

Anejo V

Proceso constructivo

ÍNDICE

1.-	ALCANCE Y MOTIVACIÓN _____	2
	1.1.- INTRODUCCIÓN _____	2
	1.2.- VERIFICACIONES A REALIZAR _____	2
2.-	MODULACIÓN DE ELEMENTOS _____	2
3.-	PROCESO DE PRODUCCIÓN EN PLANTA DE PREFABRICADOS _____	3
	3.1.- FABRICACIÓN Y PUESTA DEL UHPFRC _____	3
	3.1.1.- Dosificación _____	3
	3.1.2.- Aspectos a considerar en la fabricación y hormigonado _____	3
	3.2.- LOGÍSTICA DE LA ELABORACIÓN DE LOS ELEMENTOS _____	3
	3.2.1.- Fabricación de los módulos del arco _____	3
	3.2.2.- Fabricación de los módulos del tablero _____	6
	3.2.3.- Fabricación de los módulos extremos _____	7
	3.2.4.- Fabricación de las péndolas, elementos centrales y losas de piso _____	8
	3.2.5.- Transporte de los elementos _____	10
4.-	PROCESO DE MONTAJE EN OBRA _____	11
	4.1.- LOCALIZACIÓN DE ÁREAS DE TRABAJO _____	11
	4.2.- LOGÍSTICA DEL MONTAJE DE LOS ELEMENTOS _____	11
	4.2.1.- Sistemas provisionales de sostenimiento _____	11
	4.2.2.- Operaciones de tesado _____	12
	4.2.3.- Equipamientos _____	12
	4.3.- COLOCACIÓN FINAL DE LA ESTRUCTURA COMPLETA _____	12
5.-	VERIFICACIONES ESTRUCTURALES _____	14
	5.1.- ELABORACIÓN Y MANIPULACIÓN DE ELEMENTOS _____	14
	5.1.1.- Armadura pasante por orientación de fibras _____	14
	5.1.2.- Comprobaciones durante los procesos de izado de elementos _____	16
	5.2.- VERIFICACIÓN DE LAS FASES DE TESADO _____	19
	5.2.1.- Tensiones inducidas por la secuencia de tesado _____	19
	5.2.2.- Estimación de las pérdidas instantáneas _____	20
	5.2.3.- Conclusiones _____	21
	5.2.4.- Evaluación de la necesidad de tesado en el arco _____	21
6.-	REFERENCIAS _____	22

1.- ALCANCE Y MOTIVACIÓN

1.1.- Introducción

En el presente documento se pretende definir completamente el proceso constructivo de la pasarela sobre el río Cérvol en Vinaroz (Castellón) partiendo de la prefabricación en planta de los módulos y elementos individuales, siguiendo por el transporte de dichas piezas hasta su ensamblaje, unión y disposición final en el emplazamiento objeto de proyecto.

El grado de detalle planteado permite evaluar el comportamiento de las piezas de UHPFRC en cada instante, de manera que se pueda asegurar la completa viabilidad de la solución adoptada con el condicionante añadido de que la manipulación de los elementos no debe suponer refuerzos adicionales a los calculados para resistir los esfuerzos de servicio.

Cabe indicar que la solución final adoptada parte de un diseño conceptual en donde se tiene en cuenta la modulación idónea para obtener la mayor eficiencia estructural y económica, integrando tanto el comportamiento global como el local de cada elemento. En este aspecto, una de las ventajas del emplazamiento seleccionado para la pasarela es la disponibilidad de espacio suficiente como para ensamblar los distintos módulos en una margen del río antes de su colocación en la posición final.

El motivo por el cual se ha optado por dedicar un importante capítulo del presente Trabajo Fin de Máster al proceso constructivo, es el de poder plantear una alternativa real a los materiales convencionales empleados para el proyecto de esta tipología de pasarelas. Como se indica en el apartado correspondiente al material en el Anejo I: "Estado del arte", a pesar del elevado coste por metro cúbico del UHPFRC, posee unas propiedades mecánicas que conllevan a una importante reducción del volumen de material empleado, y unas propiedades físicas, como su fluidez, que permiten una gran variedad de soluciones y de formas a desarrollar en una planta de prefabricados. Es cuando, aprovechando ambas, las soluciones con este material son realmente competitivas.

Así como se aprovechan dichas propiedades físicas del material, también se debe comprender ciertos fenómenos que no son comunes a otros materiales, como es el efecto de la reordenación de fibras. En este ámbito, la dirección de hormigonado tiene gran influencia pues, como se explica en el capítulo dedicado al material, se debe garantizar una adecuada aleatoriedad en la orientación de las fibras. El hecho de aprovechar las propiedades mecánicas para el cálculo estructural, como es la resistencia a tracción, debe ser consecuente con el proceso de fabricación.

Por otro lado, temas que requieren de un estudio en profundidad, como es el ensayo de las uniones planteadas para la solución adoptada, se delegan a una posterior tesis del Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón.

1.2.- Verificaciones a realizar

Para las etapas de fabricación en planta, transporte, ensamblaje y disposición final en obra, se estudiarán los siguientes aspectos:

- Evaluación de regiones con posible incorrecta reordenación de fibras y por tanto, limitación de la resistencia a tracción a la matriz del hormigón.
- Puntos idóneos y mecanismos a utilizar para el izado, acopio y cimbrado de piezas.
- Estabilidad de las piezas durante la manipulación.
- Logística durante las operaciones de montaje (gestión del espacio disponible, número de operarios necesarios en cada fase...)
- Elección de la secuencia idónea de las fases de tesado.
- Colocación final de la estructura completa

2.- MODULACIÓN DE ELEMENTOS

La división en elementos final de la pasarela se establece a partir de un compromiso entre eficiencia estructural, sencillez de fabricación y economía, de manera que la posición de las juntas frías se localizara en las regiones con menores esfuerzos de flexión pero respetando la logística del proceso de industrialización, acopio y transporte.

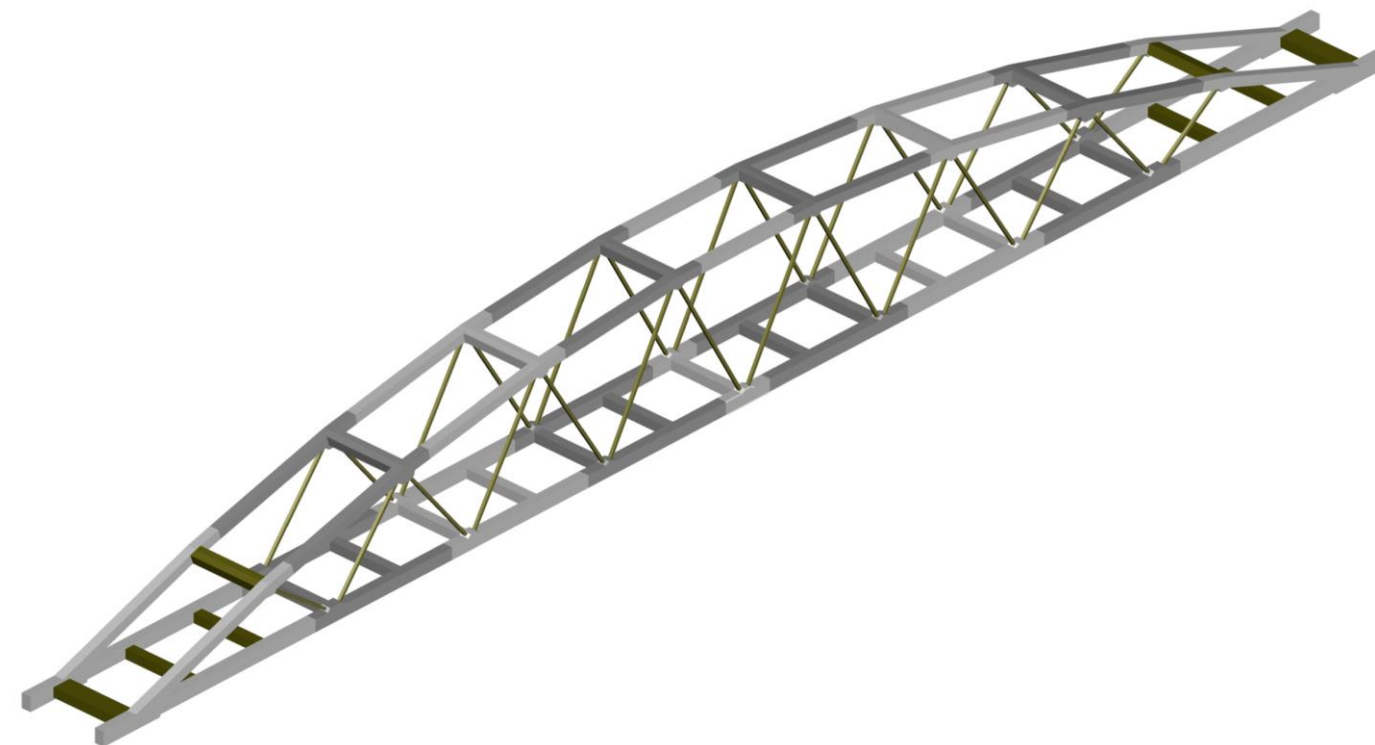


Figura 1 Modulación 3D de elementos de la pasarela

Como se puede observar en la imagen, los módulos completos a prefabricar se muestran en colores distintos. Mientras que los primeros dos módulos, correspondientes a los extremos de la pasarela, son hormigonados con tramo de arco y viga longitudinal conjuntamente, el resto de la pasarela se ensambla a partir de módulos de arcos-riostras y vigas longitudinales-vigas transversales completamente independientes que, posteriormente, se conectan "in situ" mediante las péndolas prefabricadas individualmente. De esta forma, se consigue un total de doce piezas idénticas (seis para el arco y seis para el tablero) a conectar en el centro mediante sendos elementos individuales y completamente horizontales.

Un aspecto importante a destacar y que posteriormente se define con mayor precisión, es el hecho de que, debido al proceso de prefabricado, el primer módulo debe ser hormigonado en dos fases en donde los tramos laterales se hormigonan con moldes simétricos (que no iguales), posteriormente se disponen verticalmente para hormigonar todos los elementos transversales entre ellos en una segunda fase. Dichas piezas deben asegurar la transmisión de rasante entre ambos hormigones que, si bien no precisa de mayor atención que para el resto de la pasarela en las dos vigas transversales y la riostra del arco, requiere de un análisis en la riostra transversal de apoyo por ser un elemento singular en la pasarela.

Como se ha explicado en el capítulo correspondiente a la descripción de la pasarela, los elementos longitudinales vienen materializados con una llave de cortante machihembrada que asegura la transmisión de esfuerzos cortantes entre piezas de sección hueca y las zonas macizadas en las uniones con distintos elementos.

3.- PROCESO DE PRODUCCIÓN EN PLANTA DE PREFABRICADOS

3.1.- Fabricación y puesta del UHPFRC

3.1.1.- Dosificación

Como se indica en el artículo correspondiente al material en el Anejo I: “Estado del arte”, aunque el nivel de control requerido para obtener las propiedades de proyecto sea elevado y se requieran de procesos no habituales para su elaboración, la fabricación del UHPFRC es completamente viable en una empresa convencional de prefabricados pues los equipos de los que ya disponen dichas empresas son aptos para trabajar este material y las materias primas necesarias se pueden obtener fácilmente, destacando entre las mismas su alto contenido en cemento, el empleo de adición activa y aditivos superplastificantes de tercera generación, fibras de elevado límite elástico y áridos síliceos de tamaño máximo de árido inferior a 2 milímetros. Un estudio realizado por el grupo de trabajo del ICITECH (UPV), en donde se realizan hasta 110 dosificaciones distintas, permite partir de los siguientes datos contrastados por la experiencia del equipo en las recientes aplicaciones del material:

Dosificación	Unidad	Nivel alto
Cemento I-42.5 R/SR	kg/m³	1000
Arena sílicea 0-0.5 mm	kg/m³	300
Arena sílicea 0.4-1.2 mm	kg/m³	700
Humo de sílice (pureza > 95%)	kg/m³	150
Pigmento rojo		0/1%
Relación agua/binder		0.185
Relación agua/cemento		0.2
Superplastificante de 3ª generación		2.50%
Fibras largas RC-80/30-B-P	kg/m³	80/0
Fibras cortas 13/0.2 mm	kg/m³	80/160
		2500 kg(m³)

Tabla 1 Dosificaciones empleadas

Con el objetivo de plantear una alternativa real para el proyecto de esta tipología de pasarela frente a la equivalente en materiales convencionales, se escoge la dosificación de nivel alto con mejor comportamiento resistente en búsqueda de una mayor eficiencia del material.

Un aspecto que resulta fundamental es la elección del tipo de cemento. En este caso, el cemento 42.5, para una demanda de agua similar, presenta mayores escurrimientos que el cemento 52.5 y, por tanto, mayor trabajabilidad.

Por lo que respecta a las fibras de alto límite elástico, el hecho de disponer hormigones híbridos proporciona una gran ductilidad al material, por ello, se emplea este tipo de dosificación (80-80 kg/m3) para la mayoría de los elementos de la pasarela, mientras que para las péndolas, dada su gran esbeltez y a que la ductilidad es aportada por la armadura pasiva, se emplean exclusivamente fibras cortas.

3.1.2.- Aspectos a considerar en la fabricación y hormigonado

El bajo contenido en humedad exigido para este material supone una dosificación electrónica del agua y del aditivo y un aseguramiento del empleo de áridos empaquetados con 0% de humedad. El hecho de preparar una dosificación precisa en laboratorio conlleva a posteriores calibraciones con los resultados que se obtengan en la planta de prefabricados que elabora la estructura final.

Una vez tratado el apartado anterior, queda reflejado que el UHPFRC es un material altamente heterogéneo en donde las fibras de alto límite elástico llevan asociado un papel fundamental en su comportamiento y cuya distribución puede verse alterada según el proceso y dirección de hormigonado,

así como del molde empleado. El hecho de computar sus ventajosas propiedades mecánicas en el cálculo seccional (Anejo I: “Estado del arte”), supone definir por completo la disposición de los moldes y el proceso de vertido. En este contexto, aparece el conocido como “efecto pared” por el que las fibras se alinean y que debe aprovecharse mediante el vertido con la finalidad de aumentar el factor de orientación de fibras *k*, que tiene una alta repercusión en las propiedades mecánicas del material. Dicho efecto se acrecienta en hormigones híbridos en fibras (cortas y largas). Este factor se adopta en función de la geometría y tipología de pieza en base a los ensayos llevados a cabo por el equipo de trabajo del ICITECH, encontrándose su valor óptimo entre 1.5 y 2.25 para los UHPFRC sin árido grueso (el empleado para la estructura). Obtener valores por defecto supone una disminución de la resistencia a flexión mientras que valores en exceso suponen una mayor complejidad en el proceso de amasado y las propiedades del material en estado fresco, formándose los conocidos como erizos de fibras.

Por otro lado, previamente a establecer la dosificación definitiva del material, es de suma importancia el realizar un estudio de la compatibilidad entre el cemento, la adición activa y el superplastificante de tercera generación ya que conlleva a importantes fluctuaciones en la resistencia del material.

Por tanto, se debe prestar atención en los aspectos descritos con la finalidad de obtener una adecuada trabajabilidad del material verificando en todo momento que no se produce la segregación de fibras largas que, unida una importante energía de amasado requerida, permita llevar a cabo la fabricación del UHPFRC en una planta convencional de prefabricados sin afectar a las propiedades mecánicas obtenidas mediante la caracterización en laboratorio.

La experiencia creada a lo largo de los últimos años con la proyección de estructuras de UHPFRC, muestra que es necesario adaptar la dosificación para cada tipología de elemento, así como a sus requisitos de fabricación con la finalidad de obtener un material competitivo.

3.2.- Logística de la elaboración de los elementos

La modulación de elementos, descrita en el apartado 2 del presente documento, permite la reutilización de una buena parte de los moldes que se diseñan para la ejecución de la pasarela objeto de proyecto. En los siguientes apartados se describe toda la logística de fabricación de dichas piezas: desde el diseño de los moldes hasta su acopio final para transporte, pasando por todos los procesos intermedios como el hormigonado, definición de puntos de manipulación, verificaciones estructurales...

3.2.1.- Fabricación de los módulos del arco

Como se explica en el capítulo correspondiente a la descripción de la pasarela, la forma del arco nace de ajustar una poligonal a una parábola muy rebajada para esta tipología de estructuras. De esta forma, el ángulo girado por las piezas en cada codo es siempre constante y de valor 5°, por lo que es posible definir un único molde para la elaboración de seis piezas.

3.2.1.1.- Molde y secuencia de hormigonado

En el presente apartado se muestra gráficamente la disposición de los elementos concebidos para materializar la forma de los módulos del arco, dispuestos sobre una bancada plana y con paredes laterales que no se muestra en las ilustraciones con la finalidad de describir los elementos principales diseñados exclusivamente para estas piezas.

Sobre la bancada se dispone un conjunto formado por listones de madera que permiten definir la geometría de la cara inferior de la pieza, mostrando especial atención al acabado del codo de unión entre el arco y las péndolas. Encima del encofrado se colocan los contramoldes que, junto con los aligeramientos internos ejecutados con porexpán, materializan la pieza definitiva. La propia forma en cuña del conjunto facilita el proceso de desencofrado.

La secuencia de hormigonado adoptada es la que se indica con flechas en la figura 3. El encuentro entre el arco y la riostra puede presentar problemas de reordenación de fibras quedando éstas paralelas a la primera dirección de hormigonado y no cosiendo bien el codo de unión. Por ello, tal y como se explica posteriormente en el Apartado 3.3, se dispone de una armadura pasiva adicional que colabore en la resistencia a flexión de la pieza, despreciando la componente correspondiente a las fibras, y que resista por completo el esfuerzo cortante sin la colaboración del hormigón.

