.000$

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$\alpha_z : 1.000$

γ_o : es un exponente calculado en función del factor de forma para flexión en el eje 'z'.

$\gamma_o : 1.00$

Donde:

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$\alpha_z : 1.000$

ξ_o : es un exponente calculado en función del factor de forma para flexión en el eje 'y'.

$\xi_o : 1.00$

Donde:

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$\alpha_y : 1.000$

Resistencia a torsión, cortante, axil y flexión biaxial combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.9 - 6.2.10 - 6.3.3)

La comprobación no procede, por coincidir con la de elementos a flexión biaxial y esfuerzo axil, puesto que los efectos de los cortantes en el eje 'z' y en el eje 'y' son despreciables en el cálculo del axil y de los momentos flectores resistentes.

Se consideran despreciables los efectos de los cortantes en el eje 'z' y en el eje 'y' en el cálculo del axil y de los momentos flectores resistentes, ya que se satisfacen las siguientes desigualdades:

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Donde:

$V_{z,Ed}$: es el cortante solicitante de cálculo en el eje 'z'.	$V_{z,Ed}$:	<u>116.60</u>	kN
$V_{y,Ed}$: es el cortante solicitante de cálculo en el eje 'y'.	$V_{y,Ed}$:	<u>0.00</u>	kN
$V_{z,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'z'.	$V_{z,Rd}$:	<u>600.16</u>	kN
$V_{y,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'y'.	$V_{y,Rd}$:	<u>695.42</u>	kN
$V_{z,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'z'. Su valor coincide con el obtenido para la variable V_{Rd} en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'z'.	$V_{z,Rd}$:	<u>600.16</u>	kN
$V_{y,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'y'. Su valor coincide con el obtenido para la variable V_{Rd} en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'y'.	$V_{y,Rd}$:	<u>695.42</u>	kN

8.3. Perfil IPE 300 del cordón inferior de la celosía

No es necesario la comprobación del perfil que forma el cordon inferior de la celosía debido a que los esfuerzos en este son inferiores a los del cordon superior, por lo que es lógico entender que este perfil cumpliría. Se ha decidido que este formado por el mismo perfil que el cordon inferior por razones constructivas para que las diagonales y montantes quden perfectamente unidas mediante la soldadura.

A modo de dejar constancia del aprovechamiento de la barra mas desfavorable se adjunta la siguiente tabla con los aprovechamientos del perfil:

Barra	COMPROBACIONES (EUROCÓDIGO 9 EN 1999-1-1: 2007)													Estado
	N_t	N_c	M_y	M_z	V_y	V_z	T	$M_y V_z$	$M_z V_y$	TV_y	TV_z	$NM_y M_z$	$NM_y M_z V_y V_z T$	
N65/N63	N.P.(1)	$\eta = 9.4$	x: 0 m $\eta = 3.2$	x: 0 m $\eta = 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 4 m $\eta = 0.7$	N.P.(2)	N.P.(3)	N.P.(4)	N.P.(5)	N.P.(5)	x: 0 m $\eta = 15.4$	N.P.(6)	CUMPLE $\eta = 15.4$
<p>Notación:</p> <p>N_t: Resistencia a tracción</p> <p>N_c: Resistencia a compresión</p> <p>M_y: Resistencia a flexión en el eje Y</p> <p>M_z: Resistencia a flexión en el eje Z</p> <p>V_y: Resistencia a cortante en el eje Y</p> <p>V_z: Resistencia a cortante en el eje Z</p> <p>T: Resistencia a torsión</p> <p>$M_y V_z$: Resistencia a flexión en el eje Y y a cortante en el eje Z combinados</p> <p>$M_z V_y$: Resistencia a flexión en el eje Z y a cortante en el eje Y combinados</p> <p>TV_y: Resistencia a torsión y cortante en el eje Y combinados</p> <p>TV_z: Resistencia a torsión y cortante en el eje Z combinados</p> <p>$NM_y M_z$: Resistencia a axil y flexión biaxial combinados</p> <p>$NM_y M_z V_y V_z T$: Resistencia a torsión, cortante, axil y flexión biaxial combinados</p> <p>x: Distancia al origen de la barra</p> <p>η: Coeficiente de aprovechamiento (%)</p> <p>N.P.: No procede</p> <p>Comprobaciones que no proceden (N.P.):</p> <p>(1) La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.</p> <p>(2) La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.</p> <p>(3) La comprobación no procede por coincidir con la de elementos a flexión, positiva o negativa dependiendo del signo del momento flector de cálculo, en el eje 'y', puesto que el efecto del esfuerzo cortante en el eje 'z' es despreciable para el cálculo del momento flector resistente.</p> <p>(4) La comprobación no procede por coincidir con la de elementos a flexión, positiva o negativa dependiendo del signo del momento flector de cálculo, en el eje 'z', puesto que el efecto del esfuerzo cortante en el eje 'y' es despreciable para el cálculo del momento flector resistente.</p> <p>(5) No hay interacción entre torsión y cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.</p> <p>(6) La comprobación no procede, por coincidir con la de elementos a flexión biaxial y esfuerzo axil, puesto que los efectos de los cortantes en el eje 'z' y en el eje 'y' son despreciables en el cálculo del axil y de los momentos flectores resistentes.</p>														

8.4. Tubo rectangular 150x150x8 mm de las diagonales y montantes

Perfil: TC-150x150x8

Material: Aluminio (EN AW-7020)

</

Resistencia a tracción (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículo 6.2.3)

La comprobación no procede, ya que no hay axil de tracción.

Resistencia a compresión (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.4 - 6.3.1)

Se debe satisfacer:

η_1 : 0.253 ✓

η_2 : 0.400 ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N67, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Donde:



N_{Ed} : es el axil de compresión solicitante de cálculo.

$N_{C,Rd}$: es la resistencia de cálculo a compresión.

$N_{b,Rd}$: es la resistencia de cálculo a pandeo.

$$N_{Ed} : 302.69 \text{ kN}$$

$$N_{C,Rd} : 1197.96 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd} : 757.09 \text{ kN}$$

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A_{eff,z} : 45.44 \text{ cm}^2$$

$$A_{eff,T} : 45.44 \text{ cm}^2$$

$$f_o : 290.00 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M1} : 1.10$$

Clase: la clasificación de la sección transversal depende de las dimensiones de sus elementos comprimidos, dado el esfuerzo axil, para la combinación de acciones considerada.

$$\text{Clase} : 3$$

χ : es el coeficiente de reducción por pandeo.

$$\chi_y : 0.63$$

$$\chi_z : 0.63$$

$$\chi_T : 1.00$$

$N_{C,Rd}$: es la resistencia de cálculo a compresión.

$$N_{C,Rd} : 1197.96 \text{ kN}$$

Donde:

Φ : es un factor relativo al cálculo del coeficiente de reducción por pandeo.

$$\Phi_y : 1.13$$

$$\Phi_z : 1.13$$

$$\Phi_T : 0.46$$

Donde:

A_{eff} : es el área eficaz de la sección, incluyendo el descuento por reblandecimiento HAZ y por pandeo local, pero sin reducción por agujeros.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A_{eff} : 45.44 \text{ cm}^2$$

$$f_o : 290.00 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M1} : 1.10$$

$\bar{\lambda}$: es la esbeltez relativa.

$$\bar{\lambda}_y : 1.04$$

$$\bar{\lambda}_z : 1.04$$

$$\bar{\lambda}_T : 0.12$$

$N_{b,Rd}$: es la resistencia de cálculo a pandeo.

$$N_{b,Rd} : 757.09 \text{ kN}$$

Φ : es un factor relativo al cálculo del coeficiente de reducción por pandeo.

$$\Phi_y : 1.13$$

$$\Phi_z : 1.13$$

$$\Phi_T : 0.46$$

La resistencia de cálculo a pandeo a considerar será la menor de las siguientes:

$N_{b,Rd,y}$: es la resistencia de cálculo a pandeo correspondiente a la carga crítica de pandeo por flexión en el plano 'xz'.

