

Anejo II

Estudio de Soluciones

ÍNDICE

1.-	MOTIVACIÓN	2
2.-	JUSTIFICACIÓN DE LA TIPOLOGÍA RESISTENTE	2
3.-	JUSTIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA	4
3.1.-	ARCO MEDIANTE ELEMENTOS MODULARES	4
3.2.-	RELACIÓN FLECHA-LUZ	5
3.3.-	ARRIOSTRAMIENTO DE LOS ARCOS	5
3.4.-	SEPARACIÓN ENTRE PÉNDOLAS	6
3.5.-	TIPOLOGÍA DE PÉNDOLAS	7
4.-	REFERENCIAS	9

1.- MOTIVACIÓN

La primera aplicación del UHPFRC en pasarelas en España fue una pasarela desarrollada desde el grupo de investigación en tecnologías de hormigones especiales del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universitat Politècnica de València (UPV) como parte de las actuaciones previstas en el *Proyecto de Acondicionamiento del Barranco de las Ovejas* en Alicante. La utilización del también denominado hormigón de muy alto rendimiento (HMAR) se justificó principalmente, además de por el hecho de otorgar un carácter innovador a la obra, por motivos de durabilidad. Inicialmente, la pasarela prevista se había proyectado como una viga Vierendeel de acero estructural. Sin embargo, durante una determinada fase del proyecto fue necesario redactar un proyecto modificado, surgiendo dudas respecto a la idoneidad del acero como material estructural en el entorno marino donde se ubicaría la pasarela. Todas estas incertidumbres se vieron agravadas por el hecho de que meses atrás tuvo que clausurarse una pasarela de acero en El Perelló (Valencia) por problemas relacionados con la durabilidad. Finalmente se ejecutó una pasarela que salvaba los 42,81 m de luz del barranco mediante una viga artesa cuyas almas estaban constituidas por celosías Warren.

Materializar con éxito esta primera experiencia permitió validar el uso del UHPFRC como alternativa real a los materiales convencionales en este tipo de estructuras (puentes y pasarelas en ambientes marinos). Pese a tratarse de un material más caro, se comprobó que es posible proponer alternativas en HMAR perfectamente competitivas, teniendo en cuenta que resulta fundamental para garantizar este resultado realizar una correcta fase de diseño. De este modo, deben plantearse tipologías estructurales y secciones que aprovechen al máximo las propiedades del material, puesto que se trata de un material compuesto por materias primas exclusivas, por lo que se tiene un coste de partida elevado.

A esta primera aplicación le han seguido otras, como por ejemplo la pasarela sobre la V-21 en Puçol (Valencia), también en un ambiente marino, o las recientemente ejecutadas para la planta de reciclados Ribera del Xúquer en Guadassuar (Valencia), situadas en un ambiente de gran humedad por la proximidad del río Xúquer, todas ellas con luces comprendidas entre 20 y 35 m.

Como fruto de la promoción de los resultados conseguidos con las actuaciones descritas a las distintas Administraciones promotoras de este tipo de obras, desde el Ayuntamiento de Vinaroz (Castellón) se planteó la posibilidad de proponer una solución en UHPFRC para una pasarela ubicada en la desembocadura del río Cérvol de 60 m de luz, siendo éste el objeto del proyecto.

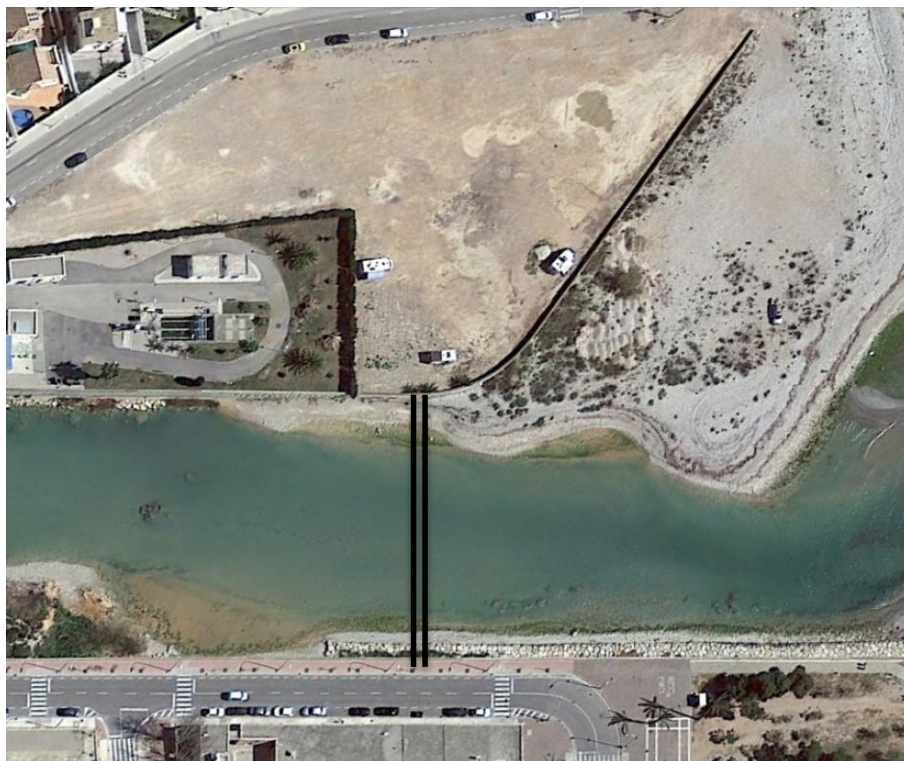


Figura 1 Ubicación definida por el Ayuntamiento de Vinaroz para la pasarela propuesta

2.- JUSTIFICACIÓN DE LA TIPOLOGÍA RESISTENTE

El emplazamiento propuesto para la pasarela, situado en la desembocadura del río Cérvol al mar Mediterráneo, hace idónea la utilización del UHPFRC como material estructural, siguiendo la línea marcada por las otras actuaciones realizadas en España. Sin embargo, existe una diferencia fundamental a la hora de afrontar el diseño con respecto a las pasarelas mencionadas, la luz que debe ser salvada.

Como se ha comentado anteriormente, los tres conjuntos de pasarelas realizadas con UHPFRC en España se han resuelto utilizando la misma tipología resistente: vigas en artesa cuyas almas se encuentran aligeradas, constituyendo celosías Warren. Frente a otros tipos de celosía, la celosía Warren resulta mucho más eficiente ya que las diagonales trabajan de manera alternativa en compresión y tracción con una baja flexión.

Teniendo en cuenta los antecedentes existentes, en una primera fase del estudio de soluciones decide mantenerse la tipología resistente adoptada en el resto de soluciones, estudiando la viabilidad de la viga en artesa con almas aligeradas en luces superiores a 50 m, concretamente su aplicación a la pasarela objeto de este proyecto, de 60 m de luz. Para ello, se adapta la geometría de la pasarela del Barranco de las Ovejas, de modo que las celosías quedan conectadas en su parte inferior por una celosía en X, y en su parte intermedia por el tablero, a una distancia constante de 1,20 m del cordón superior, constituyendo por tanto la barandilla de la pasarela. En una primera aproximación, se plantea una viga de canto igual a 3,00 m, cuyo modelo estructural se presenta en la siguiente figura:

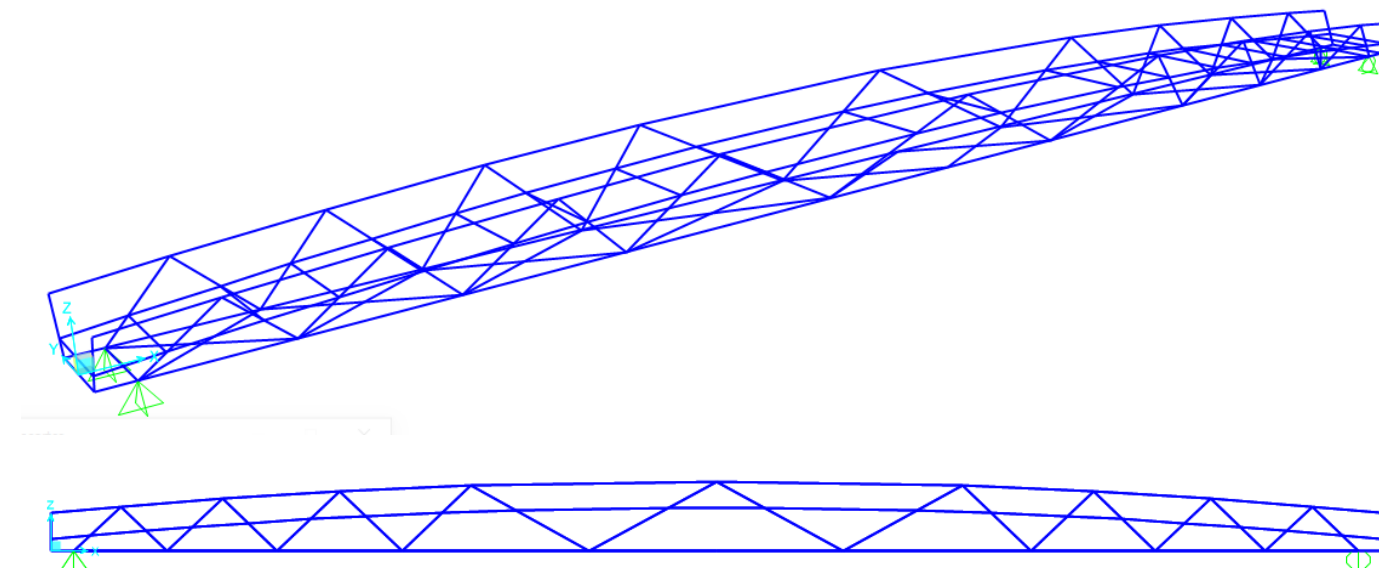


Figura 2 Vistas del modelo estructural desarrollado para la alternativa en celosía. Canto igual a 3,00 m

