



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Grado

Diseño y cálculo de una pasarela peatonal atirantada  
de estructura mixta acero-hormigón

Design and calculation of a cable-stayed pedestrian  
walkway with a mixed steel-concrete structure

Autor

Sergio Tesán Torrecilla

Directores

Elena Ibarz Montaner

Luis Gracia Villa

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2020/2021

RESUMEN

El objetivo del proyecto es el diseño y cálculo estructural de una pasarela peatonal con atirantamiento tipo abanico, y estructura mixta acero-hormigón. El trabajo incluye el diseño y cálculo del tablero de hormigón, cajón metálico y piona de hormigón, así como de todos los detalles constructivos singulares. Se tendrá en cuenta toda la normativa de aplicación en este tipo de estructuras.

Para ello, se ha revisado y aplicado con criterio la normativa IAP-11 sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera dentro del territorio español, así como la distinta documentación a cumplir por parte de los distintos materiales utilizados en el proyecto en función de las comprobaciones necesarias.

ABSTRACT

The objective of the project is the design and structural calculation of a pedestrian walkway with fan-type cable-stayed, and a mixed steel-concrete structure. The work includes the design and calculation of the concrete deck, metal box and concrete bollard, as well as all the unique construction details. All applicable regulations in this type of structures will be taken into account.

For this, the IAP-11 regulation on the actions to be considered in the project of road bridges within the Spanish territory has been reviewed and applied with criteria, as well as the different documentation to be fulfilled by the different materials used in the project in function of the necessary checks.

## ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
1. OBJETO Y ALCANCE .....	4
2. INTRODUCCIÓN.....	5
3. DISEÑO .....	10
3.1 CONSIDERACIONES GENERALES.....	10
3.2 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE LA PASARELA .....	12
4. MODELO DE CÁLCULO.....	17
5. RESULTADOS .....	27
6. PLANOS .....	34
CONCLUSIONES .....	35
BIBLIOGRAFIA.....	36
ANEXO .....	38

## 1. OBJETO Y ALCANCE

El objetivo del proyecto es el diseño y cálculo estructural de una pasarela peatonal con atirantamiento tipo abanico, y estructura mixta acero-hormigón. El trabajo incluye el diseño y cálculo del tablero de hormigón, cajón metálico y piona de hormigón, así como de todos los detalles constructivos singulares. Se tendrá en cuenta toda la normativa de aplicación en este tipo de estructuras.

Para ello, se ha revisado y aplicado con criterio la normativa IAP-11 sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera dentro del territorio español, así como la distinta documentación a cumplir por parte de los distintos materiales utilizados en el proyecto en función de las comprobaciones necesarias.

La memoria del proyecto se estructura en 6 apartados. Éste primer apartado corresponde al objeto y alcance del proyecto. En el segundo se desarrolla la introducción al proyecto. En el tercer apartado se describen las características generales del diseño realizado para la pasarela. En el cuarto apartado se incluyen todos los detalles del modelo de elementos finitos implementado para el cálculo. En el quinto apartado se muestran los resultados obtenidos a efectos de las comprobaciones resistentes del diseño, tanto en lo referente a desplazamientos como a tensiones y esfuerzos, y además se realiza el armado de la piona y el dimensionado de las zapatas. En el sexto apartado se incluyen unos planos representativos del diseño realizado. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas del desarrollo del proyecto.

Adicionalmente, se presenta un anexo en el que se recoge toda la información detallada relativa tanto al diseño como al cálculo de la pasarela.

## 2. INTRODUCCIÓN

Los puentes y pasarelas son construcciones de obra civil que tienen como misión desde hace siglos permitir el cruce seguro de una vía sobre un obstáculo natural o artificial; ríos, valles, montañas, carreteras, líneas de ferrocarril... Hoy en día se ha convertido en un elemento esencial para el mundo y su diseño varía dependiendo de su función, peso, acciones dominantes y naturaleza del terreno donde se cimente.

Están formados básicamente por dos partes principales: el tablero y los apoyos. El tablero se fija en los apoyos, siendo la distancia entre dos de ellos lo que se conoce como vano. En relación a la construcción de un puente debemos plantearnos dos partes separadas; la superestructura (conjunto de los tramos que salvan los vanos situados entre los soportes) y la infraestructura (formada por los cimientos, los estribos y las pilas que soportan los tramos).

Las pasarelas se pueden clasificar en base a distintos criterios pero a continuación se mostrarán los distintos tipos en función de su estructura y material.

### PASARELAS SEGÚN SU ESTRUCTURA

- Pasarelas de arco

El arco cubre la totalidad de la pasarela, extendiéndose de un extremo al otro de manera ininterrumpida. Trabajan transfiriendo el peso propio y las sobrecargas de uso hacia los apoyos mediante la compresión del arco, donde se transforman en un empuje horizontal y una carga vertical. Normalmente la esbeltez del arco (relación entre la flecha máxima y la luz) es alta, haciendo que los esfuerzos horizontales sean mucho mayores que los verticales.



FIGURA 1. PASARELA DE ARCO Y TABLERO SUSPENDIDO (SANTANDER)



FIGURA 2. PUENTE DE PIEDRA (ZARAGOZA)

- Pasarelas voladizas

Son aquellas que se construyen a partir del método de volados sucesivos, donde la superestructura se mantiene a partir de pilas o pilones que permiten la adición de tramos sucesivos a partir de las anteriores.



FIGURA 3. PASARELA DEL BICENTENARIO (ZARAGOZA)



FIGURA 4. PASARELA DEL AZUD (ZARAGOZA)

- Pasarelas colgantes

Las pasarelas colgantes son aquellas donde el tablero se suspende bajo un arco invertido compuesto de cables de acero. Estos cables se sostienen a partir de vigas de acero u hormigón en los extremos del puente, y sujetan el tablero mediante tirantes verticales. Son sensibles a grandes ráfagas de viento por la acción que ellas ejercen sobre los tirantes verticales.

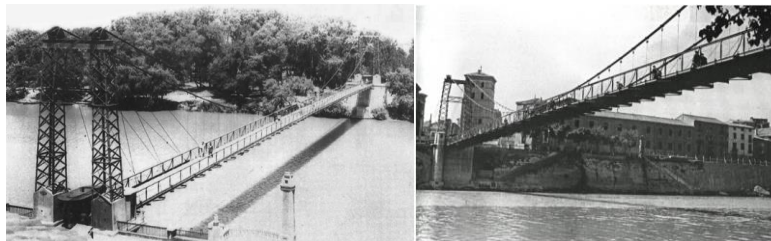


FIGURA 5. PASARELA SITUADA DONDE EL ACTUAL PUENTE DE SANTIAGO (ZARAGOZA)

- Pasarelas atirantadas

Las pasarelas atirantadas son aquellas cuyo tablero está suspendido por uno o varios pilones centrales que se enlazan con el tablero a través de tirantes. Son similares a los puentes colgantes, pero se diferencian de ellos en que tienen componentes que actúan tanto por tracción como por compresión.



FIGURA 6. PASARELA ATIRANTADA (SALAMANCA)



FIGURA 7. PASARELA DEL VOLUNTARIADO (ZARAGOZA)

## PASARELAS SEGÚN LOS MATERIALES UTILIZADOS

A lo largo de la historia, se han ido empleando distintos materiales en la construcción de puentes y pasarelas; evolucionando hasta el día de hoy. Madera, piedra, hierro, ladrillo y aluminio han sido los materiales utilizados con más frecuencia en la construcción de todo tipo de estructuras. Actualmente se prueban nuevos materiales o combinaciones diversas para construir pasarelas con mayor resistencia que el acero. Son los que se denominan "materiales compuestos", formados por fibras unidas con una matriz de resina y que se vienen utilizando desde hace años en diversos tipos de industrias tales como la aeroespacial, aeronáutica y automovilística, entre otras.

	<u>COMPRESION</u>	<u>FLEXION</u>	<u>TRACCION</u>
<b>PREHISTORIA</b>	Arcilla, tapia, adobe, ladrillo	Madera	Cuerdas
<b>HISTORIA CLASICA</b>	Piedra	Madera	Madera Grapas metálicas
<b>SIGLO XIX</b>	Fundición	Madera	Cadenas de hierro
<b>PRIMERA ETAPA SIGLO XX</b>	Hormigón Acero laminado	Hormigón armado Acero laminado	Cables de acero
<b>SEGUNDA ETAPA SIGLO XX</b>	Hormigones especiales Acero laminado	Maderas especiales Hormigones <u>pretensados</u> Aleaciones	Cables de acero de alta resistencia Alto límite elástico

FIGURA 8. ESFUERZOS SEGÚN LA ÉPOCA

- Pasarelas de piedra

Son las más comunes siglos atrás. Son muy compactas por lo que son muy resistentes a las distintas condiciones meteorológicas aunque por el contrario son muy costosas de construir.



FIGURA 9. PASARELA VECCHIO (FLORENCIA)

- Pasarelas metálicas

Las pasarelas metálicas son una alternativa bastante común en la actualidad, entre otras cosas, porque el acero es un material fácil de reciclar. Pueden cortarse para facilitar su demolición y ser llevadas nuevamente a las aceras, haciendo de las pasarelas metálicas una opción idónea para la gestión sostenible de los recursos.





FIGURA 10. PASARELA CON VIGAS CAJÓN (SANTANDER)

- Pasarelas de hormigón

Las pasarelas de hormigón son de montaje rápido dado que admiten componentes prefabricados en su construcción. El hormigón es un material resistente a elementos atmosféricos, por lo que el gasto de mantenimiento es escaso. En el interior se introducen varillas de acero para dar lugar al hormigón armado, permitiéndole así soportar los esfuerzos de tracción. A raíz de esto, es posible referirse a esta pasarela como pasarela de armadura y, en consecuencia, se pueden identificar varios tipos de armaduras para éstas.



FIGURA 11. PASARELA DE HORMIGÓN PREFABRICADO EN AUTOPISTAS

- Pasarelas de madera

Probablemente, las pasarelas de madera para uso peatonal y bicicletas sean la alternativa más ecológica y natural. Están fabricadas con madera laminada encolada de pino. El tratamiento se realiza en profundidad para intemperie, por lo que se garantiza su durabilidad.



FIGURA 12. PASARELA DE MADERA



Como se puede observar, gran cantidad de las pasarelas no son de un único tipo si no que se tratan de una estructura combinada de varias de ellas; arco-celosía, arco-atirantada...

En particular, en este proyecto, la estructura está dotada de un tablero mixto, es decir, un tablero de hormigón con cajón metálico, el cual va atirantado a una pila de hormigón, mostrando así una forma innovadora y atractiva visualmente al público.

El estudio y puesta en marcha requiere de un análisis en función de las diferentes solicitaciones, deformaciones y efectos dinámicos que puede experimentar la pasarela. Por ello, se ha optado por un programa de elementos finitos 3D llamado RFEM, de la compañía Dlubal Software. A través de éste se ha podido someter a la estructura creada a las acciones que experimentaría en las posibles ubicaciones comentadas anteriormente. Posteriormente, se analizarán combinaciones de éstas acciones según los criterios de ELS (Estado Límite Servicio) y ELU (Estado Límite Último).

De esta forma, se obtendrán las deformaciones, esfuerzos internos, tensiones... y así se determinará si es necesario modificar el material, resistencia o incluso cambiar el diseño de alguna de las partes que componen la pasarela.

### 3. DISEÑO

#### 3.1 CONSIDERACIONES GENERALES

A continuación se expondrán los principales elementos que habrá que tener en cuenta para el posterior cálculo de la pasarela así como una serie de criterios para su correcto funcionamiento.

Es esencial con la finalidad de asegurar una integración de los elementos que componen la pasarela tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Constructivo:** Además de ser efectivos estructuralmente se pretende que sea visualmente atractivo al público. Siempre que sea posible podrán utilizarse elementos prefabricados para reducir así el tiempo de ejecución de la estructura. A su vez, se seleccionará los materiales en relación a estos aspectos, a la climatología que vaya a soportar y por lo tanto a las acciones a considerar.
- **Estéticos:** Deben integrarse en el entorno seleccionado así como ser visualmente atractivos al público en la medida de lo posible.
- **Durabilidad:** Se debe diseñar de tal forma que se tenga la mayor vida útil posible, no siendo ésta menor a 50 años. Para ello se deberán de tener en cuenta algunos aspectos como los materiales, elementos estructurales y diseño de la pasarela. Será conveniente a su vez planificar cómo proteger y realizar operaciones de mantenimiento a lo largo de los años para poder así aumentar su durabilidad.
- **Funcionalidad:** Se estudiará para cumplir con los requisitos fundamentales de una pasarela en relación a las acciones a soportar y el tránsito de bicicletas y peatones.
- **Económicos:** Siempre es un aspecto importante a tener en cuenta y para ello se deberá de analizar el coste económico de la pasarela, su ejecución y del posterior mantenimiento necesario para cumplir con la durabilidad exigida.
- **Medioambientales:** Se deberá minimizar en la medida de lo posible el impacto de la pasarela en el entorno de colocación, buscando por lo tanto una mimetización de ésta.

Todos y cada uno de estos aspectos son relevantes a la hora de diseñar una pasarela por lo que siempre que sea posible se buscará un equilibrio entre todos ellos pero sin olvidar

que lo verdaderamente importante es el correcto funcionamiento estructural de la pasarela velando así por la seguridad de la población.

A lo largo del proyecto ha sido necesaria la aplicación de una serie de normativas en relación con las acciones y los materiales que se han utilizado. Con ellas se ha podido llevar a cabo un diseño y cálculo adecuado. A continuación se exponen las normativas utilizadas:

- **IAP-11 - Instrucción sobre las Acciones a considerar en el proyecto de Puentes de carretera.**

El objeto de esta Instrucción es la definición de las acciones y sus combinaciones, así como el establecimiento de los coeficientes de ponderación a considerar en el proyecto de puentes de la red de carreteras del Estado, para permitir la verificación de los elementos de la infraestructura viaria desde el punto de vista de la funcionalidad y de la seguridad estructural.

