

Trabajo Fin de Grado

Título del trabajo : Cálculo estructural de la
Pasarela Marina Española

Autor/es

José María Corbacho de Jesús

Director/es

David Bel Cacho

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2025

Índice

1	Objeto y alcance	3
1.1	Motivación	3
1.2	Objetivos y alcance	3
2	Introducción	5
2.1	Localización	5
2.2	Estudio previo	5
3	Diseño estructural	6
3.1	Descripción general	6
3.2	Materiales	7
3.3	Secciones estructurales	8
3.4	Apoyos	10
4	Introducción general de las cargas en la pasarela	12
5	Combinaciones de carga	13
6	Comprobación ELU y ELS	16
6.1	Estado Límite Último: Esfuerzos	16
6.2	Estado Límite de Servicio: Deformaciones	20
7	Comprobación a pandeo	21
7.1	Cordones superior e inferior (QRO 150×6)	22
7.2	Montantes (2×UPN 140)	23
7.3	Diagonales (QRO 100×5)	24
7.4	Apoyo intermedio (RRO 250×150×10)	25
8	Análisis modal y verificación del ELS de vibraciones	26
Anexos		28
Anexo 0. Planos facilitados por el Ayuntamiento		28
Anexo I. Cálculo de cargas estructurales		32
8.1	Definición del peso propio en RFEM	32
8.2	Sobrecarga de uso (q_k)	33
8.3	Acción del viento sobre la pasarela	35
8.3.1	Velocidad básica del viento (V_b)	35
8.3.2	Velocidad media del viento	36

8.3.3	Empuje del viento sobre el tablero	38
8.3.4	Dirección del viento	41
8.3.5	Empuje del viento sobre tableros	42
8.3.6	Empuje del viento sobre la pila del apoyo intermedio	50
8.4	Carga de nieve	52
Anexo II. Cálculo de las cargas máximas admisibles por sección		54
Anexo III. Formas modales del análisis de vibraciones		57

1. Objeto y alcance

1.1. Motivación

Los puentes y pasarelas siempre han tenido un papel especial en las ciudades. Más allá de ser simples estructuras, permiten conectar lugares, facilitar la vida diaria de las personas y, en cierto modo, unir comunidades que de otra manera quedarían separadas por ríos o accidentes del terreno. Con el paso del tiempo, estas construcciones han dejado de ser únicamente funcionales para convertirse también en elementos que forman parte del paisaje urbano y de la identidad de una ciudad.

La Pasarela de la calle Marina Española, situada en Zaragoza, responde precisamente a esa idea: mejorar la movilidad de los vecinos y ofrecer un paso seguro y cómodo sobre el río Huerva. Se trata de una infraestructura que, aunque pueda parecer sencilla, cumple una función fundamental dentro del entramado urbano, ya que conecta barrios y facilita el acceso a distintos servicios.

El objetivo es aplicar los conocimientos adquiridos durante la carrera para comprobar, mediante el cálculo de cargas, la definición de materiales y perfiles y la verificación del comportamiento de la estructura con ayuda de software especializado, que esta estructura responde adecuadamente a las exigencias a las que está sometida.

La motivación principal de este trabajo surge de la oportunidad de poner en práctica lo aprendido en un caso real, de acercarse a la realidad profesional del ingeniero y de comprender la responsabilidad que supone garantizar la seguridad y la durabilidad de una infraestructura que forma parte de la vida cotidiana de la ciudad.

1.2. Objetivos y alcance

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es modelar y calcular estructuralmente la pasarela situada en la calle Marina Española, en la ciudad de Zaragoza. Además del cálculo estático, se incluye un análisis modal de vibraciones propias. La pasarela, que cruza el río Huerva, está compuesta por una estructura metálica tipo celosía y presenta un diseño basado en perfiles soldados y ensamblados en taller.

Para el análisis estructural y modal se ha utilizado el software **RFEM 5.0**, ampliamente reconocido en el ámbito de la ingeniería de estructuras, mientras que la redacción de

la memoria técnica se ha llevado a cabo empleando el sistema L^AT_EX por sus ventajas en la composición de documentos técnicos.

La información geométrica y los datos de partida provienen de documentos oficiales facilitados por el Ayuntamiento de Zaragoza y de observaciones directas realizadas sobre la estructura, quedando recogidos en el **Anexo 0**.

2. Introducción

2.1. Localización

La estructura objeto de estudio se encuentra situada entre la Calle Marina Española y la calle Manuel Lasala, sobre el río Huerva.

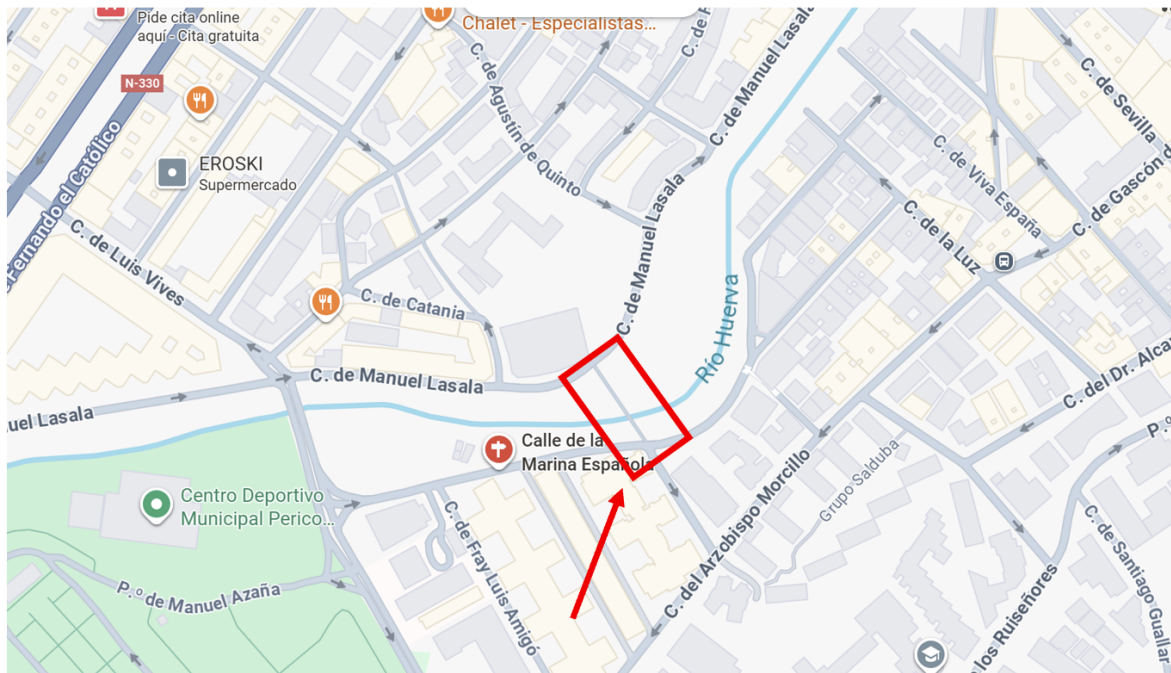


Figura 1: Ubicación de la pasarela Marina Española sobre el río Huerva (Zaragoza)

2.2. Estudio previo

Toda la información geométrica ha sido obtenida a partir de documentación oficial facilitada por el Ayuntamiento de Zaragoza y complementada mediante observaciones directas sobre el terreno.

3. Diseño estructural

3.1. Descripción general

Se trata de una celosía metálica recta compuesta por dos celosías que cruzan el río Huerva, permitiendo el tránsito exclusivo de peatones y ciclistas.

Cada vano está constituido por una sucesión de módulos estructurales formados por una celosía tipo Warren, dispuesta en planos verticales a ambos lados de la pasarela. Estos módulos constan de tres montantes unidos por los cordones superior e inferior, y arriostrados mediante dos diagonales que parten desde los nudos inferiores de los montantes extremos y convergen en el nudo superior del montante central.



Figura 2: Vista general de la pasarela Marina Española

Las dimensiones principales de la pasarela son las siguientes:

- Longitud vano corto: 14,9 m
- Longitud vano largo: 31,8 m
- Longitud total: 46,70 m .

- Canto aproximado de la celosía: 2,50 m.
- Ancho exterior: 2,75 m.
- Ancho útil para el paso peatonal: 2,45 m.

La plataforma peatonal está formada por una chapa grecada metálica, sobre la que se dispone una capa de hormigón que actúa como pavimento. La estructura se apoya sobre dos estribos de hormigón armado —uno en cada margen del río— y una pila intermedia metálica formada por dos fustes verticales arriostrados horizontalmente a media altura y en la cabeza.

Cabe destacar que, debido a la orografía del terreno, el apoyo situado en la margen derecha se encuentra a una cota superior respecto al otro extremo.

3.2. Materiales

El material empleado en toda la estructura metálica es acero estructural laminado en caliente de tipo **S275 JR**, conforme a la norma **UNE-EN 10025**. Esta información ha sido obtenida del informe técnico de rehabilitación realizado en 2021 por el Ayuntamiento de Zaragoza. Sus propiedades mecánicas utilizadas en el modelo son las siguientes:

- Módulo de elasticidad: $E = 210\,000$ MPa
- Módulo cortante: $G = 81\,000$ MPa
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha = 12 \times 10^{-6}$ °C⁻¹
- Densidad: $7\,850$ kg/m³ *Lmiteelstico*: $f_y = 275$ MPa
- Tensión de rotura: $f_u = 410$ MPa

Por otro lado, la plataforma destinada al tránsito peatonal está constituida en **hormigón C25/30**, conforme a la norma **EN 1992-1-1:2004/A1:2014** (*Eurocódigo 2*). Las propiedades mecánicas adoptadas en el modelo, de acuerdo con el Eurocódigo 2, son las siguientes:

- Módulo de elasticidad: $E = 30\,000$ MPa
- Módulo cortante: $G = 12\,000$ MPa
- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$
- Coeficiente de dilatación térmica: $\alpha = 1,0 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
- Densidad: 2500 kg/m^3
- Resistencia característica a compresión: $f_{ck} = 25$ MPa
- Resistencia media a tracción: $f_{ctm} = 2,6$ MPa

3.3. Secciones estructurales

La estructura metálica de la pasarela se ha modelado empleando diferentes tipos de perfiles de acero laminado S275.

En la Figura 3 se muestra una vista general del modelo estructural.

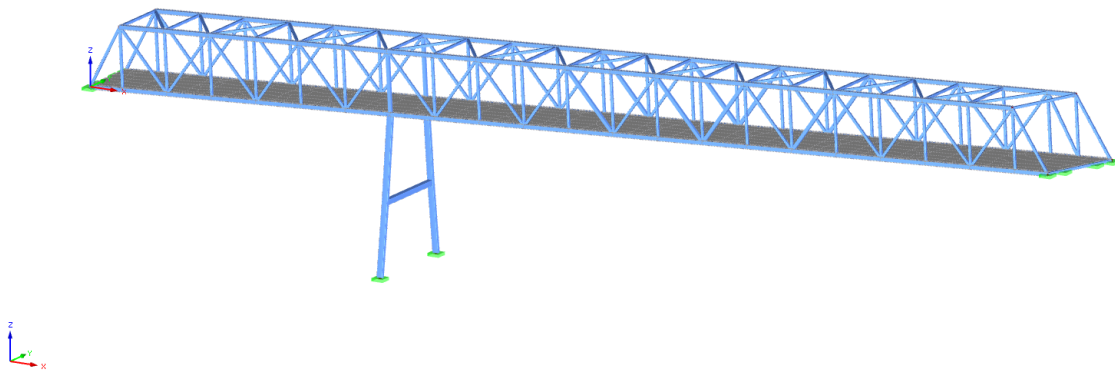


Figura 3: Vista general del modelo estructural .

A continuación, se detallan las secciones adoptadas en el modelo, acompañadas de su representación gráfica:

- **Sección 1: QRO 150x6 (acero S275, conformado en frío).** Corresponde a los **cordones superior e inferior** de la celosía principal, encargados de resistir las mayores sollicitaciones de tracción y compresión.

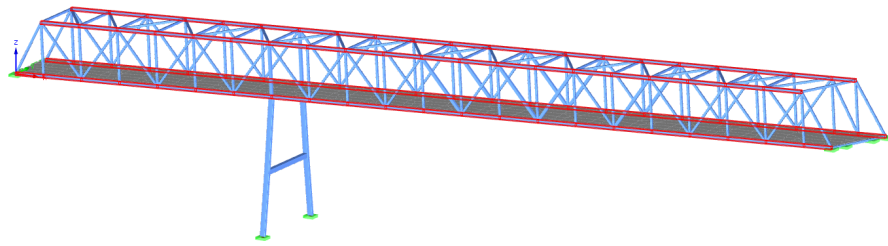


Figura 4: Vista del modelo con la Sección 1 (cordones superior e inferior).

- **Sección 2: QRO 100x5 (acero S275, conformado en frío).** Se asigna a la totalidad de los **montantes y diagonales** de la celosía, salvo en aquellos casos específicos en los que se ha optado por una sección distinta.

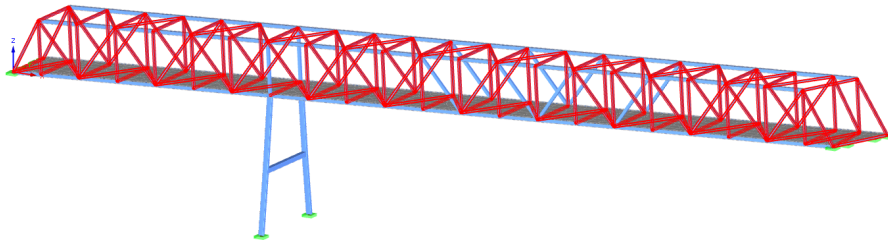


Figura 5: Vista del modelo con la Sección 2 (montantes y diagonales).

- **Sección 3: 2UV UPN 140-0 soldados entre sí (acero S275).** Esta sección se emplea en las **diagonales 6, 8, 9 y 11**, así como en el **montante 7** de cada celosía, comenzando la numeración desde el apoyo de mayor cota.

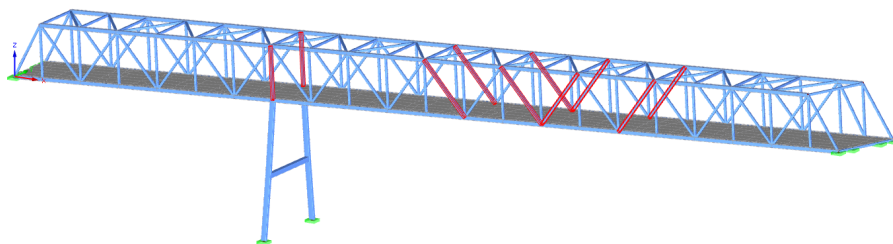


Figura 6: Vista del modelo con la Sección 3 (diagonales y montante reforzados).

- **Sección 4: QRO 220x10 (acero S275, conformado en caliente).** Corresponde al **travesaño intermedio del apoyo central**, cuya función principal es arriostrar los dos postes de apoyo.

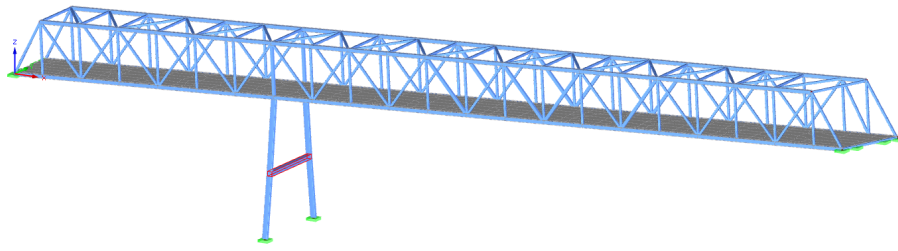


Figura 7: Vista del modelo con la Sección 4 (travesaño intermedio).

- **Sección 5: RRO 250x150x10 (acero S275, conformado en caliente).** Sección asignada a los **postes del apoyo intermedio**, elementos verticales encargados de transmitir las cargas de la pasarela hacia la cimentación.

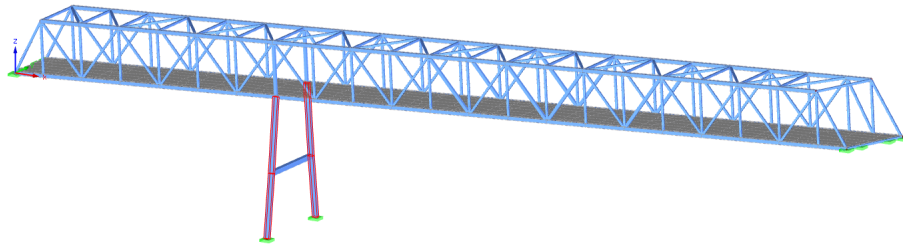


Figura 8: Vista del modelo con la Sección 5 (montantes del apoyo intermedio).