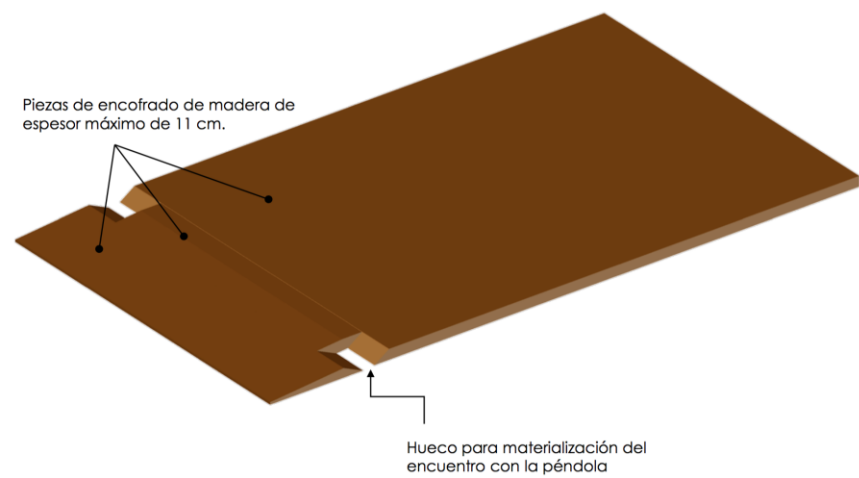


Figura 2 Encofrado base de madera

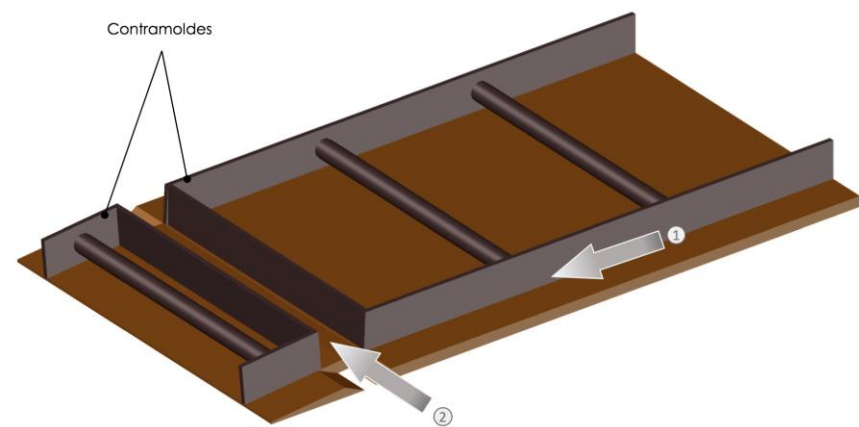


Figura 3 Elementos de contramolde y secuencia de hormigonado

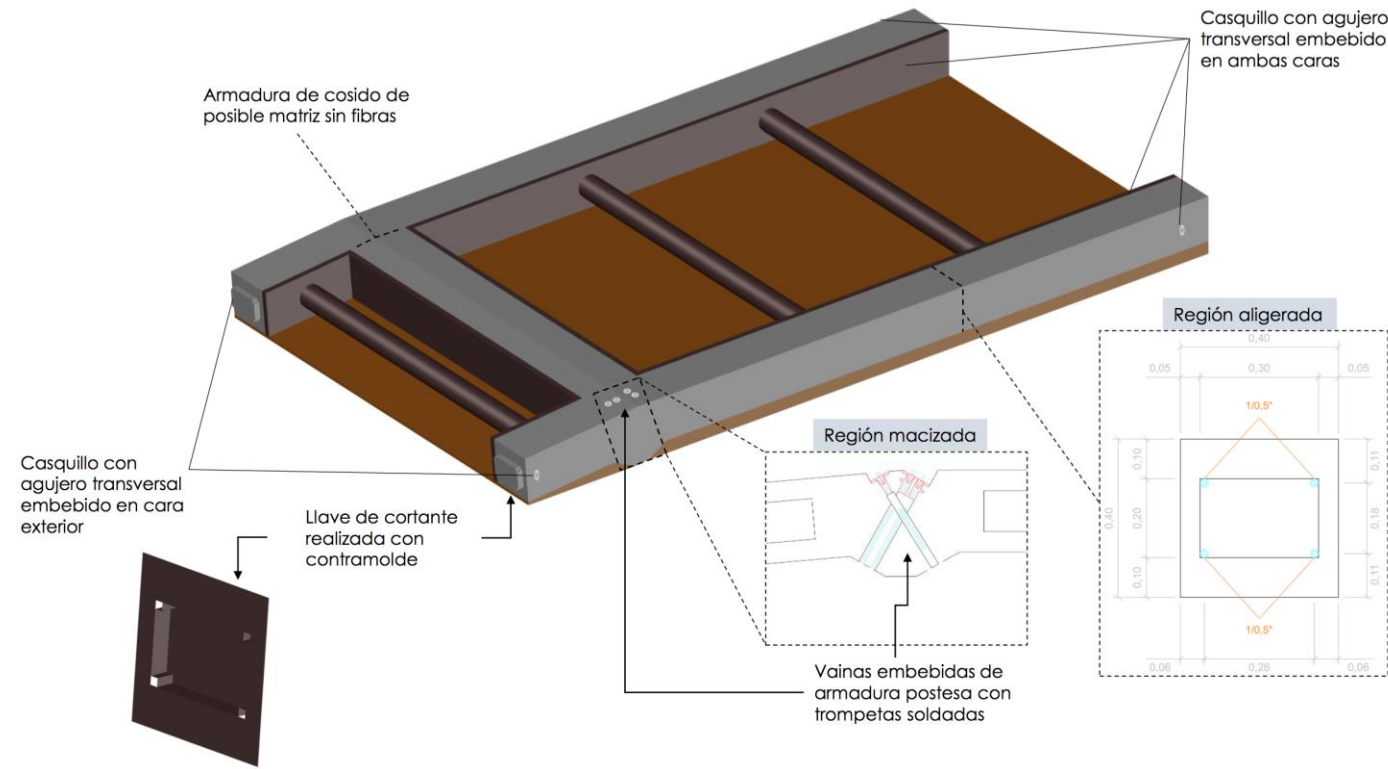


Figura 4 Módulo hormigonado y detalles constructivos

Como se puede observar en la figura 4, mientras que el nudo de unión se encuentra macizado, el resto del módulo está constituido por elementos de sección hueca que se materializa con piezas de porexpán. Además, la cara más próxima al nudo se mecaniza con una llave de cortante que conecta con la siguiente pieza hueca y que presenta unas hendiduras en las esquinas para permitir el paso de la armadura activa del arco.

3.2.1.2.- Izado y acopio

Para llevar a cabo el proceso de manipulación de la pieza, se disponen casquillos mecanizados embebidos en el hormigón. Mientras que en el extremo de la llave de cortante, dichos elementos solo se colocan en la cara exterior, en el extremo opuesto aparecen a ambas caras de los arcos con la finalidad de disponer de una barra de unión entre caras interiores que le otorgue de estabilidad al conjunto durante su manipulación y transporte.

De entre la variedad de piezas disponibles en el catálogo de la casa PHILIPP, se seleccionan las que se muestra en la siguiente figura:

Referencia Galvanizado	Referencia Acero Inoxidable	Tipo RD	Capacidad de carga admisible [kN]		Dimensiones [mm]				Peso [kg/100 uds.]	Embalaje [uds.]
			adm. F _z 0°-45°	adm. F _Q Tensión lateral	diám.D	h	e	diám.d		
71HM12	77HM12VA	12	5,0	2,5	15,0	40	22	8	2,0	200
71HM14	77HM14VA	14	8,0	4,0	18,0	47	25	11	4,0	200
71HM16	77HM16VA	16	12,0	6,0	21,0	55	27	13	6,0	100
71HM18	77HM18VA	18	16,0	8,0	24,0	65	34	13	11,0	100
71HM20	77HM20VA	20	20,0	10,0	27,0	67	35	16	13,0	100
71HM24	77HM24VA	24	25,0	12,5	31,0	77	43	18	18,0	100
71HM30	77HM30VA	30	40,0	20,0	39,5	105	56	23	44,0	50
71HM36	77HM36VA	36	63,0	31,5	47,0	125	68	28	72,0	25
71HM42	77HM42VA	42	80,0	40,0	54,0	145	80	32	110,0	10
71HM52	77HM52VA	52	125,0	62,5	67,0	195	100	40	220,0	5

Referencia RD	Referencia M	Tipo	Capacidad de carga admisible F _z 0°-45° [kN]	h [mm]	e [mm]	Peso [kg/100 uds.]	Embalaje [uds.]
69RD12	69M12	12	5,0	155	22	6,0	10
69RD14	69M14	14	8,0	155	25	9,5	10
69RD16	69M16	16	12,0	165	27	13,0	10
69RD18	69M18	18	16,0	190	34	19,0	10
69RD20	69M20	20	20,0	215	35	26,0	10
69RD24	69M24	24	25,0	255	44	46,0	5
69RD30	69M30	30	40,0	300	55	88,0	5
69RD36	69M36	36	63,0	360	68	145,0	1
69RD42	69M42	42	80,0	425	75	216,0	1
69RD52	69M52	52	125,0	530	95	450,0	1

Figura 5 Casquillos y gazas de elevación del catálogo de PHILIPP [PHILIPP 2010]

De entre el listado, se escogen las dimensiones recuadradas en verde deducidas de las comprobaciones que se tratan en el próximo apartado. Además, el fabricante señala que la operación de izado debe realizarse con al menos una resistencia característica de 15 MPa, lo cual es rápidamente alcanzado por este hormigón tal y como se explicó en el capítulo correspondiente al estudio del material.

Como se muestra en la figura 5, la unión debe reforzarse con una cuantía mínima de armado y ciertas exigencias de curado de la pieza completamente controladas para este material. Por lo que respecta a la armadura de refuerzo, no se exige la forma detallada en la figura, sino que cualquier disposición equivalente es válida. Debido a las reducidas dimensiones de la pieza y con el objetivo de no modificar el diseño estructural para los esfuerzos de servicio, se dispone un único cerco de 12 mm de diámetro bordeando internamente la cara más extrema de la pieza y quedando expuesto a posibles ataques por agente externos pero que resulta irrelevante por no desempeñar ninguna función en servicio.

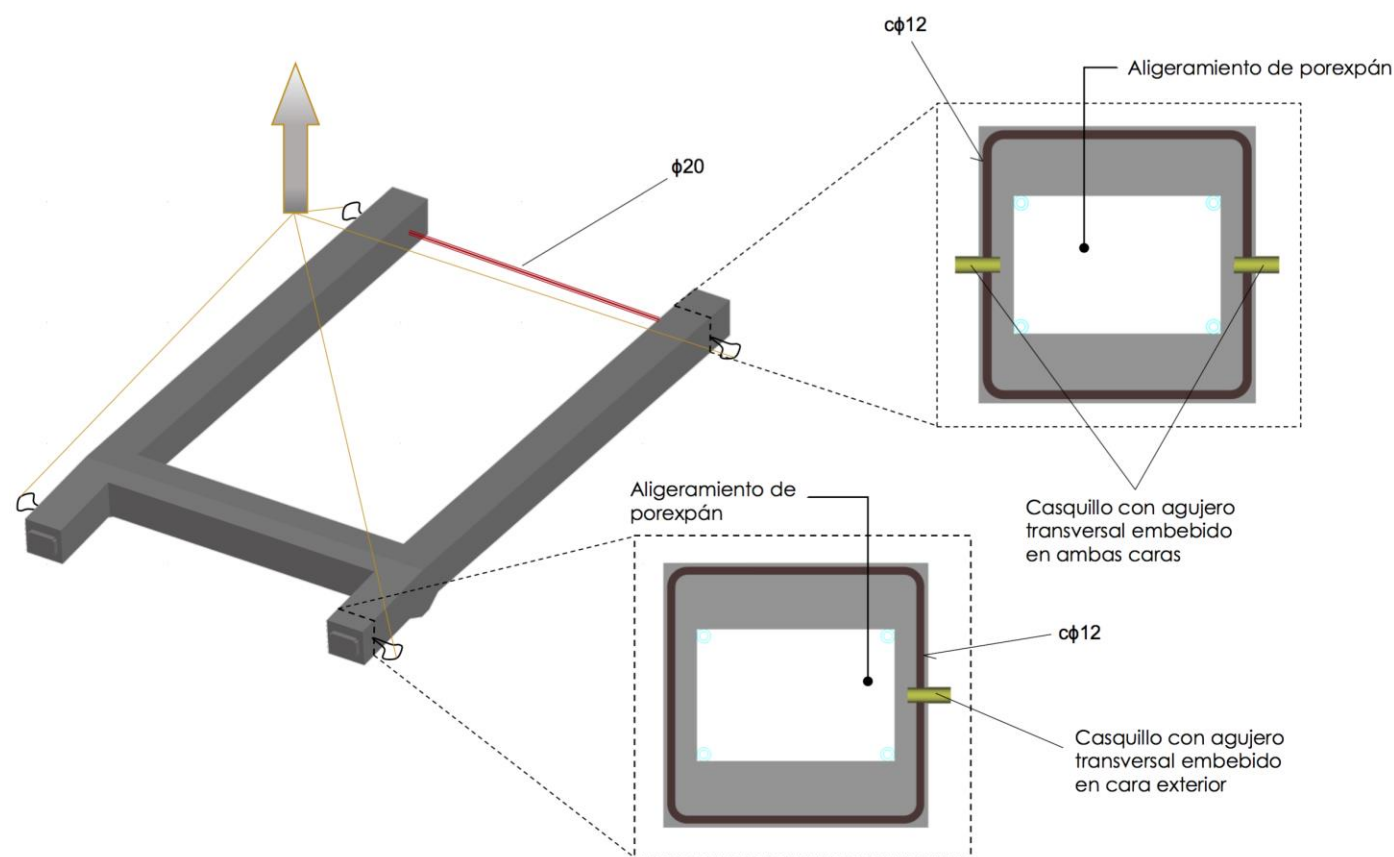


Figura 6 Proceso de izado de la pieza

Por lo que respecta al acopio de los módulos, tanto en la situación previa al transporte como en obra, se disponen sobre cuatro tacos de madera en la superficie plana de los arcos y girados alternadamente 180° para no que no interfieran entre sí los codos de los distintos elementos.

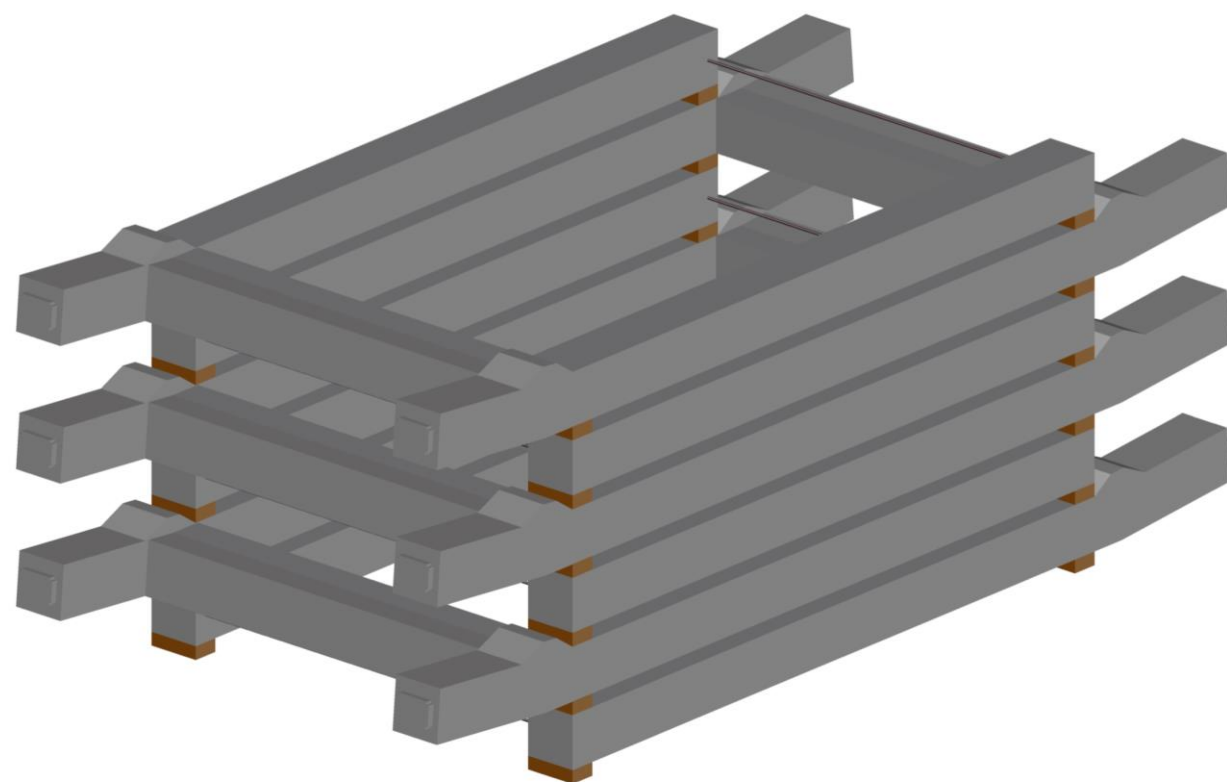


Figura 7 Acopio provisional de los módulos del arco

3.2.1.3.- Alternativa de diseño del codo de unión

La región macizada en donde se materializa la unión con la péndola, consta en su diseño final de vainas embebidas para armadura postesa con trompetas soldadas. Sin embargo, se ha planteado una solución que puede resultar más apropiada puesto que permite una mayor corrección de tolerancias en el proceso de montaje en obra.

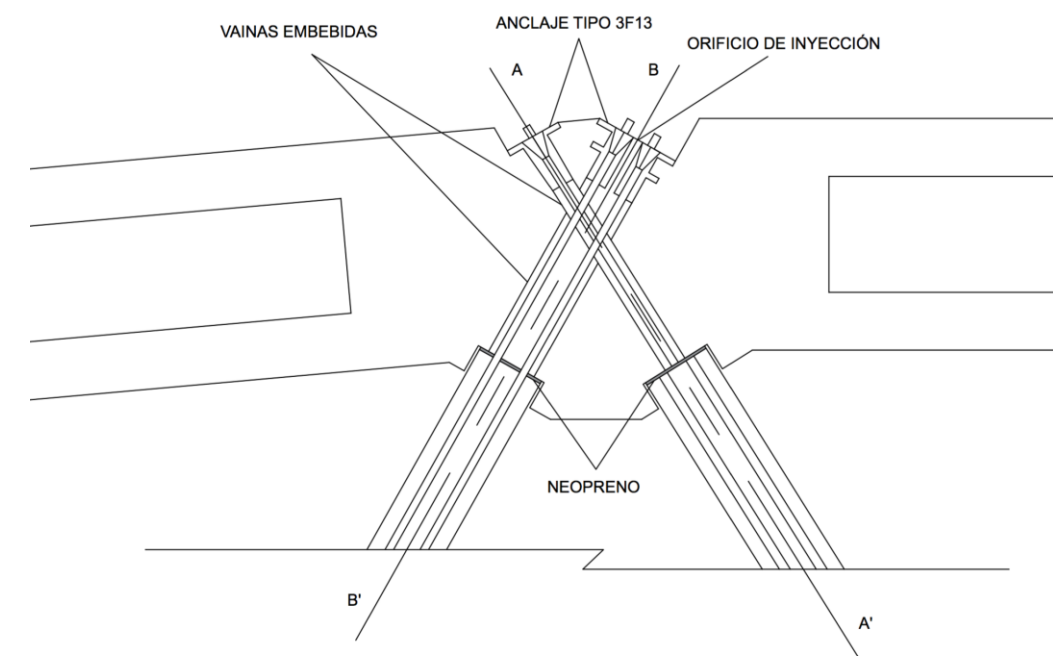


Figura 8 Solución adoptada

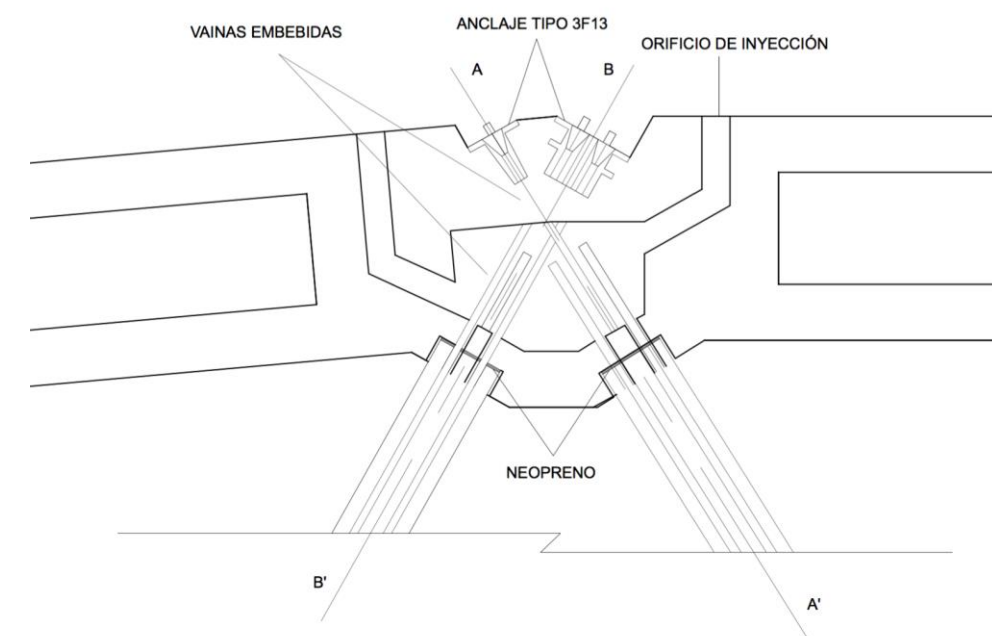


Figura 9 Alternativa planteada

Mientras la inyección final de sellado, una vez aplicada la fuerza de tesado in situ sobre la péndola, se realiza a través de la propia vaina en la solución finalmente adoptada, en la alternativa se propone la materialización de unos conductos que permiten un adecuado aislamiento de la armadura, correcta transmisión de esfuerzos y mayor sencillez en obra. Sin embargo, por tratarse de una solución compleja que requiere de un estudio en profundidad, se delega a unas posibles futuras líneas de investigación.