Tras realizar un primer predimensionamiento, se advierte como la utilización de un canto de 3,00 se antoja como claramente insuficiente. Estimando de modo aproximado el número de cables de pretensado que sería necesario disponer para resistir la tracción del cordón inferior en fase de servicio (3384 kN), considerando la resistencia a tracción de las secciones de UHPFRC, se obtiene un total 28 cordones de 0,5" por cordón traccionado, número muy superior a los 18 cordones dispuestos en la pasarela del Barranco de las Ovejas. La siguiente figura muestra las leyes de axiles obtenidas tras el cálculo:

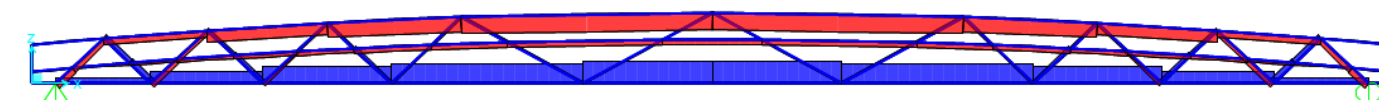


Figura 3 Ley de axiles en combinación ELS (PP + SC) de la alternativa en celosía. Canto igual a 3,00 m

A falta de realizar otras comprobaciones, la sola disposición de 28 cordones obligaría a definir unas dimensiones de las secciones de cordón inferior muy elevadas, por lo que se estima necesario reducir la magnitud de los esfuerzos. Puesto que el momento flector máximo actuante es el mismo, independientemente del canto, el único modo de reducir el par de fuerzas de compresión y tracción es aumentando el brazo mecánico del mismo, esto es, aumentando el canto de la sección. A continuación se presenta el modelo realizado tras aumentar el canto de la viga a 4,00 m:

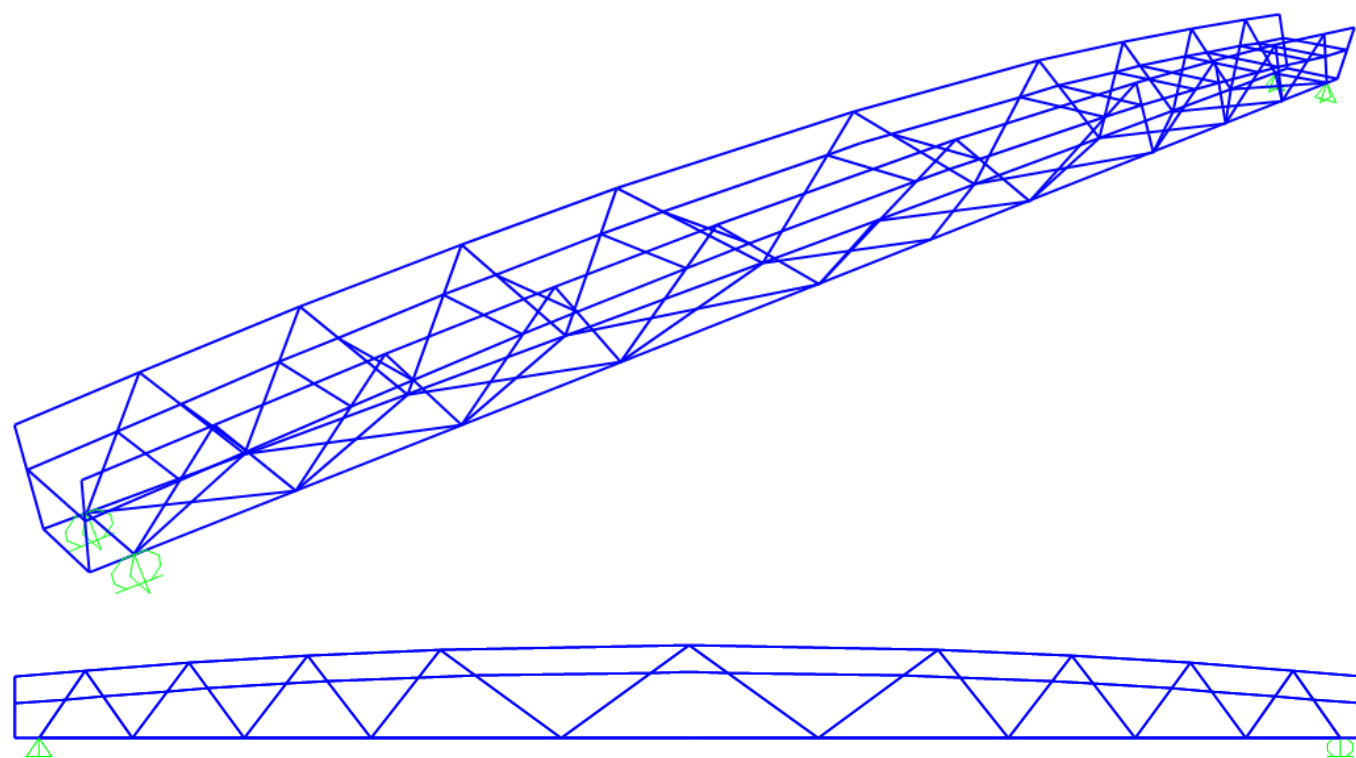


Figura 4 Vistas del modelo estructural desarrollado para la alternativa en celosía. Canto igual a 4,00 m

Realizando el mismo cálculo que el descrito para la alternativa de canto igual a 3 m, para este caso se obtiene un total de 24 cordones de 0,5" por cordón traccionado, tratándose esta vez de un número más próximo al dispuesto en la pasarela del Barranco de las Ovejas. Sin embargo, pese a la mejora conseguida en este aspecto, el aumento de canto conlleva una serie de inconvenientes que hacen que también deba descartarse esta solución, los cuales se describen a continuación.

En primer lugar, y aunque se trata de un aspecto evidente, debe tenerse en cuenta que un aumento lineal de luz no supone un aumento lineal de esfuerzos. Este hecho motiva que cada tipología estructural tenga límites de aplicabilidad en función de su comportamiento resistente. Para el caso particular de la tipología viga, frente a un aumento lineal de la luz, los esfuerzos que la solicitan aumentan cuadráticamente, lo que conlleva principalmente dos problemas.

Por un lado, a igualdad de canto, un aumento lineal de la luz origina un aumento cuadrático de la tracción, lo que conlleva un aumento también cuadrático del número de cordones de pretensado a disponer. Dado que los cordones inferiores de la celosía están compuestos por elementos de sección maciza en los que se dispone la armadura activa pretesa, un aumento significativo del número de cables obligaría a adoptar geometrías de sección excesivas.

Por otro lado, debe destacarse el hecho de que en las vigas con sección en artesa, un alma en celosía con un tablero intermedio ofrece mayores problemas de estabilidad en el cordón superior que en el caso de disponer alma llena. Sin embargo, a pesar de que desde el punto de vista estructural la utilización de un alma llena es más adecuada si los cordones comprimidos no están arriostrados, la transparencia y el aspecto estético resultan ser en este tipo de estructuras urbanas predominantes por encima de la eficiencia estructural. Un aumento significativo de los esfuerzos de compresión podría obligar a tener que arriostrar los cordones superiores entre sí, aspecto inviable puesto que éstos constituyen los pasamanos de las barandillas, estando al nivel de circulación de los peatones.