3.4. Apoyos

La pasarela se encuentra vinculada al terreno mediante diferentes tipos de apoyos, definidos en el modelo como **empotramientos completos**. Este tipo de condición de contorno implica la restricción total de los grados de libertad en los nudos correspondientes a los puntos de apoyo. Concretamente, se han bloqueado los desplazamientos en los ejes globales X , Y y Z (condiciones u_x , u_y , u_z), así como las rotaciones en torno a dichos ejes (φ_x , φ_y , φ_z). Esta condición asegura que no se permite ni movimiento ni giro en los nudos de apoyo, garantizando así la transmisión íntegra de las acciones de la estructura hacia la cimentación.

En el modelo estructural se han considerado dos tipos de apoyos:

- **Apoyos en nudos:** Se han asignado a los nudos de los extremos de los cordones inferiores y a los puntos de apoyo intermedio (nudos 1, 23, 45, 68, 93 y 94). Todos ellos se han definido como empotramientos completos.

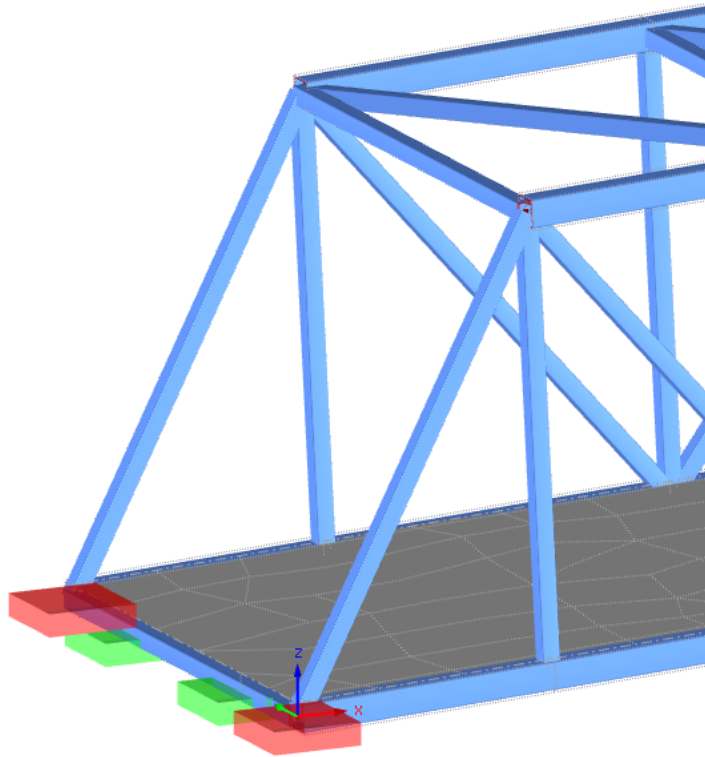


Figura 9: Definición de los apoyos en nudos como empotramientos completos.

- **Apoyos en línea:** Se han dispuesto en las líneas que representan el contacto de las barras verticales del apoyo intermedio con el terreno (líneas 113 y 158). También se han definido como empotramientos completos, representando de forma fiel la transmisión de cargas de la pasarela hacia el cimiento.

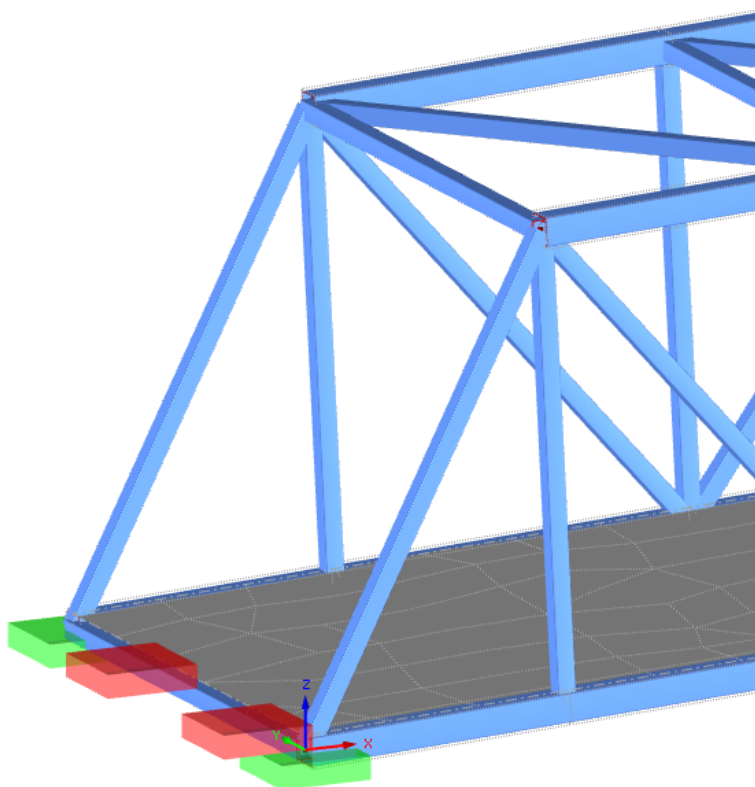


Figura 10: Definición de los apoyos en línea como empotramientos completos.

De esta forma, el conjunto de apoyos garantiza la estabilidad global de la pasarela y refleja de manera adecuada las condiciones reales de empotramiento de la estructura.

4. Introducción general de las cargas en la pasarela

En este trabajo se han considerado tanto las **acciones permanentes**, ligadas al propio peso de los materiales que constituyen la pasarela, como las **acciones variables**, que representan las solicitaciones derivadas del uso y de las condiciones ambientales. Entre estas últimas se incluyen la sobrecarga de uso, el viento y la nieve, que constituyen los estados más representativos a los que se expone la estructura en servicio.

Todos los cálculos necesarios para la obtención de las cargas aplicadas se encuentran desarrollados en el **Anexo I**, de forma que en este apartado únicamente se recogen las magnitudes finales y su implementación en el modelo estructural.

Cada caso de carga se ha introducido en RFEM de forma individual, detallándose a continuación tanto su magnitud como el modo de aplicación sobre los diferentes elementos estructurales.

Cuadro 1: Resumen de las cargas introducidas en el modelo.

ID	Carga	Magnitud	Dirección	Localización
CC1	Sobrecarga de uso vertical	5,00 kN/m ²	Vertical (Z)	Superficie del tablero
	Sobrecarga de uso longitudinal (10 % de q)	0,50 kN/m ²	Longitudinal (X)	Superficie del tablero
CC2	Viento	<i>Según elemento</i>	Transversal (Y)	Cordones, montantes, diagonales y apoyo intermedio
CC3	Peso propio estructura principal (celosía y plataforma)	-9,81 m/s ²	Vertical	Totalidad de la estructura
CC4	Nieve	0,40 kN/m ²	Vertical (Z)	Superficie del tablero

5. Combinaciones de carga

Introducción

Una vez definidos los casos de carga que actúan sobre la pasarela, es necesario combinarlos de acuerdo con lo indicado en la normativa vigente. La **IAP-11** establece los criterios generales para la formación de combinaciones de acciones, mientras que en el caso de la nieve se han completado los valores de simultaneidad con lo indicado en el **CTE DB-SE**.

El objetivo es comprobar la estructura tanto frente a los **Estados Límite Últimos (ELU)**, que garantizan la seguridad estructural frente a situaciones extremas, como frente a los **Estados Límite de Servicio (ELS)**, que aseguran la funcionalidad y comodidad en condiciones normales de uso.

Factores de simultaneidad

Las acciones variables no se aplican siempre de manera simultánea en sus valores característicos. Por ello, la normativa introduce coeficientes reductores denominados **factores de simultaneidad** (ψ):

- ψ_0 : valor de combinación, empleado en ELU para las acciones acompañantes.
- ψ_1 : valor frecuente, utilizado en ELS frecuentes.
- ψ_2 : valor cuasi-permanente, aplicado en combinaciones a largo plazo.

$$\text{Acción acompañante} = \psi \cdot Q_k$$

Cuadro 2: Coeficientes de simultaneidad para las acciones consideradas.

Acción	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga de uso	0,40	0,40	0,00
Viento	0,60	0,20	0,00
Nieve	0,50	0,20	0,00

Estado Límite Último (ELU)

En el ELU se busca garantizar la seguridad frente al agotamiento resistente de la estructura. La combinación fundamental en situación persistente o transitoria se define, según la IAP-11, como:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m}^* + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

donde:

- $G_{k,j}$: acciones permanentes de valor constante (peso propio).
- $G_{k,m}^*$: acciones permanentes de valor no constante (no aplican en este caso).
- $Q_{k,1}$: acción variable principal.

- $Q_{k,i}$: acciones variables acompañantes.
- γ_G, γ_Q : coeficientes parciales.
- $\psi_{0,i}$: factores de combinación.

Cuadro 3: Coeficientes parciales de seguridad para las acciones consideradas.

Acción	γ
Peso propio (permanente)	1,35
Sobrecarga de uso	1,50
Viento	1,50
Nieve	1,50

Estado Límite de Servicio (ELS)

En este estado se comprueba que la pasarela mantiene la aptitud en condiciones normales de uso, es decir, que no presenta deformaciones excesivas ni vibraciones que perjudiquen la durabilidad o la comodidad de los peatones.

Según la **IAP-11**, la combinación aplicable es la **frecuente**, ya que representa de forma realista las acciones que pueden coincidir durante la vida útil de una pasarela peatonal. En este caso, los coeficientes parciales de seguridad adoptan el valor 1 para todas las acciones. La expresión es:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \sum_{m \geq 1} \gamma_{G,m} G_{k,m} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \varphi_{0,i} Q_{k,i}$$

Criterio de resistencia del material

El material metálico empleado en la estructura es **acero S275**, cuyo límite elástico característico es $f_y = 275$ MPa. Considerando un coeficiente parcial $\gamma_M = 1,05$, la resistencia máxima admisible resulta:

$$\sigma_{adm} = \frac{f_y}{\gamma_M} \approx 262 \text{ MPa}$$

La verificación estructural se realiza mediante el criterio de **Von Mises**, asegurando que:

$$\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$$

6. Comprobación ELU y ELS

6.1. Estado Límite Último: Esfuerzos

El análisis estructural de la pasarela se ha realizado en el software **RFEM 5.0**, aplicando las combinaciones de carga definidas previamente. El objetivo principal de este apartado es identificar los elementos más solicitados de la estructura, comprobar en qué combinación de carga se alcanzan los máximos esfuerzos internos y contrastar dichos resultados con la resistencia admisible del material empleado.

Para ello, la pasarela se ha dividido en cinco familias de elementos: **cordón superior**, **cordón inferior**, **montantes**, **diagonales** y **apoyo intermedio**. Dentro de cada familia, se han identificado las barras críticas en función de tres parámetros principales:

- Esfuerzo axil (N)
- Momento torsor (M_t)
- Momento flector (M_y o M_z)

De esta forma, se determinó qué barra alcanzaba el valor máximo de cada esfuerzo y en qué **combinación de carga (CO)** se producía dicho máximo. Esta metodología permite localizar las zonas más exigidas de la estructura y asociar los esfuerzos a los escenarios de carga más desfavorables.

Envolvente de esfuerzos utilizada Los esfuerzos listados en este apartado proceden de la *envolvente de combinaciones en ELU* generada por **RFEM 5.0**. Es decir, para cada barra y tipo de esfuerzo (N , M_y , M_z , M_t) el programa evalúa todas las combinaciones definidas y toma automáticamente el valor más desfavorable. Por tanto, los resultados mostrados no corresponden a una única combinación aislada, sino al máximo obtenido entre todas las combinaciones ELU persistentes consideradas.

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos para cada familia de barras, mostrando tanto los esfuerzos máximos registrados como la combinación en la que se producen. Cabe señalar que los cálculos detallados de los valores máximos admisibles por cada sección se encuentran recogidos en el **Anexo II**.

Cordón superior (QRO 150x6)

Cuadro 4: Cordón superior: barras críticas y combinación asociada.

Criterio	Barra	Combinación	N (kN)	M_t (kNm) / M_y/M_z (kNm)
Máx. axil N	81	CO5	-525,29	$M_t = -0,10$; $M_z = -3,34$
Máx. M_t	53	CO8	+220,26	$M_t = -0,58$; $M_y = -4,94$
Máx. M_y	54	CO5	+205,33	$M_t = +0,26$; $M_y = -7,01$

Los valores admisibles de la sección QRO 150x6 son:

$$N_{\text{adm}} = 880,00 \text{ kN}, \quad T_{\text{adm}} = 34,78 \text{ kNm}, \quad M_{y,\text{adm}} = M_{z,\text{adm}} = 40,07 \text{ kNm}.$$

Dado que se cumple que

$$|N_{\text{máx}}| = 525,29 < 880,00, \quad |M_{t,\text{máx}}| = 0,58 < 34,78, \quad |M_{y,\text{máx}}| = 7,01 < 40,07,$$

la sección se considera **verificada** frente a esfuerzos axiales, de torsión y de flexión.

Cordón inferior (QRO 150x6)

Cuadro 5: Cordón inferior: barras críticas y combinación asociada.

Criterio	Barra	Combinación	N (kN)	M_t (kNm) / M_y (kNm)
Máx. axil N	1	CO4	-362,68	$M_t = +6,26$; $M_y = -21,21$
Máx. M_t	1	CO5	-358,36	$M_t = +6,39$; $M_y = -21,60$
Máx. M_y	23	CO5	-300,96	$M_t = +5,56$; $M_y = -24,60$

Los valores admisibles de la sección QRO 150x6 son:

$$N_{\text{adm}} = 880,00 \text{ kN}, \quad T_{\text{adm}} = 34,78 \text{ kNm}, \quad M_{y,\text{adm}} = 40,07 \text{ kNm}.$$

Dado que se cumple que

$$|N_{\text{máx}}| = 362,68 < 880,00, \quad |M_{t,\text{máx}}| = 6,39 < 34,78, \quad |M_{y,\text{máx}}| = 24,60 < 40,07,$$

la sección se considera **verificada** frente a esfuerzos axiles, de torsión y de flexión.

Montantes (2× UPN 140-0 soldados)

Cuadro 6: Montantes (2× UPN 140): barras críticas y combinación asociada.

Criterio	Barra	Combinación	N (kN)	M_t (kNm) / M_y/M_z (kNm)
Máx. axil N	96	CO5	$N = -413,46$	$M_t = +0,03$; $M_z = +4,50$
Máx. M_t	95	CO5	$N = -392,25$	$M_t = +0,05$; $M_y = +1,04$
Máx. M_z	96	CO8	$N = -328,18$	$M_t = +0,02$; $M_z = +5,87$

Los valores admisibles de la sección **2× UPN 140-0** (S275) son:

$$N_{\text{adm}} = 1\,068,55 \text{ kN}, \quad M_{y,\text{adm}} = 45,27 \text{ kNm}, \quad M_{z,\text{adm}} = 37,64 \text{ kNm}.$$

Dado que se cumple que

$$|N_{\text{máx}}| = 413,46 < 1\,068,55, \quad |M_{y,\text{máx}}| = 1,04 < 45,27, \quad |M_{z,\text{máx}}| = 5,87 < 37,64,$$

Comparando con el valor máximo torsor del modelo:

$$|M_{t,\text{máx}}| = 0,05 \text{ kN m} < T_{\text{adm}} = 31,10 \text{ kN m},$$

por lo que la verificación a torsión *se cumple ampliamente* y la torsión no condiciona el dimensionamiento frente a axil y flexión.

Diagonales (QRO 100×5)

Cuadro 7: Diagonales: barras críticas y combinación asociada.

Criterio	Barra	Combinación	N (kN)	M_t (kNm) / M_y/M_z (kNm)
Máx. axil N	122	CO5	$N = +318,85$	$M_t = +0,17$; $M_y = -2,23$
Máx. M_t	91	CO5	$N = +178,76$	$M_t = +0,61$; $M_z = +3,17$
Máx. M_y	122	CO5	$N = +318,85$	$M_t = +0,17$; $M_y = -2,23$

Los valores admisibles de la sección son:

$$N_{\text{adm}} = 481,90 \text{ kN}, \quad M_{y,\text{adm}} = M_{z,\text{adm}} = 14,20 \text{ kNm}, \quad T_{\text{adm}} = 12,35 \text{ kNm}.$$

Dado que se cumple que

$$|N_{\text{máx}}| = 318,85 < 481,90, \quad |M_{t,\text{máx}}| = 0,61 < 12,35, \quad |M_{y,\text{máx}}| = 2,23 < 14,20,$$

la sección se considera **verificada** frente a esfuerzos axiales, de torsión y de flexión.

Apoyo intermedio (RRO 250×150×10)

Cuadro 8: Apoyo intermedio: barras críticas y combinación asociada.

