

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***INVERNADERO SOSTENIBLE PARA  
COOPERACIÓN INTERNACIONAL EN  
PERÚ***

***DOCUMENTO 5- CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO***

**Alumno/Alumna:** de la Puerta Sasía, Jaione

**Director/Directora:** Laraudogoitia Alzaga, Juan Esteban

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** miércoles, 28 febrero 2018

## ÍNDICE DEL DOCUMENTO – CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO

1.	CÁLCULO .....	3
1.1.	Cargas.....	3
1.1.1.	Carga muerta. Peso Propio .....	3
1.1.2.	Carga viva. Uso.....	3
1.1.3.	Sobrecarga de Nieve .....	3
1.1.4.	Sobrecarga de Lluvia .....	4
1.1.5.	Carga de Viento .....	4
1.1.6.	Sismo .....	17
1.1.7.	Acciones térmicas.....	18
1.2.	Combinaciones .....	18
1.3.	Estudio en CYPE 3D.....	19
1.3.1.	Elementos barra.....	19
1.3.2.	Cargas .....	19
1.3.3.	Vinculación de nudos.....	20
1.3.4.	Longitud de pandeo .....	21
1.3.5.	Coeficiente de momentos.....	24
1.3.6.	Arriostramiento.....	25
1.3.7.	Zapatas .....	25
1.4.	Elementos de unión.....	27
1.5.	Mecanismo de apertura de cubierta .....	30
2.	DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS .....	34
2.1.	Pilares.....	34
2.2.	Vigas en arco .....	47
2.3.	Arriostramiento longitudinal .....	62
2.4.	Tirantes y cable en el plano del pórtico .....	67
2.5.	Perfiles perpendiculares al plano del pórtico .....	68
2.6.	Uniones .....	82

2.6.1.	Pilar .....	82
2.6.2.	Correas .....	83
2.6.3.	Arcos.....	83
2.6.4.	Cruces de San Andrés.....	83
2.6.5.	Tirante horizontal.....	83
2.7.	Placas de anclaje .....	83
2.8.	Cimentación .....	84
3.	PLAN DE PROYECTO Y PLANIFICACIÓN .....	86
3.1.	Fases del proyecto .....	87
3.2.	Diagrama de Gantt .....	89
4.	NORMAS Y REFERENCIAS.....	89
5.	PROGRAMAS DE CÁLCULO Y DISEÑO.....	91

## 1. CÁLCULO

En este primer apartado del documento se presentarán todos los cálculos realizados en el desarrollo del trabajo, para justificar así las diferentes decisiones tomadas en cada ámbito del mismo y presentar la solución completa.

### 1.1. Cargas

Todas las cargas se calcularán siguiendo lo establecido en la Norma E.020 (Cargas) del Reglamento Nacional de Edificaciones de Perú (RNE).

#### 1.1.1. Carga muerta. Peso Propio

El peso que soportará la estructura es el de la cubierta de polietileno de baja densidad.

Es un material plástico no rígido de densidad  $0,92 \text{ g/cm}^3 = 0,92 \text{ kg/dm}^3 = 920 \text{ kg/m}^3$

El espesor más habitualmente comercializado es de  $400 \text{ }\mu\text{m} = 0,4\text{mm}$

$$q_P = 920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{10 \text{ N}}{1 \text{ kg}} \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 3,68 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \approx 0,004 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

La carga lineal sobre cada pórtico sería (distancia entre pórticos: 2,5m)

$$\text{Pórticos hastiales} \quad 0,004 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,25 \text{ m} = 0,005 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Pórticos centrales} \quad 0,004 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 2,5 \text{ m} = 0,01 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

#### 1.1.2. Carga viva. Uso

Como la cubierta no es rígida, nadie puede subir a ella. No hay uso.

$$q_U = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

#### 1.1.3. Sobrecarga de Nieve

La norma indica que la carga de nieve se considerará carga viva (variable), y tendrá dos componentes: la carga básica de nieve sobre el suelo ( $Q_s$ ) y la carga de nieve sobre el techo ( $Q_t$ )

$$Q_s$$

La norma indica que su valor se establecerá de un análisis estadístico de la información disponible en la zona, y su valor mínimo será  $0,4 \text{ kg/m}^2$ .

Los datos recogidos sobre el clima en la costa central de Perú, lugar objeto del presente proyecto, muestran que no ha nevado en los últimos diez años. Por tanto, se tomará el valor mínimo como sobrecarga de nieve.

$Q_t$

Según la clasificación de la norma, se trata de un techo curvo con relación flecha/luz =  $\frac{2}{9} = 0,22 > \frac{1}{10}$  e inclinación de  $45^\circ$  en su unión con el pilar.

- c) Para techos a una o dos aguas con inclinaciones mayores que  $30^\circ$  la carga de diseño ( $Q_t$ ), sobre la proyección horizontal, será:

$$Q_t = C_s (0,80 Q_s) \text{ donde } C_s = 1 - 0,0025(\theta^\circ - 30^\circ),$$

siendo  $C_s$  un factor adimensional.

*Ilustración 1.1. Definición de la carga de nieve (Norma E.090)*

$$Q_t = C_s \cdot (0,8 \cdot Q_s) = (1 - 0,0025 \cdot (15)) \cdot 0,8 \cdot 0,004 \frac{kN}{m^2} = q_N$$

$$q_N = 0,003 \frac{kN}{m^2}$$

El valor obtenido corresponde a la proyección horizontal de la carga sobre la cubierta. En realidad, la carga sobre el arco sería algo menor, puesto que se reparte entre toda la longitud del mismo, pero se decide no realizar esta concreción debido a que optando por tomar directamente el valor proyectado queda la carga mayorada y, por tanto, el resultado estará del lado de la seguridad.

#### 1.1.4. Sobrecarga de Lluvia

Debido a la singularidad de la cubierta, que no es rígida ni de gran resistencia mecánica, se ha buscado información que especifique qué cargas debidas a impacto y/o acumulación de agua por lluvias conviene considerar para el cálculo de la estructura. Sin embargo, la norma de acciones de Perú no especifica ningún criterio para las acciones de lluvia.

#### 1.1.5. Carga de Viento

***Carga de viento sobre la cubierta***

Clasificación de las edificaciones: el invernadero a dimensionar entra en el tipo 1 por ser una construcción de poca altura (4m).

**Tipo 1.** Edificaciones poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento, tales como edificios de poca altura o esbeltez y edificaciones cerradas con cobertura capaz de soportar las cargas sin variar su geometría. Para este tipo de edificaciones se aplicará lo dispuesto en los Artículos 12 (12.3) y 12 (12.4).

*Ilustración 1.2. Clasificación de las edificaciones (Norma E.090)*

Velocidad de diseño (V): hasta 10m de altura, será la velocidad máxima adecuada a la zona de ubicación de la estructura (Anexo 2 de la norma E.020). Se tomará una velocidad de 100km/h.

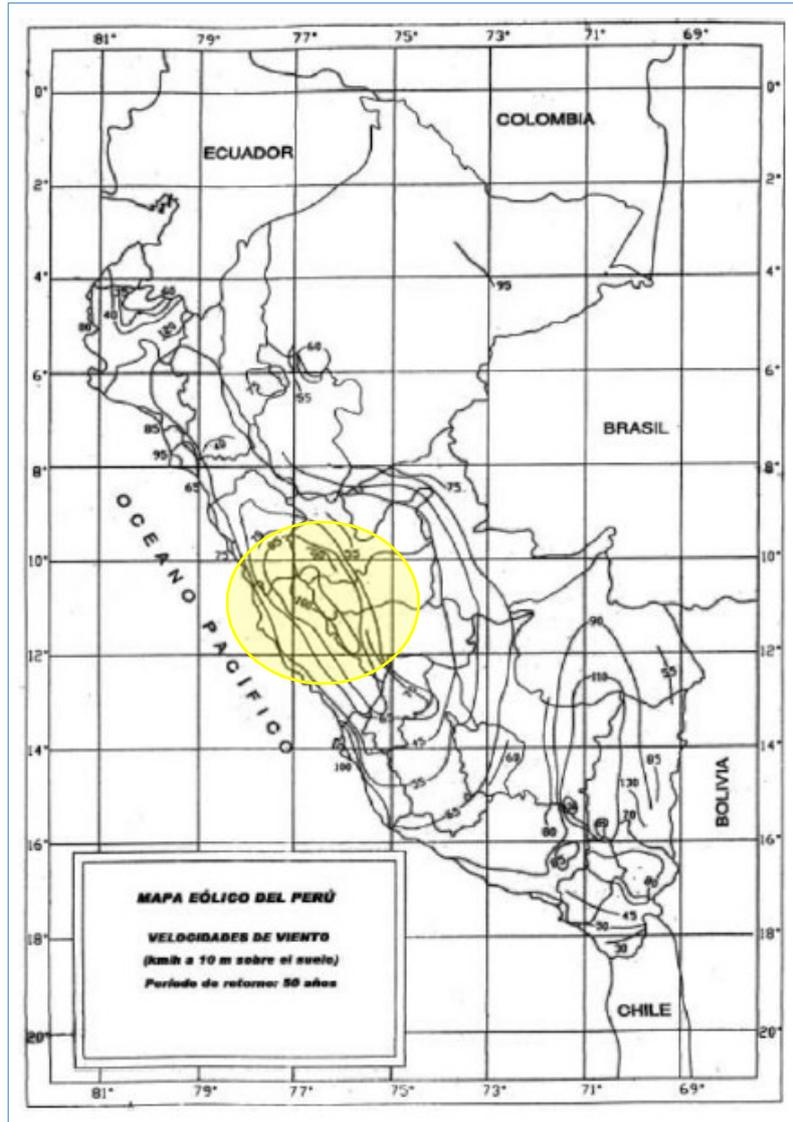


Ilustración 1.3. Zonas de viento en Perú (Norma E.090)

### Viento en el exterior

La carga exterior ejercida por el viento se supondrá estática y perpendicular a la superficie sobre la cual se actúa. Se calculará mediante la siguiente expresión:

$$P = 0.005 \cdot C \cdot V^2$$

Siendo C un factor de forma adimensional determinado por la tabla 5.4 de la norma E.020.

**TABLA 5.4**  
**FACTORES DE FORMA (C) \***

CONSTRUCCIÓN	BARLOVENTO	SOTAVENTO
Superficies verticales de edificios	+0.8	-0.6
Anuncios, muros aislados, elementos con una dimensión corta en la dirección del viento	+1.5	
Tanques de agua, chimeneas y otros de sección circular o elíptica	+0.7	
Tanques de agua, chimeneas, y otros de sección cuadrada o rectangular	+2.0	
Arcos y cubiertas cilíndricas con un ángulo de inclinación que no exceda 45°	±0.8	-0.5
Superficies inclinadas a 15° o menos	+0.3	-0.6

	-0.7	
Superficies inclinadas entre 15° y 60°	+0.7 -0.3	-0.6
Superficies inclinadas entre 60° y la vertical	+0.8	-0.6
Superficies verticales o inclinadas (planas o curvas) paralelas a la dirección del viento	-0,7	-0,7
* El signo positivo indica presión y el negativo succión.		

*Tabla 1.1. Factores de forma (C) (Norma E.090)*

Como la norma de Perú no especifica qué zonas de cubierta quedan a presión y cuáles a succión en función de la dirección del viento y la geometría de la estructura, se procede a consultar el CTE y el Euro Código.

Según estas dos normas, hay tres zonas diferenciadas (A, B y C) y los coeficientes contemplados son muy similares a los de la norma E.020, superándolos en alguno de los casos. Por tanto, considerando que la norma española queda del lado de la seguridad, se empleará esta referencia para las hipótesis de carga debida al viento en diferentes situaciones.

Referencias para las hipótesis de viento:

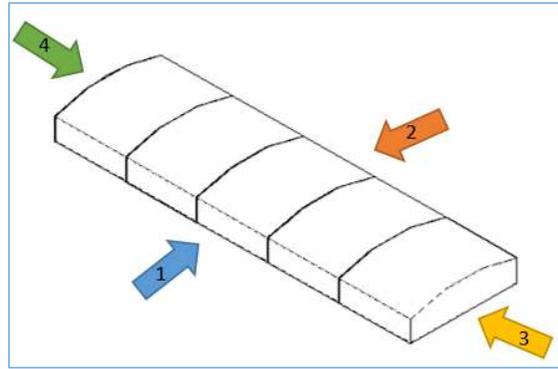


Ilustración 1.4. Referencias para las hipótesis de viento

PRIMERA HIPÓTESIS DE VIENTO. TRANSVERSAL, POR LA IZQUIERDA

CTE

- $g/d = 2/9 = 0,22 \rightarrow$  Para  $0 < g/d < 0,5$  el coeficiente de presión exterior,  $C_{pe,10}$ , correspondiente a la superficie A, se obtendrá mediante interpolación lineal.
- $f/d = 1/9 = 0,11$

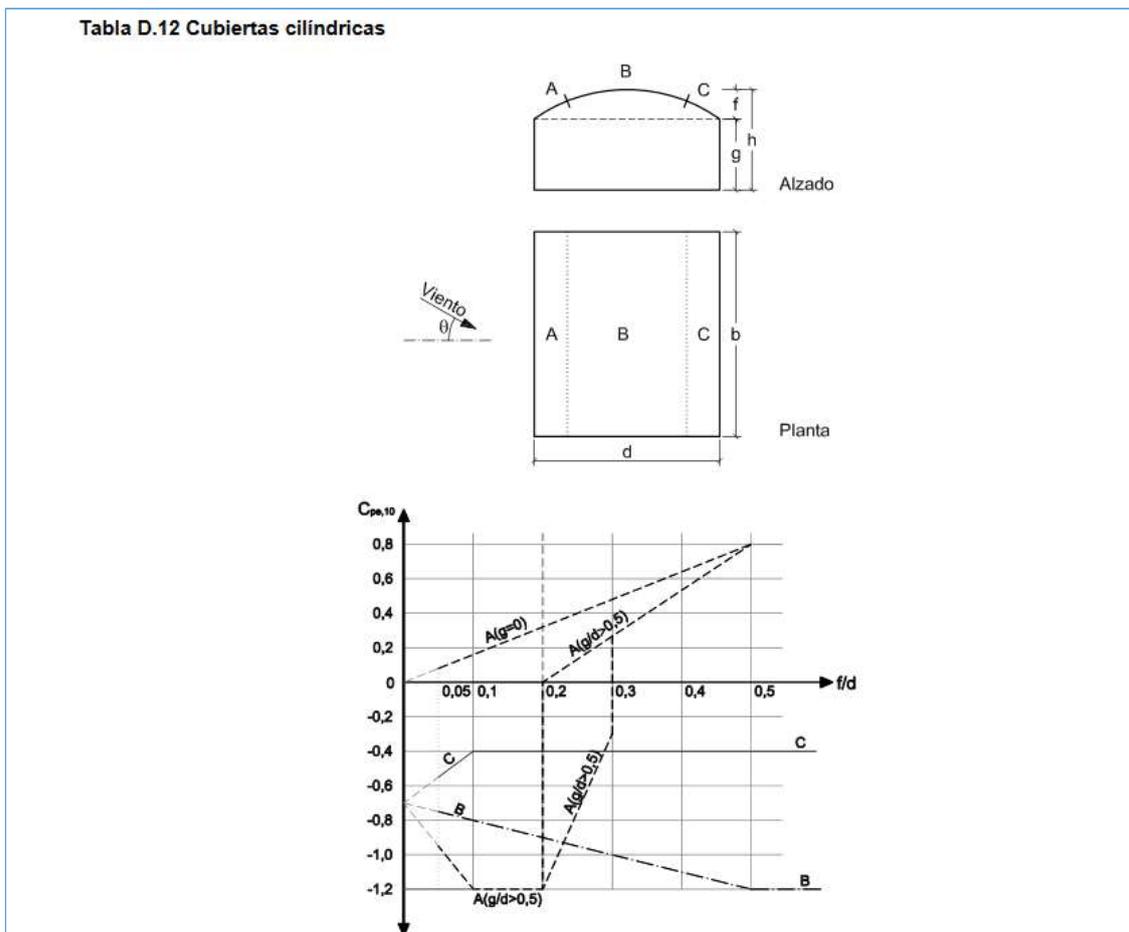


Ilustración 1.5. Coeficientes para el viento transversal sobre cubierta cilíndrica (CTE)

Por interpolación lineal,  $C_{pe,10}$  a presión, para la zona A sería igual a  $0,108 \approx 0,11$ .

Para la zona B, a succión, el coeficiente sería -0,8.

Para la zona C, a succión, el coeficiente sería -0,4.

A	B	C
0,11	-0,8	-0,4

Tabla 1.2. Coeficientes de cada zona para Viento 1

ZONA A - Presión	ZONA B - Succión	ZONA C - Succión
$q_v = 0,005 \cdot 0,11 \cdot 100^2$	$q_v = 0,005 \cdot (-0,8) \cdot 100^2$	$q_v = 0,005 \cdot (-0,4) \cdot 100^2$
=	=	=
<b>5,5 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>-40 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>-20 kg/m<sup>2</sup></b>
<b>0,055 kN/m<sup>2</sup></b>	<b>-0,4 kN/m<sup>2</sup></b>	<b>-0,2 kN/m<sup>2</sup></b>

Tabla 1.3. Carga superficial en cada zona (V1)

Con la tabla de cargas de viento V1 se puede determinar las cargas por unidad de longitud a lo largo de la viga en arco de uno de los pórticos centrales:

Zona A	$q_{V1,A} = 0,055 [kN/m^2] \cdot 2,5 [m] =$	<b>0,1375 [kN/m]</b>
Zona B	$q_{V1,B} = -0,4 [kN/m^2] \cdot 2,5 [m] =$	<b>-1 [kN/m]</b>
Zona C	$q_{V1,C} = -0,2 [kN/m^2] \cdot 2,5 [m] =$	<b>-0,5 [kN/m]</b>

Tabla 1.4. Carga lineal en cada zona (V1)

En los pórticos hastiales, la carga sería la mitad.

#### SEGUNDA HIPÓTESIS DE VIENTO. TRANSVERSAL, POR LA DERECHA

Esta hipótesis es simétrica a la primera, por lo que los coeficientes y las cargas no varían.

#### TERCERA HIPÓTESIS DE VIENTO. LONGITUDINAL DELANTERA.

Debido a que ni la norma de Perú, ni el CTE, ni el Euro Código especifican cuál es la zonificación de viento en dirección longitudinal a la nave cuando la cubierta tiene forma curva, se han consultado varios proyectos de universidades publicados en internet. Tras ese proceso, se ha optado por la siguiente solución:

La cubierta cilíndrica, cuando está expuesta a viento en la dirección longitudinal, se considera como una cubierta plana, ya que todas las líneas de viento que pasan por encima de la cubierta lo hacen a una misma distancia. Al igual que antes, la norma E.020 peruana no especifica las zonas de succión y presión de una cubierta plana, por lo que se acude de nuevo al Código Técnico (España). En este caso, la determinación del coeficiente de presión exterior ( $C_{pe}$ ) se realizará mediante la tabla D.4 del anejo D del DB SE-AE.