En este proyecto se ha utilizado por ello para las acciones a considerar y con los distintos coeficientes de ponderación para llevar a cabo las distintas combinaciones en los Estados Límite Último (ELU) y Estado Límite de Servicio (ELS).

- **EHE-08 - Instrucción de hormigón estructural**

En ella se establecen los requisitos a tener en cuenta en el proyecto y ejecución de estructuras de hormigón, tanto de edificación como de ingeniería civil, con el objeto de lograr los niveles de seguridad adecuados a su finalidad.

Se ha requerido la aplicación de esta normativa en el proyecto ya que como se ha comentado anteriormente, el tablero cuenta con una parte de hormigón y la pila, la cual sustenta el tablero a través de los tirantes, es de éste material también. Además, se tendrá en cuenta para llevar a cabo el armado de estas dos partes.

- **EAE - Instrucción de Acero Estructural**

Se trata de una instrucción que se aplica en todas las estructuras y elementos de acero estructural, tanto de edificación como de ingeniería civil. En este caso se ha requerido para verificar el cumplimiento de las tensiones y esfuerzos de las zonas con éste material, como es el caso del cajón metálico colocado a lo largo del tablero de la pasarela.

### 3.2 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DE LA PASARELA

Como se ha comentado anteriormente, la pasarela se prevé que pueda ser colocada en localizaciones donde el cauce fluvial sea inferior a 90 metros, como por ejemplo en algunas zonas del río Ebro a su paso por Zaragoza o Logroño. Esto se debe a que cuenta con una luz de 90 metros entre los apoyos metálicos y de neopreno colocados en los extremos. Consta a su vez de una pylona, con una forma similar a una aleta de tiburón, de 36 metros de altura. A continuación se muestra un esquema con las distintas partes diferenciadas.

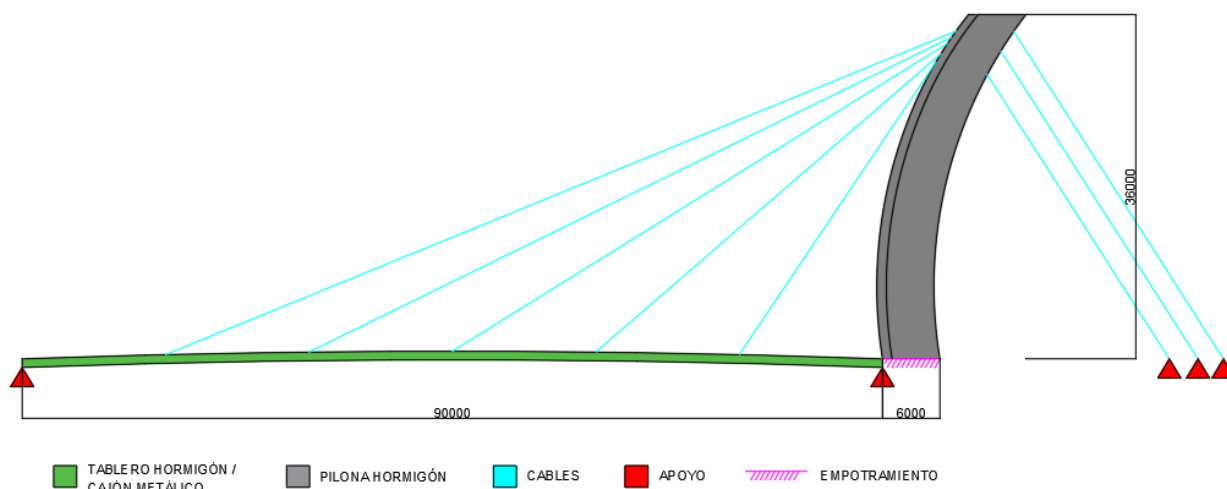


FIGURA 13. ESQUEMA PASARELA

Pese a no tratarse de un aspecto necesario en el cálculo estructural, a la hora de definir la anchura del tablero se ha estudiado la funcionalidad que se le quería dar a la pasarela. Tras determinar que iba a ser únicamente para el tránsito peatonal y de bicicletas, basándose en la Instrucción IAP-11, se concreta una dimensión de 6 metros. Ésta estaría desglosada en dos carriles en los laterales para las bicicletas, con una anchura de 1.75 metros cada uno de ellos y de un carril central para el paso de peatones de 2.5 metros. Son unas dimensiones bastante amplias que proporcionan confort al mismo tiempo que seguridad a los transeúntes.

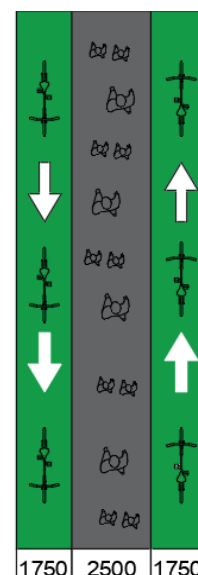


FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN TABLERO

## ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS

En este apartado se van a mostrar en detalle las distintas partes que componen la pasarela y que posteriormente serán objeto del cálculo en el programa RFEM. Cada una de ellas contará con su plano correspondiente en el apartado de "PLANOS" y sus propiedades en relación con el material elegido en el apartado del anexo de "PROPIEDADES MECÁNICAS SEGÚN MATERIAL"

- Pilona

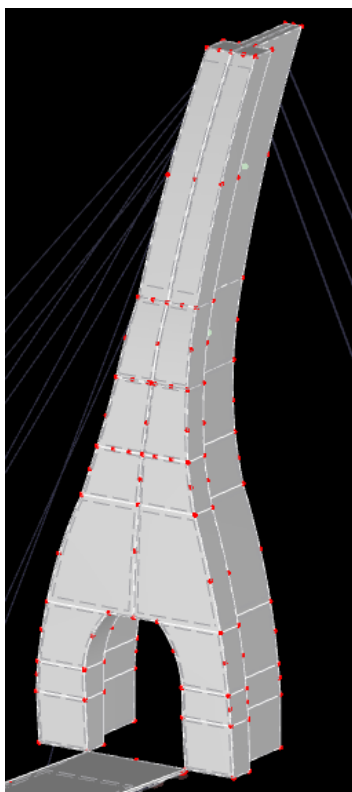


FIGURA 15. PILONA

Se trata de un elemento que además de ser uno de los más importantes para el correcto funcionamiento de la pasarela es el elemento que debido a su envergadura más puede llegar a destacar. Es por ello que en numerosas ocasiones se busca que además de ser óptimo estructuralmente, sea atractivo visualmente al público, creando así un punto de interés turístico.

En relación a ello, en el proyecto se ha diseñado una pylona con una forma similar a la de una aleta de tiburón haciéndola así muy peculiar. Comienza en su base con una forma de pi y conforme aumenta su altura, sus atractivas curvas hacen que termine siendo únicamente una T. El material utilizado para ella es hormigón armado (HA-30) para aumentar su resistencia a la tracción.

A continuación se muestra una descripción más detallada de la geometría:

- Base inferior: Sobre ella, apoyará la pasarela mediante los apoyos metálicos y de neopreno nombrados anteriormente. Tiene una forma similar a la del símbolo matemático  $\pi$ .
- Base superior: Zona más elevada de la pylona, a 36 metros de altura. En este caso la forma que se obtiene es la de una T.
- Apertura central: Hueco con anchura igual a la del tablero (6 metros) y con una forma similar a la de un portón.

- Tablero

Elemento sobre el cual van a circular las bicicletas y caminar los peatones. Cubre los 90 metros de luz de pasarela con una pendiente del 2 % en sus extremos, provocando que el punto central de la pasarela esté por lo tanto 0.9 m más alto que los extremos. El material utilizado en este caso ha sido hormigón armado (HA-30).

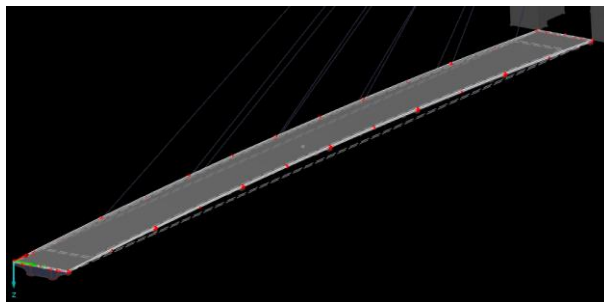


FIGURA 16. TABLERO DE HORMIGÓN HA-30

- Cajón

Conjunto sobre el cual apoya el tablero. Se trata de un cajón formado por chapas de acero S-355 soldadas entre sí. El cajón cuenta con 7 diafragmas, cada uno de ellos colado a 15 metros, coincidiendo a su vez con los puntos de apoyo del tablero y de anclaje de los cables pretensados. Para conseguir el anclaje de los cables en dicho punto se requiere de la colocación de unos vuelos de canto decreciente con forma de I. Además, en los puntos que sirven de apoyo, se van a colocar dos chapas rigidizadoras transversales.

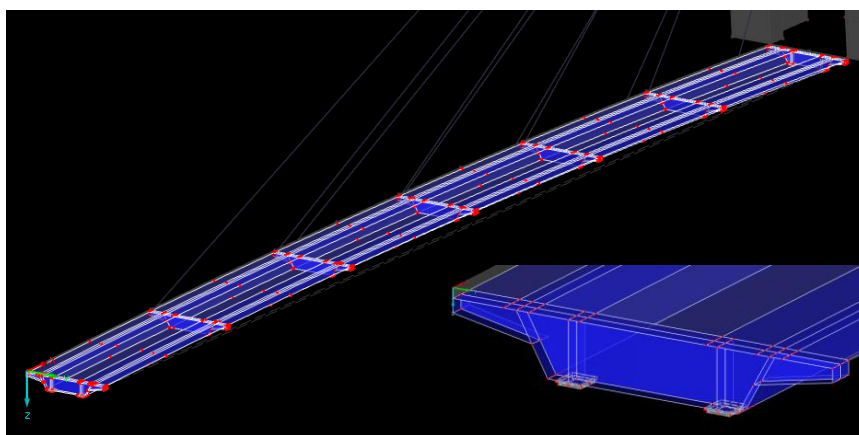


FIGURA 17. CAJÓN METÁLICO DE ACERO S-355

- Elementos de apoyo

Son aquellos elementos que conectan la parte inferior del tablero, el cajón metálico, con el punto de apoyo de la pasarela. Se tratan de dos elementos, el primero de ellos de acero S-355 y canto variable para poder compensar así la inclinación de la pasarela. Éste

apoya sobre el segundo, un cuadrado de neopreno de 4 centímetros de espesor. En cada uno de los apoyos se colocan dos elementos de cada tipo, separados 2.35 metros entre centros, haciéndolos así coincidir con las chapas rigidizadoras transversales comentadas anteriormente.

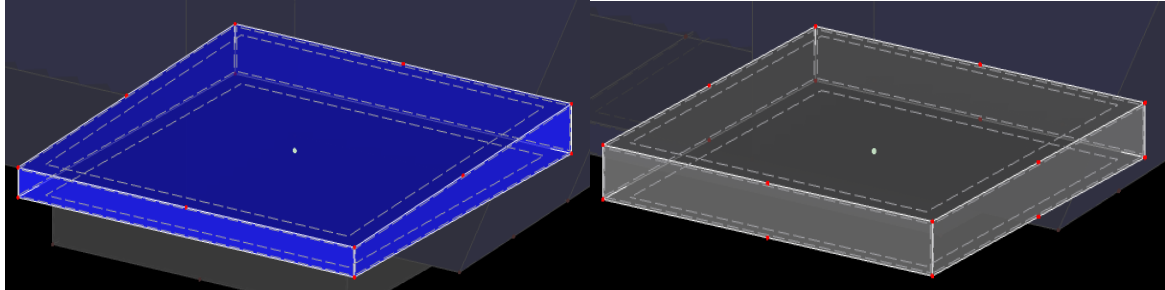


FIGURA 18. APOYO METÁLICO DE ACERO S-355

FIGURA 19. APOYO DE NEOPRENO ZUNCHADO

- Cables pretensados

Son aquellos elementos cuya finalidad es contrarrestar la flecha producida por el peso propio y la sobrecarga de la pasarela. Para éstos se ha utilizado unos cables de acero de alta resistencia St 1080/1230 y un diámetro de 80/120 mm. Previamente a su colocación requieren de un pretensado que posteriormente será determinado. Como se ha mencionado con anterioridad, se colocan desde los vuelos en forma de I del cajón metálico hasta la parte superior de la pila.

En este proyecto se han modelado 13 cables en su totalidad, 10 para la sustentación del tablero (80 diámetro) y 3 de compensación de la pila (120 diámetro).