Tal y como se ha comentado anteriormente, una posible solución a los problemas descritos consiste en aumentar el canto de la viga, de modo que se aumente el brazo mecánico entre el cordón superior y el cordón inferior, pudiendo mantener valores similares de compresión y tracción del orden de los obtenidos en las actuaciones previas recogidas. Si bien esta solución fue la que se llevó a cabo en el proceso de predimensionamiento inicial, como principal conclusión de esta primera fase del estudio de soluciones puede afirmarse que la tipología de viga artesa con almas aligeradas y tablero intermedio cuenta con un límite de aplicabilidad en torno a luces de 50 m.

Una de las principales premisas de la tipología resistente adoptada hasta el momento es su estética, ligereza y transparencia. Gracias a esos tres factores se hace posible la circulación de los peatones por el interior de la viga en artesa, donde las propias almas de la viga constituyen la barandilla de la pasarela, formando el pasamanos mediante el cordón superior de la celosía.

Si se decide mantener la circulación peatonal a través de un tablero intermedio situado a 1,20 m del cordón superior, un aumento de canto de la pasarela a 4,00 m obliga a que en centro-luz, la distancia entre el cordón inferior y el tablero de la pasarela sea de 2,80 m. Este aspecto resulta tremendamente limitante de cara a gálibos por debajo de la misma. Por otro lado, si se opta por no aumentar tanto el canto a costa de resistir mayores esfuerzos en los cordones superior e inferior, el hecho de disponer almas aligeradas puede obligar a tener que arriostrar los cordones superiores, aspecto inviable si se pretende mantener la circulación por el tablero intermedio. La siguiente figura muestra una vista desde los apoyos de las dos alternativas planteadas (canto igual a 3,00 m y a 4,00 m), donde se aprecia la limitación de gálibos que supone la alternativa de mayor canto.

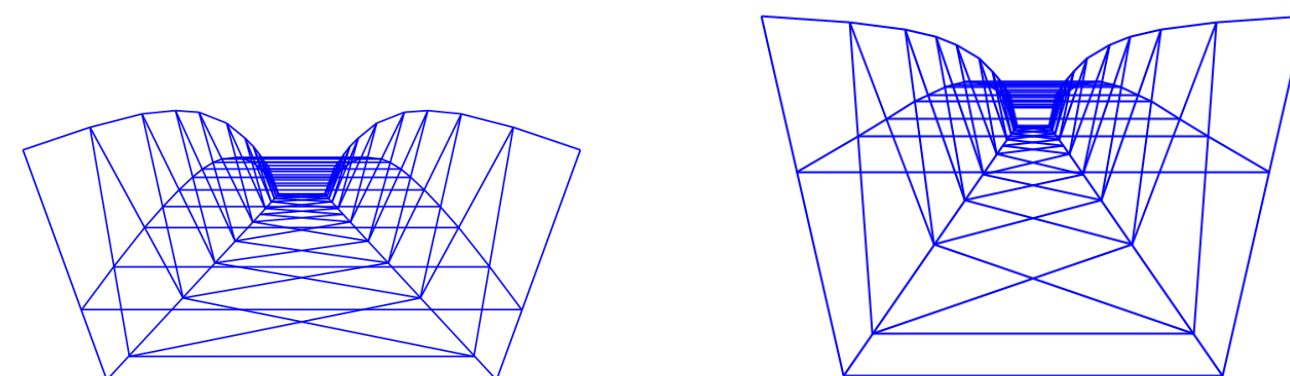


Figura 5 Vista frontales esquemática de las pasarelas desde los apoyos. Cantos 3,00 m (izquierda) y 4,00 m (derecha)

Una posible solución a la problemática descrita sería disponer la circulación de los peatones sobre un tablero inferior situado sobre vigas transversales que unieran los cordones inferiores entre sí. De este modo podría aumentarse el canto hasta alcanzar un nivel de esfuerzos asumible, sin perjudicar el gálibo de la pasarela. Por otro lado, esta solución también permitiría el arriostramiento superior de los cordones superiores, debiendo permitir una altura libre mínima adecuada.

La descripción de la estructura requerida realizada en el párrafo anterior, donde se incluye un tablero inferior, cordones inferiores traccionados y cordones superiores comprimidos y arriostrados, unidos ambos mediante elementos lineales, inevitablemente conduce a una tipología resistente tipo arco atirantado tipo bowstring, presentándose ésta como una evolución natural de las vigas artesa con alma aligerada, cuya aplicabilidad queda limitada a rangos de luces de 20 a 50 m. De este modo, se concluye que la tipología resistente tipo arco con tablero inferior es la adecuada para pasarelas de UHPFRC con luces superiores a 50 m, dedicando el resto de este anejo a la definición geométrica de la solución adoptada para la pasarela objeto de este proyecto, de 60 m de luz.

3.- JUSTIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA

3.1.- Arco mediante elementos modulares

El elemento principal de la pasarela objeto de este proyecto consiste en un arco atirantado tipo bowstring construido mediante elementos modulares. Con esta elección se consiguen aprovechar algunas de las ventajas más importantes del UHPFRC en la construcción de puentes señaladas en el Anejo I: "Estado del Arte", como son:

- La prefabricación de los elementos es altamente recomendable pues permite obtener elementos estructurales de gran calidad, pudiendo incluso eliminar los efectos principales de retracción y limitar en gran medida la fluencia si se someten las piezas a un tratamiento de calor
- La unión entre los distintos elementos modulares puede realizarse de manera muy sencilla, bien aprovechando la gran eficiencia del pretensado maximizando la resistencia del UHPFRC o bien aprovechando las elevadas tensiones de adherencia que puede desarrollar (hasta 50 MPa), lo que permite longitudes de anclaje y solape mucho menores que en el hormigón convencional
- La utilización de elementos modulares prefabricados, fáciles de transportar y manejar, permite llevar a cabo procesos constructivos mucho más rápidos que los convencionales, pudiendo además utilizar maquinaria más ligera que la habitual

Si bien existen distintas aplicaciones de elementos modulares de UHPFRC en la construcción de puentes y pasarelas, como las celosías desarrolladas en la Universidad de Leipzig mediante elementos prefabricados aislados conectados mediante el uso de pretensado, en la elaboración de este proyecto se ha tomado como obra de referencia el puente WILD, en Austria, descrito en el Anejo I: "Estado del Arte".

Sintetizando lo descrito en el citado anejo, el puente WILD posee un vano central consistente en dos arcos paralelos poligonales de 69 m de luz, formados por segmentos rectangulares de sección 1,20 x 1,20 m y tan sólo 6 cm de espesor, unidos entre sí mediante elementos de conexión de mayor grosor. Los distintos segmentos que forman el arco se unen entre sí mediante cables de pretensado externos, dispuestos en el interior de la sección, y llaves de cortante, formando por tanto una junta seca. Gracias a la geometría del arco, los esfuerzos cortantes y los esfuerzos flectores no adquieren un valor muy importante, por lo que la resistencia aportada por las fibras es suficiente para resistirlos y no se requiere ningún tipo de armado adicional, ni longitudinal ni transversal. Además, el pretensado externo del arco mejora la estabilidad durante la fase constructiva. Para asegurar la durabilidad, todas las uniones entre segmentos y elementos de conexión se diseñan para que en fase de servicio no se produzca la descompresión de las mismas. Con respecto al procedimiento constructivo, los elementos modulares del arco, prefabricados y transportados a obra, se ensamblan conjuntamente utilizando los cables de pretensado externo dispuestos en el interior de los mismos. Este proceso constructivo representa una mínima utilización de medios: únicamente se requiere una grúa móvil y un conjunto de cables para fijar provisionalmente la posición del arco mientras se pretensan los cables del interior del mismo.

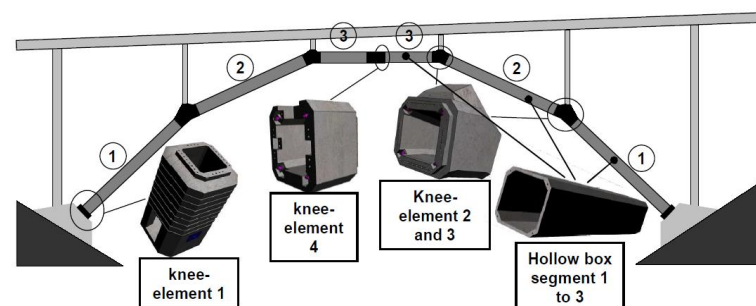


Figura 6 Síntesis de elementos que forman el puente WILD y detalle del elemento de conexión [Reichel et al. 2009]

Una vez decidida la utilización de elementos modulares para la construcción del arco de la pasarela, gracias a las ventajas enumeradas anteriormente, todavía faltan por decidir aspectos relativos a su geometría, al número de elementos a disponer y a la posición relativa de los arcos entre sí.