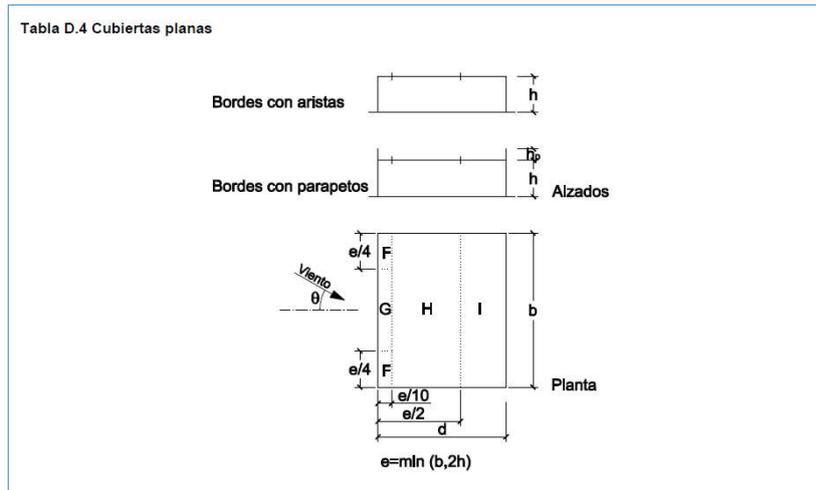


Ilustración 1.6. Zonas de viento para la situación V3 (CTE)

Se tomará como altura de la cubierta plana el punto más alto de la cubierta en arco, de forma que los cálculos queden por el lado de la seguridad.

$$h_p/h = 0 \text{ (Bordes con aristas)}$$

$$e = \min(b; 2h) = \min(9; 2 \cdot 4) = 8$$

$$A \geq 10m^2$$

$$e/10=0,8$$

$$e/2=4$$

$$e/4=2$$

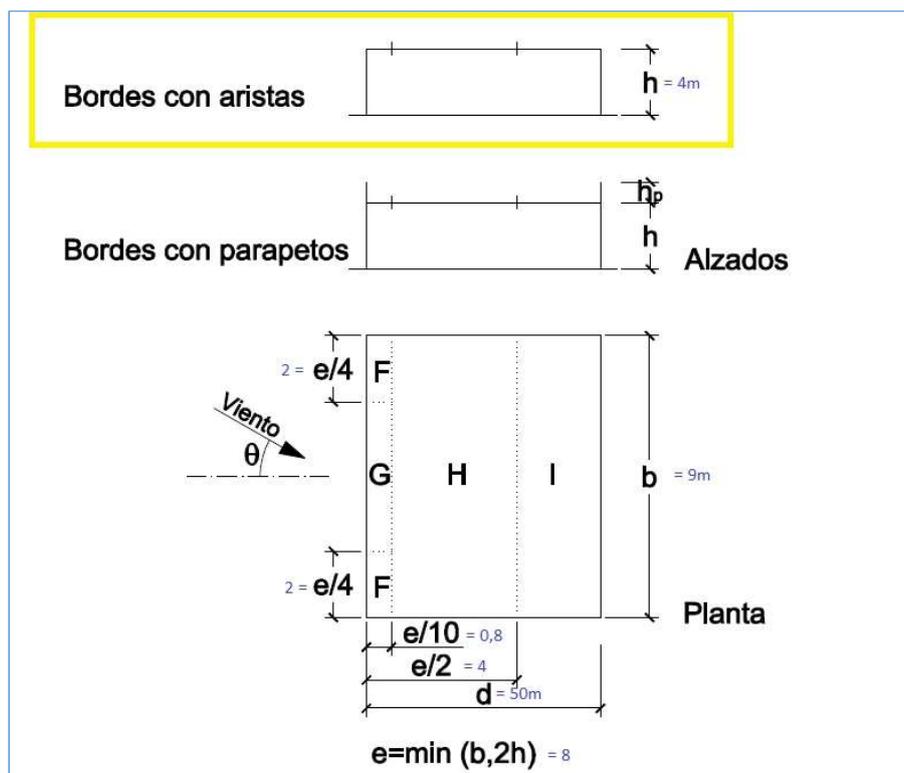


Ilustración 1.7. Valores de e para el cálculo de V3

Según la tabla D.4:

F	G	H	I
-1,8	-1,2	-0,7	±0,2

Tabla 1.5. Coeficientes de cada zona para la situación de Viento 3

ZONA F - Succión	ZONA G - Succión	ZONA H - Succión	ZONA I - Presión/Succión
$q_v$ $= 0,005 \cdot (-1,8)$ $\cdot 100^2$ $-90 \text{ kg/m}^2$ $-0,9 \text{ kN/m}^2$	$q_v$ $= 0,005 \cdot (-1,2)$ $\cdot 100^2$ $-60 \text{ kg/m}^2$ $-0,6 \text{ kN/m}^2$	$q_v$ $= 0,005 \cdot (-0,7)$ $\cdot 100^2$ $-35 \text{ kg/m}^2$ $-0,35 \text{ kN/m}^2$	$q_v$ $= 0,005 \cdot (0,2)$ $\cdot 100^2$ $\pm 10 \text{ kg/m}^2$ $\pm 0,1 \text{ kN/m}^2$

Tabla 1.6. Cargas superficiales en cada zona (V3)

Las cargas lineales a introducir sobre cada pórtico de la estructura serían las siguientes:

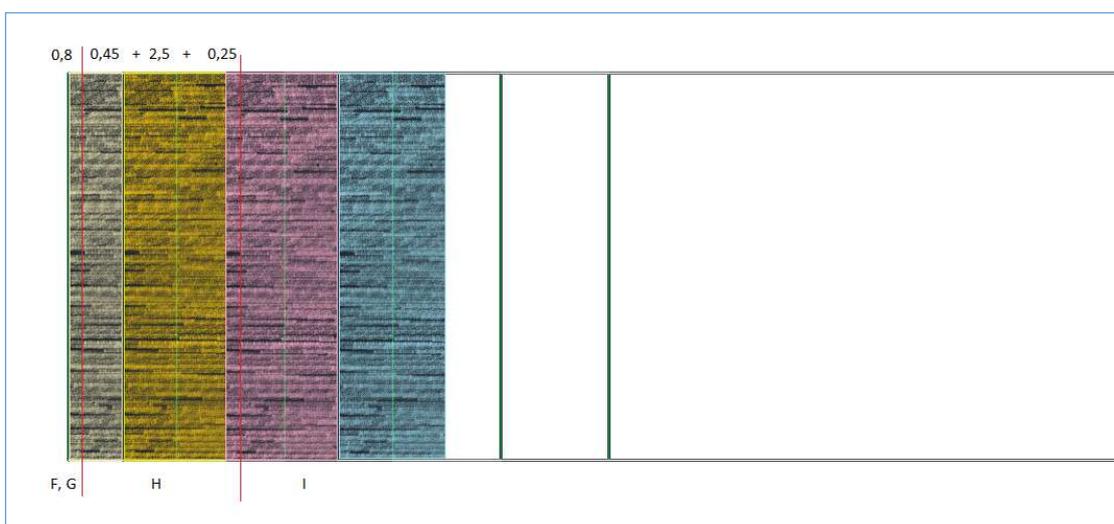


Ilustración 1.8. Zonificación de la cubierta en planta (V3)

Pórtico hastial (área tributaria = 9 x 1,25)

<b>Zona F+H</b>	$q_{V3,F} = -0,9 \cdot 0,8 - 0,35 \cdot 0,45 =$	$-0,4815 \text{ [kN/m]}$
<b>Zona G+H</b>	$q_{V3,G} = -0,6 \cdot 0,8 - 0,35 \cdot 0,45 =$	$-0,3735 \text{ [kN/m]}$

Tabla 1.7. Carga lineal sobre el pórtico hastial (V3)

Pórtico 2 (área tributaria = 9 x 2,5)

<b>Zona H</b>	$q_{VH} = -0,35 \cdot 2,5 =$	$-0,875 \text{ [kN/m]}$
---------------	------------------------------	-------------------------

Tabla 1.8. Carga lineal sobre el pórtico 2 (V3)

Pórtico 3 (área tributaria = 9 x 2,5)

<b>Zonas H+I*</b>	$q_{VH,I} = -0,35 \cdot 0,25 - 0,1 \cdot 2,25 =$	$-0,422 \text{ [kN/m]}$
-------------------	--	-------------------------

Tabla 1.9. Carga lineal sobre el pórtico 3 (V3)

\*Para la zona I se ha tomado directamente el valor de succión (-) porque se suma al de la zona H y da un resultado más crítico.

Resto de pórticos (área tributaria = 9 x 2,5 excepto el hastial)

<b>Zona I</b>	$q_{VI} = \pm 0,1 \cdot 2,5 =$	$\pm 0,25 [kN/m]$
---------------	--------------------------------	-------------------

Tabla 1.10. Carga lineal para los demás pórticos (V3)

#### CUARTA HIPÓTESIS DE VIENTO. LONGITUDINAL TRASERA

Esta hipótesis es simétrica a la tercera, por lo que los coeficientes y las cargas no varían.

##### Viento en el interior

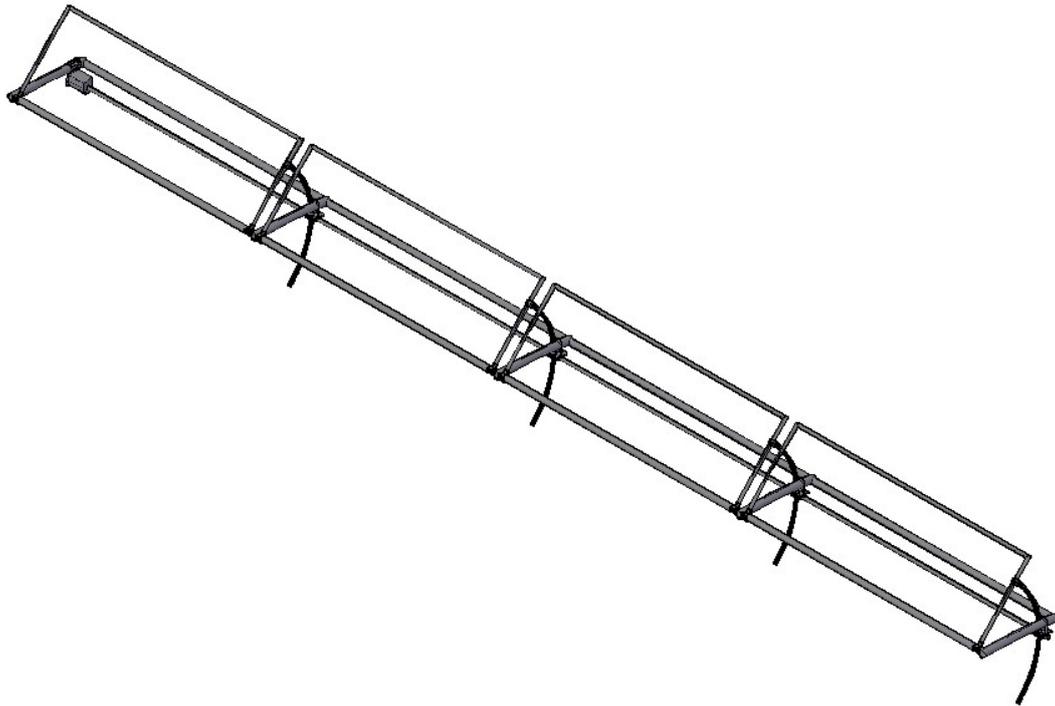
Norma E.020 de Perú: “Para el diseño de los elementos de cierre, incluyendo sus fijaciones y anclajes, que limitan en cualquier dirección el nivel que se analiza, tales como paneles de vidrio, coberturas, alféizares y elementos de cerramiento, se adicionará a las cargas exteriores calculadas según el Artículo 12 (12.4), las cargas interiores (presiones y succiones) calculadas con los factores de forma para presión interior de la Tabla 5.”

TABLA 5 FACTORES DE FORMA PARA DETERMINAR CARGAS ADICIONALES EN ELEMENTOS DE CIERRE (C)		
A B E R T U R A S		
Uniforme en lados a barlovento y sotavento	Principales en lado a barlovento	Principales en lado a sotavento o en los costados
±0,3	+0,8	-0,6

Ilustración 1.9. Factores de forma (C) para el viento en el interior (Norma E.090)

Como el invernadero tiene una geometría uniforme y simétrica, sus aberturas también lo son: las ventanas de cubierta están igualmente colocadas a barlovento y sotavento, y hay puerta en los dos extremos. El factor de forma correspondiente entonces es ±0,3 para cualquiera de las hipótesis de viento:

$$P = 0,005 \cdot C \cdot V^2 = 0,005 \cdot \pm 0,3 \cdot 100^2 = \pm 15 \text{ kg/m}^2 = 0,15 \text{ kN/m}^2$$



*Ilustración 1.10. Apertura de cubierta*

Las cargas a añadir en cada pórtico debido al viento interior serían entonces:

Pórticos centrales.  $0,15 \frac{kN}{m^2} \cdot 2,5 m = 0,375 \frac{kN}{m}$

Pórticos hastiales.  $0,1875 \frac{kN}{m}$

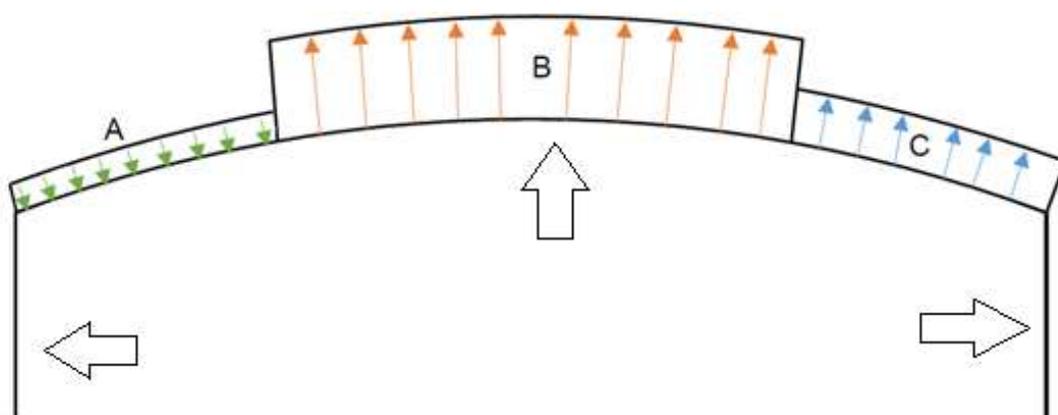
Dependiendo de los huecos que estén abiertos o cerrados, la situación de carga resultante de viento (exterior + interior) variará. A continuación, se muestran las diferentes situaciones posibles:

**Situación 1:** Todos los huecos cerrados.

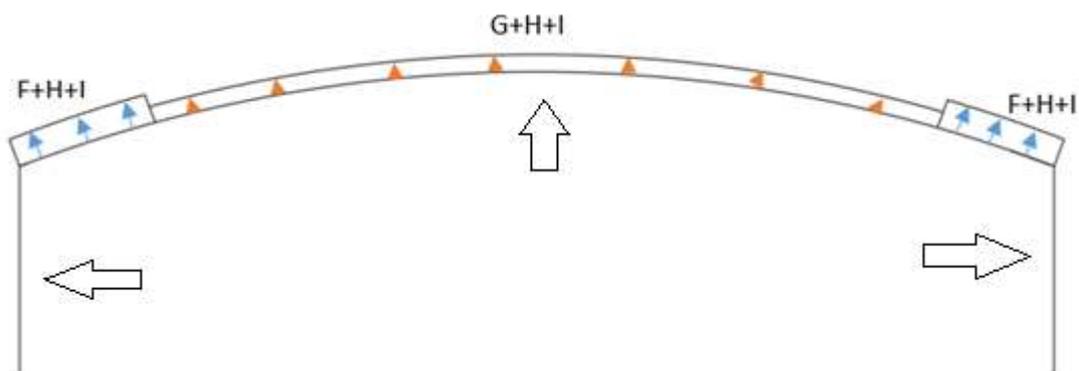
En este caso no habría que añadir ninguna hipótesis de viento interior.

**Situación 2:** Puerta delantera abierta, todos los demás huecos cerrados.

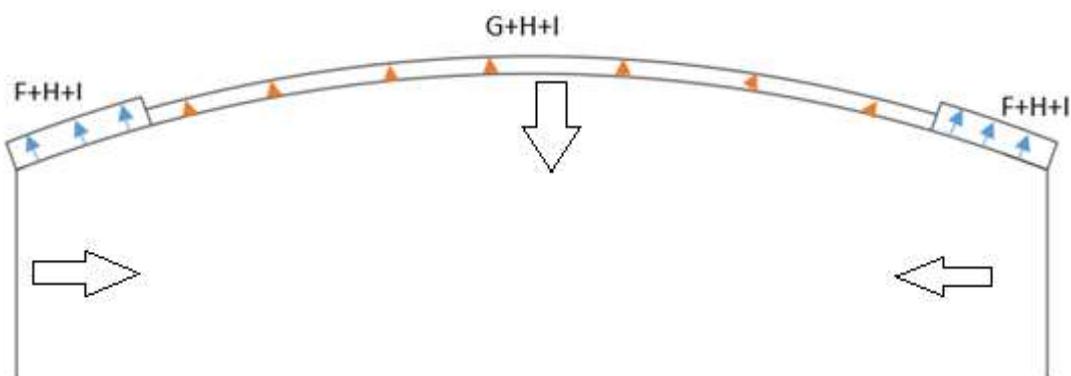
Viento transversal. Hipótesis 1 o 2. Genera presión interior:



Viento longitudinal. Hipótesis 3: hueco a barlovento.



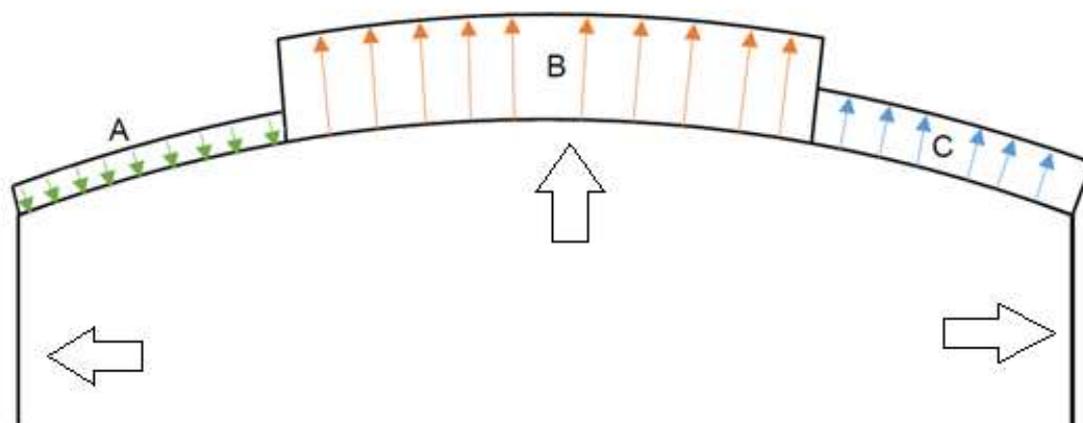
Hipótesis 4: hueco a sotavento



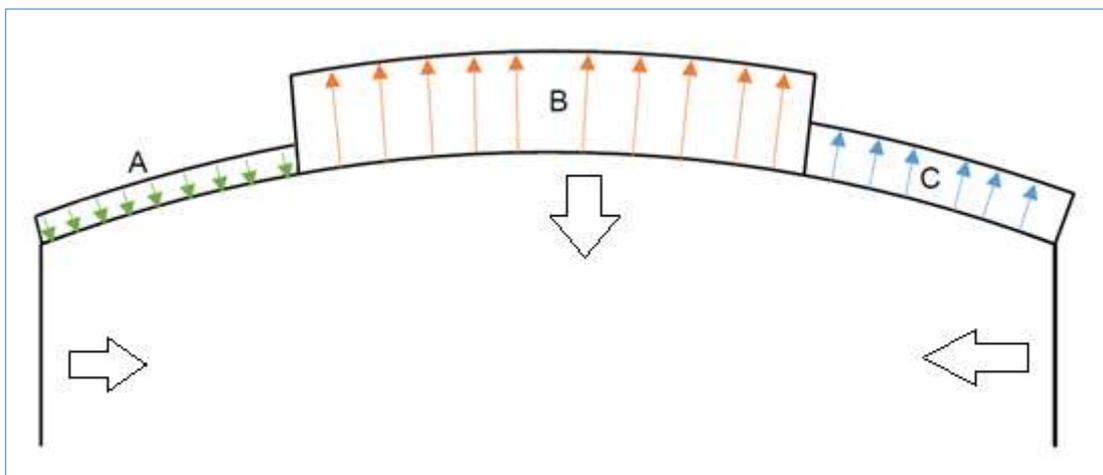
Hay otra opción simétrica, que es que la puerta trasera esté abierta y la delantera cerrada.

**Situación 3:** Puerta cerrada y ventanas de la izquierda de la cubierta abiertas.

Hipótesis 1: huecos a barlovento



Hipótesis 2: huecos a sotavento.



Hay otra opción simétrica, que es que las ventanas de la derecha de la cubierta estén abiertas y las otras cerradas.

