



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Diseño preliminar de una marquesina
fotovoltaica multifunción**

Autor:

Monge Francés, Daniel

Tutor:

**Lorenzana Iban, Antolín
C.A.,I.T.,M.M.C y Teoría de Estructuras**

Valladolid, Diciembre 2021.

*Dedicado a todos mis seres queridos,
los que están y los que no.*

RESUMEN

El objetivo principal de este TFG consiste en la realización del predimensionado de una marquesina para automóviles a partir de los datos de cargas permanentes y variables que afectan la estructura y su posterior dimensionado y verificación de conformidad ante las mismas.

El desarrollo de este se ha realizado siguiendo un orden muy concreto. A partir del cálculo teórico de cargas basándonos en el Código Técnico de la Edificación se realiza el dimensionado de la estructura y se compara con el predimensionado para observar las posibles mejoras. Posteriormente se comprueban las tensiones que va a soportar las correas en la marquesina mediante el software de cálculo de tensiones ThinSecBeam, debido a que son uno de los elementos más susceptibles en la estructura.

Por último, se realiza el renderizado de la estructura mediante el software de diseño en tres dimensiones Catia V5-6 para su concepción.

Palabras clave

Estructura, carga, dimensionado, ThinSecBeam, fotovoltaica.

Abstract

The main objective of this TFG is to carry out the pre-dimensioning of a car shelter based on the data of permanent and variable loads that affect the structure and its subsequent dimensioning and verification of conformity to them.

The development of this has been carried out following a very specific order. Starting with the theoretical calculation of loads based on the Technical Building Code, the dimensioning of the structure is carried out and compared with the pre-dimensioning to observe possible improvements. Subsequently, the stresses to be supported by the purlins in the canopy are checked using ThinSecBeam stress calculation software, as they are one of the most susceptible elements in the structure.

Finally, the structure is rendered using the three-dimensional design software Catia V5-6 for its conception.

Keywords

Structure, load, dimensioning, ThinSecBeam, photovoltaics.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción y objetivos	8
1.1 Antecedentes	8
1.2 Motivación	11
1.3 Objetivos	12
Capítulo 2. Geometría de la marquesina	13
2.1 Predimensionado de perfiles y uniones	15
2.2 Paneles fotovoltaicos	18
Capítulo 3. Dimensionado de las cargas sobre la estructura	19
3.1 Acciones permanentes: peso propio	20
3.2 Acciones variables: nieve	20
3.3 Acciones variables: sobrecarga de uso	21
3.4 Acciones variables: viento	22
3.4.1 Viento de norte a sur (V1)	23
3.4.2 Concepto de coeficiente eólico de presión interior	26
3.4.3 Viento de sur a norte (V2)	27
3.4.4 Viento de este a oeste (V3)	30
3.4.5 Viento de oeste a este (V4)	31
Capítulo 4. Dimensionado de correas	33
4.1 Unión entre pescante y correa	34
4.2 Evaluación de la correa más crítica	35
4.2.1 Correa de 5 m, área tributaria A1	37
4.2.2 Correa interior de 5 m, área tributaria A3	38
4.3 Cargas en la correa más crítica	39
4.4 Combinaciones de acciones	40
4.5 Cálculo de momentos flectores y esfuerzos cortantes	43
4.6 Cálculo de tensiones normal y tangenciales en el perfil	43
4.6.1 Tensiones normales	44
4.6.2 Tensiones tangenciales	47
4.7 Cálculo de tensión de Von Mises y selección del perfil de correas	50
Capítulo 5. Comprobación de tensiones sobre las correas mediante software: ThinSecBeam	52
5.1 Creación del perfil de las correas	52
5.2 Cálculo de tensiones	54

5.2.1 Tensiones normales	55
5.2.2 Tensiones tangenciales debidas al cortante V_y	57
5.2.3 Tensiones tangenciales debidas al cortante V_z	59
Capítulo 6. Dimensionado de pórticos.....	61
6.1 Dimensionado de pescantes y cartelas.....	62
6.2 Dimensionado de pilares	67
6.3 Acciones permanentes: peso propio real	68
Capítulo 7. Dimensionado de zapatas	69
7.1 Dimensiones de zapatas.....	69
7.2 Armado de zapatas.....	71
7.3 Unión entre pilar y zapata	72
8. Estimación económica del proyecto	73
9. Plano de la estructura	76
10. Conclusiones	778
Bibliografía	789

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Marquesina de fachada de hierro [12]	9
Figura 2: Marquesina de fachada de madera [13]	9
Figura 3: Marquesina de acero, Plaza España, Valladolid [14]	10
Figura 4: Marquesina de acero, estación de servicio [15].....	10
Figura 5: Marquesina fotovoltaica de acero [16]	11
Figura 6: Dimensiones aparcamientos	13
Figura 7: Pórtico	13
Figura 8: Estructura en perspectiva	14
Figura 9: Renderizado de la estructura	14
Figura 10: Consideración del efecto de la resultante del viento en la estructura	15
Figura 11: Diagrama de esfuerzos axil, cortantes y momentos flectores	16
Figura 12: Unión soldada entre pilar, pescante y cartela	17
Figura 13: Distribución paneles fotovoltaicos	18
Figura 14: Distribución de las correas en la cubierta	18
Figura 15: Áreas tributarias y pórticos	19
Figura 16: Zonas climáticas invierno	20
Figura 17: Carga de nieve	21
Figura 18: Velocidad del viento, vb	22
Figura 19: Dirección del viento y zonas de influencia	23
Figura 20: Viento norte a sur, presión, ZONA B.....	24
Figura 21: Viento norte a sur, presión, ZONAS A y C	24
Figura 22: Viento norte a sur, succión, ZONA B.....	25
Figura 23: Viento norte a sur, succión, ZONAS A y C.....	25
Figura 24: Dirección del viento y zonas de influencia.....	27
Figura 25: Viento sur a norte, presión, ZONAS F, G y H	28
Figura 26: Viento sur a norte, succión, ZONAS H y F.....	29
Figura 27: Viento sur a norte, succión, ZONAS H y G	29
Figura 28: Dirección del viento y zonas de influencia	30
Figura 29: Dirección del viento y zonas de influencia	31
Figura 30: Carga de viento V3 y V4, ZONAS Fsup, G y Finf	32
Figura 31: Carga de viento V3 y V4, ZONA I.....	32
Figura 32: Colocación de las correas.....	33
Figura 33: Áreas tributarias y tipos de correas.....	33
Figura 34: Unión entre correa y pescante mediante ejión.....	34
Figura 35: Cargas sobre el perfil de las correas-ejes globales	35
Figura 36: Diagramas de cortantes y flectores en correas de 5m y 10m	36
Figura 37: Carga correa tipo A1	37
Figura 38: Carga correa tipo A3	38
Figura 39: Cargas en la correa más crítica.....	39
Figura 40: Carga más desfavorable sobre la correa más crítica	42
Figura 41: Valores perfil tipo C.....	43
Figura 42: Tensiones normales en la correa más crítica	46
Figura 43: Direcciones principales para el cálculo de las tensiones tangenciales en la correa (Vy)	47

Figura 44: Tensiones tangenciales debidas a V_y , plano de normal negativa	48
Figura 45: Direcciones principales para el cálculo de las tensiones tangenciales en la correa (V_z)	48
Figura 46: Tensiones tangenciales debidas a V_z , plano de normal negativa	49
Figura 47: Agujeros de paso para pernos en unión tipo ejón	51
Figura 48: Introducción de datos del perfil de las correas	52
Figura 49: Sección de la correa	53
Figura 50: Datos sección correas	54
Figura 51: Introducción datos de momento flector.....	55
Figura 52: Tensiones normales correa	55
Figura 53: Tensiones normales en 3D.....	56
Figura 54: Introducción datos de esfuerzo cortante V_y (V_z -TSB).....	57
Figura 55: Tensiones tangenciales debidas a V_y (V_z -TSB).....	57
Figura 56: Alabeo de la sección debido a V_y (V_z -TSB).....	58
Figura 57: Introducción datos de esfuerzo cortante V_z (V_y -TSB).....	59
Figura 58: Tensiones tangenciales debidas a V_z (V_y -TSB).....	59
Figura 59: Alabeo de la sección debido a V_z (V_y -TSB).....	60
Figura 60: Perfil IPE240	62
Figura 61: Diagramas de esfuerzos ante la carga más crítica	63
Figura 62: Cálculo de la longitud de cartela	64
Figura 63: Corte de perfil IPE240 para cartela.....	65
Figura 64: Saneamiento de cartela.....	65
Figura 65: Simplificación del perfil compuesto en la unión.....	66
Figura 66: Perfil compuesto y simplificado en la unión	66
Figura 67: Cargas permanentes-peso propio	68
Figura 68: Fuerzas que afectan en el vuelco de la estructura	70
Figura 69: Armado de zapata.....	71
Figura 70: Unión entre pilar y zapata.....	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades perfil IPE240	15
Tabla 2: Sobrecarga de nieve en terreno horizontal	21
Tabla 3: Coeficiente de exposición.....	23
Tabla 4: Coeficiente de presión norte a sur.....	23
Tabla 5: Coeficiente de presión exterior sur a norte	27
Tabla 6: Coeficiente de presión exterior este a oeste	30
Tabla 7: Coeficientes parciales de seguridad γ	40
Tabla 8: Coeficientes de simultaneidad Ψ	40
Tabla 9: Coeficientes de simultaneidad.....	41
Tabla 10: Coeficientes parciales de seguridad	41

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Antecedentes

Antes de profundizar en el cálculo, se va a pasar a definir que son las marquesinas, la utilidad que tienen y los diferentes tipos que existen.

Una marquesina es una estructura formada por diferentes elementos estructurales para cumplir una función principal o varias. Históricamente se llamaba marquesina a un trozo de tela extendida con la finalidad de cubrir determinadas zonas, estructuras y/o personas del sol y de la lluvia.

En la actualidad, las marquesinas han evolucionado de diversas formas. Su finalidad a lo largo del tiempo apenas ha cambiado. Siguen siendo un refugio efectivo ante los efectos meteorológicos, pero se le han ido añadiendo funciones, como, por ejemplo: generar electricidad o energía térmica colocando en la cubierta de éstas paneles fotovoltaicos o térmicos respectivamente.

Una función que ha ido cobrando cada vez más importancia con el paso de los años es la estética. Las marquesinas pueden diseñarse de diversas maneras y con distintos materiales en función del aspecto final deseado.

Algunos de estos materiales pueden ser madera, hierro, piedra, acero, policarbonato, aluminio, etc.

En cuanto a los tipos de marquesinas que existen se pueden diferenciar los siguientes:

- Marquesinas para fachadas de edificios: son muy usuales en viviendas, hoteles, restaurantes, bares, etc.



Figura 1: Marquesina de fachada de hierro [12]



Figura 2: Marquesina de fachada de madera [13]

- Marquesinas aisladas: son las más comunes. Se pueden ver tanto en gasolineras como en plazas o en aparcamientos de automóviles.



Figura 3: Marquesina de acero, Plaza España, Valladolid [14]



Figura 4: Marquesina de acero, estación de servicio [15]

Dentro de este grupo se encuentra la marquesina objeto de estudio en este trabajo.

Se trata de una marquesina fotovoltaica para un aparcamiento de automóviles.

Una marquesina fotovoltaica, como su propio nombre indica, está dotada de una cubierta compuesta por paneles fotovoltaicos que captan la energía solar y la transforman en energía eléctrica para su consumo o almacenado.

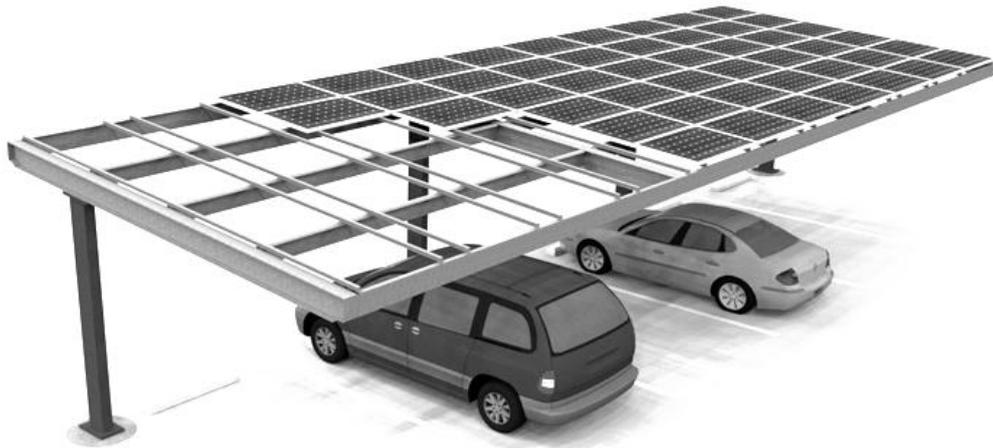


Figura 5: Marquesina fotovoltaica de acero [16]

1.2 Motivación

Este TFG ha sido elegido por las razones que se especifican a continuación:

- El principal motivo es la gran afición por el mundo de las estructuras y las construcciones industriales, la cual ha ido creciendo conforme he ido adquiriendo nuevos conocimientos a lo largo de mi formación académica, llenando mi mente de curiosidad e inquietud por aprender más al respecto.
- Una razón de mucho peso es la innovación con una mirada puesta en el futuro. Actualmente estamos constantemente rodeados de automóviles y los utilizamos a diario para realizar nuestras tareas cotidianas. Esto ha conllevado unas consecuencias gravísimas sobre el planeta en temas de contaminación y capa de ozono.

La humanidad se ve obligada a reinventarse para cuidar del planeta y de este modo poder vivir de manera más sostenible.

Las marcas de automóviles ya están empezando a incorporar tecnologías híbridas o totalmente eléctricas para sus vehículos, dejando atrás las anteriores tecnologías basadas en motores propulsados por combustión.

La implantación de marquesinas fotovoltaicas en aparcamientos, aparte de cumplir su principal función frente a los efectos meteorológicos, permite dar suministro eléctrico para la carga de los automóviles eléctricos del presente y futuro.

Cuando esta electricidad no sea utilizada para la carga de vehículos, debido a la falta de éstos bajo la marquesina, se utilizará para dar suministro a la red, asegurando así el 100% de eficacia de los paneles fotovoltaicos.

1.3 Objetivos

Al tratarse este TFG de un diseño preliminar o anteproyecto, se va a especificar cuáles son los objetivos del mismo y cuáles son objetivos previstos para líneas futuras, en las siguientes fases del proyecto.

- Objetivos de este trabajo:
 - Diseño de la geometría de la marquesina.
 - Evaluar las cargas que afectan a la estructura.
 - Dimensionar la estructura conforme a las cargas obtenidas (pilares, pescantes, correas, zapatas, unión entre correa y pescante, unión entre pilar y zapatas).
 - Comprobación mediante software de las tensiones en correas → ThinSecBeam.
 - Renderizado de la estructura y creación de planos mediante software → Catia V5-6.
 - Estimación económica del proyecto.

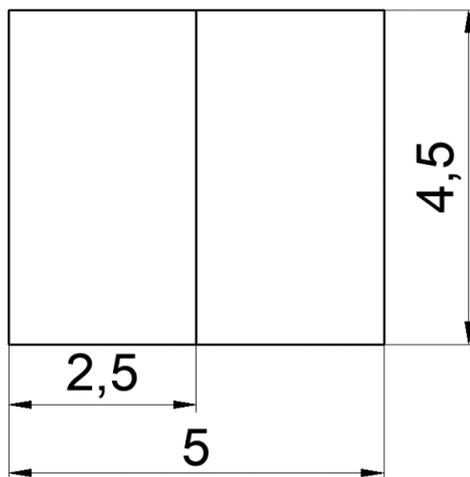
De ser viable este anteproyecto habría que acometer los siguientes puntos adicionales:

- Detalles constructivos de todas las uniones.
- Estudio geotécnico del terreno para la cimentación.
- Estudio de la instalación de los paneles fotovoltaicos (anclaje, cableado, inversor, conexión a la red y cargadores para automóviles).
- Redacción del resto de documentos del proyecto.
- Urbanización (permisos de asfaltados, conexión a red, etc).

CAPÍTULO 2. GEOMETRÍA DE LA MARQUESINA

La geometría de la estructura a estudiar se ha pensado con la finalidad principal de proporcionar un tejado para aparcamientos de automóviles y aprovechar la energía solar mediante paneles fotovoltaicos en la cubierta de la estructura.

En la *figura 6*, se muestran las dimensiones de dos plazas de aparcamiento contiguas. A continuación, se concreta detalladamente la geometría de la estructura:



- Crujía o distancia entre pilares: 5 metros para cubrir dos plazas de aparcamiento.
- Longitud total de la estructura: 20 metros para cubrir un total de 8 plazas de aparcamiento.
- Dintel o pescante acartelado: como se puede observar en las *figuras 2* y *3* se ha optado por un pescante acartelado para aportar a la unión entre pilar y pescante mayor rigidez.

Figura 6: Dimensiones aparcamientos

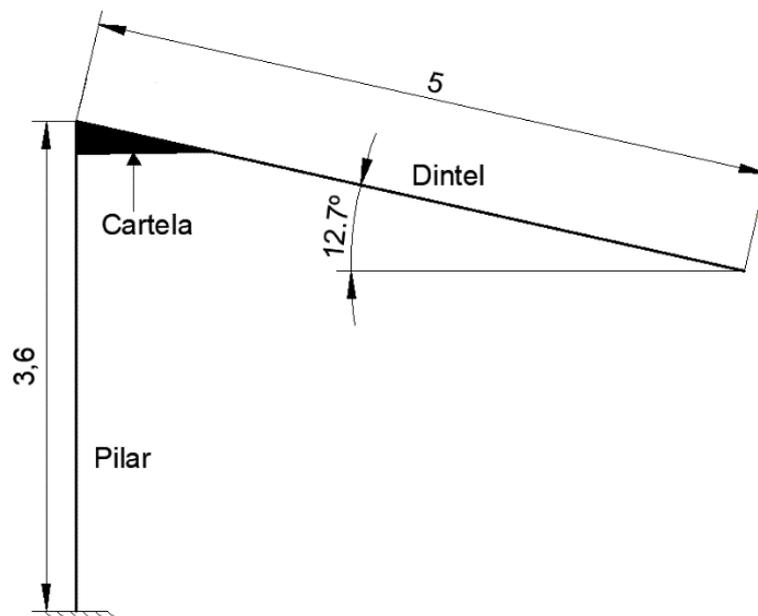


Figura 7: Pórtico

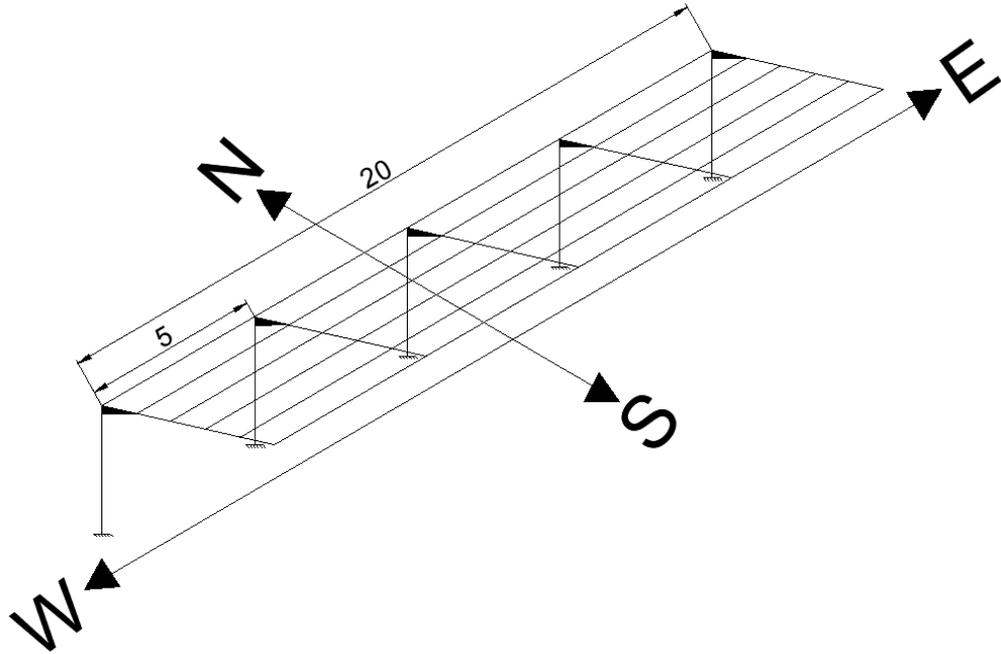


Figura 8: Estructura en perspectiva

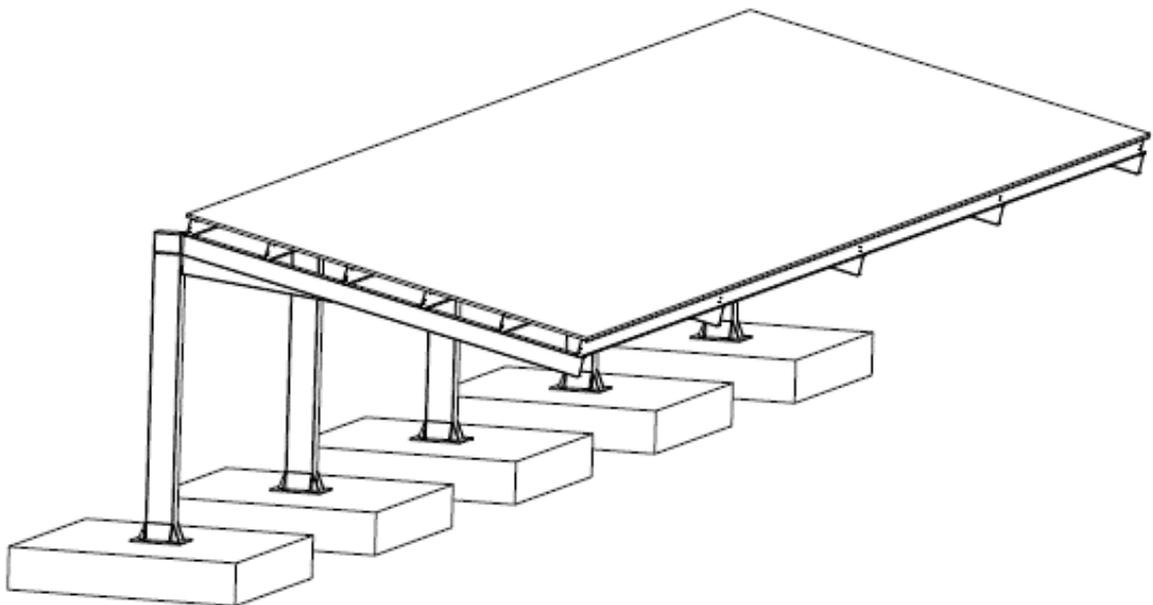
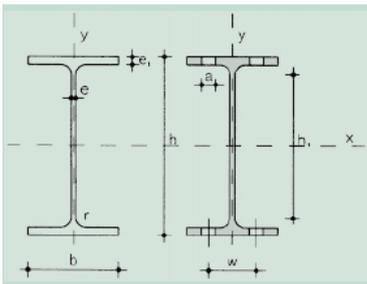


Figura 9: Renderizado de la estructura

2.1 Predimensionado de perfiles y uniones

A modo de predimensionamiento, partimos de unos pescantes y cartelas con un tamaño tentativo de **IPE 240** acero **S275** [1]:

Tabla 2.A1.2. Perfiles IPE



A = Área de la sección
 S_x = Momento estático de media sección, respecto a X
 I_x = Momento de inercia de la sección, respecto a X
 W_x = 2I_x : h. Módulo resistente de la sección, respecto a X
 i_x = √(I_x/A). Radio de giro de la sección, respecto a X
 I_y = Momento de inercia de la sección, respecto a Y
 W_y = 2I_y : b. Módulo resistente de la sección, respecto a Y
 i_y = √(I_y/A). Radio de giro de la sección, respecto a Y

I_t = Módulo de torsión de la sección
 I_z = Módulo de alabeo de la sección
 u = Perímetro de la sección
 a = Diámetro del agujero del roblón normal
 w = Gramil, distancia entre ejes de agujeros
 h₁ = Altura de la parte plana del alma
 p = Peso por m

Perfil	Dimensiones							Términos de sección										Agujeros			Peso	
	h mm	b mm	e mm	e ₁ mm	r ₁ mm	h ₁ mm	u mm	A cm ²	S _x cm ³	I _x cm ⁴	W _x cm ³	i _x cm	I _y cm ⁴	W _y cm ³	i _y cm	I _t cm ⁴	I _z cm ⁴	w mm	a mm	e ₂ mm	p kp/m	
IPE 80	80	46	3,8	5,2	5	60	328	7,64	11,6	80,1	20,0	3,24	8,49	3,69	1,05	0,721	118	—	—	3,8	6,00	C
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7	75	400	10,30	19,7	171,0	34,2	4,07	15,90	5,79	1,24	1,140	351	—	—	4,1	8,10	C
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7	93	475	13,20	30,4	318,0	53,0	4,90	27,70	8,65	1,45	1,770	890	35	—	4,4	10,40	C
IPE 140	140	73	4,7	6,9	7	112	551	16,40	44,2	541,0	77,3	5,74	44,90	12,30	1,65	2,630	1.981	40	11	4,7	12,90	C
IPE 160	160	82	5,0	7,4	9	127	623	20,10	61,9	869,0	109,0	6,58	68,30	16,70	1,84	3,640	3.959	44	13	5,0	15,80	P
IPE 180	180	91	5,3	8,0	9	146	698	23,90	83,2	1.320,0	146,0	7,42	101,00	22,20	2,05	5,060	7.431	48	13	5,3	18,80	P
IPE 200	200	100	5,6	8,5	12	159	788	28,50	110,0	1.940,0	194,0	8,26	142,00	28,50	2,24	6,670	12.990	52	13	5,6	22,40	P
IPE 220	220	110	5,9	9,2	12	178	848	33,40	143	2.770	252	9,11	205	37,3	2,48	9,15	22.670	58	17	5,9	26,20	P
IPE 240	240	120	6,2	9,8	15	190	922	39,10	183	3.890	324	9,97	284	47,3	2,69	12,00	37.390	65	17	6,2	30,70	P

Tabla 1: Propiedades perfil IPE240

$$\sigma_{xx} = \frac{M_z}{W_z} = 275 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 275 \text{ MPa}$$

Tal y como marca la normativa del 'CTE' [2]:

- A efectos de dimensionado de la estructura, la resultante de la acción del viento se supondrá actuando a una distancia de d/4, medida desde el borde de barlovento.

Figura 10: Consideración del efecto de la resultante del viento en la estructura

En nuestro caso la longitud de pescante es d=5m.

Para dimensionar el pilar supondremos que esta resultante del viento va a ser la carga máxima admisible por el perfil del pescante.