Respecto a la geometría de los arcos, decide ajustarse la forma poligonal de los mismos a una parábola, dado que esta forma geométrica es la antifunicular de las cargas permanentes actuantes sobre la pasarela, a excepción del peso propio del arco, y en general de cualquier sobrecarga actuante sobre la totalidad del tablero (cargas verticales uniformemente repartidas por unidad de proyección horizontal).

En cuanto al número de elementos que forman el arco, debe tenerse en cuenta que en la medida de lo posible deben minimizarse las uniones en obra, así como aprovechar al máximo las dimensiones permitidas por el transporte. De este modo se decide que, al igual que en el puente WILD, los elementos que forman el arco se unirán entre sí en el entorno de la unión con la péndola, por lo que el número de elementos vendrá determinado por la separación entre péndolas, aspecto que se trata más adelante en este mismo apartado.

Por último, respecto a la posición relativa de los arcos entre sí, en una primera fase del estudio de soluciones se planteó tanto la posibilidad de disponer los arcos paralelos entre sí, así como la posibilidad de disponer los arcos inclinados, llegando a juntarse en clave, tal y como se muestra en los siguientes modelos tridimensionales:

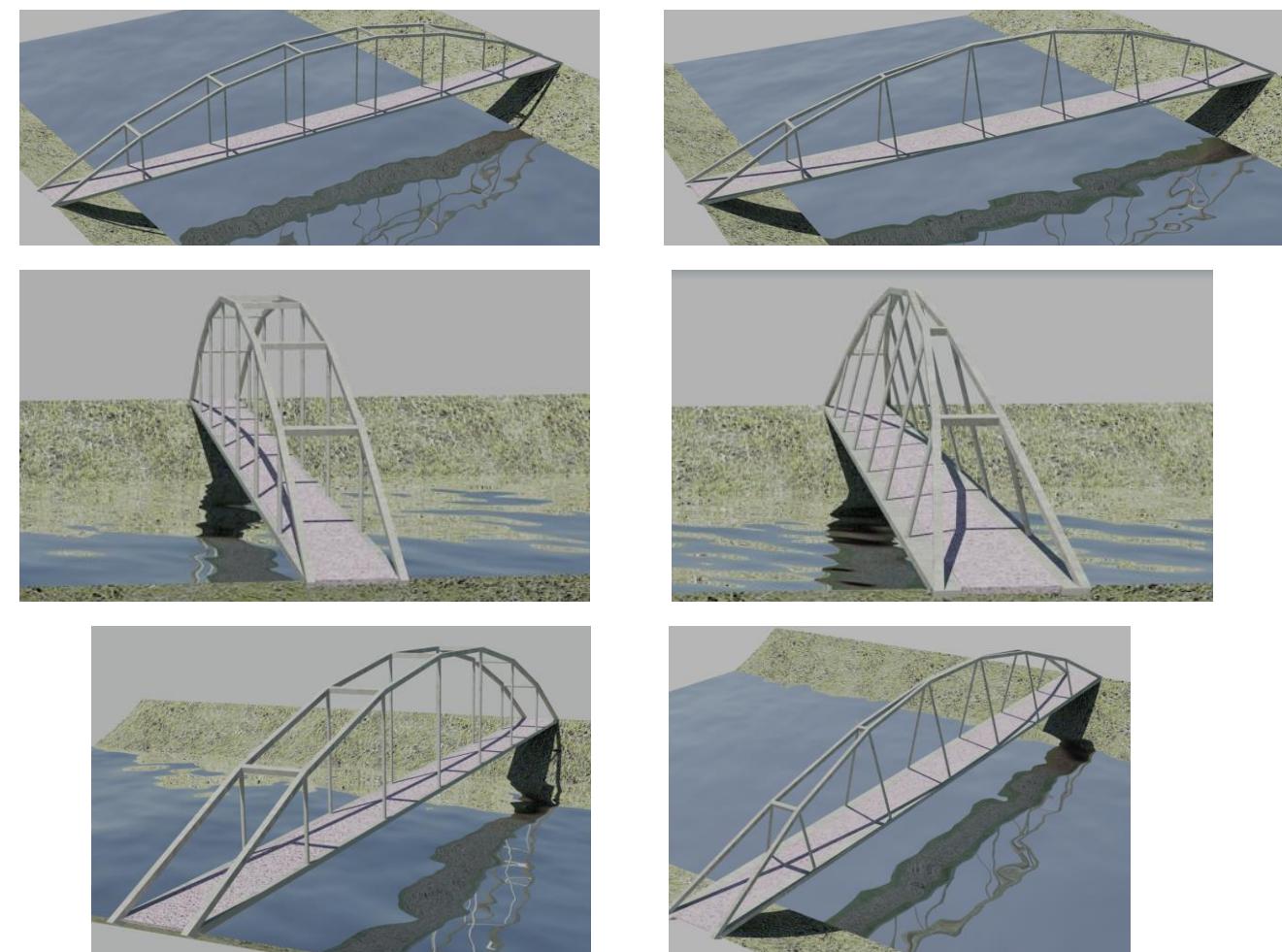


Figura 7 Diferentes vistas de los modelos tridimensionales realizados para pasarela de arcos paralelos e inclinados

Finalmente, tanto por motivos estéticos como funcionales, deciden disponerse los arcos paralelos. La elección de arcos inclinados habría obligado a aumentar la relación flecha-luz o bien aumentar el ancho de la pasarela para que la altura libre a la entrada de la misma fuese adecuada, además de dificultar la modulación de los elementos prefabricados (p.e. riostras de distinta longitud). La disposición de arcos paralelos permite una mejor modulación, además de no interferir en la funcionalidad de la pasarela y resultar una solución más estética.

3.2.- Relación flecha-luz

Tras determinar la tipología de elementos que forman los arcos, la forma geométrica a la que se ajustan los mismos, la posición relativa entre ellos y el número de elementos que los integran, el siguiente paso consiste en definir un parámetro fundamental de un puente arco, su flecha, y por tanto la relación flecha/luz de la pasarela.

Llegados a este punto, deben recordarse dos aspectos que se han ido introduciendo a lo largo de este anejo. En primer lugar, las fenomenales características del UHPFRC permiten diseñar estructuras con geometrías y comportamientos más cercanos a los de las estructuras metálicas, huyendo de la robustez y magnitud de las estructuras realizadas con hormigón convencional. Teniendo en cuenta este hecho, y sintetizando la información recogida en el Anejo I: "Estado del Arte", a continuación se recogen las relaciones flecha/luz de algunos de los puentes de acero tipo arco atirantado, recogidos en el citado anejo:

- Puente arco sobre el río Deba en Guipúzcoa (flecha/luz de 1/5,5)
- Puente arco sobre el río Guadalquivir en Palma del Río (flecha/luz de 1/5,2)
- Puente arco sobre el río Júcar en Alzira (flecha/luz de 1/6,91)
- Puente arco sobre la rambla del Cañuelo en Roquetas de Mar (flecha/luz de 1/7)
- Pasarelas bowstring del Anillo Verde Ciclista de Madrid (flecha/luz de 1/7)

En segundo lugar, y tal y como se ha indicado en anteriores apartados de este anejo, la tipología estructural de la pasarela objeto de este proyecto ha sido concebida como una evolución natural de las celosías desarrolladas con este material en rangos de luces menores. Partiendo de esta premisa, se admiten como válidos valores de flecha menores a los habituales en arcos bowstring convencionales.

Teniendo en cuenta los aspectos indicados, en una primera fase del estudio de soluciones se plantearon dos alternativas de flecha, 6 m (flecha/luz de 1/10) y 8,5 m (flecha/luz de 1/7), las cuales se muestran en la siguiente figura:

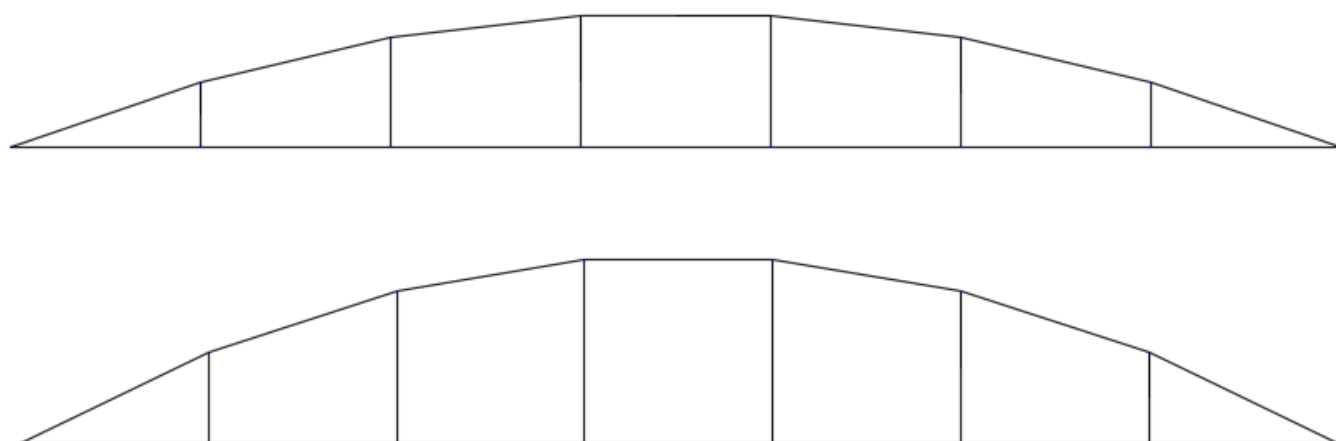


Figura 8 Geometrías alternativas: flecha 6 m (f/L de 1/10 – arriba) y flecha 8,5 m (f/L de 1/7 – abajo)

