

# Trabajo Fin de Grado

Diseño y análisis estructural de una pasarela  
peatonal de tablero suspendido y piso de  
forjado colaborante  
Design and structural analysis of pedestrian  
footbridge of suspended board and floor of  
forged collaborating

Autor

José Manuel Milián Fuentes

Director

Luis Gracia Villa



## **Resumen: Diseño y análisis estructural de pasarela peatonal de tablero suspendido y piso de forjado colaborante**

El objeto de este Trabajo Fin de Grado es el de diseñar y analizar estructuralmente una pasarela peatonal de tablero suspendido y piso de forjado colaborante.

Las pasarelas peatonales son un elemento cada vez más común en nuestras ciudades y vías de comunicación, pero la gran mayoría de ellas poseen un diseño más funcional que arquitectónico. Por ello, al diseñar esta pasarela se ha tenido en cuenta otorgarle un valor añadido a su diseño. El diseño de la pasarela es un homenaje a un arte tan presente e importante en Aragón como es el arte mudéjar, colocando en la parte central de la misma una estrella mudéjar.

En cuanto al cálculo estructural, se han dimensionado los diferentes perfiles metálicos de la estructura para que soportaran las tensiones y las deformaciones máximas calculadas con los parámetros e indicaciones que aparecen en el Código Técnico.

Una vez se consiguió la estructura definitiva, se analizó su comportamiento en relación a un incremento de temperatura, en relación a su estabilidad y a como le afectan los diferentes modos de vibración.

Los programas informáticos utilizados han sido SolidWorks para el diseño y DLUBAL RFEM para el cálculo estructural y los análisis de temperatura, estabilidad y vibración.

Una vez analizados todos los resultados, se han realizado los planos de la pasarela.



## Índice

|   |    |
|---|----|
| 1.OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO .....            | 6  |
| Motivación personal para realizar el proyecto ..... | 6  |
| 2.PASARELAS PEATONALES (TIPOLOGÍAS Y USOS).....     | 8  |
| 2.1. Material .....                                 | 8  |
| Madera: .....                                       | 8  |
| Metal: .....  | 9  |
| Piedra .....  | 10 |
| Hormigón.....                                       | 11 |
| Hormigón prefabricado:.....                         | 11 |
| Plástico y Fibras:.....                             | 12 |
| 2.2. Tipología estructural .....                    | 14 |
| Vigas y pórticos .....                              | 14 |
| Arcos:.....   | 16 |
| Atirantada: .....                                   | 17 |
| Colgante: .....                                     | 17 |
| 3.DISEÑO ESTRUCTURAL .....                          | 19 |
| 4.CALCULO ESTRUCTURAL .....                         | 22 |
| 5.RESULTADOS .....                                  | 33 |
| 5.1. Temperatura.....                               | 33 |
| 5.2. Estabilidad .....                              | 38 |
| 5.3. Vibraciones.....                               | 40 |
| 6.CONCLUSIONES .....                                | 46 |
| 7. BIBLIOGRAFIA .....                               | 48 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Pasarela de madera situada en Velilla del Río Carrión (Palencia), de 53 metros de longitud. ....   | 9  |
| Figura 2: Pasarela peatonal situada en la Rambla de Benipila, Cartagena (Murcia). Construida en 2011, posee una longitud de 182 metros. ....   | 10 |
| Figura 3: Puente de losas de Scorhill, en el Parque Nacional de Exmoor (Reino Unido). De origen medieval y todavía en uso, su construcción sobre un único pilar y con doble losa proporciona un paso muy útil sobre el río North Teign. ....   | 10 |
| Figura 4: Kiss bridge o puente del beso, situado en localidad alicantina de Pilar de la Horadada. Posee una longitud de 60 metros y una anchura de 2.5 metros. ....  | 11 |
| Figura 5: Pasarela situada en una autovía española. ....   | 12 |
| Figura 6: Pasarela de almuñecar. Forma parte de la actuación “Madrid Río Manzanares”, ubicada entre la M-30 y el puente de los franceses, en Madrid. La pasarela es una viga artesa en forma de U construida con un material composite reforzado con fibras, fibras de carbono con una matriz de resina polimérica. Posee una longitud de 43 metros, un ancho de 5 y un canto de 1,2. ....   | 13 |
| Figura 7. ....   | 14 |
| Figura 8 y 7: Puente Trencat, de uso peatonal situado entre los municipios barceloneses de Sant Celoni y Santa Maria de Palautordera. Construido en 1442 y destruido parcialmente en 1811 en el transcurso de las Guerras Napoleónicas, fue restaurado en 2003. La parte “nueva” esta construida con una viga cajón de 3.36 metros de ancho, soportada por un arco de 24 metros de luz. .... | 15 |
| Figura 9: Pasarela situada en Leganés (Madrid), con una longitud de 40 metros, 4 metros de anchura y 50 toneladas de peso. ....  | 16 |
| Figura 10: Pasarela de la Amistad, situada en Terrassa (Barcelona), cuenta con 56 metros de luz. ....  | 16 |
| Figura 11: Pasarela atirantada La Rosa (La Coruña). Posee un tablero metálico con planta oval, de 156 metros de desarrollo y una anchura de tablero de 3 metros. ....  | 17 |
| Figura 12: Pasarela colgante del Siegué, entre Aragón y Cataluña. ....   | 18 |
| Figura 13: Estrella Mudéjar. ....  | 19 |
| Figura 14: Idea original. Uno de los primeros bocetos realizados. ....   | 19 |
| Figura 15: Primera variación de la idea original. Se observa que la estructura queda más “limpia” que en la idea original, otorgando un mayor protagonismo a la estrella mudéjar central. En este momento se dan las primeras medidas de manera aproximada. ....   | 20 |
| Figura 16: Vista lateral de la pasarela en SolidWorks. En ella se puede observar el arco inferior, ya que las pasarelas no son totalmente planas, para dar más seguridad a los viandantes que transitan por las mismas. ....   | 20 |
| Figura 17: Vista tridimensional de la pasarela en SolidWorks. ....   | 21 |
| Figura 18: Boceto con los nodos de la estructura. ....   | 22 |
| Figura 19: Arco. ....  | 23 |
| Figura 20: Arcos y montantes. ....   | 23 |
| Figura 21: Croquis estrella. ....  | 24 |
| Figura 22: Detalle de la estrella mudéjar. ....  | 25 |
| Figura 23: Detalle de una mitad simétrica de la pasarela. ....   | 25 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 24: Detalle del arco, la estrella y la pasarela. ....  | 26 |
| Figura 25 y Figura 26: Explicación de la barandilla. ....   | 26 |
| Figura 27: Detalle de los travesaños superiores, en rojo. ....  | 27 |
| Figura 28: Vista general de la pasarela, con todos sus elementos. ....  | 27 |
| Figura 29: Primera aproximación. Como se puede observar, realice en primer lugar el arco superior de un grosor inferior al de los arcos inferiores. Posteriormente, se observará como este postulado inicial es completamente erróneo. ....   | 28 |
| Figura 30: Casos de carga existentes. ....  | 28 |
| Figura 31: En esta imagen observamos la estructura con los distintos tramos del arco superior coloreados. ....  | 28 |
| Figura 32: Combinaciones de casos de carga existentes para el cálculo de la resistencia. ....   | 29 |
| Figura 33: En esta imagen observamos la tensión obtenida y su distribución a lo largo de la estructura en la combinación de cargas CO10. En ella observamos que los valores maximos aparecen en los puntos de unión de la estructura con sus apoyos, siendo el valor maximo de tensión von mises obtenido en esta combinación 31.55 KN/cm <sup>2</sup> . ....   | 30 |
| Figura 34: En esta imagen observamos la tensión obtenida y su distribución a lo largo de la estructura en la combinación de cargas CO9. En ella observamos que los valores maximos aparecen, al igual que en el caso anterior, en los puntos de unión de la estructura con sus apoyos, siendo el valor maximo de tensión von mises obtenido en esta combinación 32,71 KN/cm <sup>2</sup> . Este valor es el más restrictivo de los analizados, pero no alcanza el maximo valor teorico calculado anteriormente (33,809 KN/cm <sup>2</sup> ), por lo tanto cumple los requisitos. .... | 30 |
| Figura 35: Combinaciones de casos de carga existentes para el cálculo de la flecha máxima. ...  | 30 |
| Figura 36: En esta imagen se muestra la flecha obtenida tras el estudio de la combinación de cargas CO17. La flecha resultante es 75,7 mm. ....   | 31 |
| Figura 37: En esta imagen, al igual que la anterior, se expone el comportamiento que presenta la estructura al aplicar la combinación de cargas CO18, obteniendo como resultado una flecha de 77.7 mm. ....   | 31 |
| Figura 38: vista de la pasarela en perspectiva. ....  | 32 |
| Figura 39: vista frontal de la pasarela. ....   | 32 |
| Figura 40: En esta captura del programa DLUBAL RFEM se muestra la incorporación de la variable temperatura de las superficies al modelo, para su posterior estudio. ....  | 33 |
| Figura 41: En esta captura del programa DLUBAL RFEM se muestra la incorporación de la variable temperatura, aplicada como una carga uniforme a cada una de las barras del modelo, para estudiar posteriormente su impacto. ....   | 34 |
| Figura 42: En esta figura se muestra la deformación que sufre la estructura debido a la temperatura. ....   | 35 |
| Figura 43: En esta figura, observamos la deformación obtenida al estudiar el efecto de la temperatura en los elementos puramente estructurales de la pasarela. ....   | 35 |
| Figura 44: vista superior del comportamiento de la pasarela tras someterla a un incremento de temperatura. ....   | 36 |
| Figura 45: un taco de neopreno en un puente. ....   | 37 |
| Figura 46: Representación gráfica del análisis de estabilidad CO11, concretamente de su vector propio número 1. ....  | 38 |
| Figura 47: Tabla resumen con los 10 vectores propios para pandeo que hemos calculado, con sus correspondientes factores de carga critica y coeficientes de amplificación. ....  | 39 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 48: Representación gráfica del análisis de estabilidad CO10, concretamente de su vector propio número 1. ....   | 39 |
| Figura 49: Tabla resumen con los 10 vectores propios para pandeo que hemos calculado, con sus correspondientes factores de carga crítica y coeficientes de amplificación. .... | 40 |
| Figura 50: Representación gráfica de las vibraciones naturales de la pasarela peatonal. ....   | 40 |
| Figura 51: Representación gráfica de la deformada del modo 2 del caso de vibraciones número 1. ....  | 41 |
| Figura 52: Leyenda con los valores de deformación que causa el caso de vibraciones número 1. ....  | 42 |
| Figura 53: Representación gráfica de la deformada del modo 1 del caso de vibraciones número 2. ....  | 42 |
| Figura 54: Leyenda con los valores de deformación que causa el caso de vibraciones número 2. ....  | 43 |
| Figura 55: Representación gráfica de la deformada del modo 2 del caso de vibraciones número 3. ....  | 43 |
| Figura 56: Leyenda con los valores de deformación que causa el caso de vibraciones número 3. ....  | 44 |
| Figura 57: Representación gráfica de la deformada del modo 1 del caso de vibraciones número 4. ....  | 44 |
| Figura 58: Leyenda con los valores de deformación que causa el caso de vibraciones número 4. ....  | 45 |



## 1.OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

El presente trabajo tiene por objetivo diseñar y analizar estructuralmente una pasarela peatonal de tipología estructural de tablero suspendido, con una estructura portante de arcos metálicos convergentes y tablero metálico con forjado colaborante apoyado sobre travesaños tubulares.

Para ello, se han debido de abordar problemas tales como; la optimización del diseño de la estructura con perfiles de diversos grosores hasta obtener los adecuados, la aplicación y la verificación de los requisitos de las normativas IAP-11, (Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera) o la UNE-ENV 1991-2-4, ACCIONES EN ESTRUCTURAS.ACCIONES DEL VIENTO. Posteriormente, se realizó un análisis estático, térmico y de vibraciones de la misma para garantizar que la estructura cumple la normativa y garantizar el correcto comportamiento de la misma en el uso para el cual ha sido diseñada. Estos análisis son expuestos en sus correspondientes apartados.

Los pasos que hemos seguido en el transcurso del proyecto hasta llegar a la conclusión son los siguientes:

En primer lugar, se ha diseñado conceptualmente la pasarela, definiendo las dimensiones globales.

En segundo lugar, se ha generado un modelo tridimensional con un programa de elementos finitos para su posterior análisis.

En tercer lugar, se ha realizado un análisis estructural estático frente a las cargas de funcionamiento, con el fin de ajustar el dimensionado de los diferentes perfiles.

En cuarto lugar, se ha verificado la estabilidad estructural con un análisis de pandeo local y global.

Por último, se han verificado las frecuencias naturales de vibración.

Para concluir este apartado, el alcance del proyecto será determinar mediante el estudio de los resultados obtenidos en los diferentes análisis realizados si la pasarela diseñada es apta para su uso, o en cambio el diseño propuesto no es el mas idóneo para la utilización prevista.

### Motivación personal para realizar el proyecto

Los motivos por los cuales decidí realizar este Trabajo Fin de Grado han sido variados. Desde siempre, cuando he viajado me ha gustado ir fijándome en todas las diversas estructuras, tales como puentes, túneles, presas, etc.. que me encontraba en mi camino y pensar como habían sido diseñadas y construidas. También, al visitar ciudades he



comprobado que unos de los elementos más icónicos de las mismas suelen ser los puentes, como puede ser en el caso de Zaragoza el Puente de Piedra o en el caso de Lisboa, los puentes Vasco de Gama y el 25 de Abril, debido a su espectacularidad y belleza.

Otro de los motivos por los cuales decidí realizar este proyecto es la posibilidad de aplicar un amplio rango de los conocimientos adquiridos durante el transcurso del grado, tales como los que conciernen a asignaturas como estructuras, resistencia de materiales, ingeniería de materiales, dibujo técnico o tecnologías de la construcción, entre muchas otras.



## 2.PASARELAS PEATONALES (TIPOLOGÍAS Y USOS)

Se puede definir una pasarela peatonal como “una estructura que permite el paso de peatones sobre cuerpos de agua, vías de tráfico o valles en las montañas. Los hay estáticos y móviles (que se pliegan, giran o elevan). Los tamaños son muy diversos desde unos pocos metros hasta cientos de metros. Debido a la poca carga para la que están concebidas y a la limitada longitud que han de atravesar, el diseño de las mismas puede ser muy diverso”<sup>1</sup>. Existen diversos tipos de pasarelas en base al material con el cual están construidas (Epígrafe 2.1) y su tipología estructural (Epígrafe 2.2).