Hay que tener en cuenta que nuestro pórtico únicamente tiene un apoyo empotrado, por lo tanto, es isostático. Los esfuerzos que soportará los vamos a poder calcular con las ecuaciones de equilibrio [3].

$$M_{z-max} = \sigma_{xx} \cdot W_z = 89100 \text{ Nm}$$

$$R_{max} = V_{y-max} = \frac{M_{z-max}}{\frac{3}{4} \cdot d} = 23760 \text{ N}$$

$$N_{x-max} = V_{y-max} \cdot \cos(12,7^\circ) = 23178,7 \text{ N}$$

A continuación, en la *figura 11*, se muestran los diagramas de esfuerzos axil, cortantes y momentos flectores en nuestro pórtico:

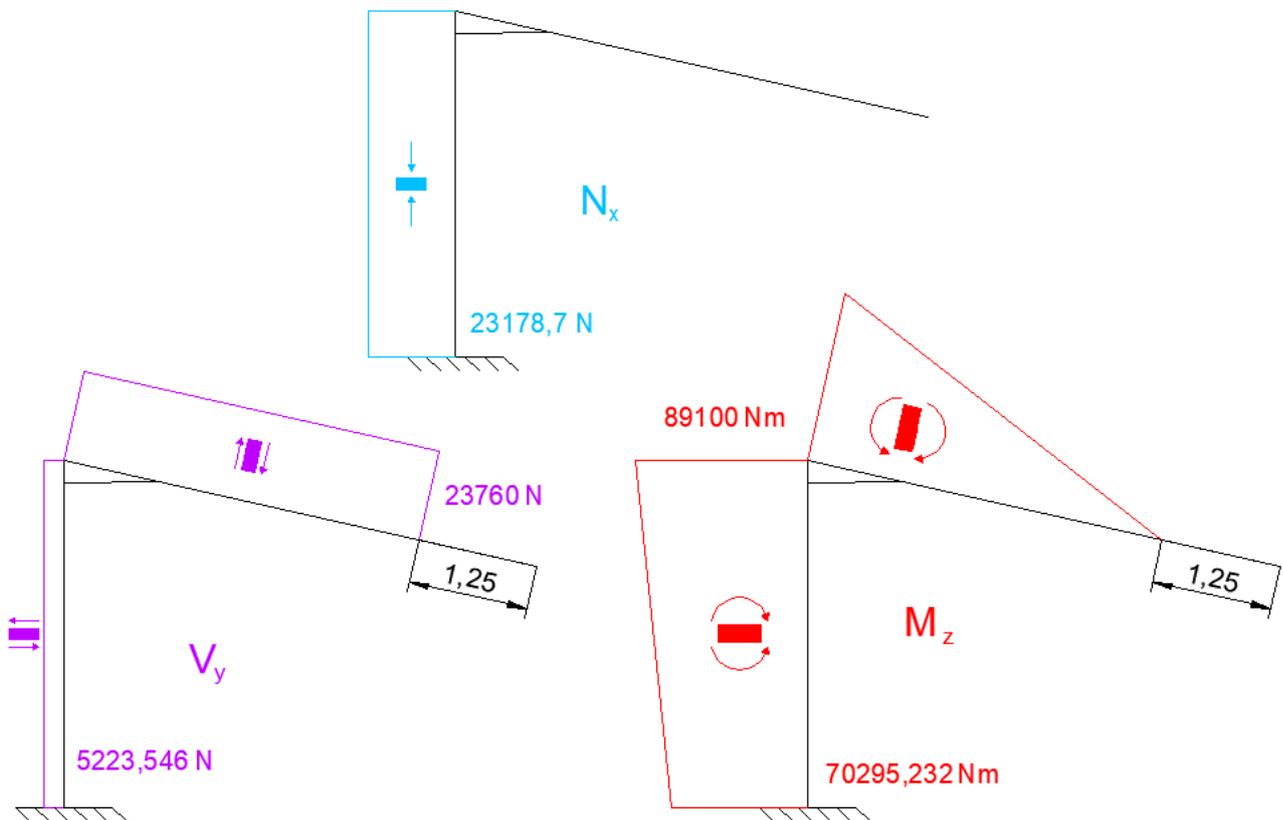


Figura 11: Diagrama de esfuerzos axil, cortantes y momentos flectores

A la vista de los resultados obtenidos de los diagramas de esfuerzos, podemos hacer las siguientes consideraciones:

- En el pescante la distribución de momentos flectores es lineal con valor máximo en la unión pilar-pescante. Será conveniente acartelar la unión para evitar que esta plastifique, de este modo tendremos mayor sección para soportar el momento flector.
- En el pilar la distribución de momentos flectores también es lineal, pero en este caso la variación no es tan notoria como en el pescante. Por lo tanto, en el pilar, para evitar tener ninguna zona comprometida optaremos por un perfil del mismo tipo que en el pescante, pero de mayor tamaño aún por dimensionar.
- Perfil de las correas: se optará por un tipo de correas conformado en frío de **tipo C**, para facilitar el montaje sobre las mismas de los paneles fotovoltaicos. El tamaño de las correas se determinará posteriormente con el análisis de las cargas sobre estas. [4]
- Unión entre pilar, pescante y cartela:
Esta unión se realizará mediante soldadura añadiendo los correspondientes rigidizadores en el pilar, de este modo se podrá asegurar la integridad de la unión en todo momento como podemos ver en la *figura 12*.

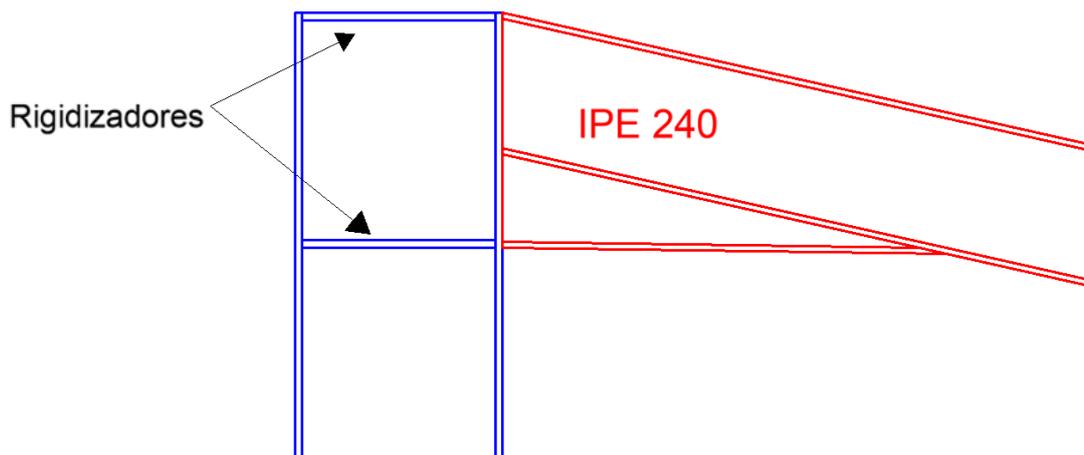


Figura 12: Unión soldada entre pilar, pescante y cartela

2.2 Paneles fotovoltaicos

Los paneles elegidos para poner a modo de cubierta de la estructura son de la marca 'AXITEC' modelo AXIpremium X HC 385-415 W, cuyas dimensiones son $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 0,036\text{ m}$. (Anejo 1)

La disposición de estos será la siguiente, donde están representados los marcos de los paneles fotovoltaicos con líneas de color verde y los pescantes de cada uno de los pórticos con líneas de color negro y mayor grosor:

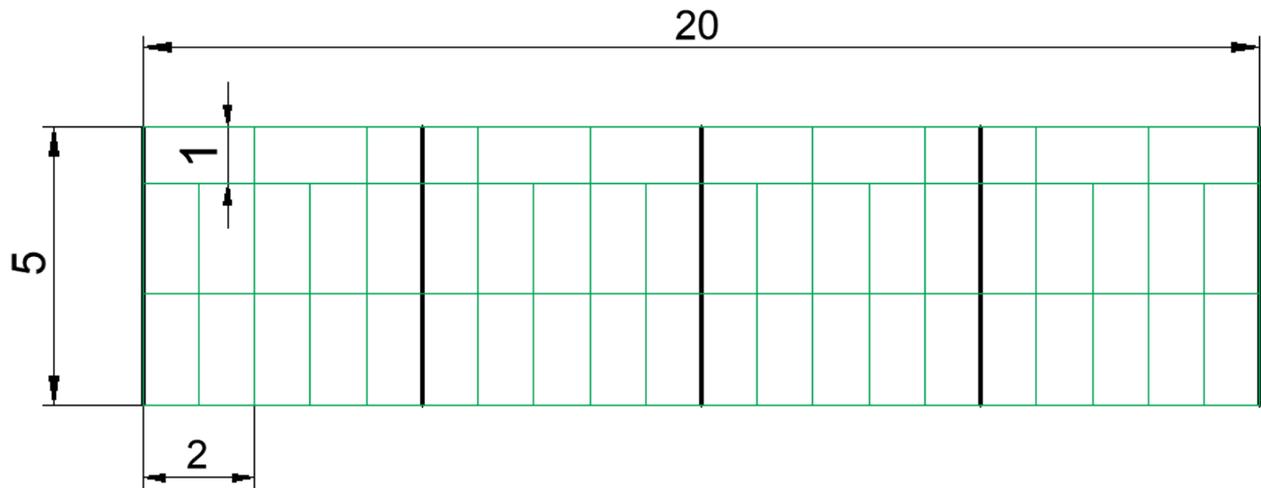


Figura 13: Distribución paneles fotovoltaicos

Las correas se van a distribuir como se muestra en la figura 14, de este modo se podrán anclar a estas los paneles fotovoltaicos en cada uno de sus seis puntos de anclaje.

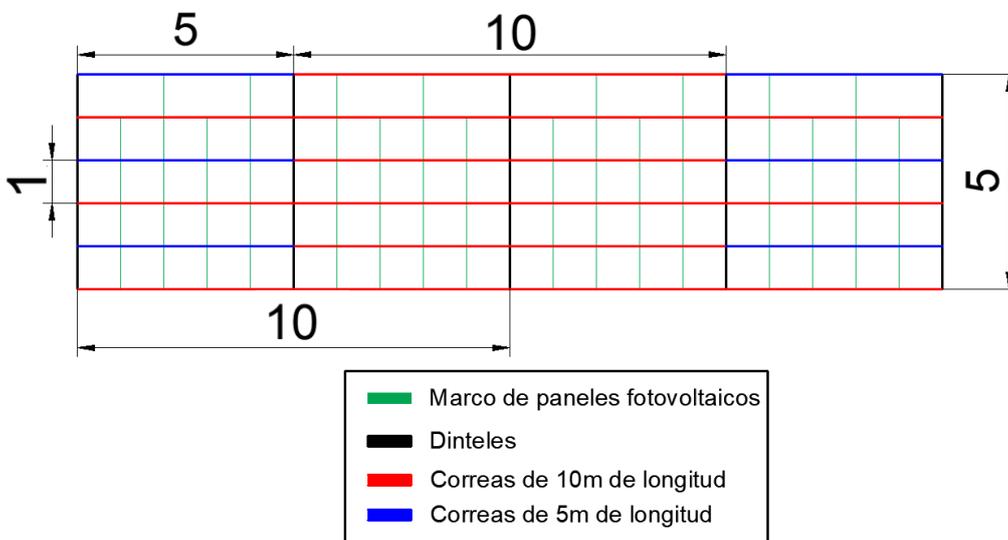


Figura 14: Distribución de las correas en la cubierta

CAPÍTULO 3. DIMENSIONADO DE LAS CARGAS SOBRE LA ESTRUCTURA

Antes de comenzar con el cálculo de las cargas sobre nuestra estructura debemos diferenciar los pórticos en dos tipos de pórticos:

- Pórticos fachada: son los pórticos colocados en primera y quinta posición con área tributaria $A_1 = 12,5 \text{ m}^2$.
- Pórticos interiores: son los pórticos colocados en segunda, tercera y cuarta posición con área tributaria $A_2 = 25 \text{ m}^2$.

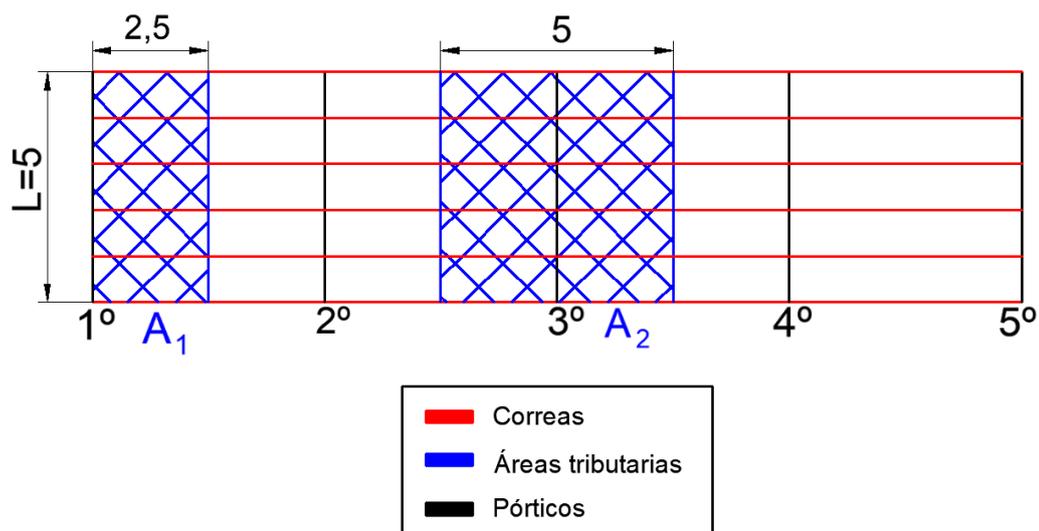


Figura 15: Áreas tributarias y pórticos

Como se puede apreciar en la *figura 15*, el área tributaria en los pórticos interiores es el doble de tamaño que el área tributaria en los pórticos fachada, por lo tanto, los pórticos más cargados en nuestra estructura serán los interiores.

A continuación, procedemos al cálculo de las cargas, teniendo en cuenta que aún se desconocen tanto el peso propio de las correas como el de los pilares, los cuales se dimensionarán posteriormente.

3.1 Acciones permanentes: peso propio

- Paneles fotovoltaicos:
 Peso por panel $\rightarrow W_{foto} = 23,5 \text{ kg} = 0,2305 \text{ kN}$
 Superficie por panel $\rightarrow S_{foto} = 2,012016 \text{ m}^2$

$$Q_{foto} = \frac{W_{foto}}{S_{foto}} = 114,6 \text{ Pa}$$
- Pescantes: $G_{IPE 240} = 300,86 \text{ Pa} \cdot \text{m}$
- Pilares: aún por dimensionar en función del momento flector máximo que soportará debido a las cargas.
- Correas: perfil aún por dimensionar en función de las cargas.

Más adelante se realizará el cálculo del peso propio real, una vez estén dimensionados tanto correas como pilares.

3.2 Acciones variables: nieve

Para obtener la carga de nieve que va a soportar nuestra estructura, nos va a hacer falta la Figura E.2 y la tabla E.2 del 'Código Técnico de la Edificación (CTE)'. [2]



Figura E.2 Zonas climáticas de invierno

Figura 16: Zonas climáticas invierno

De este modo vemos que nuestra estructura al estar ubicada en Valladolid se encontrará en la ZONA 3 según la figura 16.

Tabla E.2 Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal (kN/m²)

Altitud (m)	Zona de clima invernal, (según figura E.2)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
200	0,5	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
400	0,6	0,6	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
500	0,7	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2
600	0,9	0,9	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2
700	1,0	1,0	0,4	0,6	0,6	0,5	0,2
800	1,2	1,1	0,5	0,8	0,7	0,7	0,2

Tabla 2: Sobrecarga de nieve en terreno horizontal

Interpolando para la altitud de Valladolid (698 m) obtenemos el valor característico de la carga de nieve en terreno horizontal: $S_k = 0,398$.

El último factor a tener en cuenta para el cálculo de la carga de nieve es coeficiente de forma de la cubierta μ ; en nuestro caso la inclinación de la cubierta es de $12,7^\circ$, por lo tanto, inferior a $20^\circ \rightarrow \mu = 1$.

$$Q_N = S_k \cdot \mu = 398 \cdot 1 = 398 \text{ Pa}$$

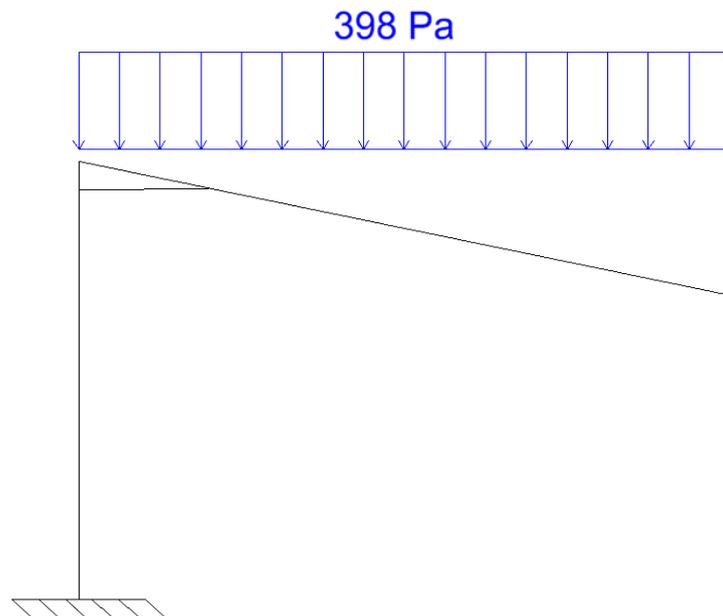


Figura 17: Carga de nieve

3.3 Acciones variables: sobrecarga de uso

Para la marquesina que estamos estudiando, se va a considerar la cubierta no transitable de ninguna manera. Esto es debido a que, al no tener excesiva altura, en caso de algún tipo de reparación (paneles fotovoltaicos o correas) estas se realizaran bajo la propia cubierta.

3.4 Acciones variables: viento

A la hora de evaluar la acción del viento, como la dirección de este es impredecible deberemos evaluar la carga que ejerce sobre nuestra estructura en las cuatro direcciones posibles (norte a sur, sur a norte, este a oeste y oeste a este).

Como vamos a ver a continuación, dada la forma de nuestra estructura tendremos que hacer diferentes consideraciones en función de la dirección del viento ya que es una estructura diáfana y por lo tanto tendremos carga interior y exterior.

La carga de viento viene caracterizada por la siguiente fórmula:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$

Siendo:

- $q_b \equiv$ presión dinámica del viento $= 0,5 \cdot \delta \cdot v_b^2$
 - $\delta \equiv$ densidad del aire $= 1,25 \text{ kg/m}^3$
 - $v_b \equiv$ valor característico de la velocidad del viento

Este se obtiene en función de la región en la que este ubicada la estructura según la figura D.1 del 'Código Técnico de la Edificación (CTE)' [2].

Valladolid está situada en la ZONA A,
por lo tanto:

$$v_b = 26 \text{ m/s}$$

La presión dinámica del viento será:

$$q_b = 0,5 \cdot \delta \cdot v_b^2 = 420 \text{ Pa}$$



Figura D.1 Valor básico de la velocidad del viento, v_b

Figura 18: Velocidad del viento, v_b

- $c_e \equiv$ coeficiente de exposición: lo obtendremos a partir de la tabla 3.3 del 'CTE' [2].

Teniendo en cuenta que el grado de aspereza del entorno en nuestro caso es el GRADO IV y la altura del punto considerado es de 3,6 m, interpolamos y obtenemos el valor de coeficiente de exposición:

Tabla 3.3 Valores del coeficiente de exposición c_e

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

→ $c_e = 1,32$

Tabla 3: Coeficiente de exposición

- $C_p \equiv$ coeficiente de presión: lo vamos a obtener en función de las cuatro direcciones posibles del viento.

A continuación, procederemos al cálculo de los coeficientes de presión y de succión para todos los casos posibles.

3.4.1 Viento de norte a sur (V1)

En este caso el 'CTE' nos proporciona la tabla D.8 para marquesinas a un agua [2] en la cual podemos hacer la distinción de marquesinas mediante el factor de obstrucción φ , el cual caracteriza el grado de obstrucción del viento por debajo de la marquesina y está definido como la relación entre el área obstruida y el área de la sección total bajo la marquesina. Ambas áreas consideradas en el plano perpendicular a la dirección del viento.

En nuestro caso $\varphi = 0$.

Con esta tabla el 'CTE' nos permite calcular directamente el efecto del viento en la parte exterior y en la parte interior simultáneamente y tendremos dos situaciones: presión (abajo) y succión (arriba). [2]

Pendiente de la cubierta α	Efecto del viento hacia	Factor de obstrucción φ	Coeficientes de presión exterior		
			$C_{p,10}$		
			Zona (según figura)		
0°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	0,5	1,8	1,1
	Arriba	0	-0,6	-1,3	-1,4
	Arriba	1	-1,5	-1,8	-2,2
5°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	0,8	2,1	1,3
	Arriba	0	-1,1	-1,7	-1,8
	Arriba	1	-1,6	-2,2	-2,5
10°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	1,2	2,4	1,6
	Arriba	0	-1,5	-2,0	-2,1
	Arriba	1	-2,1	-2,6	-2,7
15°	Abajo	$0 \leq \varphi \leq 1$	1,4	2,7	1,8
	Arriba	0	-1,8	-2,4	-2,5
	Arriba	1	-1,6	-2,9	-3,0

Tabla 4: Coeficiente de presión norte a sur

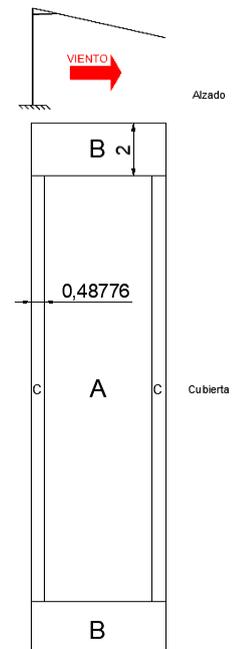


Figura 19: Dirección del viento y zonas de influencia

En todos los casos tendremos que interpolar para nuestra pendiente de cubierta $\alpha = 12,7^\circ$.

Comenzamos con el efecto de presión:

- ZONAS A:

$$C_{p-V1-presión}^A = 1,308 \rightarrow Q_{V1-int-presión}^A = 420 \cdot 1,32 \cdot 1,308 = 725,2 \text{ Pa}$$

- ZONA B:

$$C_{p-V1-presión}^B = 2,562 \rightarrow Q_{V1-fach-presión}^B = 420 \cdot 1,32 \cdot 2,562 = 1420,4 \text{ Pa}$$

- ZONA C:

$$C_{p-V1-presión}^C = 1,708 \rightarrow Q_{V1-int-presión}^C = 420 \cdot 1,32 \cdot 1,708 = 946,92 \text{ Pa}$$

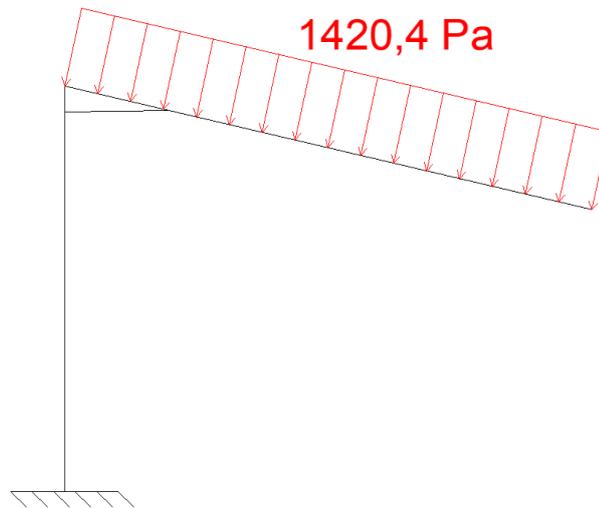


Figura 20: Viento norte a sur, presión, ZONA B

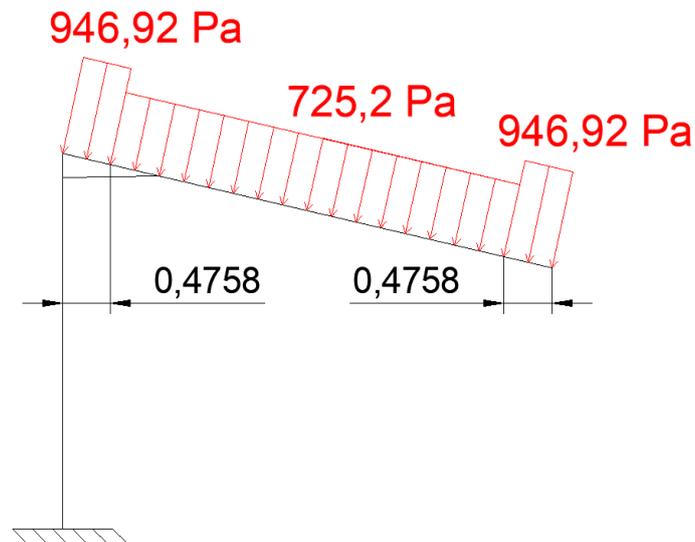


Figura 21: Viento norte a sur, presión, ZONAS A y C

Efecto de succión:

- ZONA A:

$$C_{p-V1-succión}^A = -1,662 \rightarrow Q_{V1-presión}^A = 420 \cdot 1,32 \cdot -1,662 = -921,4 \text{ Pa}$$

- ZONA B:

$$C_{p-V1-succión}^B = -2,216 \rightarrow Q_{V1-succión}^B = 420 \cdot 1,32 \cdot -2,216 = -1228,56 \text{ Pa}$$

- ZONA C:

$$C_{p-V1-succión}^C = -2,316 \rightarrow Q_{V1-succión}^C = 420 \cdot 1,32 \cdot -2,316 = -1284 \text{ Pa}$$

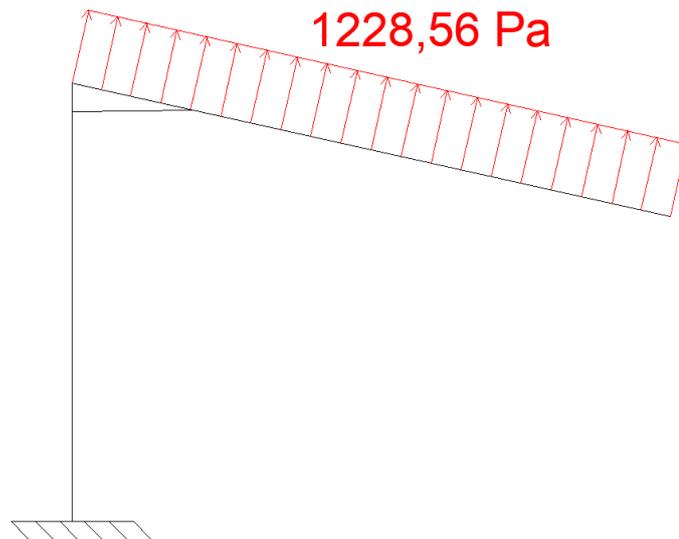


Figura 22: Viento norte a sur, succión, ZONA B

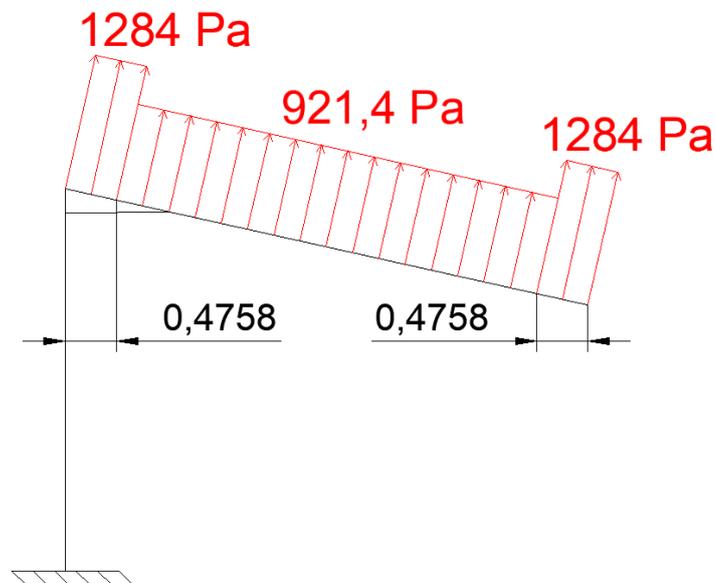


Figura 23: Viento norte a sur, succión, ZONAS A y C

3.4.2 Concepto de coeficiente eólico de presión interior

Para el resto de las direcciones de viento, el 'CTE' no nos proporciona unas tablas para contabilizar simultáneamente el efecto interior y exterior del viento como en el caso anterior.

Lo que nos proporciona para estas direcciones el 'CTE' es el coeficiente eólico de presión interior para poder tener en cuenta el efecto del viento en el interior de la estructura y de este modo poder sumar a este el efecto exterior para el cuál sí que nos facilitan tablas para cada una del resto de direcciones del viento.

Según el 'CTE' el coeficiente eólico interior [2], en los casos en los que exista un hueco dominante, será el correspondiente a la altura media de dicho hueco.