Finalmente decida adoptarse una flecha de 6 m y por tanto una relación flecha/luz de 1/10. Los motivos que llevan a diseñar un arco tan rebajado son varios. Por un lado, una menor flecha conlleva una menor longitud de péndolas, lo que reduce la longitud de pandeo en el caso de disponer una configuración distinta a las péndolas verticales, como se verá posteriormente. Por otro lado, la estética de la pasarela resulta mucho más ligera, acercándose más a las celosías indicadas anteriormente. Por último, y dentro de un proyecto donde la innovación juega un papel importante, decide plantearse una relación flecha/luz más reducida que las convencionales, buscando llegar al límite del material.

3.3.- Arriostramiento de los arcos

La decisión de arriostrar o no los dos arcos paralelos que componen la pasarela tiene una gran repercusión a la hora de determinar la rigidez que deben los mismos. De este modo, si se opta por no arriostrar los arcos, disponiendo por tanto dos arcos exentos, debería de dotarse de gran inercia a las secciones de los mismos, lo que se traducirá en cantos elevados y por tanto acabaría perjudicando a la estética de la pasarela. La siguiente figura muestra los modos de pandeo que se obtendrían en el caso de disponer arcos exentos:

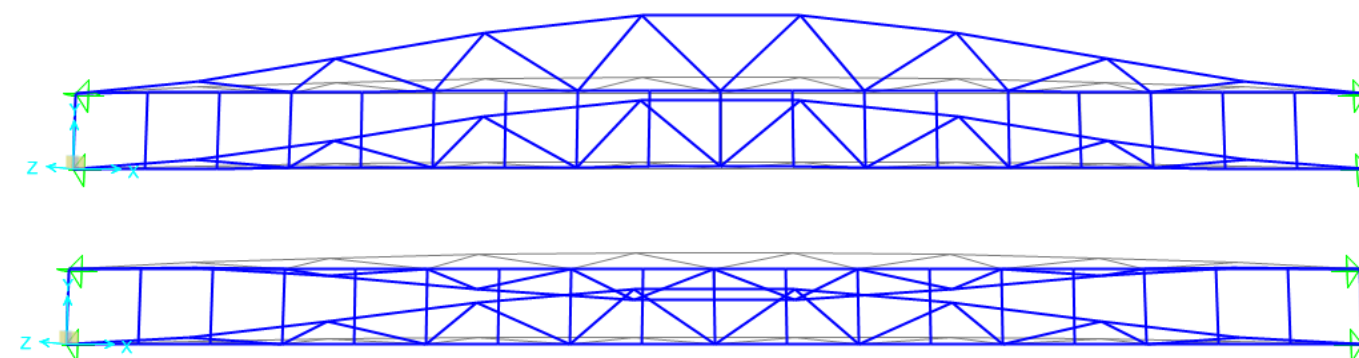


Figura 9 Primer y segundo modo de pandeo de la alternativa con arcos exentos

Sin embargo, en una pasarela de las características descritas anteriormente, donde se prima la ligereza de los elementos para su fácil transporte, manejo y puesta en obra, no resulta lógico penalizar las secciones de los arcos por el mero hecho de no disponer riostras entre ellos. Es más, gracias a la versatilidad que aporta el prefabricado, pueden fabricarse tramos enteros de arco, que dos elementos relativos a los arcos unidos por una riostra, de modo que se simplificase en gran medida las operaciones a realizar en obra. La siguiente figura muestra los modos de pandeo que se obtendrían en el caso de disponer arcos arriostrados:

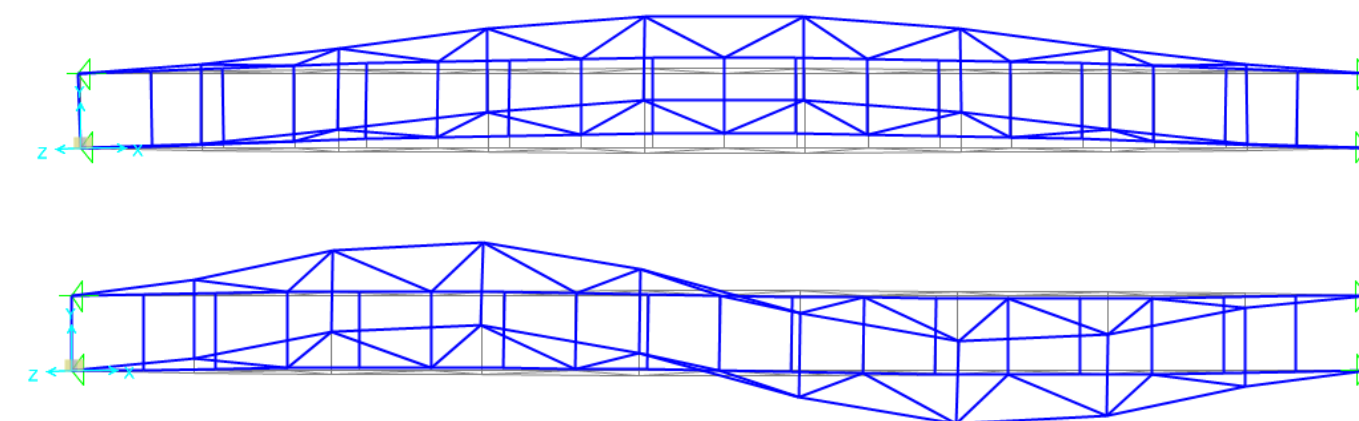


Figura 10 Primer y segundo modo de pandeo de la alternativa con arcos arriostrados

Por tanto, de acorde con todo lo expuesto anteriormente, decide adoptarse la alternativa con arcos arriostrados mediante riostras perpendiculares a los mismos, dispuestas en los quiebro de la geometría poligonal, sobre el elemento de unión con la péndola.

3.4.- Separación entre péndolas

La separación entre péndolas también supone un aspecto fundamental a la hora de determinar la geometría de un arco atirantado tipo bowstring. Cuanto mayor sea la separación entre péndolas, mayor será la distancia entre puntos de apoyo elástico del tablero, a mayores flexiones se verá sometido el mismo y mayores tracciones deberán resistir las péndolas. Por otra parte, menor será el número de elementos modulares que formarán la pasarela, mayores serán sus dimensiones y menor será el número de uniones a realizar en obra. Por último, también hay que tener en cuenta el componente estético, y es que cuanto mayor sea el número de péndolas, mayor número de elementos formarán el arco y más se podrá ajustar la geometría poligonal a la parabólica.