### Situación más desfavorable

Tras analizar todas las posibilidades, se comprueba que la peor combinación de viento exterior + interior es aquella en la que la succión exterior se suma a la presión interior. Como la mayor carga de viento a succión se da para la situación de viento transversal, se considerará la siguiente carga de viento para la introducción en CYPE:

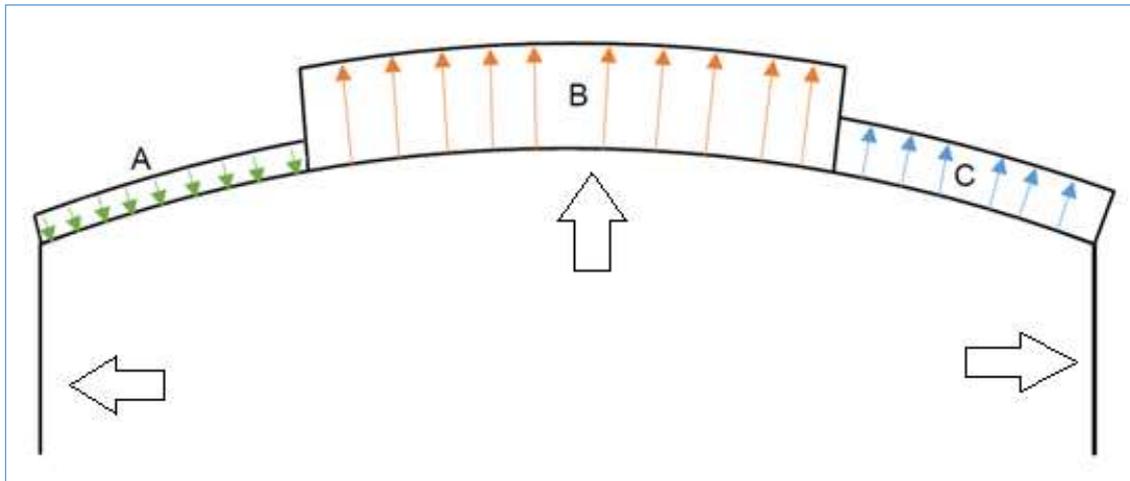


Ilustración 1.11. Situación más desfavorable de viento interior y exterior

**Carga de viento sobre el cerramiento vertical**

La norma de Perú indica lo siguiente:

Superficies verticales de edificios	+0.8	-0.6
-------------------------------------	------	------

Superficies verticales o inclinadas (planas o curvas) paralelas a la dirección del viento	-0,7	-0,7
---	------	------

**Cerramientos laterales**

Para las hipótesis de viento 1 y 2 (transversal) habrá una carga unitaria de

$$q = 0,005 \cdot 0,8 \cdot 100^2 = 40 \text{ kg/m}^2 \text{ a barlovento y de}$$

$$q = 0,005 \cdot (-0,6) \cdot 100^2 = -30 \text{ kg/m}^2 \text{ a sotavento en los cerramientos laterales.}$$

La carga lineal sobre los pilares sería entonces de:

Pórticos hastiales:  $0,4 \cdot 1,25 = 0,5 \text{ kN/m}$  y  $-0,3 \cdot 1,25 = -0,375 \text{ kN/m}$

Pórticos centrales:  $1 \text{ kN/m}$  y  $-0,75 \text{ kN/m}$

Para las hipótesis de viento 3 y 4 habrá una carga unitaria de

$$q = 0,005 \cdot (-0,7) \cdot 100^2 = -35 \text{ kg/m}^2 \text{ a ambos lados.}$$

Pórticos hastiales:  $-0,35 \cdot 1,25 = -0,4375 \text{ kN/m}$

Pórticos centrales:  $-0,35 \cdot 2,5 = -0,875 \text{ kN/m}$

**Cerramiento delantero/trasero**

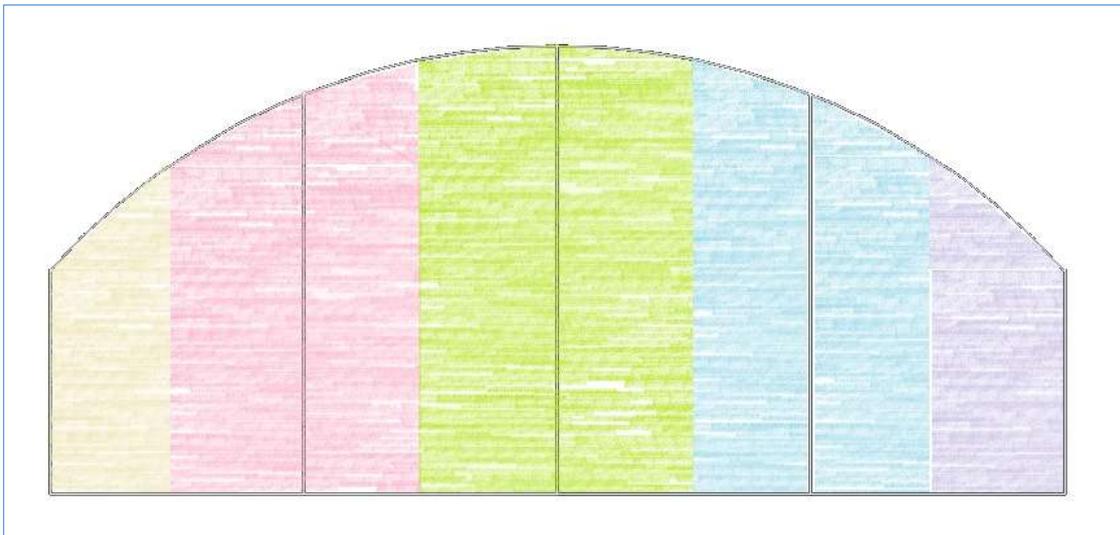


Ilustración 1.12. Áreas tributarias de los pilares del pórtico hastial

Para las hipótesis de viento 1 y 2 (transversal), los cerramientos delantero y trasero están en el plano de la carga.

Por tanto, el resultado sería:

$$\text{Área del cerramiento} = 30461505,60 \text{ mm}^2 \cong 30,46 \text{ m}^2$$

$$\text{Pilares extremos: } -0,35 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,125 \text{ m} = -0,394 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Pilarillos: } -0,35 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 2,25 \text{ m} = -0,788 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Para las hipótesis de viento 3 y 4 (longitudinal), los cerramientos delantero y trasero están en el plano perpendicular a la carga.

Por tanto, el resultado sería:

A barlovento

$$\text{Pilares extremos: } 0,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,125 \text{ m} = 0,45 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Pilares centrales: } 0,4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 2,25 \text{ m} = 0,9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

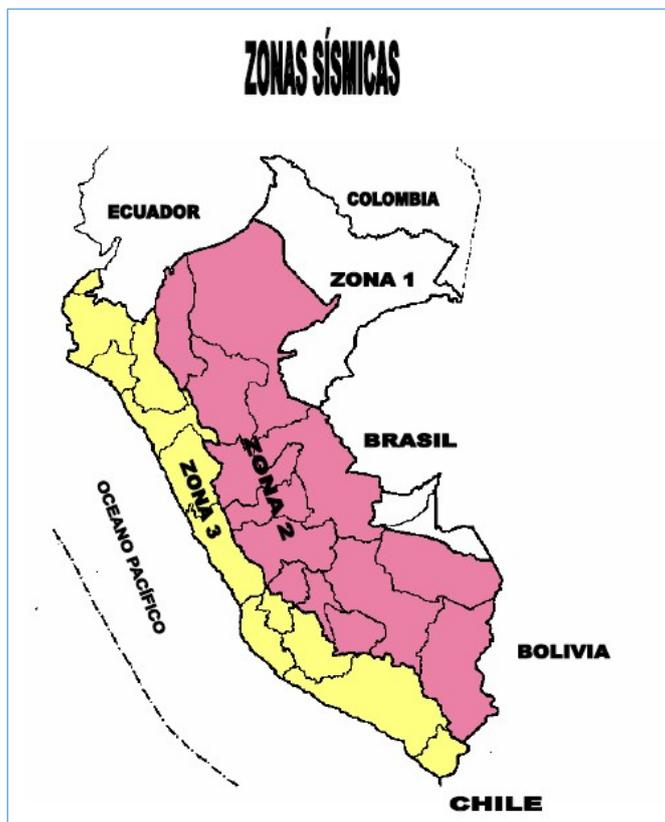
A sotavento

$$\text{Pilares extremos: } -0,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 1,125 \text{ m} = -0,3375 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Pilares centrales: } -0,3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 2,25 \text{ m} = -0,675 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

**1.1.6. Sismo**

La Norma NTE E.030 de Perú contempla el diseño sismo-resistente en función de la zona de construcción, el tipo de estructura y otros parámetros. La costa central de Perú se encuentra en la zona 3 del mapa sísmico, con el factor de zona más alto:



*Ilustración 1.13. Mapa sísmico de Perú (RNE)*

Tabla N°1 FACTORES DE ZONA	
ZONA	Z
3	0,4
2	0,3
1	0,15

*Tabla 1.11. Factores de sismo según zona (RNE)*

Sin embargo, por el tipo de construcción según la página 12 de la norma (tabla de clasificación – tipo D) no es necesario considerar la carga de sismo.

D Edificaciones Menores	Edificaciones cuyas fallas causan pérdidas de menor cuantía y normalmente la probabilidad de causar víctimas es baja, como cercos de menos de 1,50m de altura, depósitos temporales, pequeñas viviendas temporales y construcciones similares.	(*)
-------------------------------	--	-----

(\*) En estas edificaciones, a criterio del proyectista, se podrá omitir el análisis por fuerzas sísmicas, pero deberá proveerse de la resistencia y rigidez adecuadas para acciones laterales.

Tabla 1.12. Clasificación de las edificaciones en cuanto a sismo (RNE)

### 1.1.7. Acciones térmicas

Artículo 15 de la norma E.020:

#### Artículo 15.- FUERZAS TERMICAS

El diseño de edificaciones tomará en cuenta las fuerzas y los movimientos que resulten de un cambio mínimo de temperatura de 20° C para construcciones de concreto y/o albañilería y 30°C para construcciones de metal.

A la vista de los datos climatológicos obtenidos por el Instituto Huayuna ([Documento 4, Apdo. 2](#)), que muestran una variación de T<sup>a</sup> menor a 30°C en la zona de aplicación del trabajo, no será necesario contemplar el efecto de acciones térmicas sobre la estructura del invernadero.

### 1.2. Combinaciones

A continuación, se presentan las combinaciones que se han tenido en cuenta en CYPE para el dimensionamiento de los elementos de la estructura.

Combinación	Peso Propio	V 1 y 2. Transversal (interior + exterior)	V 3 y 4. Longitudinal (interior + exterior)	N 1
1	0.800			
2	1.350			
3	0.800	1.500		
4	1.350	1.500		
5	0.800		1.500	
6	1.350		1.500	
7	0.800			1.500
8	1.350			1.500
9	0.800	0.900		1.500
10	1.350	0.900		1.500
11	0.800		0.900	1.500
12	1.350		0.900	1.500
13	0.800	1.500		0.750
14	1.350	1.500		0.750
15	0.800		1.500	0.750
16	1.350		1.500	0.750

Tabla 1.13. Combinaciones de carga (CYPE)

### 1.3. Estudio en CYPE 3D

Dado que el generador de pórticos no tiene la opción de creación de pórticos con cubierta en arco, se accede directamente al programa de cálculo de estructuras metálicas para introducir la geometría de los pórticos manualmente.

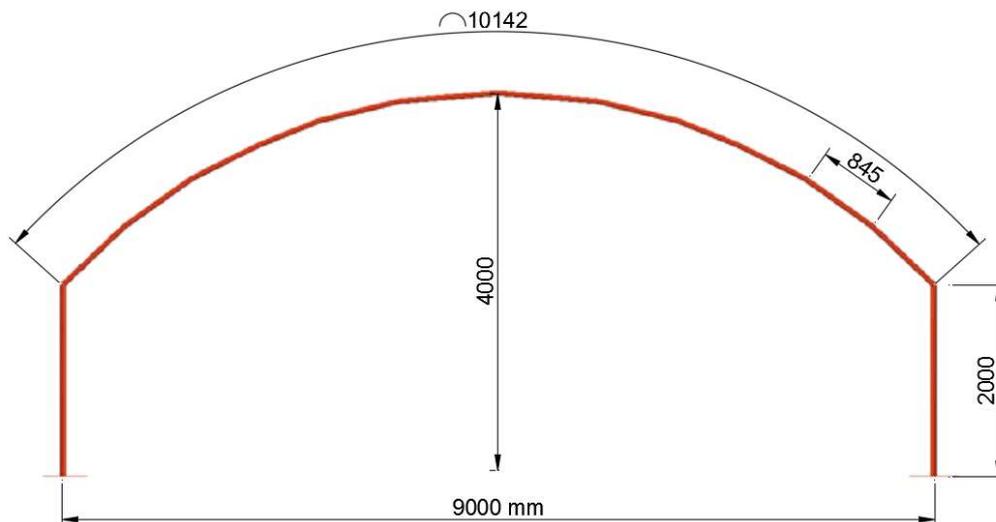
#### 1.3.1. Elementos barra

El programa Metal 3D no permite la creación de vigas curvas, por lo que los arcos del invernadero se han modelizado como una serie de barras de pequeña longitud unidas rígidamente entre sí, cuyas direcciones conforman finalmente el arco deseado con suficiente similitud.

Las dos condiciones principales que se han impuesto para la modelización de las barras han sido:

- La cota del punto más alto del arco (4 metros) debe coincidir con el nudo de mayor cota de todos los elementos barra introducidos.
- La longitud de cada elemento barra debe ser tal que no comprometa la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Siguiendo las directrices mencionadas, la modelización del pórtico tipo quedaría como se muestra a continuación:



*Ilustración 1.14. Geometría pórtico tipo*

Como se puede observar, la cubierta está formada por doce elementos tipo barra. La longitud de cada uno de ellos es de aproximadamente 0,845 metros.

#### 1.3.2. Cargas

Todas las cargas previamente calculadas se han introducido en la estructura del programa como cargas longitudinales sobre las barras de la misma.

A pesar de que el invernadero cuenta con elementos estructurales perpendiculares al plano de los pórticos, éstos no se han calculado como correas, pues su función, más que transmitir las cargas de la cubierta a las vigas y pilares, es proporcionar mayor rigidez al conjunto y limitar la longitud de pandeo de la viga en arco de cubierta fuera de su plano. Por esa razón, las cargas superficiales medidas en  $[kN/m^2]$  que se han calculado con la Norma de Perú (E.060 – Cargas) se han trasladado directamente como carga por unidad de longitud  $[kN/m]$  a cada uno de los pórticos del invernadero.

### 1.3.3. Vinculación de nudos

En este apartado se distinguirá entre dos tipos de vinculaciones, tal como lo hace el programa Cype Metal 3D. Por un lado, las vinculaciones interiores; aquellas que se definen en cada uno de los nudos en los que concurren dos o más elementos. Por otro lado, las vinculaciones exteriores; son las que describen la fijación de un nudo a algún elemento externo, como puede ser el terreno.

En cuanto a las vinculaciones interiores, los nudos entre vigas y pilares se han definido como rígidos. Esto se debe a que los elementos auxiliares que van a emplearse para el montaje del invernadero no permitirán el giro relativo de los elementos que se fijen en él una vez terminada la estructura. Sin embargo, sí se han articulado los extremos de aquellos elementos que son tirantes, como las cruces de San Andrés que arriostran la nave.

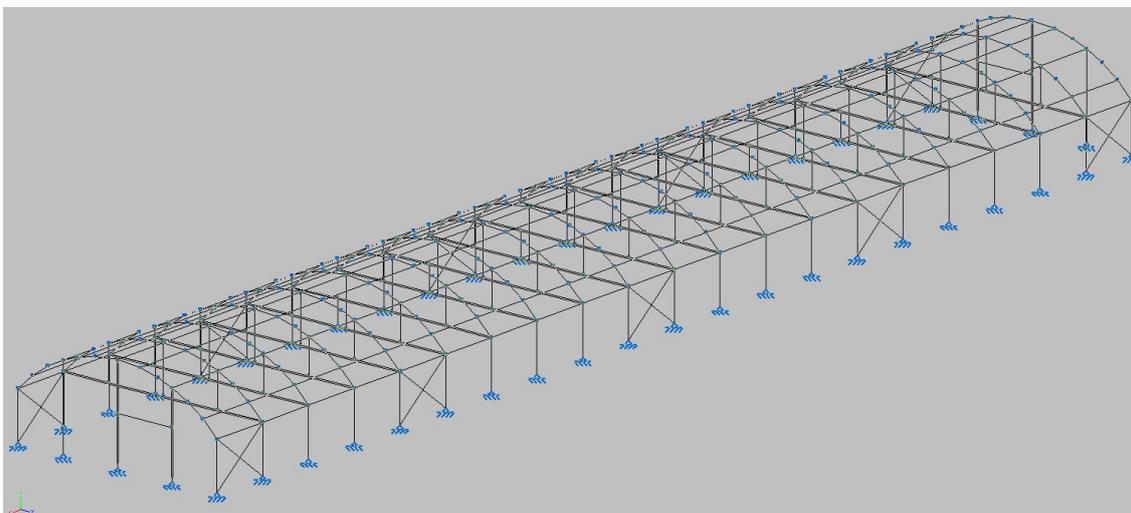


Ilustración 1.15. Estructura 3D

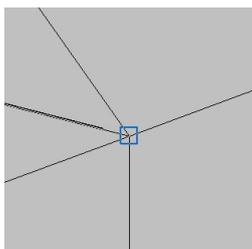


Ilustración 1.16. Nudo rígido

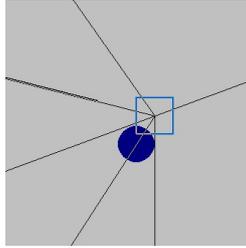


Ilustración 1.17. Articulación cruz San Andrés

Las vinculaciones al terreno, sin embargo, se han definido como articuladas. Esto quiere decir que el extremo inferior de cada pilar estará unido a su correspondiente zapata mediante elementos que no bloqueen su giro. Esta decisión se ha tomado porque el momento flector que soportarán los pilares debido a las cargas es mínimo, y no se ve necesario trasladar esos esfuerzos a la cimentación. Además, esta tipología de unión permite colocar zapatas más reducidas, lo que favorece tanto el montaje en obra como el precio de las mismas.

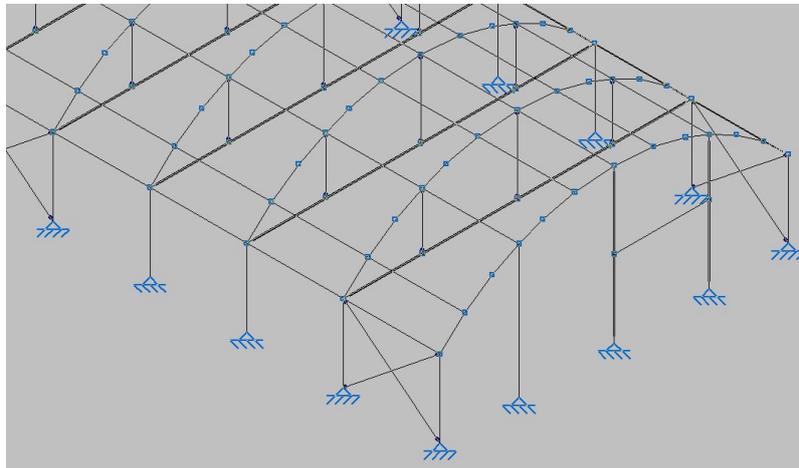


Ilustración 1.18. Apoyos articulados

#### 1.3.4. Longitud de pandeo

La longitud de pandeo se ha establecido como igual a la longitud de cada elemento ( $\beta=1$ ) en todos los elementos salvo en las vigas en arco.

Se ha podido comprobar que los invernaderos suelen contar con elementos auxiliares tanto dentro como fuera del plano de cada pórtico para disminuir la longitud de pandeo de los arcos. A continuación, se muestran algunas imágenes de los elementos mencionados:



*Ilustración 1.19. Tirantes para limitar longitud de pandeo*



*Ilustración 1.20. Tirantes para limitar longitud de pandeo (II)*

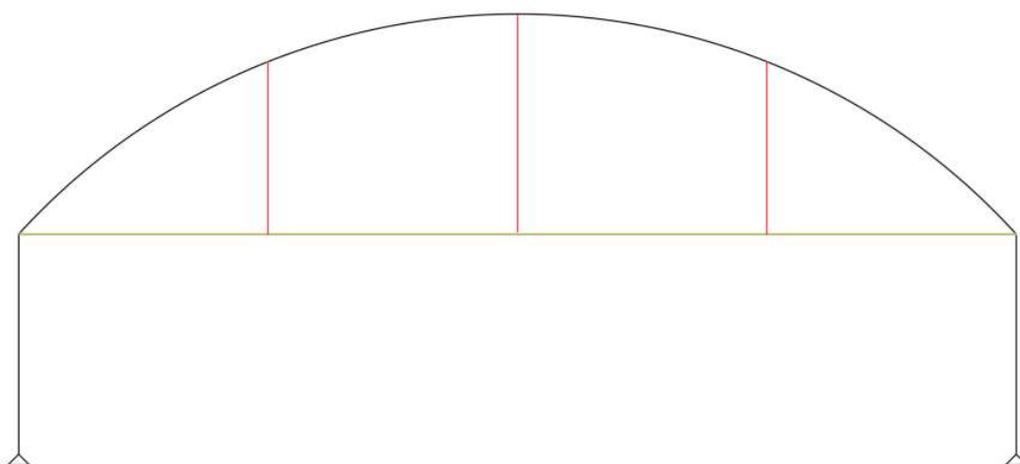
En este trabajo se han colocado los siguientes elementos para limitar la longitud de pandeo:

***Dentro del plano***

Se ha optado por tres tirantes verticales que fijan los nudos del arco y evitan que éste pandee en el plano tanto hacia arriba como hacia abajo. Para poder colocar dichos tirantes, se ve necesario incluir un elemento horizontal (cable) que trabajará a tracción y sostendrá los elementos verticales.