En nuestro caso la altura de nuestro hueco dominante es de 3,6 m, por lo que el valor de nuestro coeficiente eólico de presión interior será de 1,8 pero con signo negativo ya que el viento que va por el interior tiende a levantar la cubierta de la estructura por lo tanto el efecto es de succión.

$$C_{pi} = -1,8$$

Por lo tanto, en los cálculos siguientes deberemos sumar con el signo correspondiente las siguientes cargas producto del viento en el interior de la estructura:

$$Q^{INTERIOR} = 420 \cdot 1,32 \cdot -1,8 = -998 \text{ Pa}$$

3.4.3 Viento de sur a norte (V2)

Comenzaremos calculando el efecto que crea el viento en la parte exterior de la estructura y después le sumaremos el efecto del viento en el interior.

Para ello el 'CTE' nos proporciona la tabla D.3 para obtener los coeficientes de presión en succión y en presión en función del ángulo de la cubierta. [2]

Pendiente de la cubierta α	A (m ²)	Zona (según figura), $-45^\circ < \theta < 45^\circ$		
		F	G	H
5°	≥ 10	-1,7 +0,0	-1,2 +0,0	-0,6 +0,0
	≤ 1	-2,5 +0,0	-2,0 +0,0	-1,2 +0,0
15°	≥ 10	-0,9 0,2	-0,8 0,2	-0,3 0,2
	≤ 1	-2,0 0,2	-1,5 0,2	-0,3 0,2

Tabla 5: Coeficiente de presión exterior sur a norte

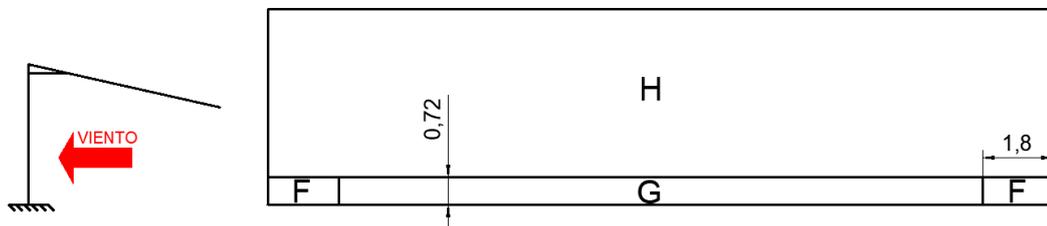


Figura 24: Dirección del viento y zonas de influencia

El área de influencia A es claramente superior a 10 m² por lo que interpolaremos con los valores de la tabla para áreas de influencia superiores a 10 m².

Comenzamos con el efecto de presión:

- ZONAS F, G y H:

$$C_{p-V2-presión}^F = C_{p-V2-presión}^G = C_{p-V2-presión}^H = 0,154$$

$$Q_{V2-presión}^F = Q_{V2-presión}^H = Q_{V2-presión}^G = 420 \cdot 1,32 \cdot 0,154 + Q^{INTERIOR} =$$

$$= -912,6 \text{ Pa}$$

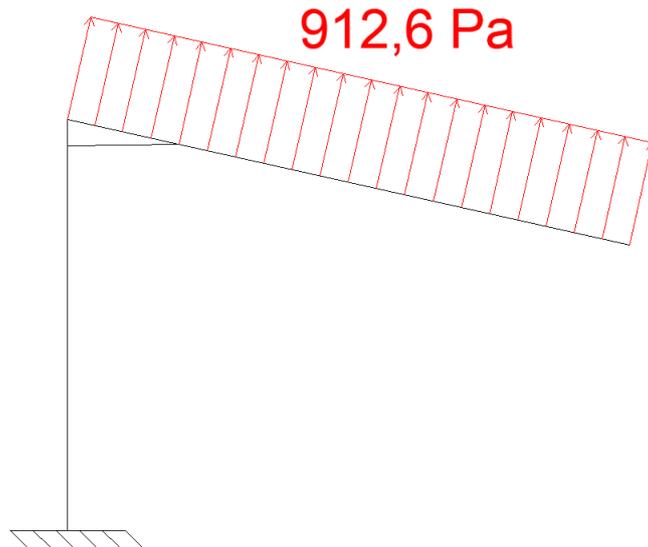


Figura 25: Viento sur a norte, presión, ZONAS F, G y H

Efecto de succión:

- ZONA F:

$$C_{p-v2-succión}^F = -1,084$$

$$Q_{V2-succión}^F = 420 \cdot 1,32 \cdot -1,084 + Q^{INTERIOR} = -1599 \text{ Pa}$$

- ZONA G:

$$C_{p-v2-succión}^G = -0,892$$

$$Q_{V2-succión}^G = 420 \cdot 1,32 \cdot -0,892 + Q^{INTERIOR} = -1495,5 \text{ Pa}$$

- ZONA H:

$$C_{p-v2-succión}^H = -0,369$$

$$Q_{V2-succión}^H = 420 \cdot 1,32 \cdot -0,369 + Q^{INTERIOR} = -1202,6 \text{ Pa}$$

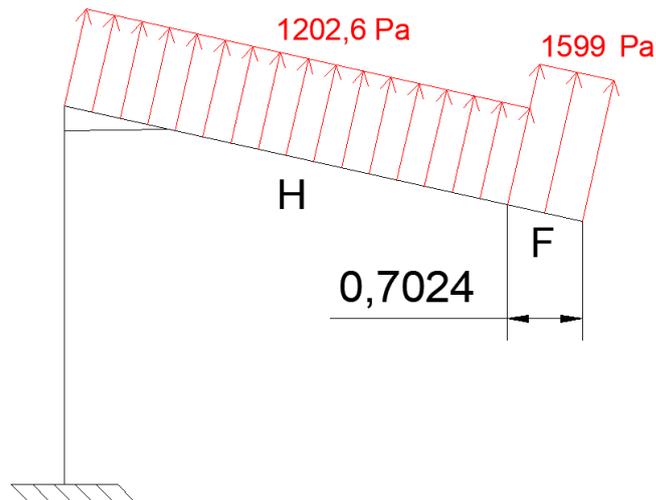


Figura 26: Viento sur a norte, succión, ZONAS H y F

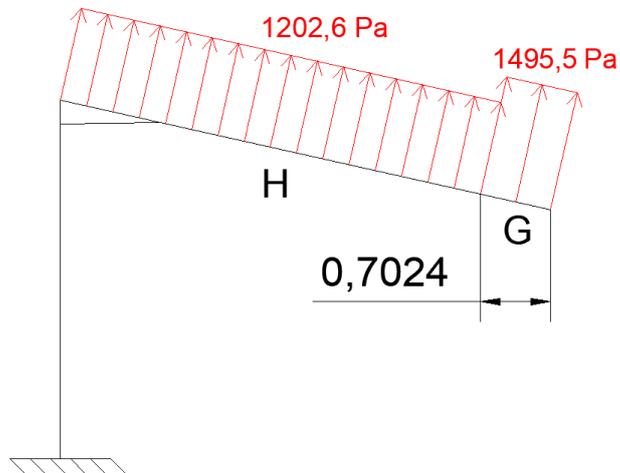


Figura 27: Viento sur a norte, succión, ZONAS H y G

Como podemos observar, cuando tenemos presión en la parte exterior de la estructura, el efecto de la presión en el interior es más representativa, por lo que la suma de ambos efectos resultan un efecto de succión.

3.4.4 Viento de este a oeste (V3)

Para esta dirección del viento el 'CTE' nos proporciona la tercera tabla dentro de las tablas D.3 para poder obtener interpolando los valores de los coeficientes de presión. Como podremos observar a continuación, únicamente tendremos el efecto de succión (arriba). [2]

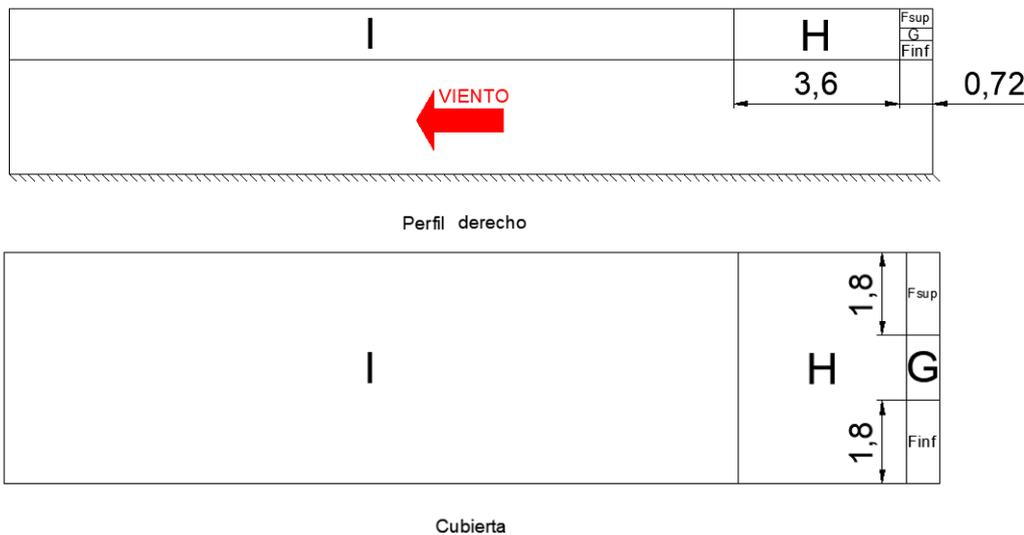


Figura 28: Dirección del viento y zonas de influencia

Pendiente de la cubierta α	A (m ²)	Zona (según figura), $45^\circ \leq \theta \leq 135^\circ$				
		F _{Inf}	F _{Sup}	G	H	I
5°	≥ 10	-2,1	-2,1	-1,8	-0,6	-0,5
	≤ 1	-2,4	-2,6	-2,0	-1,2	-0,5
15°	≥ 10	-1,6	-2,4	-1,9	-0,8	-0,7
	≤ 1	-2,4	2,9	-2,5	-1,2	-1,2

Tabla 6: Coeficiente de presión exterior este a oeste

Como hemos visto en el apartado anterior, calcularemos interpolando los coeficientes de presión exterior teniendo en cuenta que nuestra área de influencia A es muy superior a los 10 m² y después sumaremos el efecto de succión que aporta el viento en la parte interior de la estructura.

En este caso no distinguiremos entre pórticos fachada y pórticos interiores por tener zonas de influencia de pequeño tamaño, calcularemos directamente el valor de las cargas en las distintas zonas de influencia y las representaremos.

- ZONA F_{sup}:

$$C_{p-Fsup} = -2,262$$

$$Q_{V3}^{Fsup} = 420 \cdot 1,32 \cdot -2,262 + Q^{INTERIOR} = -2252 \text{ Pa}$$

- ZONA F_{inf}:

$$C_{p-Finf} = -1,83$$

$$Q_{V3}^{Finf} = 420 \cdot 1,32 \cdot -1,83 + Q^{INTERIOR} = -2012,55 \text{ Pa}$$

- ZONA G:

$$C_{p-G} = -1,854$$

$$Q_{V3}^G = 420 \cdot 1,32 \cdot -1,854 + Q^{INTERIOR} = -2025,86 \text{ Pa}$$

- ZONA H: Si observamos la *figura 17*, no hay ningún pórtico que este incluido dentro de esta zona H por lo que omitiremos el cálculo de la carga de viento en esta zona.

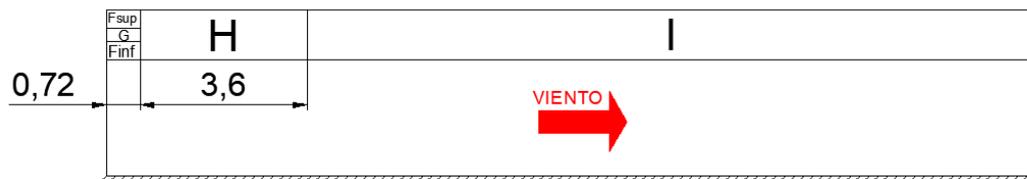
- ZONA I:

$$C_{p-I} = -0,608$$

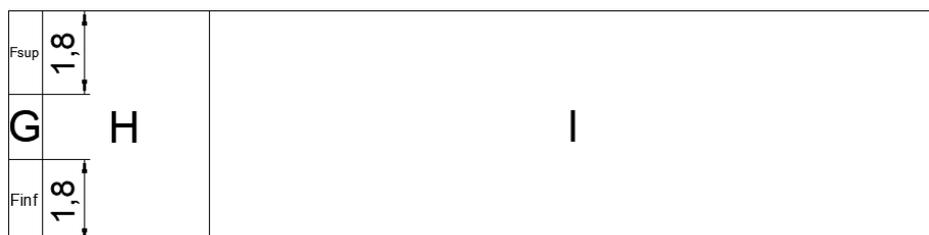
$$Q_{V3}^I = 420 \cdot 1,32 \cdot -0,608 + Q^{INTERIOR} = -1335,1 \text{ Pa}$$

3.4.5 Viento de oeste a este (V4)

Para esta dirección del viento, se procede del mismo modo que en la dirección de este a oeste (V3), obteniendo los mismos resultados. Con la única diferencia en las zonas de influencia que serán las siguientes:



Perfil derecho



Cubierta

Figura 29: Dirección del viento y zonas de influencia

A continuación se representan las respectivas cargas en las distintas zonas de influencia para las direcciones de viento este a oeste (V3) y oeste a este (V4):

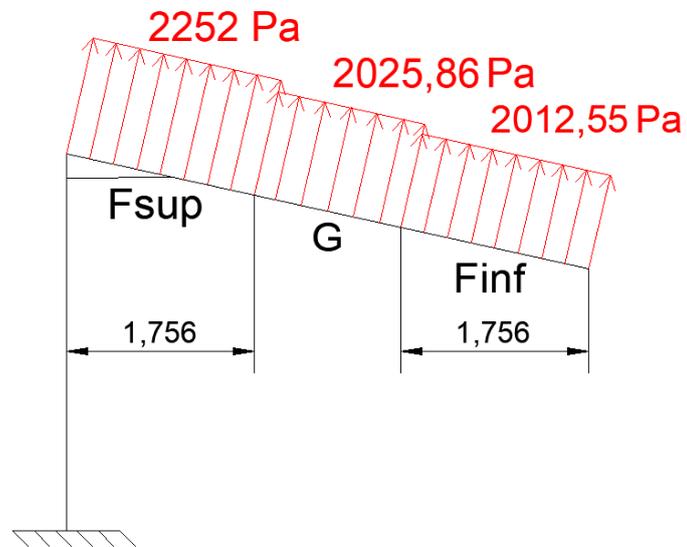


Figura 30: Carga de viento V3 y V4, ZONAS Fsup, G y Finf

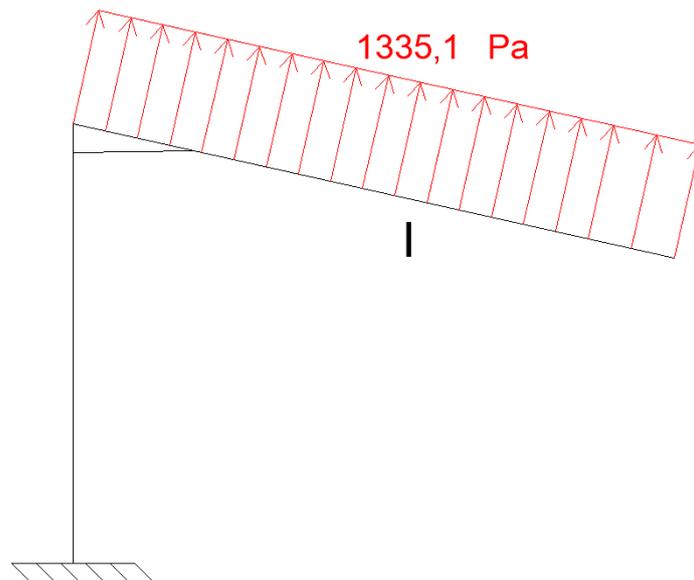


Figura 31: Carga de viento V3 y V4, ZONA I

CAPÍTULO 4. DIMENSIONADO DE CORREAS

Antes de proceder al dimensionado de las correas debemos observar cómo se distribuirán las correas en la cubierta de la estructura, cómo se unirán a los pescantes y evaluar cuál va a ser la más crítica.

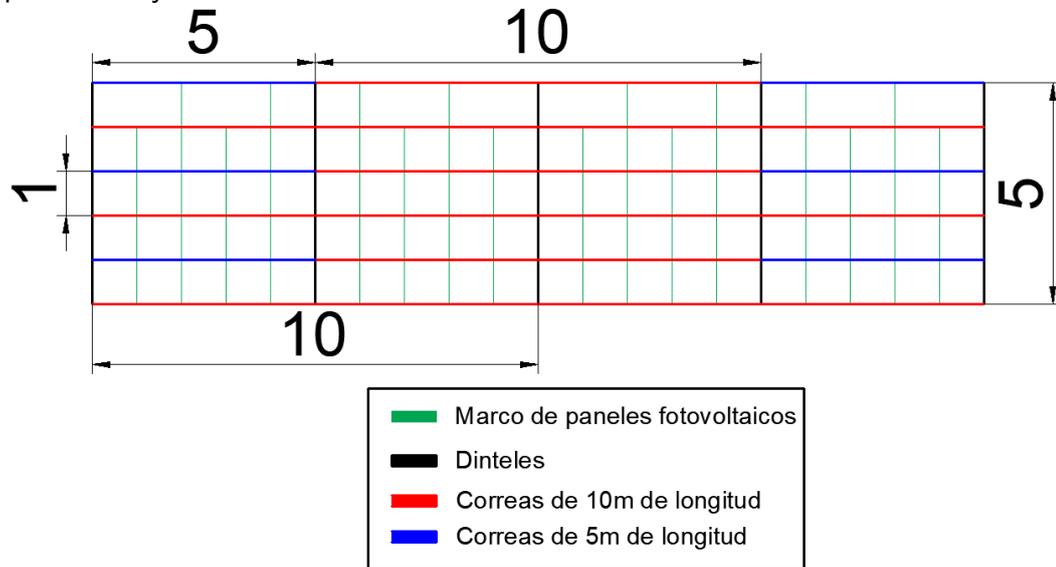


Figura 32: Colocación de las correas

Como podemos observar, vamos a tener colocadas de manera alterna correas de un vano y longitud 5 m y correas de dos vanos y 10 m de longitud.

A continuación, se muestran las áreas tributarias de los distintos tipos de correas y calculamos la carga que soportan cada una de ellas, teniendo en cuenta que desconocemos el peso propio de la correa.

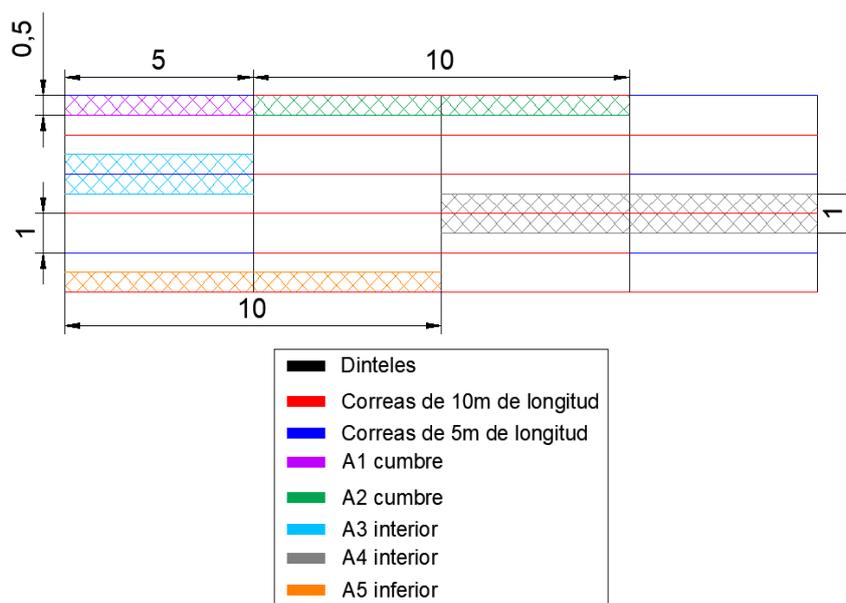


Figura 33: Áreas tributarias y tipos de correas

Como podemos ver en la *figura 33*, tenemos cinco tipos de correas con sus áreas tributarias correspondientes, dos en la cumbre, dos en el interior y una en la parte inferior de la cubierta.

4.1 Unión entre pescante y correa

Para poder anclar las correas sobre los pescantes, se ha decidido por una unión tipo ejión.

Esta consiste en la colocación de un perfil conformado en frío con forma de L (tipo LD) y de longitud igual al ancho del pescante soldándolo sobre este por el lado más corto del perfil.

A continuación, se colocarán las correas realizando cuatro taladros por cada tramo de perfil de forma L y colocando una unión desmontable tipo perno en estos huecos como se puede observar en la *figura 34*.

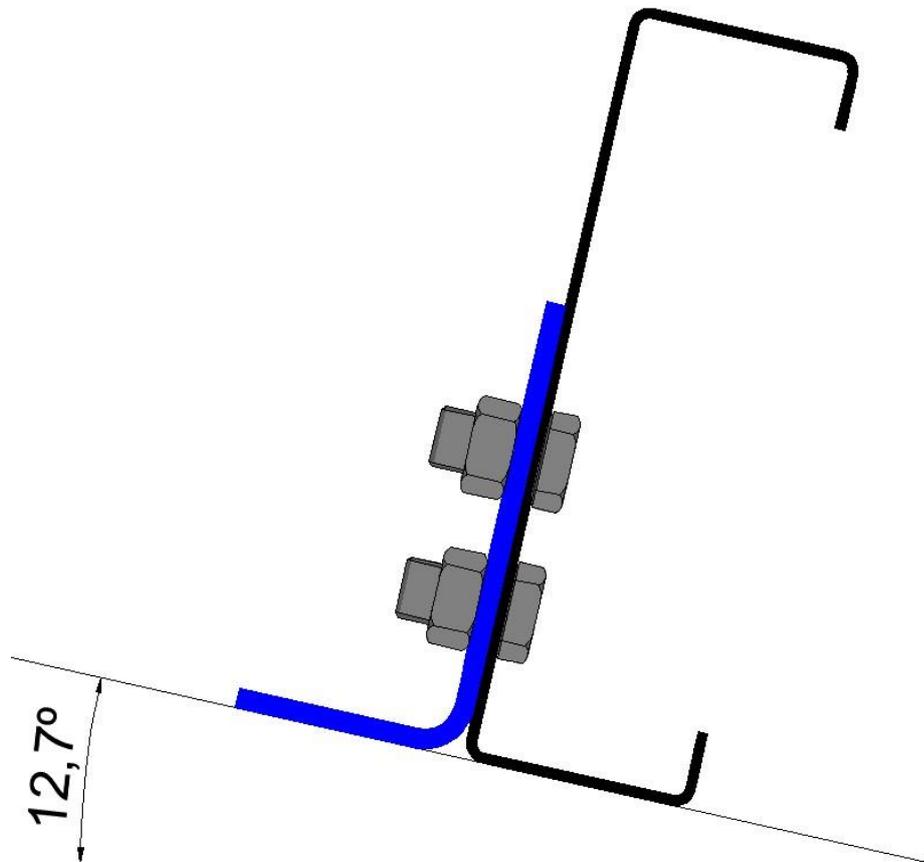


Figura 34: Unión entre correa y pescante mediante ejión

4.2 Evaluación de la correa más crítica

A la hora de evaluar las cargas que soporta cada correa, debemos tener en cuenta que la correa tiene la misma inclinación que nuestra cubierta por lo tanto vamos a tener cargas gravitatorias como el peso propio, la carga de nieve y la sobrecarga de uso; y cargas que dirección perpendicular a la cubierta como es el caso del viento.

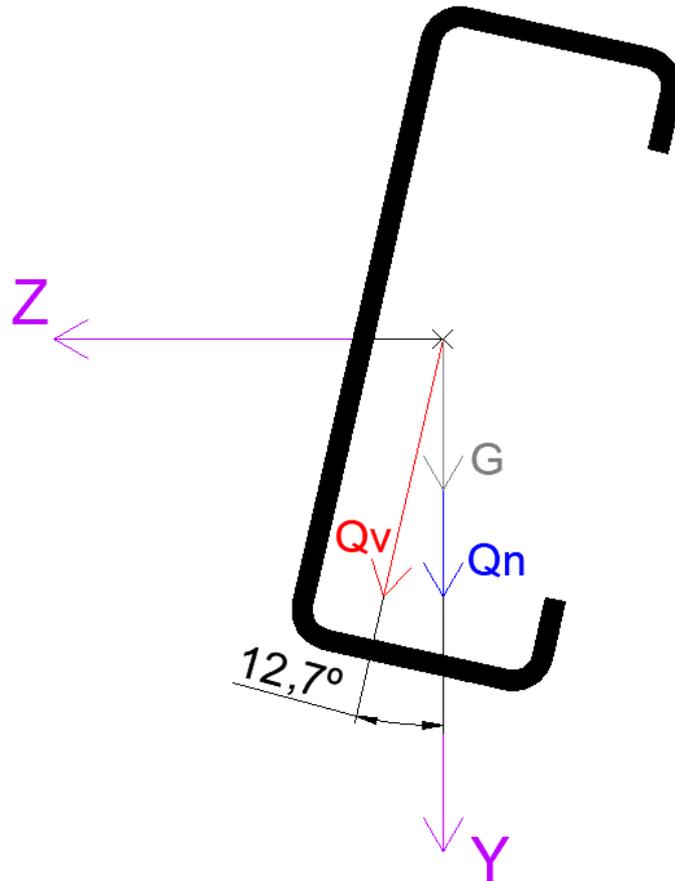


Figura 35: Cargas sobre el perfil de las correas-ejes globales

En la *figura 35* se muestran los diagramas de cortantes y flectores para los dos tipos de correa en la cubierta. Como podemos observar, para la misma carga 'q', el momento máximo se va a dar en $\frac{L}{2} = 2,5 m$ en la correa de un vano y en $L = 5m$ en la correa de dos vanos, el valor de este momento es $M_{max} = \frac{qL^2}{8}$.

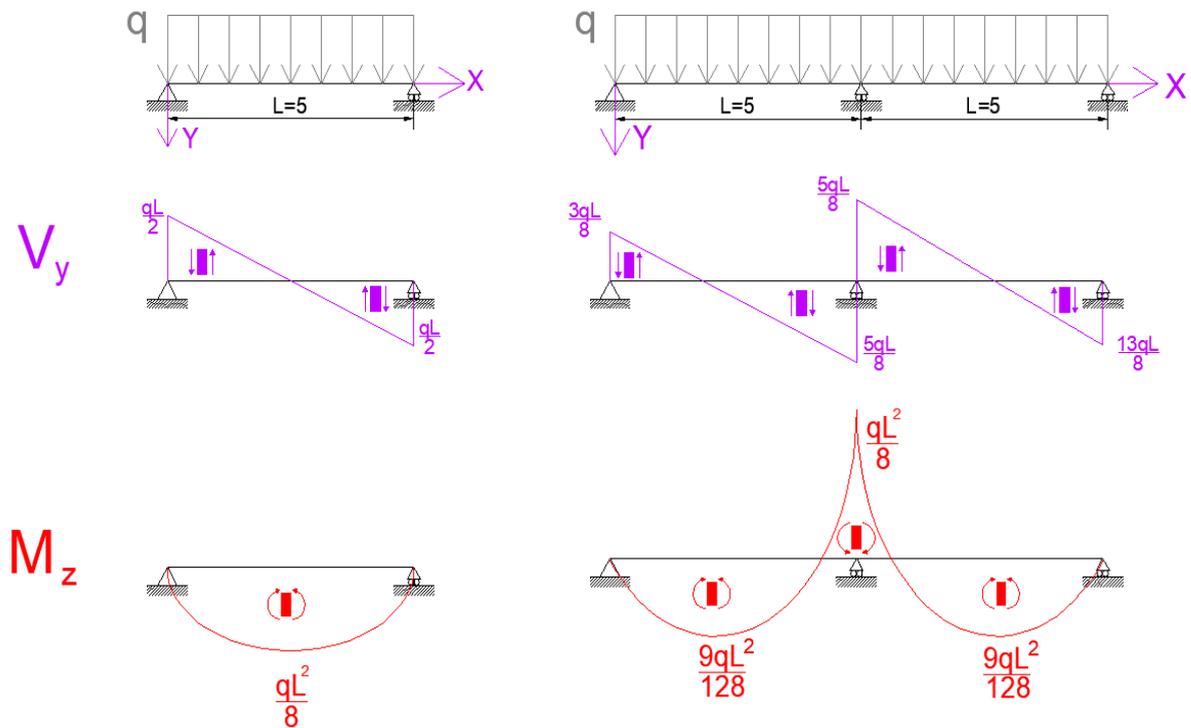


Figura 36: Diagramas de cortantes y flectores en correas de 5m y 10m

Por lo tanto, nos vamos a centrar en las correas de longitud 5 metros e identificaremos la más crítica para posteriormente dimensionarla ante la carga solicitada.