$N_{b,Rd,z}$: es la resistencia de cálculo a pandeo correspondiente a la carga crítica de pandeo por flexión en el plano 'xy'.

$N_{b,Rd,T}$: es la resistencia de cálculo a pandeo correspondiente a la carga crítica de pandeo por torsión.

$$N_{b,Rd,y} : 757.09 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd,z} : 757.09 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd,T} : 1197.96 \text{ kN}$$

Donde:

α : es un coeficiente de imperfección.

$$\alpha_y : 0.20$$

$$\alpha_z : 0.20$$

$$\alpha_T : 0.35$$

$\bar{\lambda}_0$: es el límite de la meseta horizontal en la curva de pandeo correspondiente.

$$\bar{\lambda}_{0,y} : 0.10$$

$$\bar{\lambda}_{0,z} : 0.10$$

$$\bar{\lambda}_{0,T} : 0.40$$

Donde:

χ : es el coeficiente de reducción por pandeo.

$$\chi_y : 0.63$$

$$\chi_z : 0.63$$

$$\chi_T : 1.00$$

κ : es el coeficiente que tiene en cuenta el debilitamiento por soldadura.

$$\kappa_y : 1.00$$

$$\kappa_z : 1.00$$

$$\kappa_T : 1.00$$

A_{eff} : es el área eficaz de la sección.

$$A_{eff,y} : 45.44 \text{ cm}^2$$

$\bar{\lambda}$: es la esbeltez relativa.

$$\bar{\lambda}_y : 1.04$$

$$\bar{\lambda}_z : 1.04$$

$$\bar{\lambda}_T : 0.12$$

Donde:

A_{eff} : es el área eficaz de la sección.

$$A_{eff,y} : 45.44 \text{ cm}^2$$

$$A_{eff,z} : 45.44 \text{ cm}^2$$



f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

N_{cr} : es la carga crítica elástica de pandeo determinada a partir de las características mecánicas de la sección transversal bruta.

A_{eff} : es el área eficaz de la sección.

$A_{eff,y}$ y $A_{eff,z}$: es el valor de A_{eff} para pandeo por flexión. En la determinación de A_{eff} se debe tener en cuenta el descuento por pandeo local.

$A_{eff,T}$: es el valor de A_{eff} para pandeo por torsión de secciones transversales de tipo 'general'. En la determinación de A_{eff} se debe tener en cuenta el descuento por reblandecimiento HAZ y por pandeo local.

$N_{cr,y}$: es la carga crítica de pandeo por flexión en el plano 'xz'.

Donde:

E : es el módulo de elasticidad longitudinal.

I_y : es el momento de inercia de la sección bruta respecto al eje principal de inercia 'y'.

k_y : es el coeficiente que define la longitud de pandeo por flexión en el plano 'xz'.

L : es la longitud del elemento.

$N_{cr,z}$: es la carga crítica de pandeo por flexión en el plano 'xy'.

Donde:

E : es el módulo de elasticidad longitudinal.

I_z : es el momento de inercia de la sección bruta respecto al eje principal de inercia 'z'.

k_z : es el coeficiente que define la longitud de pandeo por flexión en el plano 'xy'.

L : es la longitud del elemento.

$N_{cr,T}$: es la carga crítica de pandeo por torsión.

$$\begin{aligned} A_{eff,T} &: 45.44 & \text{cm}^2 \\ f_o &: 290.00 & \text{MPa} \\ N_{cr,y} &: 1227.45 & \text{kN} \\ N_{cr,z} &: 1227.45 & \text{kN} \\ N_{cr,T} &: 92016.00 & \text{kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{eff,y} &: 45.44 & \text{cm}^2 \\ A_{eff,z} &: 45.44 & \text{cm}^2 \end{aligned}$$

$$A_{eff,T} : 45.44 \quad \text{cm}^2$$

$$N_{cr,y} : 1227.45 \quad \text{kN}$$

$$E : 70000.00 \quad \text{MPa}$$

$$I_y : 1531.93 \quad \text{cm}^4$$

$$k_y : 1.00$$

$$L : 2.936 \quad \text{m}$$

$$N_{cr,z} : 1227.45 \quad \text{kN}$$

$$E : 70000.00 \quad \text{MPa}$$

$$I_z : 1531.93 \quad \text{cm}^4$$

$$k_z : 1.00$$

$$L : 2.936 \quad \text{m}$$

Donde:

i_s : es el radio de giro polar de la sección bruta respecto al centro de esfuerzos cortantes.

G : es el módulo de elasticidad transversal.

I_t : es el módulo de torsión de la sección bruta.

E : es el módulo de elasticidad longitudinal.

I_w : es el módulo de alabeo de la sección bruta.

k_w : es el coeficiente que define la longitud de pandeo por torsión. Se estima como el mayor de los coeficientes que definen las longitudes de pandeo lateral con torsión.

L : es la longitud del elemento.

i_s : es el radio de giro polar de la sección bruta respecto al centro de esfuerzos cortantes.

Donde:

i_y : es el radio de giro de la sección bruta respecto al eje principal de inercia 'y'.

i_z : es el radio de giro de la sección bruta respecto al eje principal de inercia 'z'.

κ : es el coeficiente que tiene en cuenta el debilitamiento por soldadura. $\kappa = 1$ para elementos sin soldaduras.

Resistencia a flexión en el eje Y (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.5 - 6.3.2)

Se debe satisfacer:

$$N_{cr,T} : 92016.00 \quad \text{kN}$$

$$i_s : 8.21 \quad \text{cm}$$

$$G : 27000.00 \quad \text{MPa}$$

$$I_t : 2297.90 \quad \text{cm}^4$$

$$E : 70000.00 \quad \text{MPa}$$

$$I_w : 0.00 \quad \text{cm}^6$$

$$k_w : 1.00$$

$$L : 2.936 \quad \text{m}$$

$$i_s : 8.21 \quad \text{cm}$$

$$i_y : 5.81 \quad \text{cm}$$

$$i_z : 5.81 \quad \text{cm}$$

$$\kappa_y : 1.00$$

$$\kappa_z : 1.00$$

$$\kappa_T : 1.00$$

$$\eta : 0.145 \quad \checkmark$$

Flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N66, para la combinación de acciones PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N66, para la combinación de acciones 1.35·PP+CM1.