3.2.2.- Fabricación de los módulos del tablero

El tablero está constituido por dos vigas longitudinales de 50 cm de canto y por una serie de vigas transversales equidistantes 3.33 m entre sí. Al igual que para la elaboración de los módulos de arco, se estudia en este apartado únicamente la parte central de la pasarela en donde se consigue mayor reutilización de moldes, dejando para un apartado final el desarrollo de las fases correspondientes a los dos módulos completos en los extremos de la estructura.

Además de los elementos descritos en el Apartado 2, el tablero consta de losas de piso simplemente apoyadas entre vigas transversales que dotan de total continuidad a la superficie de la pasarela.

3.2.2.1.- Molde y secuencia de hormigonado

La naturaleza de estas piezas es prácticamente idéntica a los módulos de arco tratados en el apartado anterior, con la ventaja de ser completamente horizontales y presentar dos vigas transversales por módulo que le otorgan de la estabilidad suficiente al conjunto.

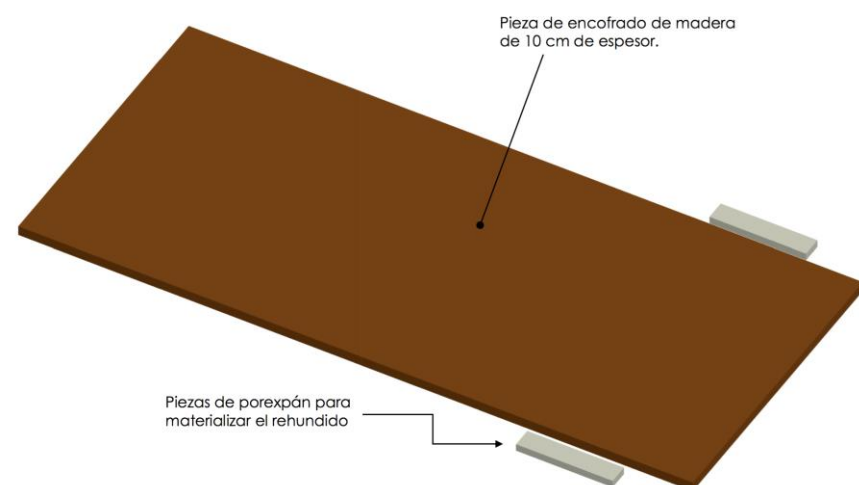


Figura 10 Encofrado base de madera y aligeramientos de porexpán

Como se puede observar, las piezas se hormigonan giradas 180° respecto de su posición final con el objetivo de facilitar la materialización del rehundido en donde se dejan embebidas cuatro barras de 16 mm de diámetro y con extremo mecanizado que permiten la conexión con el pie de pilar dispuesto en las péndolas.

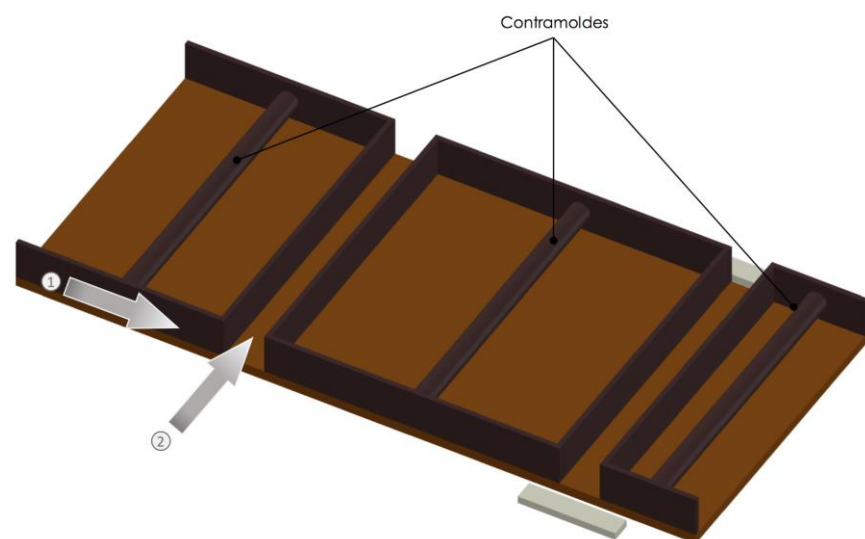


Figura 11 Elementos de contramolde y secuencia de hormigonado

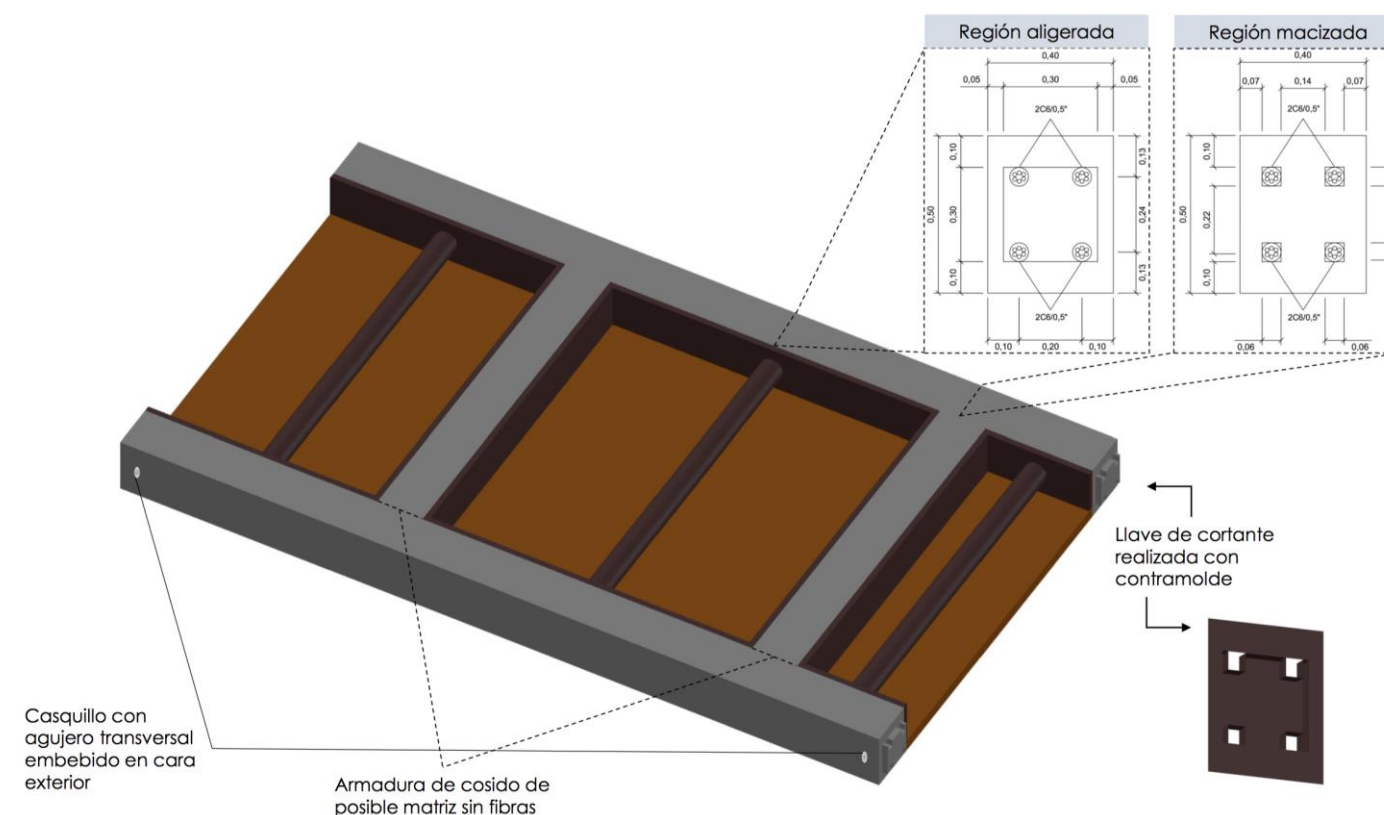


Figura 12 Módulo hormigonado y detalles constructivos

Como se ha comentado para los módulos del arco, la secuencia de hormigonado implica la disposición de una armadura de cosido en la transición entre los elementos longitudinales y transversales como consecuencia de una posible mala orientación de las fibras.

Las regiones macizadas corresponden a los encuentros entre vigas transversales y longitudinales, quedando el resto de las piezas aligeradas mediante nuevos elementos de porexpán. La conexión con la siguiente pieza hueca se realiza, al igual que en los módulos de arco, mediante una llave de cortante ejecutada con contramolde realizado de tal forma que permite la aproximación de las vainas de pretensado hacia el interior de la sección hueca con el objetivo de simplificar el detalle constructivo en los extremos en donde se realiza la inducción del pretensado mediante gatos.

3.2.2.2.- Izado y acopio

El sistema de izado empleado para los módulos del tablero es el mismo que para los módulos del arco a base de casquillos embebidos en el hormigón y gazas de elevación roscadas a los mismos. Se ha verificado que, a pesar de tratarse de elementos más pesados que los del arco, pueden seguir empleándose los mismos modelos de piezas adaptando las dimensiones del cerco de 12 mm de diámetro que atraviesa el casquillo a la geometría de la viga longitudinal.

La singularidad de estos módulos viene marcada por la materialización del rehundido en donde, a su vez, se dejan embebidas cuatro barras de 16 mm de diámetro mecanizadas en su extremo libre para ser posteriormente roscadas al pie de pilar dispuesto en la péndola. Si bien la parte superior de la péndola dispone de una vaina de pretensado, en el extremo inferior se consigue la transmisión de esfuerzos mediante este tipo de detalle constructivo con acero pasivo. Como se explicará en el Apartado 4, una vez fijada la posición de la péndola, se hormigona toda la región in situ mediante un acabado achaflanado que asegura una correcta distribución de tensiones.

Como se muestra en las siguientes figuras, la pieza es elevada girada respecto de su posición final. Previamente al instante de acopio, cada pieza debe ser abatida para reducir el número de operaciones en obra de manera que, ya en la fase de transporte, las piezas se encuentren listas para su montaje final.

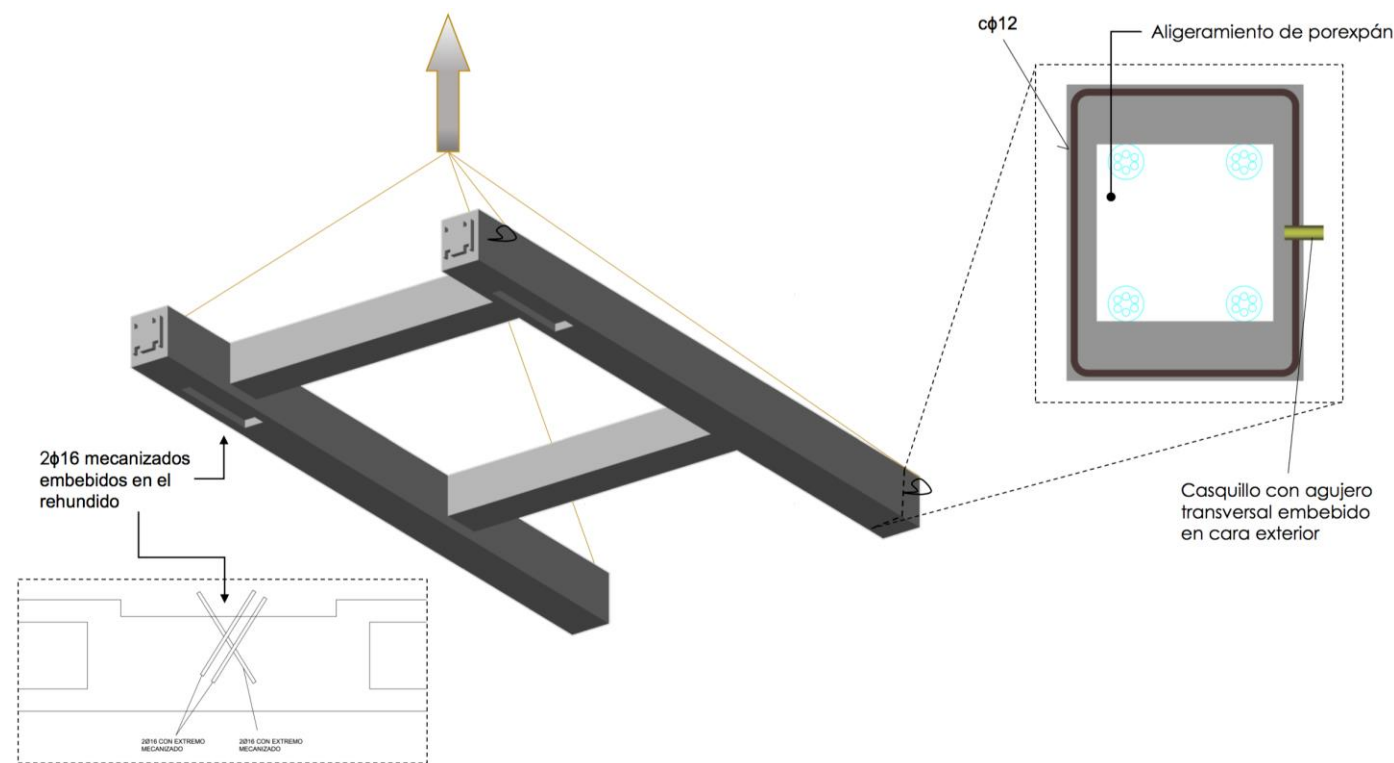


Figura 13 Proceso de izado de la pieza

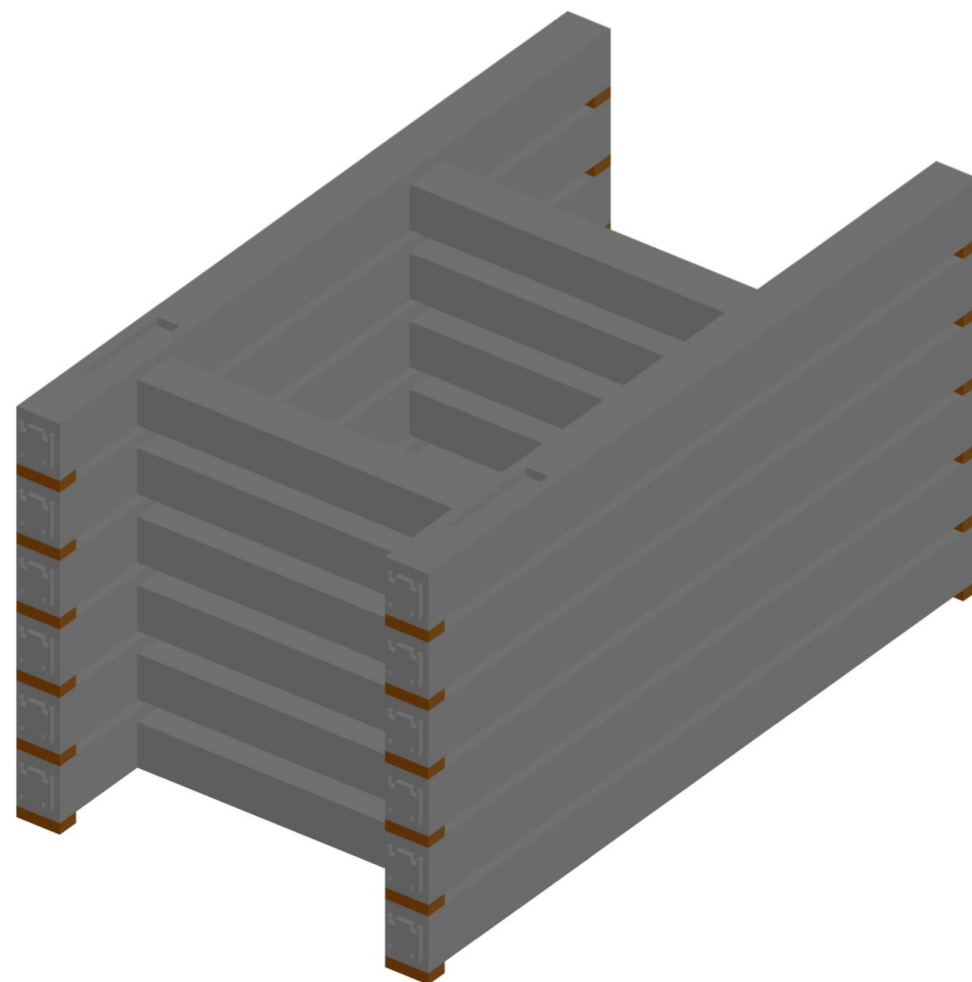


Figura 14 Acopio provisional de los módulos del tablero

3.2.3.- Fabricación de los módulos extremos

3.2.3.1.- Molde y secuencia de hormigonado

La elaboración de los módulos extremos requiere de un hormigonado en dos fases en donde los elementos longitudinales se realizan sobre una bancada basculante que permite, una vez se alcanza suficiente resistencia, disponerlos en posición vertical para posteriormente hormigonar los elementos transversales materializando una junta de rasante.

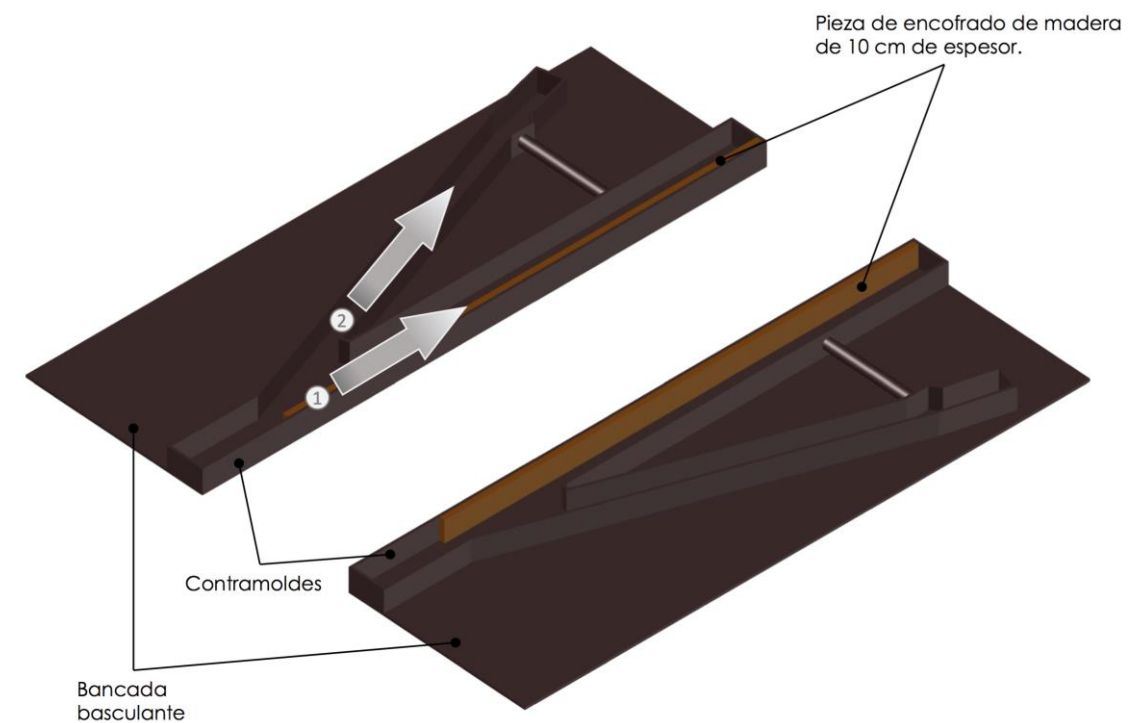


Figura 15 Elementos de contramolde y secuencia de hormigonado

La dirección y secuencia de hormigonado resulta ser favorable para el efecto de reordenación de fibras, por lo que la unión entre la viga longitudinal y el arco puede considerarse como un elemento perfectamente continuo y con completa resistencia a tracción.