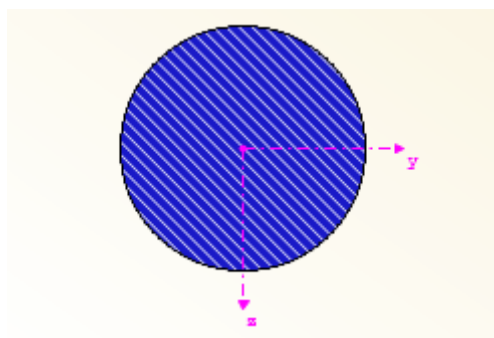


FIGURA 20. SECCIÓN DE LOS CABLES ST 1080/1230



- Conjunto

Agrupando todos los elementos descritos y fijando las condiciones de apoyo requeridas (empotramiento en la pila y apoyo deslizante en los extremos), se obtiene el modelo que se refleja en las siguientes figuras:

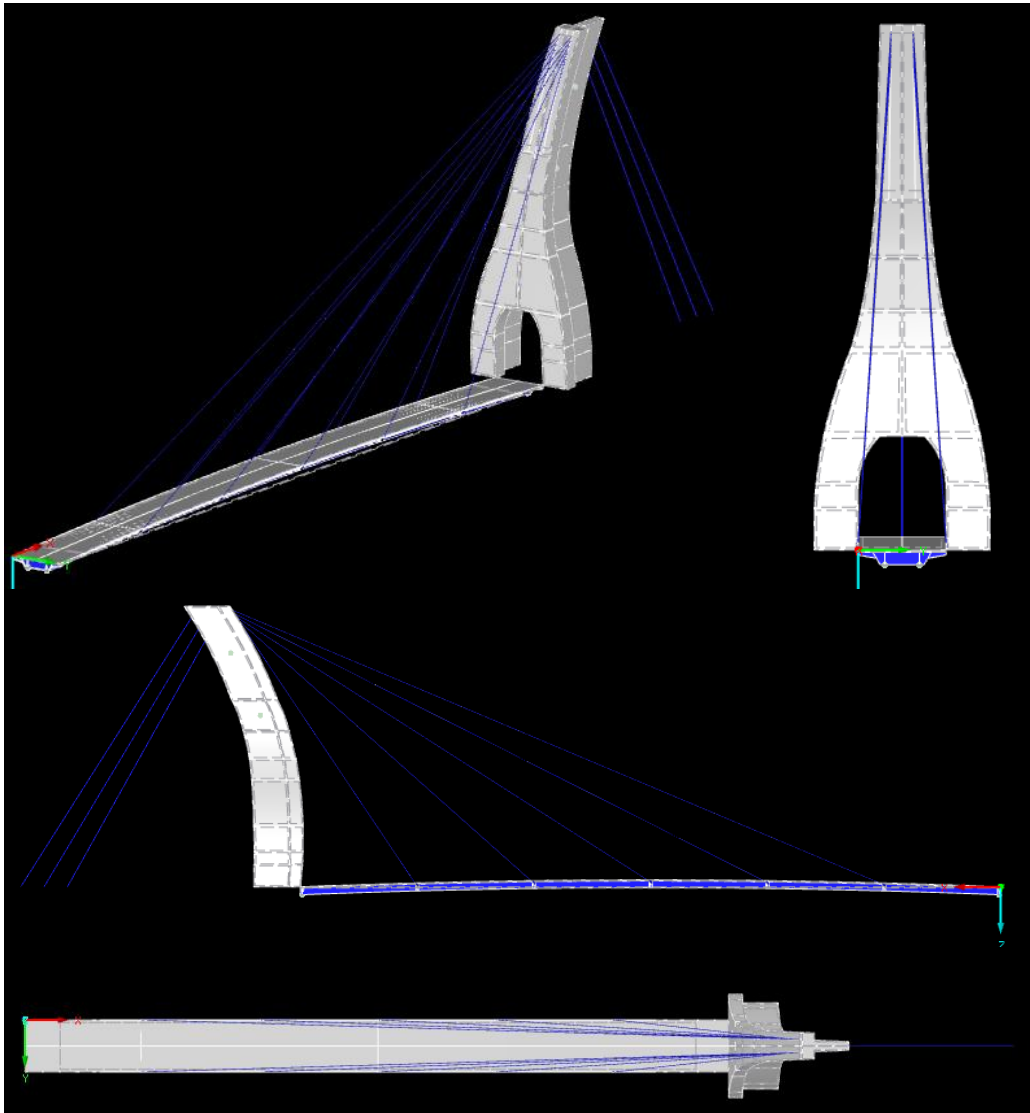


FIGURA 21. VISTAS DE LA PASARELA EN SU CONJUNTO

## 4. MODELO DE CÁLCULO

Una vez descritas las distintas partes que componen la pasarela se va a explicar cómo se ha modelizado cada una de ellas en el programa RFEM utilizado para el cálculo.

En primer lugar, la piona es un elemento modelizado mediante un sólido 3D compuesto por superficies de espesor nulo. Este procedimiento sería idéntico para la modelización del tablero y los elementos de apoyo con el terreno, tanto en el caso del componente metálico como el de neopreno zunchado. Por el contrario, el cajón metálico colocado en la parte inferior del tablero ha sido modelizado mediante elementos tipo placa, con espesor variable en función de la zona que se trate, siendo de 40 mm en los puntos de mayor sollicitación como son los rigidizadores en los puntos de apoyo, 30 en las chapas rigidizadoras verticales de los puntos de apoyo y 25 mm en el resto. Por último, los cables han sido modelizados mediante elemento tipo barra y se les ha asignado un diámetro en función de las acciones a sustentar.

Tras haber realizado el diseño de cada uno de los elementos que constituyen la pasarela y que han sido descritos previamente a su cálculo, se deberá de realizar el mallado del sistema. Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. El conjunto de todos ellos es lo que se denomina malla. La precisión del método depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis.

En el apartado del anexo "Parámetros de la malla" se encuentran las opciones seleccionadas en el programa para definirla. En un primer momento debido a la complejidad del cálculo es conveniente utilizar un tamaño de malla no muy pequeño para posteriormente, una vez ajustado todos elementos, reducir el tamaño y ser lo más precisos posibles.

En el actual proyecto, tras realizar el mallado se obtiene una malla compuesta por un total de 116 elementos finitos 1D (elementos en barra), 33710 elementos finitos 2D (elementos en superficie) y 121638 elementos finitos 3D (elementos macizos). Con todo ello se obtiene un total de 42584 nudos de malla de EF.

A continuación se van a mostrar capturas de los elementos que forman la pasarela para poder observar el mallado utilizado en cada uno de ellos.

- Pilona

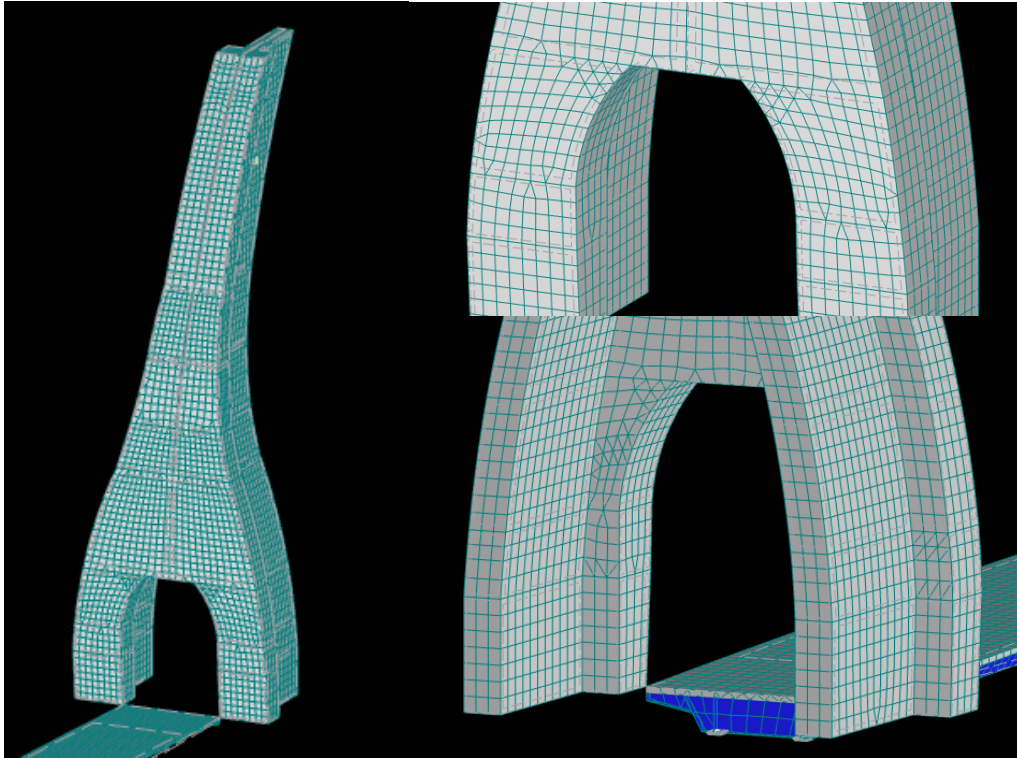


FIGURA 22. MALLADO DE LA PILONA

Se puede observar que el mallado es en su mayoría a través de hexaedros pero en los puntos conflictivos recurre a la utilización además de tetraedros.

- Tablero

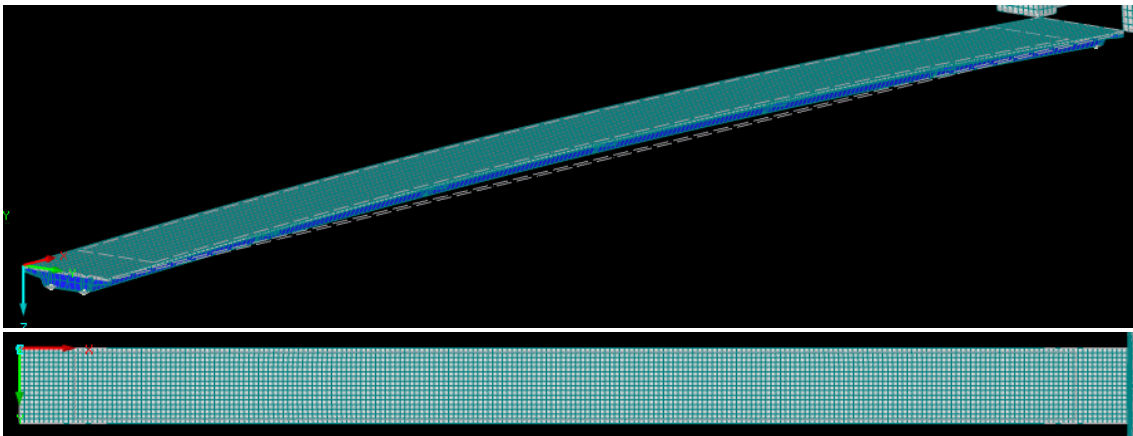


FIGURA 23. MALLADO DEL TABLERO

En este caso, en la totalidad del tablero, el mallado se ha definido mediante hexaedros.

- Cajón

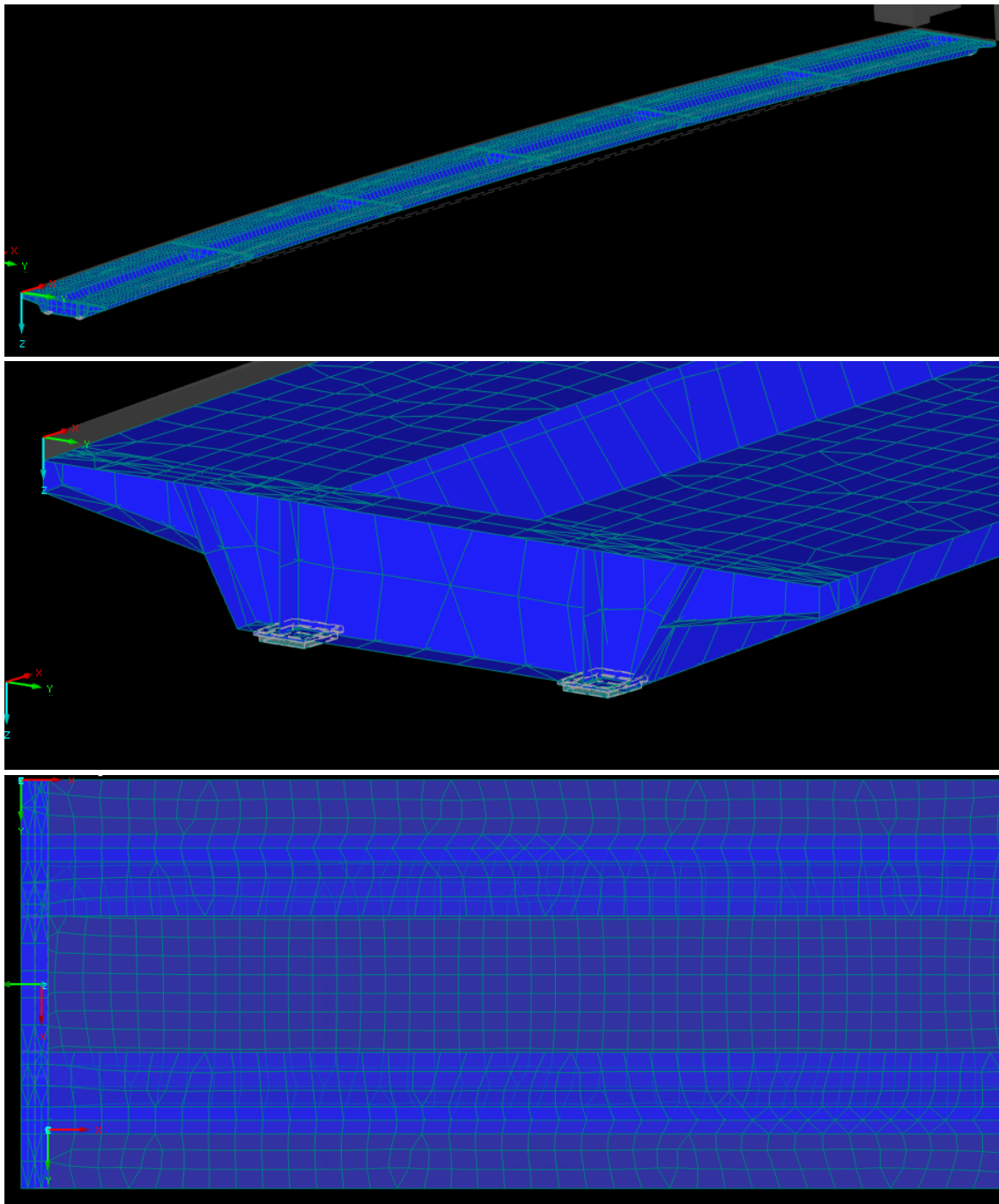


FIGURA 24. MALLADO DEL CAJÓN

En el cajón sucede al igual que en la pila, se utilizarán tetraedros y hexaedros dependiendo de la zona, en función de si se trata de un punto conflictivo o no.