Criterio	Barra	Combinación	N (kN)	M_t (kNm) / M_y/M_z (kNm)
Máx. axil N	266	CO5	$N = -476,51$	$M_t = +0,09; M_z = -7,14$
Máx. M_t	263	CO5	$N = -472,03$	$M_t = -0,15; M_y = +11,39$
Máx. M_y	263	CO5	$N = -472,03$	$M_t = -0,15; M_y = +11,39$

Los valores admisibles de la sección **RRO 250×150×10** (S275) son:

$$N_{\text{adm}} = 1\,961,63 \text{ kN}, \quad T_{\text{adm}} = 91,48 \text{ kNm}, \quad M_{y,\text{adm}} = 129,38 \text{ kNm}, \quad M_{z,\text{adm}} = 96,12 \text{ kNm}.$$

Dado que se cumple que

$$\begin{aligned} |N_{\text{máx}}| &= 476,51 < 1\,961,63, \\ |M_{t,\text{máx}}| &= 0,15 < 91,48, \\ |M_{y,\text{máx}}| &= 11,39 < 129,38, \\ |M_{z,\text{máx}}| &= 7,14 < 96,12, \end{aligned}$$

la sección se considera **verificada** frente a esfuerzos axiales, de torsión y de flexión.

Contenido de las combinaciones empleadas en los resultados En RFEM se han definido los casos de carga: CC1 = Sobrecarga de uso, CC2 = Viento, CC3 = Peso propio, CC4 = Nieve. Las combinaciones citadas en las tablas son, por tanto, las siguientes:

CO4: $1,5 \text{ CC1} + 0,9 \text{ CC2} + 1,35 \text{ CC3} + 0,75 \text{ CC4}$,

CO5: $1,5 \text{ CC1} + 1,35 \text{ CC3} + 0,75 \text{ CC4}$,

CO8: $1,05 \text{ CC1} + 1,5 \text{ CC2} + 1,35 \text{ CC3} + 0,75 \text{ CC4}$.

6.2. Estado Límite de Servicio: Deformaciones

De acuerdo con la *IAP-11*, en su apartado **7.1.1 Estado límite de deformaciones**, se establece que la flecha vertical máxima correspondiente al valor frecuente de la sobrecarga de uso no debe superar los siguientes límites:

- $\frac{L}{1000}$ en puentes de carretera.
- $\frac{L}{1200}$ en pasarelas o en puentes con zonas peatonales.

En el caso de la pasarela objeto de estudio, cuya luz es de $L = 31,8 \text{ m}$ (vano largo), el límite normativo aplicable es:

$$\frac{L}{1200} = \frac{31\,800 \text{ mm}}{1200} = 26,5 \text{ mm}.$$

El modelo estructural en RFEM, bajo la combinación de cargas correspondiente al estado de carga **ELS frecuente**, arroja una deformación vertical máxima de $24,2 \text{ mm}$.

Dado que

$$24,2 \text{ mm} < 26,5 \text{ mm},$$

se concluye que la pasarela **cumple satisfactoriamente la condición establecida en la normativa** respecto al límite de flecha vertical.

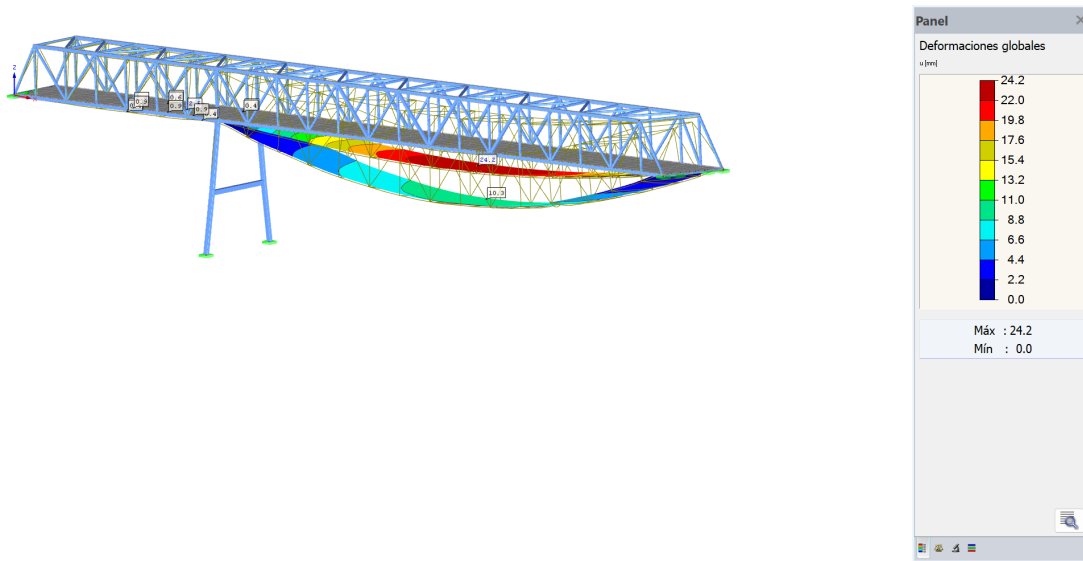


Figura 11: Deformación global de la pasarela bajo el estado de carga ELS frecuente.

7. Comprobación a pandeo

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad que limita la resistencia a compresión de las barras esbeltas. La normativa (Eurocódigo 3 y CTE DB-SE-A) establece que la comprobación se realice en varios pasos:

1. Cálculo de la **carga crítica de Euler**:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2}$$

2. Determinación de la **esbeltez reducida**:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}}, \quad N_{pl,Rk} = A \cdot f_y$$

3. Obtención del **coeficiente reductor por pandeo**:

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad \varphi = \frac{1}{2} [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

donde α depende de la curva de pandeo de la sección (curva a: 0,21; curva b: 0,34; curva c: 0,49; curva d: 0,76).

4. Cálculo de la **resistencia de cálculo a compresión con pandeo**:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

5. Verificación final:

$$N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$$

7.1. Cordones superior e inferior (QRO 150×6)

Para los cordones superior e inferior se adopta:

$$A = 3360 \text{ mm}^2, \quad I = 11,475 \times 10^6 \text{ mm}^4, \quad L_k = 2000 \text{ mm}, \quad f_y = 275 \text{ MPa}, \quad E = 210,000 \text{ MPa}$$

con curva de pandeo **c** ($\alpha = 0,49$).

Carga crítica de Euler

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 210,000 \cdot 11,475 \cdot 10^6}{2000^2} = 5946 \text{ kN}$$

Esbeltez reducida

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3360 \cdot 275}{5946 \cdot 10^3}} = 0,394$$

Coefficiente de reducción

$$\varphi = \frac{1}{2} [1 + 0,49(0,394 - 0,2) + 0,394^2] = 0,625$$

$$\chi = \frac{1}{0,625 + \sqrt{0,625^2 - 0,394^2}} = 0,899$$

Resistencia de cálculo

$$N_{b,Rd} = 0,899 \cdot 3360 \cdot \frac{275}{1,05} = 791 \text{ kN}$$

Verificación

$$\text{Cordón superior (barra 81): } N_{Ed} = 525,29 \text{ kN} \Rightarrow 525,29 < 791 \quad \checkmark$$

$$\text{Cordón inferior (barra 1): } N_{Ed} = 362,68 \text{ kN} \Rightarrow 362,68 < 791 \quad \checkmark$$

Por tanto, los cordones superior e inferior cumplen la verificación a pandeo.

7.2. Montantes (2×UPN 140)

Para los montantes se adopta:

$$A = 4080 \text{ mm}^2, \quad I_z = 4,31 \times 10^6 \text{ mm}^4, \quad L_k = 2500 \text{ mm}, \quad f_y = 275 \text{ MPa}, \quad E = 210,000 \text{ MPa}$$

con curva de pandeo **c** ($\alpha = 0,49$).

Carga crítica de Euler

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot 210,000 \cdot 4,31 \cdot 10^6}{2500^2} = 1429 \text{ kN}$$

Esbeltez reducida

$$N_{pl,Rk} = A \cdot f_y = 4080 \cdot 275 = 1122 \text{ kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{1122}{1429}} = 0,886$$

Coefficiente de reducción

$$\varphi = \frac{1}{2} [1 + 0,49(0,886 - 0,2) + 0,886^2] = 1,061$$

$$\chi = \frac{1}{1,061 + \sqrt{1,061^2 - 0,886^2}} = 0,608$$

Resistencia de cálculo

$$N_{b,Rd} = 0,608 \cdot 4080 \cdot \frac{275}{1,05} = 650,2 \text{ kN}$$

Verificación

$$N_{Ed} = 413,46 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 650,2 \text{ kN} \quad \checkmark$$

Por tanto, los montantes cumplen la verificación a pandeo.

7.3. Diagonales (QRO 100×5)

Aunque la envolvente de esfuerzos muestra que la diagonal más solicitada alcanza su máximo en tracción, se verifica asimismo una diagonal con el *máximo axil en compresión* para asegurar que, bajo combinaciones desfavorables, la estabilidad por pandeo también queda garantizada.

Para la diagonal crítica en compresión (QRO 100×5) se adoptan:

$$A = 1840 \text{ mm}^2, \quad I \simeq 2,71 \times 10^6 \text{ mm}^4, \quad L_k = 3202 \text{ mm}, \quad f_y = 275 \text{ MPa}, \quad E = 210\,000 \text{ MPa},$$

con curva de pandeo **c** ($\alpha = 0,49$). El esfuerzo de cálculo de la envolvente ELU es $N_{Ed} = -308,25 \text{ kN}$ (compresión).

Carga crítica de Euler

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2,71 \cdot 10^6}{3202^2} = 547,83 \text{ kN}.$$

Esbeltez reducida

$$N_{pl,Rk} = A f_y = 1840 \cdot 275 = 506,0 \text{ kN}, \quad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{506,0}{547,83}} = 0,961.$$

Coefficiente de reducción

$$\varphi = \frac{1}{2} [1 + 0,49(0,961 - 0,2) + 0,961^2] = 1,148, \quad \chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0,563.$$

Resistencia de cálculo

$$N_{b,Rd} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,563 \cdot 1840 \cdot \frac{275}{1,05} = 271,24 \text{ kN}.$$

Verificación

$$|N_{Ed}| = 308,25 \text{ kN} \not\leq N_{b,Rd} = 271,24 \text{ kN}.$$

Con las hipótesis conservadoras adoptadas (articulaciones en nudo y $K = 1$), la diagonal no verifica. La comprobación podría cumplirse justificando una menor longitud eficaz ($K < 1$ por arriostramiento/condiciones de nudo), o bien mediante un incremento de sección/espesor.

Con los valores geométricos extraídos de los planos disponibles, la diagonal no cumple la comprobación de pandeo. Sin embargo, dado que la documentación facilitada por el Ayuntamiento presenta ciertas limitaciones (no todos los espesores y detalles están especificados con claridad), es razonable considerar que en la estructura real dicha diagonal cuenta con un espesor mayor al indicado en los planos, lo que le confiere una mayor capacidad resistente y permite satisfacer la condición de verificación.

7.4. Apoyo intermedio (RRO 250×150×10)

Datos adoptados:

$$A = 7490 \text{ mm}^2, \quad I_z = 27,53 \times 10^6 \text{ mm}^4, \quad L_k = 2939 \text{ mm}, \quad f_y = 275 \text{ MPa}, \quad E = 210,000 \text{ MPa},$$

curva de pandeo **a** ($\alpha = 0,21$). En la envolvente ELU de RFEM: $N_{Ed} = 476,51 \text{ kN}$ (compresión).

Carga crítica de Euler

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_z}{L_k^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210\,000 \cdot 27,53 \cdot 10^6}{2939^2} = 6605,81 \text{ kN}.$$

Esbeltez reducida

$$N_{pl,Rk} = A f_y = 7490 \cdot 275 = 2059,75 \text{ kN}, \quad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,Rk}}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{2059,75}{6605,81}} = 0,558.$$

Coefficiente de reducción

$$\varphi = \frac{1}{2} [1 + 0,21(0,558 - 0,2) + 0,558^2] = 0,694, \quad \chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0,905.$$

Resistencia de cálculo

$$N_{b,Rd} = \chi A \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = 0,905 \cdot 7490 \cdot \frac{275}{1,05} = 1775,50 \text{ kN.}$$

Verificación

$$N_{Ed} = 476,51 \text{ kN} < N_{b,Rd} = 1775,50 \text{ kN} \quad \checkmark$$

El apoyo intermedio verifica holgadamente la comprobación a pandeo.

8. Análisis modal y verificación del ELS de vibraciones

Se ha realizado un análisis modal con RFEM 5.0 obteniendo las diez primeras frecuencias naturales de la pasarela. De acuerdo con la IAP-11 (7.2.2), se considera verificado el Estado Límite de Servicio (ELS) de vibraciones si las frecuencias naturales se sitúan fuera de los rangos críticos: (i) vibraciones verticales y longitudinales: 1,25–4,60 Hz, (ii) vibraciones laterales: 0,50–1,20 Hz.

En la Tabla 9 se recogen las diez primeras frecuencias naturales del modelo. El primer modo aparece a 5,304 Hz y, por tanto, todas las frecuencias analizadas quedan fuera de los rangos críticos indicados por la IAP-11. En consecuencia, el ELS de vibraciones queda **verificado**.

Cuadro 9: Primeras diez frecuencias naturales del modelo.

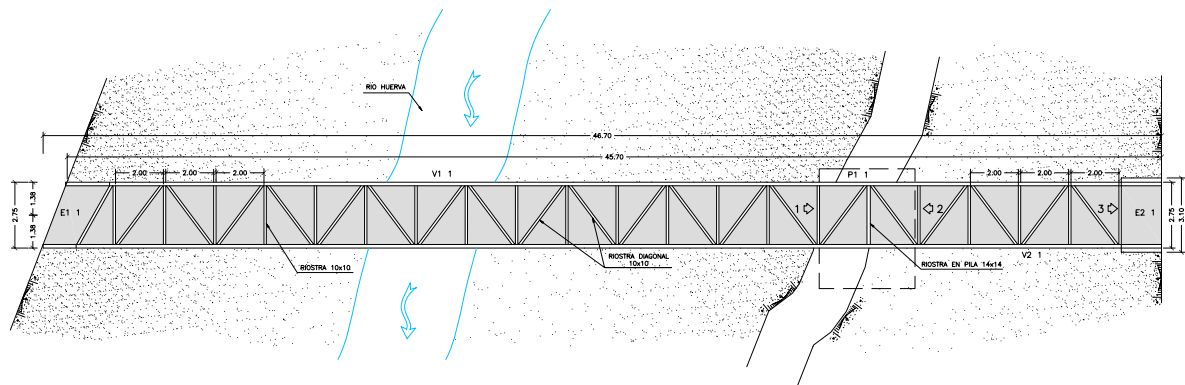
Modo	f [Hz]	ω [rad/s]
1	5.304	33.304
2	7.354	46.223
3	8.611	54.102
4	9.274	58.269
5	10.842	68.134
6	12.007	75.427
7	13.915	87.436
8	15.437	96.977
9	18.203	114.394
10	19.777	124.205

Cabe señalar que las **formas modales correspondientes a cada uno de los diez primeros modos** se incluyen en el **Anexo III**. En dichas figuras se representan los desplazamientos normalizados obtenidos en RFEM 5.0, permitiendo visualizar con detalle la configuración de cada modo.

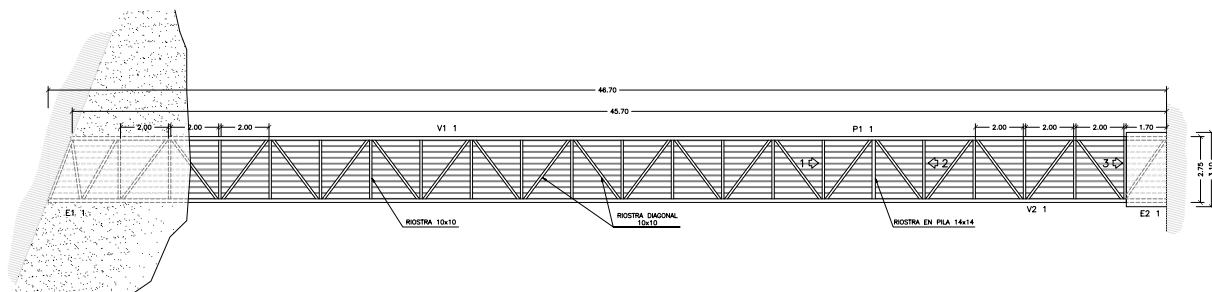
Anexos

Anexo 0. Planos facilitados por el Ayuntamiento

En este anexo se incluyen los planos originales de la pasarela de Marina Española, facilitados por el Ayuntamiento de Zaragoza, los cuales han servido como base para el modelado y cálculo estructural realizado en este Trabajo Fin de Grado.