El siguiente esquema muestra los elementos descritos:

- Tirantes
- Cable

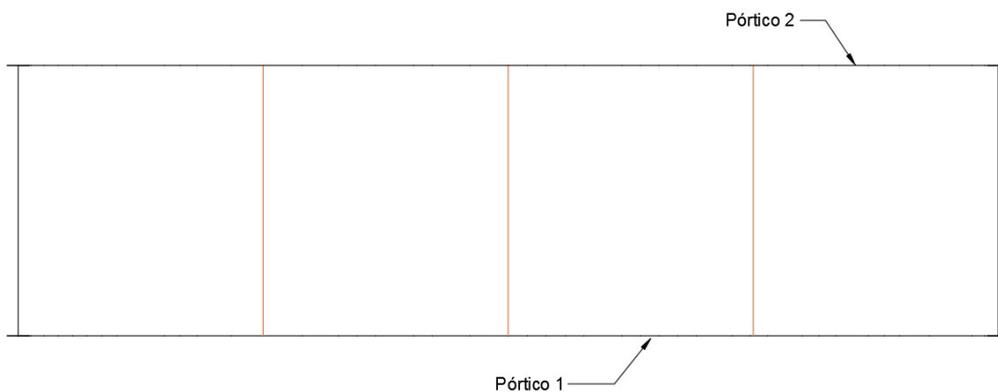


*Ilustración 1.21. Modelización de los tirantes del pórtico*

**Fuera del plano**

En el plano perpendicular a los pórticos del invernadero se ha optado por colocar perfiles tubulares para fijar los nudos que ya tenían limitada la  $\beta$  dentro del plano, haciendo así coincidir la longitud de pandeo en ambos planos. Habrá por tanto tres perfiles tubulares el perpendicular a cada pórtico, tal como se muestra en la siguiente imagen:

- Perfil tubular circular para limitar  $\beta$  fuera del plano



*Ilustración 1.22. Modelización perfiles longitudinales*

En el programa CYPE, todos los elementos descritos en este apartado están situados cada tres elementos barra en el arco. Por tanto, la longitud de pandeo para esos elementos barra será  $3L$  tanto dentro como fuera del plano.

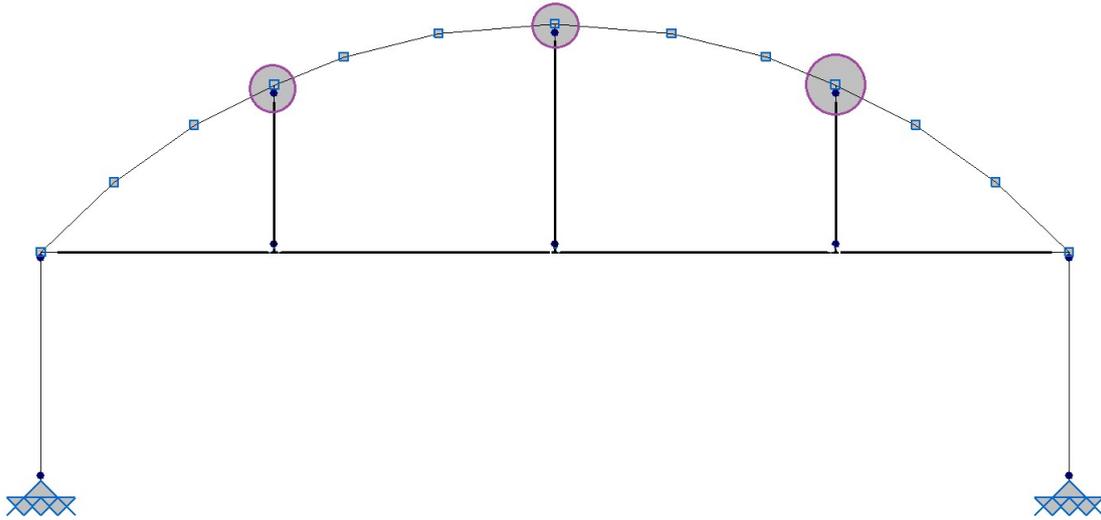


Ilustración 1.23. Pórtico modelizado en CYPE

Al haberse modelizado el arco como una serie de barras unidas rígidamente entre sí, cada una con una dirección diferente, conformando una geometría lo más similar posible a un arco, el programa no encuentra un recuadro completo dentro del propio plano y por tanto no dimensiona los tirantes verticales de forma correcta, sino que los considera barras rígidamente. Incluye el trabajo a flexión y compresión, cuando en realidad los tirantes verticales trabajarán únicamente a esfuerzo axial.

En consecuencia, se ha optado por dimensionar esos elementos de forma manual con un cálculo de estática. Con el esfuerzo axial más crítico que CYPE considera para dicho elemento y la tensión límite de cálculo del acero empleado (S235), se procederá a obtener la sección necesaria para el tirante.

### 1.3.5. Coeficiente de momentos

Tras realizar un primer dimensionamiento de los perfiles necesarios para soportar las cargas introducidas en el programa, se observaba que los resultados para las vigas en arco daban tamaños de elemento más grandes de lo habitual para este tipo de estructura, ligera y con cargas pequeñas.

Se pudo comprobar que estos resultados se debían a las condiciones de flexión y axial de compresión combinados, cuyas ecuaciones son:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + \alpha_z \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + \alpha_y \cdot k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1$$

Por lo que se decidió realizar el cálculo de los coeficientes de momento  $c_{m,y}$  y  $c_{m,z}$  para ajustarlos a la realidad.

El coeficiente de momento depende del diagrama de momento flector. En el caso de las barras consideradas, se trata de un diagrama lineal. Por tanto, el  $c_m$  se calcula de la siguiente manera:

Tabla 6.10 Coeficientes del momento equivalente		
Factor de momento flector	Eje de flexión	Puntos arriostrados en dirección
$c_{m,y}$	y-y	z-z
$c_{m,z}$	z-z	y-y
$c_{m,LT}$	y-y	y-y
<b>Diagrama de Fletores</b>	<b>Factor de momento uniforme equivalente</b>	
	$c_{m,y} = c_{m,i} (i=y)$	
	$c_{m,z} = c_{m,i} (i=z)$	
	$c_{m,LT} = c_{m,i} (i=LT)$	


$c_{m,i} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4$

Tabla 1.14. Coeficientes de momentos de las barras

$$c_{m,i} = 0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4$$

Siendo  $-1 < \psi < 1$  la relación entre el valor mínimo y el máximo del momento flector.

Aplicando este cálculo se han actualizado en el programa los coeficientes de las diferentes barras.

### 1.3.6. Arriostramiento

Se ha definido arriostramiento en el plano perpendicular a los pórticos para aquellas situaciones en las que el viento en dirección longitudinal al invernadero incida sobre los cerramientos y pilares de la estructura.

Debido a limitaciones del programa, no ha podido modelizarse el arriostramiento longitudinal en la cubierta.

Sin embargo, habiendo visto necesario colocar elementos longitudinales que enmarquen las ventanas de cubierta del invernadero, se ha optado por su instalación a lo largo de todo el módulo para proporcionar rigidez y ayuda frente a dichas cargas.

Como resultado, se han instalado cruces de San Andrés solamente en el plano vertical, entre pórticos consecutivos de la estructura.

### 1.3.7. Zapatas

Dado que la estructura es muy ligera y las cargas más desfavorables son de viento a succión, el principal problema que puede presentarse en el invernadero es que pierda su estabilidad cuando el viento incide a gran velocidad sobre él.

Por tanto, será importante tratar de encontrar una geometría para las zapatas que favorezca la estabilidad del conjunto: esto se consigue con una sección mayor y un canto no muy elevado.

El hormigón empleado será HA-25, con un tamaño máximo de árido de 20mm. La clase de exposición según la Norma EHE-08 se corresponde con la IIa:

**Clases Generales de Exposición**

Clase	Subclase	Ámbito	Tipo proceso	Descripción	Ejemplos
No agresiva	No agresiva	I	ninguno	Interiores de edificios, no sometidos a condensaciones. Elementos de hormigón en masa.	- Interiores de edificios, protegidos de la intemperie.
Normal	Humedad alta	IIa	Corrosión de origen diferente de los cloruros.	Interiores sometidos a humedades relativas medias altas (>65%) o a condensaciones. Exteriores en ausencia de cloruros, y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm. Elementos enterrados o sumergidos.	- Sotanos no ventilados. - cimentaciones. - tableros y pilas de puentes en zonas con precipitación media superior a 600 mm. - elementos de hormigón en cubiertas de edificios.

Tabla 1.15. Clases de exposición del hormigón (EHE 08)

Los datos para el cálculo del recubrimiento mínimo necesario son por tanto los siguientes:

Hormigón: HA-25
Consistencia: Blanda
Tamaño máximo de árido [mm]= 20
Clase general de exposición: IIa
Clase específica de exposición: ---
Control de la ejecución: Prefabricado, control intenso
Tipo de elemento: Prefabricado o lámina

Introduciendo estos datos y la geometría de la sección calculada por CYPE en el prontuario informático del hormigón, los resultados obtenidos son los siguientes:

Tipificación del hormigón: HA-25 / B / 20 / IIa
---

Recubrimiento mínimo [mm] = 20.0
Recubrimiento nominal [mm] (*) = 20.0
Máxima relación agua/cemento = 0.60
Mínimo contenido de cemento [kg/m <sup>3</sup> ] = 275.0
Resistencia mínima compatible [MPa] = 25.00

#### 1.4. Elementos de unión

Como ya se ha planteado en el [Documento 4 – Apartado 7.5](#), para el montaje de este invernadero se hará uso de elementos de unión prefabricados que permitan el encaje sencillo de los perfiles de la estructura.

Como dimensiones iniciales, se ha tomado para cada tubo del elemento un diámetro 2mm mayor al del perfil correspondiente y como espesor el mismo del perfil a encajar en cada hueco.

Con estos datos se ha realizado el modelo en Autodesk Inventor y se ha llevado a cabo un análisis tensional para verificar su validez.

El modelo se muestra en la siguiente imagen:



*Ilustración 1.24. Elemento de unión*

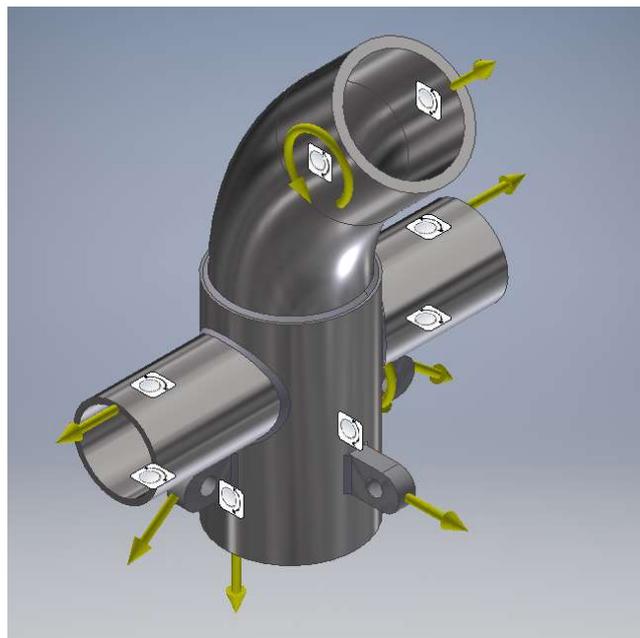
Para el análisis de tensión, se ha mallado el modelo quedando de la siguiente manera:



*Ilustración 1.25. Modelo mallado para el análisis tensional de la unión*

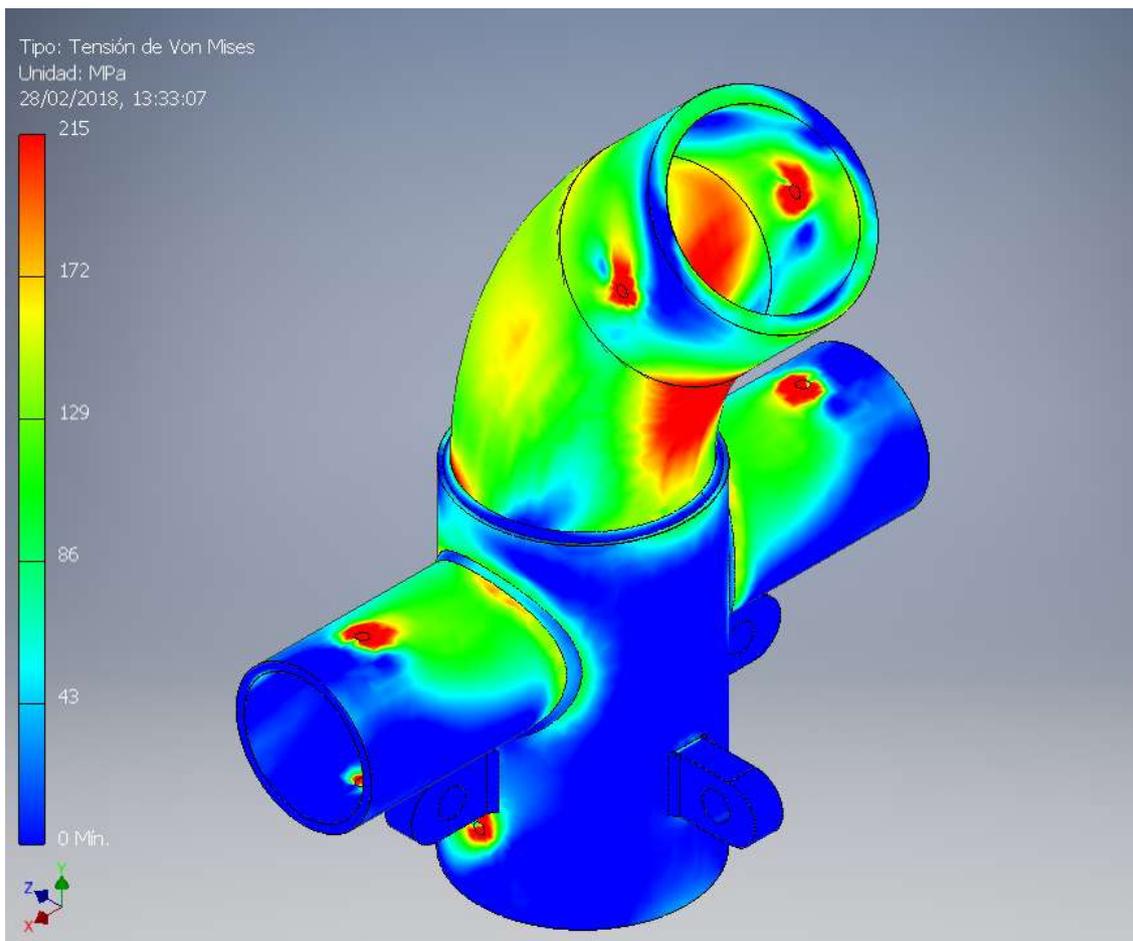
Las condiciones de contorno introducidas han sido los pasadores que anclan cada perfil al elemento de unión una vez colocados y las cargas más críticas de combinación obtenidas en el nudo más solicitado de la estructura. Estos valores se han obtenido de CYPE.

Por tanto, el modelo a analizar queda de la siguiente manera:



*Ilustración 1.26. Modelo para el análisis tensional de la unión*

El resultado del análisis estático realizado se muestra en la siguiente imagen:



*Ilustración 1.27. Resultado análisis tensional unión*

Como puede observarse, la pieza objeto de estudio presenta resistencia suficiente frente a las cargas impuestas, estando la tensión de la pieza entre 40MPa y 130MPa en la mayor parte de su geometría. Las zonas que alcanzan los 215 MPa son las esperadas: aquellas en las que por la geometría de la pieza se da una concentración de tensiones.

Los puntos de soldadura también presentan un mayor valor de tensión, pero no alcanzan la fluencia. En conjunto, el estado tensional del modelo es razonable, por lo que se concluye que la pieza es válida.

Con este análisis se consigue verificar que la geometría (longitudes y espesores, fundamentalmente) es adecuada para soportar las cargas que se transmiten en la estructura del invernadero.

Finalmente, el resultado ha sido el siguiente: un elemento de 208mm de ancho por 265mm de alto formado por cuatro (4) tubos soldados entre sí de espesor igual al del perfil que encaja en cada uno de ellos. También se han practicado agujeros en cada tubo para anclar los perfiles con pernos, y se han incluido tres orejas (soldadas también) que sirven para anclar tanto el tirante

horizontal de cada pórtico como las cruces de San Andrés en los vanos que las contengan. Para favorecer la facilidad de montaje, se ha optado por que todas las piezas sean iguales excepto las de las cuatro esquinas, que carecen de uno de los tubos horizontales.

### 1.5. Mecanismo de apertura de cubierta

En este apartado se presentan los cálculos realizados para dimensionar el motor necesario para abrir y cerrar las secciones móviles de la parte más alta de la cubierta.

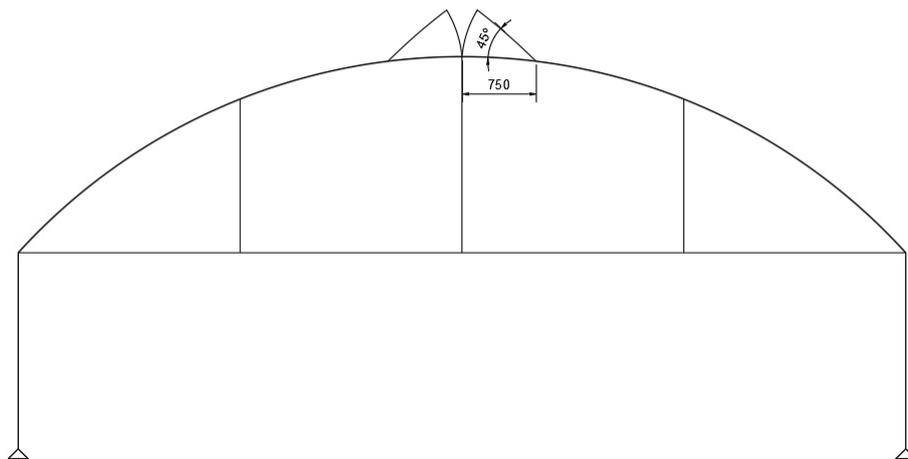


Ilustración 1.28. Apertura de cubierta

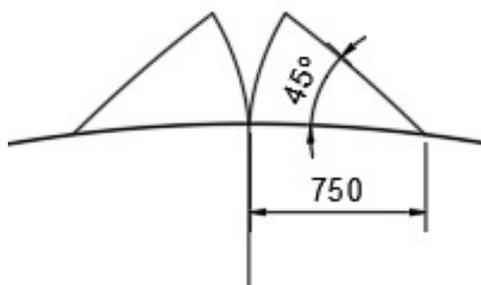


Ilustración 1.29. Apertura de cubierta (Detalle)

En primer lugar, los datos disponibles son:

Radio de giro	0,75m
Ángulo de giro	$45^\circ = \pi/4$ rad
Tiempo de apertura	5s
Peso de una sección móvil	16kg

Tabla 1.16. Datos para dimensionamiento del motor

$$P = M \cdot \omega$$

P = potencia del motor [W]

$M$  = par necesario  $[\text{N} \cdot \text{m}]$

$\omega$  = velocidad angular  $[\text{rad/s}]$

$$M = F \cdot r = 160\text{N} \cdot 0,75\text{m} = 120\text{ N} \cdot \text{m}$$

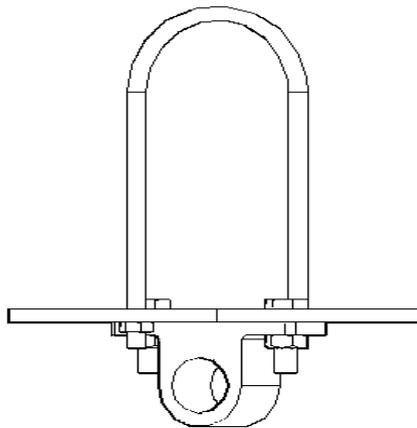
$$\omega = \frac{\theta}{t} = \frac{\pi/4}{5} = 0,157\text{ rad/s}$$

$$P = 120 \cdot 0,157 = 18,84\text{ W}$$

Por tanto, la potencia necesaria para abrir una sola sección de la cubierta es de aproximadamente 20 Vatios.

Como un motor estándar de 500W resulta suficiente y económico, se plantea elegir un motor de esas características con una caja reductora que tenga como salida hasta 200W, de forma que con un solo motor puedan abrirse varias secciones de la cubierta al mismo tiempo.