### 2.1. Material

Este tipo de estructuras, debido a que se suelen construir sobre vías de comunicación ya existentes o sobre cauces fluviales de diversa índole, suelen realizarse con prefabricados metálicos, de hormigón o de madera, de forma que su colocación in situ se produce de una forma rápida e interfiriendo lo menos posible en el tráfico rodado de dichas vías de comunicación. Además de su rápida ejecución, las estructuras realizadas en taller poseen la ventaja de controlar mejor su calidad, evitando contratiempos futuros.

Los materiales tradicionalmente utilizados en la construcción de pasarelas peatonales son el hormigón, la madera y el acero, aunque en la actualidad se está experimentando su construcción en materiales tan novedosos como los materiales compuestos por fibras como la de carbono, la de vidrio u otras insertadas en matrices configuradas por una resina.

A continuación, exponemos las diversas cualidades de dichos materiales:

Madera:

Podemos definir madera como “un material compuesto natural, que está formado por una disposición compleja de moléculas de celulosa, en forma de cadenas helicoidales, reforzadas por una sustancia polimérica, llamada lignina, que actúa como adhesivo manteniendo unidas a las cadenas moleculares”<sup>2</sup>. En uso estructural, de las diversas propiedades que posee la madera, la más importante es su comportamiento a flexión. Para comprobar si la madera tiene las propiedades óptimas, se debe de realizar un ensayo de flexión. Otras dos propiedades importantes para soportar cargas son la compresión y las propiedades de cizallamiento.

La madera es el material de construcción con más amplio uso y la construcción de pasarelas peatonales no es una excepción. Se pueden fabricar pasarelas peatonales con madera encolada de pino o de abeto, las cuales normalmente van destinadas a parques o

---

<sup>1</sup> Wikipedia. Puente peatonal

<sup>2</sup> Ingeniería de materiales para industria y construcción. Pág. 460.

áreas naturales (Figura 1) para reducir el impacto paisajístico, además de que permite conseguir un ambiente muy acogedor a sus usuarios.



Figura 1: Pasarela de madera situada en Velilla del Río Carrión (Palencia), de 53 metros de longitud.

#### Metal:

El material más empleado en la construcción de pasarelas por sus cualidades y su versatilidad es el metal, concretamente el acero estructural. Los aceros estructurales se utilizan en la construcción de naves industriales, puentes, torres eléctricas, estructuras de edificios o incluso material ferroviario y naval. Sus características son un porcentaje de carbono entre el 0,1 y el 0,7, de manganeso, entre el 0,35 y el 0,80, de silicio, entre el 0,1 y el 0,3 e inferiores al 0,1 en el caso del fósforo y del azufre. Una de sus ventajas es que permite salvar grandes luces sin necesidad de columnas intermedias, tal y como podemos observar en la figura 2, donde salva un barranco de grandes dimensiones.



Figura 2: Pasarela peatonal situada en la Rambla de Benipila, Cartagena (Murcia). Construida en 2011, posee una longitud de 182 metros.

### Piedra

La piedra como material de construcción ha sido utilizada desde la antigüedad y su uso ha perdurado hasta la actualidad. Se trata de un material natural, que una vez extraída, es trabajada para darle la forma que necesite en su uso posterior. En comparación con otros materiales, la piedra produce un impacto ambiental reducido, requiere de un menor mantenimiento y su vida útil es mucho mayor debido a su alta durabilidad.



Figura 3: Puente de losas de Scorhill, en el Parque Nacional de Exmoor (Reino Unido). De origen medieval y todavía en uso, su construcción sobre un único pilar y con doble losa proporciona un paso muy útil sobre el río North Teign.

## Hormigón

Podemos definir Hormigón “como un material compuesto, de naturaleza cerámica, formado por un material de tipo tosco (llamado agregado), encajado en una dura matriz de una pasta hecha con cemento y agua (llamada aglutinante)”<sup>3</sup>, en la cual el aglutinante actúa como pegamento para unirlo.

Es uno de los materiales más utilizados en ingeniería en la construcción de estructuras. Una de sus mayores ventajas es su flexibilidad, es decir, que puede ser moldeado fácilmente en una amplia variedad de formas, texturas y colores, tal y como podemos observar en la figura 4. Sus principales características son una baja resistencia a la tracción, una alta resistencia a la compresión y poca ductilidad. Todas ellas deben ser tenidas en cuenta a la hora de construir las pasarelas.



Figura 4: Kiss bridge o puente del beso, situado en localidad alicantina de Pilar de la Horadada. Posee una longitud de 60 metros y una anchura de 2.5 metros.

## Hormigón prefabricado:

Definimos como hormigón prefabricado o pretensado “a la tecnología de construcción de elementos estructurales de hormigón sometidos intencionalmente a esfuerzos de compresión previos a su puesta en servicio. Dichos esfuerzos se consiguen mediante barras, alambres o cables de acero que son tensados y anclados al hormigón.”<sup>4</sup>

<sup>3</sup> Ingeniería de materiales para industria y construcción. Pág. 453.

<sup>4</sup> Wikipedia. Hormigón pretensado

Este tipo de construcción es cada vez más utilizado en la construcción de pasarelas peatonales y en todo tipo de estructuras industriales debido a sus grandes ventajas tales como una mayor resistencia que el hormigón tradicional a los esfuerzos de tracción, durabilidad de la construcción, ya que al realizarse en un taller permite realizar unos controles de calidad estrictos, evitando defectos a la larga perjudiciales para la estructura, la posibilidad de salvar grandes luces debido a la longitud de sus piezas, tal y como observamos en la figura 5, permitiendo cruzar autopistas y vías férreas de una manera sencilla, además de su bajo coste de mantenimiento y la rapidez de su montaje, lo que minimiza las afecciones durante su construcción.



*Figura 5: Pasarela situada en una autovía española.*

#### Plástico y Fibras:

Las pasarelas construidas con plástico, tanto de primer uso como reciclado son muy novedosas y de reciente implantación. Algunas de sus características son que no necesitan mantenimiento, son sostenibles, duraderas y fáciles de limpiar. Poseen una vida útil de 50 años y no necesitan ser repintadas. Además, comparados con la madera, son más seguros porque el material no astilla y tiene mejores propiedades antirresvalones que la madera.

También se construyen pasarelas realizadas con materiales compuestos por fibras de gran resistencia tales como la fibra de carbono, la de vidrio y de aramida. La aramida se caracteriza por poseer una tensión de rotura de entre siete y diez veces superior a la del acero, además de ser estable a las variaciones de temperatura. La fibra de vidrio se caracteriza por ser resistente a la corrosión, una elevada resistencia y una alta temperatura de fusión. Por último, las principales características de la fibra de carbono son gran resistencia y rigidez. En la figura 6 podemos observar una pasarela realizada con fibra de carbono.



Figura 6: Pasarela de almuñecar. Forma parte de la actuación “Madrid Río Manzanares”, ubicada entre la M-30 y el puente de los franceses, en Madrid. La pasarela es una viga artesa en forma de U construida con un material composite reforzado con fibras, fibras de carbono con una matriz de resina polimérica. Posee una longitud de 43 metros, un ancho de 5 y un canto de 1,2.

## 2.2. Tipología estructural

A la hora de diseñar una pasarela peatonal, al igual que en el resto de los puentes, existe la posibilidad de aplicar una gran variedad de soluciones estructurales tales como tableros tipo viga, arcos, pórticos, atirantados y colgantes. En multitud de ocasiones, el uso de una tipología u otra se debe a la necesidad de alcanzar unas determinadas dimensiones y al diseño que poseen, ya que suelen ser estructuras a las cuales se les otorga una función simbólica, para embellecer el lugar donde se colocan, más que una función puramente útil y racional. A continuación, se exponen los tipos de pasarelas en base a su estructura:

### Vigas y pórticos

La viga, en sus diferentes tipos, es un elemento muy usado debido a su simplicidad. En cuanto a su uso en pasarelas, nos las encontramos en estructuras constituidas por una sola viga en forma de U. De este modo, disminuimos su canto aparente al utilizar una sección transversal de la viga y aprovechamos sus brazos laterales para barandillas del tablero, otorgando un aspecto moderno y minimalista. Un ejemplo de esto último lo podemos observar en la figura 7.



Figura 7



Figura 8 y 7: Puente Trencat, de uso peatonal situado entre los municipios barceloneses de Sant Celoni y Santa Maria de Palautordera. Construido en 1442 y destruido parcialmente en 1811 en el transcurso de las Guerras Napoleónicas, fue restaurado en 2003. La parte “nueva” está construida con una viga cajón de 3.36 metros de ancho, soportada por un arco de 24 metros de luz.

En el caso de que la viga se empotre en las pilas que la sostienen, constituirá un pórtico, tal y como podemos observar en la figura 9.





Figura 9: Pasarela situada en Leganés (Madrid), con una longitud de 40 metros, 4 metros de anchura y 50 toneladas de peso.

#### Arcos:

Es una buena solución constructiva cuando el obstáculo a salvar, ya sea una carretera, un cauce fluvial (Figura 10, donde se atraviesa una rambla) o cualquier otro elemento se encuentre en un plano inferior al vial de los usuarios. Se pueden usar escaleras o rampas para alcanzar el lugar de donde parte el arco. Si la pasarela posee un arco muy rebajado, se puede aprovechar este para el tránsito de los usuarios, al igual que se hacía en los puentes medievales.



Figura 10: Pasarela de la Amistad, situada en Terrassa (Barcelona), cuenta con 56 metros de luz.

Atirantada:

Con este método constructivo se pueden conseguir, combinando de manera diferente el tablero, los mástiles y los cables, estructuras más variadas que las tradicionales (como muestra la figura 11, donde vemos un tablero suspendido con forma ovalada), otorgando una sensación de ligereza y unicidad.



Figura 11: Pasarela atirantada La Rosa (La Coruña). Posee un tablero metálico con planta oval, de 156 metros de desarrollo y una anchura de tablero de 3 metros.

Colgante:

Los puentes colgantes se remontan cientos de años para atrás. Diferentes culturas presentes en los rincones más remotos del planeta los han empleado, tales como los puentes tibetanos, que consisten en tres cables suspendido formando una “V”, en el que cable inferior sirve para caminar y los dos superiores hacen la función de una barandilla, o los Incas en América del Sur que realizaron puentes como el qeshuachaca (*Q'ichwachaka* en quechua), construido con fibras vegetales.

En la actualidad, en esta categoría se engloban dos tipos de pasarelas colgantes, las que poseen las bandas tesas, confluyendo en un único elemento el cable y el tablero y las tradicionales, que tienen el tablero suspendido de un cable en catenaria. Una de sus grandes ventajas es el poco material empleado en su construcción (cables de acero), con el ahorro económico que ello supone.

Una de las aplicaciones más utilizadas hoy en día para este tipo de pasarelas es la de uso turístico en el senderismo y en el montañismo, tal y como podemos observar en la figura 12.

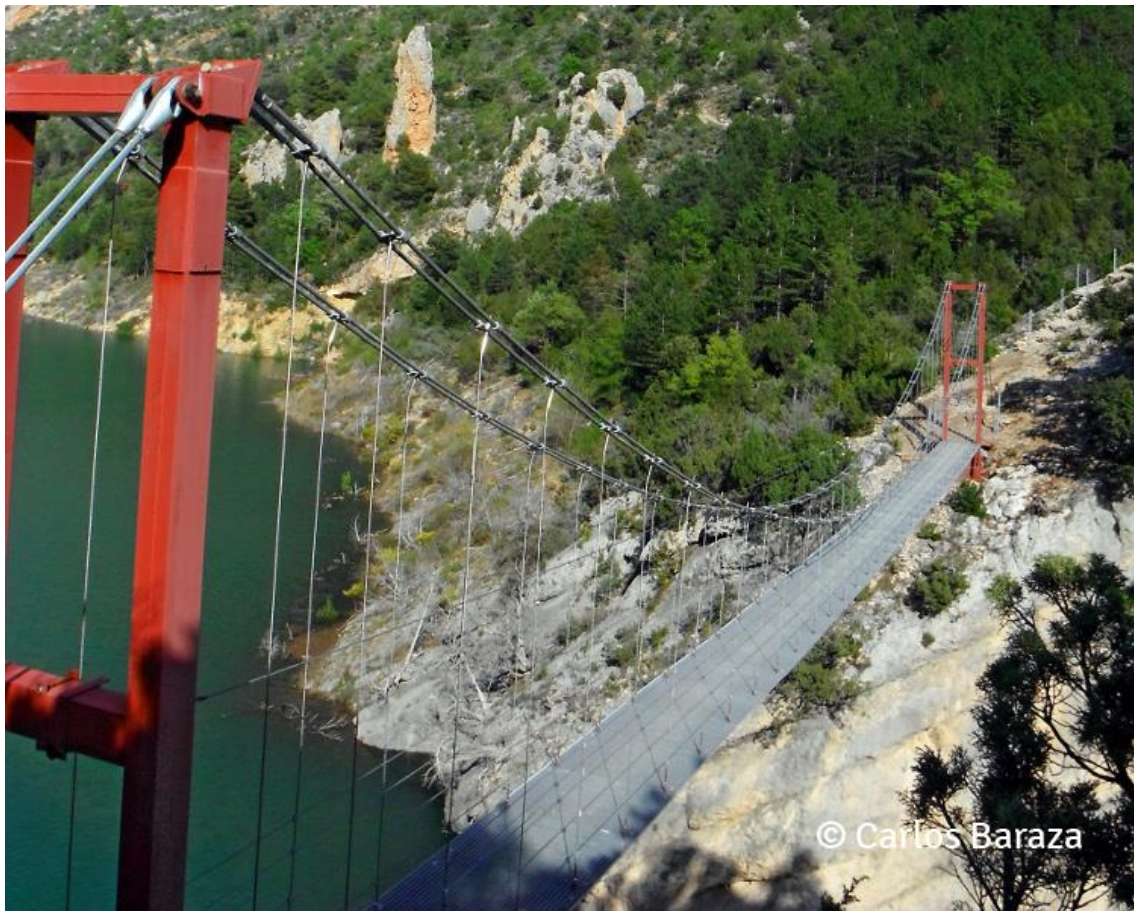


Figura 12: Pasarela colgante del Siegué, entre Aragón y Cataluña.

### 3.DISEÑO ESTRUCTURAL

El diseño estructural de la pasarela es el primer paso que hay que abordar para construir esta estructura. En primer lugar, para decidir el diseño estructural de la pasarela, se realizó un minucioso trabajo de indagación en el que se revisó un amplio abanico de diseños y posibles materiales de construcción.

Con el fin de conseguir un toque diferencial al común de las pasarelas peatonales, se incluyó en el diseño de la estructura un símbolo aragonés como es la estrella mudéjar. El arte mudéjar es parte de nuestra historia aragonesa, por lo que se ha querido rendir un pequeño homenaje a este tipo de arte arquitectónico, la cual es considerada por la UNESCO Patrimonio de la Humanidad.