Finalmente, con todos estos elementos y la implementación de los cables, se obtiene en el conjunto de la pasarela el mallado mostrado en las siguientes imágenes:

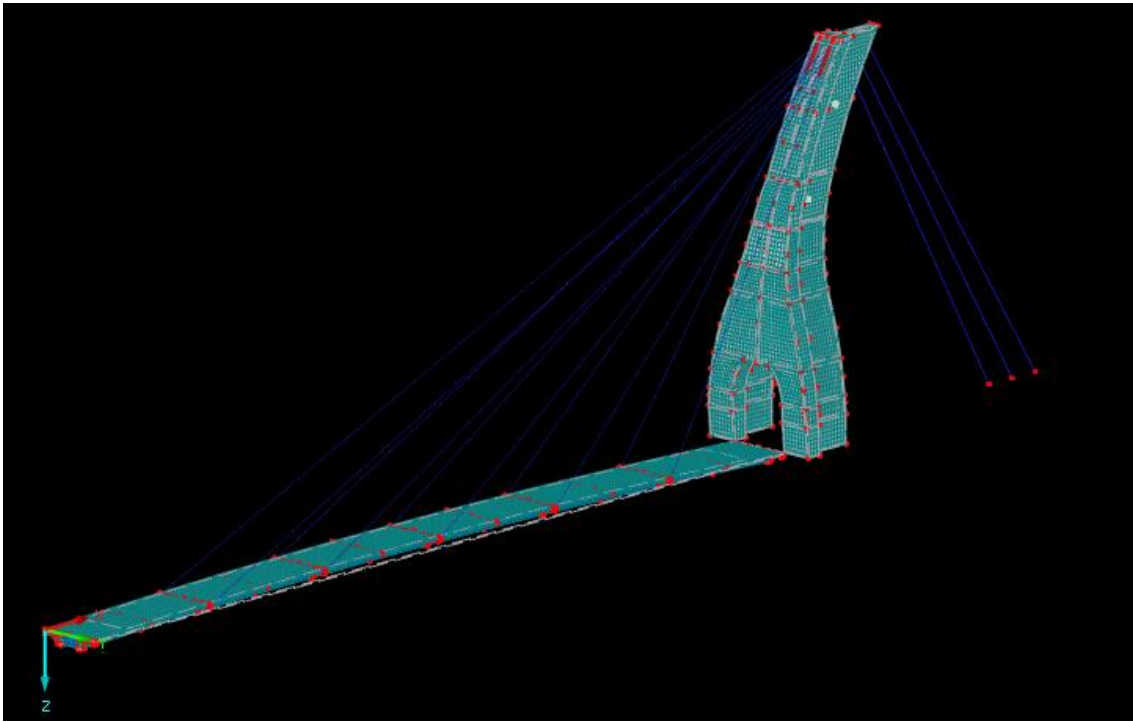


FIGURA 25. MALLADO DEL CONJUNTO DE LA PASARELA

### **CASOS INDIVIDUALES DE CARGA**

Posteriormente a la modelización de la pasarela y del mallado de la misma, se procederá a aplicar sobre ella los casos individuales de carga que se definen en la norma IAP-11.

En el anexo “Método de cálculo” se especificarán los casos definidos y sus correspondientes combinaciones de carga para la resolución del cálculo. En relación a ello, surgirán las siguientes hipótesis individuales de carga.

- **Peso Propio**

Se conoce como la carga producida por los elementos constructivos. Como se ha mostrado anteriormente, los materiales utilizados han sido; acero, hormigón armado y neopreno. Por ello, de acuerdo con la tabla 3.1-a de la IAP-11 (Figura 26), se observan sus respectivos pesos específicos ( $\text{kN/m}^3$ ).

Acero	78,5
Hormigón armado y pretensado	25,0
Material elastomérico	15,0

FIGURA 26. PESO PROPIO MATERIALES UTILIZADOS

- **Sobrecarga de uso**

La sobrecarga de uso es en este caso el peso de todos los objetos que pueden gravitar sobre la pasarela por su razón de uso: peatones, bicicletas, barandillas... Se trata junto con el peso propio de una de las acciones más importantes en el cálculo de la pasarela.

Analizando la norma IAP-11, se observa que en base al objeto de este proyecto se deben considerar una carga vertical distribuida uniformemente sobre el tablero de  $5 \text{ kN/m}^2$  y una componente horizontal con un valor del 10% de la carga vertical. Se considera únicamente el efecto producido por la carga vertical y se desprecia el que generaría la carga horizontal en consecuencia de su poca relevancia.

Debido a la morfología de la pasarela, se van a analizar los comportamientos de está al distribuir la sobrecarga de uso en distintas posiciones del tablero. Se divide el tablero por la mitad longitudinalmente y transversalmente. De esta forma, las hipótesis obtenidas serán las siguientes:

- Completa: Actúa sobre la totalidad del tablero.

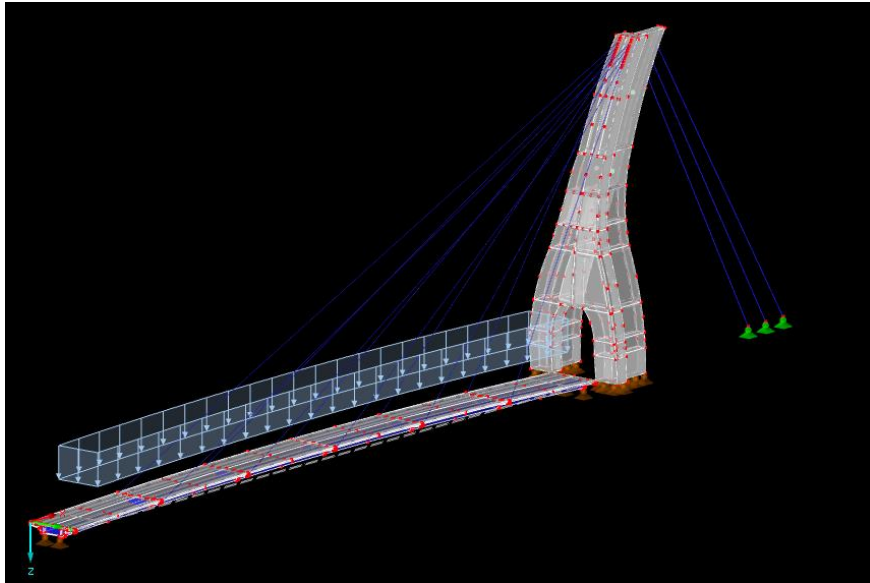


FIGURA 27. SOBRECARGA TOTAL EN TABLERO

- Mitad izquierda del tablero

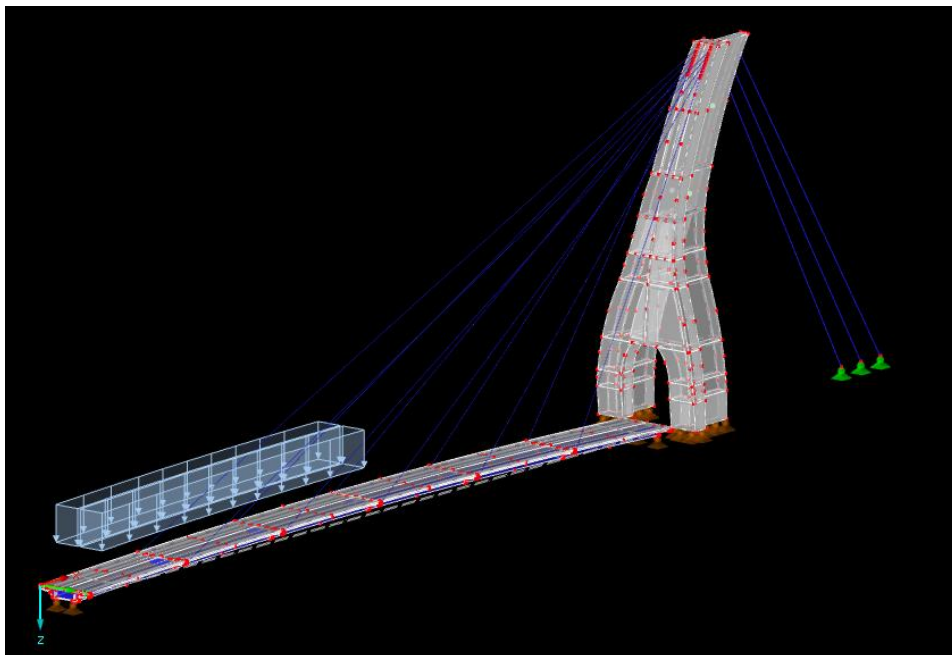


FIGURA 28. SOBRECARGA MITAD IZQUIERDA TABLERO



- Mitad derecha del tablero

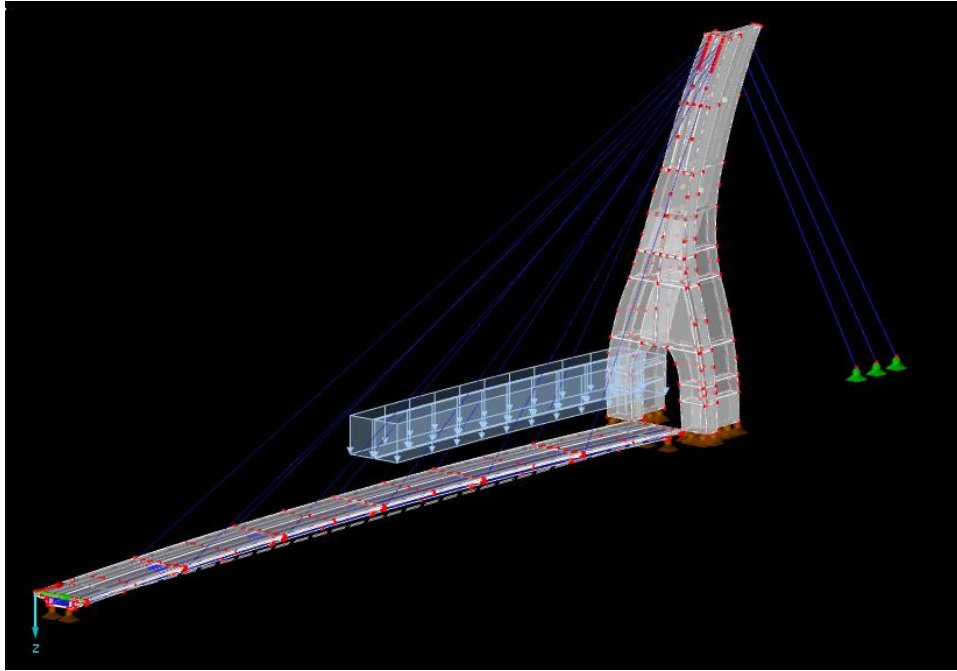


FIGURA 29. SOBRECARGA MITAD DERECHA TABLERO

- Sobrecarga 1/4 – 1/4

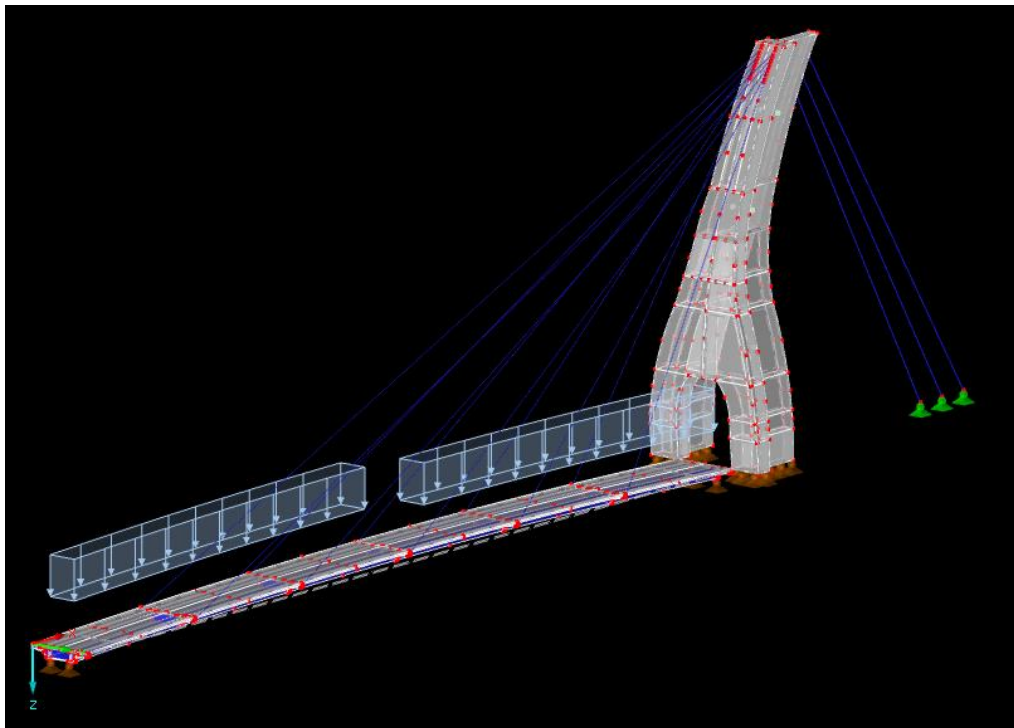


FIGURA 30. SOBRECARGA 1/4 – 1/4 TABLERO

Además, se tendrá en cuenta el empuje sobre cada una de las barandillas colocadas a los extremos del tablero, una carga en sentido transversal de 2 kN/m.

- Viento

En relación al viento, en el apartado 4.2 de la IAP-11, la acción del viento se tomará como una carga estática. El cálculo de éste se verá reflejado en el apartado del anexo de “Obtención de los valores de carga”.

Tendrá gran importancia el análisis de ésta carga sobre el tablero de la pasarela. Por ello habrá que analizar el efecto del viento tanto en el lateral como el producido en el cajón metálico. También se deberá tener en cuenta el efecto que se producirá en los cables que sustentan el tablero y los de compensación para la pila.