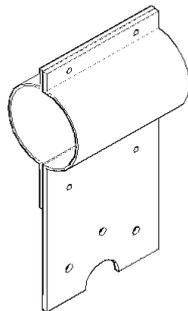
Finalmente, se ha decidido dividir la cubierta en cinco secciones de apertura de cuatro vanos cada una. Por tanto, se empleará un eje y un motor por cada 10m de módulo. El eje estará sujeto cada 2,5m a la estructura por el siguiente elemento:



*Ilustración 1.30. Soporte para eje motor*

Como se puede observar, este elemento consta de un abarcón que rodea el perfil en arco de la cubierta y una placa con un elemento de alojamiento para el cojinete sobre el que irá apoyado el eje, permitiendo así su giro cuando el motor lo accione.

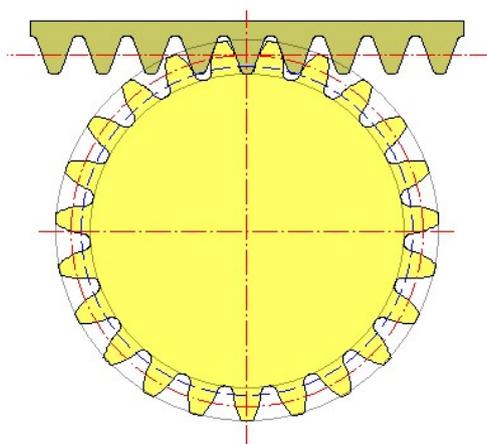
Así mismo, el motor irá anclado a un perfil de la estructura de la siguiente manera



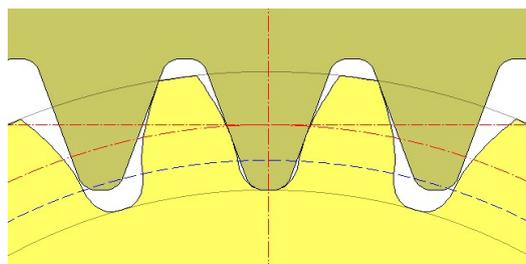
*Ilustración 1.31. Anclaje motor*

Por tanto, el motor se sujeta a la estructura mediante una placa atornillada al perfil y a éste.

El mecanismo piñón – cremallera se ha diseñado mediante Inventor Design Accelerator:



*Ilustración 1.32. Piñón cremallera*

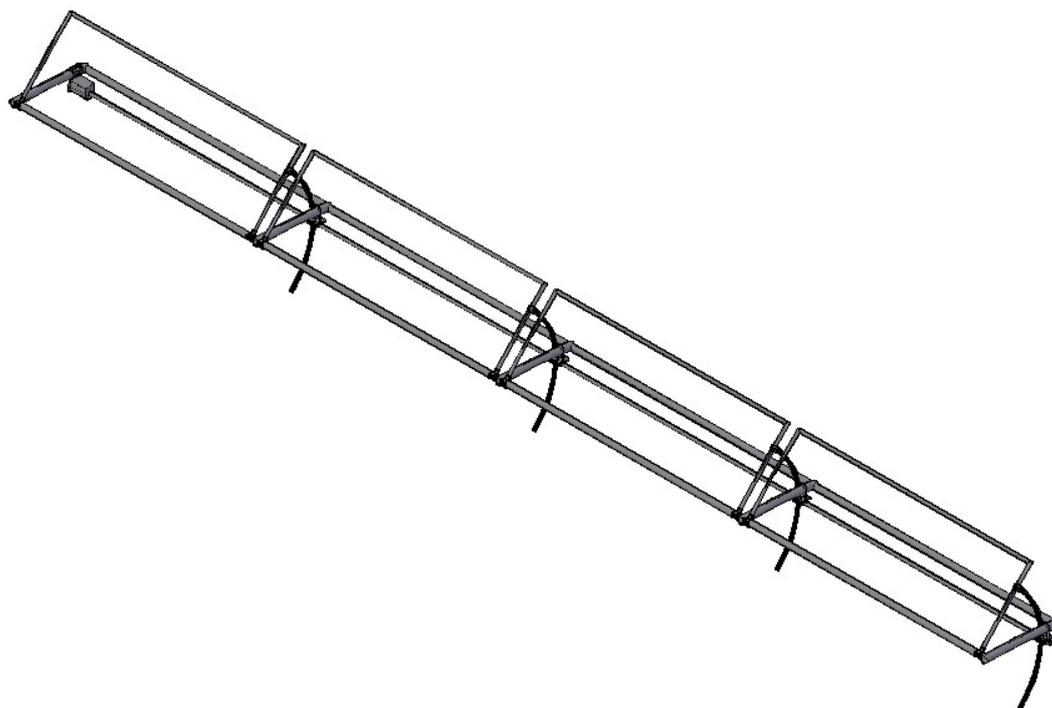


*Ilustración 1.33. Piñón cremallera (II)*



*Ilustración 1.34. Piñón cremallera (III)*

De esta forma se soluciona la apertura de la parte superior del invernadero.



*Ilustración 1.35. Conjunto apertura cubierta*

En la Ilustración 1.35 pueden observarse todos los elementos relevantes para el funcionamiento de la ventilación natural: por un lado, los perfiles que conforman el marco de cada ventana

articulados a los tubos CHS 42.4x3 de la estructura. Por otro lado, el eje de 10 metros de longitud y 20 milímetros de diámetro anclado a la viga en arco de cada pórtico, es decir, cada 2.5 metros, con el piñón correspondiente en cada tramo para poder accionar la apertura de la cubierta.

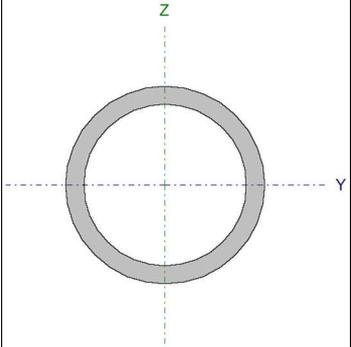
También puede verse el motor en un extremo anclado al quinto pórtico de la sección, así como las cremalleras fijas a los marcos de las ventanas y en contacto cada una con su piñón correspondiente. Aunque la propuesta es que la cubierta se abra a 45°, se ha decidido aumentar el recorrido de las cremalleras para dar cierto margen y permitir una mayor abertura si la persona encargada del cultivo así lo desea.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

En este apartado se presentan los cálculos obtenidos con el programa Cype, que prueban la validez de los elementos seleccionados para conformar la estructura final del invernadero.

### 2.1. Pilares

Barra N144/N145

Perfil: CHS 63.0x6.0							
Material: Acero (S235)							
Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas				
Inicial	Final		Área (cm <sup>2</sup> )	I <sub>y</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>z</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> <sup>(2)</sup> (cm <sup>4</sup> )	
N144	N145	2.000	10.74	44.12	44.12	88.24	
<i>Notas:</i>							
<i>(1) Inercia respecto al eje indicado</i>							
<i>(2) Momento de inercia a torsión uniforme</i>							
	Pandeo		Pandeo lateral				
		Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
	$\beta$	1.00	1.00	0.00	0.00		
	L <sub>k</sub>	2.000	2.000	0.000	0.000		
	C <sub>m</sub>	0.600	0.600	1.000	1.000		
	C <sub>1</sub>	-		1.000			
	<i>Notación:</i>						
<i><math>\beta</math>: Coeficiente de pandeo</i>							
<i>L<sub>k</sub>: Longitud de pandeo (m)</i>							
<i>C<sub>m</sub>: Coeficiente de momentos</i>							
<i>C<sub>1</sub>: Factor de modificación para el momento crítico</i>							

Barra	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)														Estado
	$\bar{\lambda}$	Nt	Nc	My	Mz	Vz	Vy	M <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>z</sub> V <sub>y</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub> V <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>y</sub>	
N144/N145	$\bar{\lambda} < 2.0$ Cumple	x: 1.958 m $\eta = 2.2$	x: 0 m $\eta = 2.0$	x: 1.96 m $\eta = 96.3$	x: 1.96 m $\eta = 0.6$	x: 0 m $\eta = 4.3$	$\eta < 0.1$	x: 0.196 m $\eta < 0.1$	x: 0.196 m $\eta < 0.1$	x: 1.96 m $\eta = 98.7$	x: 0.196 m $\eta < 0.1$	M <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(1)</sup>	N.P. <sup>(2)</sup>	N.P. <sup>(2)</sup>	<b>CUMPLE</b> $\eta = 98.7$
<p>Notación:</p> <p><math>\bar{\lambda}</math>: Limitación de esbeltez</p> <p>N<sub>t</sub>: Resistencia a tracción</p> <p>N<sub>c</sub>: Resistencia a compresión</p> <p>M<sub>y</sub>: Resistencia a flexión eje Y</p> <p>M<sub>z</sub>: Resistencia a flexión eje Z</p> <p>V<sub>z</sub>: Resistencia a corte Z</p> <p>V<sub>y</sub>: Resistencia a corte Y</p> <p>M<sub>y</sub>V<sub>z</sub>: Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados</p> <p>M<sub>z</sub>V<sub>y</sub>: Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados</p> <p>NM<sub>y</sub>M<sub>z</sub>: Resistencia a flexión y axil combinados</p> <p>NM<sub>y</sub>M<sub>z</sub>V<sub>y</sub>V<sub>z</sub>: Resistencia a flexión, axil y cortante combinados</p> <p>M<sub>t</sub>: Resistencia a torsión</p> <p>M<sub>t</sub>V<sub>z</sub>: Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados</p> <p>M<sub>t</sub>V<sub>y</sub>: Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados</p> <p>x: Distancia al origen de la barra</p> <p><math>\eta</math>: Coeficiente de aprovechamiento (%)</p> <p>N.P.: No procede</p> <p>Comprobaciones que no proceden (N.P.):</p> <p><sup>(1)</sup> La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.</p> <p><sup>(2)</sup> No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.</p>															

### Limitación de esbeltez (CTE DB SE-A, Artículos 6.3.1 y 6.3.2.1 - Tabla 6.3)

La esbeltez reducida  $\bar{\lambda}$  de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 2.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} : \underline{1.05} \quad \checkmark$$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección. **Clase :** 1

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3. **A :** 10.74 cm<sup>2</sup>

**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1) **f<sub>y</sub> :** 235.00 MPa

**N<sub>cr</sub>:** Axil crítico de pandeo elástico. **N<sub>cr</sub> :** 228.60 kN

El axil crítico de pandeo elástico **N<sub>cr</sub>** es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y. **N<sub>cr,y</sub> :** 228.60 kN

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.  $N_{cr,z} : \underline{228.60}$  kN

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión.  $N_{cr,T} : \underline{\infty}$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[ G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

$I_y$ : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y.  $I_y : \underline{44.12}$  cm<sup>4</sup>

$I_z$ : Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z.  $I_z : \underline{44.12}$  cm<sup>4</sup>

$I_t$ : Momento de inercia a torsión uniforme.  $I_t : \underline{88.24}$  cm<sup>4</sup>

$I_w$ : Constante de alabeo de la sección.  $I_w : \underline{0.00}$  cm<sup>6</sup>

$E$ : Módulo de elasticidad.  $E : \underline{210000}$  MPa

$G$ : Módulo de elasticidad transversal.  $G : \underline{81000}$  MPa

$L_{ky}$ : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.  $L_{ky} : \underline{2.000}$  m

$L_{kz}$ : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.  $L_{kz} : \underline{2.000}$  m

$L_{kt}$ : Longitud efectiva de pandeo por torsión.  $L_{kt} : \underline{0.000}$  m

$i_0$ : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.  $i_0 : \underline{2.87}$  cm

$$i_0 = (i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2)^{0.5}$$

Siendo:

$i_y, i_z$ : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.  $i_y : \underline{2.03}$  cm  
 $i_z : \underline{2.03}$  cm

$y_0, z_0$ : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.  $y_0 : \underline{0.00}$  mm  
 $z_0 : \underline{0.00}$  mm

### **Resistencia a tracción** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.022} \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1.958 m del nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

**N<sub>t,Ed</sub>**: Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo.

$$\mathbf{N_{t,Ed}} : \underline{5.24} \text{ kN}$$

La resistencia de cálculo a tracción **N<sub>t,Rd</sub>** viene dada por:

$$\mathbf{N_{t,Rd}} = A \cdot f_{yd}$$

$$\mathbf{N_{t,Rd}} : \underline{240.47} \text{ kN}$$

Donde:

**A**: Área bruta de la sección transversal de la barra.

$$\mathbf{A} : \underline{10.74} \text{ cm}^2$$

**f<sub>yd</sub>**: Resistencia de cálculo del acero.

$$\mathbf{f_{yd}} : \underline{223.81} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

**f<sub>y</sub>**: Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$\mathbf{f_y} : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

**γ<sub>M0</sub>**: Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\mathbf{\gamma_{M0}} : \underline{1.05}$$

### **Resistencia a compresión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.5)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.010} \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.020} \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N144, para la combinación de acciones  $1.35 \cdot PP + 1.5 \cdot N1$ .

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.  $N_{c,Ed}$  : 2.42 kN

La resistencia de cálculo a compresión  $N_{c,Rd}$  viene dada por:

$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$   $N_{c,Rd}$  : 240.47 kN

Donde:

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección. **Clase** : 1

**A**: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3. **A** : 10.74 cm<sup>2</sup>

**f<sub>yd</sub>**: Resistencia de cálculo del acero. **f<sub>yd</sub>** : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

**f<sub>y</sub>**: Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1) **f<sub>y</sub>** : 235.00 MPa

**γ<sub>M0</sub>**: Coeficiente parcial de seguridad del material. **γ<sub>M0</sub>** : 1.05

**Resistencia a pandeo**: (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.2)

La resistencia de cálculo a pandeo  $N_{b,Rd}$  en una barra comprimida viene dada por:

$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd}$   $N_{b,Rd}$  : 122.87 kN

Donde:

**A**: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3. **A** : 10.74 cm<sup>2</sup>

**f<sub>yd</sub>**: Resistencia de cálculo del acero. **f<sub>yd</sub>** : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

**f<sub>y</sub>**: Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1) **f<sub>y</sub>** : 235.00 MPa

$\gamma_{M1}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{M1}$  : 1.05

$\chi$ : Coeficiente de reducción por pandeo.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - (\bar{\lambda})^2}} \leq 1$$

$\chi_y$  : 0.51

$\chi_z$  : 0.51

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right]$$

$\phi_y$  : 1.26

$\phi_z$  : 1.26

$\alpha$ : Coeficiente de imperfección elástica.

$\alpha_y$  : 0.49

$\alpha_z$  : 0.49

$\bar{\lambda}$ : Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$\bar{\lambda}_y$  : 1.05

$\bar{\lambda}_z$  : 1.05

$N_{cr}$ : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:

$N_{cr}$  : 228.60 kN

$N_{cr,y}$ : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.

$N_{cr,y}$  : 228.60 kN

$N_{cr,z}$ : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.

$N_{cr,z}$  : 228.60 kN

$N_{cr,T}$ : Axil crítico elástico de pandeo por torsión.

$N_{cr,T}$  :  $\infty$

### **Resistencia a flexión eje Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.963 ✓

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1.960 m del nudo N144, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$M_{Ed}^+$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$M_{Ed}^+ : 0.59 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1.960 m del nudo N144, para la combinación de acciones  $0.8\cdot PP+1.5\cdot V1y2$ . Transversal(int+ext).

$M_{Ed}^-$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$M_{Ed}^- : 4.22 \text{ kN}\cdot\text{m}$

El momento flector resistente de cálculo  $M_{c,Rd}$  viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_{yd}$$

$M_{c,Rd} : 4.38 \text{ kN}\cdot\text{m}$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple.

**Clase :** 1

$W_{pl,y}$ : Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.

$W_{pl,y} : 19.57 \text{ cm}^3$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd} : 223.81 \text{ MPa}$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$f_y : 235.00 \text{ MPa}$

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{M0} : 1.05$

### **Resistencia a flexión eje Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta : 0.006 \checkmark$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1.960 m del nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$$\mathbf{M_{Ed}^+}: \text{Momento flector solicitante de cálculo pésimo.} \quad \mathbf{M_{Ed}^+}: \underline{0.03} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1.960 m del nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$$\mathbf{M_{Ed}^-}: \text{Momento flector solicitante de cálculo pésimo.} \quad \mathbf{M_{Ed}^-}: \underline{0.01} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo  $\mathbf{M_{c,Rd}}$  viene dado por:

$$\mathbf{M_{c,Rd}} = W_{pl,z} \cdot f_{yd} \quad \mathbf{M_{c,Rd}}: \underline{4.38} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple. **Clase:** 1

$\mathbf{W_{pl,z}}$ : Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.  $\mathbf{W_{pl,z}}$ : 19.57 cm<sup>3</sup>

$\mathbf{f_{yd}}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $\mathbf{f_{yd}}$ : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$\mathbf{f_y}$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $\mathbf{f_y}$ : 235.00 MPa

$\mathbf{\gamma_{M0}}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\mathbf{\gamma_{M0}}$ : 1.05

### Resistencia a corte Z (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta: \underline{0.043} \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 3.81 kN

### Resistencia a cortante de la sección:

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$V_{c,Rd}$  : 88.38 kN

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.

$A_v$  : 6.84 cm<sup>2</sup>

$$A_v = 2 \cdot A / \pi$$

Siendo:

$A$ : Área de la sección bruta.

$A$  : 10.74 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{M0}$  : 1.05

### **Resistencia a corte Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta < \underline{0.001}$  ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones  $0.8 \cdot PP + 1.5 \cdot V3y4$ . Longitudinal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 0.01 kN

### Resistencia a cortante de la sección:

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$V_{c,Rd}$  : 88.38 kN

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.

$A_v$  : 6.84 cm<sup>2</sup>

$$A_v = 2 \cdot A / \pi$$

Siendo:

$A$ : Área de la sección bruta.

$A$  : 10.74 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{M0}$  : 1.05

### **Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

**3.48 kN ≤ 44.19 kN** ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.196 m del nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 3.48 kN

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$V_{c,Rd}$  : 88.38 kN

**Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

**0.01 kN ≤ 44.19 kN** ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.196 m del nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 0.01 kN

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$V_{c,Rd}$  : 88.38 kN

**Resistencia a flexión y axil combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1$$

$\eta$  : **0.987** ✓

$$\eta = \frac{M_{ef,Ed}}{M_{b,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.948 ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 1.960 m del nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

Donde:

<b>N<sub>t,Ed</sub></b> : Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo.	<b>N<sub>t,Ed</sub></b> : <u>5.24</u> kN
<b>M<sub>y,Ed</sub>, M<sub>z,Ed</sub></b> : Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.	<b>M<sub>y,Ed</sub></b> : <u>4.22</u> kN·m <b>M<sub>z,Ed</sub></b> : <u>0.01</u> kN·m
<b>Clase</b> : Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.	<b>Clase</b> : <u>1</u>
<b>N<sub>pl,Rd</sub></b> : Resistencia a tracción.	<b>N<sub>pl,Rd</sub></b> : <u>240.47</u> kN
<b>M<sub>pl,Rd,y</sub>, M<sub>pl,Rd,z</sub></b> : Resistencia a flexión de la sección bruta en condiciones plásticas, respecto a los ejes Y y Z, respectivamente.	<b>M<sub>pl,Rd,y</sub></b> : <u>4.38</u> kN·m <b>M<sub>pl,Rd,z</sub></b> : <u>4.38</u> kN·m

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.4.1)

<b>M<sub>ef,Ed</sub></b> : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.	<b>M<sub>ef,Ed</sub></b> : <u>-4.14</u> kN·m
$M_{ef,Ed} = W_{y,com} \cdot \sigma_{com,Ed}$	

Siendo:

**σ<sub>com,Ed</sub>**: Tensión combinada en la fibra extrema comprimida.

**σ<sub>com,Ed</sub>** : 211.71 MPa

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,com}} - 0.8 \cdot \frac{N_{t,Ed}}{A}$$

**W<sub>y,com</sub>**: Módulo resistente de la sección referido a la fibra extrema comprimida, alrededor del eje Y.

**W<sub>y,com</sub>** : 19.57 cm<sup>3</sup>

**A**: Área de la sección bruta.

**A** : 10.74 cm<sup>2</sup>

<b>M<sub>b,Rd,y</sub></b> : Momento flector resistente de cálculo.	<b>M<sub>b,Rd,y</sub></b> : <u>4.38</u> kN·m
--	--

### **Resistencia a flexión, axil y cortante combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo **V<sub>Ed</sub>** es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo **V<sub>c,Rd</sub>**.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.196 m del nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$3.48 \text{ kN} \leq 44.19 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,z}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$$V_{Ed,z} : \underline{3.48} \text{ kN}$$

$V_{c,Rd,z}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{c,Rd,z} : \underline{88.38} \text{ kN}$$