Figura 13: Estrella Mudéjar

“El desarrollo en el siglo XII del arte Mudéjar en Aragón es consecuencia de las condiciones políticas, sociales y culturales particulares que prevalecieron en España después del Reconquista. Este arte, influido por la tradición islámica, refleja también los varios estilos europeos contemporáneos, particularmente el gótico. Presente hasta el inicio del siglo XVII, está caracterizado por un uso extremadamente refinado e inventivo del ladrillo y de azulejos esmaltados en arquitectura, especialmente en los campanarios de iglesias.”

[Declaración del Mudéjar Aragonés en la página oficial de la UNESCO.<sup>5</sup>](#)

A partir de esta idea inicial de incorporar en el diseño de la pasarela la estrella mudéjar, se procedió a realizar un primer boceto en papel (Figura 14), sin incorporar medidas ni cualquier otro elemento técnico.

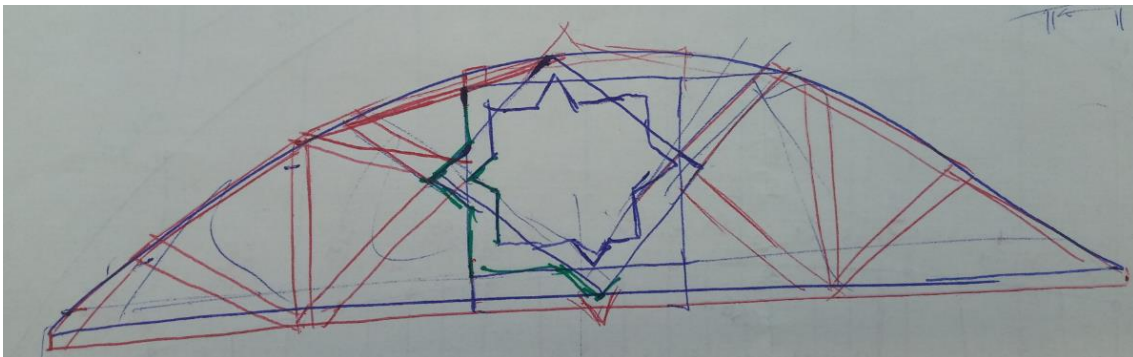


Figura 14: Idea original. Uno de los primeros bocetos realizados.

---

<sup>5</sup> Wikipedia. Arte Mudejar

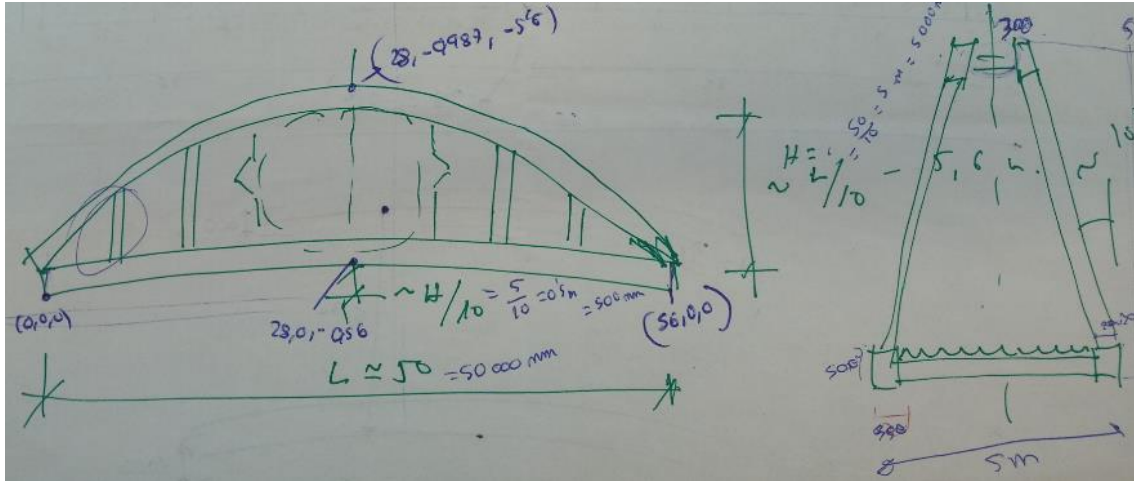


Figura 15: Primera variación de la idea original. Se observa que la estructura queda más “limpia” que en la idea original, otorgando un mayor protagonismo a la estrella mudéjar central. En este momento se dan las primeras medidas de manera aproximada.

Una vez realizado el primer boceto, se asignaron unas primeras medidas reales de la pasarela y se realizaron una serie de mejoras del diseño original. Dichas mejoras consistieron en arquear el cordón inferior de la pasarela, para otorgar al futuro usuario una sensación mayor seguridad y la de eliminar todas las diagonales presentes en el boceto inicial, para otorgar una mayor luminosidad a la pasarela y incrementar su sensación de ligereza. Podemos contrastar el cambio comparando las figuras 14 y 15.

Tras realizar los primeros diseños en papel, se procedió a su diseño en un programa de CAD. En este caso, se utilizó el programa SolidWorks, debido a que es un programa que nos permite dibujar en 3D (Figura 17) y con ello, hacernos una idea bastante certera a como resultaría nuestra estructura en la vida real (Figura 16). Además, este programa nos permite, si lo deseamos, incorporar propiedades de los distintos materiales que utilizaremos en su construcción.

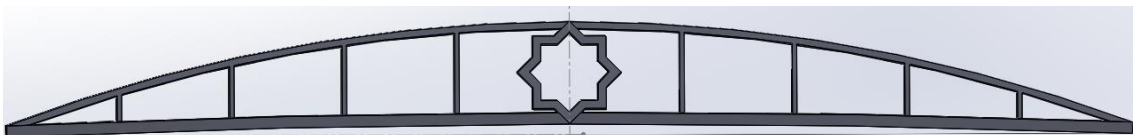


Figura 16: Vista lateral de la pasarela en SolidWorks. En ella se puede observar el arco inferior, ya que las pasarelas no son totalmente planas, para dar más seguridad a los viandantes que transitan por las mismas.

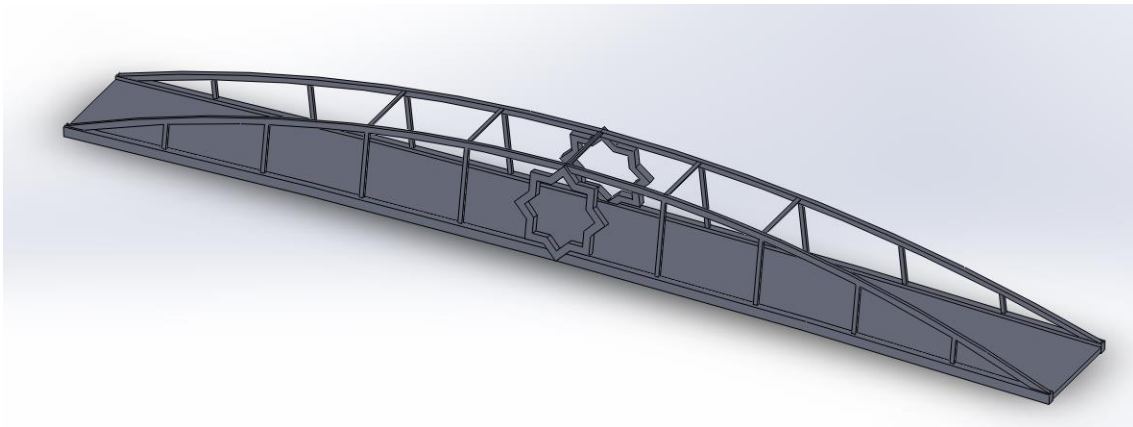


Figura 17: Vista tridimensional de la pasarela en SolidWorks.

## 4.CALCULO ESTRUCTURAL

Tras realizar una simulación de la estructura únicamente de carácter estético en SolidWorks, se procedió a modelizar la pasarela en el programa de Elementos Finitos Dlubal RFEM.

RFEM es un programa de análisis por elementos finitos que permite modelar, calcular y dimensionar modelos estructurales 2D y 3D compuestos de elementos tipo barra, placas, muros, laminas y sólidos.

En primer lugar, antes de crear el diseño en RFEM, se dibujó nuevamente la estructura en papel con las medidas definitivas, tal y como muestra la figura 18.

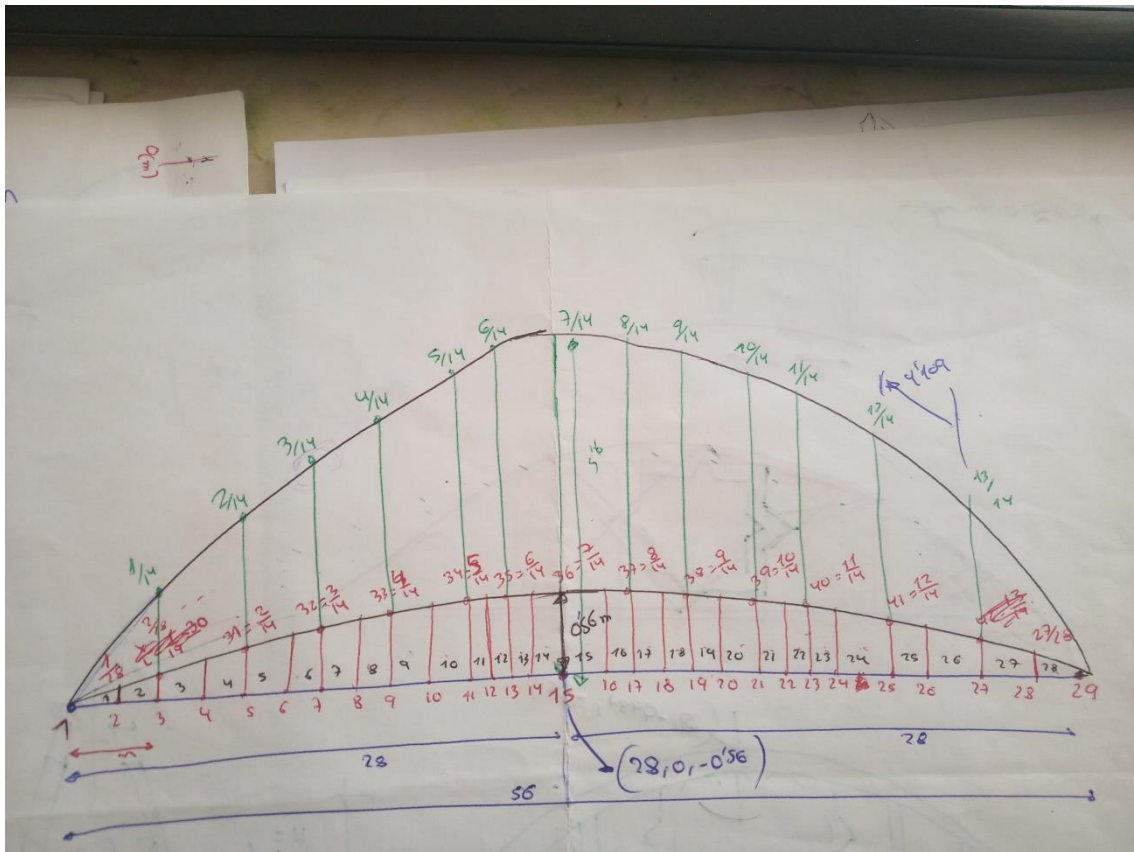


Figura 18: Boceto con los nodos de la estructura

Una vez conocidas las medidas definitivas, se inició la construcción de la pasarela en RFEM.

En primer lugar, se insertó el nudo inicial, final y central del arco inferior. Este posee una flecha de 0.56 m., la cual se calcula a partir de la siguiente formula:

$$\text{Flecha arco inferior} = \frac{H}{10} = \frac{5.6}{10} = 0.56 \text{ m}$$

Una vez insertados los nodos, se procede a dibujar el arco con la herramienta arco por tres nudos, obteniendo el siguiente resultado:

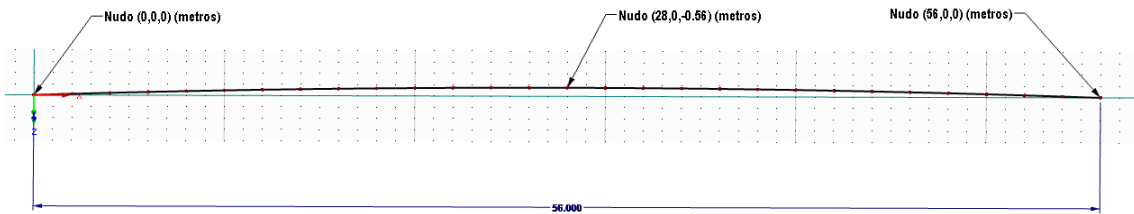


Figura 19: Arco

A continuación, se divide la barra en 28 tramos, que coincide con el número de travesaños necesarios para sostener el suelo de la pasarela. La distancia entre ellos es de 2 metros, con un montante cada 4 metros.

Una vez dibujado el arco inferior y dividido en 28 tramos, se procede a realizar el arco superior. La altura de este arco en su punto central se corresponde con la décima parte de su longitud total.

$$\text{Altura arco superior (H)} = \frac{L}{10} = \frac{56}{10} = 5.6 \text{ m}$$

En la construcción de este arco, hay que considerar que tenemos posee una inclinación de 10 grados respecto a la vertical. Este arco estará dividido en 14 tramos en los cuales se colocarán los montantes, exceptuando el tramo central donde ira la estrella mudéjar (Figura 20).