En una primera fase del estudio de soluciones se plantearon dos alternativas de número de péndolas, disponiendo 6 péndolas espaciadas 8,57 m y disponiendo 8 péndolas espaciadas 6,67 m, las cuales se muestran en la siguiente figura:

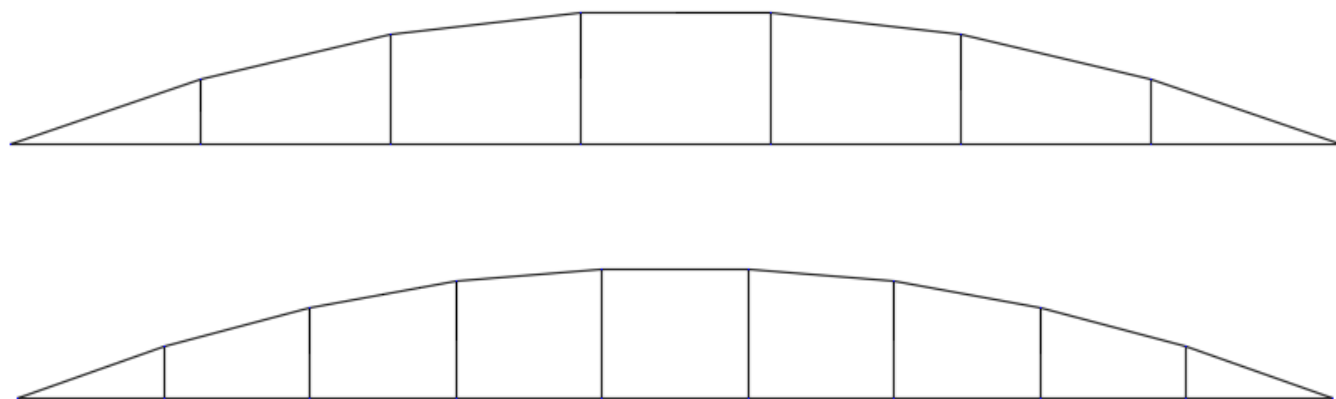


Figura 11 Geometrías alternativas: 6 péndolas espaciadas 8,57 m (arriba) y 8 péndolas espaciadas 6,67 m (abajo)

Buscando el equilibrio óptimo entre estética, comportamiento resistente y optimización del transporte y procedimiento constructivo, decide escogerse la segunda alternativa. De este modo se consigue un mejor comportamiento estético global, con un arco poligonal cuya geometría se ajusta mejor a la antifunicular de las cargas permanentes, unas péndolas que deben resistir menos tracciones y un tablero sometido a flexiones menores. El número de elementos resultantes no es excesivo, y sus dimensiones se encuentran alrededor de 6,67 m, lo que supone una mayor facilidad para el transporte y un fácil manejo durante la fase de montaje. Por último, se consigue una mejor estética en comparación con la alternativa de 6 péndolas.

Tras decidir la separación de péndolas en la primera fase del estudio de soluciones, el cambio de configuración de péndolas que se realizó en la segunda fase del mismo obligó a reestudiar la separación adoptada. Los motivos por los que se cambió de un sistema de péndolas verticales a un sistema de péndolas inclinadas en V o tipo Nielsen se exponen en el siguiente apartado.

La adaptación del modelo anterior de 8 péndolas verticales cada 6,67 m a un modelo con péndolas inclinadas en V supuso el planteamiento de dos alternativas. En la primera de ellas (geometría A), se mantenían los puntos de unión entre las péndolas y las vigas longitudinales, variando la posición de las uniones con el arco, modificando por tanto la posición de las riostras. En la segunda de ellas (geometría B), se mantenían los puntos de unión entre las péndolas y el arco, variando la posición de las uniones con las vigas longitudinales, originando un tramo inicial de tablero donde la distancia entre apoyos es de 1,5 veces la separación entre péndolas. Las siguientes figuras muestran las geometrías descritas:

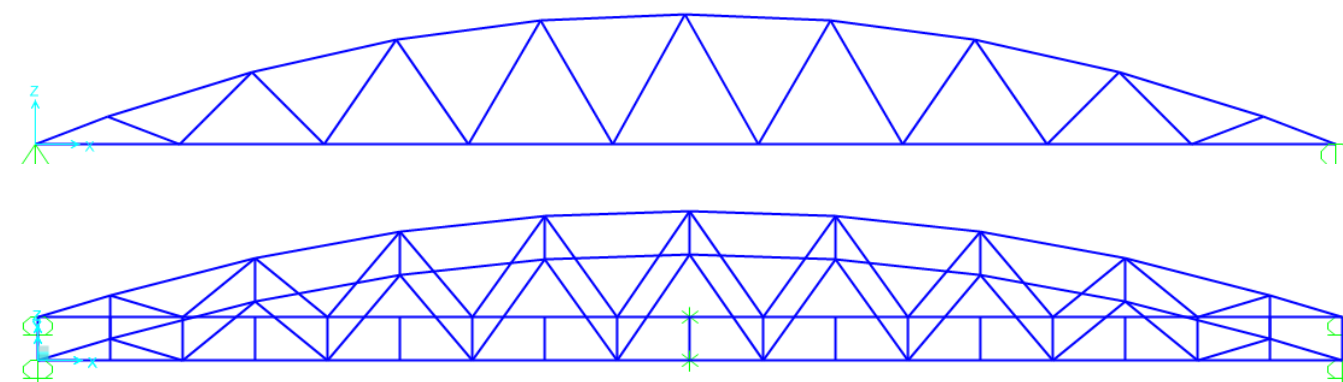


Figura 12 Separación entre péndolas según geometría A

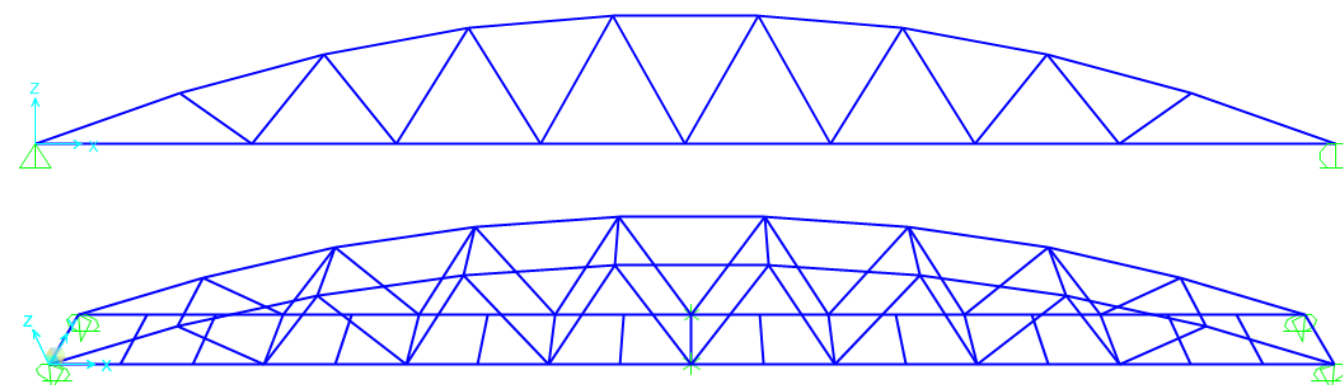


Figura 13 Separación entre péndolas según geometría B

Si bien la geometría A es la que ofrece una mayor regularidad en la separación entre péndolas, la reducida relación flecha/luz origina que las péndolas extremas tengan una inclinación excesiva. Además de perjudicar la componente estética del puente, una inclinación tan pronunciada perjudica en gran medida el comportamiento estructural de dichas péndolas. Por este motivo decide adoptarse la geometría B, si bien el tramo inicial del tablero deberá reforzarse bien con armadura pasiva o bien con un doble pretensado, solución muy común en el mundo del prefabricado que consiste en realizar un primer pretensado en planta mediante armadura pretesa para posteriormente realizar un postesado en obra. Esta operación permite ahorrar grandes costes durante la fase constructiva, disponiendo un postesado común a todos los elementos y reforzando aquellos donde sea necesario. Esta geometría es similar a la que se adoptó en la pasarela del Anillo Verde Ciclista de Madrid sobre la N-VI, la cual se ha definido en el Anejo I: "Estado del Arte" como referencia para el diseño de esta pasarela. La siguiente figura muestra como el tramo inicial de dicha pasarela cuenta con una distancia entre apoyos de 1,5 veces la separación entre péndolas:

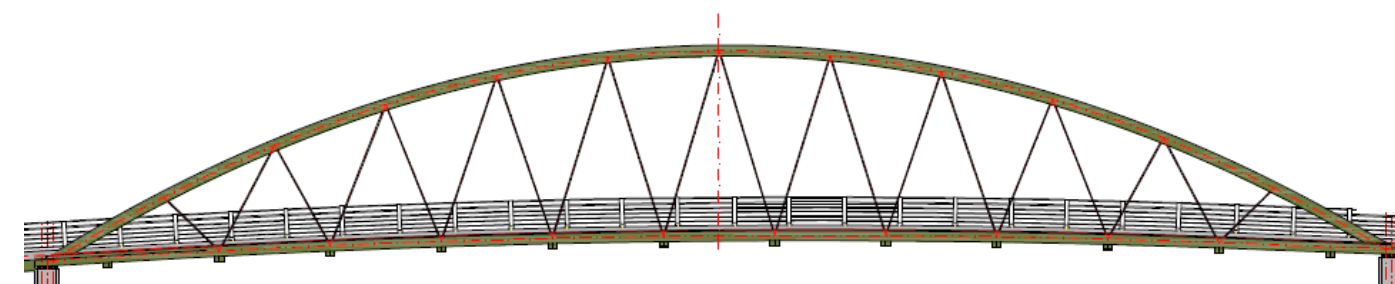


Figura 14 Vista frontal de la pasarela del Anillo Verde Ciclista de Madrid sobre la N-VI [Millanes et al. 2008]

3.5.- Tipología de péndolas

Tal y como se observa en los apartados anteriores, la primera aproximación a la solución estructural mediante un arco atirantado tipo bowstring se ha realizado mediante una configuración convencional de péndolas verticales. Esta tipología de péndolas, si bien tiene como principal ventaja la facilidad constructiva y de unión al resto de elementos prefabricados, conlleva un deficiente comportamiento estructural frente a cargas asimétricas y vibraciones.