#### **Resistencia a torsión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.7)

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

#### **Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

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

#### **Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

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

2.2. Vigas en arco

Barra N4/N11

Perfil: CHS 57.0x4.0						
Material: Acero (S235)						
Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
Inicial	Final		Área (cm <sup>2</sup> )	I <sub>y</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>z</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> <sup>(2)</sup> (cm <sup>4</sup> )
N4	N11	0.887	6.66	23.52	23.52	47.04
<p>Notas:</p> <p><sup>(1)</sup> Inercia respecto al eje indicado</p> <p><sup>(2)</sup> Momento de inercia a torsión uniforme</p>						
	Pandeo		Pandeo lateral			
	Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
β	2.00	2.00	0.00	0.00		
L <sub>K</sub>	1.774	1.774	0.000	0.000		
C <sub>m</sub>	0.400	0.600	1.000	1.000		
C <sub>1</sub>	-		1.000			
<p>Notación:</p> <p>β: Coeficiente de pandeo</p> <p>L<sub>K</sub>: Longitud de pandeo (m)</p> <p>C<sub>m</sub>: Coeficiente de momentos</p> <p>C<sub>1</sub>: Factor de modificación para el momento crítico</p>						

Barra	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)														Estado
	$\bar{\lambda}$	N <sub>t</sub>	N <sub>c</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	V <sub>z</sub>	V <sub>y</sub>	M <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>z</sub> V <sub>y</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub> V <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>y</sub>	
N4/N11	$\bar{\lambda} < 2.0$ Cumple	x: 0.855 m η = 1.6	x: 0.044 m η = 0.8	x: 0.044 m η = 78.9	x: 0.044 m η = 15.4	x: 0.857 m η = 2.4	η = 1.0	η < 0.1	η < 0.1	x: 0.044 m η = 94.8	η < 0.1	η = 4.9	x: 0.044 m η = 1.6	x: 0.044 m η = 1.6	<b>CUMPLE</b> η = 94.8
<p>Notación:</p> <p><math>\bar{\lambda}</math>: Limitación de esbeltez</p> <p>N<sub>t</sub>: Resistencia a tracción</p> <p>N<sub>c</sub>: Resistencia a compresión</p> <p>M<sub>y</sub>: Resistencia a flexión eje Y</p> <p>M<sub>z</sub>: Resistencia a flexión eje Z</p> <p>V<sub>z</sub>: Resistencia a corte Z</p> <p>V<sub>y</sub>: Resistencia a corte Y</p> <p>M<sub>y</sub>V<sub>z</sub>: Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados</p> <p>M<sub>z</sub>V<sub>y</sub>: Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados</p> <p>NM<sub>y</sub>M<sub>z</sub>: Resistencia a flexión y axil combinados</p> <p>NM<sub>y</sub>M<sub>z</sub>V<sub>y</sub>V<sub>z</sub>: Resistencia a flexión, axil y cortante combinados</p> <p>M<sub>t</sub>: Resistencia a torsión</p> <p>M<sub>t</sub>V<sub>z</sub>: Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados</p> <p>M<sub>t</sub>V<sub>y</sub>: Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados</p> <p>x: Distancia al origen de la barra</p> <p>η: Coeficiente de aprovechamiento (%)</p>															

**Limitación de esbeltez** (CTE DB SE-A, Artículos 6.3.1 y 6.3.2.1 - Tabla 6.3)

La esbeltez reducida  $\bar{\lambda}$  de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 2.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$\bar{\lambda}$  : 1.01 ✓

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección. **Clase** : 1

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3. **A** : 6.66 cm<sup>2</sup>

**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1) **f<sub>y</sub>** : 235.00 MPa

**N<sub>cr</sub>:** Axil crítico de pandeo elástico. **N<sub>cr</sub>** : 154.91 kN

El axil crítico de pandeo elástico **N<sub>cr</sub>** es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y. **N<sub>cr,y</sub>** : 154.91 kN

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z. **N<sub>cr,z</sub>** : 154.91 kN

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión. **N<sub>cr,T</sub>** : ∞

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[ G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

**I<sub>y</sub>:** Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y. **I<sub>y</sub>** : 23.52 cm<sup>4</sup>

**I<sub>z</sub>:** Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z. **I<sub>z</sub>** : 23.52 cm<sup>4</sup>

**I<sub>t</sub>:** Momento de inercia a torsión uniforme. **I<sub>t</sub>** : 47.04 cm<sup>4</sup>

**I<sub>w</sub>:** Constante de alabeo de la sección. **I<sub>w</sub>** : 0.00 cm<sup>6</sup>

**E:** Módulo de elasticidad. **E** : 210000 MPa

**G:** Módulo de elasticidad transversal. **G** : 81000 MPa

<b>L<sub>ky</sub></b> : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.	<b>L<sub>ky</sub></b> : <u>1.774</u> m
<b>L<sub>kz</sub></b> : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.	<b>L<sub>kz</sub></b> : <u>1.774</u> m
<b>L<sub>kt</sub></b> : Longitud efectiva de pandeo por torsión.	<b>L<sub>kt</sub></b> : <u>0.000</u> m
<b>i<sub>o</sub></b> : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.	<b>i<sub>o</sub></b> : <u>2.66</u> cm

$$i_o = (i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2)^{0.5}$$

Siendo:

<b>i<sub>y</sub></b> , <b>i<sub>z</sub></b> : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.	<b>i<sub>y</sub></b> : <u>1.88</u> cm
	<b>i<sub>z</sub></b> : <u>1.88</u> cm
<b>y<sub>o</sub></b> , <b>z<sub>o</sub></b> : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.	<b>y<sub>o</sub></b> : <u>0.00</u> mm
	<b>z<sub>o</sub></b> : <u>0.00</u> mm

### **Resistencia a tracción** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.016} \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.855 m del nudo N4, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

<b>N<sub>t,Ed</sub></b> : Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo.	<b>N<sub>t,Ed</sub></b> : <u>2.35</u> kN
---	--

La resistencia de cálculo a tracción **N<sub>t,Rd</sub>** viene dada por:

<b>N<sub>t,Rd</sub></b> = A · f <sub>yd</sub>	<b>N<sub>t,Rd</sub></b> : <u>149.06</u> kN
---	--

Donde:

<b>A</b> : Área bruta de la sección transversal de la barra.	<b>A</b> : <u>6.66</u> cm <sup>2</sup>
--	--

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$  : 1.05

### **Resistencia a compresión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.5)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.004 ✓

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.008 ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.044 m del nudo N4, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext)+0.75·N1.

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.  $N_{c,Ed}$  : 0.67 kN

La resistencia de cálculo a compresión  $N_{c,Rd}$  viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$  : 149.06 kN

Donde:

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección. **Clase** : 1

**A**: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3. **A** : 6.66 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$  : 1.05

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.2)

La resistencia de cálculo a pandeo  $N_{b,Rd}$  en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} \quad N_{b,Rd} : \underline{80.04} \text{ kN}$$

Donde:

$A$ : Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.  $A$  : 6.66 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M1}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M1}$  : 1.05

$\chi$ : Coeficiente de reducción por pandeo.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - (\bar{\lambda})^2}} \leq 1 \quad \chi_y : \underline{0.54}$$

$$\chi_z : \underline{0.54}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right] \quad \phi_y : \underline{1.20}$$

$$\phi_z : \underline{1.20}$$

$\alpha$ : Coeficiente de imperfección elástica.  $\alpha_y$  : 0.49

$\alpha_z$  : 0.49

$\bar{\lambda}$ : Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \bar{\lambda}_y : \underline{1.01}$$

$$\bar{\lambda}_z : \underline{1.01}$$

$N_{cr}$ : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:  $N_{cr}$  : 154.91 kN

<b>N<sub>cr,y</sub></b> : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.	<b>N<sub>cr,y</sub></b> : <u>154.91</u> kN
<b>N<sub>cr,z</sub></b> : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.	<b>N<sub>cr,z</sub></b> : <u>154.91</u> kN
<b>N<sub>cr,T</sub></b> : Axil crítico elástico de pandeo por torsión.	<b>N<sub>cr,T</sub></b> : <u>∞</u>

### **Resistencia a flexión eje Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.789} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.044 m del nudo N4, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$$\mathbf{M_{Ed}^+} : \text{Momento flector solicitante de cálculo pésimo.} \quad \mathbf{M_{Ed}^+} : \underline{0.35} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.044 m del nudo N4, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext)+0.75·N1.

$$\mathbf{M_{Ed}^-} : \text{Momento flector solicitante de cálculo pésimo.} \quad \mathbf{M_{Ed}^-} : \underline{1.99} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo **M<sub>c,Rd</sub>** viene dado por:

$$\mathbf{M_{c,Rd}} = W_{pl,y} \cdot f_{yd} \quad \mathbf{M_{c,Rd}} : \underline{2.52} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple. **Clase** : 1

**W<sub>pl,y</sub>**: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2. **W<sub>pl,y</sub>** : 11.26 cm<sup>3</sup>

**f<sub>yd</sub>**: Resistencia de cálculo del acero. **f<sub>yd</sub>** : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$ : 235.00 MPa  
 $\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$ : 1.05

### Resistencia a flexión eje Z (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta$ : 0.154 ✓

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.044 m del nudo N4, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$M_{Ed}^+$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^+$ : 0.39 kN·m

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.044 m del nudo N4, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$M_{Ed}^-$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^-$ : 0.04 kN·m

El momento flector resistente de cálculo  $M_{c,Rd}$  viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_{yd}$$

$M_{c,Rd}$ : 2.52 kN·m

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple. **Clase:** 1

$W_{pl,z}$ : Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.  $W_{pl,z}$ : 11.26 cm<sup>3</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd}$ : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$  : 1.05

**Resistencia a corte Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.024 ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.857 m del nudo N4, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext)+0.75·N1.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 1.30 kN

**Resistencia a cortante de la sección:**

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$V_{c,Rd}$  : 54.79 kN

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.

$A_v$  : 4.24 cm<sup>2</sup>

$$A_v = 2 \cdot A / \pi$$

Siendo:

$A$ : Área de la sección bruta.

$A$  : 6.66 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$  : 1.05

### **Resistencia a corte Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.010 ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 0.56 kN

### **Resistencia a cortante de la sección:**

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$V_{c,Rd}$  : 54.79 kN

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.

$A_v$  : 4.24 cm<sup>2</sup>

$$A_v = 2 \cdot A / \pi$$

Siendo:

$A$ : Área de la sección bruta.

$A$  : 6.66 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa  
 $\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$  : 1.05

**Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

**0.89 kN ≤ 27.39 kN** ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed}$  : 0.89 kN

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{c,Rd}$  : 54.79 kN

**Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

**0.56 kN ≤ 27.39 kN** ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : \underline{0.56} \text{ kN}$

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{c,Rd} : \underline{54.79} \text{ kN}$

**Resistencia a flexión y axil combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1 \quad \eta : \underline{0.948} \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot A \cdot f_{yd}} + k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + \alpha_z \cdot k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad \eta : \underline{0.522} \checkmark$$

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot A \cdot f_{yd}} + \alpha_y \cdot k_y \cdot \frac{C_{m,y} \cdot M_{y,Ed}}{W_{pl,y} \cdot f_{yd}} + k_z \cdot \frac{C_{m,z} \cdot M_{z,Ed}}{W_{pl,z} \cdot f_{yd}} \leq 1 \quad \eta : \underline{0.357} \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.044 m del nudo N4, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext)+0.75·N1.

Donde:

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.  $N_{c,Ed} : \underline{0.67} \text{ kN}$

$M_{y,Ed}$ ,  $M_{z,Ed}$ : Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.  $M_{y,Ed}^- : \underline{1.99} \text{ kN}\cdot\text{m}$

$M_{z,Ed}^+ : \underline{0.39} \text{ kN}\cdot\text{m}$

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

**Clase** : 1

$N_{pl,Rd}$ : Resistencia a compresión de la sección bruta.  $N_{pl,Rd} : \underline{149.06} \text{ kN}$

$M_{pl,Rd,y}$ ,  $M_{pl,Rd,z}$ : Resistencia a flexión de la sección bruta en condiciones plásticas, respecto a los ejes Y y Z, respectivamente.  $M_{pl,Rd,y} : \underline{2.52} \text{ kN}\cdot\text{m}$

$M_{pl,Rd,z} : \underline{2.52} \text{ kN}\cdot\text{m}$

**Resistencia a pandeo**: (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.4.2)

**A:** Área de la sección bruta. **A:** 6.66 cm<sup>2</sup>

**W<sub>pl,y</sub>, W<sub>pl,z</sub>:** Módulos resistentes plásticos correspondientes a la fibra comprimida, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente. **W<sub>pl,y</sub>:** 11.26 cm<sup>3</sup>

**W<sub>pl,z</sub>:** 11.26 cm<sup>3</sup>

**f<sub>yd</sub>:** Resistencia de cálculo del acero. **f<sub>yd</sub>:** 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1) **f<sub>y</sub>:** 235.00 MPa

**γ<sub>M1</sub>:** Coeficiente parcial de seguridad del material. **γ<sub>M1</sub>:** 1.05

**k<sub>y</sub>, k<sub>z</sub>:** Coeficientes de interacción.

$$k_y = 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_y \cdot N_{c,Rd}} \quad \mathbf{k_y:} \quad \underline{1.01}$$

$$k_z = 1 + (\bar{\lambda}_z - 0.2) \cdot \frac{N_{c,Ed}}{\chi_z \cdot N_{c,Rd}} \quad \mathbf{k_z:} \quad \underline{1.01}$$

**C<sub>m,y</sub>, C<sub>m,z</sub>:** Factores de momento flector uniforme equivalente. **C<sub>m,y</sub>:** 0.60

**C<sub>m,z</sub>:** 0.40

**χ<sub>y</sub>, χ<sub>z</sub>:** Coeficientes de reducción por pandeo, alrededor de los ejes Y y Z, respectivamente. **χ<sub>y</sub>:** 0.54

**χ<sub>z</sub>:** 0.54

**λ̄<sub>y</sub>, λ̄<sub>z</sub>:** Esbelteces reducidas con valores no mayores que 1.00, en relación a los ejes Y y Z, respectivamente. **λ̄<sub>y</sub>:** 1.01

**λ̄<sub>z</sub>:** 1.01

**α<sub>y</sub>, α<sub>z</sub>:** Factores dependientes de la clase de la sección. **α<sub>y</sub>:** 0.60

**α<sub>z</sub>:** 0.60

### **Resistencia a flexión, axil y cortante combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo **V<sub>Ed</sub>** es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo **V<sub>c,Rd</sub>**.

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$$V_{Ed,z} \leq \frac{V_{c,Rd,z}}{2}$$

$$0.89 \text{ kN} \leq 26.05 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Donde:

$V_{Ed,z}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed,z} : \underline{0.89} \text{ kN}$

$V_{c,Rd,z}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{c,Rd,z} : \underline{52.10} \text{ kN}$

### Resistencia a torsión (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.7)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{T,Ed}}{M_{T,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.049} \quad \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.  $M_{T,Ed} : \underline{0.10} \text{ kN}\cdot\text{m}$

El momento torsor resistente de cálculo  $M_{T,Rd}$  viene dado por:

$$M_{T,Rd} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot W_T \cdot f_{yd}$$

$$M_{T,Rd} : \underline{2.13} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.  $W_T : \underline{16.50} \text{ cm}^3$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : \underline{223.81} \text{ MPa}$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : \underline{235.00} \text{ MPa}$

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0} : \underline{1.05}$

**Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.016 ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo p<sup>s</sup>imos se producen en un punto situado a una distancia de 0.044 m del nudo N4, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext)+0.75·N1.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo p<sup>s</sup>imo.

$V_{Ed}$  : 0.86 kN

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo p<sup>s</sup>imo.

$M_{T,Ed}$  : 0.10 kN·m

El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido  $V_{pl,T,Rd}$  viene dado por:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{T,Ed}}{f_{yd}/\sqrt{3}} \right] \cdot V_{pl,Rd}$$

$V_{pl,T,Rd}$  : 52.10 kN

Donde:

$V_{pl,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$V_{pl,Rd}$  : 54.79 kN

$\tau_{T,Ed}$ : Tensiones tangenciales por torsión.

$\tau_{T,Ed}$  : 6.33 MPa

$$\tau_{T,Ed} = \frac{M_{T,Ed}}{W_t}$$

Siendo:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.

$W_T$  : 16.50 cm<sup>3</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{M0}$  : 1.05

**Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.016 ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 0.044 m del nudo N4, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext)+0.75·N1.

**V<sub>Ed</sub>**: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

**V<sub>Ed</sub>** : 0.86 kN

**M<sub>T,Ed</sub>**: Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.

**M<sub>T,Ed</sub>** : 0.10 kN·m

El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido **V<sub>pl,T,Rd</sub>** viene dado por:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{T,Ed}}{f_{yd}/\sqrt{3}} \right] \cdot V_{pl,Rd}$$

**V<sub>pl,T,Rd</sub>** : 52.10 kN

Donde:

**V<sub>pl,Rd</sub>**: Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

**V<sub>pl,Rd</sub>** : 54.79 kN

**τ<sub>T,Ed</sub>**: Tensiones tangenciales por torsión.

**τ<sub>T,Ed</sub>** : 6.33 MPa

$$\tau_{T,Ed} = \frac{M_{T,Ed}}{W_t}$$

Siendo:

**W<sub>T</sub>**: Módulo de resistencia a torsión.

**W<sub>T</sub>** : 16.50 cm<sup>3</sup>

**f<sub>yd</sub>**: Resistencia de cálculo del acero.

**f<sub>yd</sub>** : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

**f<sub>y</sub>**: Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

**f<sub>y</sub>** : 235.00 MPa

**γ<sub>M0</sub>**: Coeficiente parcial de seguridad del material.

**γ<sub>M0</sub>** : 1.05

2.3. Arriostramiento longitudinal

Barra N144/N160

Perfil: R 3						
Material: Acero (S235)						
Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
Inicial	Final		Área (cm <sup>2</sup> )	I <sub>y</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>z</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> <sup>(2)</sup> (cm <sup>4</sup> )
N144	N160	3.202	0.07	0.00	0.00	0.00
Notas: (1) Inercia respecto al eje indicado (2) Momento de inercia a torsión uniforme						
	Pandeo		Pandeo lateral			
	Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
$\beta$	0.00	0.00	0.00	0.00		
L <sub>K</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000		
C <sub>m</sub>	1.000	1.000	1.000	1.000		
C <sub>1</sub>	-		1.000			
Notación: $\beta$ : Coeficiente de pandeo L <sub>K</sub> : Longitud de pandeo (m) C <sub>m</sub> : Coeficiente de momentos C <sub>1</sub> : Factor de modificación para el momento crítico						

Barra	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)														Estado
	$\bar{\lambda}$	N <sub>t</sub>	N <sub>c</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	V <sub>z</sub>	V <sub>y</sub>	M <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>z</sub> V <sub>y</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub> V <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>y</sub>	
N144/N160	$\bar{\lambda} \leq 4.0$ Cumple	$\eta = 71.8$	N <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(1)</sup>	M <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(2)</sup>	M <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(2)</sup>	V <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(3)</sup>	V <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(3)</sup>	N.P. <sup>(4)</sup>	N.P. <sup>(4)</sup>	N.P. <sup>(5)</sup>	N.P. <sup>(6)</sup>	M <sub>Ed</sub> = 0.00 N.P. <sup>(7)</sup>	N.P. <sup>(8)</sup>	N.P. <sup>(8)</sup>	<b>CUMPLE</b> $\eta = 71.8$

Barra	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)														Estado
	$\bar{\lambda}$	N <sub>t</sub>	N <sub>c</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	V <sub>z</sub>	V <sub>y</sub>	M <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>z</sub> V <sub>y</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub> V <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>y</sub>	
<p><b>Notación:</b></p> <p><math>\bar{\lambda}</math>: Limitación de esbeltez</p> <p>N<sub>t</sub>: Resistencia a tracción</p> <p>N<sub>c</sub>: Resistencia a compresión</p> <p>M<sub>y</sub>: Resistencia a flexión eje Y</p> <p>M<sub>z</sub>: Resistencia a flexión eje Z</p> <p>V<sub>z</sub>: Resistencia a corte Z</p> <p>V<sub>y</sub>: Resistencia a corte Y</p> <p>M<sub>y</sub>V<sub>z</sub>: Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados</p> <p>M<sub>z</sub>V<sub>y</sub>: Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados</p> <p>NM<sub>y</sub>M<sub>z</sub>: Resistencia a flexión y axil combinados</p> <p>NM<sub>y</sub>M<sub>z</sub>V<sub>y</sub>V<sub>z</sub>: Resistencia a flexión, axil y cortante combinados</p> <p>M<sub>t</sub>: Resistencia a torsión</p> <p>M<sub>t</sub>V<sub>z</sub>: Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados</p> <p>M<sub>t</sub>V<sub>y</sub>: Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados</p> <p>x: Distancia al origen de la barra</p> <p>η: Coeficiente de aprovechamiento (%)</p> <p>N.P.: No procede</p>															
<p><b>Comprobaciones que no proceden (N.P.):</b></p> <p><sup>(1)</sup> La comprobación no procede, ya que no hay axil de compresión.</p> <p><sup>(2)</sup> La comprobación no procede, ya que no hay momento flector.</p> <p><sup>(3)</sup> La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.</p> <p><sup>(4)</sup> No hay interacción entre momento flector y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.</p> <p><sup>(5)</sup> No hay interacción entre axil y momento flector ni entre momentos flectores en ambas direcciones para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.</p> <p><sup>(6)</sup> No hay interacción entre momento flector, axil y cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.</p> <p><sup>(7)</sup> La comprobación no procede, ya que no hay momento torsor.</p> <p><sup>(8)</sup> No hay interacción entre momento torsor y esfuerzo cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.</p>															

### Limitación de esbeltez (CTE DB SE-A, Artículos 6.3.1 y 6.3.2.1 - Tabla 6.3)

La esbeltez reducida  $\bar{\lambda}$  de las barras de arriostramiento traccionadas no debe superar el valor 4.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$$\bar{\lambda} < \underline{0.01} \quad \checkmark$$

Donde:

**A:** Área bruta de la sección transversal de la barra.

**A :** 0.07 cm<sup>2</sup>

**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

**f<sub>y</sub> :** 235.00 MPa

**N<sub>cr</sub>:** Axil crítico de pandeo elástico.

**N<sub>cr</sub> :** ∞

**Resistencia a tracción** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : **0.718** ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$N_{t,Ed}$ : Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo.