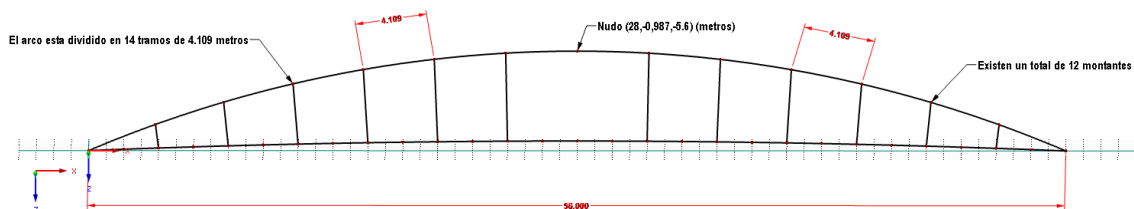


Figura 20: Arcos y montantes

Después de dibujar los arcos y los montantes, diseñamos el detalle central y hecho diferencial de esta estructura metálica respecto a otras, la estrella mudéjar. Antes de



comenzar su diseño definitivo en el ordenador, procedí a su dibujo en papel, realizando el siguiente croquis:

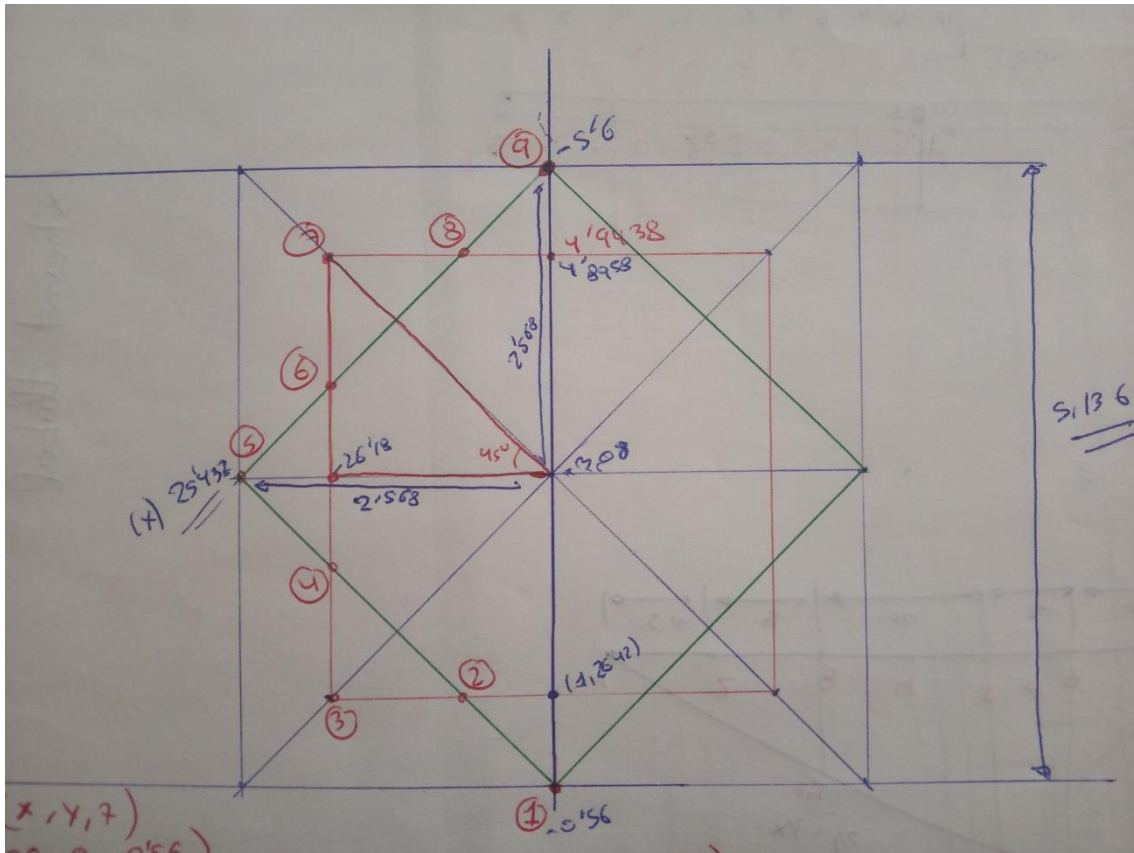



Figura 21: Croquis estrella

Una vez tuve totalmente claro el dibujo definitivo, comencé su dibujo en RFEM. Al ser un diseño simétrico, solamente dibujé una parte. Para dibujar la otra, apliqué la herramienta de simetría .

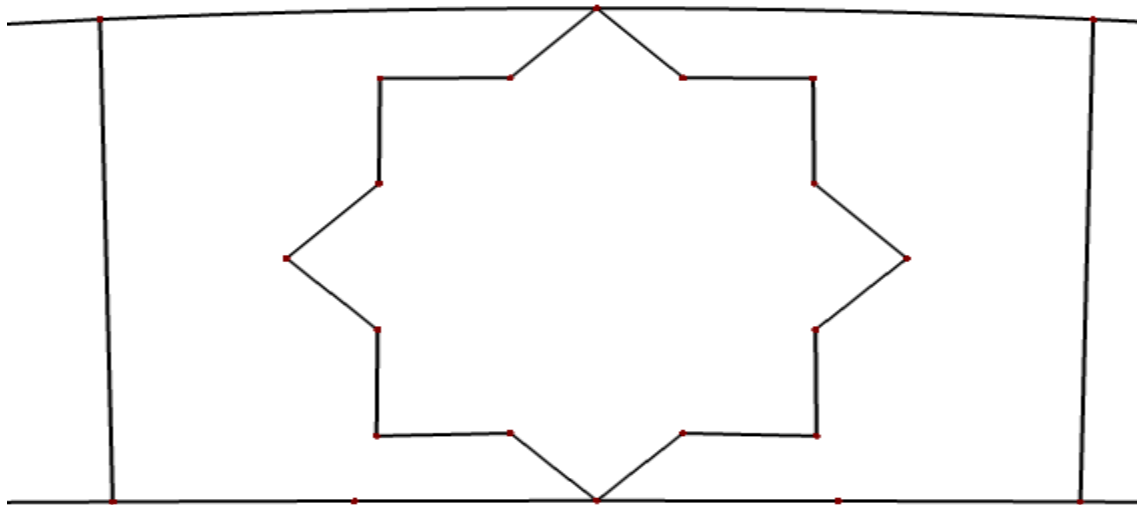


Figura 22: Detalle de la estrella mudéjar

Una vez incorporada la estrella (Figura 22), tenemos completado la vista lateral de la pasarela. Para poder hacer simetría como hemos hecho anteriormente, pero esta vez con toda la estructura, dibujamos los travesaños (Figura 23).

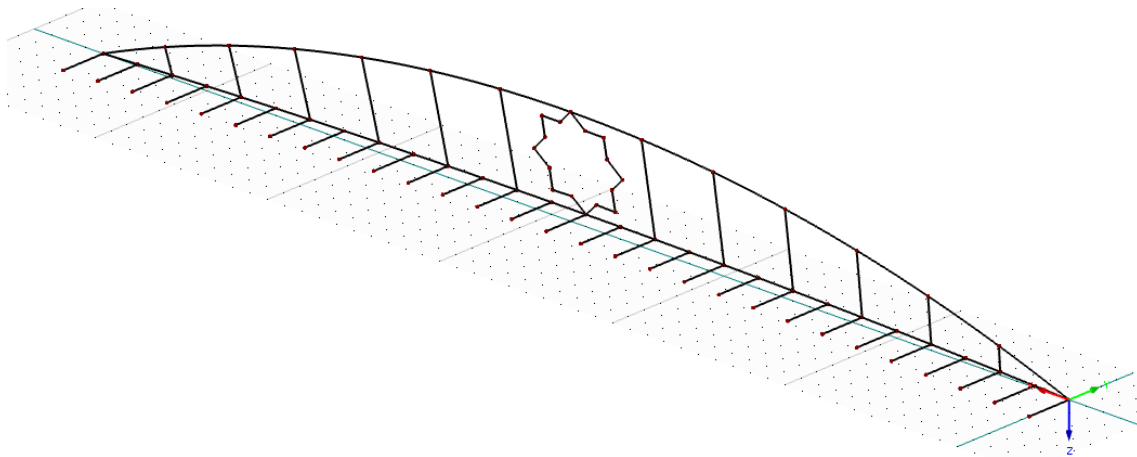


Figura 23: Detalle de una mitad simétrica de la pasarela.

Estos tendrán una longitud de 3,175 metros, que al realizar la simetría se convierten en 6,35 metros de anchura.

Por último, antes de realizar la simetría, realizamos la barandilla.

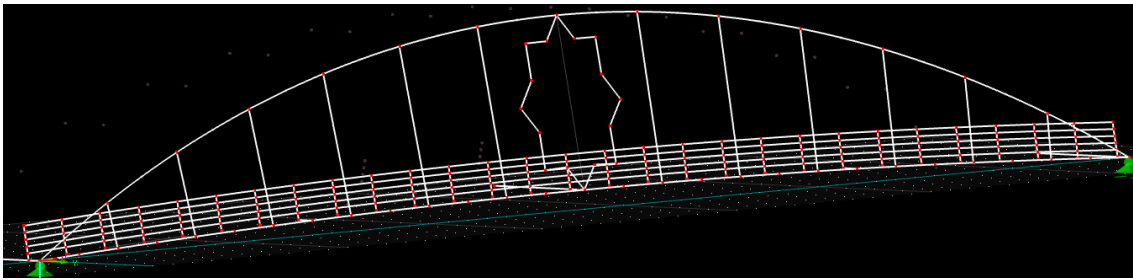


Figura 24: Detalle del arco, la estrella y la pasarela.

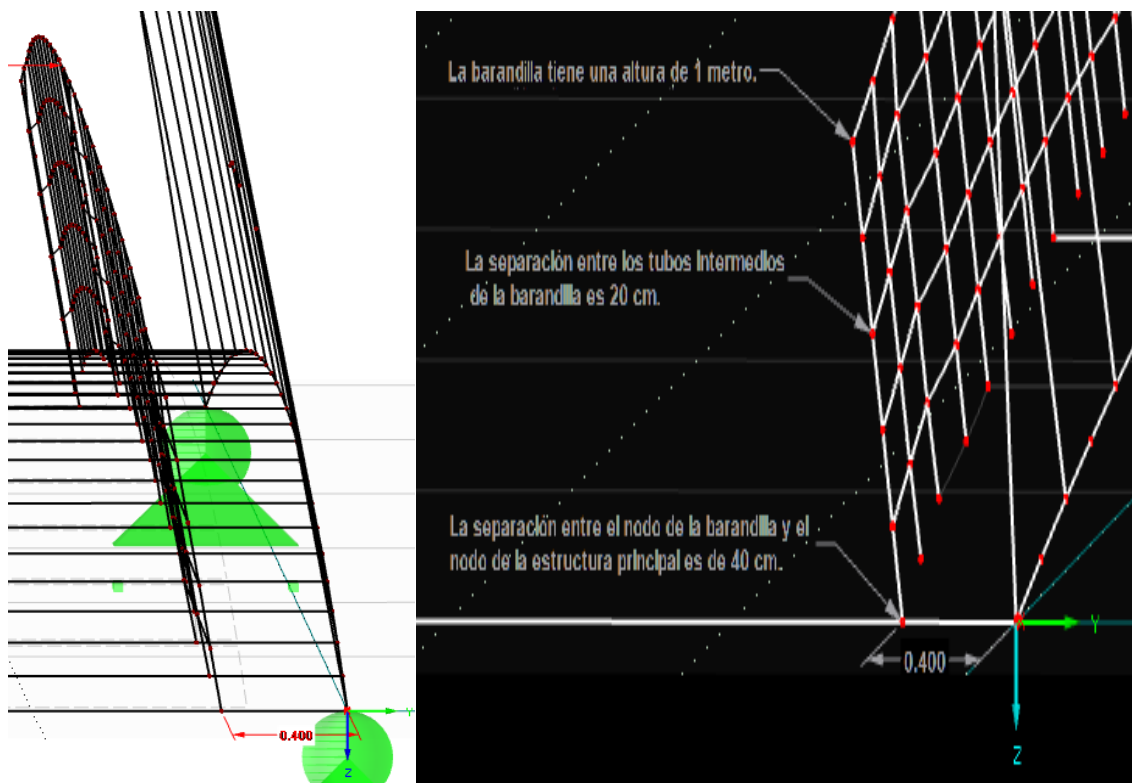


Figura 25 y Figura 26: Explicación de la barandilla.

Una vez realizada la pasarela y la simetría solamente faltan los travesaños (Figura 27) que unen los dos arcos superiores para obtener el diseño definitivo.

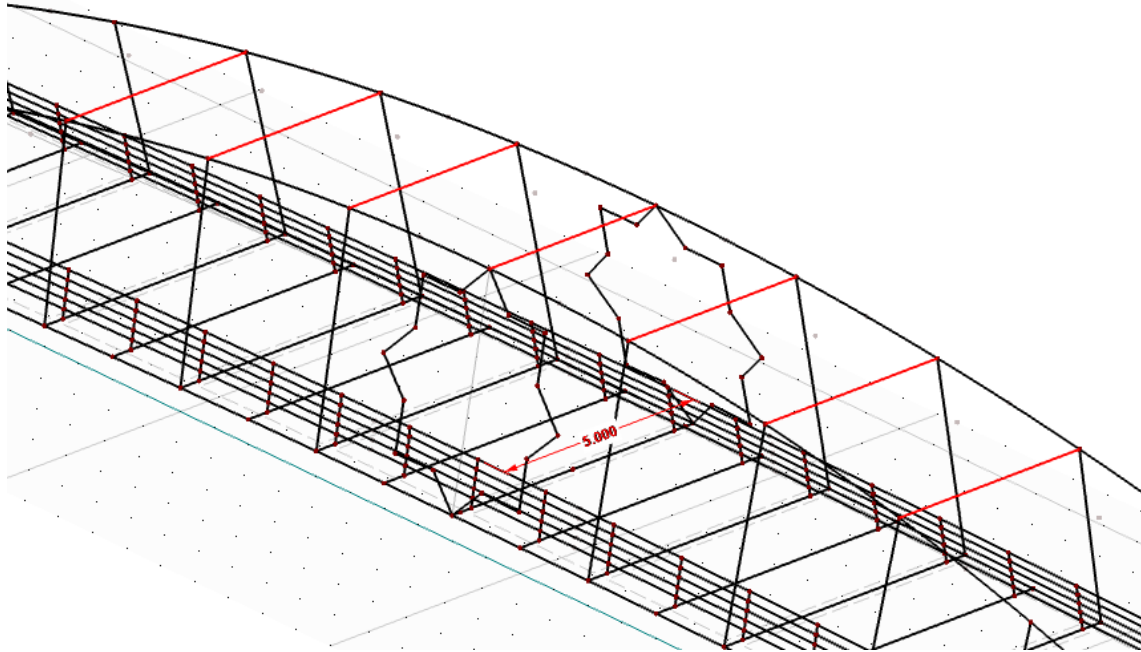


Figura 27: Detalle de los travesaños superiores, en rojo.

Con esto tendríamos la pasarela finalizada, tal y como vemos en la figura 28:

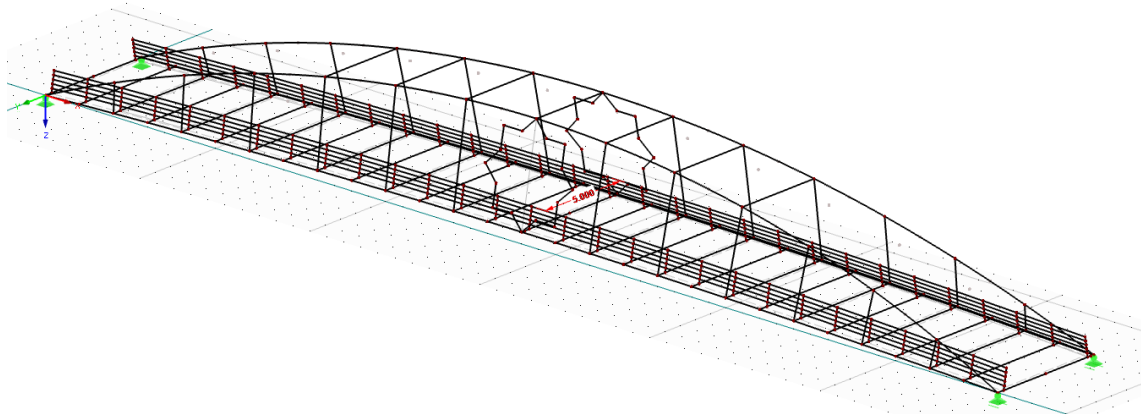


Figura 28: Vista general de la pasarela, con todos sus elementos.