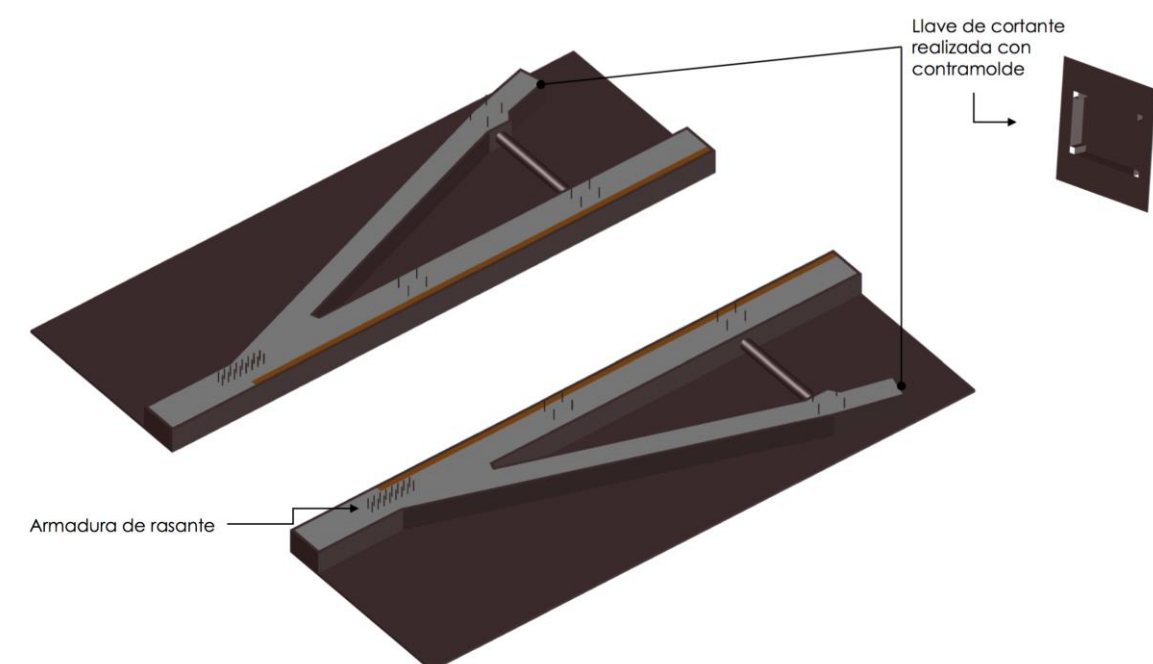


Figura 16 Elementos longitudinales hormigonados y detalles constructivos

Mientras la parte frontal del arco se materializa con una llave de cortante, la viga longitudinal se deja hueca para encajar con el siguiente módulo del tablero.

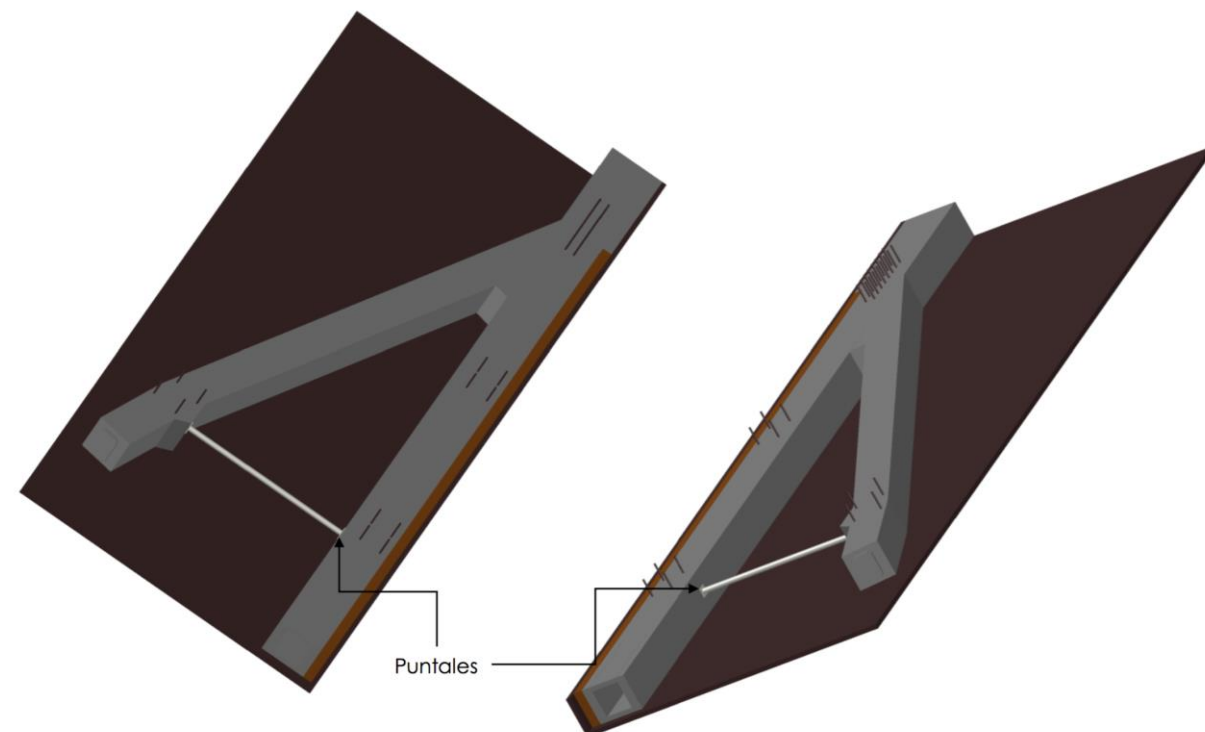


Figura 17 Proceso de posicionamiento vertical mediante encofrado basculante

Una vez ha endurecido la pieza, se disponen puntales entre las vigas longitudinales y los arcos para otorgarle estabilidad al conjunto. En dicho momento, la pieza está preparada para ser dispuesta en posición vertical.

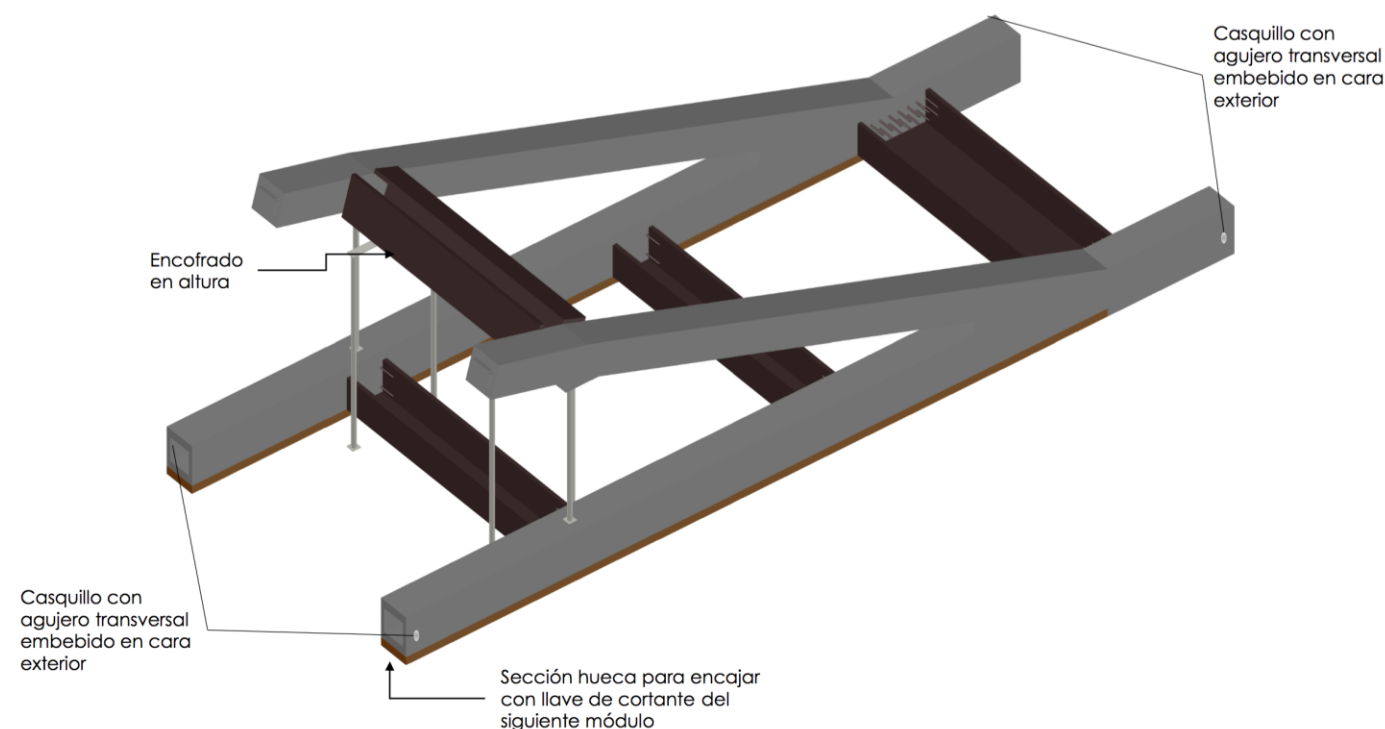


Figura 18 Hormigonado de elementos transversales

Cabe destacar que la riostra debe ser hormigonada mediante un encofrado en altura de cuatro caras, en donde la parte superior deje una franja para hormigonar dado que se trata de una pieza con cierta inclinación.

3.2.3.2.- Izado y acopio

Con la finalidad de emplear la misma tipología de piezas que las seleccionadas para el resto de elementos modulares, se dispone de una doble eslinga en la región bajo el puntal dado que es la zona que asume mayor carga.

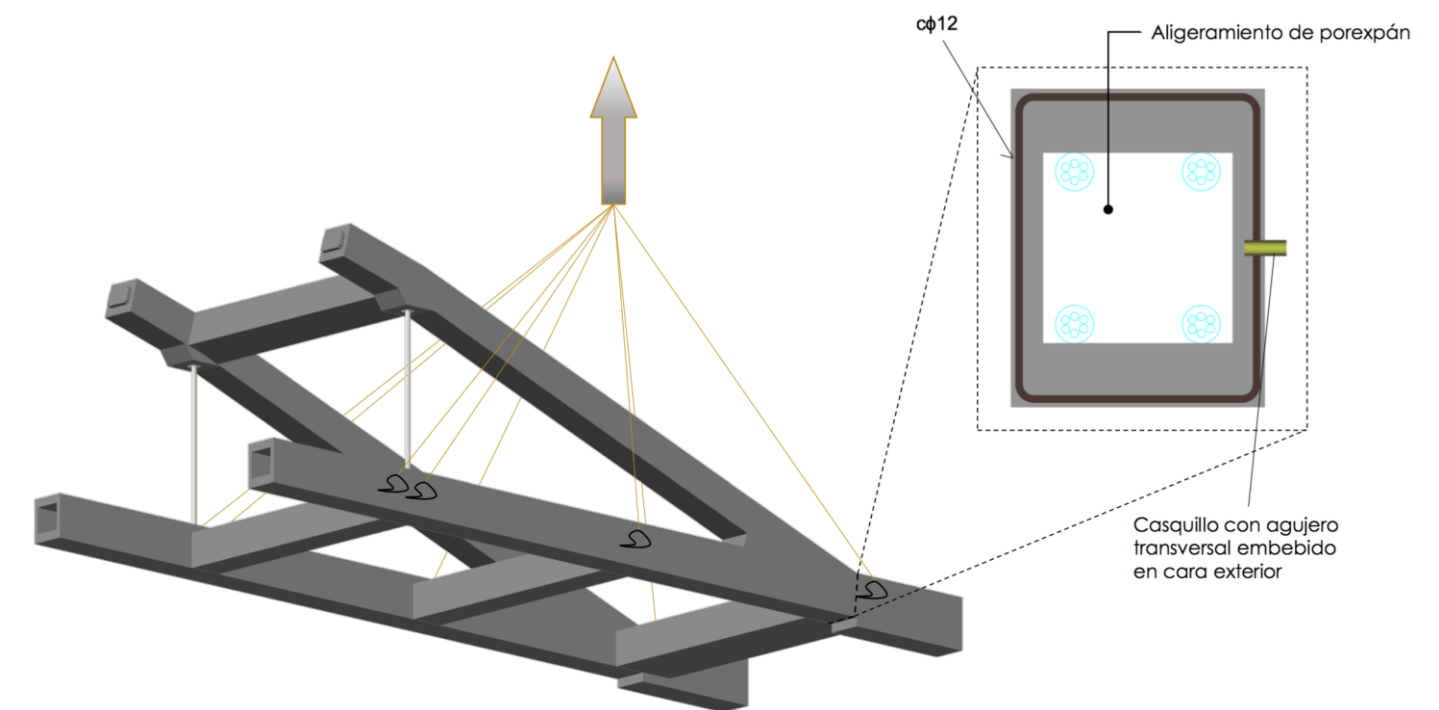


Figura 19 Proceso de izado de la pieza

3.2.4.- Fabricación de las péndolas, elementos centrales y losas de piso

Por lo que respecta a las péndolas, a los elementos de cierre de la pasarela y a las losas de piso son tratados en el mismo apartado por su similitud con el resto de la estructura (en el caso de los elementos centrales) y por su sencillez de hormigonado.

Los detalles constructivos, así como el izado de los elementos, se muestran en las siguientes imágenes.

Como se ha explicado en el Apartado 2, se obtienen un total de 28 péndolas que se pueden subdividir en 4 juegos diferentes de 3.20, 4.45, 5.55 y 6.15 metros de longitud respectivamente. En el extremo de unión con el arco, quedan embebidas las vainas de armadura postesa, mientras que en el extremo inferior, se instala el sistema de pie de pilar comentado en el Anejo V: "Diseño Estructural".

Respecto del sistema de izado, se plantea realizar operaciones en grupos de 4 péndolas rodeadas en sus extremos por fijaciones tipo brida que, por rozamiento, aseguran una adecuada manipulación de las piezas. El hecho de haber definido piezas tan esbeltas con armado pasivo y activo en su interior, limitan la posibilidad de embeber elementos auxiliares para las operaciones del proceso constructivo.

Los elementos centrales correspondientes al arco consisten en dos piezas longitudinales que para su manipulación requieren de la disposición del casquillo y la gaza de elevación en su cara superior a pesar de no ser la dirección idónea de izado. Sin embargo, debido al reducido peso de los elementos, se opta por disponer de los mismos sistemas de elevación. Los elementos centrales del tablero mantienen la misma configuración de las piezas de elevación que para los módulos completos tratados anteriormente.

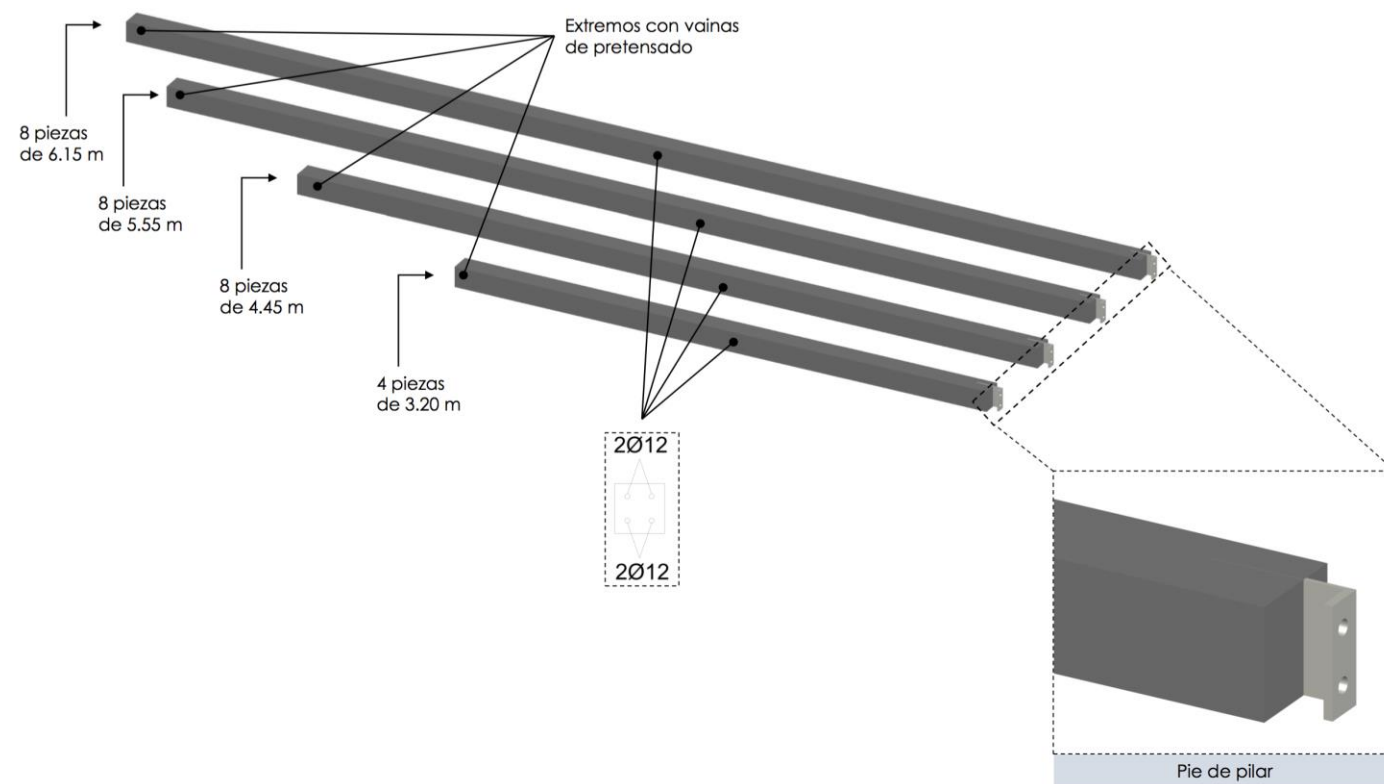


Figura 20 Detalles constructivos de las péndolas

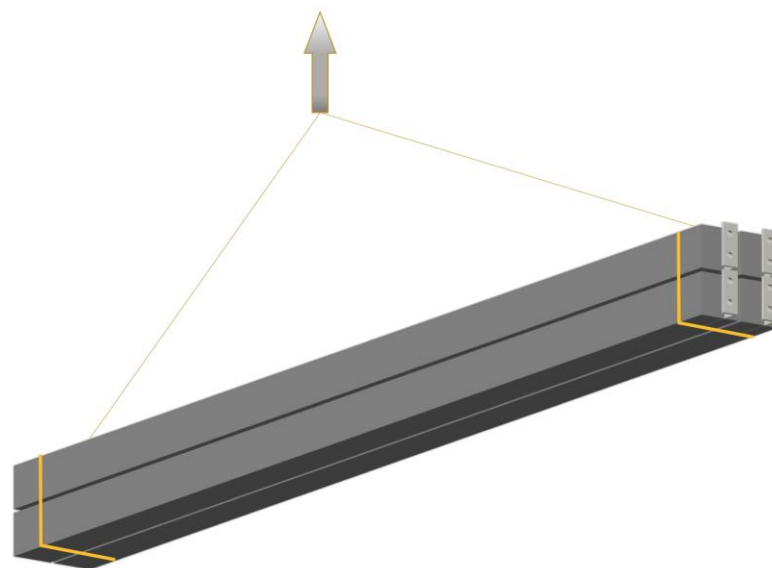


Figura 21 Izado de grupo de péndolas

Mientras que el elemento central de unión de los módulos del tablero dispone de doble cara de llave de cortante, el elemento central de unión de los módulos del arco se trata de una pieza completamente hueca en donde se introducen las llaves de cortantes de los arcos.