4.2.1 Correa de 5 m, área tributaria A1

- Carga de paneles fotovoltaicos:

$$Q_{foto-A1} = Q_{foto} \cdot 2,5 \text{ paneles} = 114,6 \cdot 2,5 = 286,5 \text{ Pa}$$

- Carga de nieve:

$$Q_{N-A1} = 398 \text{ Pa}$$

- Carga de viento más desfavorable → viento de norte a sur (V1) efecto de presión.

La correa soporta dos cargas distintas porque se encuentra en dos zonas de distinta influencia del viento:

- $Q_{V1-presión}^B$ en los primeros 2 m de la longitud de la correa.
- $Q_{V1-presión}^C$ en los 3 últimos m de la longitud de la correa.

Por tanto, para saber cuál es la carga que soporta realizamos la media ponderada de ambas cargas:

$$Q_{V-A1} = (2 \cdot 1420,4 + 3 \cdot 946,92) \cdot \frac{1}{5} \cdot \cos(12,7^\circ) = 1108,5 \text{ Pa}$$

$$\sum Q_{A1} = G_{foto-A1} + Q_{N-A1} + Q_{V-A1} = \mathbf{1793 \text{ Pa}}$$

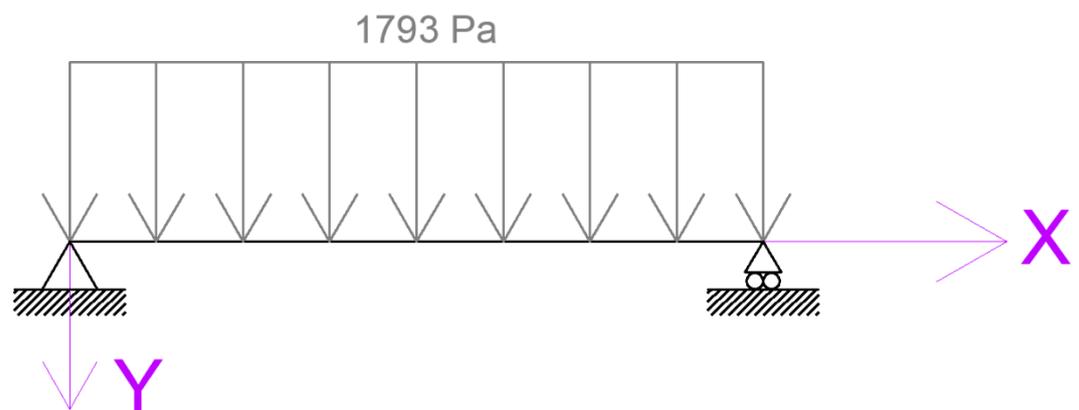


Figura 37: Carga correa tipo A1

4.2.2 Correa interior de 5 m, área tributaria A3

- Carga de paneles fotovoltaicos:

$$Q_{foto-A3} = q_{foto} \cdot 5 \text{ paneles} = 114,6 \cdot 5 = 573 \text{ Pa}$$

- Carga de nieve:

$$Q_{N-A3} = q_N \cdot 1 = 398 \text{ Pa}$$

- Carga de viento más desfavorable → viento de norte a sur (V1) efecto de presión.

La correa soporta dos cargas distintas porque se encuentra en dos zonas de distinta influencia del viento:

- $Q_{V1-presión}^B$ en los primeros 2 m de la longitud de la correa.
- $Q_{V1-presión}^A$ en los 3 últimos m de la longitud de la correa.

Por tanto, para saber cuál es la carga que soporta realizamos la media ponderada de ambas cargas:

$$Q_{V-A3} = (2 \cdot 1420,4 + 3 \cdot 725,2) \cdot \frac{1}{5} \cdot \cos(12,7^\circ) = 978,7 \text{ Pa}$$

$$\sum Q_{A3} = G_{foto-A3} + Q_{N-A3} + Q_{V-A3} = \mathbf{1949,7 \text{ Pa}}$$

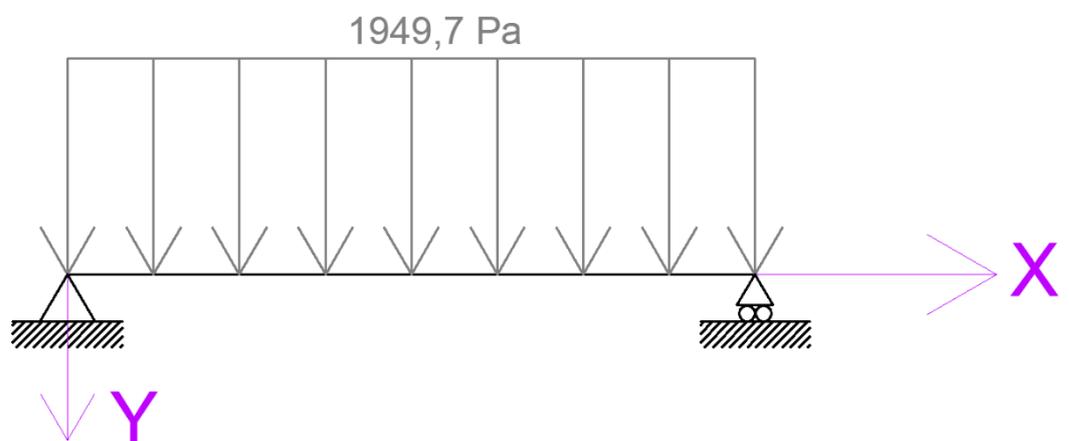


Figura 38: Carga correa tipo A3

Como podemos observar, las correas más críticas serán las correas de la parte interior, de 5 m de longitud y área tributaria A3. Disponemos de cuatro correas de este tipo en nuestra cubierta.

A continuación, deberemos evaluar la combinación de acciones más desfavorable sobre este tipo de correas para poder elegir un perfil adecuado para las mismas.

4.3 Cargas en la correa más crítica

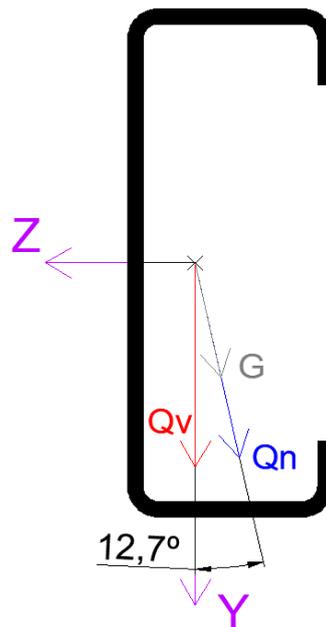


Figura 39: Cargas en la correa más crítica

- Cargas permanentes (Paneles fotovoltaicos):

$$G_{foto-Y} = 573 \cdot \cos(12,7^\circ) = \mathbf{559 Pa}$$

$$G_{foto-Z} = -573 \cdot \sin(12,7^\circ) = \mathbf{-126 Pa}$$

- Cargas variables:

- Carga de nieve:

$$Q_{N-Y} = 398 \cdot \cos(12,7^\circ) = \mathbf{388,3 Pa}$$

$$Q_{N-Z} = -398 \cdot \sin(12,7^\circ) = \mathbf{-87,5 Pa}$$

- Carga de viento:

$$Q_V = (2 \cdot 1420,4 + 3 \cdot 725,2) \cdot \frac{1}{5} = \mathbf{1003,3 Pa}$$

4.4 Combinaciones de acciones

El efecto de las acciones combinadas lo calcularemos aplicando la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Tanto los coeficientes parciales de seguridad (γ) como los coeficientes de simultaneidad (Ψ) los obtendremos gracias a las tablas 4.1 y 4.2 que nos proporciona el 'CTE'.

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

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

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

Tabla 7: Coeficientes parciales de seguridad γ

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría F)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría G)		⁽¹⁾	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría H)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

⁽¹⁾ En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Tabla 8: Coeficientes de simultaneidad Ψ

	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_2
SOBRECARGA DE USO (SOLO PARA MANTENIMIENTO)	0	0	0
NIEVE (<1000 M)	0,5	0,2	0
VIENTO	0,6	0,5	0

Tabla 9: Coeficientes de simultaneidad

	γ_G	γ_Q
DESFAVORABLE	1,35	1,5
FAVORABLE	0,8	0

Tabla 10: Coeficientes parciales de seguridad

- Hipótesis 1: carga de nieve como carga principal, carga de viento carga secundaria:

$$q_{y1} = 1,35 \cdot G_{foto-Y} + 1,5 \cdot Q_{N-Y} + 1,5 \cdot 0,6 \cdot Q_V = 2240,1 \text{ Pa}$$

$$q_{z1} = 1,35 \cdot G_{foto-Z} + 1,5 \cdot Q_{N-Z} = -301,4 \text{ kN/m}$$

- Hipótesis 2: carga de viento como carga principal, carga de nieve carga secundaria:

$$q_{y2} = 1,35 \cdot G_{foto-Y} + 1,5 \cdot Q_V + 1,5 \cdot 0,5 \cdot Q_{N-Y} = 2550,83 \text{ Pa}$$

$$q_{z2} = 1,35 \cdot G_{foto-Z} + 1,5 \cdot 0,5 \cdot Q_{N-Z} = -235,73 \text{ Pa}$$

A la vista de los resultados obtenidos para ambas hipótesis, observamos que $|q_{y2}| > |q_{y1}|$ y $|q_{z2}| < |q_{z1}|$. Optaremos por elegir la hipótesis cuyo valor de q_y sea el mayor, ya que es la carga más significativa sobre nuestra correa.

Por lo tanto, la hipótesis más desfavorable es la hipótesis 2 con la carga de viento como carga principal, y teniendo en cuenta que el ancho de área tributaria de nuestra correa es de 1 m, obtenemos las cargas longitudinales aplicadas sobre la misma tanto en dirección y como en z:

$$q_Y = 2550,83 \text{ N/m}$$

$$q_Z = -235,73 \text{ N/m}$$

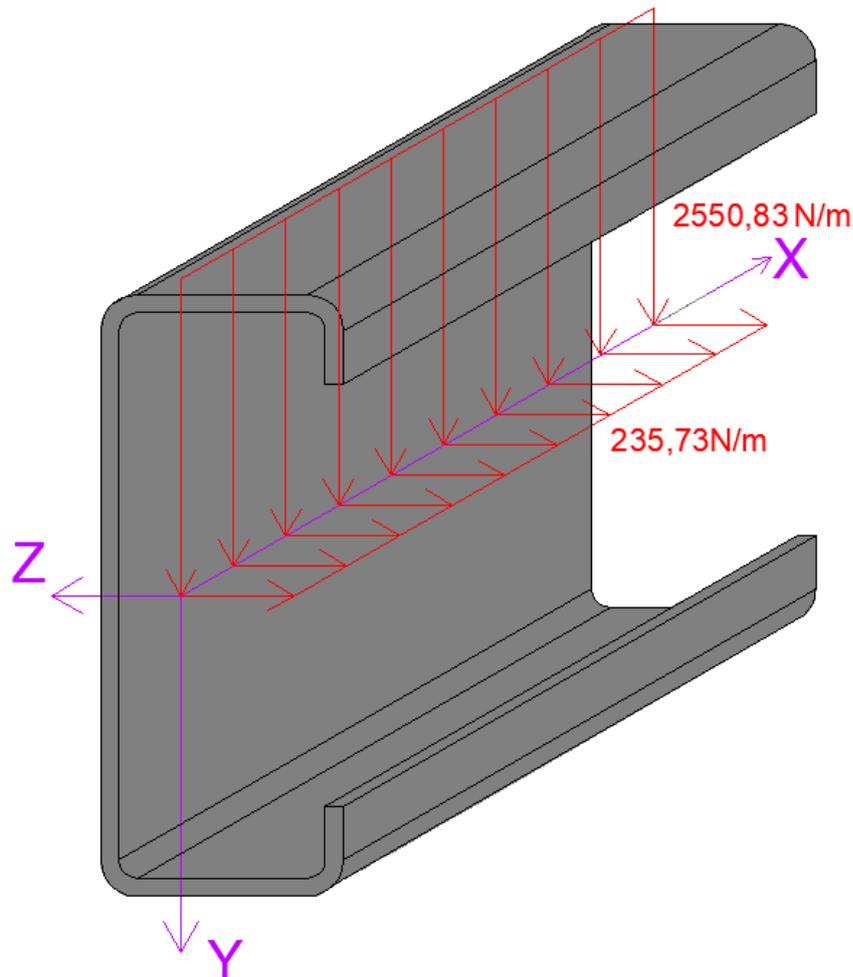


Figura 40: Carga más desfavorable sobre la correa más crítica

4.5 Cálculo de momentos flectores y esfuerzos cortantes

La correa se va a montar como una viga continua de un único vano, con una separación entre apoyos de $L = 5 \text{ m}$, siendo l la separación entre pórticos.

A la hora de evaluar los momentos flectores y esfuerzos cortantes, hay que tener en cuenta que la correa está soportando una carga q_Y en sentido positivo del eje Y y una carga q_Z en sentido negativo del eje Z .

Por lo tanto, la correa tendrá los siguientes esfuerzos cortantes y momentos flectores:

$$V_Y = \frac{q_Y \cdot L}{2} = 6377,1 \text{ N} \quad V_Z = \frac{q_Z \cdot L}{2} = -589,33 \text{ N}$$

$$M_Z = \frac{q_Y \cdot L^2}{8} = 7971,34 \text{ Nm} \quad M_Y = \frac{q_Z \cdot L^2}{8} = -736,66 \text{ Nm}$$

4.6 Cálculo de tensiones normal y tangenciales en el perfil

A la vista de los resultados de momentos flectores y cortantes, realizaremos los cálculos de tensiones con los valores del perfil tipo **C200,2,5** y posteriormente verificaremos si la elección de dicho perfil será suficiente para una calidad del acero S275.

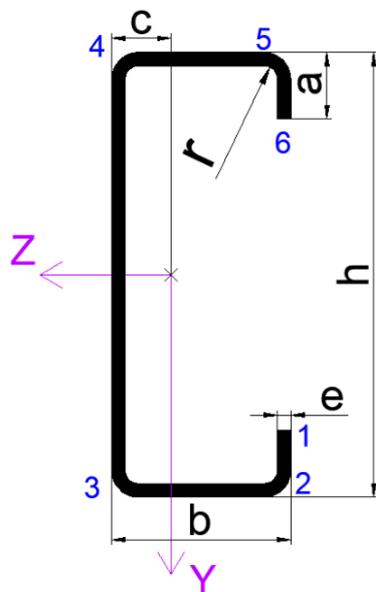


Figura 41: Valores perfil tipo C

$$h = 0,2 \text{ m}$$

$$b = 0,06 \text{ m}$$

$$a = 0,02 \text{ m}$$

$$e = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$c = 16,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$A = 8,59 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I_z = 500 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$I_y = 39,7 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$W_z = \frac{I_z}{h/2} = 50 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

4.6.1 Tensiones normales

$$\sigma_{xx} = \frac{N_x}{A} + \frac{M_z}{I_z} \cdot y + \frac{M_y}{I_y} \cdot z$$

Se calculan a continuación las tensiones normales en cada uno de los seis puntos del perfil marcados en la *figura 41*:

- Tensión normal en el punto 1:

$$y_1 = 80 \text{ mm}$$

$$z_1 = -43,4 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^1 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{500 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 80 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{39,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -43,4 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^1 = \mathbf{208,1 \text{ MPa}}$$

- Tensión normal en el punto 2:

$$y_2 = 100 \text{ mm}$$

$$z_2 = -43,4 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{500 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 100 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{39,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -43,4 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^2 = \mathbf{239,96 \text{ MPa}}$$

- Tensión normal en el punto 3:

$$y_3 = 100 \text{ mm}$$

$$z_3 = 16,6 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^3 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{500 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 100 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{39,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 16,6 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^3 = \mathbf{128,62 \text{ MPa}}$$

- Tensión normal en el punto 4:

$$y_4 = -100 \text{ mm}$$

$$z_4 = 16,6 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^4 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{500 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -100 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{39,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 16,6 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^4 = -190,23 \text{ MPa}$$

- Tensión normal en el punto 5:

$$y_5 = -100 \text{ mm}$$

$$z_5 = -43,4 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^5 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{500 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -100 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{39,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -43,4 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^5 = -78,9 \text{ MPa}$$

- Tensión normal en el punto 6:

$$y_6 = -80 \text{ mm}$$

$$z_6 = -43,4 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^6 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{500 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -80 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{39,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -43,4 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^6 = -47 \text{ MPa}$$

- Cota del punto con tensión normal nula ($\sigma_{xx} = 0 \text{ MPa}$):

$$z_7 = 16,6 \text{ mm}$$

$$y_7 = y$$

$$\sigma_{xx}^7 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{500 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot y + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{39,7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 16,6 \text{ mm} = 0$$

$$y = y_7 = 19,32 \text{ mm}$$

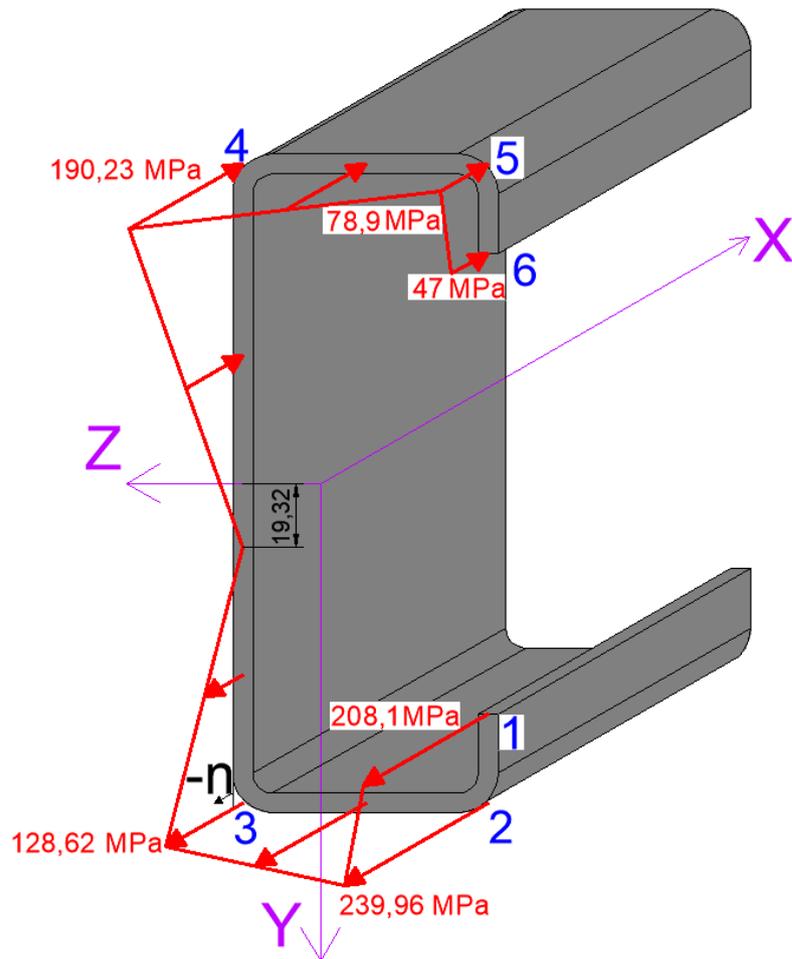


Figura 42: Tensiones normales en la correa más crítica

4.6.2 Tensiones tangenciales

Para el cálculo de las tensiones tangenciales en nuestro perfil, tomaremos la hipótesis de pared delgada teniendo en cuenta el efecto que el producen tanto el esfuerzo cortante V_y como el V_z .

➤ Tensiones tangenciales debidas a V_y :

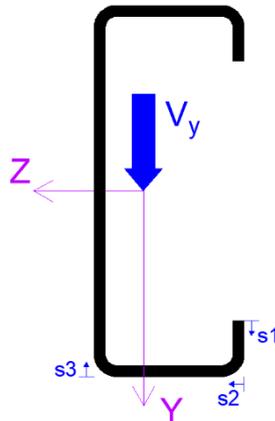


Figura 43: Direcciones principales para el cálculo de las tensiones tangenciales en la correa (V_y)

$$\sigma_{xs} = -\frac{q_v(\vec{s}_i)}{e(\vec{s}_i)} = -\frac{Q_z}{e(\vec{s}_i)} \cdot \frac{V_y}{I_z}$$

$$Q_z = A_i \cdot y_i(g_i)$$

Siendo:

- A_i el área del tramo i .
- $y_i(g_i)$ la cota en dirección y y del centro de gravedad del tramo i .

$$\begin{aligned} \sigma_{xs}(s_1 = a) &= -\frac{e \cdot a \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{a}{2}\right) \cdot V_y}{e \cdot I_z} = -\frac{2,5\text{mm} \cdot 20\text{mm} \cdot (100 - 10)\text{mm} \cdot 6377,1\text{N}}{2,5 \cdot 500 \cdot 10^4\text{mm}^4} = \\ &= -2,3 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{xs}(s_2 = 0) = \sigma_{xs}(s_1 = a) = -2,3 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xs}(s_2 = b) &= \sigma_{xs}(s_2 = 0) - \frac{e \cdot b \cdot \left(\frac{h}{2} - \frac{e}{2}\right) \cdot V_y}{e \cdot I_z} = \\ &= -2,3 \text{ MPa} - \frac{2,5\text{mm} \cdot 60\text{mm} \cdot \left(100 - \frac{2,5}{2}\right)\text{mm} \cdot 6377,1\text{N}}{2,5 \cdot 500 \cdot 10^4\text{mm}^4} = -9,86 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{xs}(s_3 = 0) = \sigma_{xs}(s_2 = h) = -9,86 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xs}\left(s_3 = \frac{h}{2}\right) &= \sigma_{xs}(s_3 = 0) - \frac{e \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{h}{4} \cdot V_y}{e \cdot I_z} = \\ &= -9,86 \text{ MPa} - \frac{2,5\text{mm} \cdot 100\text{mm} \cdot 50\text{mm} \cdot 6377,1\text{N}}{2,5 \cdot 500 \cdot 10^4\text{mm}^4} = -16,24 \text{ MPa} \end{aligned}$$

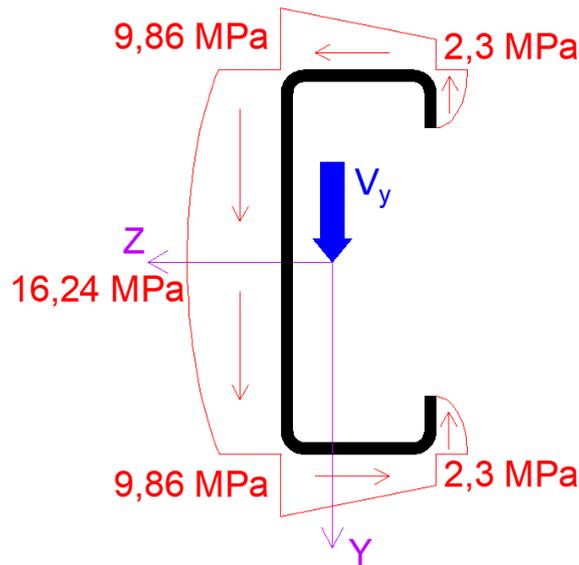


Figura 44: Tensiones tangenciales debidas a V_y , plano de normal negativa

➤ Tensiones tangenciales debidas a V_z :

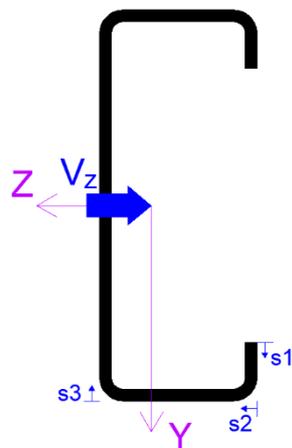


Figura 45: Direcciones principales para el cálculo de las tensiones tangenciales en la correa (V_z)

$$\sigma_{xs} = -\frac{q_v(\vec{s}_i)}{e(\vec{s}_i)} = -\frac{Q_y}{e(\vec{s}_i)} \cdot \frac{V_z}{I_y}$$

$$Q_y = A_i \cdot z_i(g_i)$$

Siendo:

- A_i el área del tramo i .
- $z_i(g_i)$ la cota en dirección z del centro de gravedad del tramo i .

$$\begin{aligned} \sigma_{xs}(s_1 = a) &= -\frac{e \cdot a \cdot \left(c - b + \frac{e}{2}\right) \cdot V_z}{e \cdot I_y} = -\frac{2,5 \cdot 20 \cdot \left(16,6 - 60 + \frac{2,5}{2}\right) \cdot -736,66}{2,5 \cdot 39,7 \cdot 10^4} = \\ &= -1,6 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\sigma_{xs}(s_2 = 0) = \sigma_{xs}(s_1 = a) = -1,6 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{xs}(s_2 = b) &= \sigma_{xs}(s_2 = 0) - \frac{e \cdot b \cdot \left(c - \frac{b}{2}\right) \cdot V_z}{e \cdot I_y} = \\ &= -1,6 - \frac{2,5 \cdot 60 \cdot \left(20 - \frac{60}{2}\right) \cdot -736,66}{2,5 \cdot 39,7 \cdot 10^4} = -3 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\sigma_{xs}(s_3 = 0) = \sigma_{xs}(s_2 = b) = -3 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{xs}\left(s_3 = \frac{h}{2}\right) &= \sigma_{xs}(s_3 = 0) - \frac{e \cdot \frac{h}{2} \cdot c \cdot V_z}{e \cdot I_y} = -3 - \frac{2,5 \cdot 100 \cdot 16,6 \cdot -736,66}{2,5 \cdot 39,7 \cdot 10^4} = \\ &= 0 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Como podemos observar en la *figura 46*, al ser un perfil simétrico respecto al eje z, las tensiones tangenciales también lo serán respecto de dicho eje cuando está sometido a un esfuerzo cortante en dicha dirección (V_z).

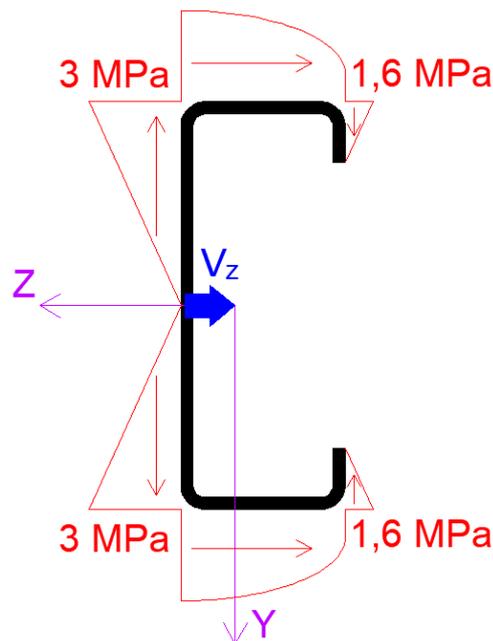


Figura 46: Tensiones tangenciales debidas a V_z , plano de normal negativa

4.7 Cálculo de tensión de Von Mises y selección del perfil de correas

A la vista de los resultados de tensiones para nuestro perfil de correa, el punto más crítico del perfil de nuestra correa será el punto 2 situado a cotas $y = 100 \text{ mm}$ y $z = -43,4 \text{ mm}$.