Donde:

M_{Ed} : es el momento flector solicitante de cálculo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{7.79} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{Ed}^- : \underline{0.06} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$$M_{c,Rd} : \underline{53.85} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

Clase: la clasificación de la sección transversal depende de las dimensiones de sus elementos comprimidos, dado el momento flector, para la combinación de acciones considerada.

$$\text{Clase} : \underline{3}$$

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$$M_{c,Rd} : \underline{53.85} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

α : es el factor de forma.

$$\alpha : \underline{1.000}$$

W_{el} : es el módulo elástico de la sección bruta.

$$W_{el} : \underline{204.26} \quad \text{cm}^3$$

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$f_o : \underline{290.00} \quad \text{MPa}$$

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

α : es el factor de forma.

$$\alpha : \underline{1.000}$$

Resistencia a flexión en el eje Z (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.5 - 6.3.2)

Se debe satisfacer:

$$\eta < \underline{0.001} \quad \checkmark$$

Flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N66, para la combinación de acciones PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Donde:

M_{Ed} : es el momento flector solicitante de cálculo.

$$M_{Ed}^+ : \underline{0.00} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

$$M_{Ed}^- : \underline{0.01} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$$M_{c,Rd} : \underline{53.85} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

Clase: la clasificación de la sección transversal depende de las dimensiones de sus elementos comprimidos, dado el momento flector, para la combinación de acciones considerada.

$$\text{Clase} : \underline{3}$$

$M_{c,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión uniaxial.

$$M_{c,Rd} : \underline{53.85} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

α : es el factor de forma.

$$\alpha : \underline{1.000}$$

W_{el} : es el módulo elástico de la sección bruta.

$$W_{el} : \underline{204.26} \quad \text{cm}^3$$

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$f_o : \underline{290.00} \quad \text{MPa}$$

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

α : es el factor de forma.

$$\alpha : \underline{1.000}$$

Resistencia a cortante en el eje Y (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.6 - 6.5.5)

Se debe satisfacer:

$$\eta < \underline{0.001} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones PP+CM1+1.5·Q1.

Donde:

V_{Ed} : es el esfuerzo cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Ed} : \underline{0.00} \quad \text{kN}$$

<p>V_{Rd}: es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal.</p>	<div>V_{Rd} : <div>326.34</div> kN</div>	<p>ε: es un parámetro dependiente de la resistencia característica del material.</p>	<div>ε : <div>0.93</div></div>
<p>La obtención de la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal se realiza suponiendo una distribución de tensiones tangenciales uniforme sobre cada elemento plano de pared delgada que la compone, de tal forma que no se sobrepasa en ninguno de ellos la tensión de plastificación y se equilibra el esfuerzo cortante solicitante de cálculo. En su cálculo se considera tanto el pandeo local por cortante como la presencia de zonas HAZ.</p>		<p>Donde:</p> <p>f_{ref}: es el límite elástico de referencia.</p> <p>f_o: es el límite elástico para el 0,2% de deformación.</p>	<div>f_{ref} : <div>250.00</div> MPa</div> <div>f_o : <div>290.00</div> MPa</div>
<p>V_{Rd}: es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal. Se estima igual a la suma de las resistencias a cortante de cada uno de los lados iguales dispuestos en paralelo a la dirección del eje 'y'.</p>		<p>$V_{Rd,w}$: es la resistencia a cortante de cada lado. Se toma el valor correspondiente al de fluencia general a lo largo del elemento.</p>	
	<div>$V_{Rd,w}$: <div>163.17</div> kN</div>		<div>$V_{Rd,w}$: <div>163.17</div> kN</div>
<p>Donde:</p> <p>$V_{Rd,w}$: es la resistencia a cortante de cada lado.</p>	<div>V_{Rd} : <div>326.34</div> kN</div> <div>$V_{Rd,w}$: <div>163.17</div> kN</div>	<p>Donde:</p> <p>$b_{w,y}$: es la anchura de cada uno de los lados paralelos al eje 'y'.</p> <p>$t_{w,y}$: es el espesor de cada uno de los lados paralelos al eje 'y'.</p> <p>f_o: es el límite elástico para el 0,2% de deformación.</p> <p>γ_{M1}: es el coeficiente parcial de seguridad del material.</p>	<div>$b_{w,y}$: <div>134.00</div> mm</div> <div>$t_{w,y}$: <div>8.00</div> mm</div> <div>f_o : <div>290.00</div> MPa</div> <div>γ_{M1} : <div>1.10</div></div>
<p>Clase: es la clasificación de cada lado a cortante, considerando cada lado como una placa rectangular sin rigidizar sometida a esfuerzos cortantes uniformes.</p>	<div>Clase : <div>no esbelta</div></div>		
<p>Se considera el lado como no esbelto, ya que se satisface la siguiente desigualdad:</p>	<div><div>16.75</div> ≤ <div>36.21</div> ✓</div>		
<p>Donde:</p> <p>β_w: es el parámetro de esbeltez del lado.</p> <p>$39 \cdot \varepsilon$: es el límite de esbeltez.</p>	<div>β_w : <div>16.75</div></div> <div>$39 \cdot \varepsilon$: <div>36.21</div></div>		<div>η : <div>0.014</div> ✓</div>
<p>β_w: es el parámetro de esbeltez del lado.</p>			
	<div>β_w : <div>16.75</div></div>		
<p>Donde:</p> <p>$b_{w,y}$: es la anchura de cada uno de los lados paralelos al eje 'y'.</p> <p>$t_{w,y}$: es el espesor de cada uno de los lados paralelos al eje 'y'.</p>	<div>$b_{w,y}$: <div>134.00</div> mm</div> <div>$t_{w,y}$: <div>8.00</div> mm</div>	<p>Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N67, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1.</p>	
		<p>Donde:</p> <p>V_{Ed}: es el esfuerzo cortante solicitante de cálculo.</p> <p>V_{Rd}: es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal.</p>	<div>V_{Ed} : <div>4.71</div> kN</div> <div>V_{Rd} : <div>326.34</div> kN</div>

La obtención de la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal se realiza suponiendo una distribución de tensiones tangenciales uniforme sobre cada elemento plano de pared delgada que la compone, de tal forma que no se sobrepasa en ninguno de ellos la tensión de plastificación y se equilibra el esfuerzo cortante solicitante de cálculo. En su cálculo se considera tanto el pandeo local por cortante como la presencia de zonas HAZ.

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal. Se estima igual a la suma de las resistencias a cortante de cada uno de los lados iguales dispuestos en paralelo a la dirección del eje 'z'.

Donde:

$V_{Rd,w}$: es la resistencia a cortante de cada lado.

Clase: es la clasificación de cada lado a cortante, considerando cada lado como una placa rectangular sin rigidizar sometida a esfuerzos cortantes uniformes.