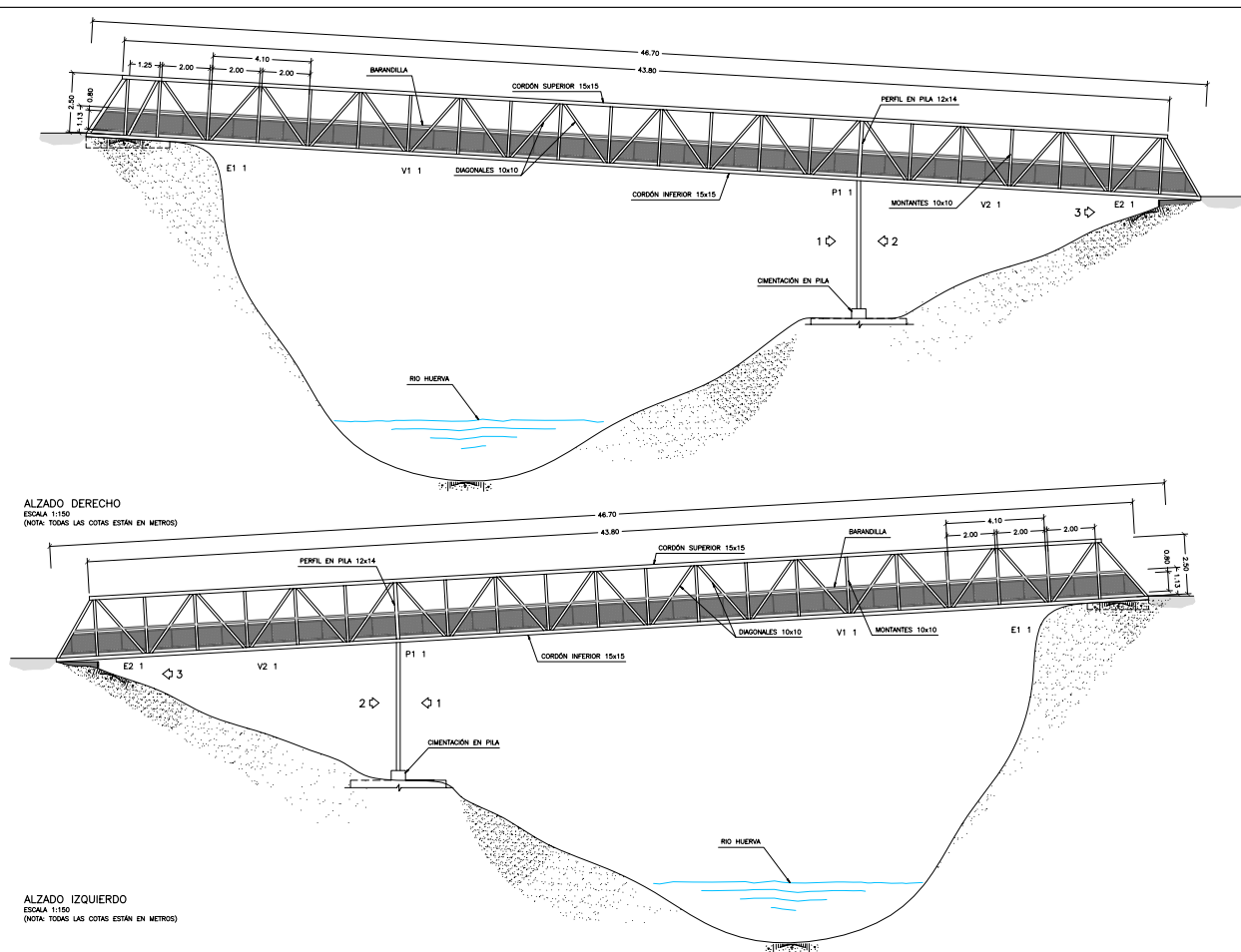


PLANTA SOBRE TABLERO. V1 1 Y V2 1.
ESCALA 1:150
(NOTA: TODAS LAS COTAS ESTÁN EN METROS)

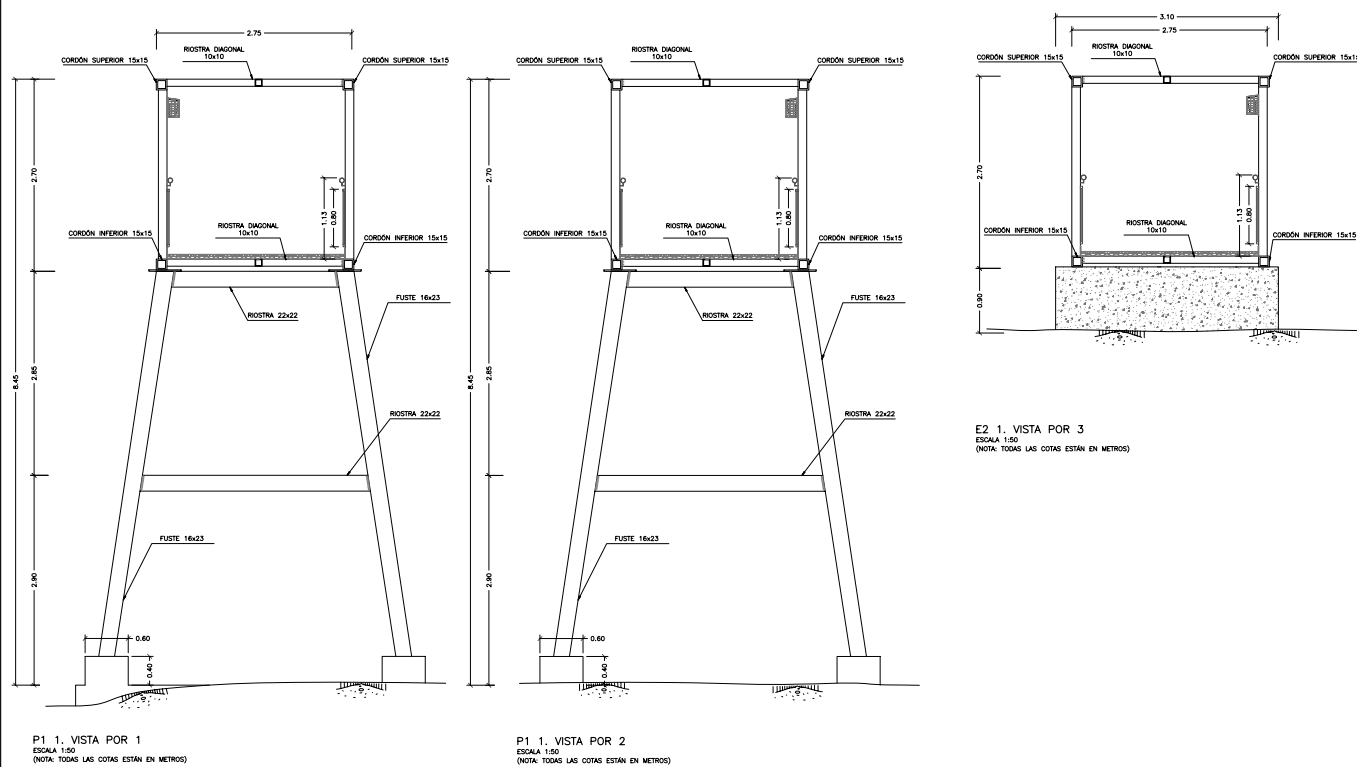


PLANTA BAJO TABLERO. V1 1 Y V2 1.
ESCALA 1:150
(NOTA: TODAS LAS COTAS ESTÁN EN METROS)

	AREA DE INFRAESTRUCTURAS Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA	SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS	EL INGENIERO DE CAMINOS DIRECTOR DEL CONTRATO JESUS GIMENEZ PEREZ Nº 12134	CONSULTOR 	EL INGENIERO DE CAMINOS AUTOR DEL ESTUDIO GONZALO ARIAS HOFMAN Nº 13265	PROYECTO SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE PUENTES. INSPECCIÓN DE LOS PUENTES SOBRE LOS RIOS EBRO Y HUERVA DEL AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA	FECHA	ARCHIVO	ESCALA	PLANO COD. 0190 PASARELA EN C/MARINA ESPAÑOLA. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA. PLANTAS.	PLANO Nº 02 HOJA 1/3		
							ESCALA GRÁFICA						



	AREA DE INFRAESTRUCTURAS Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA	SERVICIO DE CONSERVACIÓN	EL INGENIERO DE CAMINOS DIRECTOR DEL CONTRATO JESUS GIMENEZ PEREZ N.º 12134	CONSULTOR ines ingeniería de caminos	EL INGENIERO DE CAMINOS AUTOR DEL ESTUDIO GONZALO ARBAS HORMAN V.º 13261	PROYECTO SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE PUENTES. INSPECCIÓN DE LOS PUENTES SOBRE LOS RIOS EIBRO Y HUERA DEL AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA	FECHA ARCHIVO ESCALA PLANO	01/15/2017 ESCALA GRAFICA 0 1 2 3	COD. 0190 PASARELA EN C/MARINA ESPAÑOLA, ALZADOS.	PLANO Nº 02/03
--	--	--------------------------	--	---	---	--	----------------------------	---	---	-------------------



	AREA DE INFRAESTRUCTURAS Y PARTICIPACIÓN CIUDADANA	SERVICIO DE CONSERVACIÓN DE INFRAESTRUCTURAS	EL INGENIERO DE CAMINOS DIRECTOR DEL CONTRATO JESUS GIMENEZ PEREZ Nº 12134	CONSULTOR  ines ingenieros de caminos	EL INGENIERO DE CAMINOS AUTOR DEL ESTUDIO GONZALO ARIAS HOFMAN Nº 13265	PROYECTO SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL DE PUENTES. INSPECCIÓN DE LOS PUENTES SOBRE LOS RIOS EBRO Y HUERVA DEL AYUNTAMIENTO DE ZARAGOZA	FECHA	ARCHIVO	ESCALA	PLANO COD. 0190 PASARELA EN C/MARINA ESPAÑOLA. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA. PILAS Y ESTRIBO.	PLANO Nº 02 HOJA 3/3		
							ESCALA GRÁFICA						
							0 1						

Anexo I. Cálculo de cargas estructurales

En este anexo se recogen todos los cálculos realizados para la obtención de las diferentes acciones que actúan sobre la pasarela, con el fin de ser introducidas posteriormente en el modelo de análisis estructural en RFEM 5.0. Se incluyen tanto las acciones permanentes como las variables (sobrecarga de uso y viento), calculadas conforme a lo indicado en la normativa **IAP-11**.

Cada apartado detalla la expresión utilizada, los datos empleados, su justificación normativa y los valores finales en forma de cargas lineales aplicables sobre las barras del modelo.

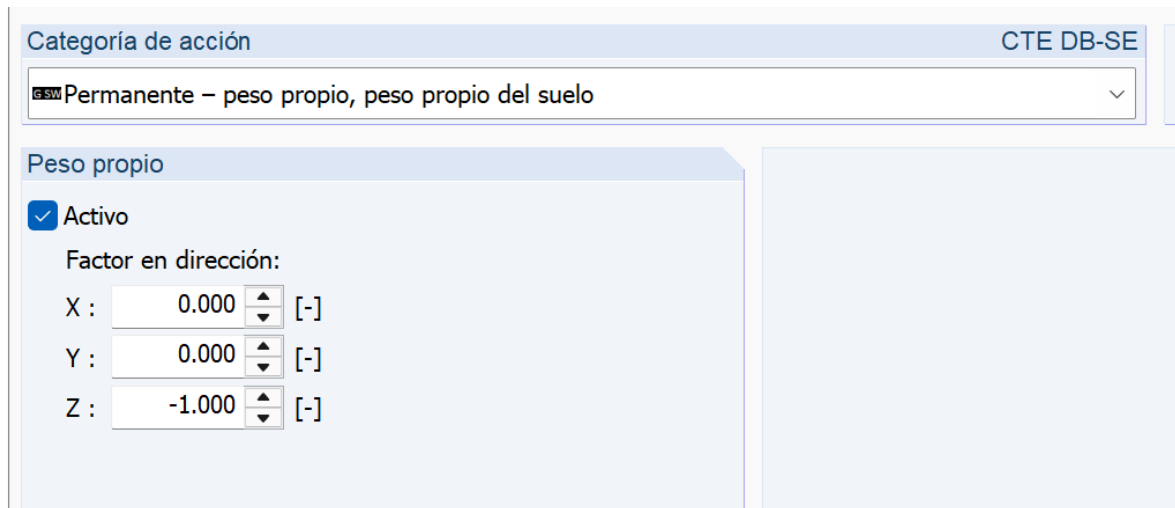
Acciones permanentes

8.1. Definición del peso propio en RFEM

En el modelo desarrollado con RFEM 5.0, se ha definido un caso de carga específico para el peso propio de la estructura. Este caso se ha configurado como una acción permanente, asignándole una aceleración gravitatoria estándar en la dirección vertical (eje Z negativo).

- **Categoría de acción:** Permanente – peso propio.
- **Dirección:** $Z = -1.0$
- **Unidades del modelo:** Longitudes en [m], fuerzas en [kN], aceleración en [m/s²], masas en [kg].

La aceleración introducida se combina automáticamente con la densidad de los materiales (en kg/m³), de modo que RFEM genera correctamente la carga distribuida equivalente de peso propio en unidades de kN/m² o kN/m, según el caso.



Categoría de acción CTE DB-SE

Permanent – peso propio, peso propio del suelo

Peso propio

☒ Activo

Factor en dirección:

X : 0.000 [-]

Y : 0.000 [-]

Z : -1.000 [-]

Figura 12: Definición del caso de carga para el peso propio en RFEM.

Acciones Variables

8.2. Sobrecarga de uso (q_k)

De acuerdo con el apartado 4.1.8 de la IAP-11, se define una carga vertical uniformemente distribuida de valor $q_k = 5 \text{ kN/m}^2$, correspondiente al tráfico peatonal. Esta carga debe actuar de forma simultánea con una carga horizontal longitudinal Q_{hk} igual al 10 % de q_k .

Dado que la pasarela presenta un ancho de 2,75 m, la carga lineal equivalente aplicada sobre las barras es:

$$q = q_k \cdot b = 5 \text{ kN/m}^2 \cdot 2,75 \text{ m} = 13,75 \text{ kN/m}$$

En la figura 13 se muestra la aplicación de q sobre las barras correspondientes:

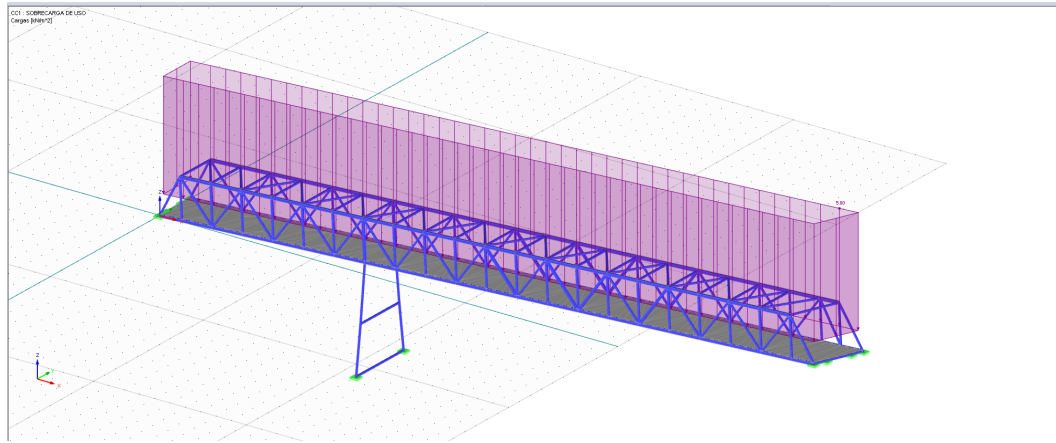


Figura 13: Carga vertical uniformemente distribuida aplicada en sentido Z global sobre el tablero.

Según el mismo apartado normativo, la acción Q_{hk} se define como:

$$Q_{hk} = 0,10 \cdot q_k = 0,5 \text{ kN/m}^2$$

Esta carga se aplicó como una fuerza distribuida uniforme en dirección X global (longitudinal de la pasarela) sobre el tablero. En la figura 14 puede verse la dirección de dicha carga:

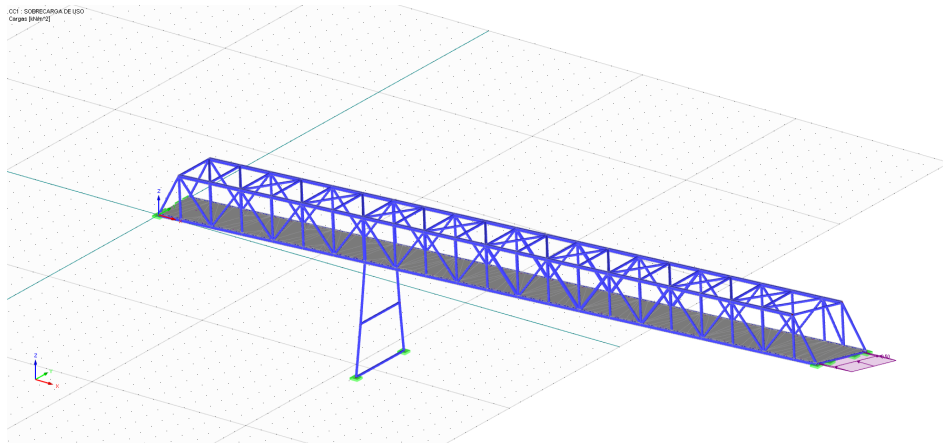


Figura 14: Carga horizontal longitudinal $Q_{hk} = 0,5 \text{ kN/m}$ aplicada en dirección X global sobre el tablero.