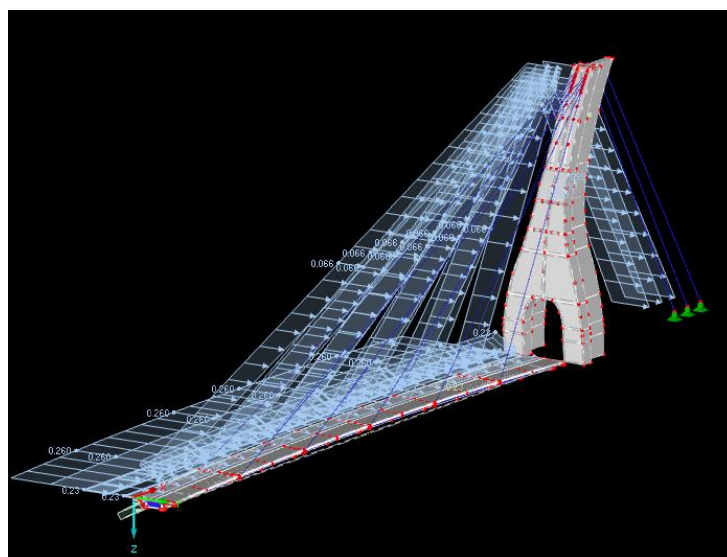


FIGURA 31. CARGAS DE VIENTO SOBRE LA PASARELA

- Nieve y temperatura

Según los apartados 4.3 y 4.4 de la IAP-11, se deberán de tener en cuenta la acción de la nieve y la temperatura. En este caso, la nieve supone una carga uniformemente distribuida en el tablero bastante inferior en relación con la sobrecarga de uso. Por ello, no tiene sentido considerar carga de nieve concomitante con la sobrecarga. En el caso de la temperatura, estará ligado a la ubicación donde se prevé colocar la pasarela. Los elementos de la pasarela se someten a una dilatación y a una contracción debido al aumento y disminución de la temperatura. Para considerar este efecto de dilatación se disponen neoprenos en los apoyos con capacidad de deformación angular suficiente, de manera que se evita la aparición de esfuerzos por efecto térmico.

- Pretensado

Se trata de una hipótesis de carga que actuará en todas las combinaciones de acciones, al igual que sucede con el peso propio.

El valor del pretensado varía en cada uno de los cables que se encuentran en la pasarela. Por ello a la hora de realizar el cálculo se ha tenido que ir ajustando este valor hasta obtener una flecha máxima inferior al límite según la IAP-11. Se analizarán posteriormente el valor de cada uno de los cables que sustentan el tablero así como los tres cables colocados tras la pila para contrarrestar las acciones de la pila.

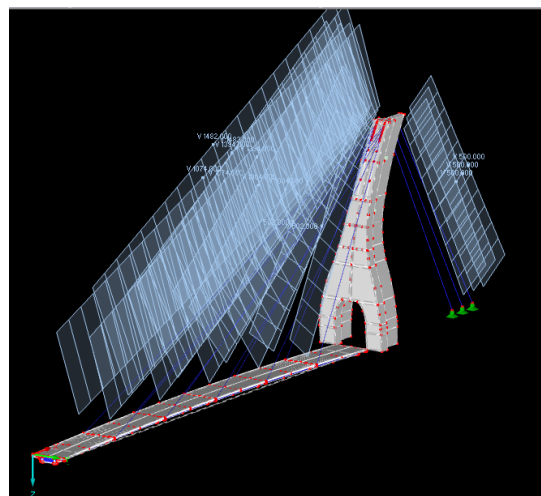


FIGURA 32. PRETENSADO DE LOS CABLES

### **HIPOTESIS DE CARGA**

En este apartado se combinarán las hipótesis de carga definidas en el apartado anterior, aplicando los coeficientes especificados en el apartado 6 de la IAP-11, tanto para el caso de Estado Límite Último (ELU) como de Estado Límite de Servicio (ELS).

La norma recoge ciertas restricciones que se deberán de tener en cuenta:

- Si la acción de viento es dominante, no se tomará la sobrecarga de uso concomitante.
- Las hipótesis de nieve se tomarán junto con el peso propio.
- No podrán actuar simultáneamente las acciones de viento y temperatura.

Para las combinaciones de cargas en ELS, se buscará la combinación de acciones con la sobrecarga de uso frecuente que mayor flecha y contraflecha produzca. Se procederá a realizar el mismo procedimiento en la combinación persistente de acciones en ELU. Sus deformadas podrán observarse con mayor detalle en el anexo "Deformadas en ELU y ELS".

En relación a ello, se recuerda que una acción será considerada como favorable cuando se oponga a la deformación y favorable cuando ayude a provocar mayor flecha.

A continuación se expondrán las combinaciones estudiadas para los casos de ELU y ELS con el fin de encontrar la combinación de acciones más desfavorables y de ésta forma justificar con ella el cumplimiento de cada uno de los elementos en base a la norma.

## DISEÑO Y CÁLCULO DE UNA PASARELA PEATONAL ATIRANTADA DE ESTRUCTURA MIXTA ACERO-HORMIGÓN

### ELU

Hipótesis	Casos Principales						
	Peso Propio	Carga Permanente	Sobrecarga Total	Sobrecarga 1/2 Izq	Sobrecarga 1/2 Dcha	Sobrecarga 1/4 + 1/4	Viento
1	1,35	1,35					
2	1,35	1,35	1,5				
3	1,35	1,35		1,5			
4	1,35	1,35			1,5		
5	1,35	1,35				1,5	
6	1,35	1,35					1,5
7	1,35	1,35	1,5				0,9
8	1,35	1,35		1,5			0,9
9	1,35	1,35			1,5		0,9
10	1,35	1,35				1,5	0,9

FIGURA 33. COMBINACIONES ELU

Hipótesis	Casos Principales						
	Peso Propio	Carga Permanente	Sobrecarga Total	Sobrecarga 1/2 Izq	Sobrecarga 1/2 Dcha	Sobrecarga 1/4 + 1/4	Viento
1	1	1					
2	1	1	1				
3	1	1		1			
4	1	1			1		
5	1	1				1	
6	1	1					1
7	1	1	0,7				0,6
8	1	1		0,7			0,6
9	1	1			0,7		0,6
10	1	1				0,7	0,6

FIGURA 34. COMBINACIONES ELS

Una vez definidas, se analizarán todas las hipótesis para observar en cuales de ellas surgen los casos más desfavorables. En el apartado siguiente se mostrarán todos y cada uno de ellos.

### CONDICIONES DE APOYO

Se han considerado impedidos los desplazamientos en los apoyos del cajón, en la base de la pila y en el arranque de los cables de compensación, tal como se muestra en la figura (35).

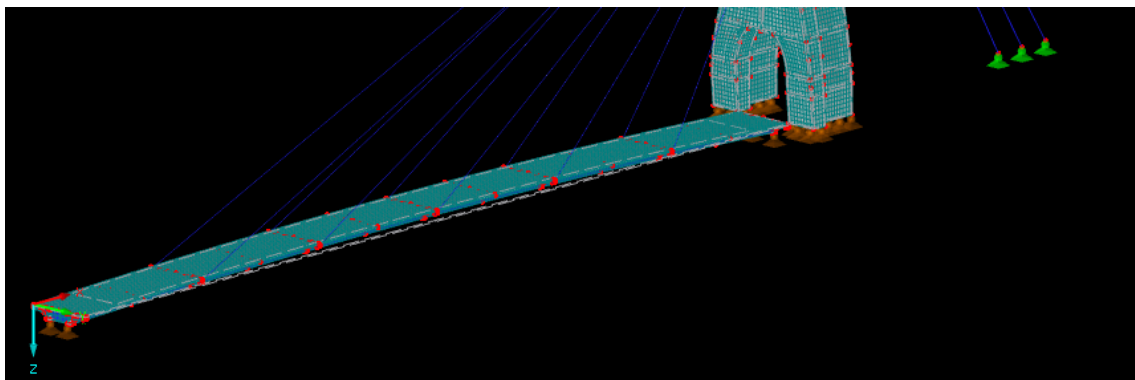


FIGURA 35. CONDICIONES DE APOYO

## 5. RESULTADOS

Analizando los resultados obtenidos en las distintas combinaciones de ELU y ELS se obtienen las combinaciones más desfavorables para cada uno de los elementos que forman la pasarela. Por ello a continuación se van a detallar las hipótesis más restrictivas en relación a cada componente.

- Configuración de montaje

Tras realizar el pretensado necesario en los cables, se obtiene la configuración final de montaje de la pasarela, con una contraflecha máxima de 100 mm, tal como se muestra en la figura (36).

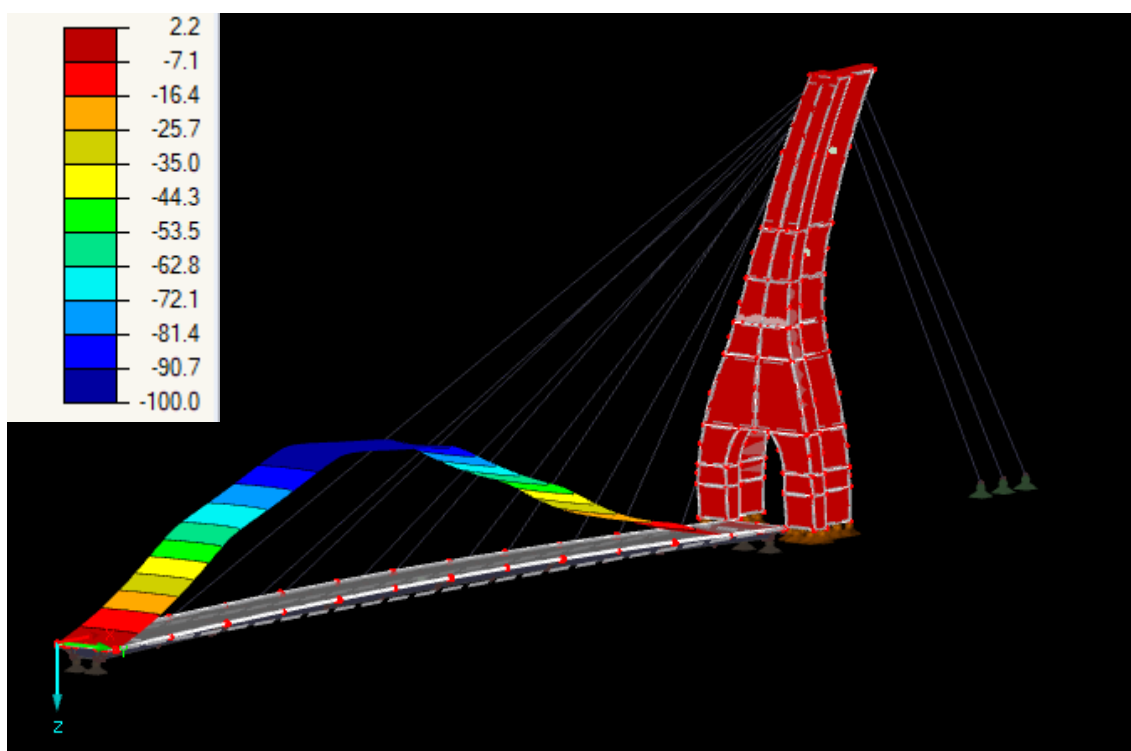


FIGURA 36. CONFIGURACIÓN MONTAJE

- Mayor contraflecha en el tablero

Observando las flechas producidas por las acciones sobre el tablero, tomando las hipótesis de ELS, se obtiene que la combinación en la cual se produce una mayor contraflecha es aquella en la que el viento es la acción dominante (ELS 6) tal como se muestra en la figura (37).

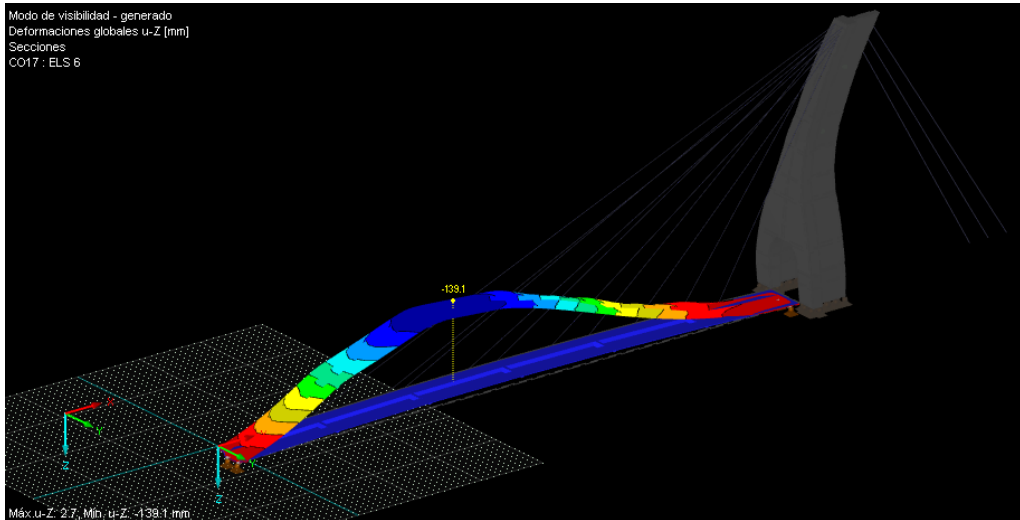


FIGURA 37. MAYOR CONTRAFLECHA

El valor obtenido es de 139.1 mm por lo que el movimiento respecto a la configuración de referencia es de 39.1 mm, lo que supone un valor equivalente a  $L/2301$ .

- Mayor flecha en el tablero

Observando las flechas producidas por las acciones sobre el tablero, tomando las hipótesis de ELS, se obtiene que la combinación en la cual se produce una mayor flecha es aquella en la que la sobrecarga es la acción dominante (ELS 2) tal como se muestra en la figura (38).