Se considera el lado como no esbelto, ya que se satisface la siguiente desigualdad:

Donde:

β_w : es el parámetro de esbeltez del lado.

$39 \cdot \epsilon$: es el límite de esbeltez.

β_w : es el parámetro de esbeltez del lado.

Donde:

$b_{w,z}$: es la anchura de cada uno de los lados paralelos al eje 'z'.

$t_{w,z}$: es el espesor de cada uno de los lados paralelos al eje 'z'.

ϵ : es un parámetro dependiente de la resistencia característica del material.

$$V_{Rd} : \underline{326.34} \text{ kN}$$

$$V_{Rd,w} : \underline{163.17} \text{ kN}$$

$$\text{Clase} : \underline{\text{no esbelta}}$$

$$16.75 \leq 36.21 \quad \checkmark$$

$$\beta_w : \underline{16.75}$$

$$39 \cdot \epsilon : \underline{36.21}$$

$$\beta_w : \underline{16.75}$$

$$b_{w,z} : \underline{134.00} \text{ mm}$$

$$t_{w,z} : \underline{8.00} \text{ mm}$$

$$\epsilon : \underline{0.93}$$

Donde:

f_{ref} : es el límite elástico de referencia.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

$$f_{ref} : \underline{250.00} \text{ MPa}$$

$$f_o : \underline{290.00} \text{ MPa}$$

$V_{Rd,w}$: es la resistencia a cortante de cada lado. Se toma el valor correspondiente al de fluencia general a lo largo del elemento.

$$V_{Rd,w} : \underline{163.17} \text{ kN}$$

Donde:

$b_{w,z}$: es la anchura de cada uno de los lados paralelos al eje 'z'.

$t_{w,z}$: es el espesor de cada uno de los lados paralelos al eje 'z'.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$b_{w,z} : \underline{134.00} \text{ mm}$$

$$t_{w,z} : \underline{8.00} \text{ mm}$$

$$f_o : \underline{290.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

Resistencia a torsión (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículo 6.2.7.1)

Se debe satisfacer:

$$\eta < \underline{0.001} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones PP+CM1+1.5·Q1.

Donde:

T_{Ed} : es el momento torsor solicitante de cálculo.

T_{Rd} : es la resistencia de cálculo a torsión de la sección transversal.

$$T_{Ed} : \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

$$T_{Rd} : \underline{49.16} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

La obtención de la resistencia de cálculo a torsión de la sección transversal se realiza suponiendo una distribución de tensiones tangenciales que maximiza dicha resistencia, sin sobrepasar en ningún punto la tensión de plastificación y equilibrando el esfuerzo torsor solicitante de cálculo. En su cálculo se considera tanto el pandeo local por cortante (en elementos pertenecientes a células) como la presencia de zonas HAZ.

T_{Rd} : es la resistencia de cálculo a torsión de la sección transversal.

$$T_{Rd} : \underline{49.16} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

$W_{T,pl}$: es el módulo de torsión plástico de la sección bruta.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$W_{T,pl} : \underline{322.97} \text{ cm}^3$$

$$f_o : \underline{290.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

Resistencia a flexión en el eje Y y a cortante en el eje Z combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículo 6.2.8)

La comprobación no procede por coincidir con la de elementos a flexión, positiva o negativa dependiendo del signo del momento flector de cálculo, en el eje 'y', puesto que el efecto del esfuerzo cortante en el eje 'z' es despreciable para el cálculo del momento flector resistente.

No es necesario considerar el efecto del cortante en la dirección del eje 'z' para el cálculo de la resistencia a flexión, ya que se satisface la siguiente desigualdad:

$$0.01 \leq 0.50 \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Donde:

V_{Ed} : es el cortante solicitante de cálculo.

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante.

$$V_{Ed} : \underline{4.71} \text{ kN}$$

$$V_{Rd} : \underline{326.34} \text{ kN}$$

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante. Su valor coincide con el obtenido en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'z'.

$$V_{Rd} : \underline{326.34} \text{ kN}$$

Resistencia a flexión en el eje Z y a cortante en el eje Y combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículo 6.2.8)

La comprobación no procede por coincidir con la de elementos a flexión, positiva o negativa dependiendo del signo del momento flector de cálculo, en el eje 'z', puesto que el efecto del esfuerzo cortante en el eje 'y' es despreciable para el cálculo del momento flector resistente.

No es necesario considerar el efecto del cortante en la dirección del eje 'y' para el cálculo de la resistencia a flexión, ya que se satisface la siguiente desigualdad:

$$0.00 \leq 0.50 \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones PP+CM1+1.5·Q1.

Donde:

V_{Ed} : es el cortante solicitante de cálculo.

$$V_{Ed} : \underline{0.00} \text{ kN}$$

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante.

$$V_{Rd} : \underline{326.34} \text{ kN}$$

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante. Su valor coincide con el obtenido en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'y'.

$$V_{Rd} : \underline{326.34} \text{ kN}$$

Resistencia a torsión y cortante en el eje Y combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.7.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta < \underline{0.001} \quad \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones PP+CM1+1.5·Q1.

Donde:

V_{Ed} : es el esfuerzo cortante solicitante de cálculo.

$V_{T,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante reducida por el efecto del momento torsor de cálculo.

$$V_{Ed} : \underline{0.00} \text{ kN}$$

$$V_{T,Rd} : \underline{326.31} \text{ kN}$$

$V_{T,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante reducida por el efecto del momento torsor de cálculo.

$$V_{T,Rd} : \underline{326.31} \text{ kN}$$

Donde:

$\tau_{t,Ed}$: es la tensión tangencial debida al torsor solicitante de cálculo.

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\tau_{t,Ed} : \underline{0.02} \text{ MPa}$$

$$V_{Rd} : \underline{326.34} \text{ kN}$$

$$f_o : \underline{290.00} \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

$\tau_{t,Ed}$: es la tensión tangencial debida al torsor solicitante de cálculo.

$$\tau_{t,Ed} : \underline{0.02} \text{ MPa}$$

Donde:

T_{Ed} : es el momento torsor solicitante de cálculo.

$W_{T,el}$: es el módulo de torsión elástico de la sección bruta.

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante. Su valor coincide con el obtenido en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'y' para la variable V_{Rd} .

T_{Ed}	:	<u>0.01</u>	kN·m
$W_{T,el}$:	<u>322.62</u>	cm ³
V_{Rd}	:	<u>326.34</u>	kN

Resistencia a torsión y cortante en el eje Z combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.7.3)

Se debe satisfacer:

η : 0.014 ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N67, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Donde:

V_{Ed} : es el esfuerzo cortante solicitante de cálculo.

$V_{T,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante reducida por el efecto del momento torsor de cálculo.

V_{Ed}	:	<u>4.71</u>	kN
$V_{T,Rd}$:	<u>326.31</u>	kN

$V_{T,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante reducida por el efecto del momento torsor de cálculo.

Donde:

$\tau_{t,Ed}$: es la tensión tangencial debida al torsor solicitante de cálculo.