Resultado final en RFEM

La figura 15 resume el estado del modelo con ambas cargas aplicadas sobre los cordones inferiores:

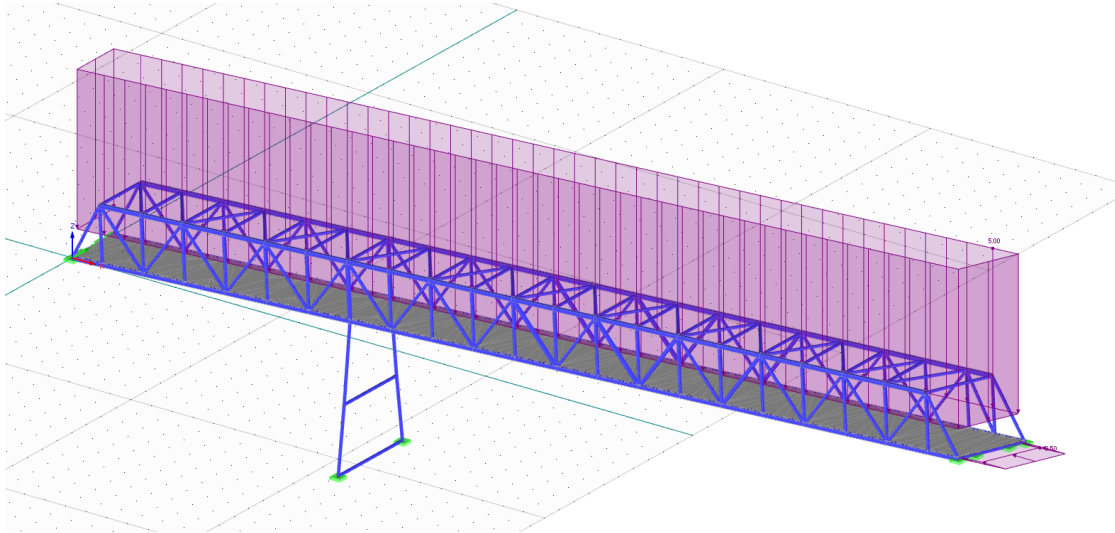


Figura 15: Vista general del modelo estructural con las cargas q y Q_{hk} correctamente definidas.

8.3. Acción del viento sobre la pasarela

El análisis de la acción del viento se ha desarrollado siguiendo rigurosamente los criterios establecidos en la normativa **IAP-11**, sección 4.2. A continuación se presentan, en orden, los subapartados normativos considerados para la evaluación de esta acción, incluyendo todos los cálculos y referencias normativas pertinentes.

8.3.1. Velocidad básica del viento (V_b)

Tal como se establece en el **apartado 4.2.1 de la IAP-11**, la velocidad básica del viento se define como la velocidad media del viento a 10 metros de altura en terreno abierto, con un periodo de retorno de 50 años. Esta velocidad se obtiene del **Mapa de isotacas** incluido en dicha normativa.



FIGURA 4.2-a MAPA DE ISOTACAS PARA LA OBTENCIÓN DE LA VELOCIDAD BÁSICA FUNDAMENTAL DEL VIENTO $v_{b,0}$
(Coincide con el mapa correspondiente del Código Técnico de la Edificación)

Figura 16: Mapa de isotacas para la obtención de la velocidad básica fundamental del viento V_b .

Para el caso de Zaragoza, la velocidad básica correspondiente es:

$$V_b = 27 \text{ m/s}$$

Este valor se usará como base para el cálculo de la presión dinámica del viento y la velocidad media a la altura del tablero.

8.3.2. Velocidad media del viento

La velocidad media del viento a una determinada altura se calcula según el apartado **4.2.2 de la IAP-11**, mediante la siguiente expresión:

$$V_m(z) = c_r(z) \cdot c_o \cdot V_b$$

Donde:

- $V_b = 27$ m/s es la velocidad básica del viento en Zaragoza.
- $c_o = 1,0$ es el coeficiente topográfico (sin canalización del viento).
- $c_r(z)$ es el coeficiente de rugosidad a la altura z , dado por:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$$

Dado que la pasarela se encuentra en un entorno urbano consolidado (tipo IV según tabla 4.2-b), se toman los siguientes parámetros:

- $k_r = 0,235$
- $z_0 = 1,0$ m
- $z = 15$ m (altura media del tablero respecto al terreno natural y lecho del río Huerva)

Cálculo de $c_r(z)$:

$$\ln \left(\frac{15}{1} \right) = \ln(15) = 2,708 \Rightarrow c_r(15) = 0,235 \cdot 2,708 = \boxed{0,636}$$

Velocidad media del viento a $z = 15$ m:

$$V_m(15) = 0,636 \cdot 1,0 \cdot 27 = \boxed{17,17 \text{ m/s}}$$

Este valor será empleado en los cálculos posteriores del empuje del viento sobre el tablero, pilas y estructura auxiliar.

TABLA 4.2-b COEFICIENTES k_r , z_0 Y z_{min} SEGÚN EL TIPO DE ENTORNO

TIPO DE ENTORNO	k_r	z_0 [m]	z_{min} [m]
0	0,156	0,003	1
I	0,170	0,01	1
II	0,190	0,05	2
III	0,216	0,30	5
IV	0,235	1,00	10

Figura 17: Coeficientes según el tipo de entorno.

8.3.3. Empuje del viento sobre el tablero

El empuje del viento sobre el tablero se calcula de acuerdo con la expresión general indicada en el apartado **4.2.3 de la IAP-11**:

$$F_w = q_z \cdot c_f \cdot A_{\text{ref}}$$

Paso 1. Cálculo de la presión de la velocidad básica del viento:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 27^2 = \boxed{456 \text{ N/m}^2}$$

Paso 2. Cálculo del coeficiente de exposición a la altura $z = 15$ m:

$$\ln\left(\frac{15}{1}\right) = \ln(15) = 2,708$$

$$c_e(15) = k_r^2 \cdot \left[c_o^2 \cdot \ln^2\left(\frac{z}{z_0}\right) + 7 \cdot k_1 \cdot c_o \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right]$$

$$c_e(15) = 0,235^2 \cdot [2,708^2 + 7 \cdot 2,708] = \boxed{1,45}$$

Paso 3. Cálculo de la presión dinámica del viento a 15 m:

$$q_z = q_b \cdot c_e(15) = 456 \cdot 1,45 = \boxed{662 \text{ N/m}^2}$$

Paso 4. Cálculo del área proyectada A_{ref} :

La altura expuesta al viento incluye el canto del tablero y el valor de 1,25 m adicional exigido por normativa:

$$h_{\text{total}} = 0,075 + 1,25 = \boxed{1,325 \text{ m}}, \quad L = 46,7 \text{ m}$$

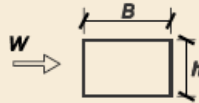
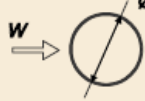
$$A_{\text{ref}} = L \cdot h_{\text{total}} = 46,7 \cdot 1,325 = \boxed{61,88 \text{ m}^2}$$

Paso 5. Cálculo del coeficiente de fuerza c_f :

El tablero se modela como un elemento prismático rectangular con el viento incidiendo sobre su canto. Según la figura **4.2-b** de la IAP-11, el coeficiente de fuerza depende de la relación:

$$\frac{B}{h} = \frac{2,75}{1,325} = 2,08 \approx 2,0$$

$$\boxed{c_f = 1,65}$$

	$\frac{B}{h}$	$\leq 0,2$	0,4	0,6	0,7	1,0	2,0	5,0	$\geq 10,0$
	c_f	2,0	2,2	2,35	2,4	2,1	1,65	1,0	0,9
 $c_f = 1,4$	 sección circular con superficie lisa y tal que: $\varnothing v_b(T) \sqrt{c_s(z)} > 6 \text{ m/s}$ $c_f = 0,7$ sección circular con superficie rugosa^(*), o lisa tal que: $\varnothing v_b(T) \sqrt{c_s(z)} < 6 \text{ m/s}$ $c_f = 1,2$								
 $c_f = 1,8$	 $c_f = 1,6$	 $c_f = 1,45$	 $c_f = 1,3$						
 $c_f = 1,6$	 $c_f = 2,2$			 $c_f = 2,0$					

(*) Se tomará siempre superficie rugosa excepto si la rugosidad superficial equivalente resulta menor de $\phi \cdot 10^{-5} \text{ m}$

FIGURA 4.2-b COEFICIENTE DE FUERZA c_f PARA LAS SECCIONES MÁS HABITUALES

Figura 18: Coeficiente de fuerza c_f para las secciones más habituales (Figura 4.2-b de la IAP-11).

Paso 6. Cálculo del empuje del viento sobre el tablero:

$$F_{w,X} = q_z c_f A_{\text{ref}} = 662 \text{ N/m}^2 \times 1,65 \times 61,88 \text{ m}^2 = \boxed{67,6 \text{ kN}}$$

Como esta fuerza se distribuye uniformemente a lo largo de la longitud del tablero ($L = 46,7 \text{ m}$), se convierte en una carga lineal:

$$q_{\text{lineal}} = \frac{F_{w,x}}{L} = \frac{67,6}{46,7} \approx 1,447 \text{ kN/m}$$

Esta carga ha sido aplicada en RFEM 5.0 sobre todas las barras horizontales del tablero como una fuerza distribuida uniforme en dirección **Y global positiva**, tal como se muestra en la Figura 19.

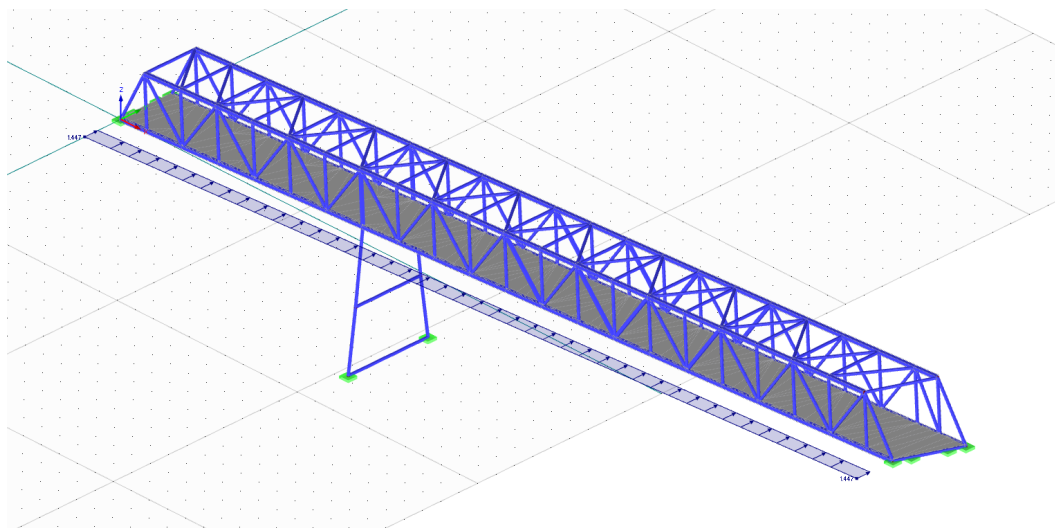


Figura 19: Aplicación de la carga de viento sobre el tablero en RFEM 5.0

8.3.4. Dirección del viento

De acuerdo con lo indicado en el apartado **4.2.4 de la IAP-11**, la acción del viento sobre la estructura se considera en dos direcciones principales:

- **Dirección transversal (X):** perpendicular al eje del tablero. Esta componente podrá ir acompañada de una componente vertical (Z). En RFEM 5.0 se corresponde a nuestra dirección Y dado que los ejes están girados.
- **Dirección longitudinal (Y):** paralela al eje del tablero. En RFEM 5.0 se corresponde con la dirección X.

En el caso de la pasarela proyectada, de trazado recto en planta, no es necesario considerar efectos de curvatura. Se tomarán por tanto las dos direcciones ortogonales principales, y para cada una de ellas, se evaluará el efecto del viento de forma independiente, aplicando los valores característicos más desfavorables.

La componente vertical del viento (dirección Z) únicamente se tendrá en cuenta conjuntamente con la acción en dirección transversal, tal y como establece la normativa.

No se prevé que el emplazamiento presente características topográficas que generen efectos de viento oblicuo o complejos. En consecuencia, no se considera necesario realizar un estudio adicional para vientos en dirección no ortogonal al eje del tablero.

8.3.5. Empuje del viento sobre tableros

Efectos provocados por el viento transversal

Empuje horizontal La pasarela objeto del presente estudio presenta una estructura de tipo **celosía metálica**, por lo que el cálculo del empuje horizontal del viento transversal se realiza de acuerdo con lo establecido para tableros de celosía en el apartado **4.2.5.1.1 de la IAP-11**.

El empuje se evalúa para cada una de las celosías expuestas directamente al viento, considerando su área sólida proyectada. En aquellas celosías que no se encuentran directamente expuestas, se aplica un coeficiente de ocultamiento η conforme al apartado **4.2.3**.

Las sobrecargas de uso se han tenido en cuenta a la hora de calcular la altura equivalente expuesta al viento, tal y como se recoge en los apartados anteriores.

Dado que los perfiles empleados en la celosía son **de caras planas**, se adopta un coeficiente de fuerza:

$$c_{f,x} = 1,8$$

Este valor será utilizado en el cálculo de empujes nodales a introducir en el modelo estructural.

Distribución del empuje sobre los distintos elementos estructurales Una vez conocido el valor de la presión dinámica del viento y el coeficiente de forma $c_{f,x} = 1,8$, se calcula la carga lineal de viento que actúa sobre los distintos elementos estructurales de la celosía metálica expuesta directamente al viento.

- **Diagonales QRO 100x5:** Existen 19 diagonales con sección QRO 100x5 y longitud $L = 3,202$ m, orientadas en el plano XZ. Al estar completamente expuestas en la dirección del viento (eje Y global), se considera su longitud completa para la aplicación de la carga. El ancho del perfil es $b = 0,1$ m. La carga lineal se calcula como:

$$q = q_z \cdot c_{f,x} \cdot b = 662 \cdot 1,8 \cdot 0,1 = 119,16 \text{ N/m} = 0,119 \text{ kN/m}$$

- **Diagonales UPN 140:** Existen 4 diagonales con perfil UPN 140. Se toma como ancho expuesto al viento el alma del perfil: $b = 0,14$ m. La carga lineal es:

$$q = 662 \cdot 1,8 \cdot 0,14 = \boxed{0,167 \text{ kN/m}}$$

- **Montantes QRO 100x5:** Hay 20 montantes verticales de longitud $L = 2,5$ m con ancho expuesto $b = 0,1$ m. Al estar completamente orientados en la dirección del viento, la carga lineal es:

$$q = 662 \cdot 1,8 \cdot 0,1 = \boxed{0,119 \text{ kN/m}}$$

- **Montante UPN 140:** Un único montante con $b = 0,14$ m, expuesto frontalmente al viento:

$$q = 662 \cdot 1,8 \cdot 0,14 = \boxed{0,167 \text{ kN/m}}$$

- **Cordón superior (QRO 150x6):** Se considera completamente expuesto al viento en dirección Y. La longitud del cordón superior es $L = 46,7$ m y el ancho del perfil $b = 0,15$ m. La carga lineal es:

$$q = 662 \cdot 1,8 \cdot 0,15 = \boxed{0,178 \text{ kN/m}}$$

Todas las cargas anteriores han sido aplicadas en RFEM 5.0 como **fuerzas lineales uniformes sobre barras en dirección Y global positiva**.

Cálculo del coeficiente de ocultamiento η

Para considerar la posible reducción del empuje del viento sobre el plano de celosía sotavento, se aplica el **coeficiente de ocultamiento** η , conforme a la tabla 4.2-c de la IAP-11. Este coeficiente depende de dos parámetros:

- **La relación de solidez λ** , definida como:

$$\lambda = \frac{A_n}{A_{\text{tot}}}$$

donde A_n es el área sólida neta del plano barlovento (sumando todas las secciones de las barras expuestas) y A_{tot} es el área bruta o contorno del plano completo.

- **El espaciamiento relativo s_r** , definido como:

$$s_r = \frac{s}{h_p}$$

donde s es la distancia horizontal entre planos de celosía (ancho del tablero) y h_p es la altura del plano trasero que queda protegida por el delantero.