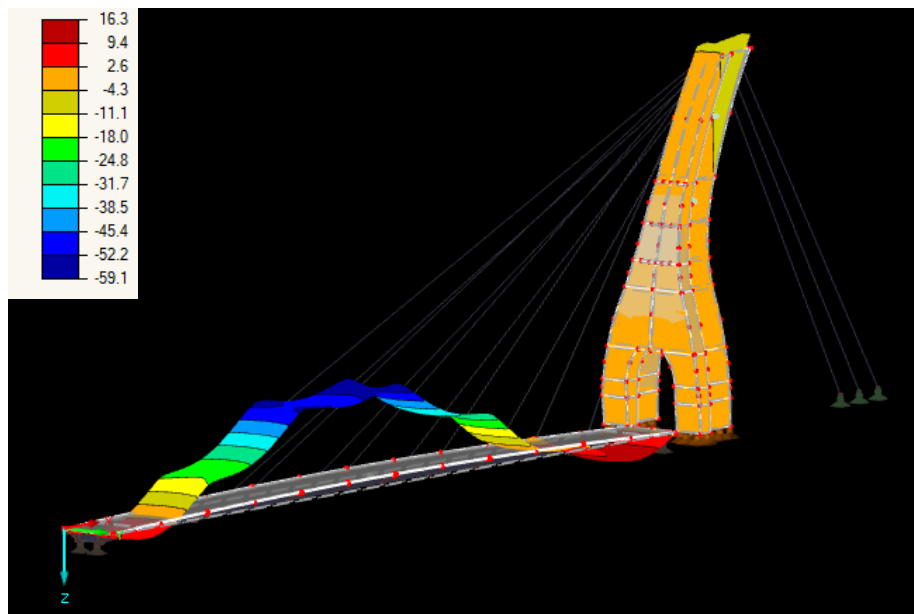


FIGURA 38. MAYOR FLECHA

El valor obtenido es de 59.1 mm por lo que el movimiento respecto a la configuración de referencia es de 40.9 mm, lo que supone un valor equivalente a  $L/2200$ .

De acuerdo con estos resultados, el diseño realizado cumple holgadamente los requisitos de normativa.

- Mayor tracción en los cables de compensación

Analizando las combinaciones de ELU, se obtiene que los cables de compensación están sometidos a una mayor tracción en la ELU 7. En ella se ha tomado la sobrecarga de uso como acción dominante y el viento como concomitante.

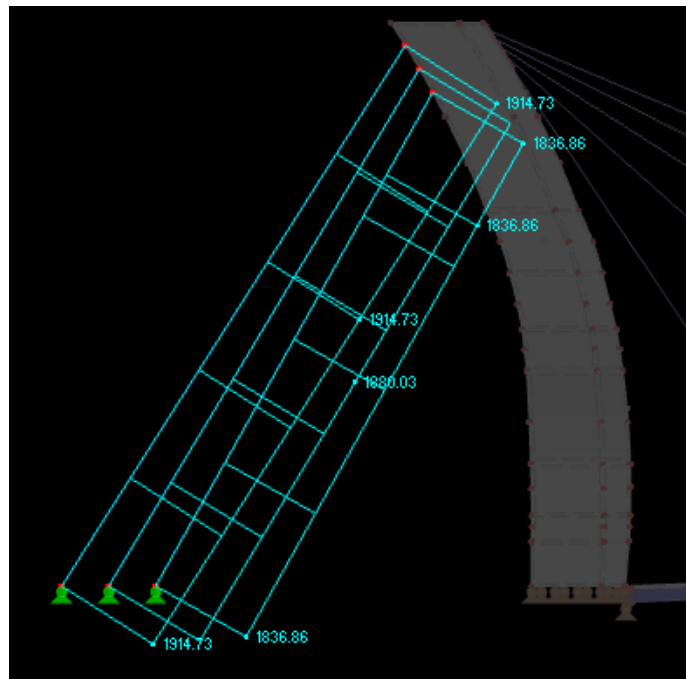


FIGURA 39. TRACCIÓN EN LOS CABLES DE COMPENSACIÓN

El valor máximo obtenido es de 1914,73 kN por lo que en este caso se cumple también con el valor máximo admisible.

- Mayor tracción en los cables de sustentación

Analizando las combinaciones de ELU, se obtiene que los cables de sustentación están sometidos a una mayor tracción es en la ELU 7. En ella se ha tomado la sobrecarga de uso como acción dominante y el viento como concomitante.



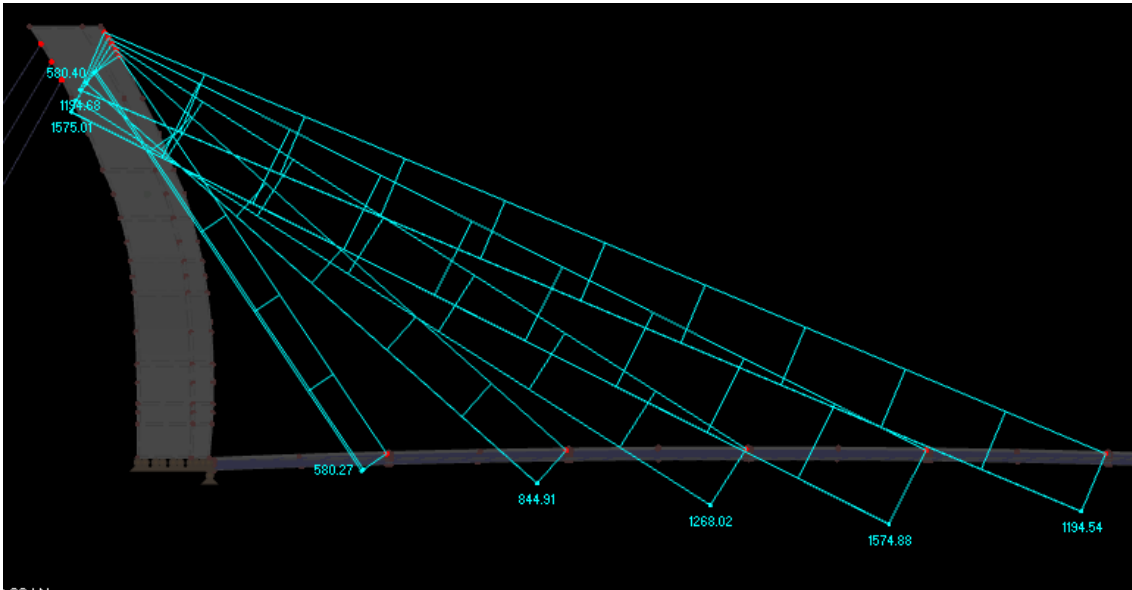


FIGURA 40. TRACCIÓN EN LOS CABLES DE COMPENSACIÓN

El valor máximo obtenido es de 1574,88 kN por lo que en este caso se cumple también con el valor máximo admisible.

- Mayor tensión en el cajón

Al igual que en el caso anterior, sucede lo mismo en el cajón metálico. La combinación en la que está sometido a una mayor tensión es la ELU 7, en la que se ha tomado la sobrecarga de uso como acción dominante y el viento como concomitante.

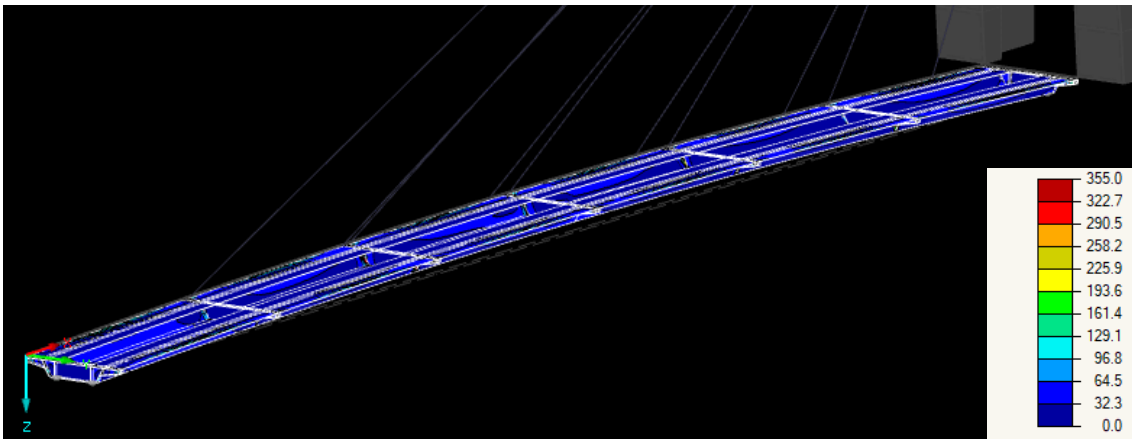


FIGURA 41. MAYOR TENSION EN EL CAJÓN METÁLICO

Como se observa en la figura, todas las tensiones se sitúan por debajo del límite admisible del material, produciéndose los valores máximos en las esquinas inferiores de los diafragmas debido al efecto local que provocan los cables de sustentación, como se observa en el detalle de la figura (42).

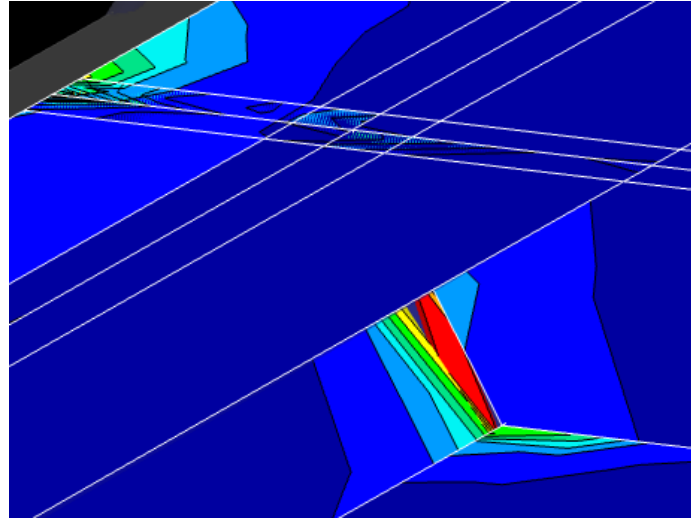


FIGURA 42. CONCENTRACIÓN ESFUERZOS ESQUINAS INFERIORES DIAFRAGMAS

- Mayores esfuerzos en la pylona

La combinación que supone un mayor requerimiento para la pylona es como viene siendo en los apartados anteriores, la ELU 7.

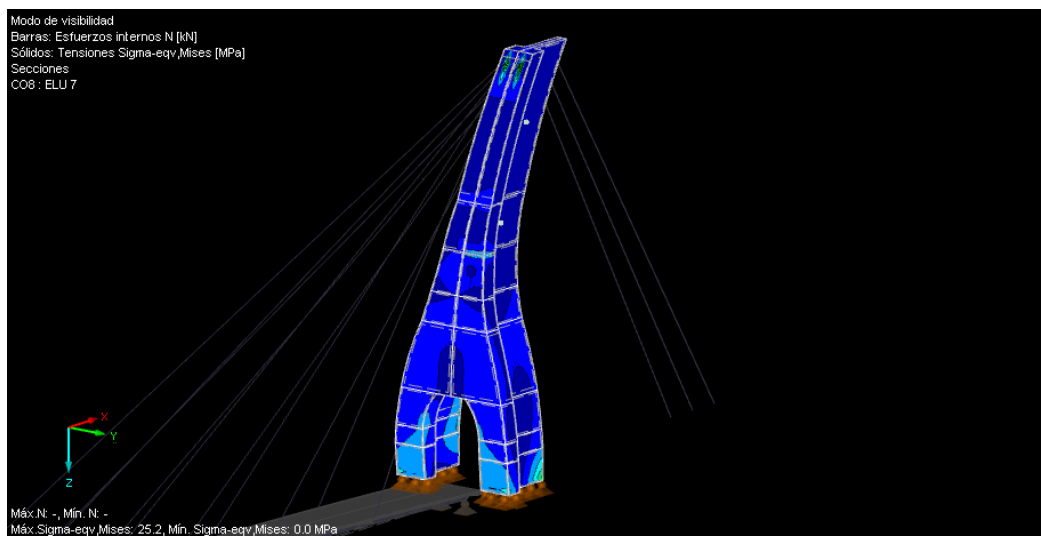


FIGURA 43. HIPÓTESIS ELU 7 EN LA PILONA

Al tratarse de un modelo de elementos finitos tridimensional, no se pueden obtener los esfuerzos como resultado directo del cálculo. No obstante, es posible obtener los mismos procesando adecuadamente las tensiones, considerando el área y el módulo resistente de la sección de empotramiento. Los esfuerzos máximos obtenidos son los siguientes:

- Esfuerzo axial: 21825 kN
- Momento flector: 69806 kNm
- Esfuerzo cortante: 8988,55 kN

### ARMADO DE LA PILONA Y ZAPATAS

Una vez ha sido modelizada la pasarela y se han obtenido los casos más desfavorables de ELU y ELS, se procede a definir el armado del hormigón de la pila y de la zapata sobre la cual irán anclados los cables de compensación.

Para ello, se adjunta a continuación unas imágenes de los esfuerzos de N y M obtenidos en las distintas combinaciones y que posteriormente serán el sujeto del cálculo del armado de la pila.

<b>ELU 1</b>		
Positivo	3,9	Mpa
Negativo	-3,5	Mpa
N	10125	KN
M	35381	KNm
<b>ELU 2</b>		
Positivo	7,9	Mpa
Negativo	-6,6	Mpa
N	22162,5	KN
M	69328	KNm
<b>ELU 3</b>		
Positivo	6,3	Mpa
Negativo	-5,2	Mpa
N	17887,5	KN
M	54984,375	KNm
<b>ELU 4</b>		
Positivo	5,5	Mpa
Negativo	-4,9	Mpa
N	14400	KN
M	49725	KNm
<b>ELU 5</b>		
Positivo	5,9	Mpa
Negativo	-5	Mpa
N	16312,5	KN
M	52115,625	KNm
<b>ELU 6</b>		
Positivo	3,8	Mpa
Negativo	-3,5	Mpa
N	9562,5	KN
M	34903,125	KNm
<b>ELU 7</b>		
Positivo	7,9	Mpa
Negativo	-6,7	Mpa
N	23825	KN
M	69806,25	KNm
<b>ELU 8</b>		
Positivo	6,3	Mpa
Negativo	-5,3	Mpa
N	17550	KN
M	55462,5	KNm
<b>ELU 9</b>		
Positivo	5,5	Mpa
Negativo	-4,9	Mpa
N	14400	KN
M	49725	KNm
<b>ELU 10</b>		
Positivo	5,9	Mpa
Negativo	-5,1	Mpa
N	15975	KN
M	52593,75	KNm

FIGURA 44. TABLAS HIPÓTESIS PARA EL ARMADO DE LA PILONA

En el caso de la pila, al ser una sección en forma de T, se realizará el cálculo mediante un programa denominado CoSHA. Una vez analizadas las distintas combinaciones, se toma la combinación ELU7 al ser la más desfavorable. Con ella, se procederá a calcular el armado en el programa mencionado. Tras ello se obtiene que el armado necesario es el siguiente:

- 12 redondos de 40 mm en la parte inferior
- 26 redondos de 40 mm en la parte media
- 36 redondos de 40 en la parte superior

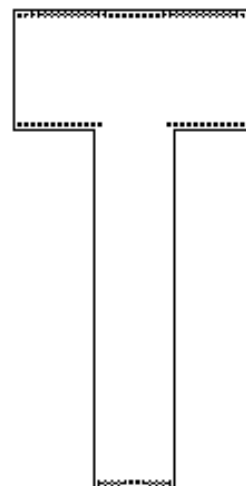


FIGURA 45. ARMADO DE LA PILONA

### Zapata de los cables de compensación

Al igual que en la pila, se adjuntan a continuación los esfuerzos obtenidos en los tres cables de compensación para las distintas hipótesis y que han sido posteriormente el objeto del cálculo.