Tras dibujar la pasarela en RFEM, se procede a dimensionar los perfiles. En primer lugar, se dimensionan los perfiles de una manera arbitraria para poder observar el aspecto exterior de la pasarela.

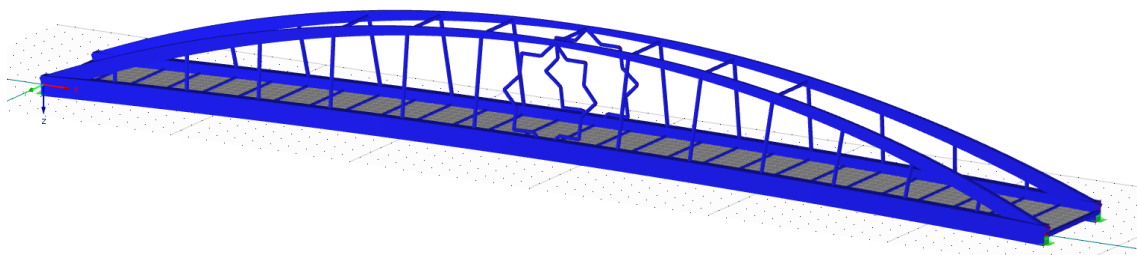


Figura 29: Primera aproximación. Como se puede observar, realice en primer lugar el arco superior de un grosor inferior al de los arcos inferiores. Posteriormente, se observará como este postulado inicial es completamente erróneo.

A continuación, se procede al cálculo de las distintas cargas que tiene que soportar la estructura. Estas se pueden agrupar en:

- Peso Propio,
- Carga Permanente,
- Sobrecarga de Uso y
- Viento.

| Casos de carga existentes |     |  |
|---------------------------|-----|--|
| G                         | CC1 | Peso Propio                              |
| G                         | CC2 | Focos Iluminación                        |
| G                         | CC3 | Barandilla                               |
| gr3                       | CC4 | Sobrecarga de uso-COMPLETA               |
| gr3                       | CC5 | Sobrecarga de uso-MITAD                  |
| gr3                       | CC6 | Sobrecarga de uso-1 CUARTO               |
| gr3                       | CC7 | Sobrecarga de uso-2 CUARTO               |
| gr2                       | CC8 | Sob. de uso-F. Horiz. Longitudinal-Eje 1 |
| Qw                        | CC9 | Empuje viento                            |

Figura 30: Casos de carga existentes.

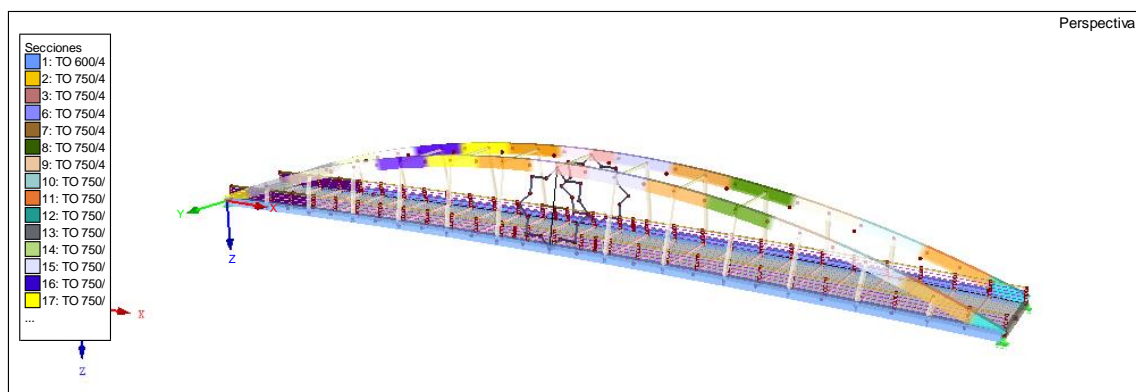


Figura 31: En esta imagen observamos la estructura con los distintos tramos del arco superior coloreados.

La carga CC3 (figura 30), correspondiente a la barandilla se incorporó en un principio, ya que no estaba dibujada físicamente la barandilla. Con su incorporación al modelo, esta carga queda incorporada en el peso propio.

Una vez incorporadas las cargas por separado a la estructura, se procede a realizar las distintas combinaciones de cargas para analizar la resistencia de la estructura y redimensionar los perfiles para que cumpla los requerimientos establecidos.

Existen dos combinaciones de cargas:

En el primer grupo, las cargas se combinan con los coeficientes de mayoración de las mismas para calcular la resistencia.

| Combinaciones de carga existentes |   |
|-----------------------------------|---|
| CO1                               | 1.35*CC1 + 1.35*CC2                                 |
| CO2                               | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.5*CC4                       |
| CO3                               | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.5*CC5                       |
| CO4                               | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.5*CC6 + 1.5*CC7             |
| CO5                               | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.5*CC9                       |
| CO6                               | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.5*CC4 + 0.9*CC9             |
| CO7                               | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.5*CC5 + 0.9*CC9             |
| CO8                               | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.5*CC6 + 1.5*CC7 + 0.9*CC9   |
| CO9                               | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.05*CC4 + 1.5*CC9            |
| CO10                              | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.05*CC5 + 1.5*CC9            |
| CO11                              | 1.35*CC1 + 1.35*CC2 + 1.05*CC6 + 1.05*CC7 + 1.5*CC9 |

Figura 32: Combinaciones de casos de carga existentes para el cálculo de la resistencia.

La resistencia la calculamos mediante el método de la tensión Von mises máxima

$$\sigma_{\text{Von mises máx}} < \sigma_{\text{adm}}$$

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{fy}{\gamma_M} = \frac{355}{1.05} = 338,095 \frac{N}{mm^2} * \frac{1KN}{1000N} * \frac{100mm^2}{1cm^2} = 33,809 \frac{KN}{cm^2}$$

Una vez analizadas todas las situaciones, se determinó que los dos casos más desfavorables son las combinaciones de cargas CO9 y CO10.

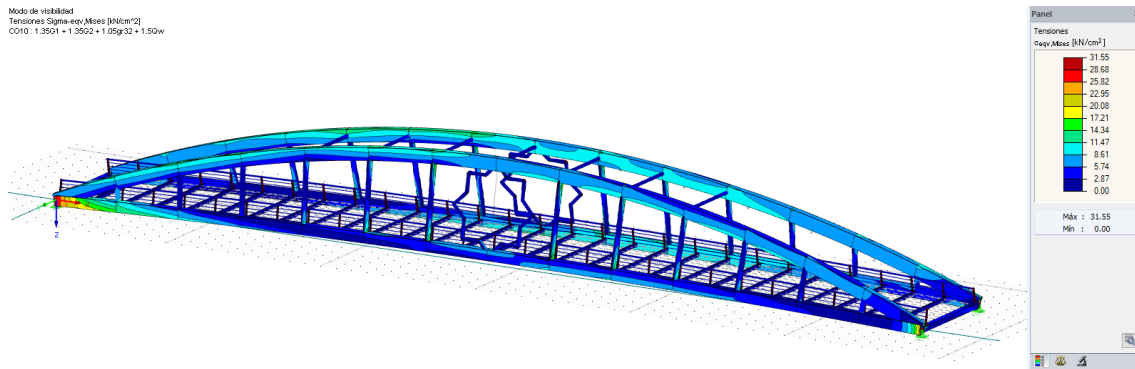


Figura 33: En esta imagen observamos la tensión obtenida y su distribución a lo largo de la estructura en la combinación de cargas CO10. En ella observamos que los valores maximos aparecen en los puntos de unión de la estructura con sus apoyos, siendo el valor maximo de tensión von mises obtenido en esta combinación 31.55 KN/cm2.

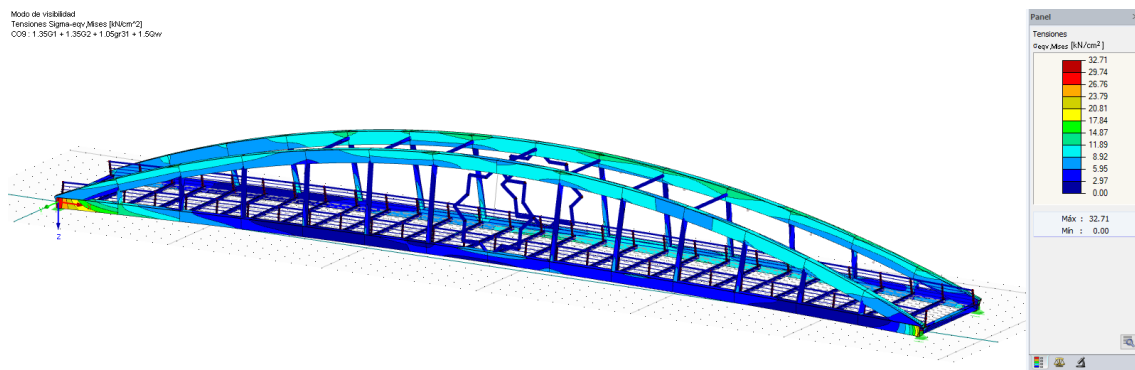


Figura 34: En esta imagen observamos la tensión obtenida y su distribución a lo largo de la estructura en la combinación de cargas CO9. En ella observamos que los valores maximos aparecen, al igual que en el caso anterior, en los puntos de unión de la estructura con sus apoyos, siendo el valor maximo de tensión von mises obtenido en esta combinación 32,71 KN/cm2. Este valor es el más restrictivo de los analizados, pero no alcanza el maximo valor teorico calculado anteriormente (33,809 KN/cm2), por lo tanto cumple los requisitos.

En este segundo grupo, las cargas no se multiplican ni por un coeficiente de mayoración ni por uno de minoración, ya que se busca establecer que la flecha máxima no supere un valor establecido.

|      |                             |
|------|-----------------------------|
| CO12 | CC1 + CC2                   |
| CO13 | CC1 + CC2 + CC4             |
| CO14 | CC1 + CC2 + CC5             |
| CO15 | CC1 + CC2 + CC6 + CC7       |
| CO16 | CC1 + CC2 + CC9             |
| CO17 | CC1 + CC2 + CC4 + CC9       |
| CO18 | CC1 + CC2 + CC5 + CC9       |
| CO19 | CC1 + CC2 + CC6 + CC7 + CC9 |

Figura 35: Combinaciones de casos de carga existentes para el cálculo de la flecha máxima.

En este caso, la flecha vertical máxima correspondiente al valor frecuente de la sobrecarga de uso no podrá superar el siguiente valor:

$$\frac{L}{750} = \frac{56}{750} = 0.0746 \text{ m} = 74.66 \text{ mm}$$

Una vez analizadas todas las situaciones, se determina que los dos casos más desfavorables son las combinaciones de cargas CO18 y CO17.

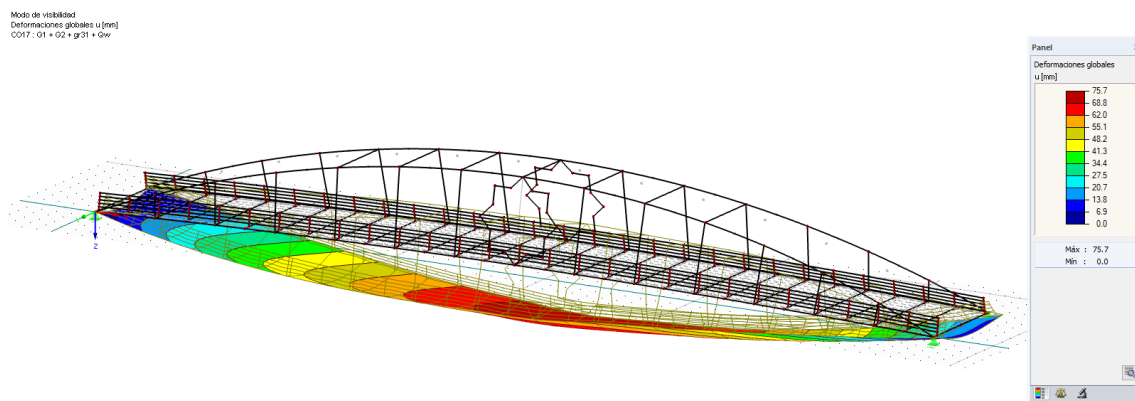


Figura 36: En esta imagen se muestra la flecha obtenida tras el estudio de la combinación de cargas CO17. La flecha resultante es 75,7 mm.

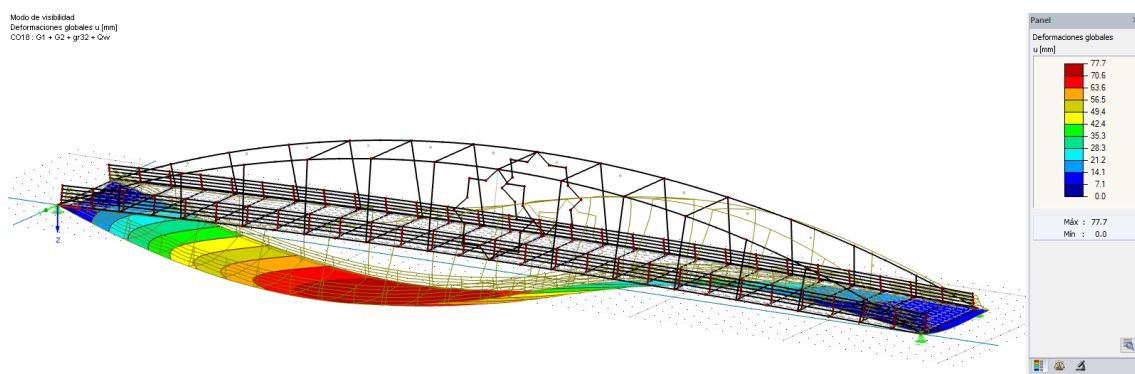


Figura 37: En esta imagen, al igual que la anterior, se expone el comportamiento que presenta la estructura al aplicar la combinación de cargas CO18, obteniendo como resultado una flecha de 77.7 mm.

Como se puede observar, ambas situaciones exceden del límite de la flecha máxima calculada anteriormente (caso CO18, con 77,7 mm de flecha y caso CO17, con 75,7 mm). Estos datos son aceptados debido a que tal y como se demostrara en apartados posteriores, las deformaciones estáticas y el nivel de vibraciones del tablero se mantienen dentro de los valores admisibles.