$N_{t,Ed}$  : 1.14 kN

La resistencia de cálculo a tracción  $N_{t,Rd}$  viene dada por:

$$N_{t,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{t,Rd}$  : 1.58 kN

Donde:

$A$ : Área bruta de la sección transversal de la barra.

$A$  : 0.07 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{M0}$  : 1.05

**Resistencia a compresión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.5)

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

**Resistencia a flexión eje Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

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

**Resistencia a flexión eje Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

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

**Resistencia a corte Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

**Resistencia a corte Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

La comprobación no procede, ya que no hay esfuerzo cortante.

**Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

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

**Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

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

**Resistencia a flexión y axil combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No hay interacción entre axil y momento flector ni entre momentos flectores en ambas direcciones para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

**Resistencia a flexión, axil y cortante combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

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

**Resistencia a torsión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.7)

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

**Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

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

**Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

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

#### 2.4. Tirantes y cable en el plano del pórtico

Para los tirantes verticales, el esfuerzo axial de mayor valor obtenido es de 0,6 kN. Por tanto,

$$\frac{f_y}{1,05} = \frac{235MPa}{1,05} = 223,81 = \frac{N}{A} = \frac{600[N]}{A[mm^2]} \rightarrow A = \frac{600}{223,81} = 2,68mm^2$$

$$2,68 = \pi \cdot r^2 \rightarrow r = 0,924 \text{ mm} \rightarrow D = 1,847 \text{ mm} (2 \text{ mm})$$

Según se ha podido comprobar, un tirante de 2mm de diámetro es suficiente para soportar el esfuerzo axial máximo que puede aparecer.

Lo mismo ocurre con los elementos horizontales en los que se apoyan los ya calculados tirantes: trabajarán solamente a tracción, por lo que se procede a realizar el mismo cálculo para comprobar la sección necesaria de esos perfiles.

Peor axial de tracción: 2,49 kN

$$\frac{f_y}{1,05} = \frac{235MPa}{1,05} = 223,81 = \frac{N}{A} = \frac{2490[N]}{A[mm^2]} \rightarrow A = \frac{2490}{223,81} = 11,125mm^2$$

$$11,125 = \pi \cdot r^2 \rightarrow r = 1,88 \text{ mm} \rightarrow D = 3,76 \text{ mm} (4 \text{ mm})$$

Según se ha podido comprobar, un tirante de 4mm de diámetro es suficiente para soportar el esfuerzo axial máximo que puede aparecer.

2.5. Perfiles perpendiculares al plano del pórtico

Perfil: CHS 42.4x3.0						
Material: Acero (S235)						
Nudos		Longitud (m)	Características mecánicas			
Inicial	Final		Área (cm <sup>2</sup> )	I <sub>y</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>z</sub> <sup>(1)</sup> (cm <sup>4</sup> )	I <sub>t</sub> <sup>(2)</sup> (cm <sup>4</sup> )
N28	N13	2.500	3.71	7.25	7.25	14.49
Notas: (1) Inercia respecto al eje indicado (2) Momento de inercia a torsión uniforme						
	Pandeo		Pandeo lateral			
	Plano XY	Plano XZ	Ala sup.	Ala inf.		
$\beta$	1.00	1.00	0.00	0.00		
L <sub>K</sub>	2.500	2.500	0.000	0.000		
C <sub>m</sub>	1.000	1.000	1.000	1.000		
C <sub>1</sub>	-		1.000			
Notación: $\beta$ : Coeficiente de pandeo L <sub>K</sub> : Longitud de pandeo (m) C <sub>m</sub> : Coeficiente de momentos C <sub>1</sub> : Factor de modificación para el momento crítico						

Barra	COMPROBACIONES (CTE DB SE-A)														Estado
	$\bar{\lambda}$	N <sub>t</sub>	N <sub>c</sub>	M <sub>y</sub>	M <sub>z</sub>	V <sub>z</sub>	V <sub>y</sub>	M <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>z</sub> V <sub>y</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub>	NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub> V <sub>y</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>z</sub>	M <sub>t</sub> V <sub>y</sub>	
N28/N13	$\bar{\lambda} < 2.0$ Cumple	$\eta = 0.3$	$\eta = 13.2$	x: 2.468 m $\eta = 28.2$	x: 2.468 m $\eta = 55.6$	x: 2.468 m $\eta = 0.6$	$\eta = 1.5$	$\eta < 0.1$	$\eta < 0.1$	x: 2.468 m $\eta = 70.9$	$\eta < 0.1$	$\eta = 2.1$	x: 2.468 m $\eta = 0.6$	x: 2.468 m $\eta = 0.6$	<b>CUMPLE</b> $\eta = 70.9$
Notación: $\bar{\lambda}$ : Limitación de esbeltez N <sub>t</sub> : Resistencia a tracción N <sub>c</sub> : Resistencia a compresión M <sub>y</sub> : Resistencia a flexión eje Y M <sub>z</sub> : Resistencia a flexión eje Z V <sub>z</sub> : Resistencia a corte Z V <sub>y</sub> : Resistencia a corte Y M <sub>y</sub> V <sub>z</sub> : Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados M <sub>z</sub> V <sub>y</sub> : Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub> : Resistencia a flexión y axil combinados NM <sub>y</sub> M <sub>z</sub> V <sub>y</sub> V <sub>z</sub> : Resistencia a flexión, axil y cortante combinados M <sub>t</sub> : Resistencia a torsión M <sub>t</sub> V <sub>z</sub> : Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados M <sub>t</sub> V <sub>y</sub> : Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados x: Distancia al origen de la barra $\eta$ : Coeficiente de aprovechamiento (%)															

**Limitación de esbeltez** (CTE DB SE-A, Artículos 6.3.1 y 6.3.2.1 - Tabla 6.3)

La esbeltez reducida  $\bar{\lambda}$  de las barras comprimidas debe ser inferior al valor 2.0.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

$\bar{\lambda}$  : 1.91 ✓

Donde:

**Clase:** Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección. **Clase** : 1

**A:** Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3. **A** : 3.71 cm<sup>2</sup>

**f<sub>y</sub>:** Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1) **f<sub>y</sub>** : 235.00 MPa

**N<sub>cr</sub>:** Axil crítico de pandeo elástico. **N<sub>cr</sub>** : 24.03 kN

El axil crítico de pandeo elástico **N<sub>cr</sub>** es el menor de los valores obtenidos en a), b) y c):

a) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y. **N<sub>cr,y</sub>** : 24.03 kN

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{ky}^2}$$

b) Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z. **N<sub>cr,z</sub>** : 24.03 kN

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{kz}^2}$$

c) Axil crítico elástico de pandeo por torsión. **N<sub>cr,T</sub>** : ∞

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left[ G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_{kt}^2} \right]$$

Donde:

**I<sub>y</sub>:** Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Y. **I<sub>y</sub>** : 7.25 cm<sup>4</sup>

**I<sub>z</sub>:** Momento de inercia de la sección bruta, respecto al eje Z. **I<sub>z</sub>** : 7.25 cm<sup>4</sup>

**I<sub>t</sub>:** Momento de inercia a torsión uniforme. **I<sub>t</sub>** : 14.49 cm<sup>4</sup>

**I<sub>w</sub>:** Constante de alabeo de la sección. **I<sub>w</sub>** : 0.00 cm<sup>6</sup>

**E:** Módulo de elasticidad. **E** : 210000 MPa

**G:** Módulo de elasticidad transversal. **G** : 81000 MPa

<b>L<sub>ky</sub></b> : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Y.	<b>L<sub>ky</sub></b> : <u>2.500</u> m
<b>L<sub>kz</sub></b> : Longitud efectiva de pandeo por flexión, respecto al eje Z.	<b>L<sub>kz</sub></b> : <u>2.500</u> m
<b>L<sub>kt</sub></b> : Longitud efectiva de pandeo por torsión.	<b>L<sub>kt</sub></b> : <u>0.000</u> m
<b>i<sub>o</sub></b> : Radio de giro polar de la sección bruta, respecto al centro de torsión.	<b>i<sub>o</sub></b> : <u>1.98</u> cm

$$i_o = (i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2)^{0.5}$$

Siendo:

<b>i<sub>y</sub></b> , <b>i<sub>z</sub></b> : Radios de giro de la sección bruta, respecto a los ejes principales de inercia Y y Z.	<b>i<sub>y</sub></b> : <u>1.40</u> cm
	<b>i<sub>z</sub></b> : <u>1.40</u> cm
<b>y<sub>o</sub></b> , <b>z<sub>o</sub></b> : Coordenadas del centro de torsión en la dirección de los ejes principales Y y Z, respectivamente, relativas al centro de gravedad de la sección.	<b>y<sub>o</sub></b> : <u>0.00</u> mm
	<b>z<sub>o</sub></b> : <u>0.00</u> mm

### **Resistencia a tracción** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.3)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.003} \checkmark$$

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

<b>N<sub>t,Ed</sub></b> : Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo.	<b>N<sub>t,Ed</sub></b> : <u>0.26</u> kN
---	--

La resistencia de cálculo a tracción **N<sub>t,Rd</sub>** viene dada por:

<b>N<sub>t,Rd</sub></b> = A · f <sub>yd</sub>	<b>N<sub>t,Rd</sub></b> : <u>83.11</u> kN
---	---

Donde:

<b>A</b> : Área bruta de la sección transversal de la barra.	<b>A</b> : <u>3.71</u> cm <sup>2</sup>
<b>f<sub>yd</sub></b> : Resistencia de cálculo del acero.	<b>f<sub>yd</sub></b> : <u>223.81</u> MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$f_y$ : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{M0}$ : 1.05

### **Resistencia a compresión** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.5)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta$ : 0.028 ✓

$$\eta = \frac{N_{c,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

$\eta$ : 0.132 ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$N_{c,Ed}$ : Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo.

$N_{c,Ed}$ : 2.33 kN

La resistencia de cálculo a compresión  $N_{c,Rd}$  viene dada por:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd}$$

$N_{c,Rd}$ : 83.11 kN

Donde:

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos comprimidos de una sección.

**Clase**: 1

**A**: Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.

**A**: 3.71 cm<sup>2</sup>

**$f_{yd}$** : Resistencia de cálculo del acero.

**$f_{yd}$** : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$  : 1.05

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.2)

La resistencia de cálculo a pandeo  $N_{b,Rd}$  en una barra comprimida viene dada por:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot f_{yd} \qquad N_{b,Rd} : \underline{17.71} \text{ kN}$$

Donde:

$A$ : Área de la sección bruta para las secciones de clase 1, 2 y 3.  $A$  : 3.71 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M1}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M1}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M1}$  : 1.05

$\chi$ : Coeficiente de reducción por pandeo.

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - (\bar{\lambda})^2}} \leq 1 \qquad \chi_y : \underline{0.21}$$

$$\qquad \qquad \qquad \chi_z : \underline{0.21}$$

Siendo:

$$\Phi = 0.5 \cdot \left[ 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + (\bar{\lambda})^2 \right] \qquad \phi_y : \underline{2.73}$$

$$\qquad \qquad \qquad \phi_z : \underline{2.73}$$

$\alpha$ : Coeficiente de imperfección elástica.  $\alpha_y$  : 0.49

$\alpha_z$  : 0.49

$\bar{\lambda}$ : Esbeltez reducida.

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \qquad \bar{\lambda}_y : \underline{1.91}$$

$$\qquad \qquad \qquad \bar{\lambda}_z : \underline{1.91}$$

$N_{cr}$ : Axil crítico elástico de pandeo, obtenido como el menor de los siguientes valores:  $N_{cr}$  : 24.03 kN

<b>N<sub>cr,y</sub></b> : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Y.	<b>N<sub>cr,y</sub></b> : <u>24.03</u> kN
<b>N<sub>cr,z</sub></b> : Axil crítico elástico de pandeo por flexión respecto al eje Z.	<b>N<sub>cr,z</sub></b> : <u>24.03</u> kN
<b>N<sub>cr,T</sub></b> : Axil crítico elástico de pandeo por torsión.	<b>N<sub>cr,T</sub></b> : <u>∞</u>

### **Resistencia a flexión eje Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$$\eta : \underline{0.282} \quad \checkmark$$

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 2.468 m del nudo N28, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$$\mathbf{M_{Ed}^+} : \text{Momento flector solicitante de cálculo pésimo.} \quad \mathbf{M_{Ed}^+} : \underline{0.16} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 2.468 m del nudo N28, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$$\mathbf{M_{Ed}^-} : \text{Momento flector solicitante de cálculo pésimo.} \quad \mathbf{M_{Ed}^-} : \underline{0.29} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

El momento flector resistente de cálculo **M<sub>c,Rd</sub>** viene dado por:

$$\mathbf{M_{c,Rd}} = W_{pl,y} \cdot f_{yd} \quad \mathbf{M_{c,Rd}} : \underline{1.04} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple. **Clase** : 1

**W<sub>pl,y</sub>**: Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2. **W<sub>pl,y</sub>** : 4.67 cm<sup>3</sup>

**f<sub>yd</sub>**: Resistencia de cálculo del acero. **f<sub>yd</sub>** : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{MO}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$ : 235.00 MPa  
 $\gamma_{Mo}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{Mo}$ : 1.05

### Resistencia a flexión eje Z (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.6)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta$ : 0.556 ✓

Para flexión positiva:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 2.468 m del nudo N28, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$M_{Ed}^+$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^+$ : 0.58 kN·m

Para flexión negativa:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 2.468 m del nudo N28, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$M_{Ed}^-$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.  $M_{Ed}^-$ : 0.20 kN·m

El momento flector resistente de cálculo  $M_{c,Rd}$  viene dado por:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_{yd} \quad M_{c,Rd}: \underline{1.04} \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Donde:

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de los elementos planos de una sección a flexión simple. **Clase**: 1

$W_{pl,z}$ : Módulo resistente plástico correspondiente a la fibra con mayor tensión, para las secciones de clase 1 y 2.  $W_{pl,z}$ : 4.67 cm<sup>3</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd}$ : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$  : 1.05

### **Resistencia a corte Z** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.006 ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 2.468 m del nudo N28, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 0.19 kN

### **Resistencia a cortante de la sección:**

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$V_{c,Rd}$  : 30.55 kN

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.

$A_v$  : 2.36 cm<sup>2</sup>

$$A_v = 2 \cdot A / \pi$$

Siendo:

$A$ : Área de la sección bruta.

$A$  : 3.71 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$  : 1.05

### **Resistencia a corte Y** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.4)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.015 ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 0.45 kN

### **Resistencia a cortante de la sección:**

El esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$  viene dado por:

$$V_{c,Rd} = A_v \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}}$$

$V_{c,Rd}$  : 30.55 kN

Donde:

$A_v$ : Área transversal a cortante.

$A_v$  : 2.36 cm<sup>2</sup>

$$A_v = 2 \cdot A / \pi$$

Siendo:

$A$ : Área de la sección bruta.

$A$  : 3.71 cm<sup>2</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y$  : 235.00 MPa  
 $\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0}$  : 1.05

**Resistencia a momento flector Y y fuerza cortante Z combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

**0.15 kN ≤ 15.27 kN** ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed}$  : 0.15 kN

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{c,Rd}$  : 30.55 kN

**Resistencia a momento flector Z y fuerza cortante Y combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir la resistencia de cálculo a flexión, ya que el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  no es superior al 50% de la resistencia de cálculo a cortante  $V_{c,Rd}$ .

$$V_{Ed} \leq \frac{V_{c,Rd}}{2}$$

**0.45 kN ≤ 15.27 kN** ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 0.45 kN

$V_{c,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$V_{c,Rd}$  : 30.55 kN

**Resistencia a flexión y axil combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{N_{t,Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.709 ✓

$$\eta = \frac{M_{ef,Ed}}{M_{b,Rd,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{pl,Rd,z}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.704 ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 2.468 m del nudo N28, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

Donde:

$N_{t,Ed}$ : Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo.

$N_{t,Ed}$  : 0.26 kN

$M_{y,Ed}$ ,  $M_{z,Ed}$ : Momentos flectores solicitantes de cálculo pésimos, según los ejes Y y Z, respectivamente.

$M_{y,Ed}^+$  : 0.16 kN·m

$M_{z,Ed}^+$  : 0.58 kN·m

**Clase**: Clase de la sección, según la capacidad de deformación y de desarrollo de la resistencia plástica de sus elementos planos, para axil y flexión simple.

**Clase** : 1

$N_{pl,Rd}$ : Resistencia a tracción.

$N_{pl,Rd}$  : 83.11 kN

$M_{pl,Rd,y}$ ,  $M_{pl,Rd,z}$ : Resistencia a flexión de la sección bruta en condiciones plásticas, respecto a los ejes Y y Z, respectivamente.

$M_{pl,Rd,y}$  : 1.04 kN·m

$M_{pl,Rd,z}$  : 1.04 kN·m

**Resistencia a pandeo:** (CTE DB SE-A, Artículo 6.3.4.1)

$M_{ef,Ed}$ : Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$M_{ef,Ed}$  : 0.16 kN·m

$$M_{ef,Ed} = W_{y,com} \cdot \sigma_{com,Ed}$$

Siendo:

$\sigma_{com,Ed}$ : Tensión combinada en la fibra extrema comprimida.

$\sigma_{com,Ed} : \underline{33.72}$  MPa

$$\sigma_{com,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{y,com}} - 0.8 \cdot \frac{N_{t,Ed}}{A}$$

$W_{y,com}$ : Módulo resistente de la sección referido a la fibra extrema comprimida, alrededor del eje Y.

$W_{y,com} : \underline{4.67}$  cm<sup>3</sup>

$A$ : Área de la sección bruta.

$A : \underline{3.71}$  cm<sup>2</sup>

$M_{b,Rd,y}$ : Momento flector resistente de cálculo.

$M_{b,Rd,y} : \underline{1.04}$  kN·m

### Resistencia a flexión, axil y cortante combinados (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

No es necesario reducir las resistencias de cálculo a flexión y a axil, ya que se puede ignorar el efecto de abolladura por esfuerzo cortante y, además, el esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo  $V_{Ed}$  es menor o igual que el 50% del esfuerzo cortante resistente de cálculo  $V_{c,Rd}$ .

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$$V_{Ed,y} \leq \frac{V_{c,Rd,y}}{2}$$

$0.45 \text{ kN} \leq 15.22 \text{ kN}$  ✓

Donde:

$V_{Ed,y}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed,y} : \underline{0.45}$  kN

$V_{c,Rd,y}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$V_{c,Rd,y} : \underline{30.43}$  kN

### Resistencia a torsión (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.7)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{M_{T,Ed}}{M_{T,Rd}} \leq 1$$

$\eta : \underline{0.021}$  ✓

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.

$M_{T,Ed}$  : 0.02 kN·m

El momento torsor resistente de cálculo  $M_{T,Rd}$  viene dado por:

$$M_{T,Rd} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot W_T \cdot f_{yd}$$

$M_{T,Rd}$  : 0.88 kN·m

Donde:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.

$W_T$  : 6.84 cm<sup>3</sup>

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$f_{yd}$  : 223.81 MPa

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$f_y$  : 235.00 MPa

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$\gamma_{M0}$  : 1.05

### **Resistencia a cortante Z y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1$$

$\eta$  : 0.006 ✓

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 2.468 m del nudo N28, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext)+0.75·N1.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.

$V_{Ed}$  : 0.19 kN

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.