N	-4911,16958	kN
V	2756,003836	kN
M	203,724386	kNm

FIGURA 46. ESFUERZOS EN LA ZAPATA DE LOS CABLES DE COMPENSACIÓN

Tras analizar los esfuerzos más desfavorables, hipótesis ELS 7, se ha dimensionado una zapata de 14x10x2m.

### Zapata de la pila

Los esfuerzos más desfavorables en la base de la pila se muestran en la tabla siguiente.

N	23825	kN
V	6242,855501	kN
M	139612,5	kNm

FIGURA 47. ESFUERZOS EN LA ZAPATA DE LA PILA

En este caso, dado que se trata de una zapata de borde en la que resulta difícil satisfacer las comprobaciones de estabilidad correspondientes a una zapata aislada, se ha dimensionado una zapata de 10x16x2 m, con tres filas de 8 pilotes cada una como se muestra en la figura (42).

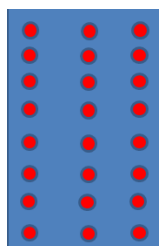


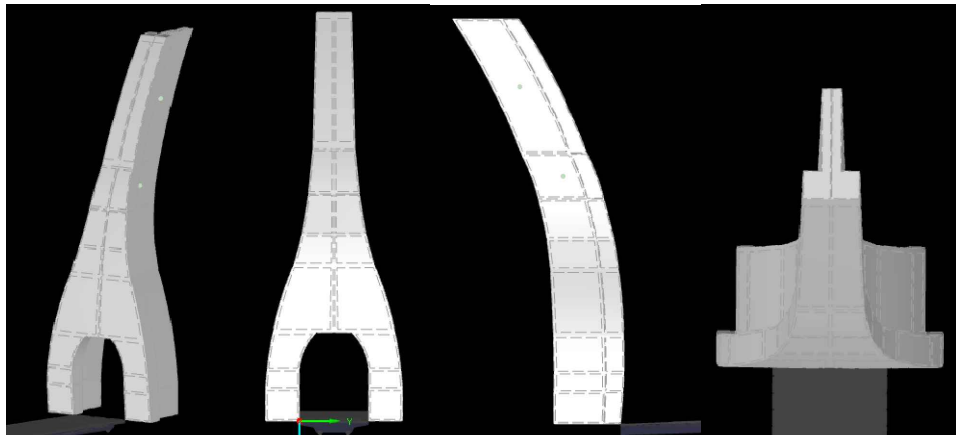
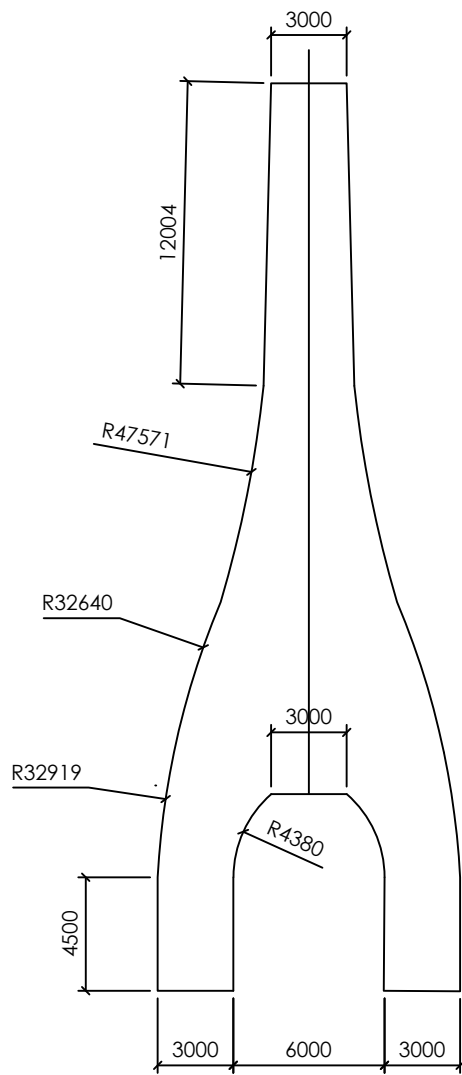
FIGURA 48. PILOTAJE DE LA ZAPATA

En estas condiciones los esfuerzos máximos en los pilotes son:


- Máxima compresión: 3507,49 kN
- Máximo cortante: 260,11 kN
- Mínima compresión: 855,4 kN

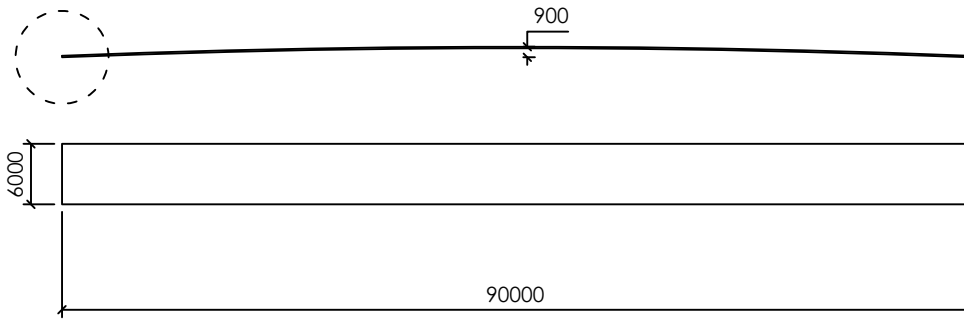
En ninguna de las hipótesis consideradas se produce tracción en los pilotes.

# PLANOS

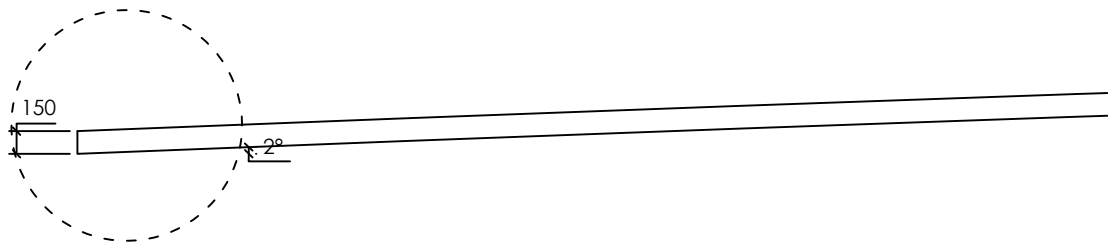


PILONA DE HORMIGÓN ARMADO (HA-30)

	Fecha	Nombre	Firma:	 <b>Universidad Zaragoza</b>
Dibujado	23/06/2021	SERGIO TESÁN TORRECILLA		
Comprobado				
Escala	Título	APOYOS METÁLICOS Y DE NEOPRENO ZUNCHADO		NIA 740398
1/300	Proyecto	DISEÑO Y CÁLCULO PASARELA PEATONAL		Curso 2020-2021
				Plano N° 1

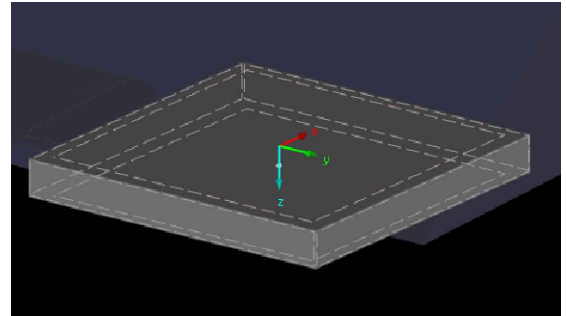
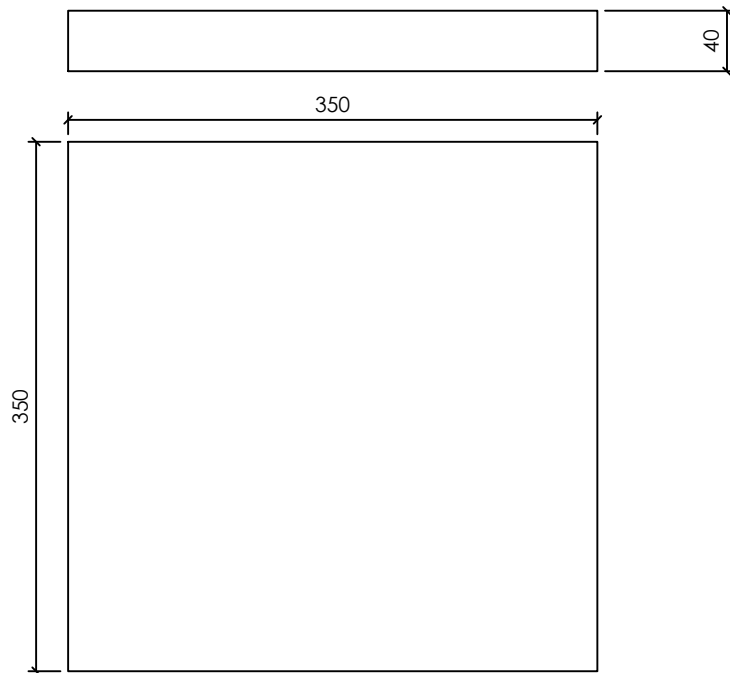


DETALLE A

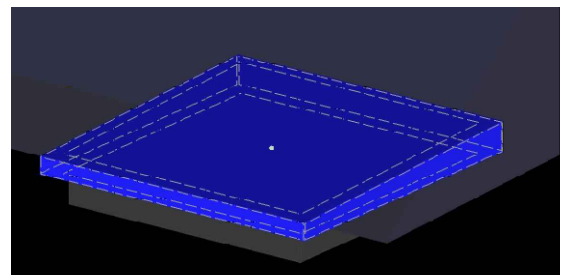
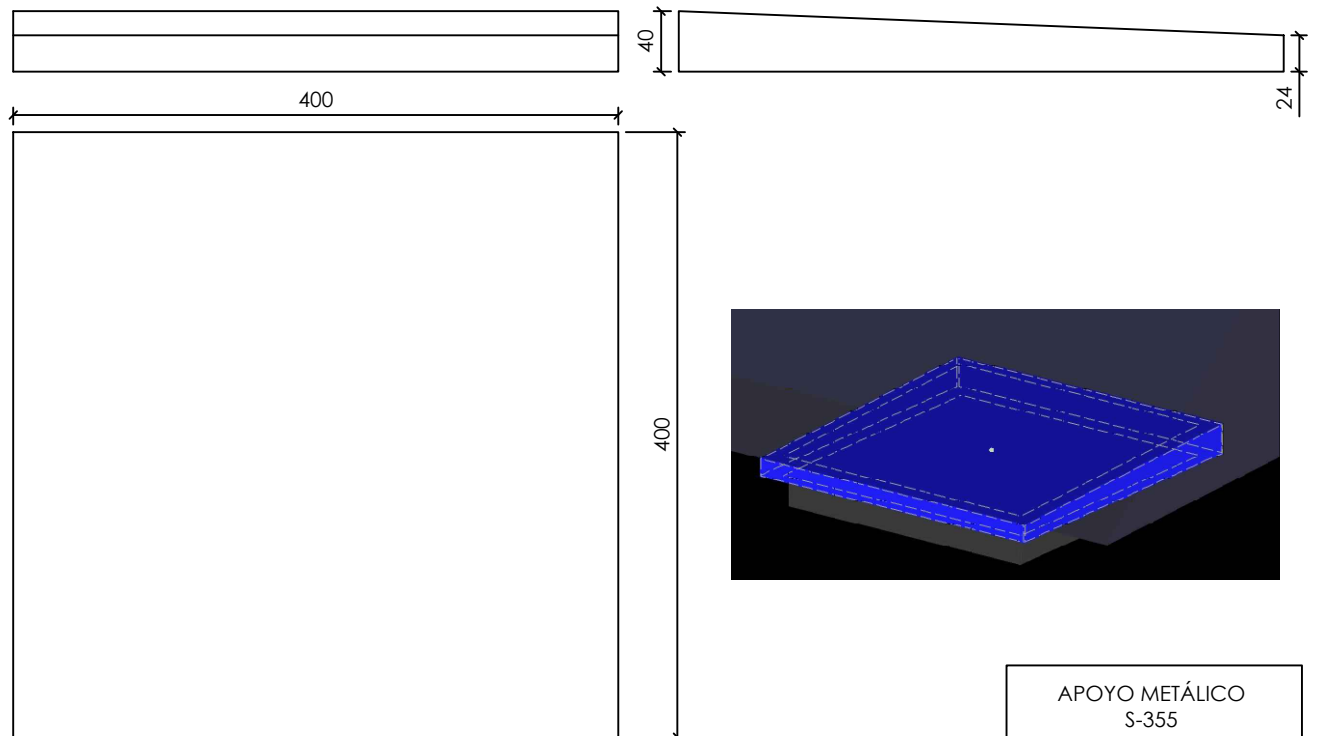