Una vez analizados los casos más desfavorables de ambos grupos y comprobado que nuestra estructura cumple, se obtienen los perfiles definitivos.

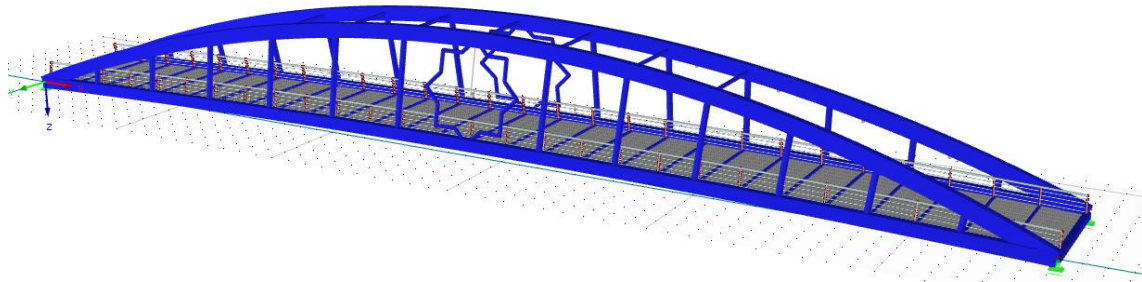


Figura 38: vista de la pasarela en perspectiva

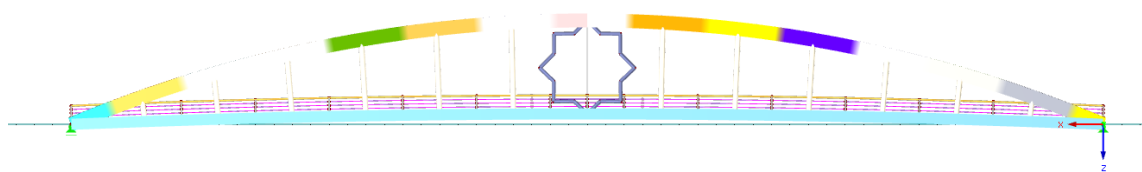


Figura 39: vista frontal de la pasarela.

## 5.RESULTADOS

### 5.1. Temperatura

En este epígrafe se analiza cómo afectan las acciones térmicas a la pasarela, en concreto, como varían las deformaciones con un incremento de 40 grados de centígrados de temperatura.

Para ello, se incorpora al modelo, tanto en el caso de las superficies como en el de las barras, una temperatura uniforme de 40° C.

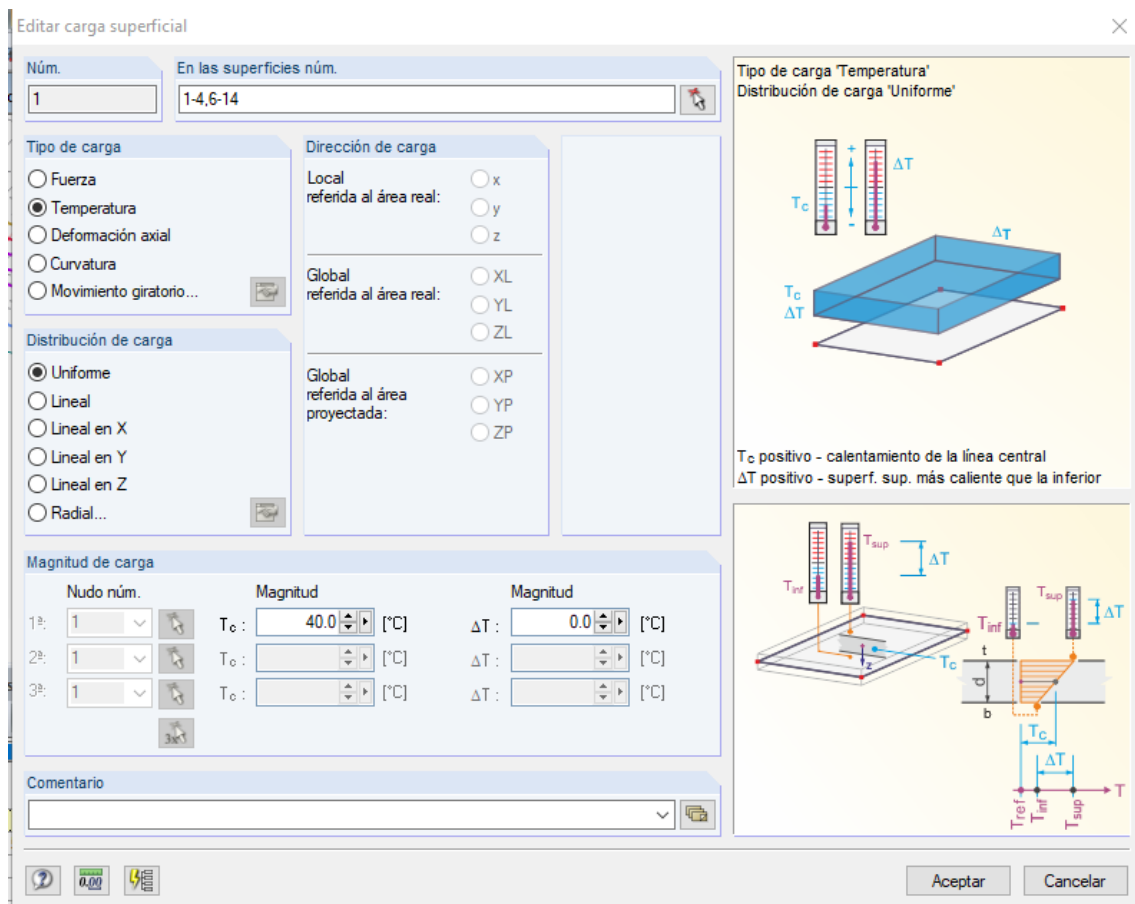


Figura 40: En esta captura del programa DLUBAL RFEM se muestra la incorporación de la variable temperatura de las superficies al modelo, para su posterior estudio.

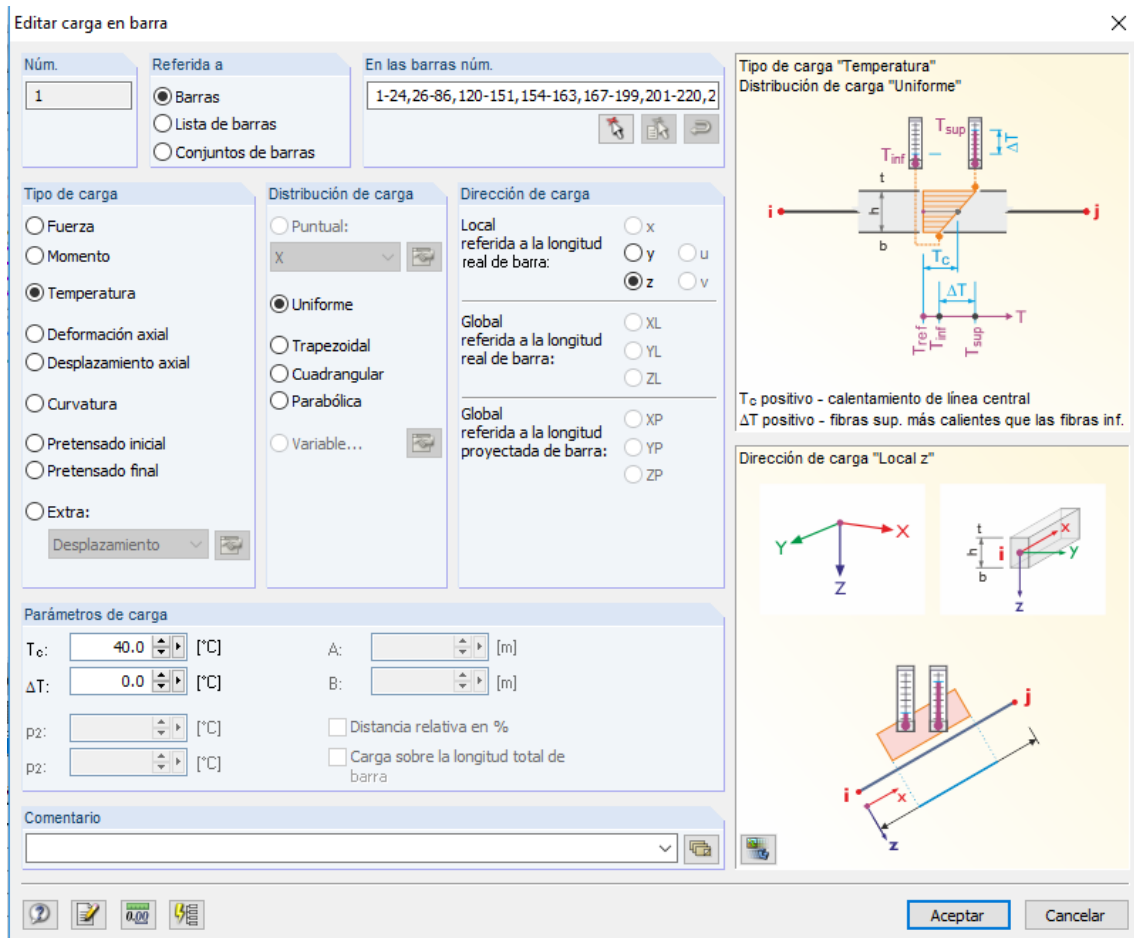


Figura 41: En esta captura del programa DLUBAL RFEM se muestra la incorporación de la variable temperatura, aplicada como una carga uniforme a cada una de las barras del modelo, para estudiar posteriormente su impacto.

Tal y como se puede observar, se ha considerado una temperatura uniforme en toda la pasarela en vez de considerar un gradiente de temperatura. Esto se debe a que se ha considerado que la temperatura de la pasarela se acaba equilibrando en todas sus caras y a que entre ellas no existe un importante contraste de temperaturas (no hay una cara que este siempre a la sombra y otra que este siempre al sol).

Una vez incorporada al programa nuestra carga de temperatura, se realiza una combinación de cargas, entre la carga de temperatura en barras y la carga en temperatura en superficies para establecer cómo se comportaría la pasarela en dicha situación.

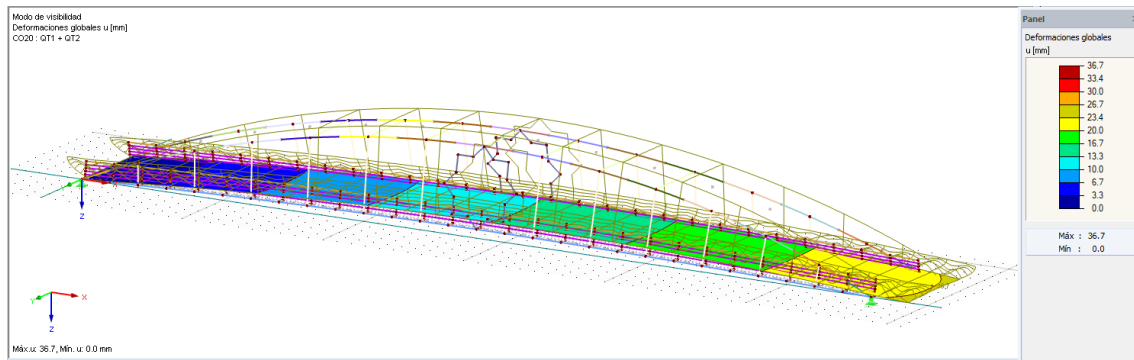


Figura 42: En esta figura se muestra la deformación que sufre la estructura debido a la temperatura.

En la figura 42 se muestra el efecto que produce la temperatura en la pasarela metálica. Tal y como se puede apreciar en la leyenda, el desplazamiento máximo sería de 36,7 mm.

Puesto que corresponde con un elemento auxiliar, como es la barandilla de aluminio, se debe obviar este dato, ya que no sería totalmente correcto. Este desplazamiento se produce en un elemento auxiliar de la pasarela, como es la barandilla de aluminio. Para obtener el desplazamiento de los elementos estructurales, se repite el procedimiento sin tener en consideración la barandilla.

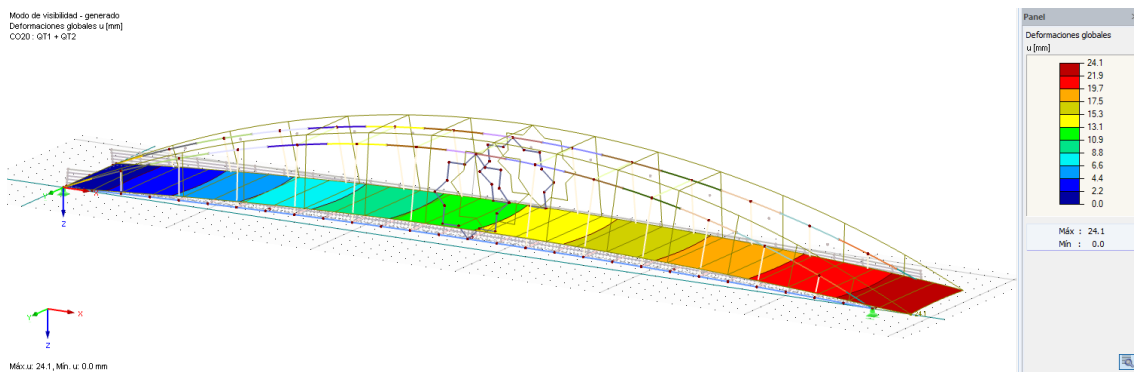


Figura 43: En esta figura, observamos la deformación obtenida al estudiar el efecto de la temperatura en los elementos puramente estructurales de la pasarela.

Los elementos estructurales, tal y como observamos en la figura anterior, se desplazan debido a la acción de la temperatura 24,1 mm. A continuación, se realiza el cálculo teórico, cuyo resultado es prácticamente el mismo:

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0$$

Donde:

Delta L: Variación de longitud ( $L_F - L_0$ )

$L_0$  = Longitud inicial

Alfa: Coeficiente de dilatación lineal

Delta T: Variación de Temperatura ( $T_F - T_0$ )

$$\Delta L = 12 * 10^{-6} * 40 * 56000 = 26,88 \text{ mm}$$

Obtenemos 26,88 mm de desplazamiento teórico frente a los 24,1 experimentales.

En la figura 44 se aprecia que la estructura no se arquea más, sino que simplemente se desplaza.