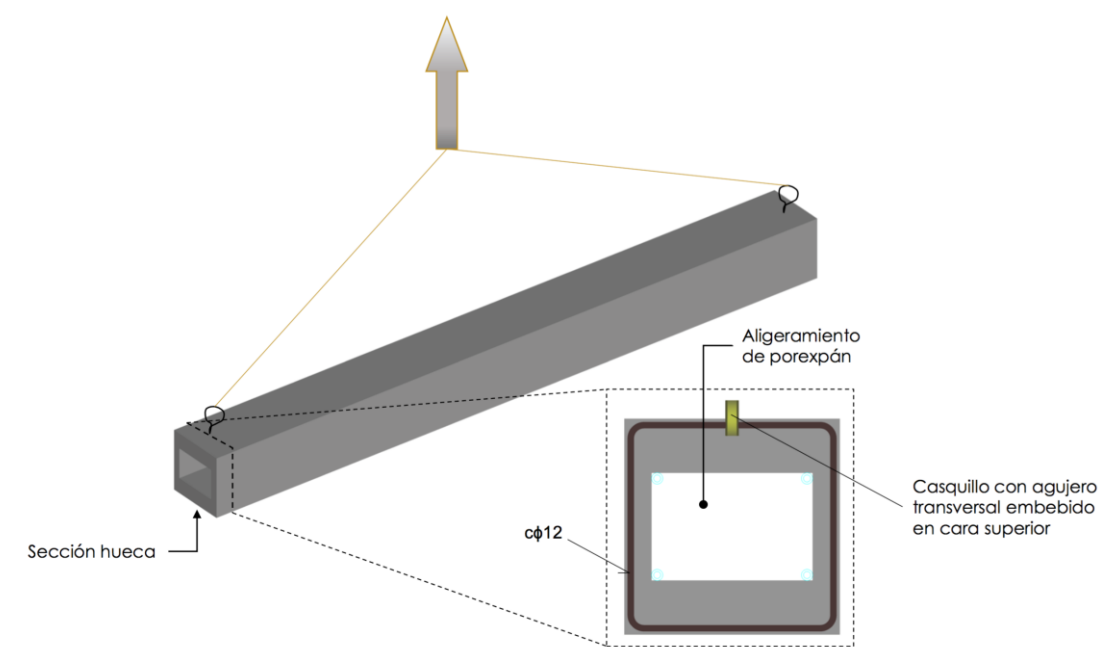


Figura 22 Izado y detalles constructivos de elementos centrales del arco

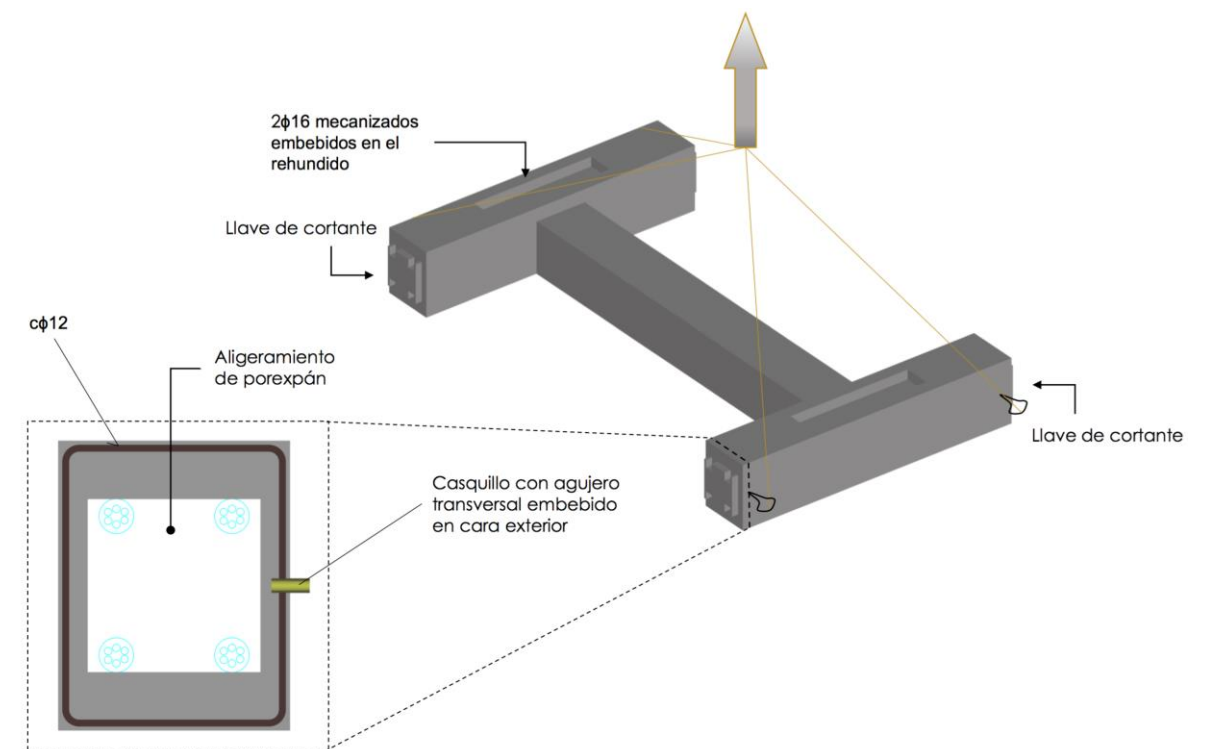


Figura 23 Izado y detalles constructivos de elementos centrales del tablero

Para las losas de piso se obtienen 2 juegos de 10 y 11,50 metros respectivamente. El sistema de elevación empleado resulta ser diferente a los adoptados para el resto de elementos debido a su dimensión. Para llevarlo a cabo, se hace uso de un bastidor elaborado mediante perfiles IPE-160 que conforman un marco rígido del cual cuelgan cuatro eslingas que se conectan a los casquillos embebidos. En este caso, la barra transversal no adopta forma de cerco, sino que se extiende a lo largo de toda la pieza.

Bajo la disposición de los módulos extremos, es posible transportar ambos en una sola operación.

Góndola Tipo	Extensible	Ejes Direccionables	Nº de Ejes	Tara (Kg)	Carga útil (Kg)	Ancho (m)	Largo (m)	Twist-locks (pies)	Marca
A			4	14.950	95.050	2,70	12,71		TRAYLONA
B			4	12.890	69.110	2,50	12,34		LECIÑENA
C	SI	SI	4	14.500	39.400	2,55/3,00	12,42/17,82		GOLDHOFER
D	SI	SI (sin mando)	3	12.360	35.140	2,50	12,90/18,50		GOLDHOFER
E	SI		3	10.940	36.560	2,55	12,57/18,07	20/40	GOLDHOFER



Figura 26 Modelo de góndola de cama rebajada empleado [Grúas RIGAR 2012]

Como se puede observar, la góndola seleccionada para transportar los módulos del tablero, se encuentra dentro de los límites normativos que exigen de transporte especial. Los valores de altura de cama rebajada suelen ser inferiores a los 80 cm que, sumados a los 3.70 m alcanzados por los módulos de arco y tablero en su posición abatida, supone un total exacto de 4.50 m para la altura de cama rebajada más desfavorable.

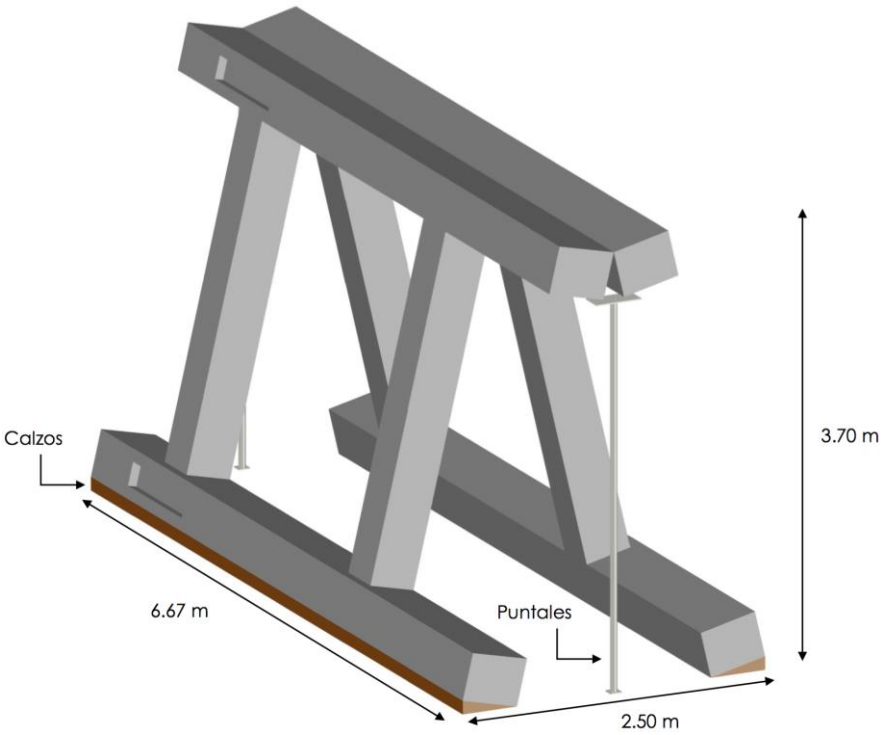


Figura 27 Disposición abatida de los módulos de tablero para transporte en góndola de cama rebajada

Para una longitud de elemento de 6.67 m, el disponer dos módulos longitudinalmente excedería la dimensión máxima de la góndola (12.57 m) que exige de cualquier autorización. Por ello, se opta por transportar dos módulos por trayecto, lo que supone un total de tres viajes en los que se completa el espacio libre con las péndolas y elementos centrales. Debido al peso de las losas de piso, se requiere de un nuevo transporte convencional.

Con todo ello, finalmente se hace uso de un único transporte especial de ancho y un total de cuatro transportes generales en góndolas (tres de cama rebajada y una convencional).

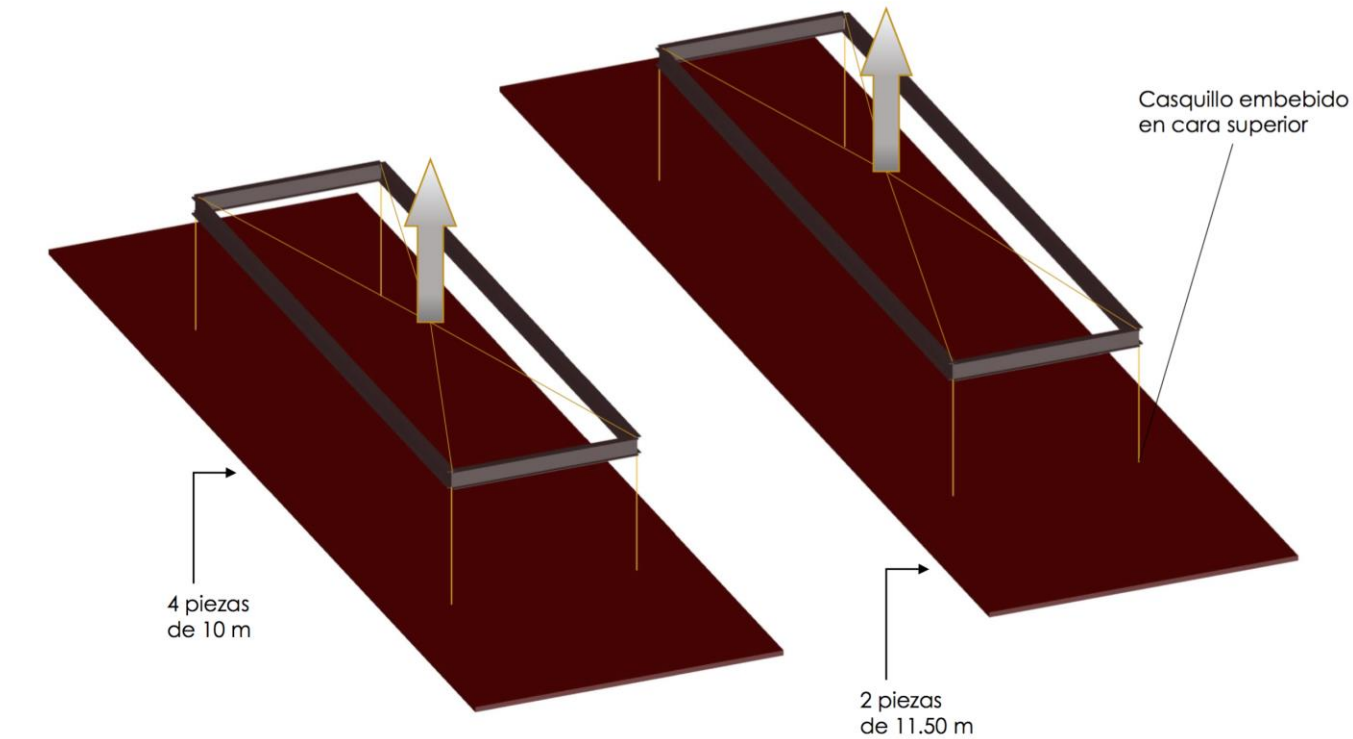


Figura 24 Izado y detalles constructivos de las losas de piso

3.2.5.- Transporte de los elementos

Uno de los objetivos de la ejecución de la pasarela por módulos independientes es el hecho de abaratar costes en el proceso de transporte. Si bien los módulos extremos requieren de una Autorización Específica de transporte especial que permite un ancho máximo de 5 m, el resto de elementos pueden ser transportados sin ninguna de las categorías de transporte especial aunque se empleen góndolas de cama rebajada.

Dada la limitación en anchura de 3 m superada por el ancho total de la pasarela de 3.80 m, se opta por disponer en vertical los módulos de arco y de tablero con un ligero abatimiento y reforzados con calzos y puntales de manera que, sobre una cama rebajada, se respeten los 4.50 m máximos en altura.

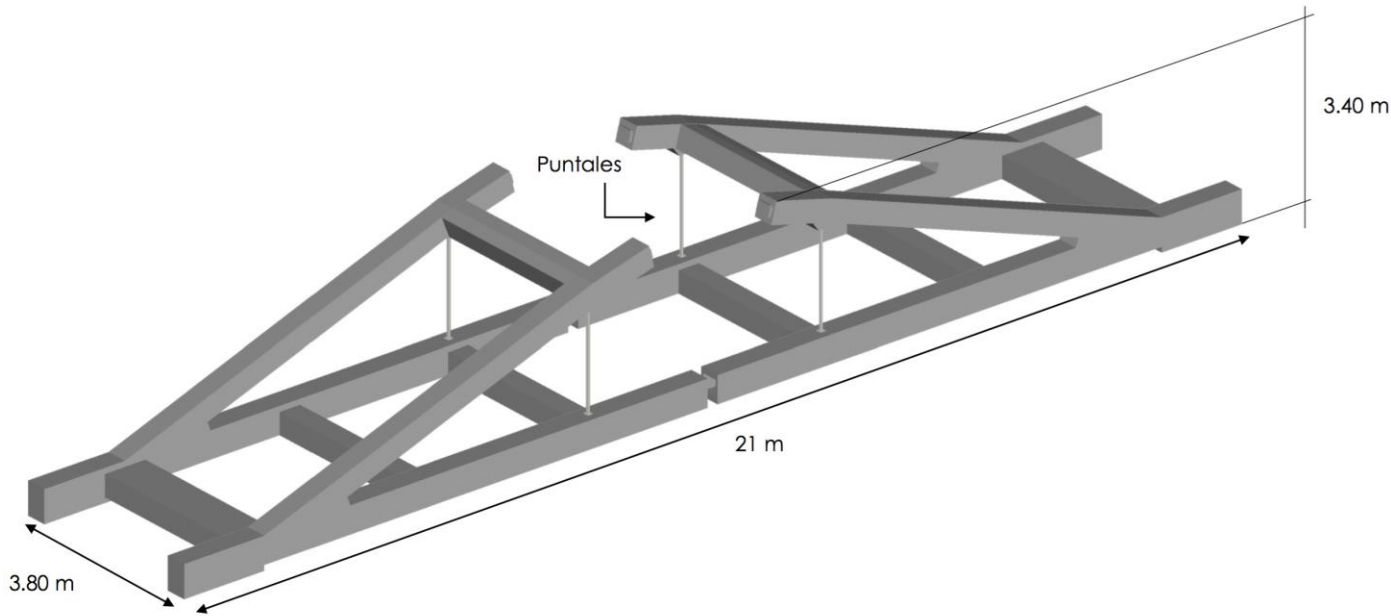


Figura 25 Disposición de módulos extremos para transporte especial

4.- PROCESO DE MONTAJE EN OBRA

Una vez definido el proceso de fabricación de las piezas, así como el izado, acopio y transporte de las mismas, se pretende definir completamente el proceso constructivo relativo al montaje de los elementos modulares "in situ".

4.1.- Localización de áreas de trabajo

El emplazamiento de la obra dispone de extensas áreas para acopio y montaje de la estructura. La distribución del espacio se muestra en la siguiente figura:

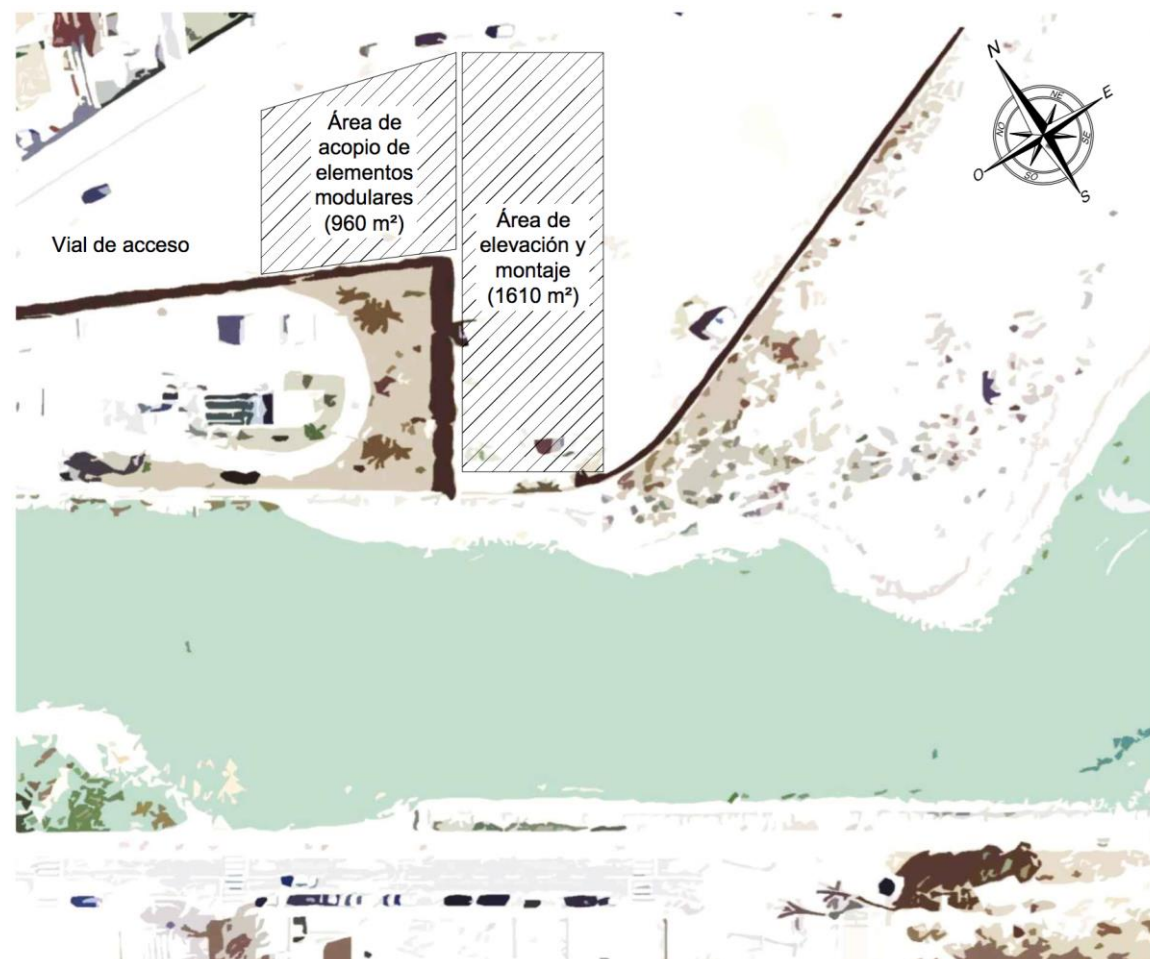


Figura 28 Localización de superficies de trabajo

Como se puede observar, se dispone de un amplio y cómodo vial de acceso con el área de acopio de elementos muy próxima a la zona de montaje.