TABLERO DE HORMIGÓN ARMADO (HA-30)


	Fecha	Nombre	Firma:	 <b>Universidad Zaragoza</b>
Dibujado	23/06/2021	SERGIO TESÁN TORRECILLA		
Comprobado				
Escala	Título	TABLERO DE HORMIGÓN		NIA 740398
1/750	Proyecto	DISEÑO Y CÁLCULO PASARELA PEATONAL		Curso 2020-2021
				Plano N° 2



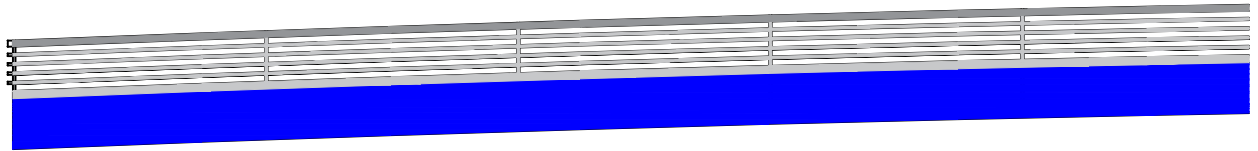
APOYO NEOPRENO  
ZUNCHADO



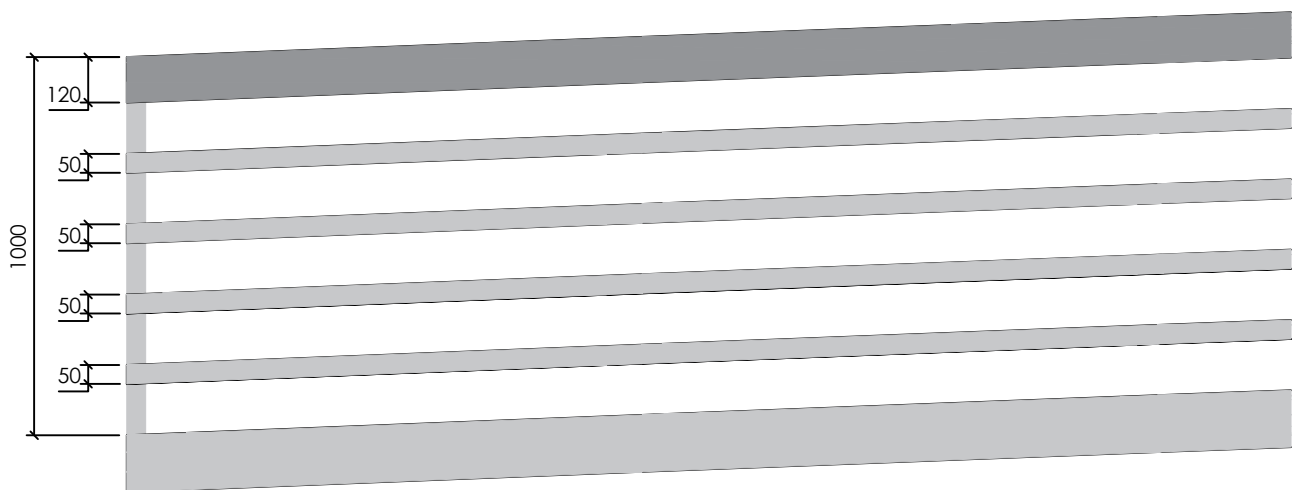
APOYO METÁLICO  
S-355

	Fecha	Nombre	Firma:	 <b>Universidad Zaragoza</b>
Dibujado	23/06/2021	SERGIO TESÁN TORRECILLA		
Comprobado				
Escala	Título	APOYOS METÁLICOS Y DE NEOPRENO ZUNCHADO		NIA 740398
1/300	Proyecto	DISEÑO Y CÁLCULO PASARELA PEATONAL		Curso 2020-2021
				Plano N° 3





ESCALA 1/150

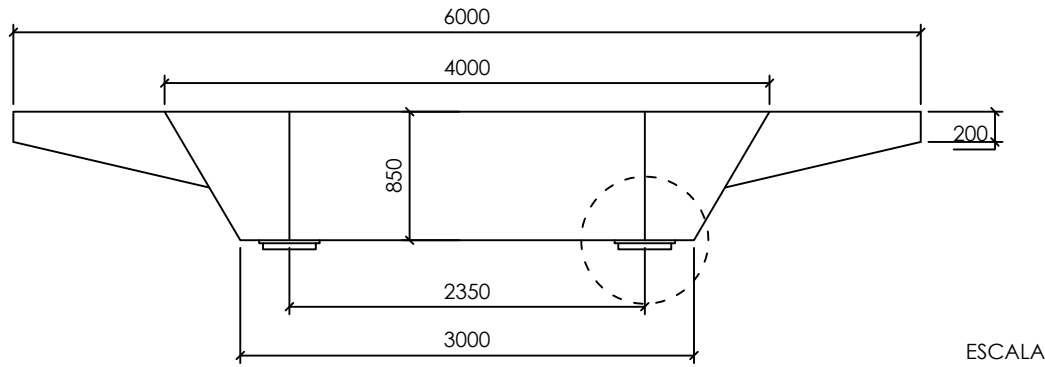


ESCALA 1/20

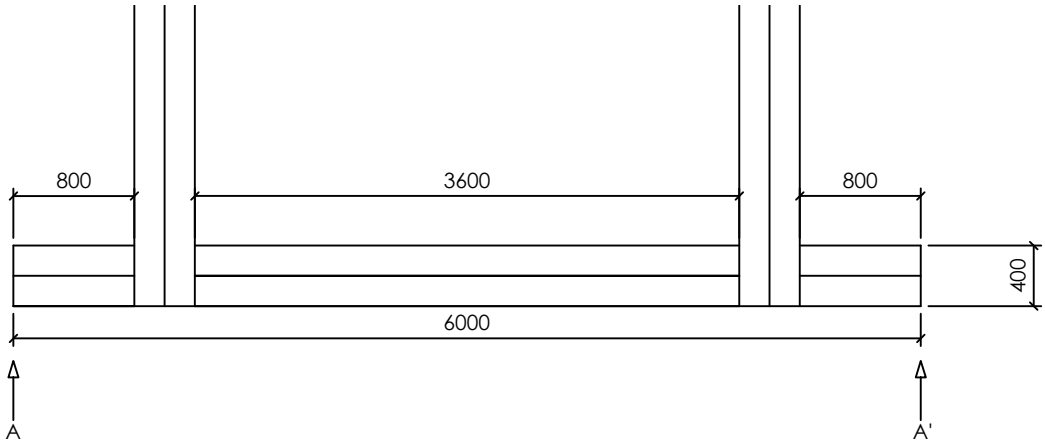
BARANDILLA  
METÁLICA

	Fecha	Nombre	Firma:	 <b>Universidad Zaragoza</b>
Dibujado	23/06/2021	SERGIO TESÁN TORRECILLA		
Comprobado				
Escala	Título	BARANDILLA METÁLICA		NIA 740398
VARIAS	Proyecto	DISEÑO Y CÁLCULO PASARELA PEATONAL		Curso 2020-2021
				Plano Nº 4

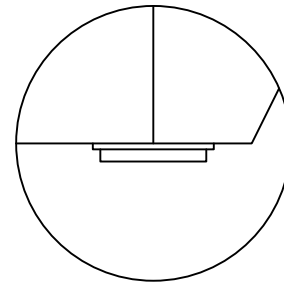
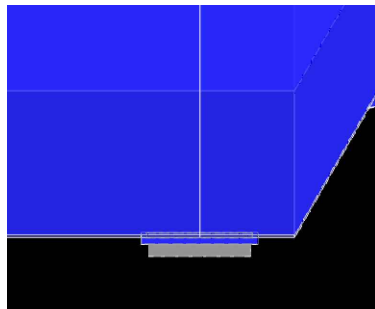
VISTA A-A'



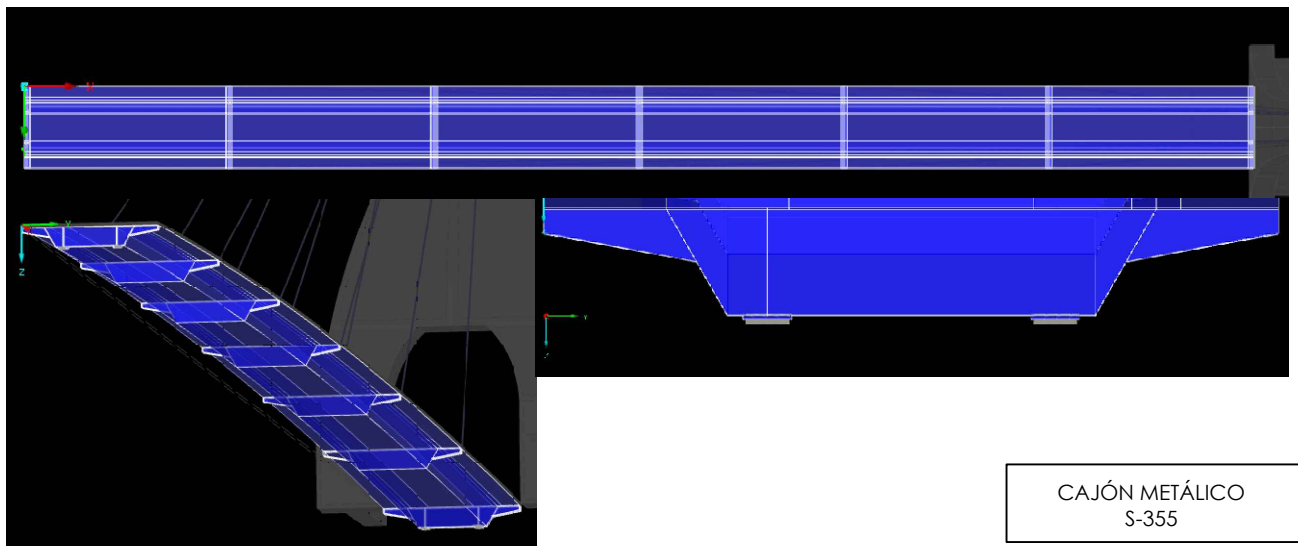
ESCALA 1/50



ESCALA 1/50



ESCALA 1/50



CAJÓN METÁLICO  
S-355

	Fecha	Nombre	Firma:	 <b>Universidad Zaragoza</b>
Dibujado	23/06/2021	SERGIO TESÁN TORRECILLA		
Comprobado				
Escala	Título	CAJÓN METÁLICO S-355		NIA 740398
VARIAS	Proyecto	DISEÑO Y CÁLCULO PASARELA PEATONAL		Curso 2020-2021
				Plano N° 5

## CONCLUSIONES

Tras mostrar el procedimiento seguido para el diseño y cálculo de la pasarela peatonal mediante elementos finitos, se llega a la conclusión tras reajustar el diseño de algún elemento, que el diseño y funcionamiento de todos y cada uno de los componentes de la pasarela es correcto. Todos ellos cumplen con la normativa como ha podido comprobarse a lo largo de los cálculos y por ello, al tener valores de tensiones y deformaciones inferiores a los admisibles, se podría llevar a cabo la materialización de este proyecto en la vida real.

A su vez, este proyecto me ha servido para mejorar mis cualidades como ingeniero. A través de él he podido aprender a manejar una normativa que no había utilizado previamente en la carrera como es la IAP-11. Además, me he enfrentado a un nuevo programa de elementos finitos que nunca había manejado, RFEM Dlubal, que me ayudará a afrontar nuevos retos en un futuro. Todo ello me ha permitido salir más reforzado de este grado y me ha ayudado a conocer que es lo que más me apasiona de lo visto durante estos años y aquello a lo que me gustaría dedicar mi futuro.

## BIBLIOGRAFIA

### Introducción

<https://www.areatecnologia.com/puentes.htm>

[https://es.wikipedia.org/wiki/Puente\\_en\\_arco](https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_en_arco)

[https://es.wikipedia.org/wiki/Puente\\_por\\_volados\\_sucesivos](https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_por_volados_sucesivos)

<https://blog.laminasyaceros.com/blog/evoluci%C3%B3n-de-los-materiales-en-la-construcci%C3%B3n-de-puentes>

<https://www.sinergia.tech/pasarelas-de-madera/>

### Normativa

[https://www.mitma.gob.es/recursos\\_mfom/0820303.pdf](https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/0820303.pdf)

<http://www.ponderosa.es/docs/Norma-EHE-08.pdf>

<http://www.carreteros.org/normativa/estructuras/eae/eae.pdf>

### Imágenes extraídas de internet

<https://www.20minutos.es/noticia/1515612/0/> (Figura 1)

<https://www.zaragoza.es/sede/portal/turismo/post/puente-de-piedra> (Figura 2)

<https://loqueveoenzaragoza.blogspot.com/2012/05/anillo-verde-sobre-el-ebro.html> (Figura 3)

[https://es.wikipedia.org/wiki/Azud\\_Manuel\\_Lorenzo\\_Pardo](https://es.wikipedia.org/wiki/Azud_Manuel_Lorenzo_Pardo) (Figura 4)

<https://www.getyourguide.es/puente-golden-gate-13624/> (Figura 5)

<https://www.tribunasalamanca.com/noticias/asi-va-a-ser-la-espectacular-pasarela-que-unira-tejares-y-huerta-otea/1568971807> (Figura 7)

<https://www.zaragoza.es/sede/portal/turismo/post/pasarela-del-voluntariado> (Figura 8)

<https://m.visittuscany.com/es/ideas/5-cosas-que-no-sabias-sobre-el-ponte-vecchio/> (Figura 9)

<https://eldiariocantabria.publico.es/articulo/cantabria/obras-pasarela-peatonal-y-ciclista-santander-y-camargo-comienzan-diciembre/20161118134622021757.html> (Figura 10)

<https://negocioyconstruccion.cl/item/pasarelas-peatonales-preansa/> (Figura 11)

<https://www.vidaeconomica.com/2020/09/malaga-pasarela-peatonal-mas-grande-europa/> (Figura 12)