Cálculo de A_{tot} :

Se considera un rectángulo central de longitud 43,8 m y altura 2,5 m, más dos triángulos laterales con base 1,45 m y altura 2,5 m:

$$A_{\text{tot}} = 43,8 \cdot 2,5 + 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,45 \cdot 2,5 = 109,5 + 3,625 = \boxed{113,13 \text{ m}^2}$$

Cálculo de A_n :

- **Diagonales QRO 100x5:**

$$A_{\text{diag,QRO}} = 18 \cdot 3,202 \cdot 0,1 = \boxed{5,76 \text{ m}^2}$$

- **Diagonales UPN 140:**

$$A_{\text{diag,UPN}} = 4 \cdot 3,202 \cdot 0,14 = \boxed{1,79 \text{ m}^2}$$

- **Montantes QRO 100x5:**

$$A_{\text{mont,QRO}} = 20 \cdot 2,5 \cdot 0,1 = \boxed{5,00 \text{ m}^2}$$

- **Montante UPN 140:**

$$A_{\text{mont,UPN}} = 1 \cdot 2,5 \cdot 0,14 = \boxed{0,35 \text{ m}^2}$$

■ **Cordones superiores (QRO 150x6):**

$$A_{\text{cordón sup}} = 2 \cdot 46,7 \cdot 0,15 = \boxed{14,01 \text{ m}^2}$$

Área total sólida:

$$A_n = 5,76 + 1,79 + 5,00 + 0,35 + 14,01 = \boxed{26,91 \text{ m}^2}$$

Relación de solidez:

$$\lambda = \frac{A_n}{A_t} = \frac{26,91}{113,13} = \boxed{0,238}$$

Espaciamiento relativo:

$$s_r = \frac{2,75}{2,7} = \boxed{1,019}$$

Cuadro resumen de parámetros:

Símbolo	Significado	Valor
s	Distancia horizontal entre planos de celosía	2,75 m
h_p	Altura del plano protegido proyectada en la dirección del viento	2,7 m
s_r	Espaciamiento relativo entre planos	1,019
λ	Relación de solidez entre planos	0,238

Cuadro 10: Resumen de los parámetros empleados para el cálculo del coeficiente de ocultamiento.

Obtención del coeficiente de ocultamiento η :

Se dispone de los valores:

- $s_r = 1,019$ (muy próximo a 1,0)
- $\lambda = 0,238$ (entre 0,2 y 0,3)

Para $s_r = 1,0$, de la tabla 4.2-c se tiene:

$$\begin{cases} \lambda = 0,2 \Rightarrow \eta = 0,82 \\ \lambda = 0,3 \Rightarrow \eta = 0,76 \end{cases}$$

Interpolando linealmente para $\lambda = 0,238$:

$$\eta = 0,82 - \left(\frac{0,238 - 0,2}{0,3 - 0,2} \right) \cdot (0,82 - 0,76) = 0,82 - 0,038 \cdot 0,06 = \boxed{0,817}$$

TABLA 4.2-c COEFICIENTE DE OCULTAMIENTO η

ESPACIAMIENTO RELATIVO s_r	RELACIÓN DE SOLIDEZ λ					
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	$\geq 0,6$
0,5	0,75	0,40	0,31	0,22	0,13	0,06
1	1,00	0,82	0,64	0,46	0,28	0,10
2	1,00	0,84	0,68	0,52	0,36	0,20
3	1,00	0,86	0,72	0,59	0,45	0,31
4	1,00	0,89	0,78	0,68	0,57	0,46
5	1,00	1,00	0,92	0,85	0,77	0,69
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Figura 20: Tabla 4.2-c de la IAP-11: Coeficiente de ocultamiento η en función de la relación de solidez λ y el espaciamiento relativo s_r .

Por tanto, todas las cargas lineales aplicadas sobre el plano barlovento se multiplicarán por $\eta = 0,817$ para aplicarse sobre el plano de celosía sotavento, en las mismas direcciones y condiciones.

Cargas lineales aplicadas sobre el plano de celosía a sotavento

Una vez determinado el coeficiente de ocultamiento $\eta = 0,817$, se procede a calcular las nuevas cargas lineales que actuarán sobre el plano de celosía a sotavento. Estas se obtienen directamente multiplicando las cargas previamente aplicadas sobre el plano barlovento por el coeficiente η .

A continuación se muestran los resultados para cada tipo de barra considerada:

- **Diagonales QRO 100x5:** La carga lineal barlovento era $q = 0,119 \text{ kN/m}$, por lo que en sotavento se aplica:

$$q = 0,817 \cdot 0,119 = \boxed{0,097 \text{ kN/m}}$$

- **Diagonales UPN 140:** La carga barlovento era $q = 0,167 \text{ kN/m}$, entonces:

$$q = 0,817 \cdot 0,167 = \boxed{0,136 \text{ kN/m}}$$

- **Montantes QRO 100x5:** La carga barlovento era $q = 0,119 \text{ kN/m}$:

$$q = 0,817 \cdot 0,119 = \boxed{0,097 \text{ kN/m}}$$

- **Montante UPN 140:** Carga barlovento de $q = 0,167 \text{ kN/m}$:

$$q = 0,817 \cdot 0,167 = \boxed{0,136 \text{ kN/m}}$$

- **Cordón superior (QRO 150x6):** La carga barlovento era $q = 0,178 \text{ kN/m}$:

$$q = 0,817 \cdot 0,178 = \boxed{0,145 \text{ kN/m}}$$

Estas cargas han sido aplicadas en el modelo de cálculo exactamente en las mismas posiciones, orientaciones y direcciones que en el plano barlovento, pero reducidas en proporción al efecto de sombra generado por la celosía delantera.

Empuje vertical del viento sobre el tablero Además del empuje horizontal, se considera también el empuje del viento en dirección vertical (eje Z), actuando en el sentido más desfavorable. Este empuje se evalúa conforme al apartado 4.2.5.1.2 de la IAP-11, mediante la siguiente expresión:

$$F_{w,z} = \left[\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 \right] \cdot c_e(z) \cdot c_{f,z} \cdot A_{\text{ref},z}$$

Donde:

- $q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 = 456 \text{ N/m}^2$ es la presión dinámica básica del viento.
- $c_e(z) = 1,45$ es el coeficiente de exposición a la altura del tablero.
- $c_{f,z} = 0,9$ es el coeficiente de fuerza vertical indicado por la IAP-11.
- $A_{\text{ref},z} = 2,75 \cdot 46,7 = 128,4 \text{ m}^2$ es el área en planta del tablero.

Sustituyendo:

$$F_{w,z} = 456 \cdot 1,45 \cdot 0,9 \cdot 128,4 = \boxed{76,2 \text{ kN}}$$

Este valor corresponde al empuje total vertical aplicado sobre el tablero. Para introducirlo en el modelo estructural de RFEM como carga distribuida, se transforma en carga lineal dividiendo entre la longitud total del tablero:

$$q_z = \frac{F_{w,z}}{L} = \frac{76,2}{46,7} = \boxed{1,63 \text{ kN/m}}$$

Empuje provocado por el viento longitudinal

De acuerdo con el apartado **4.2.5.2 de la IAP-11**, se considerará un empuje horizontal paralelo al eje de la pasarela (dirección Y), actuando sobre los elementos de desarrollo longitudinal, como el tablero, las barandillas y cualquier sistema auxiliar.

En el caso de estructuras tipo **celosía**, como la pasarela objeto del presente estudio, la IAP-11 establece que puede aplicarse un **coeficiente reductor adicional** definido por la siguiente expresión:

$$\left[1 - \frac{7}{c_o \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 7} \cdot \Phi\left(\frac{L}{L(z)}\right) \right]$$

Donde:

- $c_o = 1,0$ es el coeficiente topográfico, ya definido.
- $z = 15 \text{ m}$ es la altura del tablero respecto al terreno natural.

- $z_0 = 1,0 \text{ m}$ es la rugosidad del terreno para entorno tipo IV.
- $L = 46,7 \text{ m}$ es la longitud de la pasarela.
- $L(z)$ es la longitud integral de la turbulencia, evaluada como:

$$L(z) = 300 \cdot \left(\frac{z}{200} \right)^\alpha = 300 \cdot \left(\frac{15}{200} \right)^{0,67} = \boxed{43,63 \text{ m}}$$

Selección del coeficiente α :

De acuerdo con la **tabla 4.2-d** de la IAP-11, el valor del coeficiente α depende del tipo de entorno en el que se encuentra la estructura.

En el presente caso, se corresponde con un **entorno de tipo IV**, el cual es definido por la normativa como el más expuesto (terreno raso o con escasa vegetación, sin construcciones cercanas).

Por tanto, y siguiendo lo indicado en la tabla, se adopta:

$$\alpha = 0,67$$

TABLA 4.2-d COEFICIENTE α SEGÚN EL TIPO DE ENTORNO

TIPO DE ENTORNO	α
0	0,38
I	0,44
II	0,52
III	0,61
IV	0,67

Figura 21: Coeficiente alpha según el tipo de entorno (Figura 4.2-d de la IAP-11).

Nota: Según la definición de la IAP-11, la longitud integral de la turbulencia $L(z)$ depende del valor de la altura z respecto al terreno y se clasifica en tres tramos. En este caso, como $z = 15$ m y cumple $z_{\min} \leq z \leq 200$, se aplica el segundo tramo de la fórmula:

$$L(z) = 300 \cdot \left(\frac{z}{200}\right)^\alpha$$

Esto justifica el uso directo de esta expresión en el cálculo anterior.

A partir de este valor, se obtiene:

$$\Phi\left(\frac{L}{L(z)}\right) = 0,230 + 0,182 \cdot \ln\left(\frac{46,7}{43,63}\right) = 0,230 + 0,182 \cdot \ln(1,07) = \boxed{0,243}$$

Finalmente, el coeficiente reductor completo queda:

$$1 - \frac{7}{1,0 \cdot \ln(15) + 7} \cdot 0,243 = 1 - \frac{7}{2,708 + 7} \cdot 0,243 = 1 - \frac{7}{9,708} \cdot 0,243 = \boxed{0,825}$$

Dado que el coeficiente reductor calculado es mayor que 0,5, la IAP-11 indica que debe aplicarse directamente el valor de dicho coeficiente. Por tanto, el empuje longitudinal del viento se calcula como:

$$F_{w,y} = 0,825 \cdot F_{w,x} = 0,825 \cdot 67,6 = \boxed{55,78 \text{ kN}}$$

Este valor ha sido aplicado en el modelo como empuje horizontal en dirección longitudinal (eje global X).

8.3.6. Empuje del viento sobre la pila del apoyo intermedio

Cálculo paso a paso

1. Datos geométricos y parámetros básicos

Magnitud	Símbolo	Valor	Comentario
Altura de la pila	H	8,45 m	Cota terreno $\rightarrow$ tablero
Ancho frontal del perfil RRO	b	0,25 m	Rectángulo hueco $250 \times 150 \times 10$
Nº de patas expuestas	n	1	Solo el apoyo central vertical
Relación de aspecto	B/h	0,6	$\Rightarrow$ Figura 4.2-b
Coef. de fuerza aerodinámico	c_f	2,35	Para $B/h = 0,6$

2. Coeficiente de exposición a la altura de la pila

$$c_e(z) = k_r^2 \left[c_o^2 \ln^2 \left(\frac{z}{z_0} \right) + 7k_1 c_o \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \right]$$

- $k_r = 0,235$
- $c_o = k_1 = 1,0$
- $z_0 = 1,0 \text{ m}$
- $z = 8,45 \text{ m}$

$$\ln \left(\frac{8,45}{1} \right) = 2,136 \quad \Rightarrow \quad c_e(8,45) = 0,235^2 \cdot [2,136^2 + 7 \cdot 2,136] = \boxed{1,08}$$

3. Presión dinámica del viento a esa altura

$$q_b = \frac{1}{2} \rho V_b^2 = 456 \text{ N/m}^2$$

$$q_z = q_b \cdot c_e(8,45) = 456 \cdot 1,08 = \boxed{492 \text{ N/m}^2}$$

4. Área de referencia de la pila

$$A_{\text{ref}} = b \cdot H = 0,25 \cdot 8,45 = \boxed{2,1125 \text{ m}^2}$$

5. Empuje horizontal sobre la pila

$$F_w = q_z \cdot c_f \cdot A_{\text{ref}} = 492 \cdot 2,35 \cdot 2,1125 = \boxed{2,44 \text{ kN}}$$

6. Conversión a carga lineal sobre barra inclinada

La barra del apoyo intermedio se encuentra inclinada un ángulo de $82,12^\circ$. Por tanto, la carga se distribuye sobre su **longitud real**, que se calcula como:

$$L_{\text{real}} = \frac{H}{\cos(82,12^\circ)} = \frac{8,45}{\cos(82,12^\circ)} \approx 60,86 \text{ m}$$

$$q_l = \frac{F_w}{L_{\text{real}}} = \frac{2,44}{60,86} \approx \boxed{0,040 \text{ kN/m}}$$

Observaciones:

- Se ha considerado una sola pila inclinada del apoyo intermedio.
- El coeficiente c_f incluye el efecto de la forma rectangular con esquinas redondeadas.
- La carga lineal obtenida se aplica directamente sobre la barra inclinada en el modelo.

8.4. Carga de nieve

De acuerdo con lo indicado en el apartado 4.4 de la IAP-11, se considera la acción de la nieve en forma de carga superficial sobre el tablero, siempre que el emplazamiento se encuentre en una zona donde esta acción sea significativa.

En el caso de la pasarela situada en la ciudad de Zaragoza, se toma como referencia la **Tabla 4.4-b** de la IAP-11, la cual establece un valor característico de sobrecarga de nieve sobre terreno horizontal de:

**TABLA 4.4-b SOBRECARGA DE NIEVE SOBRE UN TERRENO HORIZONTAL
EN LAS CAPITALES DE PROVINCIA Y CIUDADES AUTÓNOMAS**
(Coincide con la tabla correspondiente del Código Técnico de la Edificación)

CAPITAL	ALTITUD [m]	s_k [kN/m ²]	CAPITAL	ALTITUD [m]	s_k [kN/m ²]	CAPITAL	ALTITUD [m]	s_k [kN/m ²]
Albacete	690	0,6	Guadalajara	680	0,6	Pontevedra	0	0,3
Alicante	0	0,2	Huelva	0	0,2	Salamanca	780	0,5
Almería	0	0,2	Huesca	470	0,7	San Sebastián	0	0,3
Ávila	1130	1,0	Jaén	570	0,4	Santander	0	0,3
Badajoz	180	0,2	León	820	1,2	Segovia	1000	0,7
Barcelona	0	0,4	Lleida	150	0,5	Sevilla	10	0,2
Bilbao	0	0,3	Logroño	380	0,6	Soria	1090	0,9
Burgos	860	0,6	Lugo	470	0,7	Tarragona	0	0,4
Cáceres	440	0,4	Madrid	660	0,6	Tenerife	0	0,2
Cádiz	0	0,2	Málaga	0	0,2	Teruel	950	0,9
Castellón	0	0,2	Murcia	40	0,2	Toledo	550	0,5
Ciudad Real	640	0,6	Ourense	130	0,4	Valencia	0	0,2
Córdoba	100	0,2	Oviedo	230	0,5	Valladolid	690	0,4
A Coruña	0	0,3	Palencia	740	0,4	Vitoria	520	0,7
Cuenca	1010	1,0	Palma de Mallorca	0	0,2	Zamora	650	0,4
Girona	70	0,4	Palmas, Las	0	0,2	Zaragoza	210	0,5
Granada	690	0,5	Pamplona	450	0,7	Ceuta y Melilla	0	0,2

Figura 22: Tabla 4.4-b: Sobrecarga de nieve sobre un terreno horizontal en las capitales de provincia y ciudades autónomas (extraída de la IAP-11).

$$s_k = 0,5 \text{ kN/m}^2$$

Según el apartado 4.4.2, la carga de nieve sobre tableros se obtiene aplicando el siguiente coeficiente de reducción:

$$q_k = 0,8 \cdot s_k = 0,8 \cdot 0,5 = \boxed{0,4 \text{ kN/m}^2}$$

Este valor representa una carga uniformemente repartida, aplicada sobre toda la superficie horizontal del tablero.