4.2.- Logística del montaje de los elementos

Las operaciones de montaje se realizan de manera que la pasarela quede orientada en dirección noreste con el objetivo de facilitar las operaciones de izado de las grúas para su disposición final sobre el río Cérvol.

4.2.1.- Sistemas provisionales de sostenimiento

Los diferentes módulos se van enfrentando entre sí asegurando su estabilidad mediante sistemas provisionales de sostenimiento y piezas de madera que permiten el montaje de la estructura a cierta altura sobre el terreno facilitando las operaciones de ensamblaje y tesado.

4.2.1.1.- Disposición de los módulos extremos

Debido a que los módulos extremos son los de mayor peso y dimensión, son los primeros en disponerse en situación de máximo despeje en el área de montaje, permitiendo un adecuado posicionamiento de los mismos.



Figura 29 Disposición de módulos extremos

4.2.1.2.- Disposición de los módulos del tablero

Los módulos del tablero se disponen a continuación de los módulos extremos empleando, del mismo modo, piezas de madera bajo los extremos de cada módulo. Tras esta operación, se procede a la disposición de andamios en forma de pórtico con dos torres laterales y una pasarela intermedia que permita realizar operaciones en altura. Además, se preparan los puntales que posteriormente sustentan los módulos de arco.

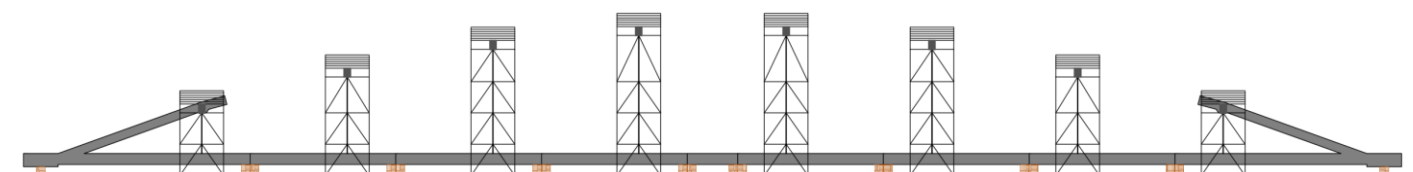


Figura 30 Disposición de los módulos del tablero

4.2.1.3.- Disposición de los módulos del arco

Además de los puntales provistos para sustentar los módulos de arco, la unión entre los distintos elementos se asegura mediante una abrazadera localizada en la llave de cortante materializada en el proceso de fabricación. Dicha unión por rozamiento junto con el puntal, resulta ser suficiente para configurar la estructura parabólica.

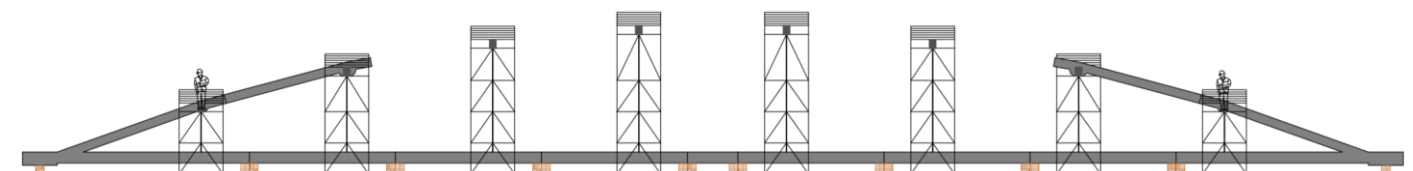


Figura 31 Disposición de los módulos del arco

4.2.1.4.- Disposición de las péndolas

Con la ayuda de una grúa, las armaduras postesas de las péndolas se enfilan en el codo de unión del arco respetando cierta holgura que permita su posterior descimbrado libre. En el extremo inferior se introduce la pletina del pie de pilar en las barras mecanizadas embebidas en las vigas longitudinales con una nueva holgura que impida la interacción con la estructura del arco en la siguiente fase.

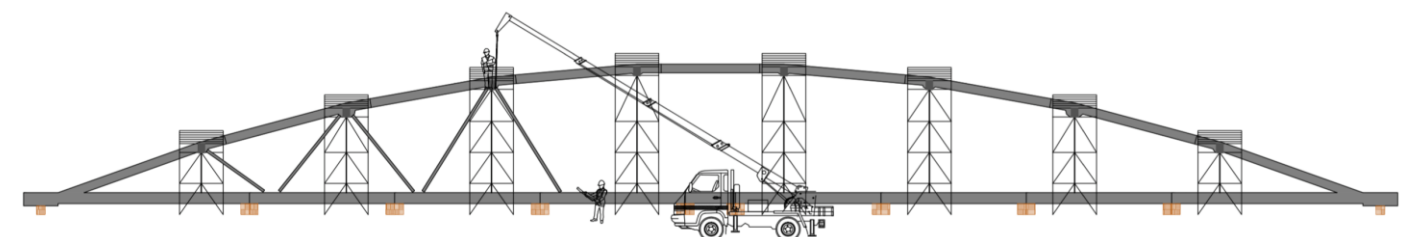


Figura 32 Disposición de las péndolas

4.2.2.- Operaciones de tesado

4.2.2.1.- Primer tesado parcial de las vigas longitudinales

Una vez se han dispuesto libremente la totalidad de las péndolas, se procede a la aplicación de un pretensado inicial a las vigas longitudinales correspondiente al 10% del esfuerzo requerido en servicio que tiene por objetivo el compensar los posteriores empujes horizontales del arco tras su descimbrado.

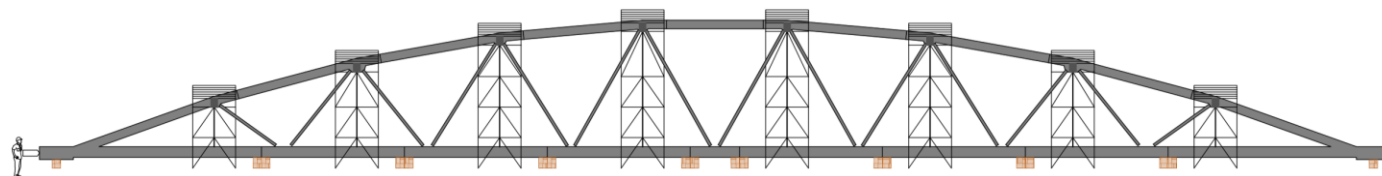


Figura 33 Tesado parcial de las vigas longitudinales

4.2.2.2.- Tesado completo del arco

Una vez se asegura que los arcos no están conectados a las péndolas, se procede a su desapuntalamiento de manera que tras cierto descenso, se configure una estructura autoportante conectada únicamente con las vigas longitudinales que asumen el empuje horizontal. En este instante se procede con el pretensado completo del arco asegurando la compresión completa de las uniones bajo cualquier acción durante la construcción.

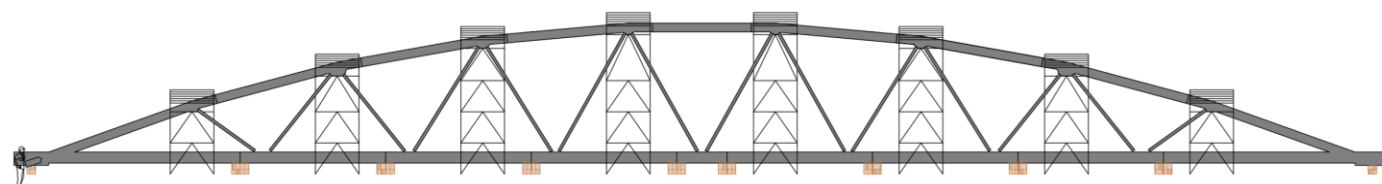


Figura 34 Tesado completo del arco

4.2.2.3.- Tesado completo de las péndolas

Tras el tesado del arco, se enfilan y pretensan las vainas de armadura postesa sellando dicha unión con UHPFRC de fibras cortas de alto límite elástico.

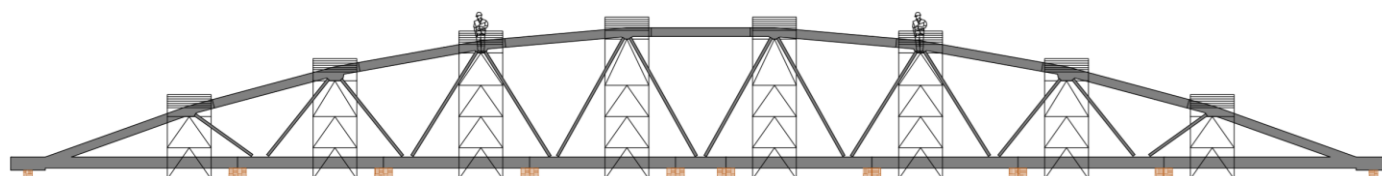


Figura 35 Tesado completo de las péndolas

Seguidamente, se procede a la completa fijación de los elementos que conforman el pie de pilar, a la instalación de los montantes de la barandilla y a su sellado final.

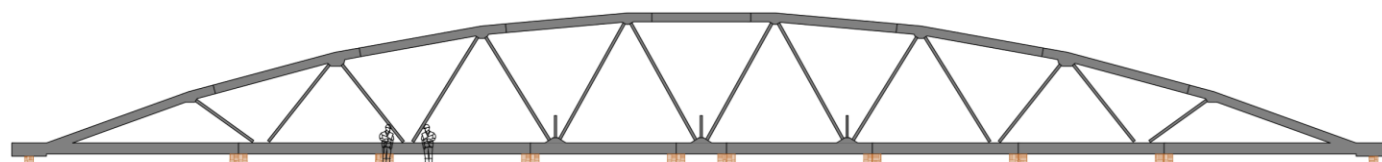


Figura 36 Hormigonado de pie de pilar

4.2.2.4.- Segundo tesado completo de las vigas longitudinales

Finalmente, se tesan por completo las vigas longitudinales estableciéndose el comportamiento de arco bow-string gracias a que se produce el levantamiento de la estructura debido al tesado.

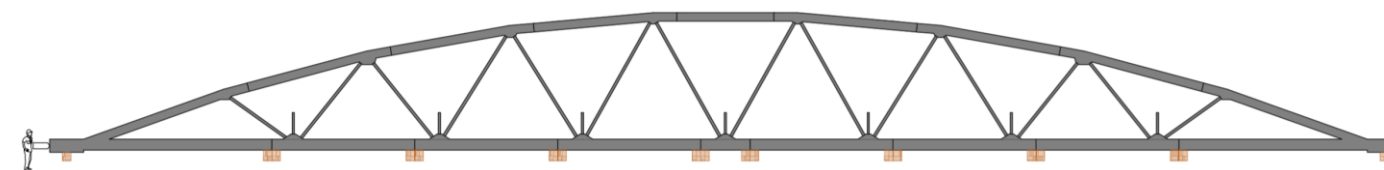


Figura 37 Tesado completo de las vigas longitudinales

Tras esta operación se retiran los apoyos intermedios con la finalidad de que el comportamiento estructural sea el de servicio.

4.2.3.- Equipamientos

4.2.3.1.- Disposición de las losas de piso

Con la ayuda de una grúa, se dispone la totalidad de las losas de piso.

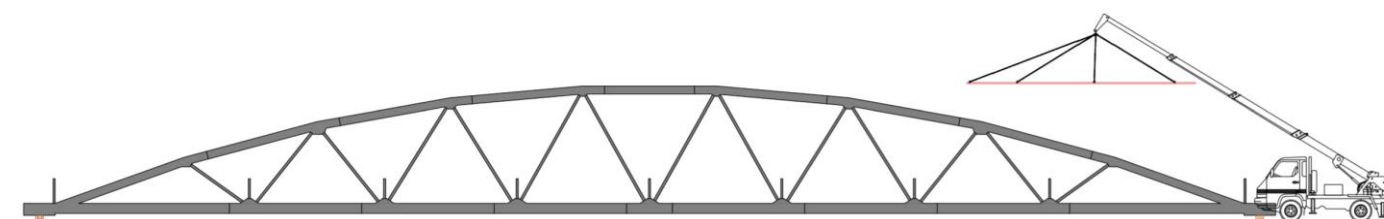


Figura 38 Disposición de las losas de piso

4.2.3.2.- Disposición de las barandillas

Finalmente, tras la instalación de las barandillas, la estructura está preparada para ser trasladada a su posición final.

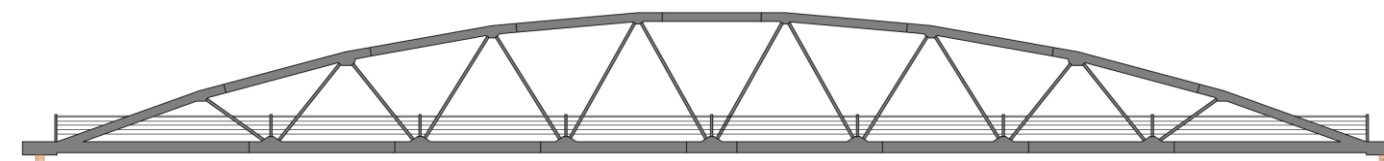


Figura 39 Disposición de las barandillas

4.3.- Colocación final de la estructura completa

Para un peso total de pasarela superior a las 100 toneladas, se ha debido optar por el empleo de cuatro grúas similares al modelo LTM 1400-7.1 de LIEBHERR que permiten la elevación de 35 toneladas para distancias entorno a los 30 metros que resulta ser idóneo para esta pasarela. Por otro lado, los anchos especificados por el fabricante permiten la disposición lateral de las grúas en el espacio del que se dispone para montaje.

Esta configuración determina la necesidad de disponer de una mota en el cauce del río Cérvol que no resulta ser de gran cubricaje debido al reducido calado de la desembocadura.

Por lo tanto, las cuatro grúas parten de una posición inicial en la que extienden el brazo hasta 30 metros de longitud para elevar la pasarela desde cuatro puntos abatiendo la posición hasta 180° para recorrer un total de 60 metros y que permite la disposición de la pasarela en su posición final.

La mota ejecutada, las especificaciones de las grúas empleadas, así como las secuencias del proceso de izado, se muestran en las siguientes figuras.



Figura 40 Disposición de mota provisional

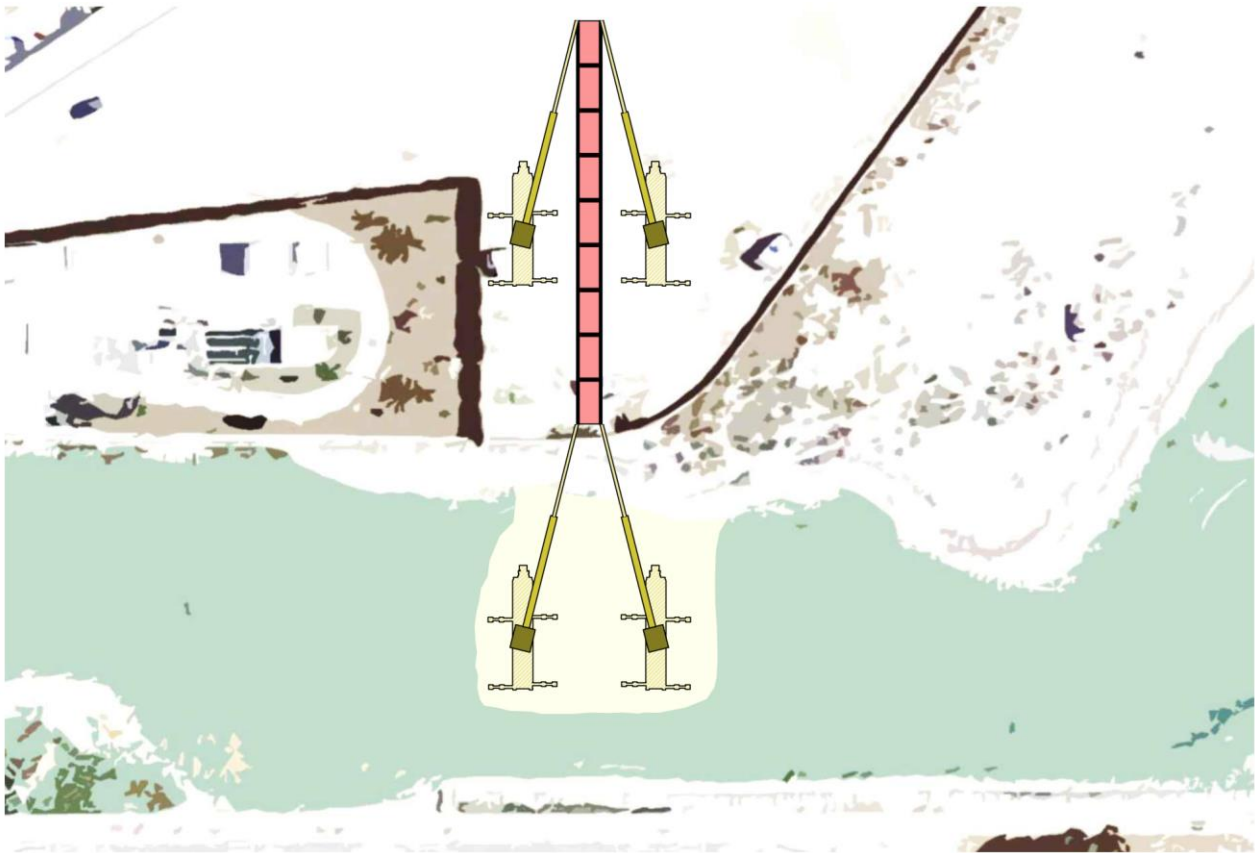


Figura 42 Posición inicial de la pasarela

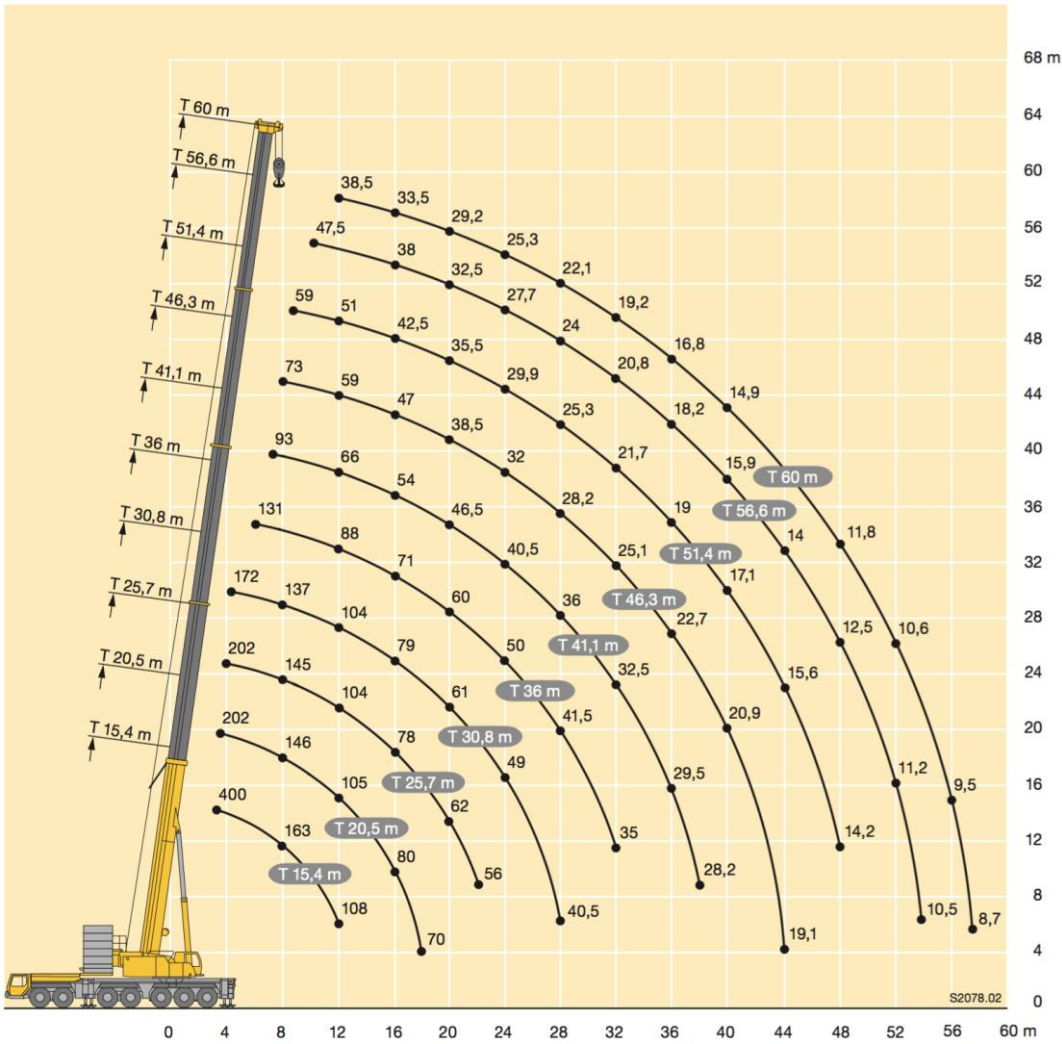


Figura 41 Características de las grúas [LIEBHERR 2012]