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante de la sección transversal.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$\tau_{t,Ed}$:	<u>0.02</u>	MPa
V_{Rd}	:	<u>326.34</u>	kN
f_o	:	<u>290.00</u>	MPa
γ_{M1}	:	<u>1.10</u>	

$\tau_{t,Ed}$: es la tensión tangencial debida al torsor solicitante de cálculo.

$\tau_{t,Ed}$: 0.02 MPa

Donde:

T_{Ed} : es el momento torsor solicitante de cálculo.

$W_{T,el}$: es el módulo de torsión elástico de la sección bruta.

V_{Rd} : es la resistencia de cálculo a cortante. Su valor coincide con el obtenido en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'z' para la variable V_{Rd} .

T_{Ed}	:	<u>0.01</u>	kN·m
$W_{T,el}$:	<u>322.62</u>	cm ³
V_{Rd}	:	<u>326.34</u>	kN

Resistencia a axil y flexión biaxial combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.9 - 6.3.3)

Se debe satisfacer:

η : 0.306 ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en el nudo N66, para la combinación de acciones PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Donde:

N_{Ed} : es el axil de compresión solicitante de cálculo.

$M_{y,Ed}$: es el momento flector solicitante de cálculo alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$M_{z,Ed}$: es el momento flector solicitante de cálculo alrededor del eje principal de inercia 'z'.

N_{Rd} : es la resistencia de cálculo a compresión.

$M_{y,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$M_{z,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

χ_{min} : es el coeficiente de reducción mínimo para pandeo por flexión.

Ψ_c : es un exponente calculado en función del coeficiente de reducción mínimo para pandeo por flexión.

N_{Ed}	:	<u>302.21</u>	kN
$M_{y,Ed}$:	<u>7.79</u>	kN·m
$M_{z,Ed}$:	<u>0.01</u>	kN·m
N_{Rd}	:	<u>1197.96</u>	kN
$M_{y,Rd}$:	<u>53.85</u>	kN·m
$M_{z,Rd}$:	<u>53.85</u>	kN·m
χ_{min}	:	<u>0.63</u>	
Ψ_c	:	<u>0.82</u>	

N_{Rd} : es la resistencia de cálculo a compresión.

$$N_{Rd} : \underline{1197.96} \quad \text{kN}$$

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

Donde:

A_{eff} : es el área eficaz de la sección, incluyendo el descuento por reblandecimiento HAZ y por pandeo local, pero sin reducción por agujeros.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$A_{eff} : \underline{45.44} \quad \text{cm}^2$$

$$f_o : \underline{290.00} \quad \text{MPa}$$

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

χ_{min} : es el coeficiente de reducción mínimo para pandeo por flexión.

$$\alpha_z : \underline{1.000}$$

$M_{y,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$$M_{y,Rd} : \underline{53.85} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

χ_z : es el coeficiente de reducción para pandeo por flexión en el plano 'xy'.

χ_y : es el coeficiente de reducción para pandeo por flexión en el plano 'xz'.

$$\chi_{min} : \underline{0.63}$$

$$\chi_z : \underline{0.63}$$

$$\chi_y : \underline{0.63}$$

Donde:

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$W_{y,el}$: es el módulo elástico de la sección bruta para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\alpha_y : \underline{1.000}$$

$$W_{y,el} : \underline{204.26} \quad \text{cm}^3$$

$$f_o : \underline{290.00} \quad \text{MPa}$$

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

χ_z : es el coeficiente de reducción para pandeo por flexión en el plano 'xy'.

$$\chi_z : \underline{0.63}$$

α_y : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'y'.

$$\alpha_y : \underline{1.000}$$

Donde:

Φ_z : es un factor relativo al cálculo del coeficiente de reducción para pandeo por flexión en el plano 'xy'.

$\bar{\lambda}_z$: es la esbeltez relativa para pandeo por flexión en el plano 'xy'.

$$\Phi_z : \underline{1.13}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{1.04}$$

$M_{z,Rd}$: es la resistencia de cálculo a flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$$M_{z,Rd} : \underline{53.85} \quad \text{kN}\cdot\text{m}$$

Φ_z : es un factor relativo al cálculo del coeficiente de reducción para pandeo por flexión en el plano 'xy'.

$$\Phi_z : \underline{1.13}$$

Donde:

α_z : es el factor de forma para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

$W_{z,el}$: es el módulo elástico de la sección bruta para flexión alrededor del eje principal de inercia 'z'.

f_o : es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

γ_{M1} : es el coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\alpha_z : \underline{1.000}$$

$$W_{z,el} : \underline{204.26} \quad \text{cm}^3$$

$$f_o : \underline{290.00} \quad \text{MPa}$$

$$\gamma_{M1} : \underline{1.10}$$

Donde:

α : es un coeficiente de imperfección para pandeo por flexión.

$\bar{\lambda}_o$: es el límite de la meseta horizontal en la curva para pandeo por flexión.

$\bar{\lambda}_z$: es la esbeltez relativa para pandeo por flexión en el plano 'xy'.

$$\alpha : \underline{0.20}$$

$$\bar{\lambda}_o : \underline{0.10}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{1.04}$$

$\bar{\lambda}_z$: es la esbeltez relativa para pandeo por flexión en el plano 'xy'.

$\bar{\lambda}_y$: 1.04

Donde:

A_{eff}: es el área eficaz de la sección para pandeo por flexión. En su determinación se debe tener en cuenta el descuento por pandeo local.

f_o: es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

N_{cr,z}: es la carga crítica de pandeo por flexión en el plano 'xy'.

N_{cr,z}: es la carga crítica de pandeo por flexión en el plano 'xy'. Su valor coincide con el obtenido en la comprobación de elementos a compresión para la variable **N_{cr,z}**.

χ_y: es el coeficiente de reducción para pandeo por flexión en el plano 'xz'.

Donde:

Φ_y: es un factor relativo al cálculo del coeficiente de reducción para pandeo por flexión en el plano 'xz'.

$\bar{\lambda}_y$: es la esbeltez relativa para pandeo por flexión en el plano 'xz'.

Φ_y: es un factor relativo al cálculo del coeficiente de reducción para pandeo por flexión en el plano 'xz'.

Donde:

α: es un coeficiente de imperfección para pandeo por flexión.

$\bar{\lambda}_o$: es el límite de la meseta horizontal en la curva para pandeo por flexión.

$\bar{\lambda}_y$: es la esbeltez relativa para pandeo por flexión en el plano 'xz'.

$\bar{\lambda}_y$: es la esbeltez relativa para pandeo por flexión en el plano 'xz'.

$\bar{\lambda}_z$: 1.04

A_{eff} : 45.44 cm²

f_o : 290.00 MPa

N_{cr,z} : 1227.45 kN

N_{cr,z} : 1227.45 kN

χ_y : 0.63

Φ_y : 1.13

$\bar{\lambda}_y$: 1.04

Φ_y : 1.13

α : 0.20

$\bar{\lambda}_o$: 0.10

$\bar{\lambda}_y$: 1.04

Donde:

A_{eff}: es el área eficaz de la sección para pandeo por flexión. En su determinación se debe tener en cuenta el descuento por pandeo local.

f_o: es el límite elástico para el 0,2% de deformación.