Anexo II. Cálculo de las cargas máximas admisibles por sección

Hipótesis comunes

Material: **acero S275**. Se adopta $\gamma_M = 1,05$. Por tanto:

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{275}{1,05} = 261,90 \text{ MPa}, \quad \tau_{\text{adm}} = \frac{\sigma_{\text{adm}}}{\sqrt{3}} = 151,21 \text{ MPa}.$$

Las expresiones empleadas son:

$$N_{\text{adm}} = A \sigma_{\text{adm}}, \quad M_{y,\text{adm}} = W_y \sigma_{\text{adm}}, \quad M_{z,\text{adm}} = W_z \sigma_{\text{adm}}, \quad T_{\text{adm}} = W_t \tau_{\text{adm}}.$$

QRO 150×6

Propiedades geométricas (según RFEM).

$$\begin{aligned} A &= 33,60 \text{ cm}^2 = 3\,360 \text{ mm}^2, \\ W_y &= 153 \text{ cm}^3 = 153\,000 \text{ mm}^3, \\ W_z &= 153 \text{ cm}^3 = 153\,000 \text{ mm}^3, \\ W_t &= 230 \text{ cm}^3 = 230\,000 \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

Resultados admisibles.

$$N_{\text{adm}} = 880,00 \text{ kN}, \quad M_{y,\text{adm}} = M_{z,\text{adm}} = 40,07 \text{ kNm}, \quad T_{\text{adm}} = 34,78 \text{ kNm}.$$

QRO 100×5

Propiedades geométricas (según RFEM).

$$\begin{aligned} A &= 18,40 \text{ cm}^2 = 1\,840 \text{ mm}^2, \\ W_y &= 54,20 \text{ cm}^3 = 54\,200 \text{ mm}^3, \\ W_z &= 54,20 \text{ cm}^3 = 54\,200 \text{ mm}^3, \\ W_t &= 81,70 \text{ cm}^3 = 81\,700 \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

Resultados admisibles.

$$N_{\text{adm}} = 481,90 \text{ kN}, \quad M_{y,\text{adm}} = M_{z,\text{adm}} = 14,20 \text{ kNm}, \quad T_{\text{adm}} = 12,35 \text{ kNm}.$$

2× UPN 140-0 soldados (ArcelorMittal)

Propiedades geométricas (según RFEM).

$$\begin{aligned} A &= 40,80 \text{ cm}^2 = 4\,080 \text{ mm}^2, \\ W_y &= 172,86 \text{ cm}^3 = 172\,860 \text{ mm}^3, \\ W_z &= 143,73 \text{ cm}^3 = 143\,730 \text{ mm}^3, \\ I_t &= 1\,454,92 \text{ cm}^4 \quad (\text{constante de torsión}). \end{aligned}$$

Resultados admisibles.

$$\begin{aligned} N_{\text{adm}} &= A \sigma_{\text{adm}} = 4\,080 \times 261,90 = 1\,068,55 \text{ kN}, \\ M_{y,\text{adm}} &= W_y \sigma_{\text{adm}} = 172\,860 \times 261,90 = 45,27 \text{ kNm}, \\ M_{z,\text{adm}} &= W_z \sigma_{\text{adm}} = 143\,730 \times 261,90 = 37,64 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Torsión. De acuerdo con las directrices del **CTE**, se adopta para el módulo resistente a torsión:

$$W_t = 2 A_m t_{\text{mín}}, \quad A_m = (140 - 10)(120 - 7) = 130 \times 113 = 14\,690 \text{ mm}^2,$$

con $t_{\min} = t_{\text{alma}} = 7 \text{ mm}$. Luego,

$$W_t = 2 \times 14\,690 \times 7 = 205\,660 \text{ mm}^3 = 205,66 \text{ cm}^3.$$

El torsor admisible se expresa como

$$T_{\text{adm}} = W_t \tau_{\text{adm}}.$$

Si se adopta el criterio de von Mises para cortante, $\tau_{\text{adm}} = \sigma_{\text{adm}}/\sqrt{3} = 261,90/\sqrt{3} = 151,21 \text{ MPa}$, entonces:

$$T_{\text{adm}} = 205\,660 \times 151,21 = 31,10 \text{ kNm}.$$

Nota. Si se emplease un criterio distinto para τ_{adm} (p. ej., Tresca), bastaría con sustituir el valor en la expresión de T_{adm} manteniendo $W_t = 205,66 \text{ cm}^3$.

QRO 220×10 (conformadas en caliente)

Propiedades geométricas (según RFEM).

$$\begin{aligned} A &= 82,90 \text{ cm}^2 = 8\,290 \text{ mm}^2, \\ W_y &= 550,00 \text{ cm}^3 = 550\,000 \text{ mm}^3, \\ W_z &= 550,00 \text{ cm}^3 = 550\,000 \text{ mm}^3, \\ W_t &= 807,00 \text{ cm}^3 = 807\,000 \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

Resultados admisibles.

$$\begin{aligned} N_{\text{adm}} &= A \sigma_{\text{adm}} = 8\,290 \times 261,90 = 2\,170,13 \text{ kN}, \\ M_{y,\text{adm}} &= W_y \sigma_{\text{adm}} = 550\,000 \times 261,90 = 144,05 \text{ kNm}, \\ M_{z,\text{adm}} &= W_z \sigma_{\text{adm}} = 550\,000 \times 261,90 = 144,05 \text{ kNm}, \\ T_{\text{adm}} &= W_t \tau_{\text{adm}} = 807\,000 \times 151,21 = 122,07 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

RRO 250×150×10 (conformadas en caliente)

Propiedades geométricas (según RFEM).

$$\begin{aligned} A &= 74,90 \text{ cm}^2 = 7\,490 \text{ mm}^2, \\ W_y &= 494,00 \text{ cm}^3 = 494\,000 \text{ mm}^3, \\ W_z &= 367,00 \text{ cm}^3 = 367\,000 \text{ mm}^3, \\ W_t &= 605,00 \text{ cm}^3 = 605\,000 \text{ mm}^3. \end{aligned}$$

Resultados admisibles.

$$\begin{aligned} N_{\text{adm}} &= A \sigma_{\text{adm}} = 7\,490 \times 261,90 = 1\,961,63 \text{ kN}, \\ M_{y,\text{adm}} &= W_y \sigma_{\text{adm}} = 494\,000 \times 261,90 = 129,38 \text{ kNm}, \\ M_{z,\text{adm}} &= W_z \sigma_{\text{adm}} = 367\,000 \times 261,90 = 96,12 \text{ kNm}, \\ T_{\text{adm}} &= W_t \tau_{\text{adm}} = 605\,000 \times 151,21 = 91,48 \text{ kNm}. \end{aligned}$$

Anexo III. Formas modales del análisis de vibraciones

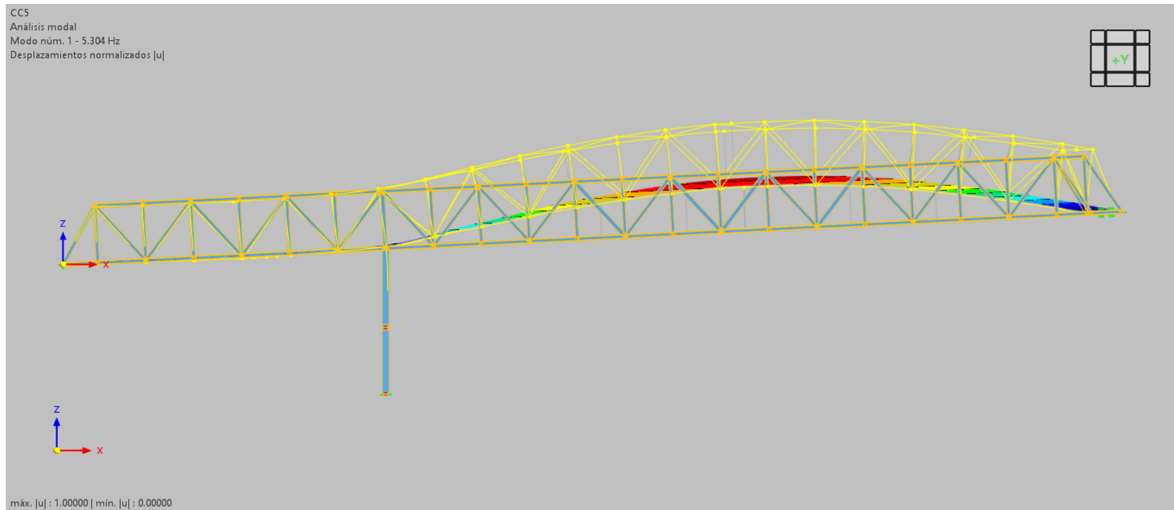


Figura 23: Forma modal correspondiente al **Modo 1**, con frecuencia natural de 5,304 Hz. Se observa un **modo global vertical** de la pasarela, caracterizado por el movimiento dominante en dirección Z . Los desplazamientos están normalizados ($|\mathbf{u}|$).

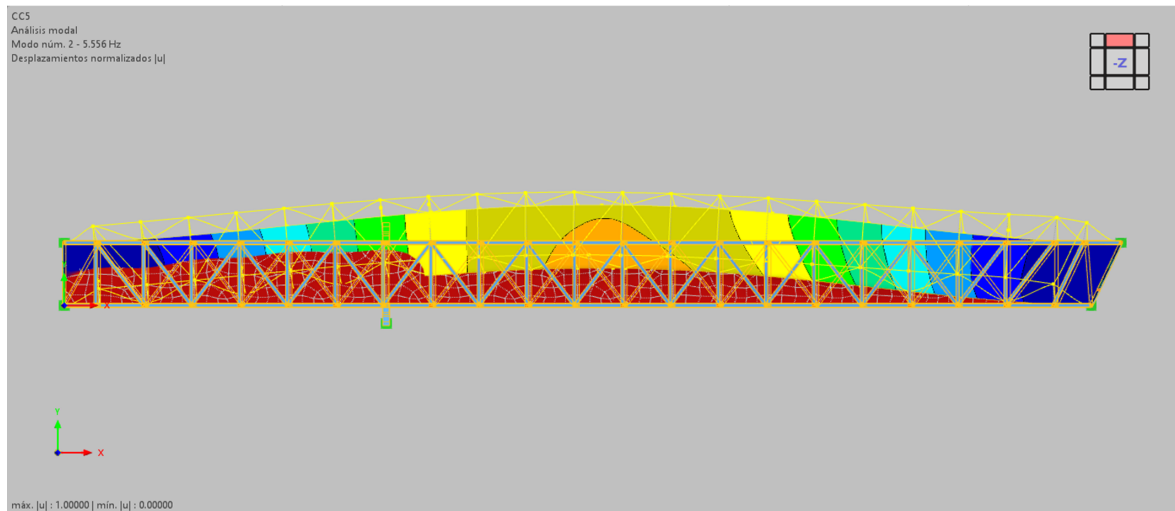


Figura 24: Forma modal correspondiente al **Modo 2**, con frecuencia natural de 5,556 Hz. Se aprecia un **modo de flexión lateral del tablero**, con desplazamientos dominantes en dirección transversal Y . Los desplazamientos están normalizados ($|u|$).

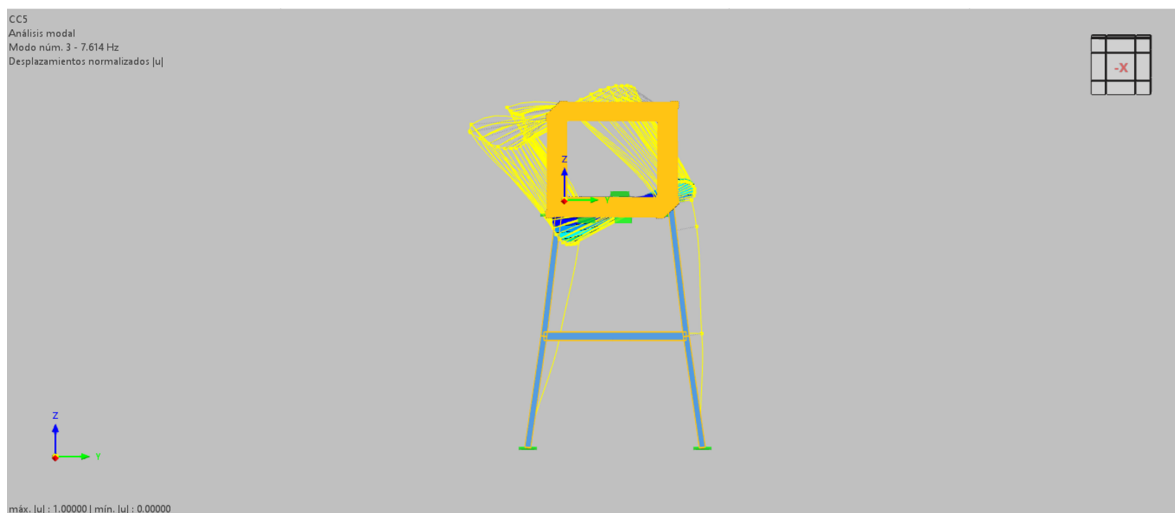


Figura 25: Forma modal correspondiente al **Modo 3**, con frecuencia natural de 7,614 Hz. Se observa un **modo torsional**, caracterizado por la rotación del tablero respecto a su eje longitudinal X . Los desplazamientos están normalizados ($|u|$).

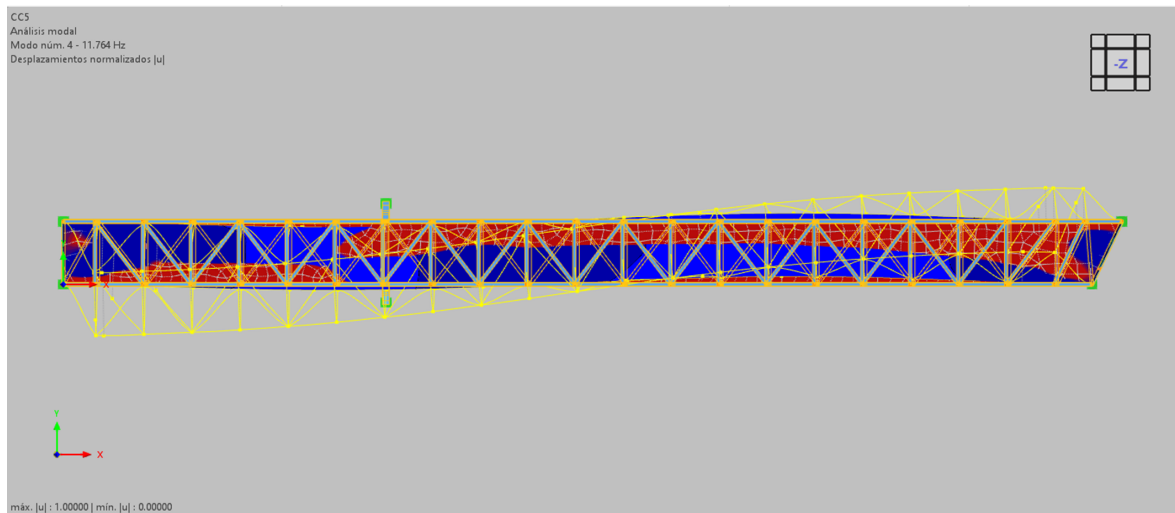


Figura 26: Forma modal correspondiente al **Modo 4**, con frecuencia natural de 11,764 Hz. Se aprecia un **modo de flexión vertical**, con el tablero oscilando de forma alterna en distintos tramos. Los desplazamientos están normalizados ($|u|$).

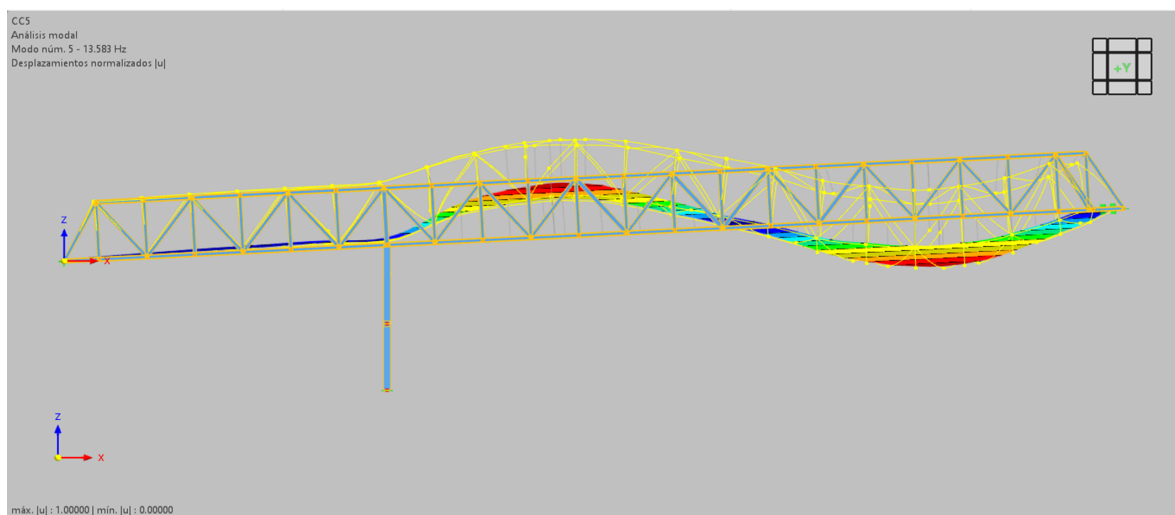


Figura 27: Forma modal correspondiente al **Modo 5**, con frecuencia natural de 13,583 Hz. Se observa un **modo de flexión vertical**, con una configuración ondulatoria del tablero que presenta varios vientres y nodos intermedios. Los desplazamientos están normalizados ($|u|$).