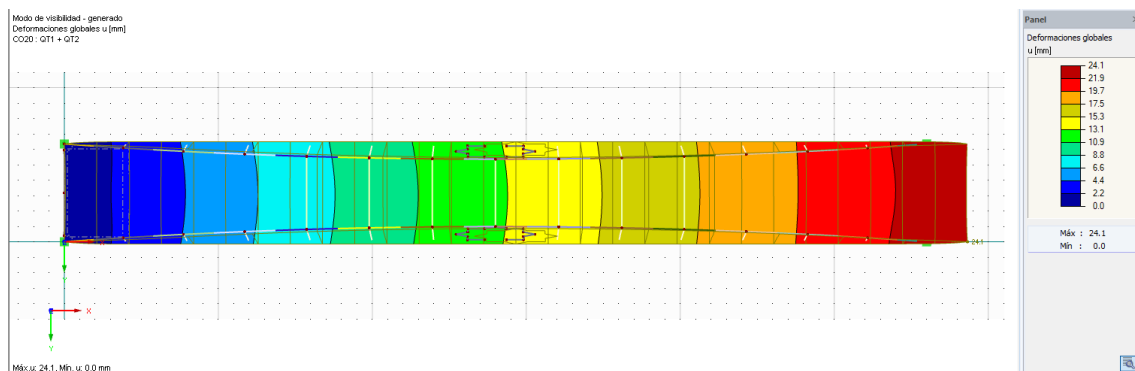


Figura 44: vista superior del comportamiento de la pasarela tras someterla a un incremento de temperatura.

Además, tal y como se observa en el modelo, solo se produce desplazamiento en un sentido. Se debe a que, para su correcta modelización, hay que considerar los apoyos en un lado como fijos, en vez de considerar los cuatro apoyos como móviles. De esta manera, el desplazamiento calculado, (24,1 mm), se produciría en ambos sentidos, por lo que la estructura se dilataría 12,05 mm por cada sentido.

Es importante conocer este desplazamiento a la hora de diseñar los apoyos de la estructura, ya que conociendo su desplazamiento se puede calcular el grosor del neopreno necesario para que resista los esfuerzos a cizalladura de la estructura.

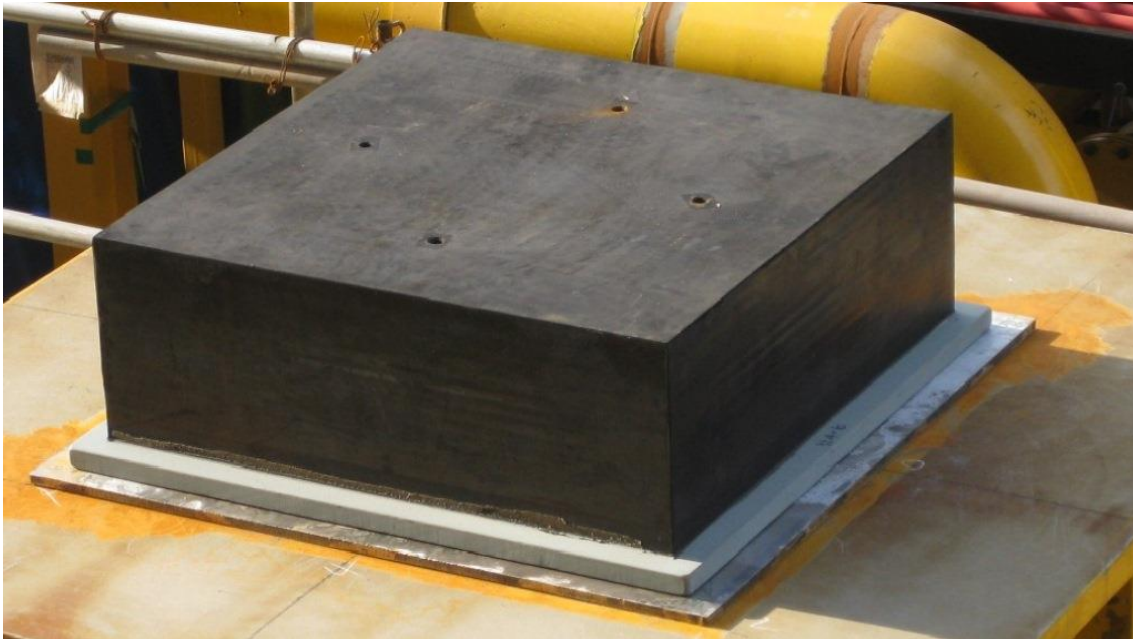


Figura 45: un taco de neopreno en un puente.

Los apoyos elastómeros permiten:

- Desplazamientos simultáneos en dos direcciones distintas
- Giros simultáneos en tres ejes diferentes
- Absorción de cargas verticales
- Absorción de cargas horizontales de corta duración

Gracias a ello, los apoyos elastómeros absorberán todas las fuerzas sin estorbar sus movimientos.

## 5.2. Estabilidad

En este apartado se analiza la estabilidad de la estructura. En primer lugar, se expone el factor de carga crítica en cada combinación de cargas.

| Combinacion de cargas | Factor |
|-----------------------|--------|
| 1                     | 10,715 |
| 2                     | 5,969  |
| 3                     | 7,64   |
| 4                     | 7,667  |
| 5                     | 14,474 |
| 6                     | 8,94   |
| 7                     | 7,549  |
| 8                     | 7,604  |
| 9                     | 4,08   |
| 10                    | 3,987  |
| 11                    | 3,511  |

Tabla 1

Tal y como se observa en la tabla 1, los dos casos más desfavorables se corresponden a los casos de carga 10 y 11.

Los dos casos más desfavorables son:

- Caso 11:

Correspondiente al caso de cargas  $1,35G1 + 1,35G2 + 1,05GR33 + 1,05GR34 + 1,5QW$

Vector propio - u [ ]  
RF-STABILITY CA12 - Análisis de estabilidad-CO11  
Vector propio núm. 1 - 3.51

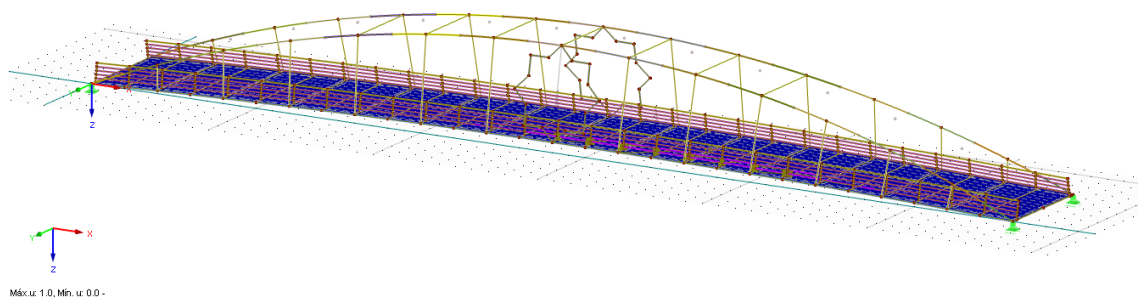


Figura 46: Representación gráfica del análisis de estabilidad CO11, concretamente de su vector propio número 1.

| Valor pr. núm. | A                             | B                                   |
|----------------|-------------------------------|-------------------------------------|
|                | Factor de carga crítica f [-] | Coef. de amplificación $\alpha$ [-] |
| 1              | 3.511                         | 1.398                               |
| 2              | 4.049                         | 1.328                               |
| 3              | 4.672                         | 1.272                               |
| 4              | 5.376                         | 1.229                               |
| 5              | 5.557                         | 1.219                               |
| 6              | 5.968                         | 1.201                               |
| 7              | 6.144                         | 1.194                               |
| 8              | 6.227                         | 1.191                               |
| 9              | 6.847                         | 1.171                               |
| 10             | 6.951                         | 1.168                               |

Figura 47: Tabla resumen con los 10 vectores propios para pandeo que hemos calculado, con sus correspondientes factores de carga crítica y coeficientes de amplificación.

En el estudio de estabilidad, correspondiente al caso de cargas 11, se obtuvo un factor de carga crítica de 3,511 (caso más desfavorable). Este valor es superior a un factor de carga de 2,5, crítico para la estabilidad. Por lo tanto, se puede concluir que a la estructura no le falta rigidez.

- Caso 10

Correspondiente al caso de cargas  $1,35G1 + 1,35G2 + 1,05GR32 + 1,5QW$

Vector propio - u [-]  
RF-STABILITY CA3 - Análisis de estabilidad CO10  
Vector propio núm. 1 - 3.99

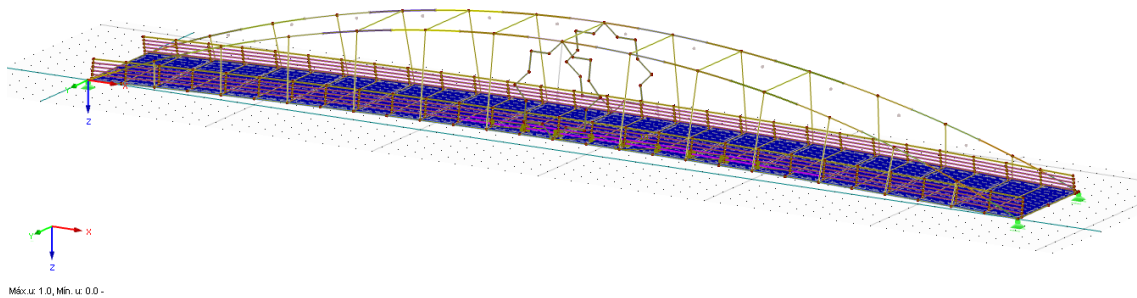


Figura 48: Representación gráfica del análisis de estabilidad CO10, concretamente de su vector propio número 1.



| Valor pr. núm. | A                               | B                                   |
|----------------|---------------------------------|-------------------------------------|
|                | Factor de carga crítica $f [-]$ | Coef. de amplificación $\alpha [-]$ |
| 1              | 3.987                           | 1.335                               |
| 2              | 4.486                           | 1.287                               |
| 3              | 5.129                           | 1.242                               |
| 4              | 5.166                           | 1.240                               |
| 5              | 5.880                           | 1.205                               |
| 6              | 6.127                           | 1.195                               |
| 7              | 6.630                           | 1.178                               |
| 8              | 6.690                           | 1.176                               |
| 9              | 7.254                           | 1.160                               |
| 10             | 7.413                           | 1.156                               |

Figura 49: Tabla resumen con los 10 vectores propios para pandeo que hemos calculado, con sus correspondientes factores de carga crítica y coeficientes de amplificación.

En este caso, el factor de carga crítica en esta combinación de cargas es de 3,987. Al poseer un factor de carga crítica superior a 2'5, se puede determinar que la estructura es lo suficientemente rígida y, por lo tanto, cumple los criterios exigidos en estabilidad.

### 5.3. Vibraciones

En este apartado se analiza el impacto de las vibraciones en la pasarela. Las vibraciones son una cuestión a tener muy en consideración en el diseño de puentes o pasarelas peatonales, ya que si existe un número elevado de las mismas pueden provocar una falta de confort en el uso de las mismas (Puente del Milenio, en Londres) o incluso su colapso (Tacoma Narrows, Estados Unidos de América).

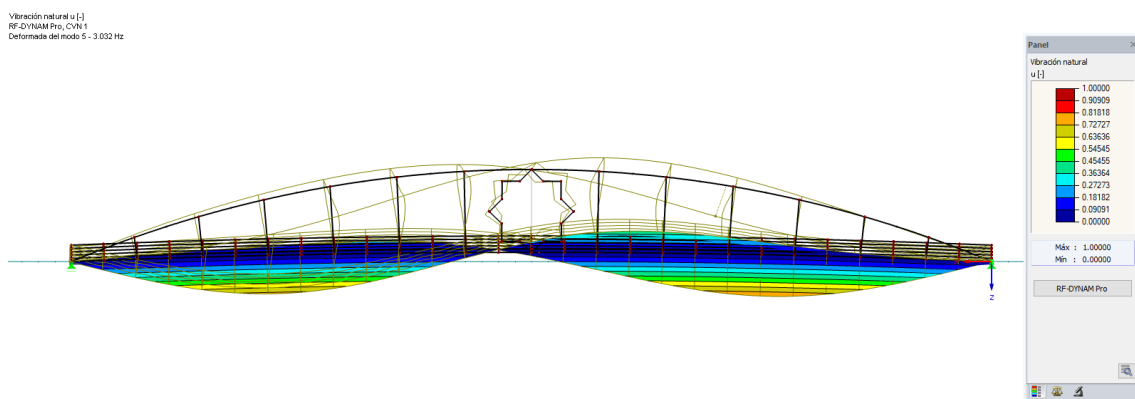


Figura 50: Representación gráfica de las vibraciones naturales de la pasarela peatonal.

Vibraciones naturales para cada caso de carga.

| CVN1  | CVN2  | CVN3  | CVN4  |
|-------|-------|-------|-------|
| 1.473 | 1.498 | 1.648 | 1.683 |
| 2.639 | 2.828 | 3.045 | 2.963 |
| 2.877 | 2.851 | 3.275 | 3.130 |
| 2.913 | 3.131 | 3.302 | 3.536 |
| 4.253 | 4.142 | 4.808 | 4.617 |
| 4.872 | 4.887 | 5.522 | 5.555 |
| 5.207 | 5.361 | 5.925 | 6.008 |
| 5.414 | 5.656 | 6.176 | 6.205 |
| 5.751 | 5.827 | 6.459 | 6.389 |

Tabla 2: Tabla resumen de las vibraciones obtenidas para cada caso de carga analizado

Para verificar el estado límite de servicio de vibraciones en pasarelas peatonales, las frecuencias naturales deben situarse fuera de estos rangos críticos:

- Vibraciones verticales y longitudinales: de 1.25 a 4.60 Hz.
- Vibraciones laterales: de 0.50 a 1.20 Hz.

Como se puede observar en la tabla anterior, las vibraciones laterales se sitúan fuera de los rangos críticos. Sin embargo, en el caso de las vibraciones verticales y longitudinales, se producen vibraciones en el rango crítico (valores coloreados en rojo).

A continuación, se exponen los casos más desfavorables en cada uno de los cuatro casos de carga:

- Caso de Vibración número 1, correspondiente al Peso Propio junto con los Focos de Iluminación

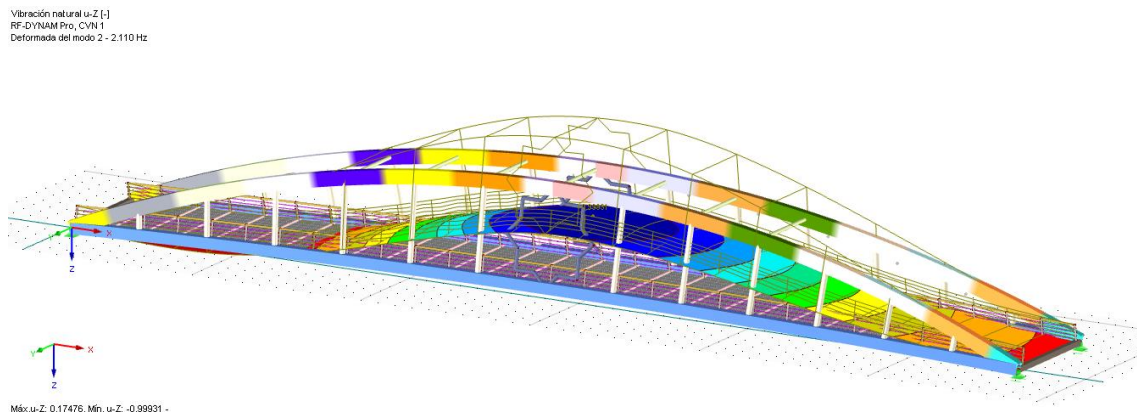


Figura 51: Representación gráfica de la deformada del modo 2 del caso de vibraciones número 1.