N_{cr,y}: es la carga crítica de pandeo por flexión en el plano 'xz'.

N_{cr,y}: es la carga crítica de pandeo por flexión en el plano 'xz'. Su valor coincide con el obtenido en la comprobación de elementos a compresión para la variable **N_{cr,y}**.

Ψ_c: es un exponente calculado en función del coeficiente de reducción mínimo para pandeo por flexión.

Donde:

χ_{min}: es el coeficiente de reducción mínimo para pandeo por flexión.

A_{eff} : 45.44 cm²

f_o : 290.00 MPa

N_{cr,y} : 1227.45 kN

N_{cr,y} : 1227.45 kN

Ψ_{cc} : 0.82

χ_{min} : 0.63

Resistencia a torsión, cortante, axil y flexión biaxial combinados (Eurocódigo 9 EN 1999-1-1: 2007, artículos 6.2.9 - 6.2.10 - 6.3.3)

La comprobación no procede, por coincidir con la de elementos a flexión biaxial y esfuerzo axil, puesto que los efectos del torsor y de los cortantes en el eje 'z' y en el eje 'y' son despreciables en el cálculo del axil y de los momentos flectores resistentes.

Se consideran despreciables los efectos del torsor combinado con los cortantes en el eje 'z' y en el eje 'y' en el cálculo del axil y de los momentos flectores resistentes, ya que se satisfacen las siguientes desigualdades:

0.01 ≤ **0.50** ✓

0.00 ≤ **0.50** ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.35·CM1+1.5·Q1.

Donde:

V_{z,Ed}: es el cortante solicitante de cálculo en el eje 'z'.

V_{y,Ed}: es el cortante solicitante de cálculo en el eje 'y'.

V_{z,Ed} : 4.71 kN

V_{y,Ed} : 0.00 kN

<p>$V_{z,T,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'z' reducida por el momento torsor.</p>	<p>$V_{z,T,Rd}$: <u>326.31</u> kN</p>	<p>$\tau_{t,Ed}$: es la tensión tangencial debida al torsor solicitante de cálculo.</p>	<p>$\tau_{t,Ed}$: <u>0.02</u> MPa</p>
<p>$V_{y,T,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'y' reducida por el momento torsor.</p>	<p>$V_{y,T,Rd}$: <u>326.31</u> kN</p>		
<p>$V_{z,T,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'z' reducida por el momento torsor.</p>	<p>$V_{z,T,Rd}$: <u>326.31</u> kN</p>	<p>Donde:</p> <p>T_{Ed}: es el momento torsor solicitante de cálculo.</p> <p>$W_{T,el}$: es el módulo de torsión elástico de la sección bruta.</p>	<p>T_{Ed} : <u>0.01</u> kN·m</p> <p>$W_{T,el}$: <u>322.62</u> cm³</p>
<p>Donde:</p> <p>$\tau_{t,Ed}$: es la tensión tangencial debida al torsor solicitante de cálculo.</p> <p>$V_{z,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'z'.</p> <p>f_o: es el límite elástico para el 0,2% de deformación.</p> <p>γ_{M1}: es el coeficiente parcial de seguridad del material.</p>	<p>$\tau_{t,Ed}$: <u>0.02</u> MPa</p> <p>$V_{z,Rd}$: <u>326.34</u> kN</p> <p>f_o : <u>290.00</u> MPa</p> <p>γ_{M1} : <u>1.10</u></p>	<p>$V_{y,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'y'. Su valor coincide con el obtenido para la variable V_{Rd} en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'y'.</p>	<p>$V_{y,Rd}$: <u>326.34</u> kN</p>
<p>$\tau_{t,Ed}$: es la tensión tangencial debida al torsor solicitante de cálculo.</p>	<p>$\tau_{t,Ed}$: <u>0.02</u> MPa</p>		
<p>Donde:</p> <p>T_{Ed}: es el momento torsor solicitante de cálculo.</p> <p>$W_{T,el}$: es el módulo de torsión elástico de la sección bruta.</p>	<p>T_{Ed} : <u>0.01</u> kN·m</p> <p>$W_{T,el}$: <u>322.62</u> cm³</p>		
<p>$V_{z,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'z'. Su valor coincide con el obtenido para la variable V_{Rd} en la comprobación de elementos a cortante en el eje 'z'.</p>	<p>$V_{z,Rd}$: <u>326.34</u> kN</p>		
<p>$V_{y,T,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'y' reducida por el momento torsor.</p>	<p>$V_{y,T,Rd}$: <u>326.31</u> kN</p>		
<p>Donde:</p> <p>$\tau_{t,Ed}$: es la tensión tangencial debida al torsor solicitante de cálculo.</p> <p>$V_{y,Rd}$: es la resistencia de cálculo a cortante en el eje 'y'.</p> <p>f_o: es el límite elástico para el 0,2% de deformación.</p> <p>γ_{M1}: es el coeficiente parcial de seguridad del material.</p>	<p>$\tau_{t,Ed}$: <u>0.02</u> MPa</p> <p>$V_{y,Rd}$: <u>326.34</u> kN</p> <p>f_o : <u>290.00</u> MPa</p> <p>γ_{M1} : <u>1.10</u></p>		

9. Comprobación de deformaciones

En la imagen siguiente se pueden comprobar la deformada de la celosía mas desfavorable bajo el caso de carga H1 anteriormente comentado. La flecha máxima que se puede observar es de 4,637 milímetros en el cordon superior y de 1,178 milímetros cumpliendo de esta manera los requisitos establecidos anteriormente.

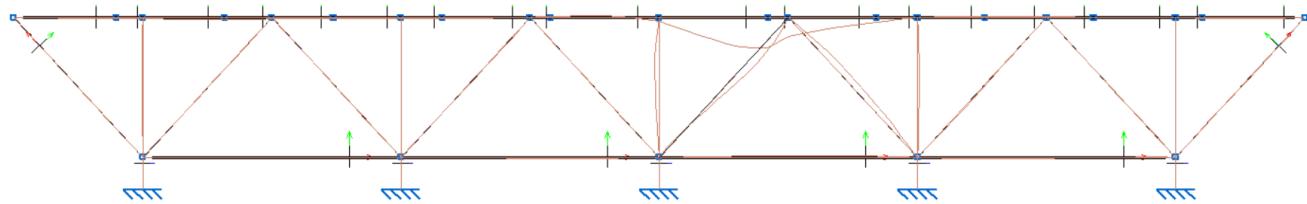


Figura 9 - Deformaciones de la celosía cargada. Fuente: Propia.