Los valores de tensiones en el punto 3 son los siguientes:

$$\sigma_{xx} = 239,96 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = -2,3 - 1,6 = -3,9 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xz} = -2,3 - 1,6 = -3,9 \text{ MPa}$$

A la vista de los valores, podemos observar que las tensiones tangenciales (τ_{xy} y τ_{xz}) representan aproximadamente un 1,63% del valor de la tensión normal (σ_{xx}) y por lo tanto se despreciarán a la hora de obtener el límite elástico.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{xx}}{2} = 119,98 \text{ MPa} \rightarrow \text{Según Von Mises: } \tau_{max} \leq \frac{\sigma_e}{2}$$

$$\sigma_e = 275 \text{ MPa} \geq 239,96 \text{ MPa}$$

A la vista de los resultados, podemos llegar a la conclusión de que el perfil seleccionado para las correas es el correcto por lo tanto, se van a utilizar unas correas de perfil conformado en frío tipo **C200,2,5**.

Teniendo en cuenta que en un principio se optó por utilizar un perfil tipo omega también conformado en frío (comprobación de no conformidad realizada en anejo 3) y que el perfil de mayor tamaño OF100.3.0 no soporta la carga solicitada para las correas; el cambio a un perfil C200,2,5 resulta una opción más satisfactoria por dos motivos:

- El perfil C200,2,5 soporta notablemente la carga en comparación con el perfil OF100.3.0.
- El perfil C200,2,5 tiene un peso de $6,74 \text{ kg/m}$ el cual es menor que el del perfil OF100.3.0 con un peso de $6,94 \text{ kg/m}$. Esto se traduce en un ahorro en el costo de la estructura, ya que en España el precio para el acero oscila entre $1,5 \text{ €/kg}$ y $2,5 \text{ €/kg}$ [5].

Utilizando el perfil C200,2,5 para nuestras correas y tomando como precio de estas la media entre los valores comentados, nos ahorramos $0,4 \text{ €/m} - \text{correa}$ en comparación con el perfil OF100.3.0. Y teniendo en cuenta que nuestra estructura cuenta con un total de 120 m de correas, el total ahorrado sería de 48 € .

Llegados a este punto, sabiendo el tamaño del perfil de las correas, hemos de elegir el tamaño del perfil conformado LD y de los tornillos y tuercas para la unión tipo perno en la unión ente correas y pescantes.

Se va a elegir un perfil cuya altura supere la mitad de la altura de la correa para asegurar una unión correcta. El perfil seleccionado es el **LF120.60.5**.

Basándonos en los espesores de ambos perfiles y en las normas ISO para la unión tipo perno, se optará por los siguientes elementos:

- Perno de cabeza hexagonal ISO 4014-M6-30-8.8. [6]
- Arandela ISO 7089-6,4-200 HV. [7]
- Arandela, GROWER, 6,1 DIN 127. [8]

Para saber el diámetro de los taladros a realizar sobre los perfiles de la unión tipo ejión, nos basamos en la norma para agujeros de paso para pernos y tornillos [9] obteniendo un diámetro de 7 mm como podemos ver en la *figura 47*.

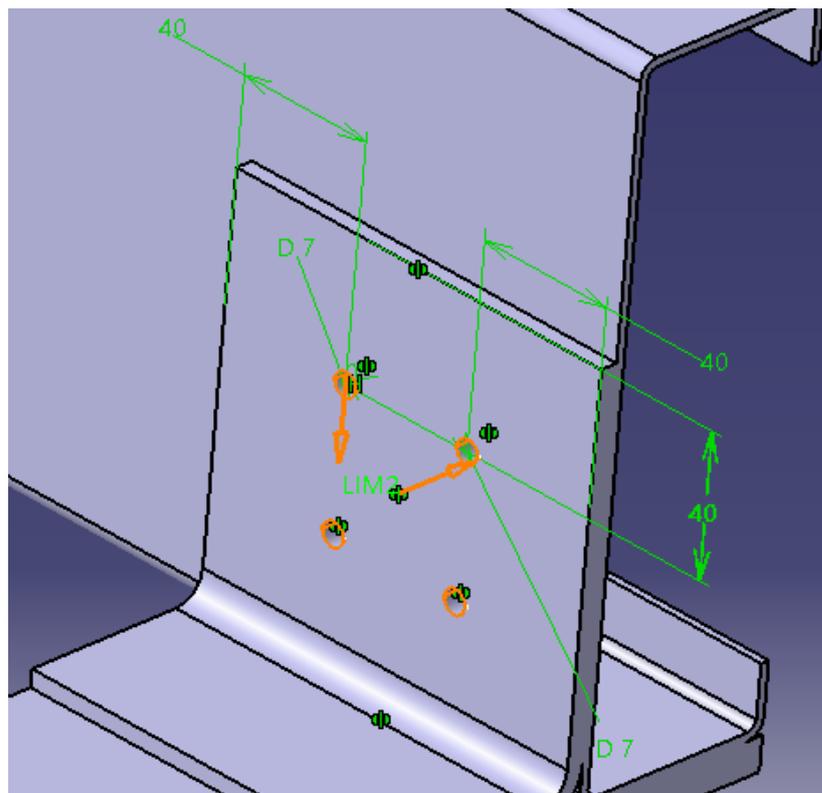


Figura 47: Agujeros de paso para pernos en unión tipo ejión

Como se puede observar en la *figura 47*, para crear la sección debemos rellenar los parámetros para definir puntos y tramos en respectivas tablas. Hay que tener en cuenta que los ejes de coordenadas para definir la sección se van a situar en la parte inferior izquierda en lugar de en el centro de gravedad, y los datos se van a meter en milímetros.

Para crear puntos se nombran y se colocan las coordenadas correspondientes en *y* y en *z*, teniendo en cuenta que ahora el eje vertical va a ser el eje *z* y el vertical el eje *y*.

La definición de los tramos se realiza especificando el punto de inicio, el punto de fin, el espesor del tramo y el radio de curvatura en el caso de ser un tramo curvo.

Una vez colocados todos los datos de la sección se clican en 'Dibuja' y 'Calcula' debajo de la tabla de tramos obteniendo lo siguiente:

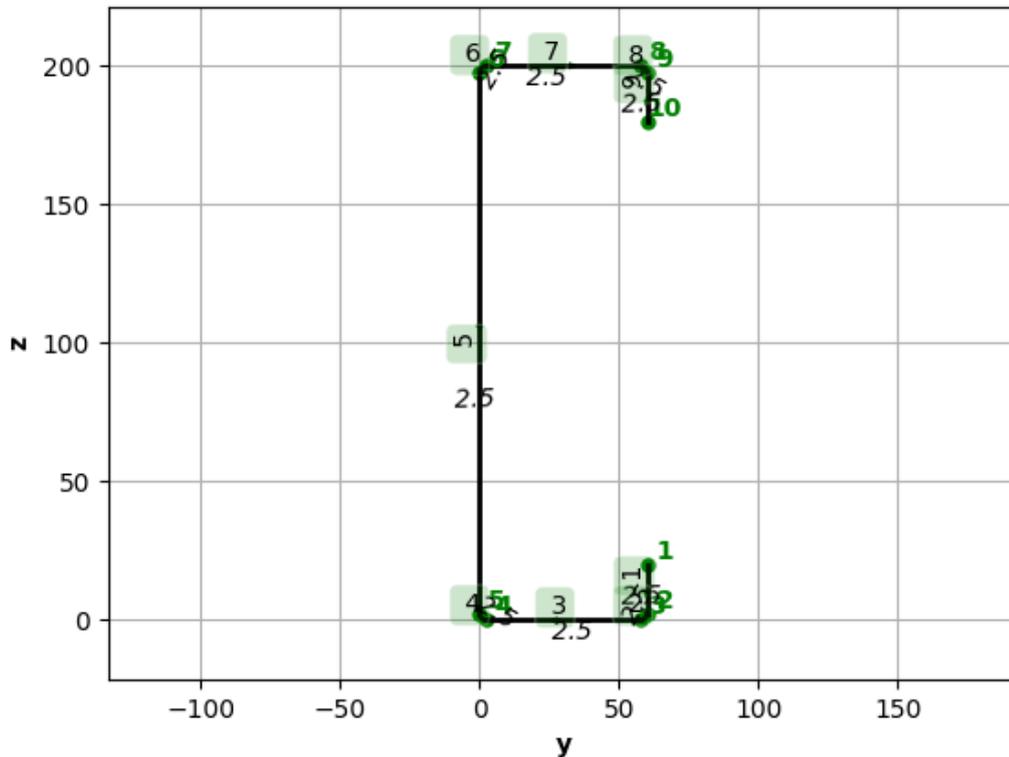


Figura 49: Sección de la correa

En la *figura 48* podemos ver la representación del perfil de la correa con el nombre de cada uno de los puntos para definirla y el grosor en cada uno de los tramos (2,5 mm para todos los tramos).

Ficha

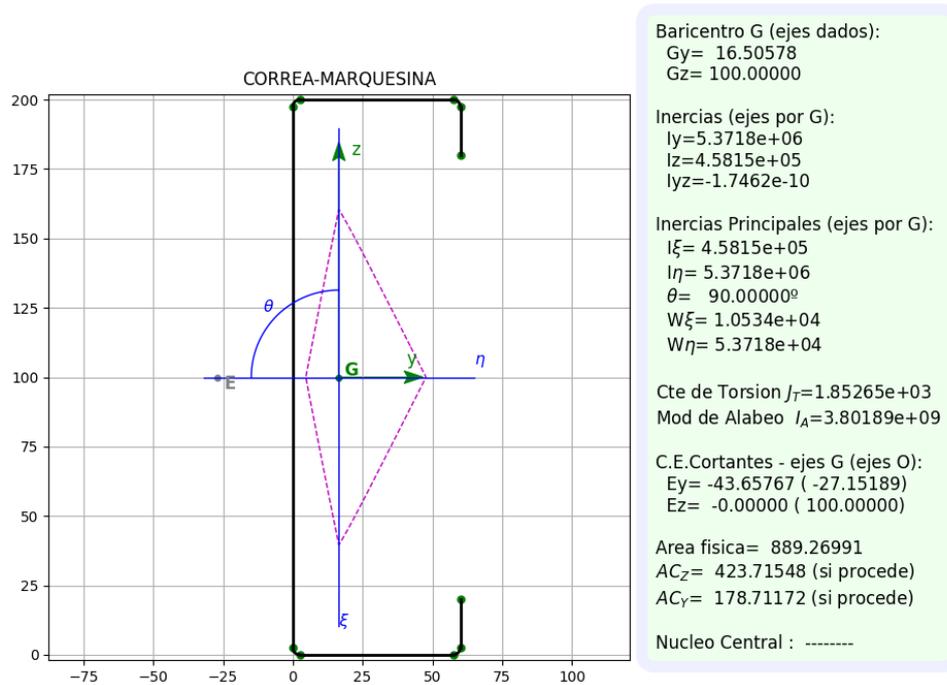


Figura 50: Datos sección correas

Como se puede observar en la figura 49, los datos obtenidos de la sección se asemejan a los valores tomados inicialmente para el cálculo (C200,2,5).

$$I_{y-TSB} = 537,18 \cdot 10^4 mm^4 \quad \rightarrow \quad I_{z-C200,2,5} = 500 \cdot 10^4 mm^4$$

$$I_{z-TSB} = 45,815 \cdot 10^4 mm^4 \quad \rightarrow \quad I_{y-C200,2,5} = 39,7 \cdot 10^4 mm^4$$

5.2 Cálculo de tensiones

Como hemos comentado antes, al meter los valores de la sección en milímetros, para que los resultados obtenidos salgan en $MPa [=] N/mm^2$ debemos meter en el programa los valores de esfuerzos cortantes en N y los valores de momentos flectores en Nmm .

La sección de nuestra correa soporta los siguientes esfuerzos:

- Cortantes:

$$V_{y-C200,2,5} = 6377,1 N \quad \rightarrow \quad V_{z-TSB} = -6377,1 N$$

$$V_{z-C200,2,5} = -589,33 N \quad \rightarrow \quad V_{y-TSB} = 589,33 N$$

- Flectores:

$$M_{y-C200,2,5} = -736,66 Nm \quad \rightarrow \quad M_{z-TSB} = 736660 Nmm$$

$$M_{z-C200,2,5} = 7971,34 Nm \quad \rightarrow \quad M_{y-TSB} = -7971340 Nmm$$

5.2.1 Tensiones normales

Para la obtención de los valores de tensiones normales que soporta la sección introduciremos los valores de los momentos flectores M_{y-TSB} y M_{z-TSB} y posteriormente clicaremos en la pestaña 'Go!' situada dentro del recuadro de flector como se muestra en la *figura 50*.

Con estos valores de flector obtendremos los siguientes resultados en MPa:

Flector

Nx

My

Mz

Cortante

Vy

Vz

Torsor

Mx

Figura 51: Introducción datos de momento flector

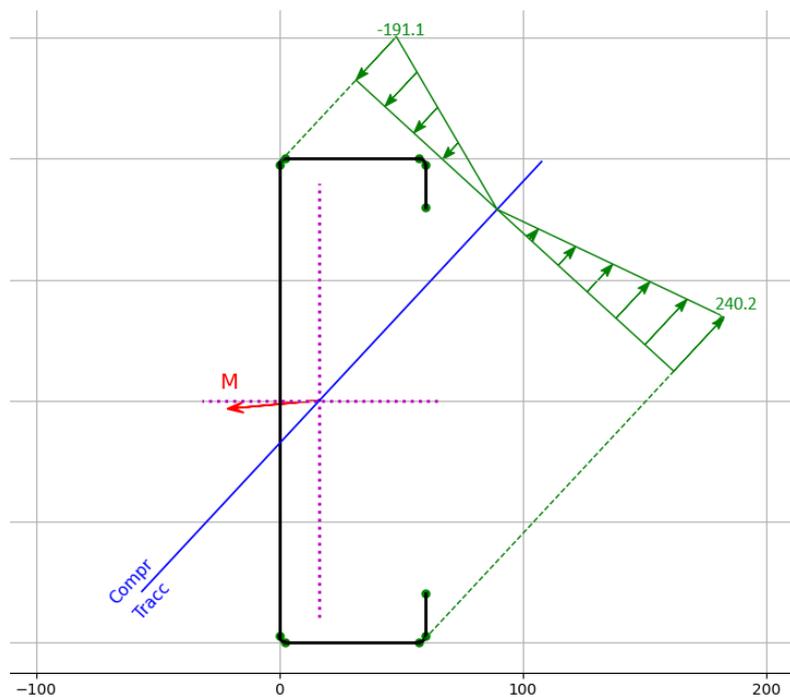


Figura 52: Tensiones normales correa

Como podemos apreciar en la *figura 51*, los resultados obtenidos para las tensiones normales son muy similares a los calculados en el [capítulo 4.6.1](#); por tanto podemos afirmar con seguridad que los cálculos realizados son correctos.

Adicionalmente ThinSecBeam nos proporciona una vista en tres dimensiones de la distribución de tensiones normales, identificando la línea neutra, las zonas de tracción y compresión y el punto de la sección cuya tensión normal es nula.

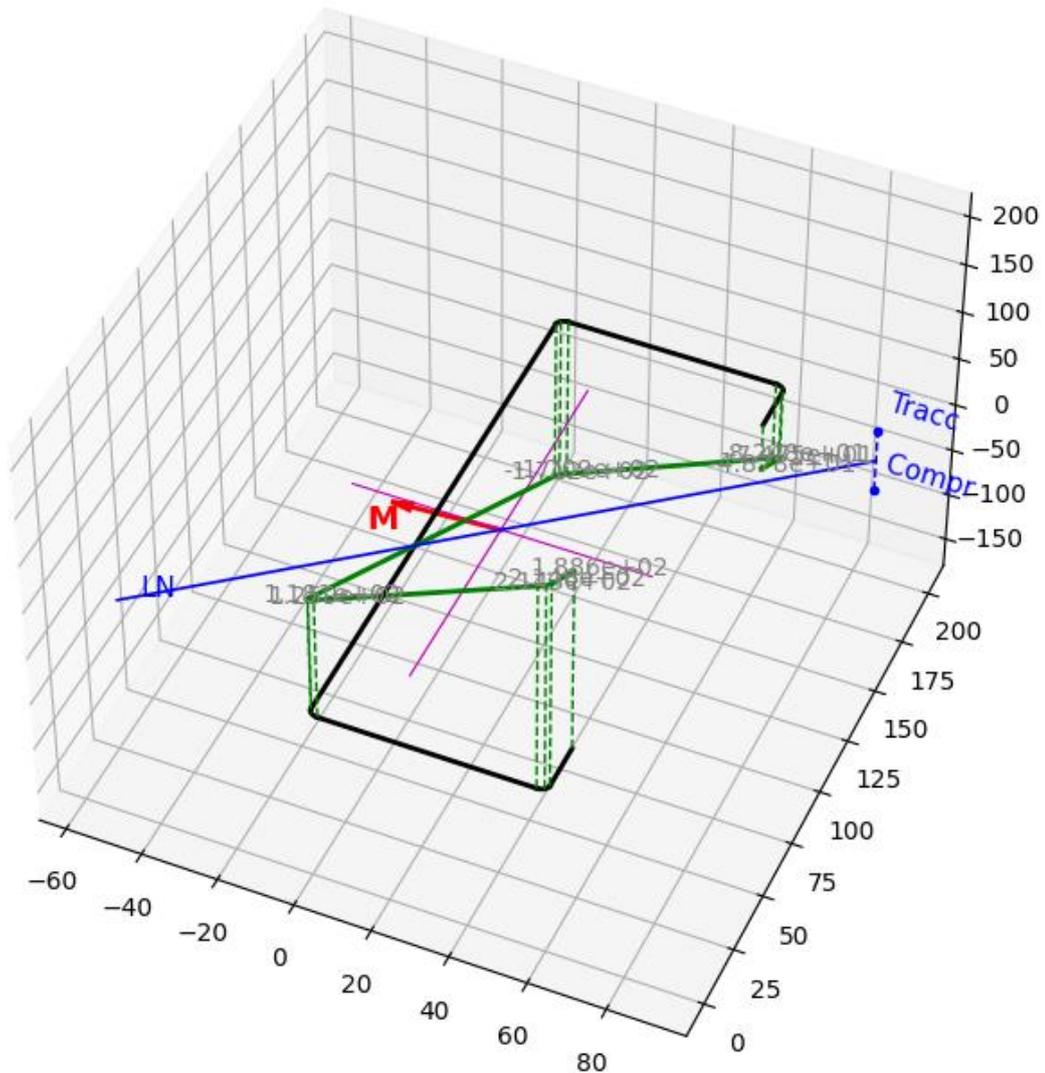


Figura 53: Tensiones normales en 3D

5.2.2 Tensiones tangenciales debidas al cortante V_y

En este caso, verificamos mediante la introducción del valor de V_{z-TSB} si las tensiones tangenciales debidas a este son similares a las obtenidas en primer apartado del [capítulo 4.6.2](#).

Cave recordar que el eje y de nuestra correa corresponde con e eje z en ThinSecBeam cambiado de sentido, por tanto, al evaluar las tensiones tangenciales debidas a V_y , en ThinSecBeam debemos introducir el valor del cortante en dirección z .

La introducción del valor del cortante se realiza de la siguiente manera; en el recuadro para los esfuerzos cortantes introduciremos únicamente el valor de V_{z-TSB} y posteriormente clicaremos en la pestaña ‘Go!’ del mismo recuadro como se muestra en la *figura 53*.

Los resultados expresados en MPa serán los siguientes:

Flector

Nx

My

Mz

Cortante

Vy

Vz

Torsor

Mx

Figura 54: Introducción datos de esfuerzo cortante V_y (V_{z-TSB})

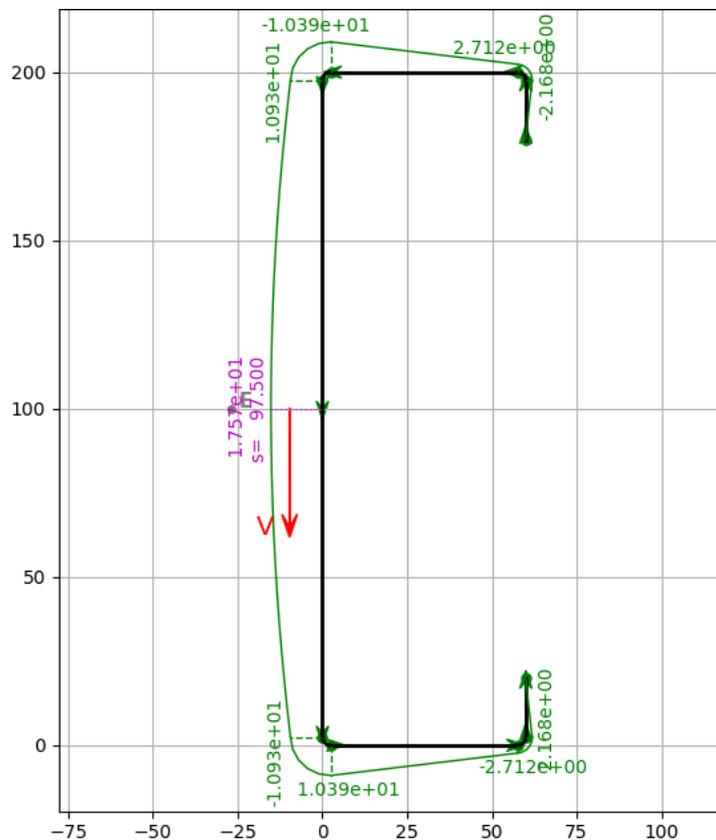


Figura 55: Tensiones tangenciales debidas a V_y (V_{z-TSB})

Como se observa en la *figura 54*, las tensiones tangenciales debidas al cortante en dirección vertical son muy similares a las calculadas, por lo tanto los cálculos realizados son correctos.

Además ThinSecBeam nos proporciona una visión en tres dimensiones del alabeo de la sección por efecto del cortante en dirección vertical, se aprecia de una manera muy visual e intuitiva el alabeo de la misma.

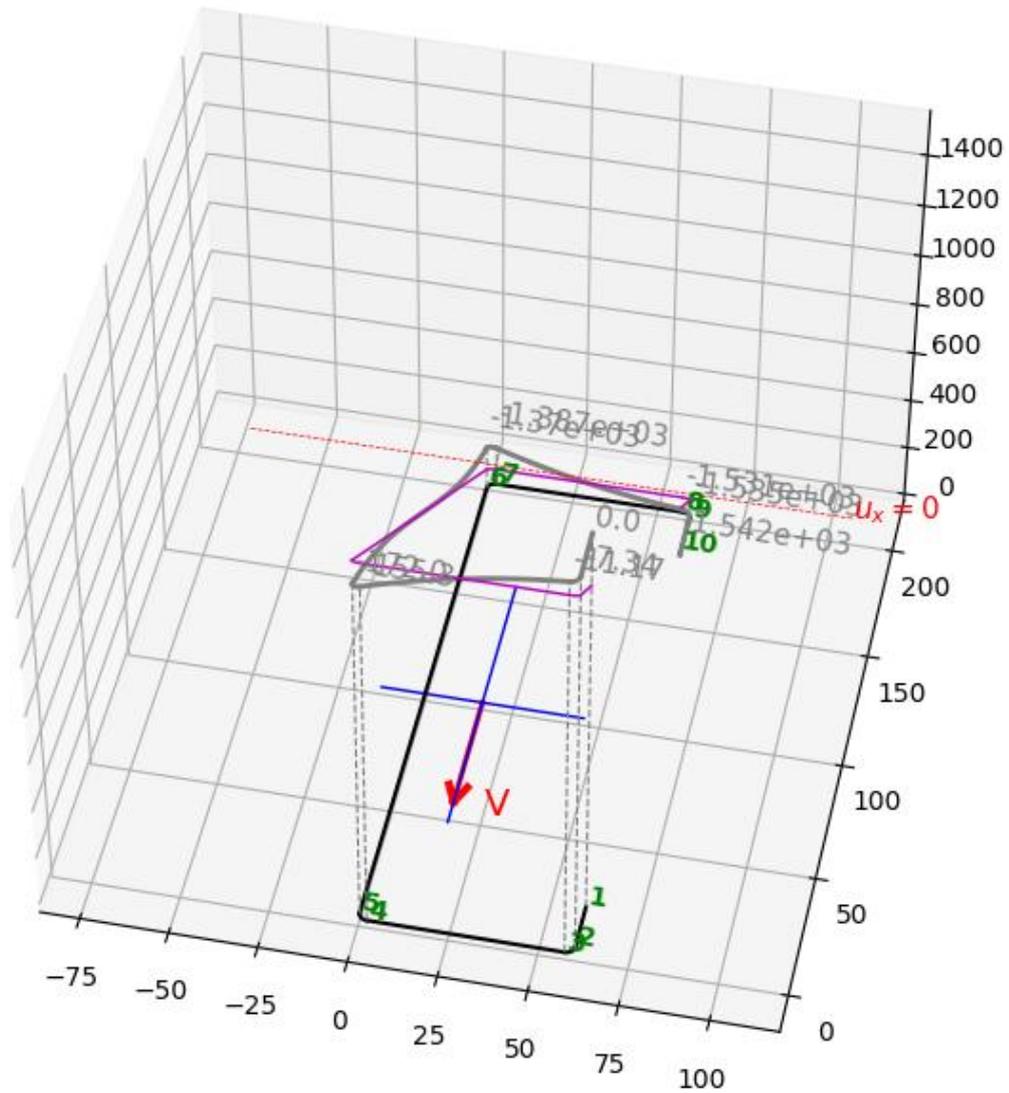


Figura 56: Alabeo de la sección debido a V_y (V_{z-TSB})

5.2.3 Tensiones tangenciales debidas al cortante V_z

Con el mismo modo de proceder que en el capítulo anterior, evaluamos las tensiones tangenciales debidas al esfuerzo cortante V_z introduciendo el valor de V_{y-TSB} en su lugar correspondiente y clicando una vez más en la pestaña 'Go!' como se muestra en la *figura 56*.

Los resultados obtenidos expresados en MPa son los siguientes:

Flector

Nx

My

Mz

Cortante

Vy

Vz

Torsor

Mx

Figura 57: Introducción datos de esfuerzo cortante Vz (Vy-TSB)

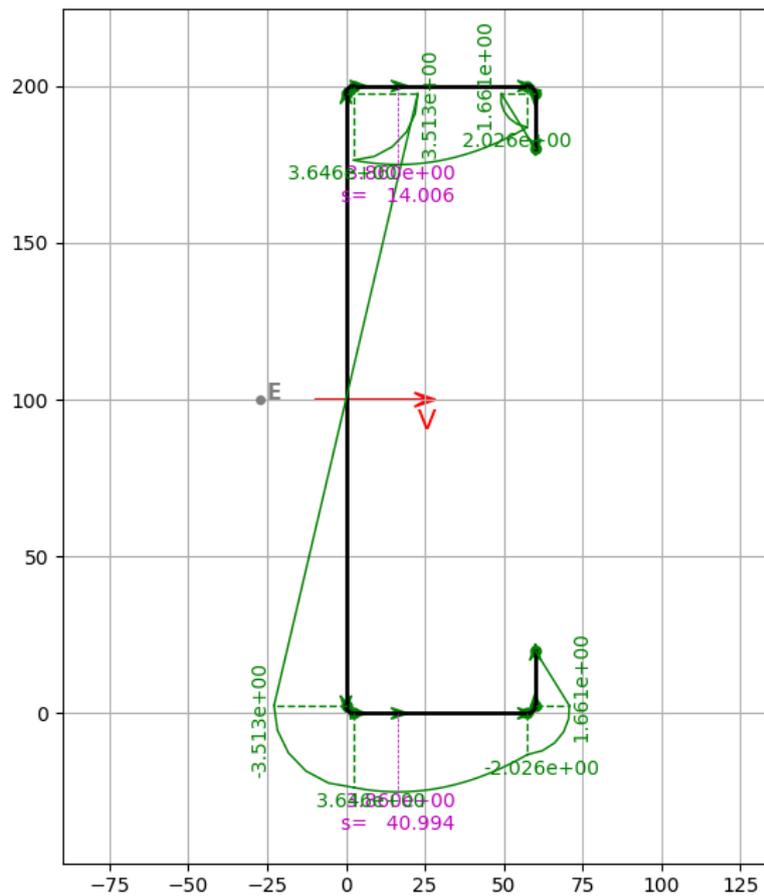


Figura 58: Tensiones tangenciales debidas a Vz (Vy-TSB)

Como podemos ver en la *figura 57*, las tensiones tangenciales debidas al cortante en dirección horizontal se asemejan mucho a las calculadas, por tanto podemos afirmar que los cálculos realizados son correctos.