En primer lugar, si bien un arco parabólico no es exactamente la forma antifunicular de las cargas correspondientes a su peso propio (carga vertical uniformemente repartida por unidad de longitud de cable), sí que lo es del resto de cargas permanentes actuantes sobre la pasarela (carga vertical uniformemente repartida por unidad de proyección horizontal). Es más, si la relación flecha/luz es reducida, tal y como es el caso del arco proyectado, la catenaria puede aproximarse por una parábola e incluso por un arco de circunferencia. De este modo, puede asegurarse que frente a cargas permanentes y cargas variables uniformes a lo largo del tablero, la forma parabólica del arco es antifunicular de las mismas y por tanto sobre el arco únicamente actúan únicamente compresiones, con ausencia total de flexiones. Si además se trata de un arco atirantado tipo bowstring, el tablero actúa atirantando al arco, trabajando a tracción e impidiendo la transmisión de empujes horizontales a la cimentación. Este comportamiento estructural es independiente de la configuración de péndolas dispuesta, ya sean verticales o inclinadas.

Sin embargo, cuando las cargas verticales se disponen longitudinalmente en la mitad del tablero, las flexiones ya no son resistidas únicamente por el arco en compresión y el tablero en tracción, sino que aparecen flexiones en ambos elementos. El arco deja de ser el antifunicular de la carga, y el traslado de la carga desde el tablero a los apoyos se realiza por distintos mecanismos resistentes, en función de la vinculación arco-tablero y de sus rigideces relativas. Cuando las péndolas son verticales, parte del cortante generado por la carga vertical situada en posición no antifunicular viaja hasta los apoyos como compresión del arco, mientras que otra parte la hace como cortante de arco o tablero, repartiéndose entre ambos elementos en función de sus rigideces respectivas a flexión, y generando momentos flectores en ambos elementos (Ortega et al, 2010).

La respuesta estructural de un arco atirantado tipo bowstring con péndolas verticales frente a cargas asimétricas puede verse claramente en las siguientes figuras, donde se compara el comportamiento teórico con el comportamiento obtenido en SAP2000 frente a una sobrecarga de uso dispuesta únicamente en la mitad del tablero. Se observa como el hecho de que el arco no sea el antifunicular de dichas cargas origina fuertes flexiones tanto en el arco como en el tablero.

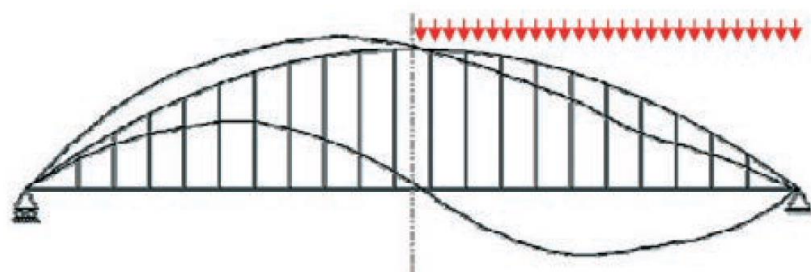


Figura 15 Ley de momentos en bowstring con péndolas verticales frente sobrecargas asimétricas [Ortega et al. 2010]

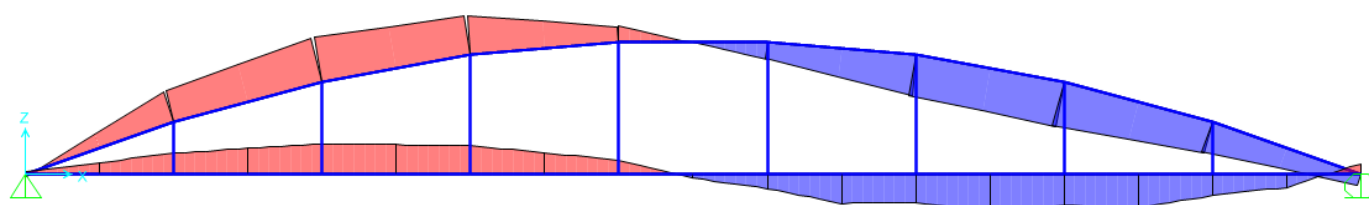


Figura 16 Ley de momentos de la pasarela frente sobrecargas asimétricas

Tal y como indica Ortega en el artículo citado, en 1926 Octavius Nielsen patentó un sistema de péndolas inclinadas según una configuración en V que transformaba el esquema resistente tipo arco en otro tipo viga, comportándose el conjunto de forma más próxima a una viga en celosía. Este sistema de péndolas inclinadas recogía los cortantes derivados de distribuciones de cargas alejadas de la funicularidad, lo que permitía reducir drásticamente las flexiones en el arco y el tablero, que pasaban a trabajar fundamentalmente a compresión/tracción y, por lo tanto, con la máxima eficiencia resistente.

Efectivamente, cuando existen péndolas inclinadas, el traslado de la carga a los apoyos se mejora gracias a la componente inclinada de la fuerza de las péndolas. Como se ha comentado anteriormente, el conjunto arco-péndolas-tablero pasa a funcionar como una viga, cuya alma está formada por las péndolas, y las leyes de momentos flectores en arco y tablero disminuyen notablemente respecto las que se generan en el caso de los puentes con péndolas verticales. Las siguientes figuras muestran la respuesta estructural de un arco atirantado con péndolas inclinadas tipo Nielsen frente a cargas asimétricas, comparando el comportamiento teórico con el comportamiento obtenido en SAP2000.

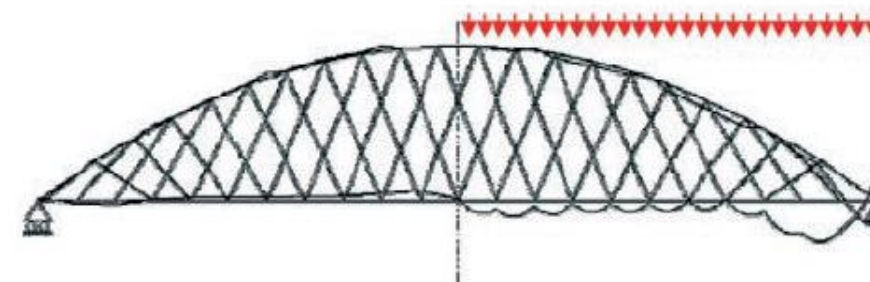


Figura 17 Ley de momentos en bowstring con péndolas inclinadas frente sobrecargas asimétricas [Ortega et al. 2010]

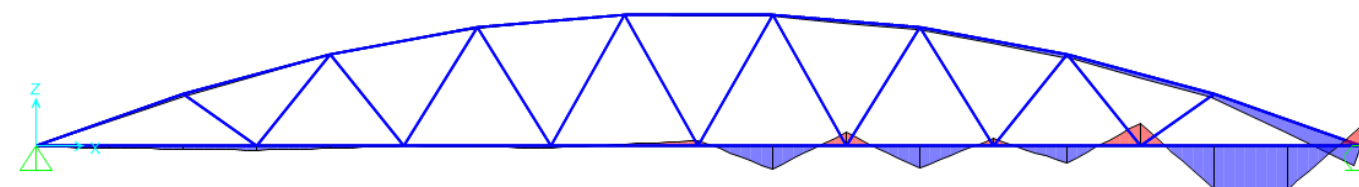


Figura 18 Ley de momentos de la pasarela frente sobrecargas asimétricas

Como contrapunto, y como también se expone en el citado artículo, la principal limitación del esquema tipo Nielsen consiste en la posibilidad de que una o varias péndolas entren en compresión. Este hecho se produce con un esquema de sobrecargas asimétrico, cuando la relación entre sobrecargas y cargas permanentes es elevada, tal y como sucede en estructuras ligeras como las pasarelas. Si bien este aspecto podría ser limitante en el caso de utilizar barras de acero como péndolas, puesto que podría producirse una inestabilidad de las mismas y por tanto dejarían de trabajar, el hecho de disponer péndolas de hormigón con una notable rigidez axial favorece en gran medida la utilización de este sistema. Únicamente deberá comprobarse que los efectos de segundo orden originados por imperfecciones geométricas pueden ser asumidos por la péndola.