10. Uniones

10.1. Especificaciones para uniones atornilladas

En cuanto a las disposiciones constructivas se establece lo siguiente:

- Se han considerado las siguientes distancias mínimas y máximas entre ejes de agujeros y entre estos y los bordes de las piezas:

Disposiciones constructivas para tornillos, según artículo 58.4 EAE							
Distancias	Al borde de la pieza		Entre agujeros		Entre tornillos		
	e1 ⁽¹⁾	e2 ⁽²⁾	p1 ⁽¹⁾	p2 ⁽²⁾	Compresión	Tracción	
						Filas exteriores	Filas interiores
Mínimas	1.5 do	1.5 do	2.2 do	2.4 do	p1 y p2	p1, e	p1, i
Máximas ⁽³⁾	40 mm + 4t 125 mm 8t		14t 200 mm		14t 200 mm	14t 200 mm	28t 400 mm
Notas: ⁽¹⁾ Paralela a la dirección de la fuerza ⁽²⁾ Perpendicular a la dirección de la fuerza ⁽³⁾ Se considera el menor de los valores do: Diámetro del agujero. t: Menor espesor de las piezas que se unen. En el caso de esfuerzos oblicuos, se interpolan los valores de manera que el resultado quede del lado de la seguridad.							

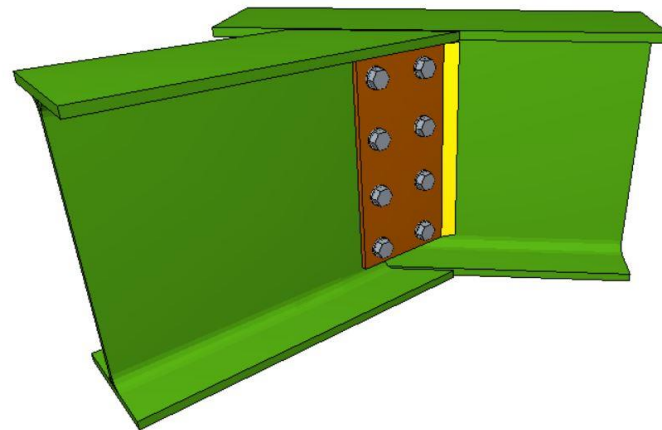
- No se deben soldar ni los tornillos ni las tuercas.
- Cuando los tornillos se dispongan en vertical, la tuerca se situará por debajo de la cabeza del tornillo.
- Los agujeros deben realizarse por taladrado u otro proceso que proporcione un acabado equivalente.
- El punzonado se admite para piezas de hasta 15 mm de espesor, siempre que el espesor nominal de la pieza no sea mayor que el diámetro nominal del agujero. De realizar el punzonado, se recomienda realizarlo con un diámetro de 2 mm menor que el diámetro definitivo y luego taladrar hasta el diámetro nominal.

Para el diseño de las uniones atornilladas se han tenido en cuenta los esfuerzos mínimos establecidos en el tabla 8.5 del Eurocodigo 9.

Table 8.5 - Design resistance for bolts and rivets

Failure mode	Bolts	Rivets
Shear resistance per shear plane:	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (8.9)$ <p>- where the shear plane passes through the threaded portion of the bolt (A is the tensile stress area of the bolt A_S):</p> <p>- for steel bolts with classes 4.6, 5.6 and 8.8: $\alpha_v = 0,6$</p> <p>- for steel bolts with classes 4.8, 5.8, 6.8 and 10.9, stainless steel bolts and aluminium bolts: $\alpha_v = 0,5$</p> <p>- where the shear plane passes through the unthreaded portion of the bolt (A is the gross cross section of the bolt): $\alpha_v = 0,6$</p> <p>f_{ub} = characteristic ultimate strength of the bolt material</p>	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}} \quad (8.10)$ <p>f_{ur} = characteristic ultimate strength of the rivet material</p> <p>A_0 = cross sectional area of the hole</p>
Bearing resistance 1) 2) 3) 4) 5) 6)	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (8.11)$ <p>where α_b is the smallest of α_d or $\frac{f_{ub}}{f_u}$ or 1,0; but $\leq 0,66$ for slotted holes</p> <p>in the direction of the load transfer:</p> <p>- for end bolts: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$; for inner bolts: $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$; (8.13 and 8.14)</p> <p>perpendicular to the direction of the load transfer:</p> <p>- for edge bolts: k_1 is the smallest of $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ or 2,5 (8.15)</p> <p>- for inner bolts: k_1 is the smallest of $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ or 2,5 (8.16)</p> <p>f_u is the characteristic ultimate strength of the material of the connected parts</p> <p>f_{ub} is the characteristic ultimate strengths of the bolt material</p> <p>d is the bolt diameter</p> <p>d_0 is the hole diameter</p> <p>e_1, e_2, p_1, p_2 see Figure 8.1 ⁵⁾</p>	$F_{b,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}} \quad (8.18)$ <p>For solid rivets with head dimensions according to Annex C, Figure C.1 or greater on both sides.</p>
Tension resistance	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \quad (8.17)$ <p>where $k_2 = 0,9$ for steel bolts,</p> <p>$k_2 = 0,50$ for aluminium bolts and</p> <p>$k_2 = 0,63$ for countersunk steel bolts,</p>	
Punching shear resistance	$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} \quad (8.19)$ <p>where:</p> <p>d_m is the mean of the across points and across flats dimensions of the bolt head or the nut or if washers are used the outer diameter of the washer, whichever is smaller;</p> <p>t_p is the thickness of the plate under the bolt head or the nut;</p> <p>f_u characteristic ultimate strength of the member material.</p>	
Combined shear and tension	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (8.20)$	

10.2. Unión vigas IPE 450 interiores con vigas IPE 450 perimetrales Tipo 1

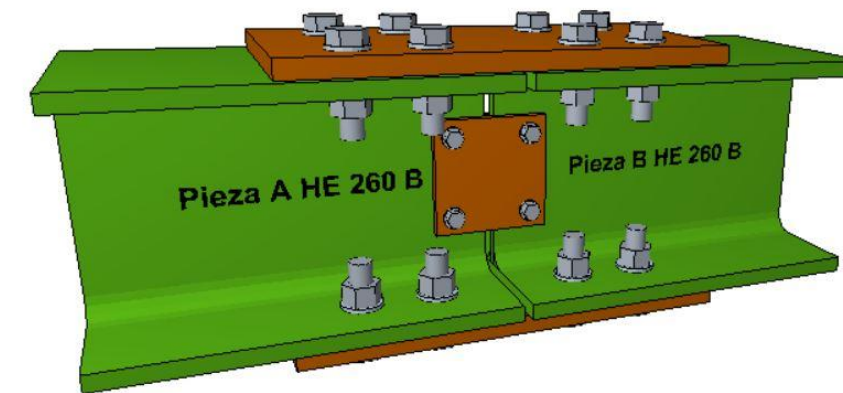


Punzonamiento	
fu (430N/mm2)	430
Espesor (mm)	9,4
DN tornillo	12
fub (N/mm2)	800
d agujero	13
N,Rd (kN) 1 tor	276,03
Fv,Rd (kN) 1 tor	38,13
¿CUMPLE?	SI