CAPÍTULO 6. DIMENSIONADO DE PÓRTICOS

Teniendo en cuenta la geometría de los pórticos de la estructura, se pretende dimensionar los perfiles tanto de pilares como de pescantes y cartelas de modo que sean del menor tañano posible y puedan soportar la mayor carga solicitada sobre los mismos.

Para ello debemos tener en cuenta las siguientes premisas:

- Se van a fijar los tamaños de pescantes y cartelas: **IPE240**.
- Los pórticos más críticos van a ser los pórticos interiores por tener mayor área tributaria que los pórticos de las fachadas: **$A_2 = 25 \text{ m}^2$** .
- Se va a tener en cuenta el peso propio de los paneles fotovoltaicos y de la carga de nieve únicamente en dirección perpendicular a la cubierta (despreciando el efecto axil que ejercen sobre esta):

$$Q_{y-foto} = 114,6 \cdot \cos(12,7) = 111,8 \text{ Pa}$$

$$Q_{y-N} = 398 \cdot \cos(12,7) = 388,3 \text{ Pa}$$

- Se tomará como carga más crítica la carga de viento más desfavorable, esta es la de norte a sur (V1) efecto de presión, como en el dimensionado de correas.

$$Q_V = 1003,3 \text{ Pa}$$

- La calidad del acero será en todo momento S275 $\rightarrow \sigma_e = 275 \text{ MPa}$, lo que significa que ningún punto del pórtico debe sufrir una tensión igual o superior a 275 MPa.

6.1 Dimensionado de pescantes y cartelas

En primer lugar necesitamos los valores del perfil seleccionado:

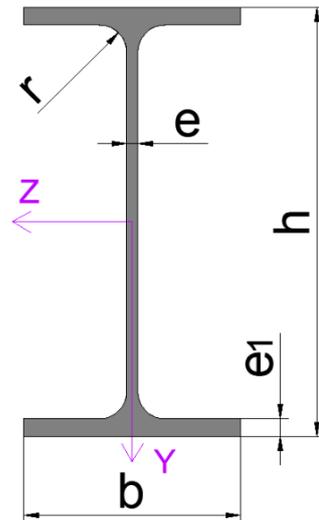


Figura 60: Perfil IPE240

$$h = 0,24 \text{ m}$$

$$b = 0,12 \text{ m}$$

$$e = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$e_1 = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$r = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$A = 39,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I_z = 38,9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W_z = \frac{I_z}{h/2} = 324 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

A continuación, calculamos los diagramas de esfuerzos teniendo en cuenta lo comentado en el [capítulo 2.1](#). [2]

Para obtener los diagramas de esfuerzos necesitamos saber el valor de la resultante combinando las acciones con sus coeficientes de mayoración correspondientes para la hipótesis de carga de viento como carga principal y carga de nieve como carga secundaria.

Los coeficientes de mayoración para cada una de las acciones son los siguientes:

$$\gamma_{Q_V} = 1,5$$

$$\gamma_{G\text{-paneles}} = 1,35$$

$$\gamma_{Q_N} = 1,5$$

$$\Psi_N = 0,5$$

$$\begin{aligned} R &= (Q_V \cdot \gamma_{Q_V} + Q_{y\text{-foto}} \cdot \gamma_{G\text{-paneles}} + Q_{y\text{-N}} \cdot \gamma_{Q_N} \cdot \Psi_N) \cdot A_2 = \\ &= (1003,3 \text{ Pa} \cdot 1,5 + 111,8 \text{ Pa} \cdot 1,35 + 388,3 \text{ Pa} \cdot 1,5 \cdot 0,5) \cdot 25 \text{ m}^2 = \\ &= 48677,63 \text{ N} \end{aligned}$$

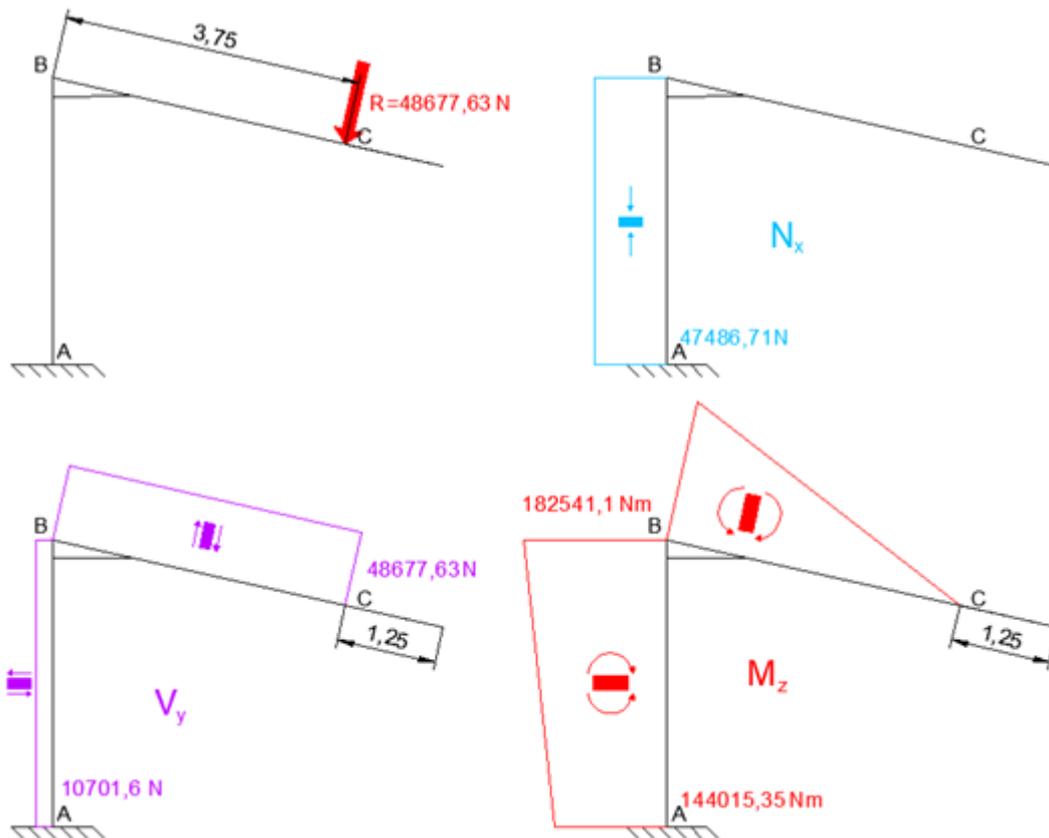


Figura 61: Diagramas de esfuerzos ante la carga más crítica

Como se muestra en la *figura 61*, el máximo momento flector está aplicado en la unión entre pilar y pescante (punto B), vamos a obtener la tensión normal soportada por el perfil del pescante (IPE240) en dicho punto y evaluaremos si es necesario la colocación de una cartela en la unión.

$$\sigma_{max} = \sigma_{xx}^B = \frac{M_z^B}{W_z} = \frac{182.541,1 \text{ Nm}}{324 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 563,4 \text{ MPa}$$

A la vista del resultado llegamos a la conclusión de que es necesaria la implantación de una cartela en la unión entre pilar y pescante, como se había predicho en el predimensionado de la estructura.

Necesitamos saber la longitud de la cartela a lo largo del pescante de tal modo que justo en el final de la cartela la tensión normal soportada tenga un valor máximo de 275 MPa.

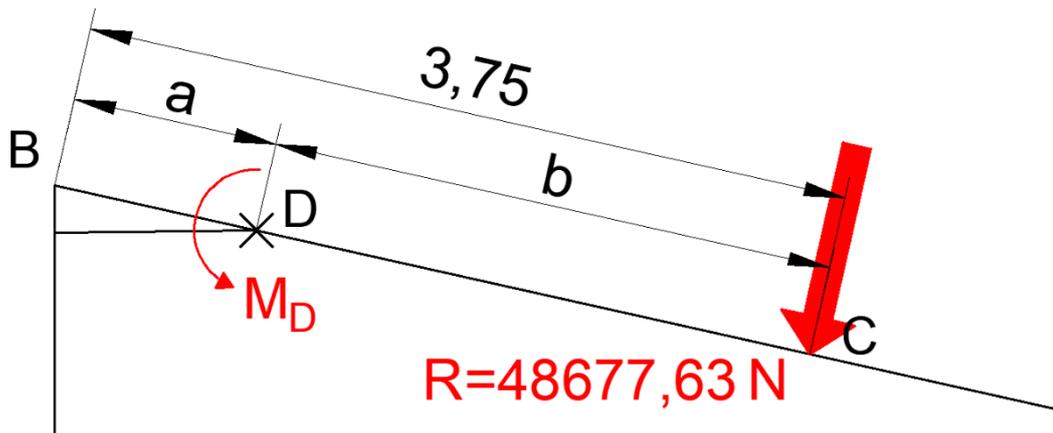


Figura 62: Cálculo de la longitud de cartela

Como se muestra en la *figura 62*, el punto D es el punto donde el pescante deja de estar acartelado. Dicho punto será el punto de máxima tensión admisible por el perfil del pescante.

Calculamos la longitud acartelada 'a' de la siguiente manera:

$$\sigma_{xx}^{max} = 275 \text{ MPa} = \frac{M_D}{W_z}$$

$$M_D = 275 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \cdot 324 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 89100 \text{ Nm} = R \cdot b$$

$$b = \frac{89100 \text{ Nm}}{48677,63 \text{ N}} = 1,83 \text{ m} \rightarrow a = 3,75 \text{ m} - b = 1,92 \text{ m}$$

La longitud acartelada resultante es de 1,92 m, pero para estar en el lado de la seguridad se va a colocar una cartela de 2 m de longitud.

De este modo el punto de soportará la siguiente tensión:

$$\sigma_D = \frac{M_D}{W_z} = \frac{R \cdot (3,75 - 2)}{W_z} = \frac{48677,63 \text{ N} \cdot 1,75 \text{ m}}{324 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = 262,92 \text{ MPa} < 275 \text{ MPa}$$

Mediante la colocación de dicha cartela, nos aseguramos que a lo largo de toda la longitud de pescante sin acartelar soporta una tensión menor a la máxima admisible.

La fabricación de la cartela se realizará de la siguiente manera:

Se corta en diagonal un tramo con el perfil específico de tal forma que la longitud de dicha diagonal coincida con la longitud acartelada, como podemos apreciar en la *figura 63*.

$$L_{cart}^2 = (h - e_1)^2 + x^2 \rightarrow x = \sqrt{2^2 - (0,24 - 0,0098)^2} = 1,99m$$

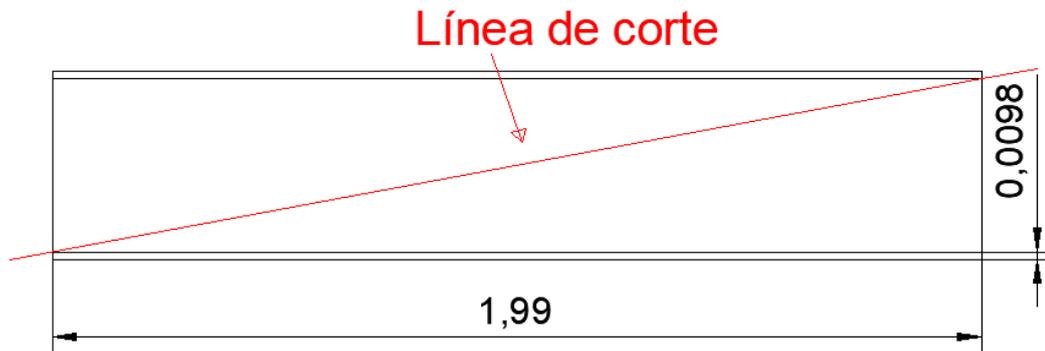


Figura 63: Corte de perfil IPE240 para cartela

Necesitamos un perfil de 1,99 metros de longitud para nuestra cartela.

Por último, para tener la cartela con la forma idónea para implementarla en la unión entre pilar y pescante, debemos sanear el perfil con un ángulo de inclinación igual al del pescante.

De este modo la cartela encajará perfectamente con pilar y con pescante.

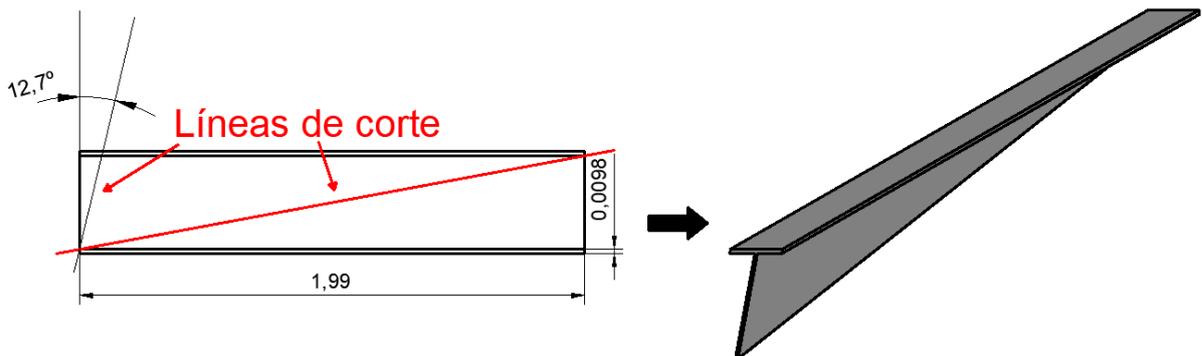


Figura 64: Saneamiento de cartela

Para comprobar que el pescante acartelado soporta la carga solicitada calcularemos los valores del perfil compuesto por pescante IPE240 y cartela IPE240 en la unión entre pilar y pescante.

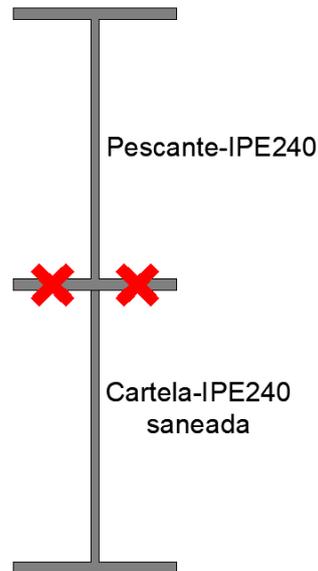


Figura 65: Simplificación del perfil compuesto en la unión

A efectos de cálculo, vamos a tener en cuenta que se va a realizar la siguiente simplificación en el perfil compuesto: como podemos observar en la *figura 65* se eliminan las alas intermedias del perfil compuesto para simplificar los cálculos.

De este modo, si con esta simplificación el perfil compuesto soporta la carga solicitada, sin la simplificación también lo hará al tener mayores valores de inercias principalmente.

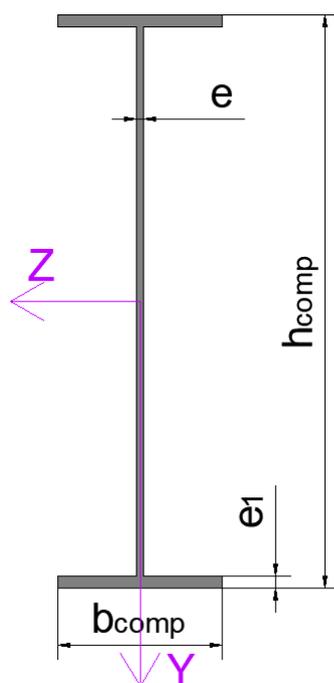


Figura 66: Perfil compuesto y simplificado en la unión

Los datos del perfil compuesto y simplificado son los siguientes:

$$h_{comp} = 0,4702 \text{ m}$$

$$b_{comp} = 0,12 \text{ m}$$

$$e_{comp} = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$e_{1-comp} = 9,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$A_{comp} = 5,146 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$I_{z-comp} = 171,93 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$W_{z-comp} = \frac{I_{z-comp}}{h_{comp}/2} = 731,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

A continuación comprobamos si la tensión que soporta el perfil compuesto esta por debajo del límite impuesto por la calidad del acero.

$$\sigma_{b-comp} = \frac{M_B}{W_z} = \frac{182541,1 \text{ Nm}}{731,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = \mathbf{249,6 \text{ MPa}} \ll 275 \text{ MPa}$$

Como se esperaba, acartelar el pescante nos permite soportar unas cargas que, en el caso de no colocar una cartela en la unión, no sería posible por que la tensión superaría el límite elástico del perfil.

El perfil compuesto simplificado en la unión entre pescante y pilar soporta de manera notable la carga solicitada en todo momento, por lo tanto, el perfil compuesto sin simplificar soportará esa misma carga de mejor manera.

6.2 Dimensionado de pilares

En el predimensionado de la estructura, se optó por un perfil IPE360 para estar en el lado de la seguridad y asegurar que los pilares resisten.

En este momento vamos a verificar si el predimensionamiento es correcto o si está sobredimensionado en exceso y podemos escoger un perfil de menor tamaño para poder ahorrar dinero en materiales asegurando la integridad de la estructura en la situación más desfavorable.

Sabiendo que el momento flector máximo soportado por el pilar está ubicado en el punto B de la unión entre pilar y pescante, y que el límite elástico para el material tiene un valor de 275 MPa, estimamos el tamaño para los pilares.

$$\sigma_e = 275 \text{ MPa} \geq \sigma_{xx}^B = \frac{M_B}{W_{z-min-pilar}} = \frac{182541,1 \text{ Nm}}{W_{z-min-pilar}}$$

$$W_{z-min-pilar} \geq \frac{182541,1 \text{ Nm}}{275 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2} = \mathbf{663,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3}$$

El perfil que se va a elegir finalmente para el pilar es el **IPE330**, con un modulo resistente $W_z = 713 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 > W_{z-min-pilar}$. Este perfil es el perfil de menor tamaño capaz de soportar las cargas en la situación más desfavorable.

Comprobamos que la tensión normal máxima en el pilar no supera el límite elástico del material:

$$\sigma_{xx}^B = \frac{M_B}{W_z} = \frac{182541,1 \text{ Nm}}{713 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3} = \mathbf{256 \text{ MPa}} < 275 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, el perfil seleccionado para los pilares es el perfil correcto.

6.3 Acciones permanentes: peso propio real

Una vez dimensionadas las correas procederemos al cálculo y representación de la carga de peso propio ya con el valor de la carga de dichas correas ([capítulo 3.1](#)).

Teniendo en cuenta que el módulo o crujía entre pórticos es $m = 5\text{ m}$, las cargas permanentes resultantes serán las siguientes:

- Paneles fotovoltaicos: $G_{foto} = 114,6\text{ Pa}$
- Correa: $G_{correa} = 6,74\text{ kg/m} = 66,12\text{ N/m [=] Pa} \cdot m$
- Pilar: $G_{pilar} = \frac{G_{IPE\ 330}}{m} = 96,33\text{ Pa}$
- Pescante sin acartelar:

$$G_{pescante} = \frac{G_{IPE\ 240} + G_{correa}}{m} + G_{foto} = 188\text{ Pa}$$
- Cartela: $G_{cartela} = \frac{G_{IPE\ 240}}{2 \cdot m} = 30,1\text{ Pa}$
- Pescante acartelado:

$$G_{pescante+cartela} = G_{pescante} + G_{cartela} = 218,1\text{ Pa}$$

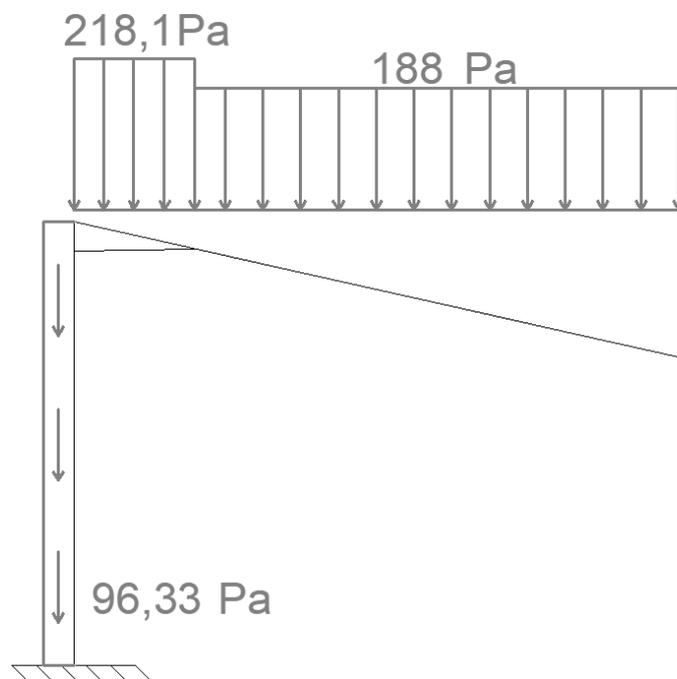


Figura 67: Cargas permanentes-peso propio

CAPÍTULO 7. DIMENSIONADO DE ZAPATAS

7.1 Dimensiones de zapatas

En este apartado, se van a calcular las dimensiones que han de tener las zapatas de la estructura, teniendo en cuenta que estas van a ser cuadradas, rígidas y aisladas. Por lo que los cálculos se harán para una zapata de los pórticos interiores ya que esta será la más cargada.

Hay que tener en cuenta todas y cada una de las fuerzas que provocarán el vuelco de la estructura con sus correspondientes coeficientes de mayoración:

- Peso propio: como podemos ver en la *figura 67* el peso propio tiene distintos valores a lo largo del pescante debido a la cartela lo que tomaremos su valor promedio. Esta carga actúa en dirección vertical.

$$\begin{aligned}
 G &= (2 \cdot G_{\text{pescante+cartela}} + 3 \cdot G_{\text{pescante}}) \cdot \frac{1}{5} \cdot \gamma_G \cdot A_2 = \\
 &= (2 \cdot 218,1 \text{ Pa} + 3 \cdot 188 \text{ Pa}) \cdot \frac{1}{5} \cdot 1,35 \cdot 25 \text{ m}^2 = \mathbf{6751,35 \text{ N}}
 \end{aligned}$$

- Carga de nieve:

$$Q_N = 398 \text{ Pa} \cdot \gamma_{Q_N} \cdot \Psi_N \cdot A_2 = 398 \text{ Pa} \cdot 1,5 \cdot 0,5 \cdot 25 \text{ m}^2 = \mathbf{7462,5 \text{ N}}$$

- Carga de viento: esta carga al estar aplicada en dirección perpendicular a la cubierta de la estructura se descompondrá en componente vertical y horizontal a la hora de evaluar el momento que provoque el vuelco de esta.

$$\begin{aligned}
 V_V &= Q_V \cdot \cos(12,7) \cdot \gamma_{Q_V} \cdot A_2 = 1003,3 \text{ Pa} \cdot \cos(12,7) \cdot 1,5 \cdot 25 \text{ m}^2 = \\
 &= \mathbf{36703,3 \text{ N}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_H &= Q_V \cdot \sin(12,7) \cdot \gamma_{Q_V} \cdot A_2 = 1003,3 \text{ Pa} \cdot \sin(12,7) \cdot 1,5 \cdot 25 \text{ m}^2 = \\
 &= \mathbf{8271,44 \text{ N}}
 \end{aligned}$$

La última carga que hay que tener en cuenta es la que impida el vuelco de la estructura, esta es el peso de la zapata. Hay que fijar la profundidad de la zapata, esta será $H = 0,5 \text{ m}$, por lo que la carga de la zapata será la siguiente:

$$\begin{aligned}
 P_Z &= L^2 \cdot H \cdot \rho_{\text{hormigón}} \cdot g = L^2 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} = \\
 &= \mathbf{L^2 \cdot 11772 \text{ N}}
 \end{aligned}$$

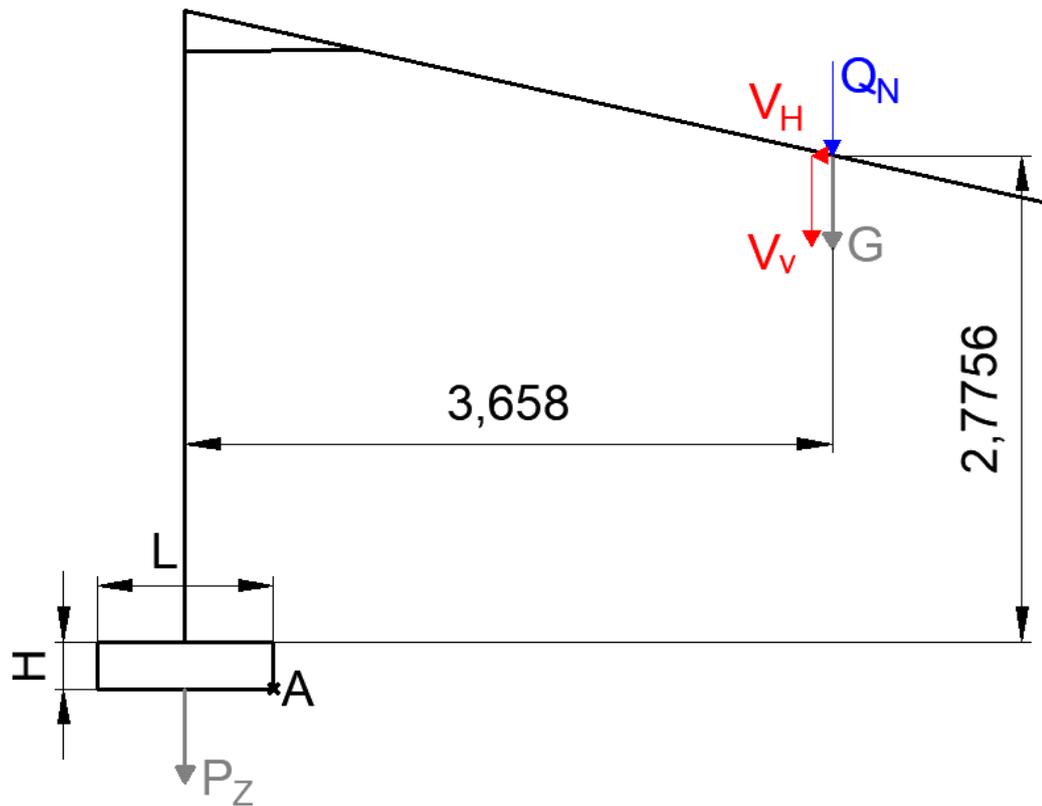


Figura 68: Fuerzas que afectan en el vuelco de la estructura

A continuación, se calculará la mínima longitud de zapata L para evitar el vuelco de la estructura, en el punto más crítico de la zapata (A).

$$\sum M(A) = 0$$

$$0 = P_z \cdot \frac{L}{2} + V_H \cdot 2,7756 - \left(3,658 - \frac{L}{2}\right) \cdot (V_V + Q_N + G)$$

$$L = 2,56 \text{ m}$$

Para que la estructura no vuelque es necesario utilizar unas zapatas cuadradas de profundidad $H = 0,5 \text{ m}$ y como mínimo de lado $L = 2,56 \text{ m}$.

Por lo tanto, se utilizarán unas zapatas cuadradas con las siguientes características geométricas:

$$H = 0,5 \text{ m}$$

$$L = 2,75 \text{ m}$$

7.2 Armado de zapatas

A continuación, se procede a detallar el armado de las zapatas.

Para el armado se van a utilizar varillas de acero de diámetro $f_i = 12 \text{ mm}$ separadas entre sí una distancia de 200 mm . Se dispondrá una parrilla de 14 varillas en dirección longitudinal y otra de 14 varillas en dirección transversal a una distancia de 70 mm de la parte inferior de la zapata como podemos ver en la figura 69.