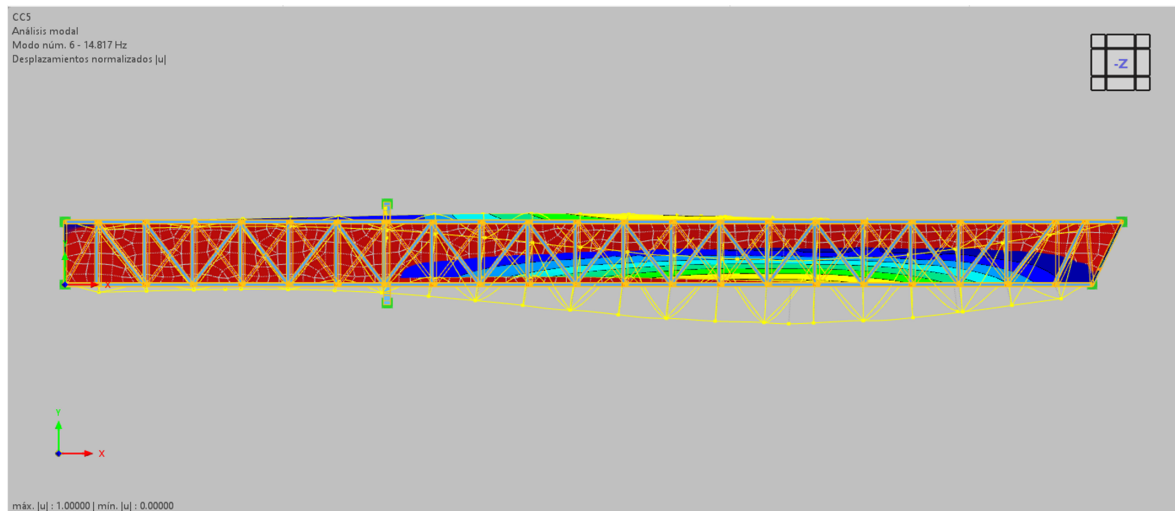


Figura 28: Forma modal correspondiente al **Modo 6**, con frecuencia natural de 14,817 Hz. Se observa un **modo de flexión vertical**, en el que el tablero presenta varios nodos intermedios y desplazamientos alternados a lo largo de su longitud. Los desplazamientos están normalizados ($|u|$).

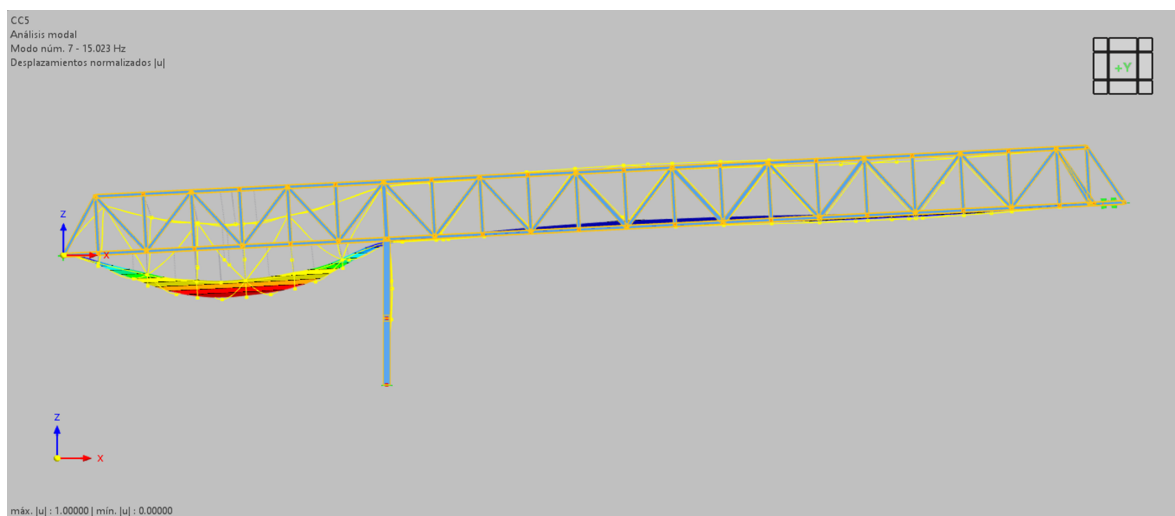
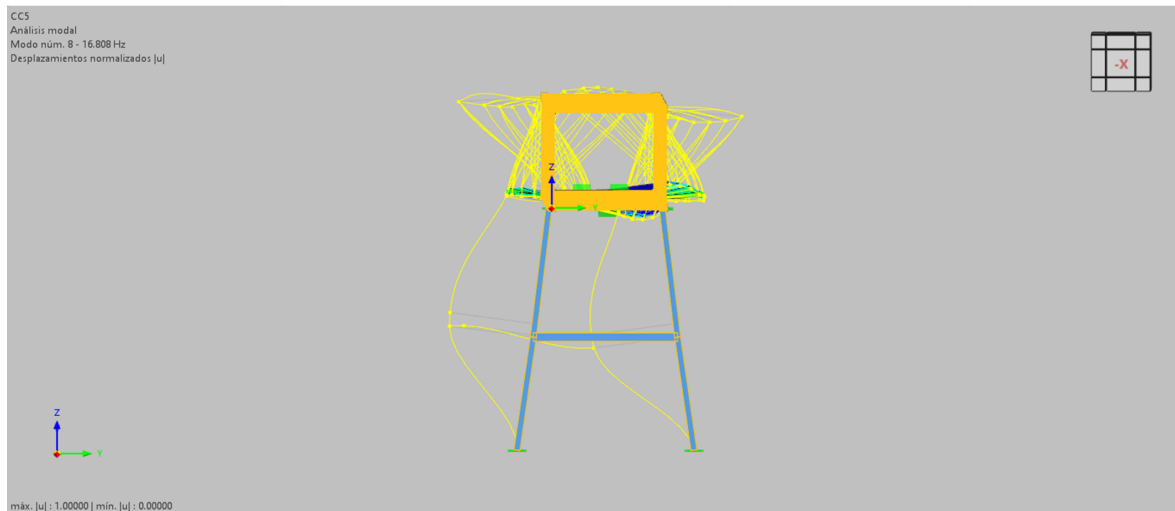
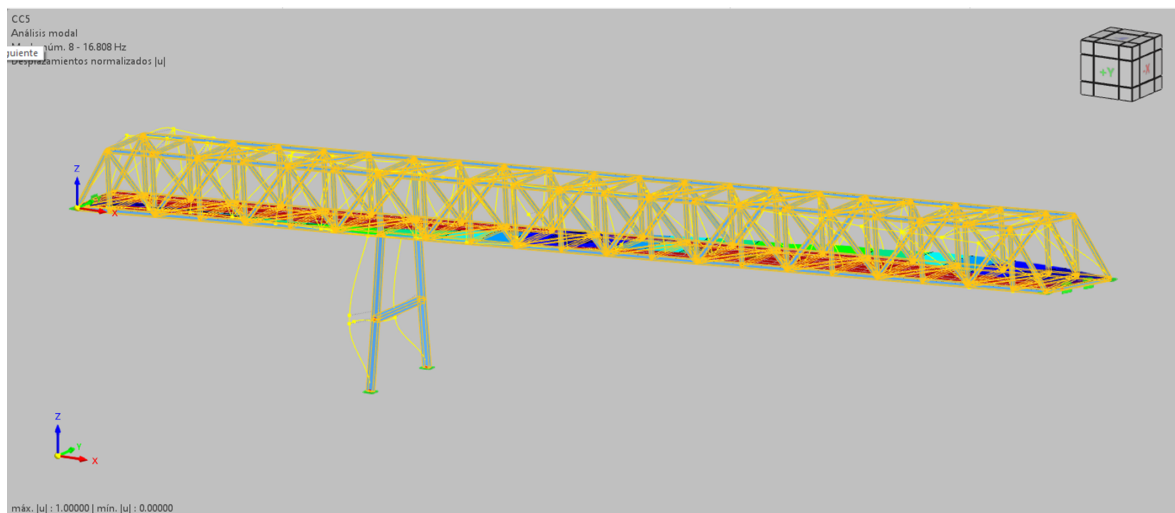


Figura 29: Forma modal correspondiente al **Modo 7**, con frecuencia natural de 15,023 Hz. Se aprecia un **modo de flexión vertical localizado**, concentrado principalmente en el extremo izquierdo del tablero próximo al apoyo. Los desplazamientos están normalizados ($|u|$).

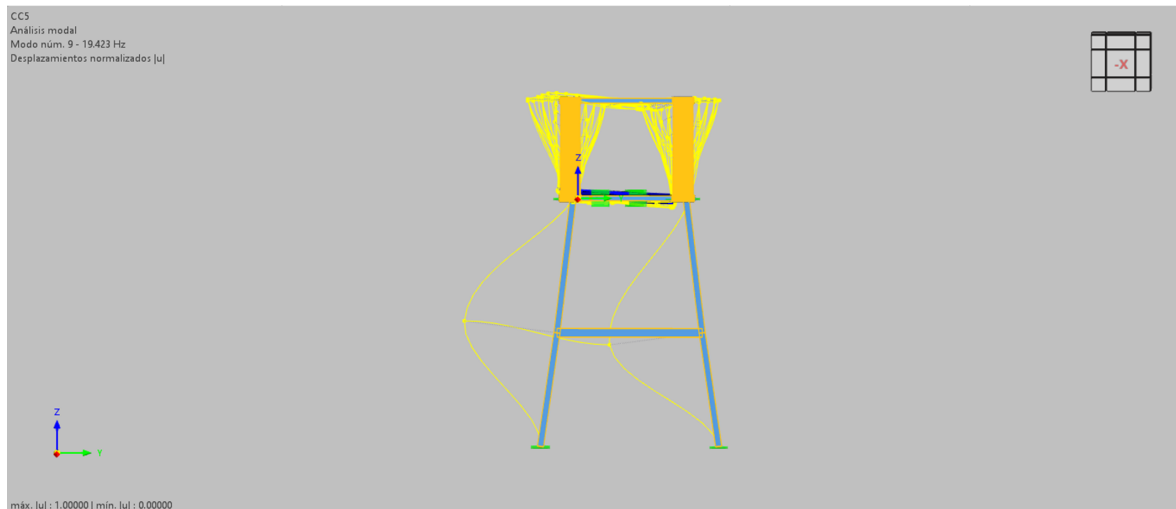


(a) Vista frontal del Modo 8

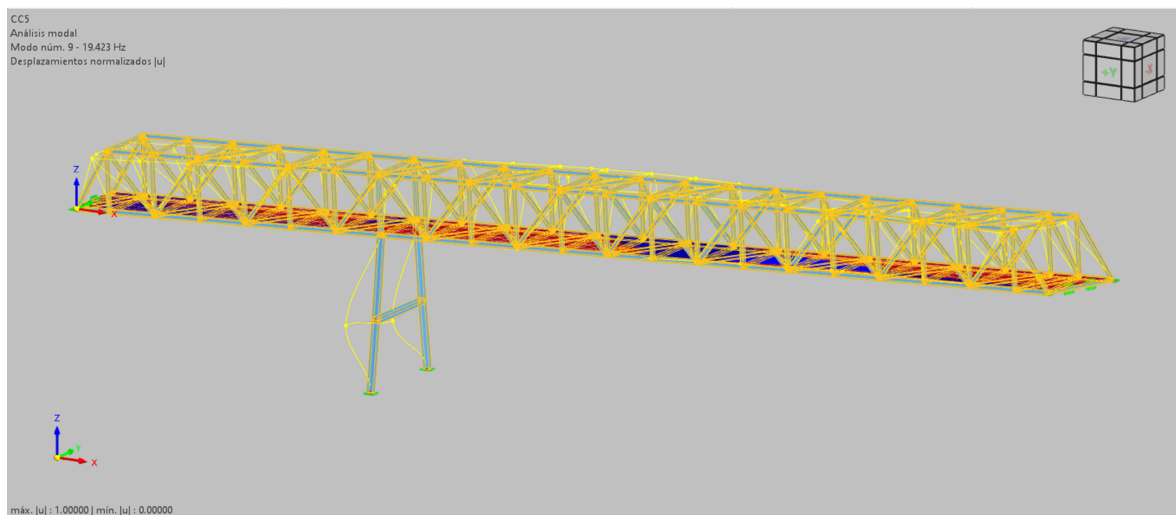


(b) Vista general del Modo 8

Figura 30: Forma modal correspondiente al **Modo 8**, con frecuencia natural de 16,808 Hz. Se representa mediante dos perspectivas: en la vista frontal se aprecia la **torsión combinada con desplazamientos laterales**, mientras que la vista general permite identificar la distribución de los desplazamientos a lo largo de toda la pasarela. Los desplazamientos están normalizados ($|u|$).

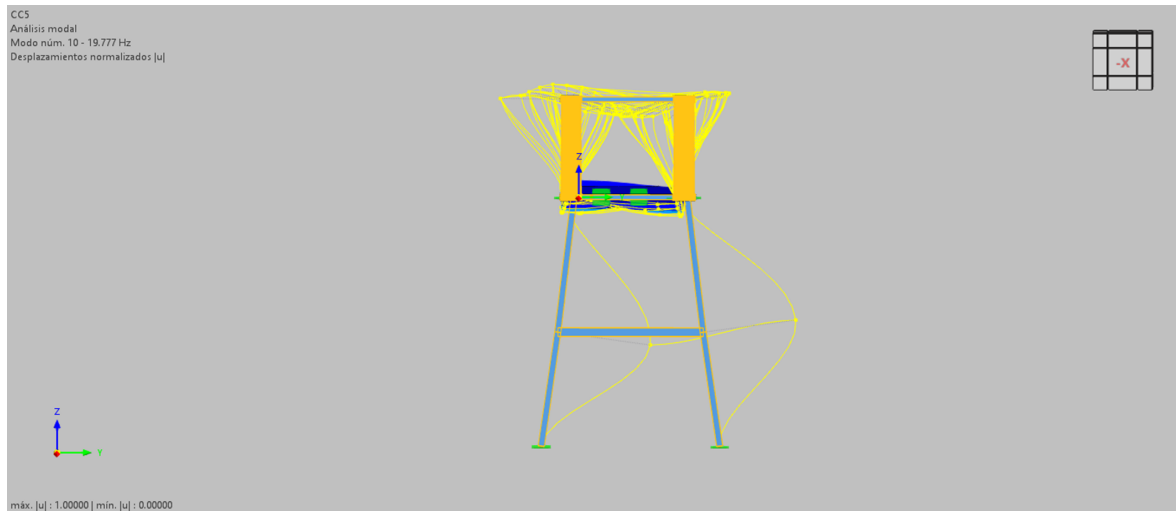


(a) Vista frontal del Modo 9

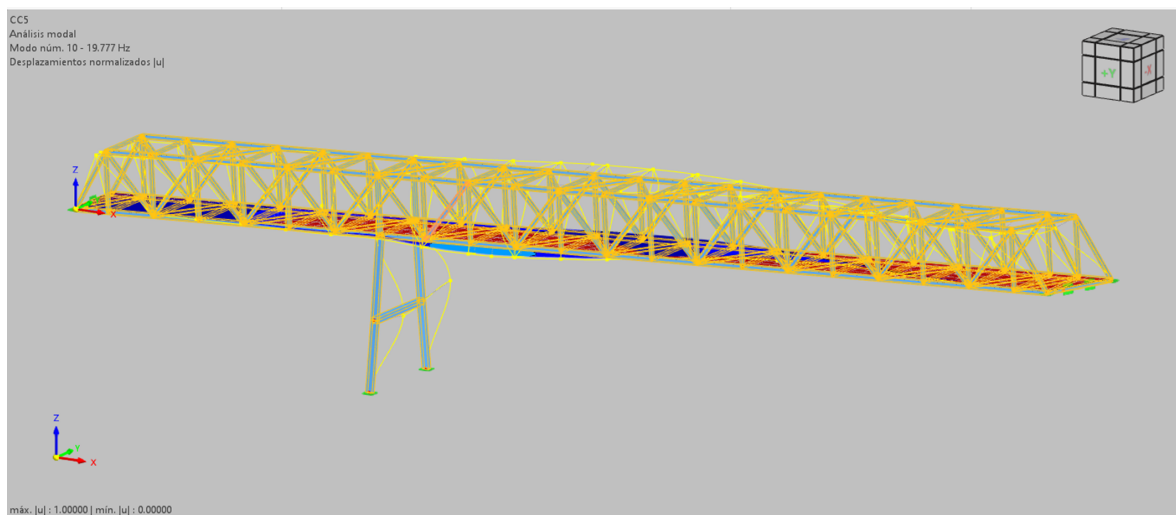


(b) Vista general del Modo 9

Figura 31: Forma modal correspondiente al **Modo 9**, con frecuencia natural de 19,423 Hz. Se representa mediante dos perspectivas: en la vista frontal se aprecia un **modo torsional combinado con flexión**, mientras que la vista general permite identificar la deformada global en toda la pasarela. Los desplazamientos están normalizados ($|u|$).



(a) Vista frontal del Modo 10



(b) Vista general del Modo 10

Figura 32: Forma modal correspondiente al **Modo 10**, con frecuencia natural de 19,777 Hz. Se representa mediante dos perspectivas: en la vista frontal se aprecia un **modo torsional del tablero con interacción de los apoyos**, mientras que la vista general muestra la deformada global en toda la pasarela. Los desplazamientos están normalizados ($|u|$).