Aplastamiento del alma	
fu (430N/mm2)	430
Espesor (mm)	10
DN tornillo	12
fub (N/mm2)	800
d agujero	13
Fb,Rd (kN) 1 tor	103,2
Fv,Rd (kN) 1 tor	5,89
¿CUMPLE?	SI

Tornillo M12 8.8			
Comprobaciones	Esf. (kN)	Resis. (kN)	Aprovech (%)
Cortante	21,34	75,8	28,1530343
Aplastamiento	21,34	103,2	20,67829457

10.3. Union HEB 260 – HEB 260



Resistencia del ala	
fu (430N/mm2)	430
Espesor (mm)	17,5
DN tornillo	24
fub (N/mm2)	800
d agujero	26
Fb,Rd (kN) 1 tor	281,76
Fv,Rd (kN) 1 tor	39,42
¿CUMPLE?	SI

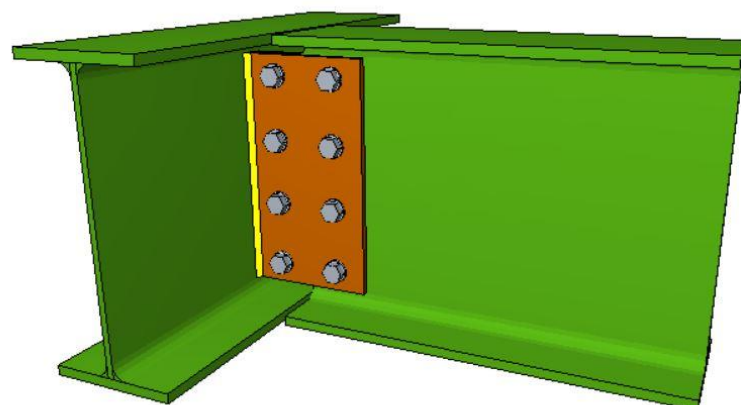
Resistencia del alma	
fu (430N/mm2)	430
Espesor (mm)	10
DN tornillo	12
fub (N/mm2)	800
d agujero	13
Fb,Rd (kN) 1 tor	103,2
Fv,Rd (kN) 1 tor	5,89
¿CUMPLE?	SI

Cubrejuntas			
Comprobaciones	Esf. (kN)	Resis. (kN)	Aprovech (%)
Compresión	214,7	1292,5	16,61
Aplastamiento	57,94	319,78	18,12
Desgarro	28,31	1070,12	2,65

Tornillo M24 8.8			
Comprobaciones	Esf. (kN)	Resis. (kN)	Aprovech (%)
Cortante	37,59	173,72	21,64
Aplastamiento	37,59	357,92	10,5

Tornillo M12 8.8			
Comprobaciones	Esf. (kN)	Resis. (kN)	Aprovech (%)
Cortante	15,43	75,8	20,35
Aplastamiento	15,43	103,2	14,95

10.4. Unión vigas IPE 450 interiores con vigas IPE 450 perimetrales Tipo 2



Punzonamiento	
fu (430N/mm2)	430
Espesor (mm)	9,4
DN tornillo	12
fub (N/mm2)	800
d agujero	13
N,Rd (kN) 1 tor	263,67
NEd (kN) 1 tor	35,43
¿CUMPLE?	SI

Resistencia a cortante	
N,Rd (kN) 1 tor	263,67
NEd (kN) 1 tor	35,43
¿CUMPLE?	SI

Resistencia a cortante	
Vc,Rd (kN) 1 tor	359,67
VEd (kN) 1 tor	43,07
¿CUMPLE?	SI

Aplastamiento del alma	
fu (430N/mm2)	430
Espesor (mm)	10
DN tornillo	12
fub (N/mm2)	800
d agujero	13
Fb,Rd (kN) 1 tor	103,2
Fv,Rd (kN) 1 tor	5,89
¿CUMPLE?	SI

Tornillo M12 8.8			
Comprobaciones	Esf. (kN)	Resis. (kN)	Aprovech (%)
Cortante	21,34	75,8	28,1530343
Aplastamiento	21,34	103,2	20,67829457

10.5. Especificaciones para uniones soldadas

10.6. Unión soldada celosía

Como se ha descrito anteriormente, las diagonales de la celosía están formadas por un perfil cuadrado de sección hueca TC 150X150X10 mm del pórtico. La unión de estos perfiles con el perfil inferior y superior se ha resuelto con un empalme con chapa frontal. Para poder materializarlo se va a realizar una soldadura perimetral en ángulo.

Debido a que el programa de cálculo Cype 3D no tiene en su biblioteca la unión entre diagonales de una celosía con el cordón superior e inferior, se ha realizado el cálculo del espesor de garganta y de la longitud del cordón de soldadura.

La unión está formada por tres soldaduras:

- Soldaduras entre las alas de la viga y las alas de la diagonal (a_1 y a_2).
- Soldadura entre el alma de la viga y las alas de la diagonal (a_3).

$$a_1 \leq 0,7 \cdot 12 = 8,4 \rightarrow 5 \text{ mm} > 4,5 \text{ mm}$$

$$a_2 = a_3 = a_1 = 5 \text{ mm}$$

Se calculan las longitudes de soldadura descontando los radios y se obtienen:

- $L_{w1} = 160 \text{ mm}$
- $L_{w2} = 160 - 2 \cdot 27 = 106 \text{ mm}$
- $L_{w3} = 160 - 2 \cdot 19 - 2 \cdot 27 = 208 \text{ mm}$

Las soldaduras 1 y 2 deben ser capaces de transmitir una fuerza igual a la resistencia completa del ala de la viga:

$$F_{w,Rd} = (a_1 \cdot L_{w1} + 2 \cdot a_2 \cdot L_{w2}) \cdot f_{uw,d} \geq b_f \cdot t_{fb} \cdot f_{yd} = (5 \cdot 160 + 2 \cdot 5 \cdot 106) \cdot 222,7 \geq 160 \cdot 13 \cdot 280 / 1,25$$

$$f_{vw,d} \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2} \cdot \sqrt{3}} = \frac{410 \cdot \frac{10^3}{\sqrt{3}}}{0,85 \cdot 1,25} = 222,7 \text{ MPa}$$

$$414,22 \text{ kN} \leq 465,92 \text{ kN} \rightarrow \text{No Cumple}$$

Aumentamos $a_1 = a_2 = a_3 = 7 \text{ mm}$

$$F_{w,Rd} = (7 \cdot 160 + 2 \cdot 7 \cdot 106) \cdot 222,7 \geq 160 \cdot 13 \cdot 280 / 1,25$$

$$579,91 \text{ kN} \geq 465,92 \text{ kN} \rightarrow \text{Cumple}$$

Las tres soldaduras deben ser capaces de transmitir el cortante que solicita a la unión.

$$F_{w,Rd} = 2 \cdot 7 \cdot 208 \cdot 222,7 = 648,5 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} < 648,5 \text{ kN} \rightarrow \text{Cumple}$$

Por tanto, cumple la unión perimetral.

Esta misma unión se dispone en la estructura auxiliar también ya que los esfuerzos máximos son menores.