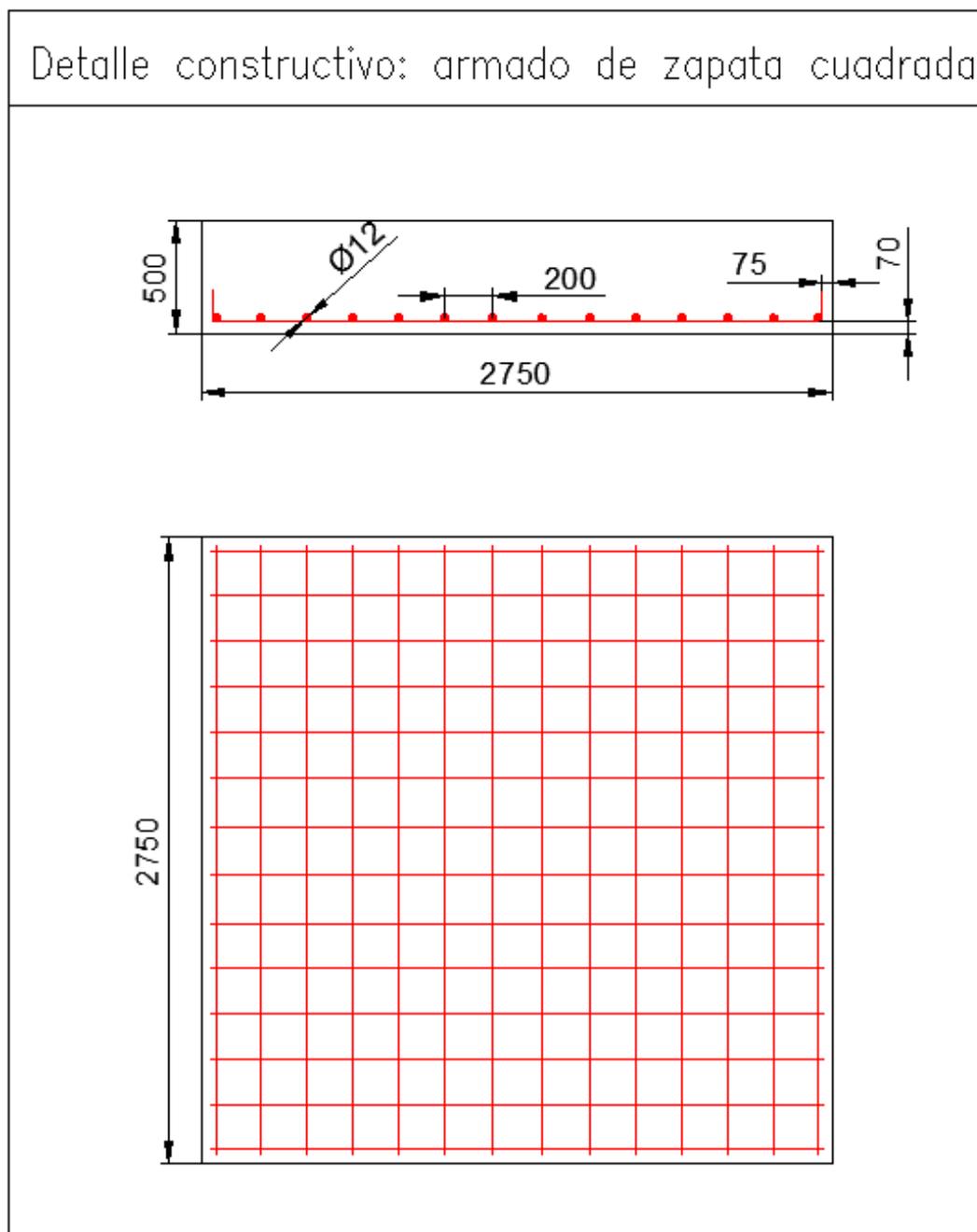


Figura 69: Armado de zapata

7.3 Unión entre pilar y zapata

Para la unión entre pilar y zapata se utilizará una placa metálica de reparto de carga acartelada y pernos de cimentación de diámetro 18 mm tipo L como se puede observar en la figura 70.

De este modo aseguramos que la carga se transmite de manera correcta a la zapata para evitar el vuelco de la estructura por fallo de la unión.

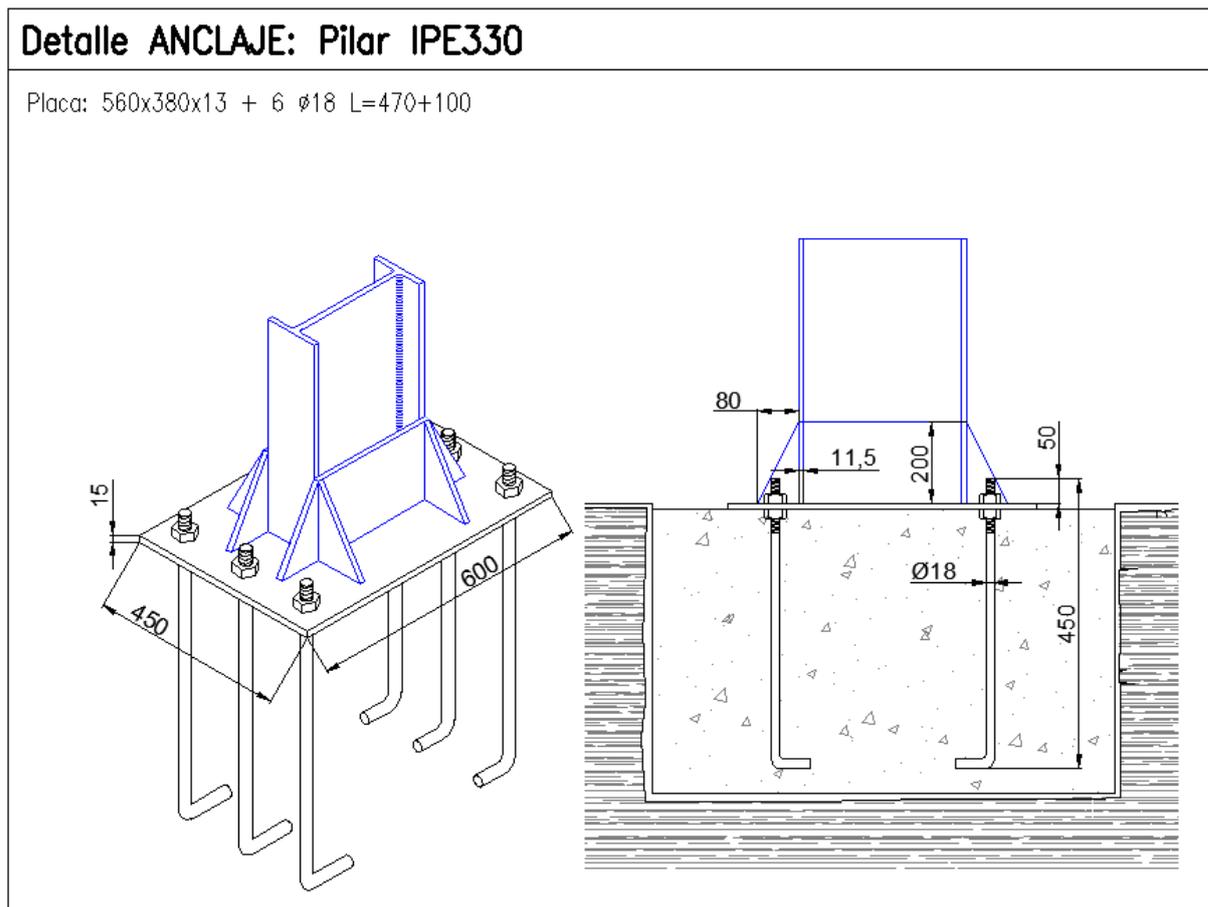


Figura 70: Unión entre pilar y zapata

8. ESTIMACIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

A continuación, se realizará una estimación del costo de la estructura teniendo en cuenta los precios del mercado.

- El precio del kg de acero varía entre 1,5 € y 2,5 €, para incluir tanto soldaduras como la pintura se tomará 2,2€ como el precio del conjunto.
- El precio del kg de acero galvanizado para correas tipo C y anclajes tipo LD cuesta 1,3 €.
- El m^3 de hormigón para las zapatas vale 80 €.
- Las varillas de acero para el armado de zapatas valen $0,9 \text{ €/kg}$.
- La preparación del terreno cuesta 100 €/m^3 .
- El asfaltado del terreno vale 12 €/m^2 para una capa de 60 mm de terreno compactado.
- El precio de alquiler compactadora de terreno durante 1 día es de 222,45 €. [10]
- Cada panel fotovoltaico 'AXITEC' tiene un precio de 215 €. [11]

- Coste de pilares: la estructura se compone de 5 pilares de 3,6 m de altura cada uno.

$$m_{\text{pilares}} = 5 \cdot 3,6 \text{ m} \cdot 49,1 \text{ kg/m} = \mathbf{883,8 \text{ kg}}$$

$$P_{\text{pilares}} = 883,8 \text{ kg} \cdot 2,2 \text{ €/kg} = \mathbf{1944,36 \text{ €}}$$

- Coste de pescantes y cartelas: la estructura se compone de 5 pescantes de 5 m de longitud cada uno y 5 cartelas de 2 m de longitud cada una.

$$m_{\text{pescantes+cartelas}} = 5 \cdot \left(5 \text{ m} + 2 \text{ m} \cdot \frac{1}{2} \text{ viga} \right) \cdot 30,7 \text{ kg/m} = \mathbf{921 \text{ kg}}$$

$$P_{\text{pescantes+cartelas}} = 921 \text{ kg} \cdot 2,2 \text{ €/kg} = \mathbf{2026,2 \text{ €}}$$

- Coste de correas tipo C y anclajes tipo LD: disponemos un total de 120 m de correas tipo C y 30 unidades de longitud 0,12 m de anclajes tipo LD.

$$m_{\text{C+LD}} = 120 \text{ m} \cdot 6,74 \text{ kg/m} + 30 \cdot 0,12 \text{ m} \cdot 6,69 \text{ kg/m} = \mathbf{832,88 \text{ kg}}$$

$$P_{\text{C+LD}} = 832,88 \text{ kg} \cdot 1,3 \text{ €/kg} = \mathbf{1082,75 \text{ €}}$$

- Coste del hormigón de zapatas: se dispone de 5 zapatas cuadradas de 2,75 m de lado y 0,5 m de profundidad.

$$V_{zapatas} = 5 \cdot 2,75^2 \text{ m}^2 \cdot 0,5 \text{ m} = \mathbf{18,1 \text{ m}^3}$$

$$m_{zapatas} = 18,1 \text{ m}^3 \cdot 2400 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{45375 \text{ kg}}$$

$$P_{zapatas} = 18,1 \text{ m}^3 \cdot 80 \text{ €/m}^3 = \mathbf{1448 \text{ €}}$$

- Coste de las varillas de armado de zapatas: disponemos de dos parrillas con 14 varillas de acero por parrilla en cada zapata y cada varilla es de 3 m de longitud en total.

$$m_{varillas} = 5 \cdot 28 \cdot 3 \text{ m} \cdot \pi \cdot \frac{(12 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 8000 \text{ kg/m}^3 = \mathbf{380 \text{ kg}}$$

$$P_{varillas} = 380 \text{ kg} \cdot 0,9 \text{ €/kg} = \mathbf{342 \text{ €}}$$

- Coste de la preparación del terreno: para la implantación de la estructura se tendrán en cuenta dos aspectos: el movimiento de tierra y el compactado del terreno. Se considerará que se moverá el mismo volumen de tierra que el volumen de zapatas y el compactado del terreno se realizará en una superficie de dimensiones 26 m x 8 m para poder abarcar sobradamente las superficies de aparcamientos.

$$V_{terreno} = V_{zapatas} = \mathbf{18,1 \text{ m}^3}$$

$$P_{terreno} = 18,1 \text{ m}^3 \cdot 100 \text{ €/m}^3 = \mathbf{1810 \text{ €}}$$

$$S_{compactado} = 26 \text{ m} \cdot 8 \text{ m} = \mathbf{208 \text{ m}^2}$$

$$P_{compactadora} = \mathbf{222,45 \text{ €}}$$

- Coste del asfaltado del terreno: se asfaltará la superficie del terreno preparado.

$$S_{asfaltado} = S_{compactado} = \mathbf{208 \text{ m}^2}$$

$$P_{asfaltado} = 208 \text{ m}^2 \cdot 80 \text{ €/m}^2 = \mathbf{16640 \text{ €}}$$

- Coste de los paneles fotovoltaicos: la cubierta de nuestra estructura esta compuesta de 50 paneles fotovoltaicos de 23,5 kg y la instalación completa de estos se estima que representa un 5% del costo total de los paneles fotovoltaicos. Se va a tener en cuenta la ausencia de inversor en caso de únicamente utilizar dicha electricidad obtenida en los paneles para cargar automóviles, por tanto, se puede ahorrar dicho gasto en pasar la corriente eléctrica de continua a alterna mediante un inversor.

$$m_{\text{paneles}} = 23,5 \text{ kg/panel} \cdot 50 \text{ paneles} = \mathbf{1175 \text{ kg}}$$

$$P_{\text{fotovoltaicos}} = 1,05 \cdot 50 \text{ paneles} \cdot 215 \text{ €/panel} = \mathbf{11287,5€}$$

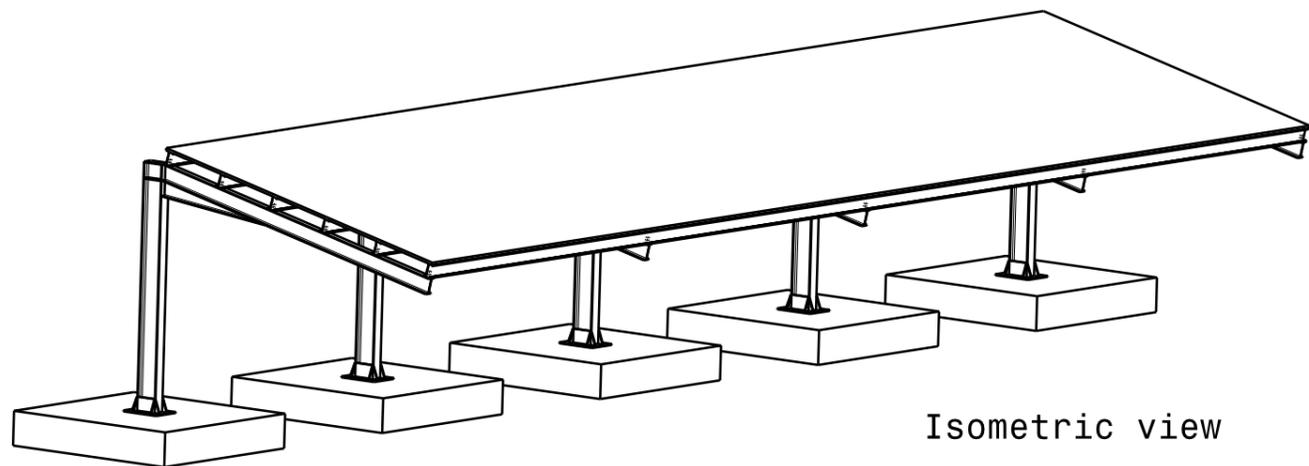
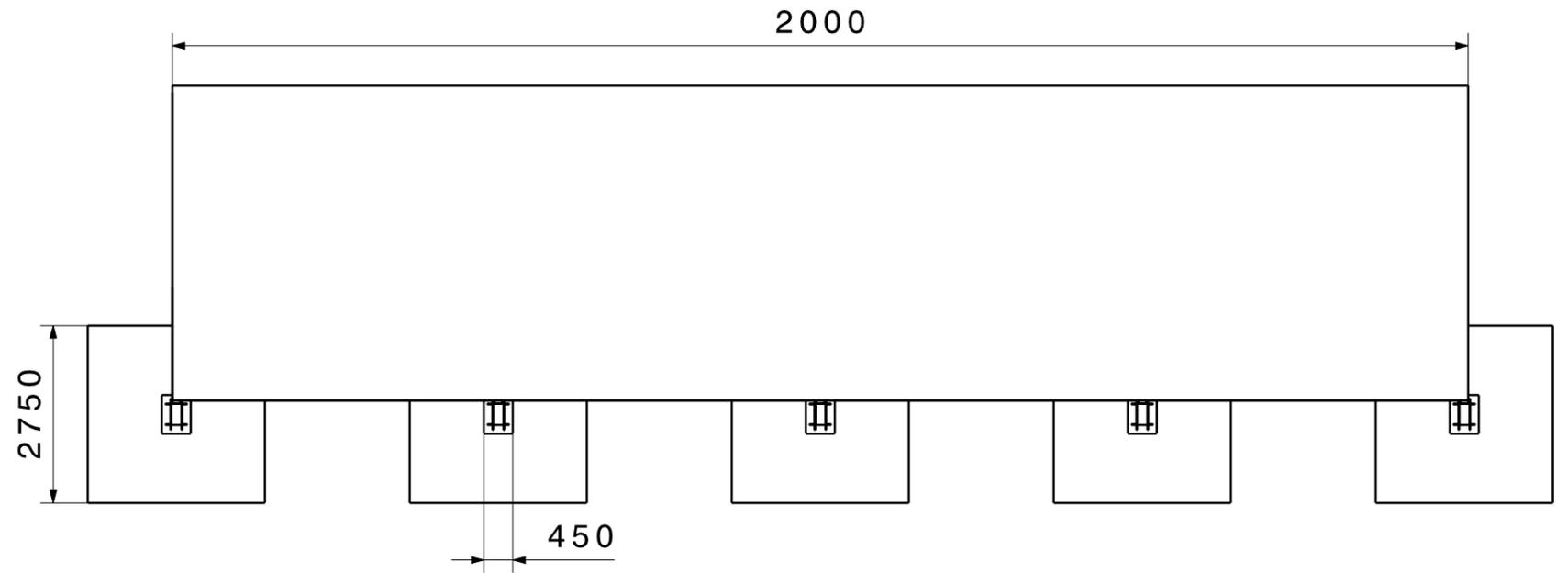
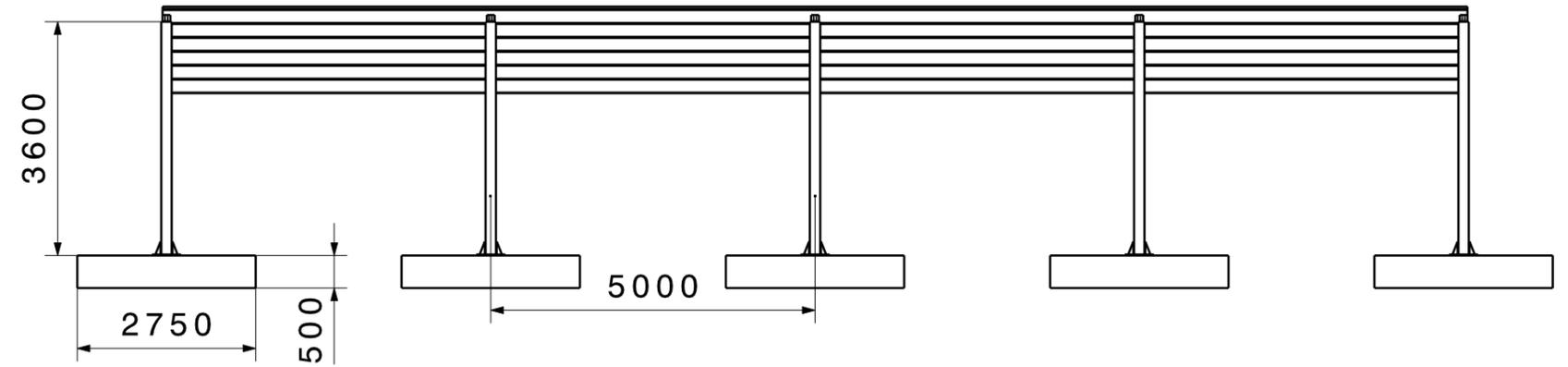
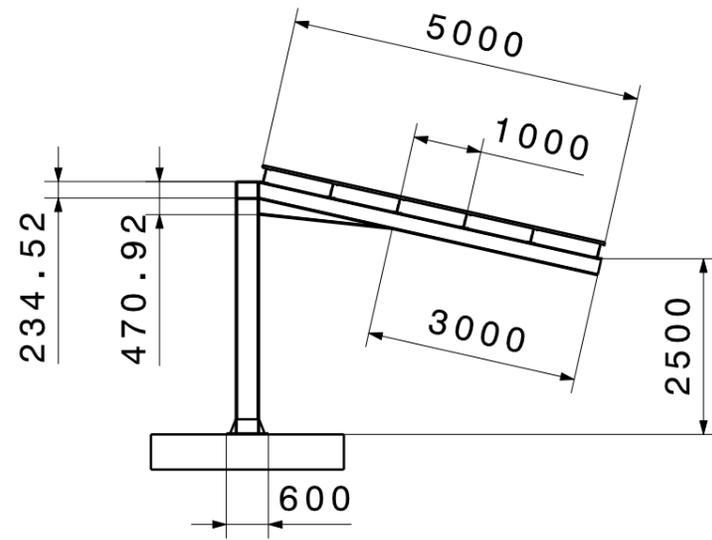
A partir de los cálculos realizados, se obtiene la siguiente estimación de pesaje y de costo de la estructura:

Peso total de la estructura → $m_{\text{estructura}} = \mathbf{49567,7 \text{ kg}}$

Coste total de la estructura → $P_{\text{estructura}} = \mathbf{36803,26 \text{ €}}$

9. PLANO DE LA ESTRUCTURA

Se ha realizado un plano de las proyecciones diédricas de la estructura mediante el software de diseño en 3D Catia V5-6 a partir del renderizado de la estructura.



Isometric view

PLANE No. 1	FIRM <i>Daniel</i>	Diseño preliminar de una marquesina fotovoltaica multifunción	
SIZE A3		PLANE NAME	Vistas diédricas de la estructura
SCALE 1:100	WEIGHT (kg) 49567,7		DESIGNED BY: Monge Francés, Daniel DATE: 17/12/2021

10. CONCLUSIONES

En este TFG se ha propuesto realizar el estudio de viabilidad y diseño de una marquesina multifunción utilizando la normativa vigente para construcciones industriales.

En primer lugar, se ha diseñado y definido la geometría de la estructura y se han calculado todas las cargas que afectan a esta.

En función de las cargas obtenidas se han dimensionado los siguientes elementos de la estructura:

- Perfiles de pilares, pescantes y correas.
- Perfil LD para la unión entre pescantes y correas.
- Unión entre pilar, pescante y cartela.
- Unión entre pilar y zapata.
- Zapatas para evitar el vuelco de la estructura.

Se han comprobado las distribuciones de tensiones normales y tangenciales en correas ante la carga más crítica mediante 'ThinSecBeam' y se ha observado su conformidad con los cálculos realizados.

Por último, se ha realizado el render de la estructura y el plano acotado de esta.

Se puede concluir que todos los objetivos marcados para este anteproyecto se han cumplido de manera satisfactoria.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] REAL DECRETO 1829/1995, de 10 de noviembre, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE EA-95"Estructuras de acero en edificación", *Boletín Oficial del Estado*, núm. 16, p. 89.
- [2] CTE DB-SE-AE Seguridad Estructural Acciones en la edificación. Código Técnico de la Edificación. Abril de 2009.
- [3] Universidad de Valladolid, Á. d. (Septiembre de 2014). *Apuntes para una breve introducción a la RESISTENCIA DE MATERIALES*. Obtenido de https://www.eii.uva.es/reic/RMgrado/docs_varios/apuntes_RMgrado.pdf
- [4] REAL DECRETO 1829/1995, de 10 de noviembre, por el que se aprueba la Norma Básica de la Edificación NBE EA-95"Estructuras de acero en edificación", *Boletín Oficial del Estado*, núm. 16, p. 113.
- [5] JOM, Estampaciones. (24 de Septiembre de 2017). *Evolución del precio del acero en España*. Obtenido de <https://www.jom.es/evolucion-del-precio-del-acero-espana/>
- [6] UNE-EN ISO 4014:2011 Pernos de cabeza hexagonal.
- [7] UNE-EN ISO 7089:2000 Arandelas planas. Serie normal. Producto de clase A.
- [8] DIN 127 Arandelas tipo GROWER
- [9] UNE-EN ISO 20273:1992 Agujeros de paso para pernos y tornillos.
- [10] Rentaire alquiler de maquinaria. *Rodillo de tierras 7000 kg*. Obtenido de <https://www.rentaire.es/alquiler-rodillo-de-tierras-7000-kg>
- [11] Teknosolar. Placa solar AXIPREMIUM XAC-410MH/144V 410Wp. Obtenido de <https://www.teknosolar.com/placa-solar-axiworldpremium-x-ac-410wp/>
- [12] Imagen obtenida de <https://www.deportrainer.com/bazar/10618-outsunny-marquesina-de-techo-dosel-tipo-toldo-de-terraza-para-puertas-y-ventanas-proteccion-contra-sol-y-lluvia-200x100x28cm-8435428727383.html>
- [13] Imagen obtenida de <https://www.ivos.es/marquesinas-de-madera/>
- [14] Imagen obtenida de <https://valladolid.rolna.es/2014/12/08/plaza-espana/>
- [15] Imagen obtenida de <https://www.elevo.es/marquesina-de-gasolinera/>
- [16] Imagen obtenida de <https://movilidadelectrica.com/marquesinas-fotovoltaicas/>



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Diseño preliminar de una marquesina
fotovoltaica multifunción**

Anejos

Autor:

Monge Francés, Daniel

Tutor:

**Lorenzana Iban, Antolín
C.A.,I.T.,M.M.C y Teoría de Estructuras**

Valladolid, Diciembre 2021.

Índice de anejos

Anejo 1. Ficha técnica de paneles fotovoltaicos	2
Anejo 2. Estimación de emisiones de CO ₂ ahorradas a la atmosfera	3
Anejo 3. Cálculos preliminares para el perfil Omega Ω como correa	4
3.1 Cálculo de momentos flectores y esfuerzos cortantes	5
3.2 Cálculo de tensiones normal y tangenciales en el perfil	5
3.2.1 Tensiones normales	6
3.2.2 Tensiones tangenciales.....	8
3.3 Cálculo de tensión de Von Mises y selección del perfil de correas	10

Índice de figuras

Figura 1: carga más desfavorable sobre la correa más crítica	4
Figura 2: valores perfil omega	5
Figura 3: tensiones normales	8
Figura 4: direcciones principales para el cálculo de las tensiones tangenciales en la correa, plano de normal negativa	8
Figura 5: tensiones tangenciales debidas a V_y , plano de normal negativa.....	9
Figura 7: tensiones tangenciales debidas a V_z , plano de normal negativa.....	9
Figura 6: direcciones principales para el cálculo de las tensiones tangenciales en la correa, plano de normal negativa	9

Anejo 1. Ficha técnica de paneles fotovoltaicos

Se va a exponer a continuación la ficha técnica de los paneles fotovoltaicos utilizados en esta estructura.



385 - 415 Wp

AXITEC
high quality german solar brand

AXIpremium X HC

144 semi-celda full-square monocristalino
Módulos fotovoltaicos de alto rendimiento

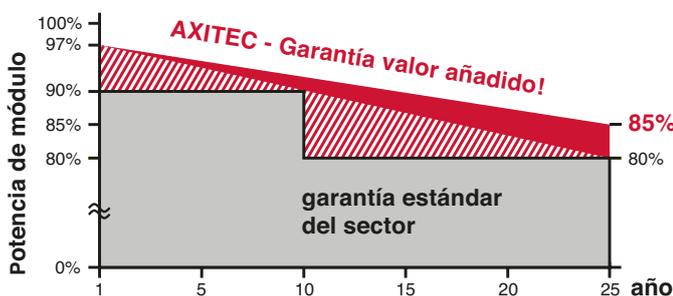
Las ventajas:

- 15** Years 15 años de garantía al producto
- HC** Máxima potencia de módulo gracias a la tecnología „half-cut“ y a sus materiales homologados
- Wp** Potencia positiva garantizada de 0-5 Wp comprobado por la medición individual de cada módulo
- 2.400 Pa** Carga máxima admisible de 2400 Pa
- 100%** 100% de prueba de electroluminiscencia
- IP 68** Caja de conexión de alta calidad y sistemas de enchufe



Garantía exclusiva lineal de máximo rendimiento de AXITEC!