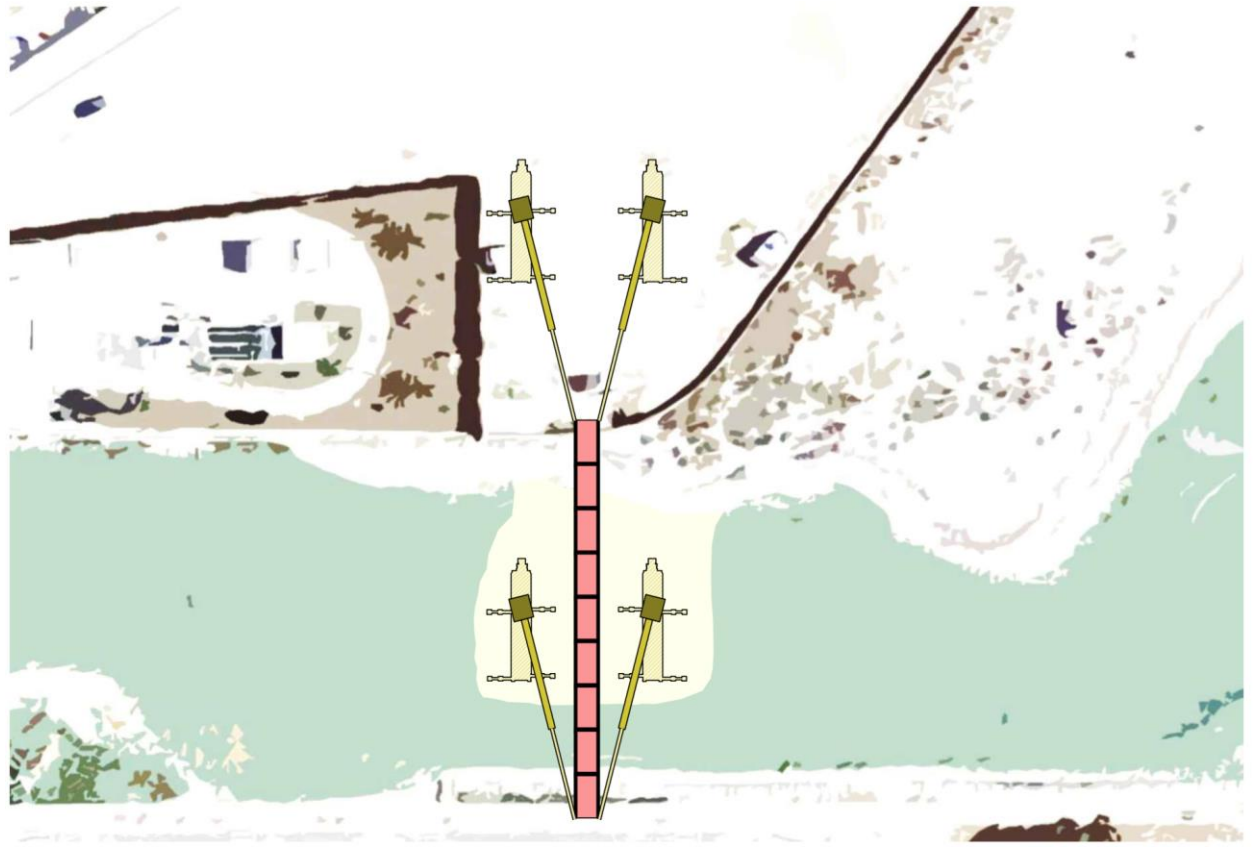


Figura 43 Posición final de la pasarela

5.- VERIFICACIONES ESTRUCTURALES

5.1.- Elaboración y manipulación de elementos

Como se ha descrito en el Apartado 3, los módulos de pasarela fabricados están sometidos a una serie de situaciones previas a su disposición final que deben ser verificadas para asegurar el buen comportamiento en cualquier operación intermedia.

5.1.1.- Armadura pasante por orientación de fibras

La secuencia de hormigonado establecida en la elaboración de los elementos del arco y del tablero implica que las uniones entre las piezas longitudinales y las transversales, a pesar de ser hormigonadas en la misma fase, deban verse reducidas en cuanto a sus capacidades mecánicas a cortante y flexión despreciando la componente a tracción de las fibras debido a una posible errónea reordenación de las mismas en dicha sección.

5.1.1.1.- Cuantía de armadura necesaria por flexión

Como se explica en Anejo IV: "Diseño Estructural", la flexión de eje horizontal no resulta ser excesiva en las uniones entre los elementos transversales y los longitudinales. Sin embargo, la flexión de eje vertical cobra importancia en estos elementos en las distintas combinaciones evaluadas. Aunque dichos esfuerzos podrían ser asumidos por una pieza de UHPFRC con orientación de fibras favorable, el proceso de fabricación descrito en el Apartado 3 del presente anejo conlleva a considerar únicamente la resistencia a tracción de la matriz del hormigón despreciando la colaboración de las fibras. Es por ello por lo que se hace necesaria la disposición de cierta cuantía de armado.

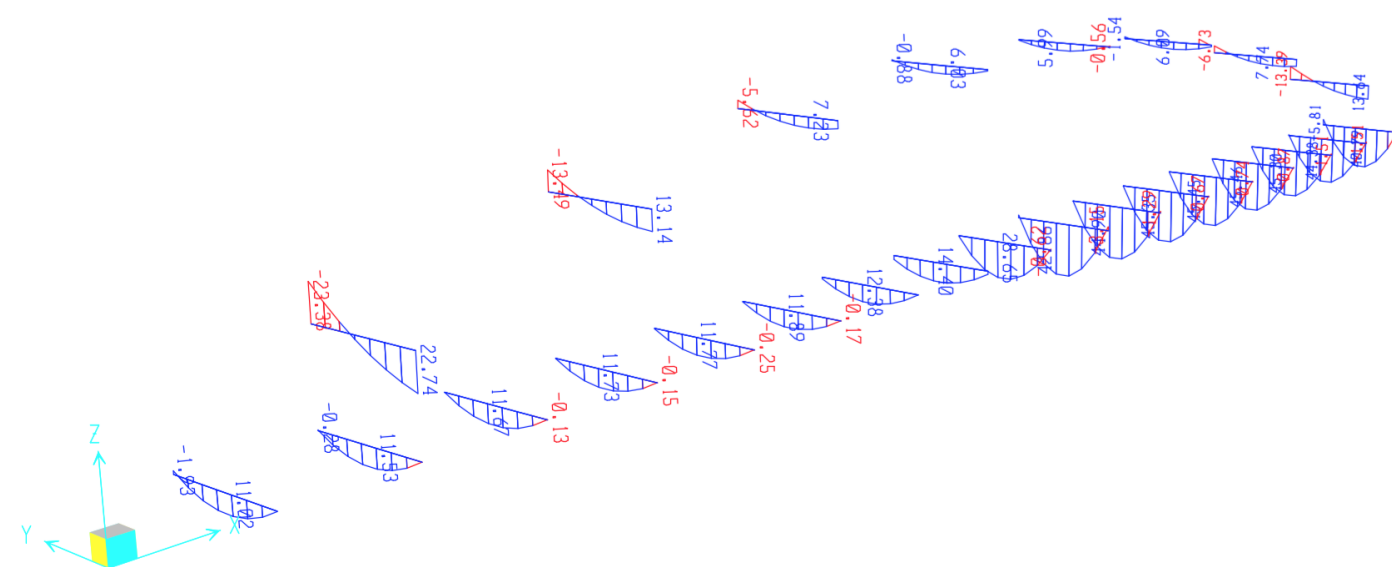


Figura 44 Momentos flectores de eje horizontal en elementos transversales centrales (ELU-SC3)

Para la tercera disposición de la sobrecarga de uso, se obtienen los siguientes esfuerzos máximos sobre los elementos transversales correspondientes a la parte central de la pasarela, dejando para un estudio de mayor detalle la riostra de apoyo de los módulos extremos.

- Riostras:
 $M_{3-3} = 23.38 \text{ kN} \cdot \text{m}$
- Vigas transversales:
 $M_{3-3} = 0.25 \text{ kN} \cdot \text{m}$

Los esfuerzos flectores de eje horizontal obtenidos se alejan de los máximos flectores de eje vertical, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

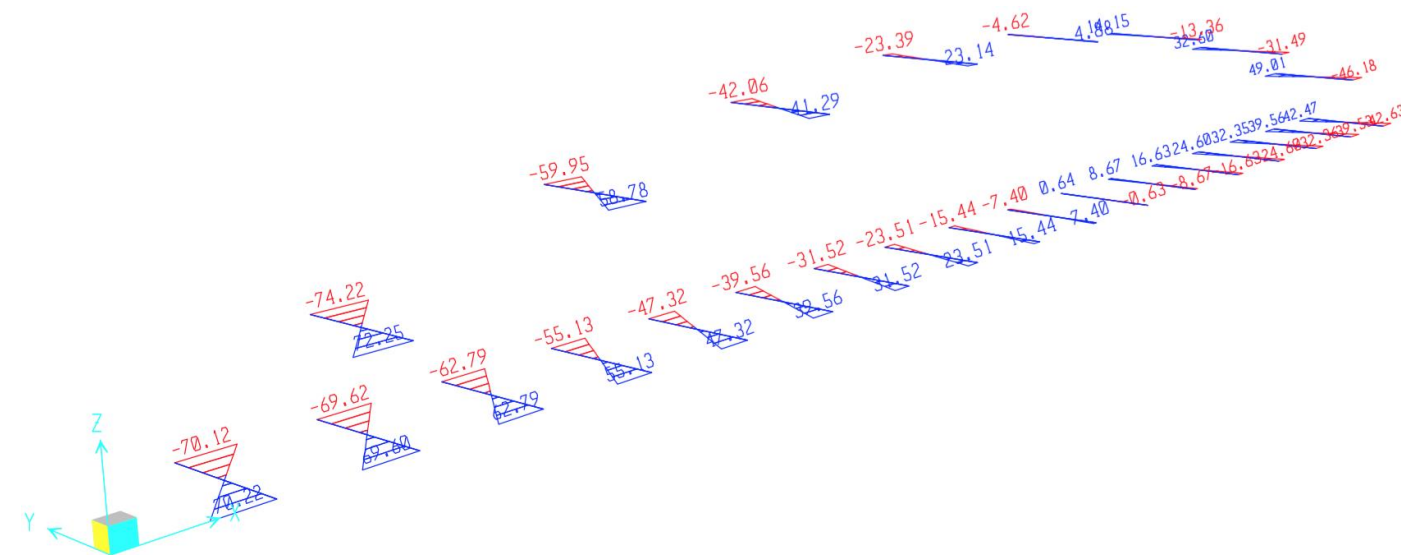


Figura 45 Momentos flectores de eje vertical en elementos transversales centrales (ELU-SC3)

Por lo que respecta a la flexión de eje vertical, se obtienen los siguientes resultados:

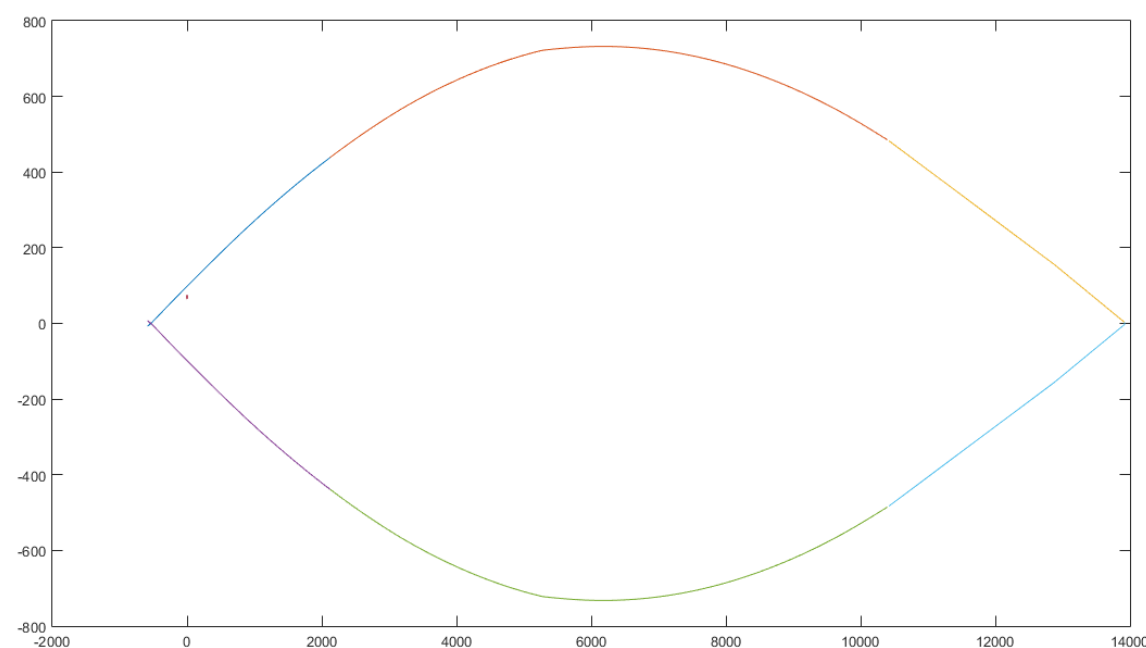


Figura 47 Diagrama de interacción N-M de la viga transversal y máximo flector aplicado

5.1.1.2.- Cuanía de armadura necesaria por cortante

Para evaluar la armadura necesaria por cortante en las secciones con orientación de fibras desfavorable, se empleará la expresión de cálculo de pasadores sometidos a esfuerzos tangenciales. Con ello, se desprecia toda la colaboración del hormigón quedando del lado de la seguridad.

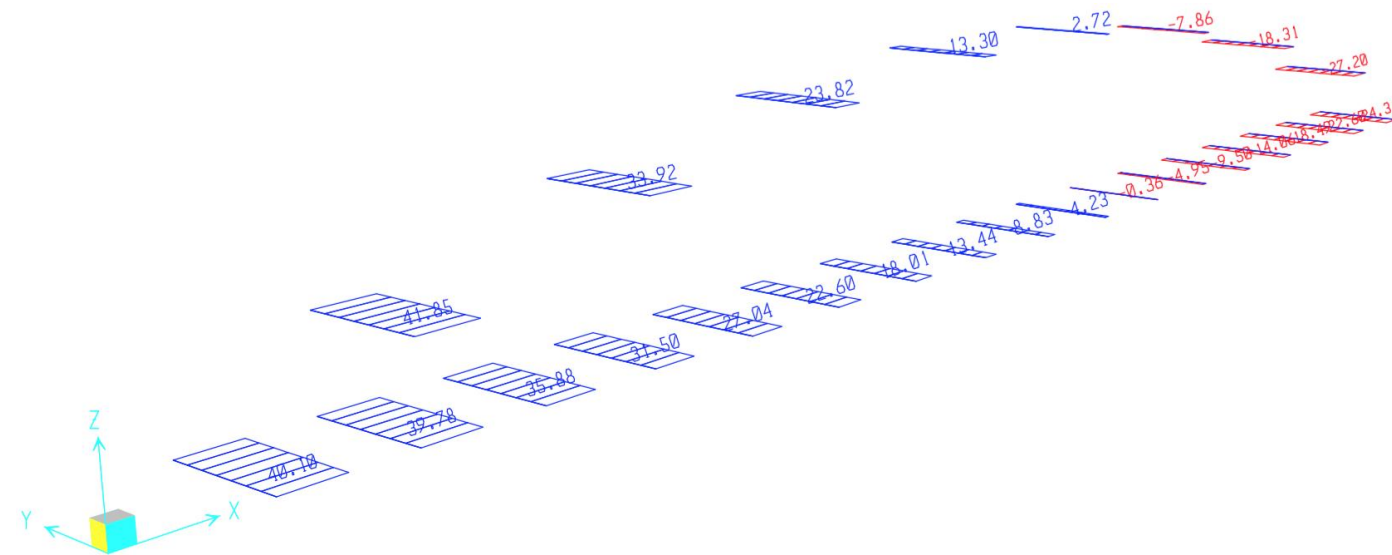


Figura 48 Esfuerzos cortantes horizontales en elementos transversales centrales (ELU-SC1)

Como se puede observar en la Figura 48, los esfuerzos cortantes horizontales aumentan conforme se aproximan a los extremos. Este efecto con el añadido de tratarse de la región de inducción del pretensado, la riostra de apoyo requiere de un estudio detallado que se explica en el siguiente apartado.