Por otro lado, las frecuencias naturales de la pasarela también dependen en gran medida de la configuración de péndolas adoptada. Una de las principales limitaciones en el diseño de una pasarela es su comportamiento dinámico, dado que se tratan de estructuras muy ligeras donde este tipo de fenómenos pueden ser de gran relevancia. Existen numerosos casos en la bibliografía de pasarelas que han tenido problemas en relación con este aspecto, como la pasarela del Milenio en Londres. A falta de realizar un análisis dinámico detallado, aspecto que sobrepasa el alcance de este proyecto, la aptitud de la pasarela frente a vibraciones se va a comprobar en relación a los rangos críticos definidos en distintas normativas, como la IAP-11 o la guía técnica del SETRA “Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading”.

En lo relativo a las vibraciones, en el artículo 7.2.2 de la IAP-11 se indica que se considerará verificado el Estado Límite de Servicio de Vibraciones en pasarelas peatonales si sus frecuencias naturales se sitúan fuera de los dos rangos que figuran a continuación:

- Rango crítico para vibraciones verticales y longitudinales: 1,25 – 4,60 Hz

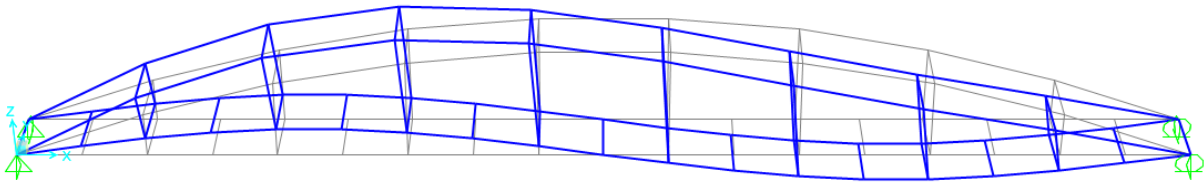
Por otro lado, a modo de referencia, se comparan las frecuencias obtenidas con los valores recogidos en la guía técnica del SETRA, “Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading”, donde se clasifica la respuesta vibracional de la pasarela en función del riesgo de resonancia. Hay cuatro rangos de frecuencias, ordenados de mayor a menor riesgo de resonancia:

- Rango 1: riesgo máximo de resonancia
- Rango 2: riesgo medio de resonancia
- Rango 3: riesgo bajo de resonancia
- Rango 4: riesgo negligible de resonancia

Frequency	0	1	1.7	2.1	2.6	5
Range 1						
Range 2						
Range 3						
Range 4						

Figura 19 Rangos para vibraciones verticales y longitudinales [SETRA 2006]

Cuando se realiza un análisis modal de la pasarela con péndolas verticales, considerando las masas relativas a los elementos estructurales y añadiendo la masa correspondiente al tablero como una masa repartida sobre las vigas longitudinales, se obtiene lo siguiente:



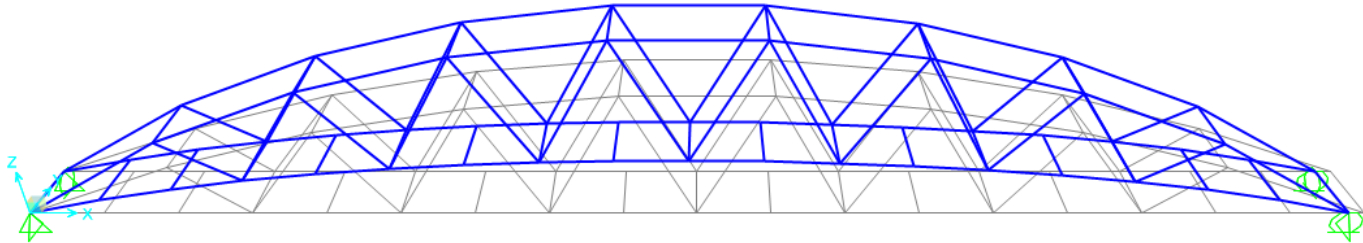
Modo de vibración nº1 – Frecuencia natural: 1,26 Hz

Figura 20 Resultados para el 1º modo de vibración vertical de la pasarela (péndolas verticales)

Como se observa, se trata de una frecuencia longitudinal extremadamente baja, situándose incluso por debajo del rango crítico de la IAP-11 y en el rango 2 (riesgo medio) del SETRA. Sin embargo, también hay que considerar que según el artículo 4.2.9.1 de la IAP-11 se verifica que no es necesaria la comprobación de los efectos aeroelásticos sobre la pasarela dado que la frecuencia fundamental de flexión vertical es mayor de 2 Hz, lo que a nivel de este proyecto implica que cualquier solución que se plantee debe superar al menos dicha frecuencia.

Tras realizar un análisis de sensibilidad, se observa cómo tras aumentar la rigidez del arco y de las vigas longitudinales se consigue aumentar la frecuencia, pero no de forma suficiente. También se observa cómo la tipología de péndolas verticales no rigidiza la estructura en longitudinal, pues un aumento de sección de las péndolas aumenta la masa pero no la rigidez, lo que se traduce en una disminución de la frecuencia natural longitudinal.

Por tanto, teniendo en cuenta todo lo descrito anteriormente cuando se ha tratado el comportamiento estructural frente a cargas asimétricas, parece obvio que un cambio en la configuración de las péndolas supondrá una mejora en el comportamiento dinámico de la estructura. La figura siguiente muestra la frecuencia natural obtenida para el primer modo de vibración longitudinal:

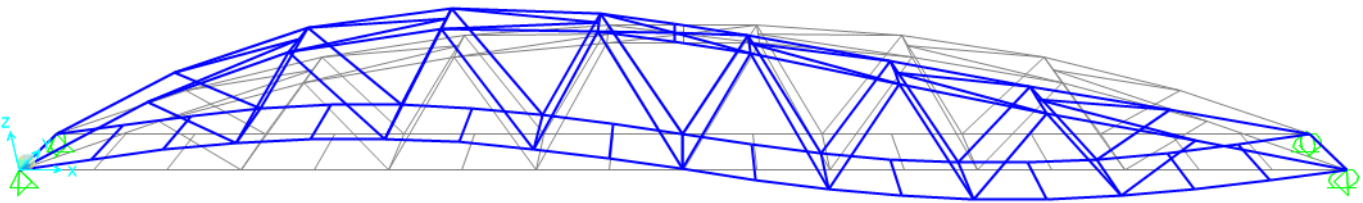


Modo de vibración nº4 – Frecuencia natural: 3,38 Hz

Figura 21 Resultados para el 1º modo de vibración vertical de la pasarela (péndolas Nielsen)

Efectivamente puede observarse cómo la disposición de péndolas inclinadas consigue rigidizar la pasarela longitudinalmente de manera notable, aumentando la frecuencia natural hasta un valor situado por encima de 2 Hz, concretamente en el rango 3 (riesgo medio) según el SETRA. Por último, también debe destacarse cómo, tal y como indica Ortega en el artículo citado anteriormente, la configuración de péndolas tipo Nielsen transforma el esquema resistente tipo arco en otro tipo viga, puesto que el modo de vibración correspondiente al segundo modelo responde al primer modo de vibración longitudinal de una viga mientras que el modo de vibración correspondiente al primero responde al primer modo de vibración longitudinal de un arco.

Por último, debe indicarse que, para verificar el procedimiento de cálculo adoptado, decide hacerse un análisis inverso de la Pasarela sobre la N-VI del Anillo Verde Ciclista de Madrid, sobre la cual indica Millanes (2008) que su frecuencia natural vertical se encuentra cercana a 2 Hz. Para ello, se realiza un modelo en SAP2000 de la pasarela en cuestión a partir de la geometría expuesta en el citado artículo, obteniendo el siguiente resultado:



Modo de vibración nº2 – Frecuencia natural: 1,94 Hz

Figura 22 Resultados para el 1º modo de vibración vertical de la pasarela sobre la N-VI

Como se observa, los resultados obtenidos mediante el análisis inverso son muy cercanos a los esperados, por lo que se da por validado el procedimiento adoptado para obtener las frecuencias propias de la pasarela objeto de este proyecto.

4.- REFERENCIAS

MILLANES, F., MATUTE, L., K., NEBRED, J. (2008). "Pasarelas bowstring del Anillo Verde Ciclista de Madrid" en *IV Congreso de ACHE* (2008. Valencia). Madrid: ACHE.

MINISTERIO DE FOMENTO. (2012). *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. IAP-11. Madrid: Ministerio de Fomento.

ORTEGA, M. et al. (2010). "Proyecto y ejecución de dos arcos mixtos con elementos tubulares y sistema de péndolas tipo network: Puentes Arco de Deba y Palma del Río" en *Hormigón y Acero*, vol. 61, nº257, p. 7-38.

SETRA/AFGC. (2006). *Assessment of vibrational behaviour of footbridges under pedestrian loading*. París: SETRA.