- 15 años de garantía al 90% de la potencia nominal
- 25 años de garantía al 85% de la potencia nominal



1 - 8 % más de potencia después de 25 años

Fig. similar 144PHES201104A

AXIpremium X HC 385 - 415 Wp

Datos eléctricos (en condiciones estándar de prueba (STC), irradiación de 1000 vatios/m² en el espectro AM 1,5 a una temperatura de célula de 25°C)

Tipo	Potencia nominal Pmpp	Tensión nominal Umpp	Corriente nominal Impp	Corriente de cortocircuito Isc	Tensión de circuito abierto Uoc	Coefficiente de rendimiento del módulo
AC-385MH/144V	385 Wp	40,24 V	9,58 A	10,10 A	48,11 V	19,14 %
AC-390MH/144V	390 Wp	40,50 V	9,64 A	10,21 A	48,30 V	19,38 %
AC-395MH/144V	395 Wp	40,80 V	9,69 A	10,33 A	48,52 V	19,63 %
AC-400MH/144V	400 Wp	41,12 V	9,74 A	10,46 A	48,81 V	19,88 %
AC-405MH/144V	405 Wp	41,43 V	9,79 A	10,59 A	49,50 V	20,13 %
AC-410MH/144V	410 Wp	41,75 V	9,83 A	10,72 A	49,79 V	20,38 %
AC-415MH/144V	415 Wp	41,98 V	9,89 A	10,84 A </tr		

Estructura

Lado frontal	crystal blanco templado de 3,2 mm de baja reflexión
Células	144 células monocristalinas de alto rendimiento
Lado posterior	hoja compuesta
Marco	marco de aluminio a la plata de 35 mm

Datos mecánicos

L x A x A	2008 x 1002 x 35 mm
Peso	23,5 kg con marco

Conexión

Caja de conexión	grado de protección IP68
Cable	aprox. 1,1 m, 4 mm ²
Sistema de enchufe	enchufe / hembra IP68, Stäubli EVO2 / EVO2 pluggable

Valores límites

Tensión del sistema	1500 VDC
NOCT (temperatura de la célula de operación nominal)*	45°C +/-2K
Carga máxima admisible	2400 Pa/m ²
Corriente de reversión IR	20,0 A
Temperatura de funcionamiento permitida	-40°C a +85°C

(No se deben conectar al módulo tensiones externas superiores al valor máximo de tensión)

*NOCT, intensidad de irradiación 800 W/m², AM 1.5
velocidad del viento 1 m/sec, temperatura 20°C

Coefficiente de temperatura

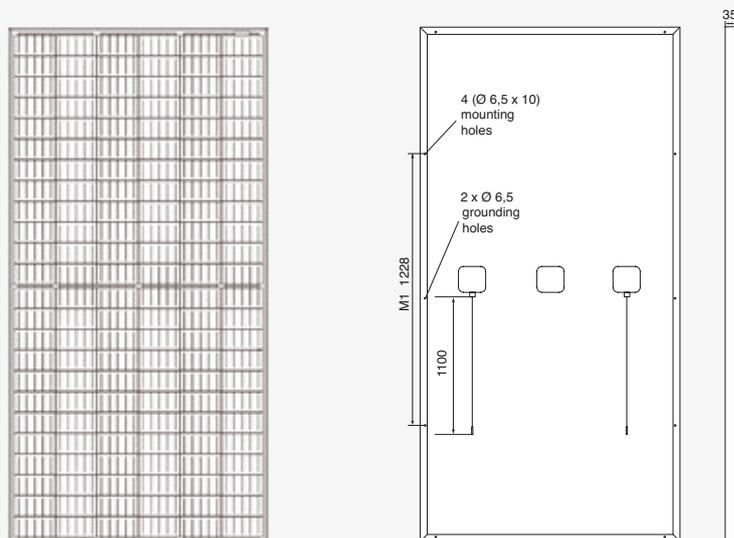
Tensión Uoc	-0,29 %/K
Corriente Isc	0,04 %/K
Potencia Pmpp	-0,39 %/K

Luz débil (Ejemplo para AC-415MH/144V)

Curva característica I/U	Corriente	Tensión
200 W/m ²	2,02 A	40,40 V
400 W/m ²	4,08 A	40,87 V
600 W/m ²	6,09 A	41,19 V
800 W/m ²	8,05 A	41,54 V
1000 W/m ²	9,89 A	41,98 V

Embalaje

Número de módulos por paleta	30 uds.
Número de módulos por contenedor HC	660 uds.



Todas las medidas en mm

Anejo 2. Estimación de emisiones de CO₂ ahorradas a la atmosfera

A continuación, calculamos la cantidad de **emisiones de CO₂** que estamos ahorrando al colocar 50 paneles en la cubierta de nuestra estructura durante un año.

Para ello no hará falta el documento de 'Factores de conversión energía final – energía primaria y factores de emisión de CO₂' publicado en 2010 por el 'Ministerio de industria, turismo y comercio del Gobierno de España'.

Este documento nos indica que para energía eléctrica de baja tensión (uso doméstico), la cantidad de CO₂ ahorrado es de 0,27 tCO₂/MWh final.

Teniendo en cuenta la potencia nominal media de nuestras placas (400 kW), el número de paneles que tenemos en nuestra estructura (50) y el número de horas diarias que captan luz solar (8 horas diarias), la cantidad de CO₂ ahorrado en un año es de:

$$\begin{aligned} CO_{2\ 1\ año} &= 0,27 \text{ tCO}_2 / MWh \text{ final} \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} MW \cdot 8 \text{ h/día} \cdot 365,256 \text{ días/año} \cdot 50 \text{ paneles} = \\ &= 15,78 \text{ tCO}_2 / \text{año} \end{aligned}$$

**FACTORES DE CONVERSIÓN ENERGÍA FINAL -ENERGÍA PRIMARIA y
FACTORES DE EMISIÓN DE CO₂ - 2010**

CARBURANTES

FUENTE ENERGÉTICA	CONSUMO FINAL DIRECTO		ENERGÍA PRIMARIA ⁽¹⁾		FACTOR DE EMISIÓN ⁽²⁾
	tep	Volumen específico	tep	MWh	tCO ₂ /tep
Gasolina	1	1.290 l	1,10	12,79	2,90
Gasóleo A y B	1	1.181 l	1,12	13,02	3,06
Gas natural	1	910 Nm ³	1,07	12,44	2,34
Biodiesel	1	1.267 l	1,24	14,42	neutro
Bioetanol	1	1.968 l	1,70	19,77	neutro
Gases Licuados de Petróleo (GLP)	1	1.763 l	1,05	12,21	2,72
Queroseno	1	1.213 l	1,12	13,02	3,01

COMBUSTIBLES

FUENTE ENERGÉTICA	CONSUMO FINAL DIRECTO		ENERGÍA PRIMARIA ⁽¹⁾		FACTOR DE EMISIÓN ⁽²⁾
	tep	Volumen específico	tep	MWh	tCO ₂ /tep
Hulla	1	2,01 t	1,14	13,21	4,23
Lignito negro	1	3,14 t	1,14	13,21	4,16
Carbón para coque	1	1,45 t	1,14	13,26	4,40
Biomasa agrícola	1	3,34 t	1,25	14,53	neutro
Biomasa industria forestal	1	2,87 t	1,25	14,53	neutro
Coque de petróleo	1	1,29 t	1,42	16,49	4,12
Gas de coquerías	1	1,08 t	1,14	13,26	1,81
Gasóleo C	1	1.092 l	1,12	13,02	3,06
Fuelóleo	1	1.126 l	1,11	12,91	3,18
Gas Natural	1	910 Nm ³	1,07	12,44	2,34
Gases Licuados de Petróleo (GLP)	1	1.763 l	1,05	12,21	2,72
Butano	1	1.670 l	1,05	12,21	2,72
Propano	1	1.748 l	1,05	12,21	2,67
Gas de refinería	1	0,85 t	1,12	13,07	2,30

ELECTRICIDAD

TECNOLOGÍA	ENERGÍA FINAL		ENERGÍA PRIMARIA				FACTOR DE EMISIÓN			
			Bornas de central		En punto de consumo		En bornas de alternador (bruta)		En bornas de central (neta)	En punto de consumo
	MWh	tep	MWh	Tep	MWh	tep	tCO ₂ /MWh	tCO ₂ /MWh	tCO ₂ /MWh	
Hulla+ antracita	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	1,13	1,17	1,27	
Lignito pardo	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,90	0,93	1,01	
Lignito negro	1	0,086	2,68	0,23	2,91	0,25	0,97	1,00	1,09	
Hulla importada	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,90	0,94	1,02	
Nuclear	1	0,086	3,03	0,26	3,29	0,28	0	0	0	
Ciclo Combinado	1	0,086	1,93	0,17	2,09	0,18	0,34	0,35	0,38	
Hidroeléctrica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0	
Cogeneración MCIA ⁽³⁾	1	0,086	1,67	0,14	1,74	0,15	0,37	0,38	0,42	
Cogeneración TG ⁽⁴⁾	1	0,086	1,61	0,14	1,69	0,15	0,33	0,34	0,37	
Cogeneración TV ⁽⁵⁾	1	0,086	1,72	0,15	1,80	0,16	0,41	0,42	0,46	
Cogeneración CC ⁽⁶⁾	1	0,086	1,54	0,13	1,61	0,14	0,31	0,32	0,35	
Eólica y fotovoltaica	1	0,086	1,00	0,09	1,09	0,09	0	0	0	
Solar termoeléctrica	1	0,086	4,56	0,39	4,95	0,43	0	0	0	
Biomasa eléctrica	1	0,086	4,88	0,42	5,29	0,46	0	0	0	
Biogás	1	0,086	3,70	0,32	4,02	0,35	0	0	0	
RSU	1	0,086	4,02	0,35	4,36	0,38	0,24	0,25	0,27	
Centrales de fuelóleo	1	0,086	2,52	0,22	2,73	0,24	0,71	0,73	0,79	
Gas siderúrgico	1	0,086	2,86	0,25	3,10	0,27	0,64	0,69	0,75	
Energía Eléctrica General	1	0,086	0,17		0,18		0,23		0,23	
			tep /MWh neto		tep /MWh		tCO ₂ /MWh bruto		tCO ₂ /MWh neto	
			1,94		2,11		2,63		2,72	
		MWh primario/MWh neto		MWh primario/MWh final		tCO ₂ /tep bruto		tCO ₂ /tep neto		
								tCO ₂ /tep final		
Energía Eléctrica Baja Tensión (Sector Doméstico)	1	0,086	0,17		0,19		0,23		0,23	
			tep /MWh neto		tep /MWh final		tCO ₂ /MWh bruto		tCO ₂ /MWh neto	
			1,94		2,21		2,63		2,72	
		MWh primario/MWh neto		MWh primario/MWh final		tCO ₂ /tep bruto		tCO ₂ /tep neto		
								tCO ₂ /tep final		

(1) Incluye las pérdidas en las transformaciones para la obtención del combustible y/o carburante y transporte del mismo.

(2) En punto de consumo

(3) MCIA: Motor de Combustión Interna Alternativo

(4) TG: Turbina de Gas

(5) TV: Turbina de Vapor

(6) CC: Ciclo combinado

Anejo 3. Cálculos preliminares para el perfil Omega Ω como correa

Para poner en contexto este anejo hay que situarse en el capítulo 4.5 de la memoria. En un principio el perfil seleccionado para las correas fue un perfil Omega; a continuación, se comprueba la viabilidad del uso de este tipo de perfil para las correas.

$$q_Y = 2550,83 \text{ N/m}$$

$$q_Z = -235,73 \text{ N/m}$$

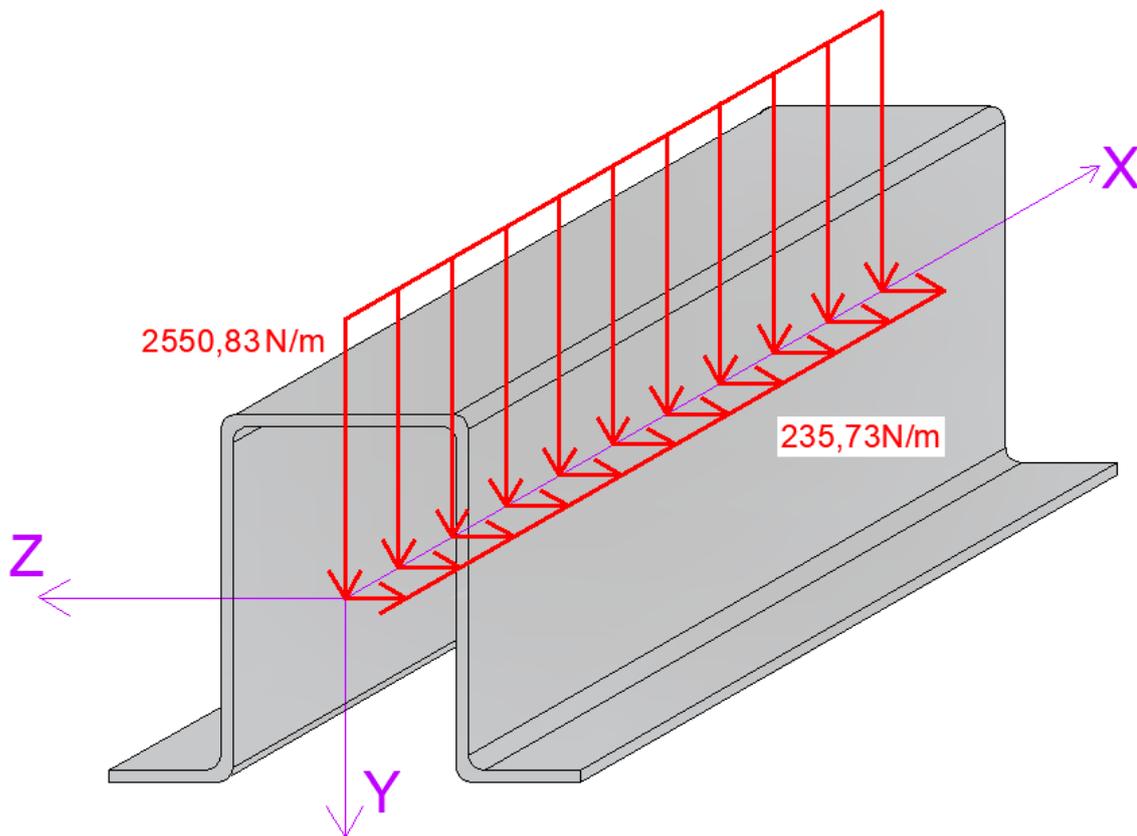


Figura 1: carga más desfavorable sobre la correa más crítica

3.1 Cálculo de momentos flectores y esfuerzos cortantes

La correa se va a montar como una viga continua de un único vano, con una separación entre apoyos de $L = 5 \text{ m}$, siendo l la separación entre pórticos.

A la hora de evaluar los momentos flectores y esfuerzos cortantes, hay que tener en cuenta que la correa está soportando una carga q_Y en sentido positivo del eje Y y una carga q_Z en sentido negativo del eje Z .

Por lo tanto, la correa tendrá los siguientes esfuerzos cortantes y momentos flectores:

$$V_Y = \frac{q_Y \cdot L}{2} = 6377,1 \text{ N} \quad V_Z = \frac{q_Z \cdot L}{2} = -589,33 \text{ N}$$

$$M_Z = \frac{q_Y \cdot L^2}{8} = 7971,34 \text{ Nm} \quad M_Y = \frac{q_Z \cdot L^2}{8} = -736,66 \text{ Nm}$$

3.2 Cálculo de tensiones normal y tangenciales en el perfil

A la vista de los resultados de momentos flectores y cortantes, realizaremos los cálculos de tensiones con los valores del perfil omega (Ω) OF 100.3.0 y posteriormente verificaremos la elección de dicho perfil y seleccionaremos la calidad del acero a elegir.

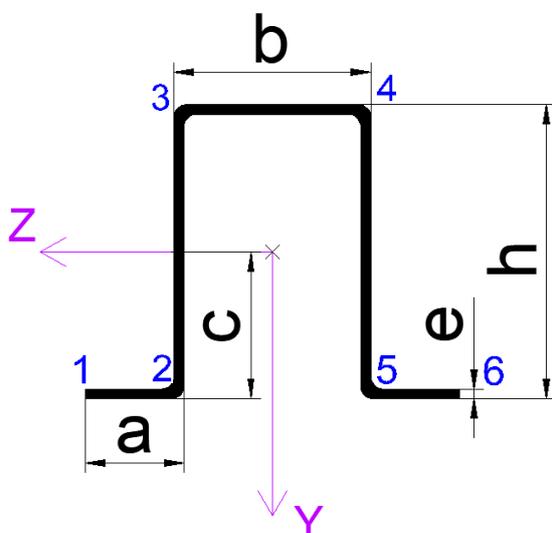


Figura 2: valores perfil omega

$$\begin{aligned} h &= 100 \text{ mm} \\ b &= 50 \text{ mm} \\ a &= 30 \text{ mm} \\ e &= 3 \text{ mm} \\ c &= 48,3 \text{ mm} \\ I_z &= 113 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \\ I_y &= 59 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

3.2.1 Tensiones normales

$$\sigma_{xx} = \frac{N_x}{A} + \frac{M_z}{I_z} \cdot y + \frac{M_y}{I_y} \cdot z$$

Se calculan a continuación las tensiones normales en cada uno de los seis puntos del perfil marcados en la *figura 2*:

- Tensión normal en el punto 1:

$$y_1 = 48,3 \text{ mm}$$

$$z_1 = 50 \text{ mm}$$

$$|\sigma_{xx}^1| = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{113 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 48,3 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{59 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 50 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^1 = \mathbf{278,3 \text{ MPa}}$$

- Tensión normal en el punto 2:

$$y_2 = 48,3 \text{ mm}$$

$$z_2 = 25 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^2 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{113 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 48,3 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{59 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 25 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^2 = \mathbf{309,51 \text{ MPa}}$$

- Tensión normal en el punto 3:

$$y_3 = h - c = -51,7 \text{ mm}$$

$$z_3 = 25 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^3 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{113 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -51,7 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{59 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 25 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^3 = \mathbf{-395,92 \text{ MPa}}$$

- Tensión normal en el punto 4:

$$y_4 = -51,7 \text{ mm}$$

$$z_4 = -25 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^4 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{113 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -51,7 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{59 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -25 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^4 = -333,5 \text{ MPa}$$

- Tensión normal en el punto 5:

$$y_5 = 48,3 \text{ mm}$$

$$z_5 = -25 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^5 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{113 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 48,3 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{59 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -25 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^5 = 371,94 \text{ MPa}$$

- Tensión normal en el punto 6:

$$y_6 = 48,3 \text{ mm}$$

$$z_6 = -50 \text{ mm}$$

$$\sigma_{xx}^6 = \frac{7971,34 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{113 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot 48,3 \text{ mm} + \frac{-736,66 \cdot 10^3 \text{ Nmm}}{59 \cdot 10^4 \text{ mm}^4} \cdot -50 \text{ mm} =$$

$$\sigma_{xx}^6 = 403,15 \text{ MPa}$$

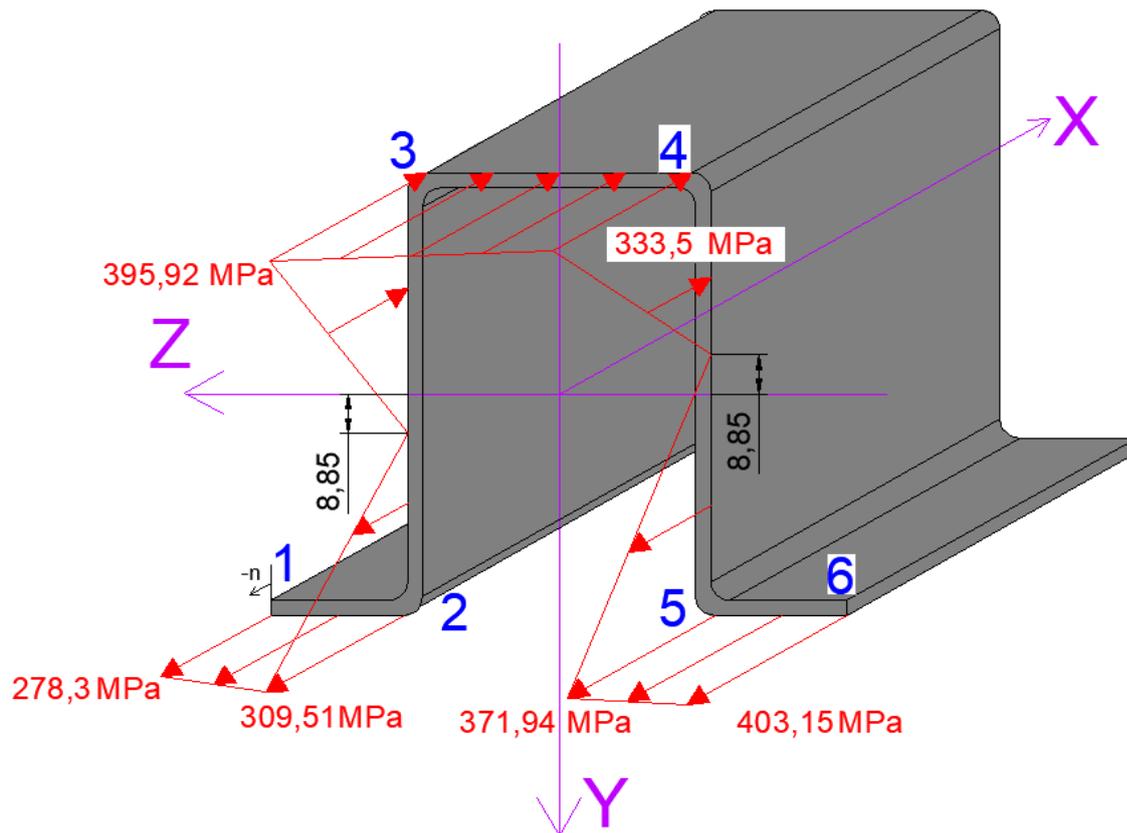
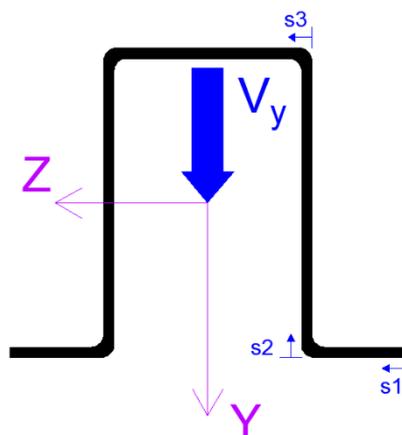


Figura 3: tensiones normales

3.2.2 Tensiones tangenciales

Para el cálculo de las tensiones tangenciales en nuestro perfil, tomaremos la hipótesis de pared delgada teniendo en cuenta el efecto que el producen tanto el esfuerzo cortante V_y como el V_z .

- Tensiones tangenciales debidas a V_y :



$$\begin{aligned} \sigma_{xs}(s_1 = a) &= -7,92 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_2 = 0) &= \sigma_{xs}(s_1 = a) = -7,92 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_2 = c) &= -14,5 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_2 = h) &= -6,964 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_3 = 0) &= \sigma_{xs}(s_2 = h) = -6,964 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_3 = b/2) &= 0 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Figura 4: direcciones principales para el cálculo de las tensiones tangenciales en la correa, plano de normal negativa

Como podemos observar en la figura 5, al ser un perfil simétrico respecto al eje Y, las tensiones tangenciales debidas al esfuerzo cortante V_y , también lo serán respecto de dicho eje.

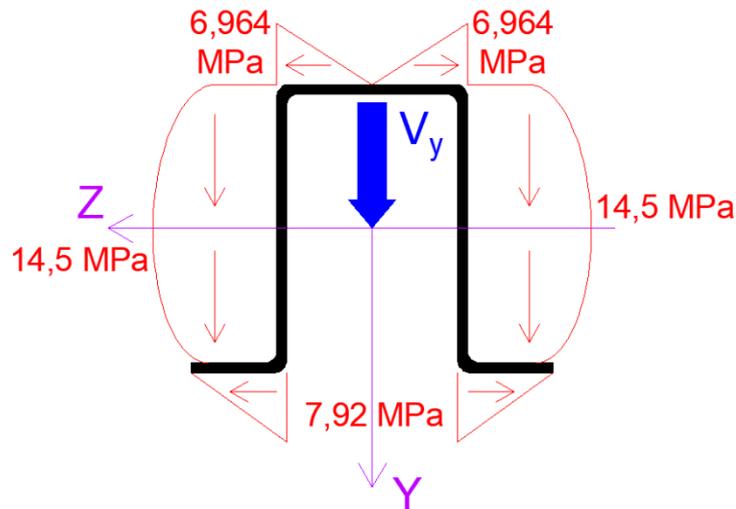


Figura 5: tensiones tangenciales debidas a V_y , plano de normal negativa

➤ Tensiones tangenciales debidas a V_z :

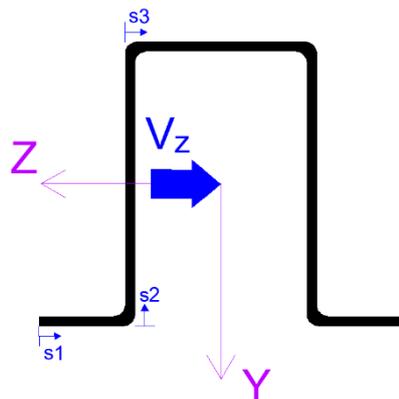


Figura 7: direcciones principales para el cálculo de las tensiones tangenciales en la correa, plano de normal negativa

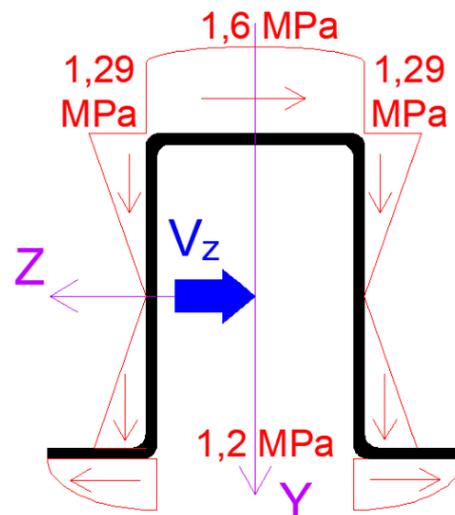


Figura 6: tensiones tangenciales debidas a V_z , plano de normal negativa

$$\begin{aligned} \sigma_{xs}(s_1 = a) &= -1,2 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_2 = 0) &= \sigma_{xs}(s_1 = a) = -1,2 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_2 = c) &= 0 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_2 = h) &= 1,29 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_3 = 0) &= \sigma_{xs}(s_2 = h) = 1,29 \text{ MPa} \\ \sigma_{xs}(s_3 = b/2) &= 1,6 \text{ MPa} \end{aligned}$$

3.3 Cálculo de tensión de Von Mises y selección del perfil de correas

Para nuestro perfil de correa, el punto más crítico del perfil de nuestra correa será el punto 3 situado a cotas $y = -51,7 \text{ mm}$ y $z = 25 \text{ mm}$.

Los valores de tensiones en el punto 3 son los siguientes:

$$\sigma_{xx} = -395,92 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xy} = -6,964 - 1,29 = -8,254 \text{ MPa}$$

$$\tau_{xz} = -6,964 + 1,29 = -5,674 \text{ MPa}$$

A la vista de los valores, podemos observar que las tensiones tangenciales (τ_{xy} y τ_{xz}) representan aproximadamente un 2% del valor de la tensión normal (σ_{xx}) y por lo tanto se despreciarán a la hora de obtener el límite elástico.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{xx}}{2} = 197,96 \text{ MPa} \rightarrow \text{Según Von Mises: } \tau_{max} \leq \frac{\sigma_e}{2}$$

$$\sigma_e \geq 395,92 \text{ MPa}$$

Para poder escoger este perfil omega (el de mayor tamaño), el tipo de acero tendría que ser un S450. La calidad del acero más común es la S275 con un límite elástico $\sigma_e = 275 \text{ MPa}$.

La conclusión a la que llegamos en este punto del dimensionado de correas es que debemos escoger otro tipo de perfil conformado en frío, de tal forma que debido a sus características de tamaño peso e inercia, la correa soporte una carga menor a su límite elástico ($\sigma_e = 275 \text{ MPa}$).

Se optará por un **perfil tipo C**, también conformado en frío, para que cumpla la misma función que la prevista inicialmente para el perfil omega.