$M_{T,Ed}$  : 0.00 kN·m

El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido  $V_{pl,T,Rd}$  viene dado por:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{T,Ed}}{f_{yd}/\sqrt{3}} \right] \cdot V_{pl,Rd} \quad V_{pl,T,Rd} : \underline{30.43} \text{ kN}$$

Donde:

$V_{pl,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.  $V_{pl,Rd} : \underline{30.55} \text{ kN}$

$\tau_{T,Ed}$ : Tensiones tangenciales por torsión.  $\tau_{T,Ed} : \underline{0.47} \text{ MPa}$

$$\tau_{T,Ed} = \frac{M_{T,Ed}}{W_t}$$

Siendo:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.  $W_T : \underline{6.84} \text{ cm}^3$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.  $f_{yd} : \underline{223.81} \text{ MPa}$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)  $f_y : \underline{235.00} \text{ MPa}$

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.  $\gamma_{M0} : \underline{1.05}$

**Resistencia a cortante Y y momento torsor combinados** (CTE DB SE-A, Artículo 6.2.8)

Se debe satisfacer:

$$\eta = \frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1 \quad \eta : \underline{0.006} \checkmark$$

Los esfuerzos solicitantes de cálculo pésimos se producen en un punto situado a una distancia de 2.468 m del nudo N28, para la combinación de acciones 1.35·PP+1.5·V3y4.Longitudinal(int+ext)+0.75·N1.

$V_{Ed}$ : Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo.  $V_{Ed} : \underline{0.19} \text{ kN}$

$M_{T,Ed}$ : Momento torsor solicitante de cálculo pésimo.  $M_{T,Ed} : \underline{0.00} \text{ kN}\cdot\text{m}$

El esfuerzo cortante resistente de cálculo reducido  $V_{pl,T,Rd}$  viene dado por:

$$V_{pl,T,Rd} = \left[ 1 - \frac{\tau_{T,Ed}}{f_{yd}/\sqrt{3}} \right] \cdot V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,T,Rd} : \underline{30.43} \text{ kN}$$

Donde:

$V_{pl,Rd}$ : Esfuerzo cortante resistente de cálculo.

$$V_{pl,Rd} : \underline{30.55} \text{ kN}$$

$\tau_{T,Ed}$ : Tensiones tangenciales por torsión.

$$\tau_{T,Ed} : \underline{0.47} \text{ MPa}$$

$$\tau_{T,Ed} = \frac{M_{T,Ed}}{W_t}$$

Siendo:

$W_T$ : Módulo de resistencia a torsión.

$$W_T : \underline{6.84} \text{ cm}^3$$

$f_{yd}$ : Resistencia de cálculo del acero.

$$f_{yd} : \underline{223.81} \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$$

Siendo:

$f_y$ : Límite elástico. (CTE DB SE-A, Tabla 4.1)

$$f_y : \underline{235.00} \text{ MPa}$$

$\gamma_{M0}$ : Coeficiente parcial de seguridad del material.

$$\gamma_{M0} : \underline{1.05}$$

## 2.6. Uniones

Los elementos de unión entre los distintos perfiles del invernadero se han modelado en CAD para después realizar su dimensionado mediante un software de Análisis por Elementos Finitos. A continuación, se presentan las cargas obtenidas de CYPE que se le han aplicado al modelo en el mencionado software.

### 2.6.1. Pilar

Axial de tracción: El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1.958 m del nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

Nt,Ed: Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo.

$$N_{t,Ed} : 5.13 \text{ kN}$$

Para flexión negativa Y: El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 1.960 m del nudo N144, para la combinación de acciones 0.8·PP+1.5·V1y2.Transversal(int+ext).

MEd-: Momento flector solicitante de cálculo pésimo.

$$M_{Ed-} : 4.17 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

Para cortante Z: El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en el nudo N144, para la combinación de acciones  $0.8 \cdot PP + 1.5 \cdot V_{1y2} \cdot \text{Transversal}(\text{int} + \text{ext})$ .

VE<sub>d</sub>: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo. VE<sub>d</sub> : 3.78 kN

### 2.6.2. Correas

Axial de compresión: El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones  $0.8 \cdot PP + 1.5 \cdot V_{1y2} \cdot \text{Transversal}(\text{int} + \text{ext})$ .

N<sub>c</sub>,E<sub>d</sub>: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo. N<sub>c</sub>,E<sub>d</sub>: 1.22 Kn

### 2.6.3. Arcos

Axial de tracción: El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.853 m del nudo N145, para la combinación de acciones  $0.8 \cdot PP + 1.5 \cdot V_{1y2} \cdot \text{Transversal}(\text{int} + \text{ext})$ .

N<sub>t</sub>,E<sub>d</sub>: Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo. N<sub>t</sub>,E<sub>d</sub> : 8.51 kN

Corte Z:

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce en un punto situado a una distancia de 0.855 m del nudo N145, para la combinación de acciones  $0.8 \cdot PP + 1.5 \cdot V_{1y2} \cdot \text{Transversal}(\text{int} + \text{ext})$ .

VE<sub>d</sub>: Esfuerzo cortante solicitante de cálculo pésimo. VE<sub>d</sub> : 0.93 kN

### 2.6.4. Cruces de San Andrés

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones  $0.8 \cdot PP + 1.5 \cdot V_{1y2} \cdot \text{Transversal}(\text{int} + \text{ext})$ .

N<sub>t,E<sub>d</sub></sub>: Axil de tracción solicitante de cálculo pésimo. N<sub>t,E<sub>d</sub></sub>: 0.13 kN

### 2.6.5. Tirante horizontal

El esfuerzo solicitante de cálculo pésimo se produce para la combinación de acciones  $0.8 \cdot PP + 1.5 \cdot V_{1y2} \cdot \text{Transversal}(\text{int} + \text{ext})$ .

N<sub>c,E<sub>d</sub></sub>: Axil de compresión solicitante de cálculo pésimo. N<sub>c,E<sub>d</sub></sub>: 2.49 kN

## 2.7. Placas de anclaje

Las placas de anclaje no han podido calcularse con CYPE, debido a que no se trata de un modelo de anclaje convencional.

Siguiendo con los dos criterios de montaje sencillo y idealización de articulación en el pie de cada pilar, se ha optado por colocar una placa de anclaje sencilla con dos piezas agujereadas entre las que encaja el pilar, quedando todos los elementos fijados por un pasador.

A continuación, se muestra un esquema del anclaje pilar-zapata propuesto:

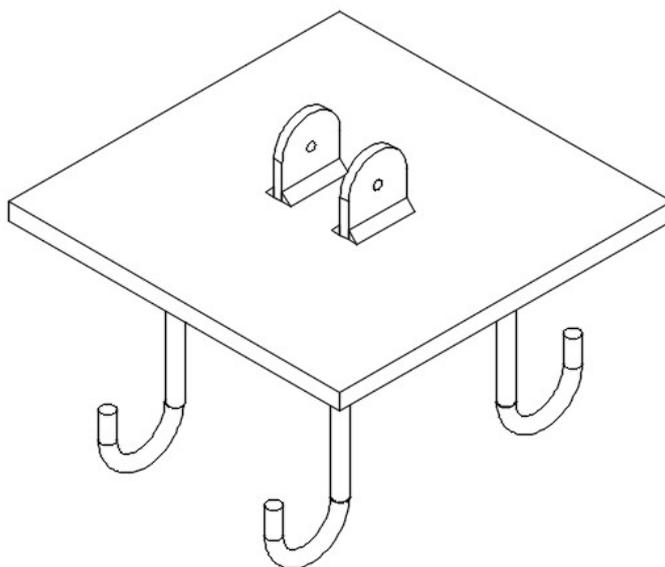


Ilustración 2.1. Placa de anclaje

### 2.8. Cimentación

Según CYPE, las dimensiones mínimas de las zapatas del invernadero son las siguientes:

Referencia: N159		
Dimensiones: 105 x 105 x 30		
Armados: Xi:Ø12c/30 Yi:Ø12c/30 Xs:Ø12c/30 Ys:Ø12c/30		
Comprobación	Valores	Estado
Tensiones sobre el terreno: <i>Criterio de CYPE Ingenieros</i>		
- Tensión media en situaciones persistentes:	Máximo: 0.1962 MPa Calculado: 0.0089271 MPa	Cumple
- Tensión máxima en situaciones persistentes sin viento:	Máximo: 0.24525 MPa Calculado: 0.0089271 MPa	Cumple
- Tensión máxima en situaciones persistentes con viento:	Máximo: 0.24525 MPa Calculado: 0.0097119 MPa	Cumple

Referencia: N159		
Dimensiones: 105 x 105 x 30		
Armados: Xi:Ø12c/30 Yi:Ø12c/30 Xs:Ø12c/30 Ys:Ø12c/30		
Comprobación	Valores	Estado
<b>Vuelco de la zapata:</b> <i>Si el % de reserva de seguridad es mayor que cero, quiere decir que los coeficientes de seguridad al vuelco son mayores que los valores estrictos exigidos para todas las combinaciones de equilibrio.</i>		
- En dirección X:	Reserva seguridad: 63413.4 %	Cumple
- En dirección Y:	Reserva seguridad: 82.1 %	Cumple
<b>Flexión en la zapata:</b>		
- En dirección X:	Momento: 0.00 kN·m	Cumple
- En dirección Y:	Momento: 0.00 kN·m	Cumple
<b>Cortante en la zapata:</b>		
- En dirección X:	Cortante: 0.88 kN	Cumple
- En dirección Y:	Cortante: 1.86 kN	Cumple
<b>Compresión oblicua en la zapata:</b>		
- Situaciones persistentes:	Máximo: 5000 kN/m <sup>2</sup>	
<i>Criterio de CYPE Ingenieros</i>	Calculado: 57.5 kN/m <sup>2</sup>	Cumple
<b>Canto mínimo:</b>		
<i>Artículo 59.8.1 de la norma EHE-98</i>	Mínimo: 25 cm	
	Calculado: 30 cm	Cumple
<b>Espacio para anclar arranques en cimentación:</b>		
- N159:	Mínimo: 0 cm	
	Calculado: 26 cm	Cumple
<b>Cuantía geométrica mínima:</b>		
<i>Criterio de CYPE Ingenieros</i>	Mínimo: 0.002	
- En dirección X:	Calculado: 0.0025	Cumple
- En dirección Y:	Calculado: 0.0025	Cumple
<b>Diámetro mínimo de las barras:</b>		
<i>Recomendación del Artículo 59.8.2 (norma EHE-98)</i>	Mínimo: 12 mm	
- Parrilla inferior:	Calculado: 12 mm	Cumple
- Parrilla superior:	Calculado: 12 mm	Cumple

Referencia: N159		
Dimensiones: 105 x 105 x 30		
Armados: Xi:Ø12c/30 Yi:Ø12c/30 Xs:Ø12c/30 Ys:Ø12c/30		
Comprobación	Valores	Estado
Separación máxima entre barras: <i>Artículo 59.8.2 de la norma EHE-98</i>	Máximo: 30 cm	
- Armado inferior dirección X:	Calculado: 30 cm	Cumple
- Armado inferior dirección Y:	Calculado: 30 cm	Cumple
- Armado superior dirección X:	Calculado: 30 cm	Cumple
- Armado superior dirección Y:	Calculado: 30 cm	Cumple
Separación mínima entre barras: <i>Criterio de CYPE Ingenieros, basado en: J. Calavera. "Cálculo de Estructuras de Cimentación". Capítulo 3.16</i>	Mínimo: 10 cm	
- Armado inferior dirección X:	Calculado: 30 cm	Cumple
- Armado inferior dirección Y:	Calculado: 30 cm	Cumple
- Armado superior dirección X:	Calculado: 30 cm	Cumple
- Armado superior dirección Y:	Calculado: 30 cm	Cumple
Longitud de anclaje: <i>Criterio del libro "Cálculo de estructuras de cimentación", J. Calavera. Ed. INTEMAC, 1991</i>	Mínimo: 15 cm	
- Armado inf. dirección X hacia der:	Calculado: 24 cm	Cumple
- Armado inf. dirección X hacia izq:	Calculado: 24 cm	Cumple
- Armado inf. dirección Y hacia arriba:	Calculado: 24 cm	Cumple
- Armado inf. dirección Y hacia abajo:	Calculado: 24 cm	Cumple
- Armado sup. dirección X hacia der:	Calculado: 24 cm	Cumple
- Armado sup. dirección X hacia izq:	Calculado: 24 cm	Cumple
- Armado sup. dirección Y hacia arriba:	Calculado: 24 cm	Cumple
- Armado sup. dirección Y hacia abajo:	Calculado: 24 cm	Cumple
Se cumplen todas las comprobaciones		

### 3. PLAN DE PROYECTO Y PLANIFICACIÓN

En este apartado se presenta el plan de proyecto con las distintas fases de ejecución de la obra.

### 3.1. Fases del proyecto

Estas son las fases de construcción en las que se ha dividido el trabajo:

- Trabajos previos

En esta fase se realizará la extracción de todas las plantas, piedras, objetos, etc. Que supongan un obstáculo para la construcción del invernadero en el terreno. Además, se realizarán todas las mediciones del área de construcción y se señalarán los puntos significativos, como por ejemplo hoyos a cavar para la cimentación.

- Excavación de zanjas

En esta fase se procederá a la extracción de tierra (por medios manuales) allá donde se haya marcado en el paso anterior, siguiendo siempre las dimensiones indicadas en proyecto.

- Colocación de zapatas

En esta fase se procederá a la colocación de las zapatas prefabricadas en las zanjas correspondientes.

- Anclaje de pilares

En esta fase se montarán todos los pilares de la estructura, dejando la obra preparada para comenzar la colocación de los elementos de unión.

- Colocación de uniones

En esta fase se montará sobre la cabeza de cada pilar el elemento de unión correspondiente en la posición que indiquen los planos.

- Montaje de arcos

Esta fase tratará de la correcta colocación y fijación de las vigas en arco del invernadero, siendo necesario para ello contar con todas las fases previas cumplimentadas.

- Arriostramiento

En esta fase se anclarán los tirantes de las cruces de San Andrés a la estructura, tal y como se indica en proyecto.

- Tirantes y cables

En esta fase se colocarán los tirantes verticales y el cable horizontal en cada pódico, que limitan la longitud de pandeo del arco.

- Perfiles longitudinales

Esta fase tratará de la instalación de todos los perfiles longitudinales de la estructura, que tienen como función limitar el pandeo y aportar rigidez al conjunto del invernadero.

- Ejes de cubierta

En esta fase se colocarán los ejes de giro de las secciones de cubierta móviles, siendo necesario para ello tener todas las fases anteriores completadas.

- Mecanismo de cubierta

En esta fase se instalarán los marcos de las ventanas, así como los motores junto con su mecanismo necesario para la apertura de la cubierta.

- Cerramiento

Esta fase tratará de la colocación y fijación del cerramiento sobre toda la estructura del invernadero, incluyendo ventanas y puertas, para lo cual será necesario que todos los demás elementos estructurales estén ya montados.

- Sensores

En esta fase se instalarán los sensores de temperatura y humedad adquiridos para poner en funcionamiento el mecanismo de apertura de la cubierta, así como los ventiladores en caso de haberse decidido contar con ellos también.

- Riego

En esta última fase se colocarán y conectarán a la fuente de agua, en el interior del invernadero y sobre el terreno, todas las tuberías de riego por goteo, quedando así el módulo listo para comenzar su explotación.

### 3.2. Diagrama de Gantt

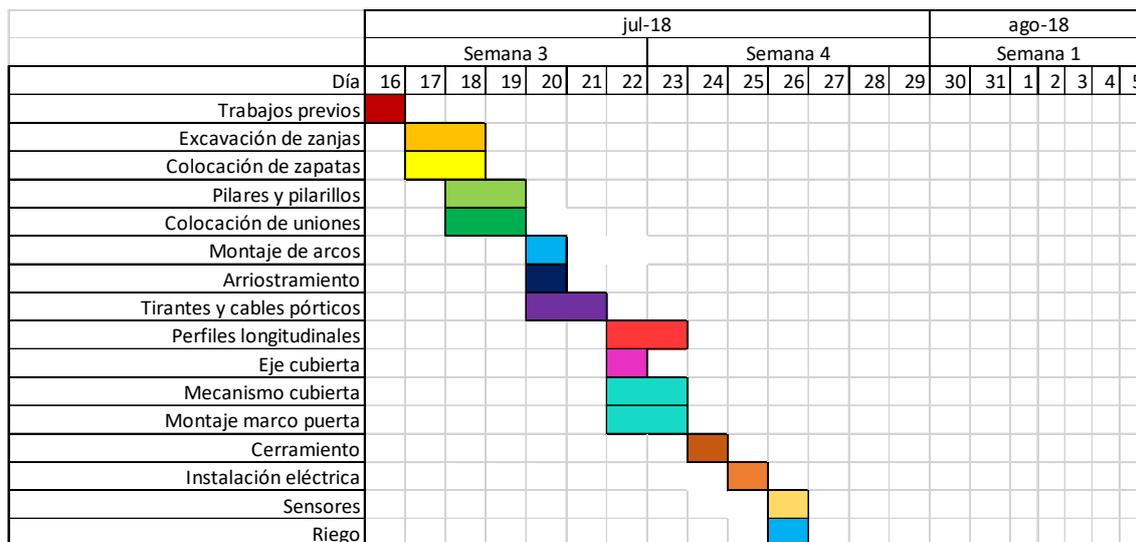


Ilustración 3.1. Diagrama de Gantt de la obra

### 4. NORMAS Y REFERENCIAS

En este apartado se presenta la normativa que se debe aplicar a un proyecto de cálculo y diseño de un invernadero. Las exigencias de la normativa deben cumplirse tanto en el proyecto como en la construcción del mismo, así como en su mantenimiento y conservación.

El principal marco normativo a seguir es el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), ya que establece las exigencias que deben cumplir las construcciones en relación con los requisitos básicos establecidos por el Decreto Supremo N° 011-2006 del Ministerio de Vivienda de Perú.

El RNE está compuesto por sesenta y seis (66) Normas Técnicas. Cada una de ellas incluye los límites y las exigencias básicas, así como una relación de procedimientos que permiten cumplir los requisitos.

Las Normas que se aplican al presente proyecto son los siguientes:

- Título I – Generalidades
  - Norma G.010. – Consideraciones Básicas.

Describe las consideraciones generales que enmarcan el Reglamento y sus Normas.

- Norma G.020. – Principios Generales.

Detalla los principios generales en que se basa el Reglamento.

- Norma G.030. – Derechos y Responsabilidades.

Determina el marco de actuación de los diferentes agentes que intervienen en un proyecto de construcción.

- Norma G.050. – Seguridad durante la Construcción.

Establece los requisitos mínimos de seguridad en el lugar de trabajo, las inspecciones, instalaciones y plan de seguridad y salud con que debe contar toda obra de construcción.

- Título II – Habilitaciones Urbanas

Clasifica los distintos tipos de habilitaciones y establece una serie de condiciones de diseño mínimas en función de la categoría de la construcción del proyecto.

- Norma TH.040. – Habilitaciones para usos especiales.
- Norma TH.050. – Habilitaciones en riberas y laderas.

- Título III – Edificaciones

Las normas técnicas establecidas en el presente Título contienen los elementos para el diseño y la ejecución de las edificaciones, garantizando el desarrollo de las actividades de las personas.

- Norma GE.010. – Alcances y contenido
- Norma GE.020. – Componentes y características de los proyectos.
- Norma GE.030. – Calidad en la construcción.
- Norma GE.040. – Uso y mantenimiento.
- Norma A.130. – Requisitos de seguridad.
- Norma E.090. – Estructuras metálicas.
- Norma EM.080. – Instalaciones con energía solar.
- Norma EM.090. – Instalaciones con energía eólica.

Además de las normas ya mencionadas, como apoyo se empleará uno de los Documentos Básicos contenidos en el CTE para consultar algunos aspectos de las acciones de viento que no están contempladas en el Reglamento de Perú.

- DB SE-AE: Acciones en la edificación.

El campo de aplicación de este Documento Básico es el de la determinación de las acciones sobre los edificios, para verificar el cumplimiento de los requisitos de seguridad estructural (capacidad portante y estabilidad) y aptitud al servicio.

El programa de cálculo de estructuras metálicas CYPE 3D emplea como referencia para el dimensionamiento de perfiles y cimientos la norma de España, por lo que se emplearán también los siguientes documentos:

- DB SE-A: Acero estructural.
- EHE 08: Hormigón.

## 5. PROGRAMAS DE CÁLCULO Y DISEÑO

### CYPE

Para la realización de los cálculos se ha optado por la utilización del programa de cálculo “CYPE”. Dentro de este programa se ha empleado el módulo Nuevo Metal 3D.

### AutoCAD

Programa de dibujo en 3D por ordenador para la realización de planos.

### Autodesk Inventor

Modelado 3D de elementos, ensamblaje de piezas y análisis tensional de uniones.