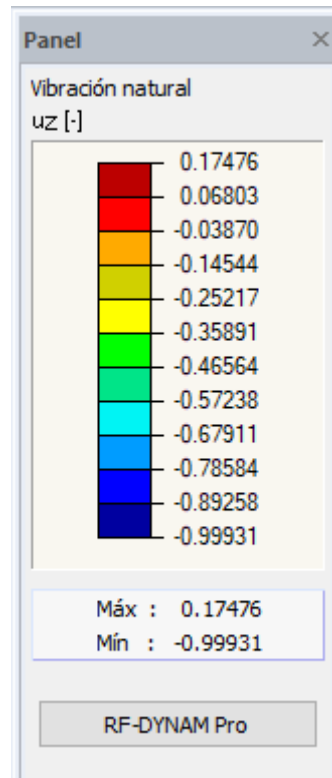


Figura 52: Leyenda con los valores de deformación que causa el caso de vibraciones número 1.

- Caso vibración número 2, correspondiente a la combinación del Peso Propio, los Focos de Iluminación y la sobrecarga de uso completa.

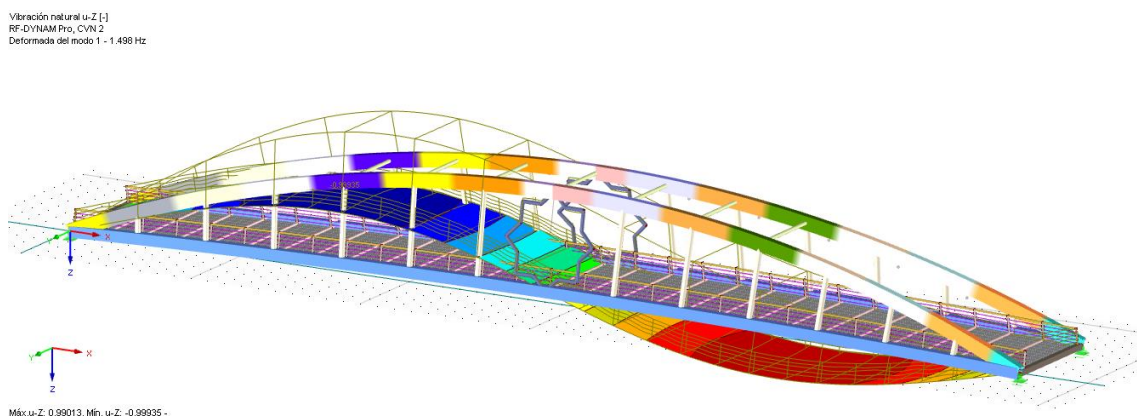


Figura 53: Representación gráfica de la deformada del modo 1 del caso de vibraciones número 2.

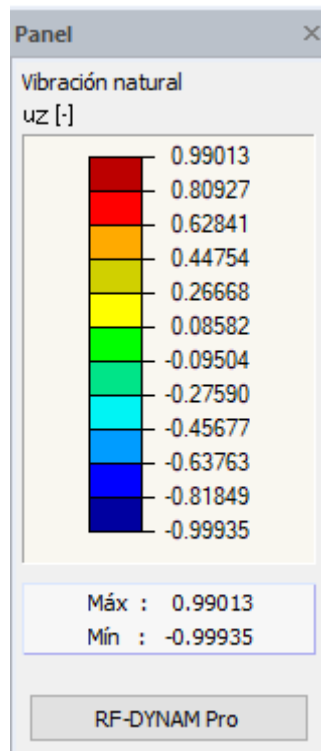


Figura 54: Leyenda con los valores de deformación que causa el caso de vibraciones número 2.

- Caso vibración número 3, correspondiente a la combinación del Peso Propio, la sobrecarga de uso completa y la sobrecarga de uso mitad.

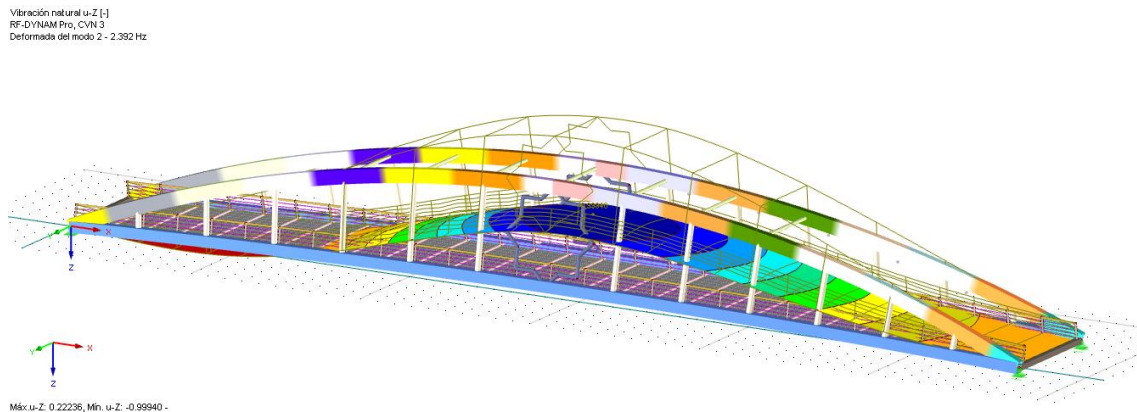


Figura 55: Representación gráfica de la deformada del modo 2 del caso de vibraciones número 3.

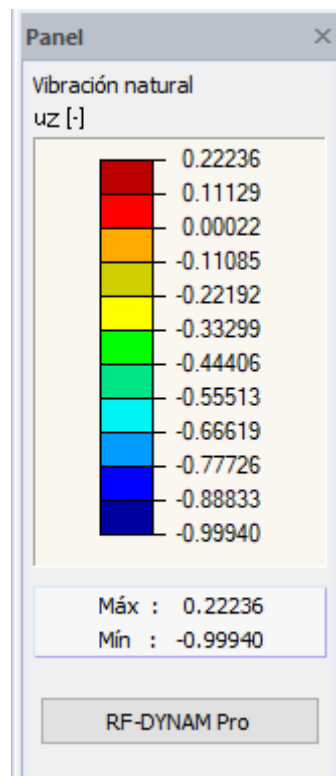


Figura 56: Leyenda con los valores de deformación que causa el caso de vibraciones número 3.

- Caso vibración número 4, correspondiente a la combinación del Peso Propio, los Focos de Iluminación y la sobrecarga de uso (1 Cuarto y 2 Cuarto).

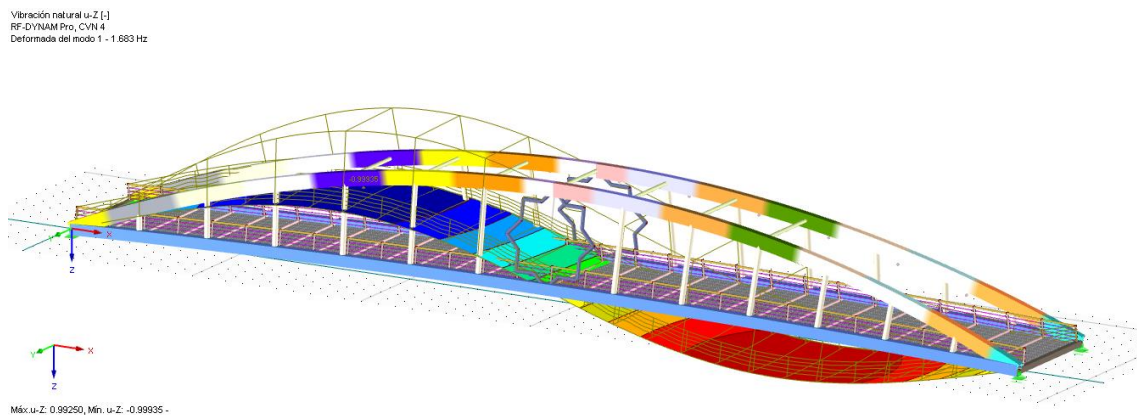


Figura 57: Representación gráfica de la deformada del modo 1 del caso de vibraciones número 4.

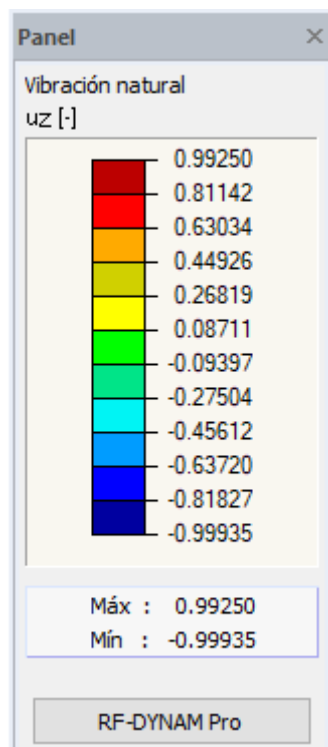


Figura 58: Leyenda con los valores de deformación que causa el caso de vibraciones número 4.

A la vista de que se han detectado varias frecuencias en el rango que la norma establece como necesario de analizar, y dado que cae fuera del objetivo del proyecto la realización de un análisis dinámico completo, se ha considerado un incremento en la limitación de flecha en el análisis estático, exigiendo un máximo de 1/750 frente a 1/500 que es lo habitual. Esta condición conlleva un incremento de la rigidez de la pasarela, lo que en el caso de vibraciones permitiría limitar la amplitud de las mismas.

## 6.CONCLUSIONES

Una vez realizado el diseño estructural de la pasarela, considerando aspectos tales como la temperatura, las vibraciones y la estabilidad, se ha llegado a las siguientes conclusiones.

En cuanto al diseño estructural, se puede distinguir entre el cálculo de la resistencia y la flecha máxima.

En el cálculo de la resistencia, se obtuvo una tensión Von mises máxima de 33'809 KN/cm<sup>2</sup>, y el valor máximo obtenido experimentalmente con DLUBAL RFEM se da en el caso de cargas CO9, con un valor de 32'71 KN/cm<sup>2</sup>.

Respecto a la flecha máxima, el valor teórico es 74'66 mm y experimentalmente se obtuvo un valor de flecha máxima de 77'7 mm correspondiente al caso de cargas C018. A pesar de que el valor obtenido experimentalmente supera el valor teórico, se trata de un valor admisible en el diseño de la estructura, ya que se trata de una diferencia mínima y no compromete la integridad estructural de la pasarela.

El análisis estructural de la pasarela se ha focalizado en tres aspectos fundamentales: la temperatura, la estabilidad y la vibración.

En lo que se refiere a la temperatura, se analizó como soportaría la estructura un incremento de temperatura de 40°C. El desplazamiento experimental obtenido es de 24,1 mm, frente a los 26,88 mm teóricos. Es una buena aproximación, a pesar de que la modelización tiene cierto grado de incertidumbre, ya que no se permite que se desplace por ambos extremos, como sucedería en la realidad, si no solo en uno debido a que el programa informático para poder realizar la simulación informática necesita tener un extremo anclado.

En el estudio de estabilidad de las diferentes combinaciones de cargas, se ha obtenido un factor de carga crítica mínimo 3'511, en el caso de cargas número 11. Al obtener un valor mínimo de 3'5 en el caso más desfavorable, muy superior que un factor de carga crítica de 2'5 ó 3, se puede concluir que la pasarela cumple holgadamente el criterio de estabilidad.

Para el estudio de las vibraciones se han analizado las vibraciones laterales y las vibraciones verticales y longitudinales. En el caso de las vibraciones laterales, el modelo cumple los requisitos, situándose fuera de los valores críticos. Por su parte, las vibraciones verticales y longitudinales, que tal y como podemos comprobar en la tabla resumen, vemos que no cumplen en su totalidad las especificaciones del código técnico. Esto podría suponer un grave problema para la pasarela, ya que si sufriera un uso intensivo podría tener problemas de confort o incluso provocar daños estructurales. Se ha revertido este posible problema incrementando la rigidez de pasarela mediante una limitación de flecha L/750, frente a los habituales L/500. Para tener una total certeza, deberíamos realizar un análisis dinámico completo o una prueba de carga mediante acelerómetros, pero dichos estudios quedan fuera del alcance de este proyecto



Finalmente, después de analizar todo lo expuesto anteriormente, se puede concluir que la pasarela es apta para la finalidad para la que ha sido diseñada.





## 7. BIBLIOGRAFIA

- ❖ Norma IAP 11
- ❖ UNE-ENV\_1991-2-4=1998
- ❖ [www.arquitecturaenacero.org/proyectos/recuperacion-restauracion-y-reciclaje/puente-trencat](http://www.arquitecturaenacero.org/proyectos/recuperacion-restauracion-y-reciclaje/puente-trencat)
- ❖ [https://lejarraga.com/proyectos/pasarela-peatonal\\_rambla-de-benipila-cartagena/](https://lejarraga.com/proyectos/pasarela-peatonal_rambla-de-benipila-cartagena/)
- ❖ <http://vacarquitectura.es/kiss-bridge/>
- ❖ <https://ereventos.com/es/projects/pasarela-amistad/>
- ❖ <https://construinnova.net/2014/04/22/pasarela-de-almunecar/>
- ❖ [https://es.wikipedia.org/wiki/Arquitectura\\_mud%C3%A9jar\\_de\\_Arag%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Arquitectura_mud%C3%A9jar_de_Arag%C3%B3n)
- ❖ [https://es.wikipedia.org/wiki/Millennium\\_Bridge](https://es.wikipedia.org/wiki/Millennium_Bridge)
- ❖ [https://es.wikipedia.org/wiki/Puente\\_peatonal](https://es.wikipedia.org/wiki/Puente_peatonal)
- ❖ Atlas ilustrado de los puentes del mundo. Ed. SUSAETA
- ❖ Pasarelas peatonales urbanas. Artículo. Autores: José Antonio González Mejide, Jesús José Corbal Álvarez y Guillermo Capellán Miguel
- ❖ Ingeniería de materiales para industria y construcción. MIRA EDITORES.
- ❖ Manual DLUBAL RFEM 5. 2016 Dlubal Software GmbH