Los valores máximos obtenidos son:

- Riostras:
 $V_{3-3} = 41.85 \text{ kN}$
- Vigas transversales:
 $V_{3-3} = 40.10 \text{ kN}$

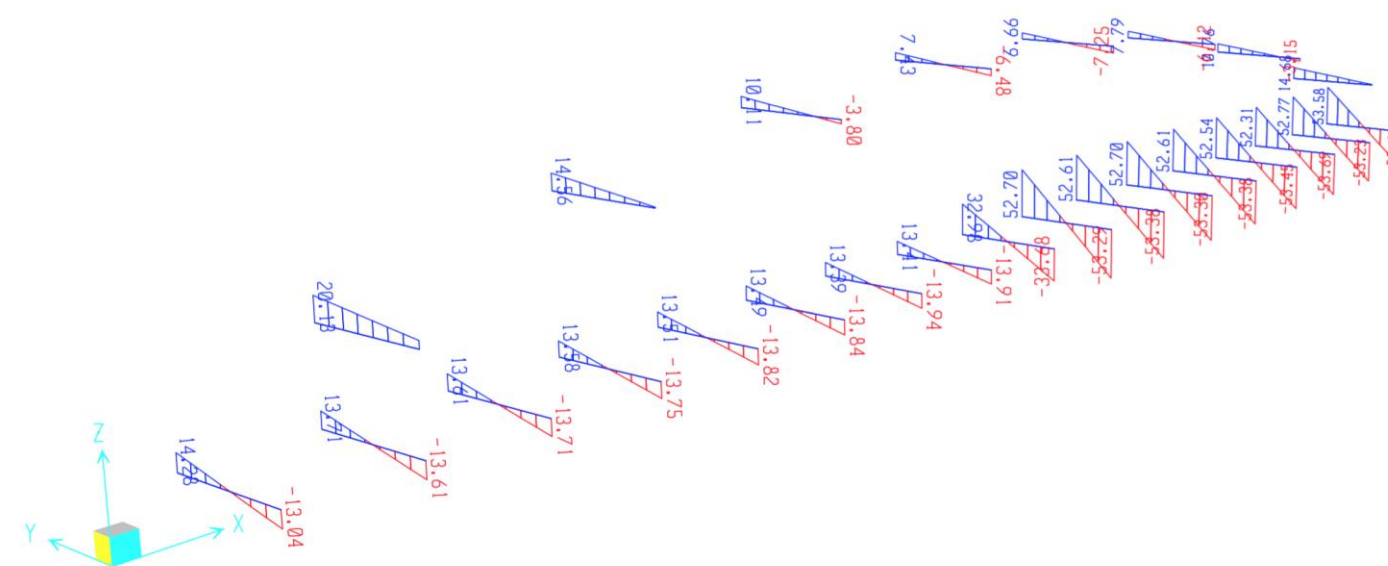


Figura 49 Esfuerzos cortantes verticales en elementos transversales centrales (ELU-SC3)

En la dirección vertical se obtiene:

- Riostras:
 $V_{2-2} = 20.13 \text{ kN}$
- Vigas transversales:
 $V_{2-2} = 53.30 \text{ kN}$

La cuantía de armadura requerida por efecto pasador para la situación más desfavorable es:

$$F_u < A_s \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} \rightarrow A_s = 53.30 \cdot \frac{\sqrt{3}}{500 \cdot 10^3 / 1.15} = 2.12 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Como se puede observar, aun siendo un cálculo muy restrictivo, las dos capas de $2\phi 20$ en cada una resultan ser suficientes para cubrir todos los efectos.

5.1.1.3.- Cuanía de armadura necesaria en junta de hormigonado de los módulos extremos

El proceso constructivo estudiado para la ejecución de los módulos extremos de la pasarela, en una región sometida a importantes esfuerzos ya que es donde se realiza la transferencia del pretensado, conlleva a la necesidad de un estudio con mayor profundidad en la junta de hormigonado entre la riostra de apoyo y la unión marcada entre los arcos y las vigas longitudinales.

Como se puede observar en el Apartado 5.1.1.3, el esfuerzo cortante en las uniones se acrecienta hacia los apoyos. Por otro lado, el modelo de barras realizado para el dimensionamiento global de la estructura no permite computar fielmente los efectos locales debidos a la inducción del pretensado, pues se trata de un sistema autoequilibrado de fuerzas que transmiten reducidos esfuerzos hiperestáticos que además son asumidos por los apoyos en los extremos.

Por lo tanto, se realiza un modelo híbrido de barras para la mayor parte de la estructura y elementos lámina para la riostra de apoyo y su unión con los elementos longitudinales. Como se muestra en la siguiente figura, las fuerzas desviadoras debidas al pretensado se introducen en los nodos de la lámina que representan la posición de la cuña realmente dispuesta. Como se indica en el Anejo IV. "Diseño Estructural", los valores de fuerzas puntuales aplicados equivalen a porcentajes de la fuerza finalmente adoptada que se escala a partir de las combinaciones. De esta forma, resulta sencillo distinguir la proporción entre componente vertical y horizontal de la fuerza desviadora en cada punto.

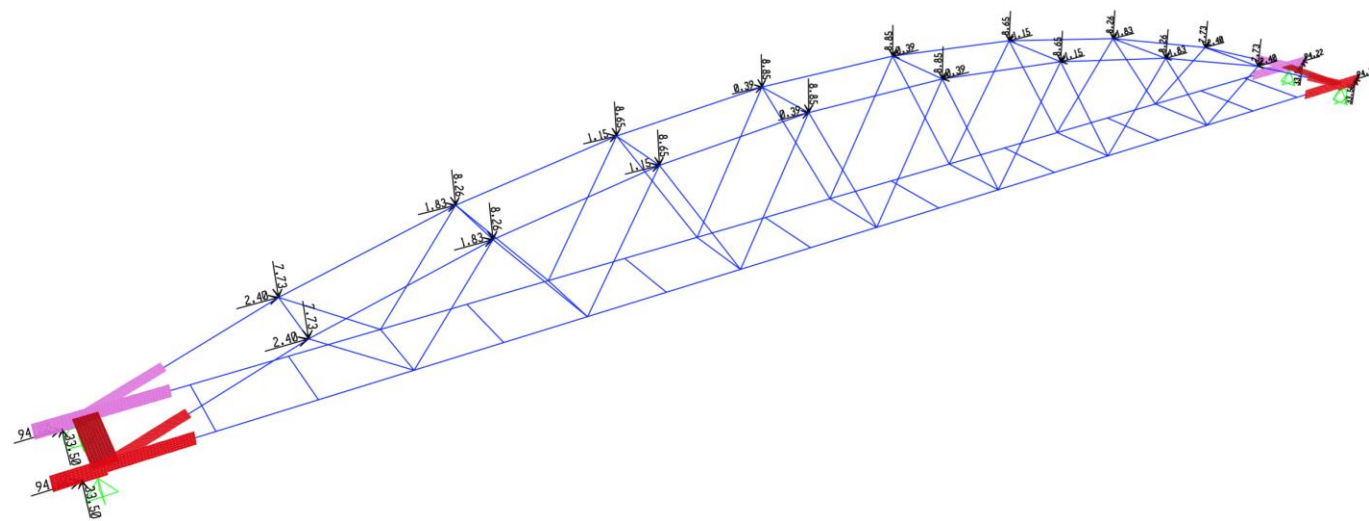


Figura 50 Fuerzas desviadoras de pretensado en modelo híbrido

El mallado realizado consta de elementos cuadrangulares de 10 cm de lado. Como es conocido, el software SAP2000 recomienda evitar el empleo de elementos triangulares en el mallado debido a su bajo grado de interpolación. La unión entre los elementos finitos y los elementos barra se realiza a través de la construcción tipo "body" del programa que modela dicho encuentro como sólido rígido. Respecto del tipo de elemento finito empleado, se trata del tipo "Shell-thick" que computa tanto el estado de flexión de placa como el estado membrana de tensiones en el plano del elemento y que es válido tanto para placas gruesas como para placas delgadas ya que, aun estando formulado en teoría de Reissner-Mindlin, presenta implementaciones numéricas que impiden el bloqueo en láminas delgadas.

Como cabía esperar, los esfuerzos obtenidos son del orden de magnitud que los calculados anteriormente mediante el modelo de barras para el resto de uniones, salvo las tensiones tangenciales longitudinales en el plano de la junta de hormigonado. El hecho de haber dispuesto una riostra de apoyo de mayor dimensión que las del resto de la pasarela supone una adecuada distribución de tensiones que serían perfectamente asumibles por una pieza continua realizada en UHPFRC pero que debido al proceso de hormigonado y a los resultados que arroja un análisis lineal, resulta en la disposición de una importante cuantía de armadura.

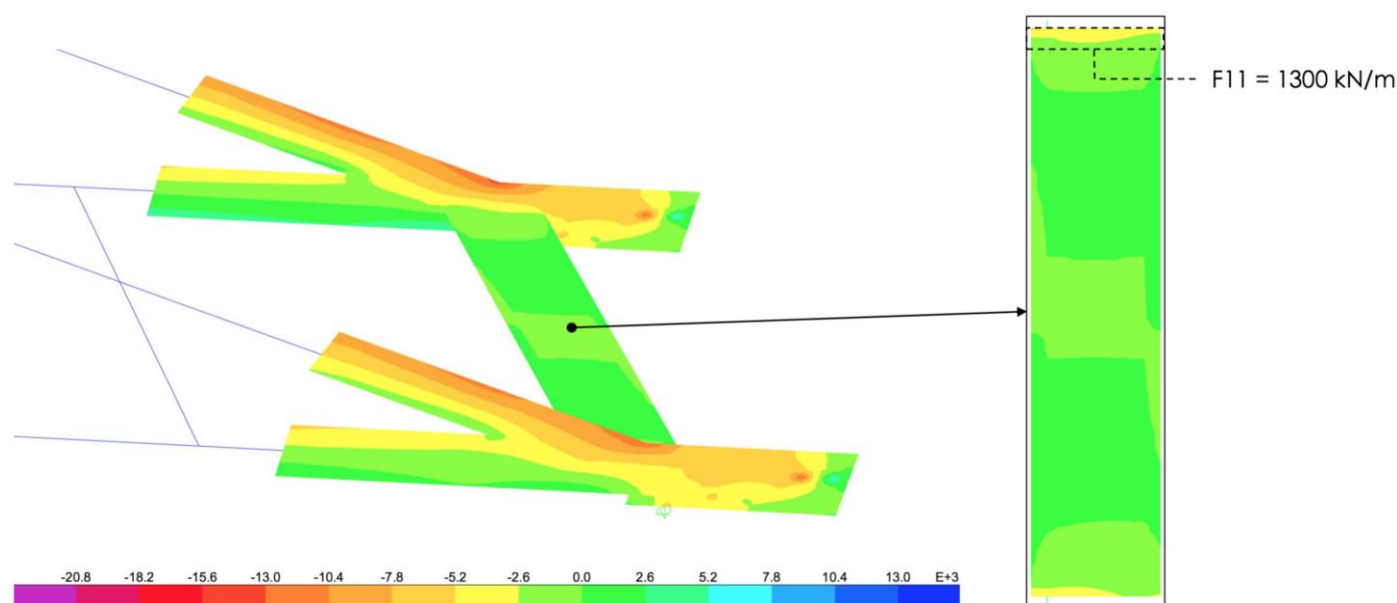


Figura 51 Resultante de tensiones obtenida en la junta de hormigonado

El resultado de integrar las tensiones a lo largo de la junta de hormigonado es de 1300 kN/m. Para un ancho de riostra de 80 cm, conlleva a una resultante de: $F_{ud} = 0.8 \cdot 1300 = 1040 \text{ kN}$.

Disponiendo dos capas de $8\phi 20$, se obtiene una resistencia por efecto pasador de:

$$F_{Rd} = A_s \cdot \frac{f_{yd}}{\sqrt{3}} = 2 \cdot 8 \cdot \frac{\pi \cdot 0.02^2}{4} \cdot \frac{500/1.15}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 = 1261.77 \text{ kN}$$

La armadura dispuesta resulta ser suficiente para resistir las tensiones tangenciales en el plano de la junta de hormigonado sobrando capacidad mecánica suficiente para resistir los pequeños esfuerzos en el resto de direcciones.

5.1.2.- Comprobaciones durante los procesos de izado de elementos

En este apartado se comprueba que las piezas de elevación seleccionados de la casa PHILIPP son adecuadas para los esfuerzos debidos a peso propio de los elementos. Además, se verifica que en la situación de izado y, por tanto, sin la acción favorable del pretensado, no aparecen fisuras debidas a sollicitaciones normales.

5.1.2.1.- Módulos del arco

Se ha elaborado un modelo local de barras en donde se introduce además la barra estabilizadora que previene de posibles movimientos relativos entre los elementos del arco. Los puntos de apoyo se localizan en aquellas regiones en donde se colocan los casquillos y gazas de elevación, de modo que la reacción vertical obtenida es la que resistirá el sistema con un ángulo más favorable.

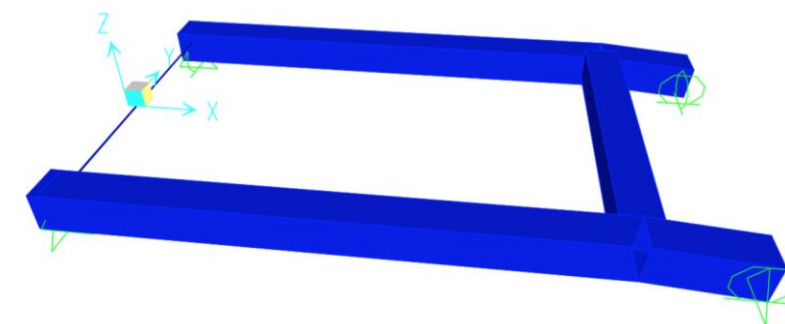


Figura 52 Modelo local de módulo de arco

Las reacciones obtenidas son:

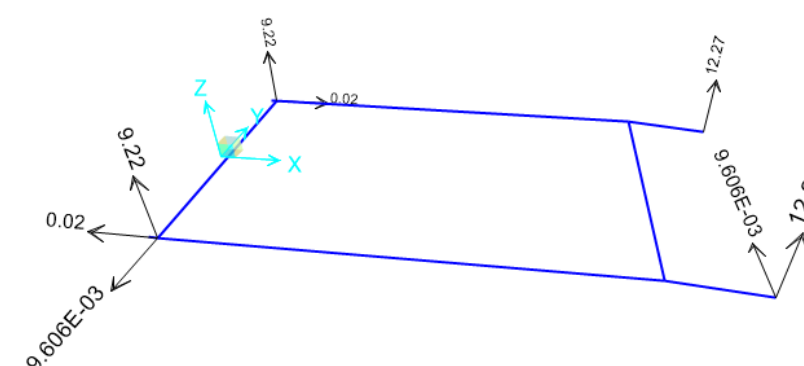


Figura 53 Reacciones

Como se puede observar, los 16 kN de resistencia de las piezas de elevación que indica el fabricante resultan ser suficientes para el izado de los módulos de arco.

Las flexiones máximas se muestran en la siguiente figura:



En el caso de los elementos del arco:

Por lo que respecta a las riostras:

5.1.2.2.- Módulos del tablero



A 3D perspective view of a square frame structure. It consists of four thick blue beams arranged in a square. At each of the four corners, there is a green triangular support, representing a pin support. The structure is shown in a perspective view, giving it a three-dimensional appearance.

Figura 55 Modelo local de módulo de tablero



En el caso de las vigas longitudinales:

Por lo que respecta a las vigas transversales:

5.1.2.3.- Módulos extremos

A 3D perspective view of a truss structure. The truss members are represented by thick blue rectangular beams. The structure is supported by three green triangular supports: one pin support at the bottom left and two roller supports at the bottom right. A local coordinate system is shown at the bottom left support, with a blue arrow pointing right labeled 'X' and a blue arrow pointing up labeled 'Y'.

Figura 58 Modelo local de módulo extremo

Por tratarse de elementos más pesados que los anteriormente analizados, se opta por disponer tres puntos de apoyo, en donde la región bajo los puntales va doblemente reforzada de manera que permita la disposición de dos eslingas próximas que asuman, cada una, la mitad del esfuerzo aplicado favoreciendo el empleo de las mismas piezas de elevación que las utilizadas para el resto de la pasarela. De esta forma, la reacción de 27 kN obtenida será asumida por dos juegos de eslingas respetando el máximo de 16 kN de tensión máxima en los casquillos y gazaras de elevación.

5.1.2.4.- Losas de piso

En el proceso de manipulación de las piezas, las losas de piso no poseen las mismas condiciones de contorno que en la fase de servicio. Por ello, se elabora un modelo lámina en teoría de Reissner-Mindlin para verificar que no se alcanzan los 6 MPa correspondientes al final de la rama elástica a tracción del material.

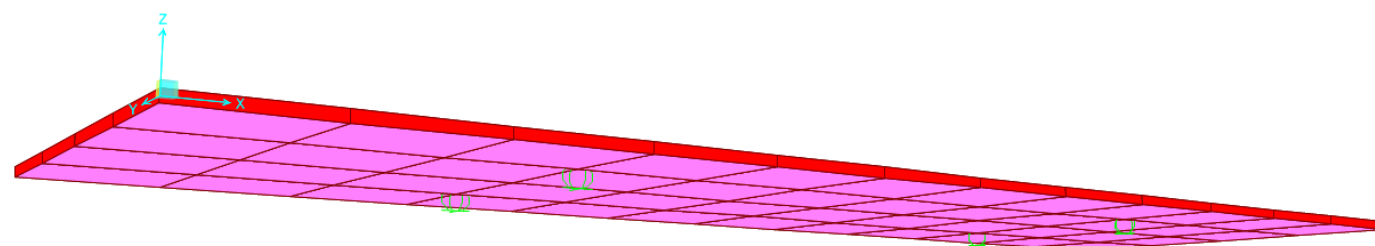


Figura 63 Modelo lámina de losa de piso

Los esfuerzos obtenidos se muestran en la siguiente figura:

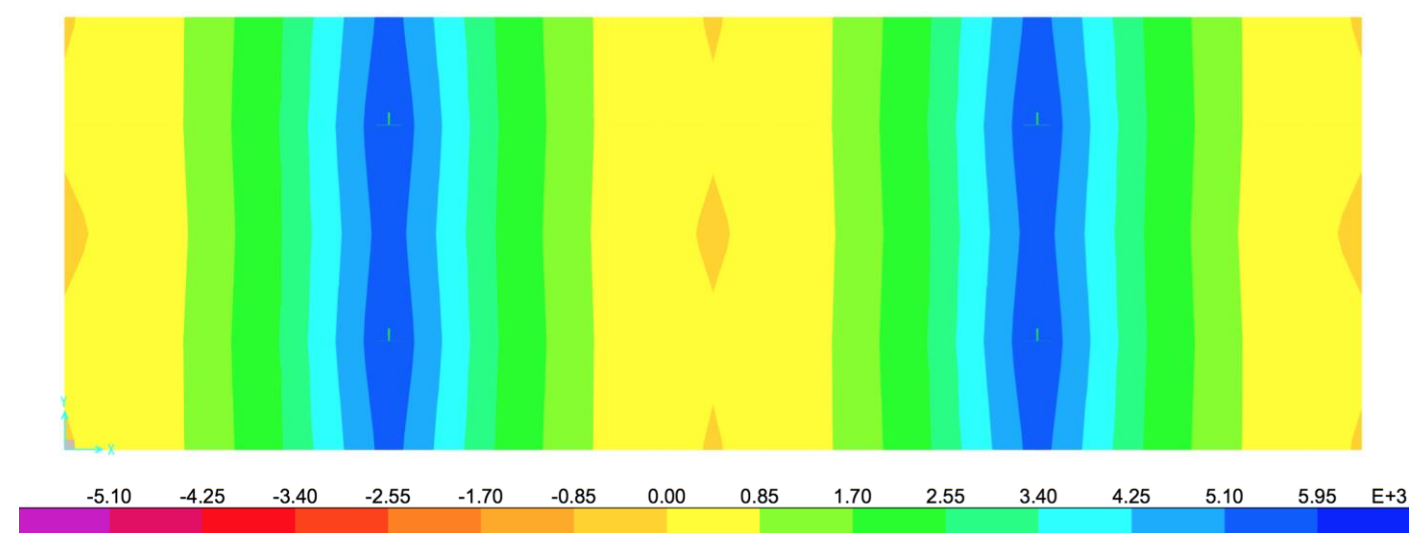


Figura 64 Tensiones longitudinales en cara superior de losa de piso

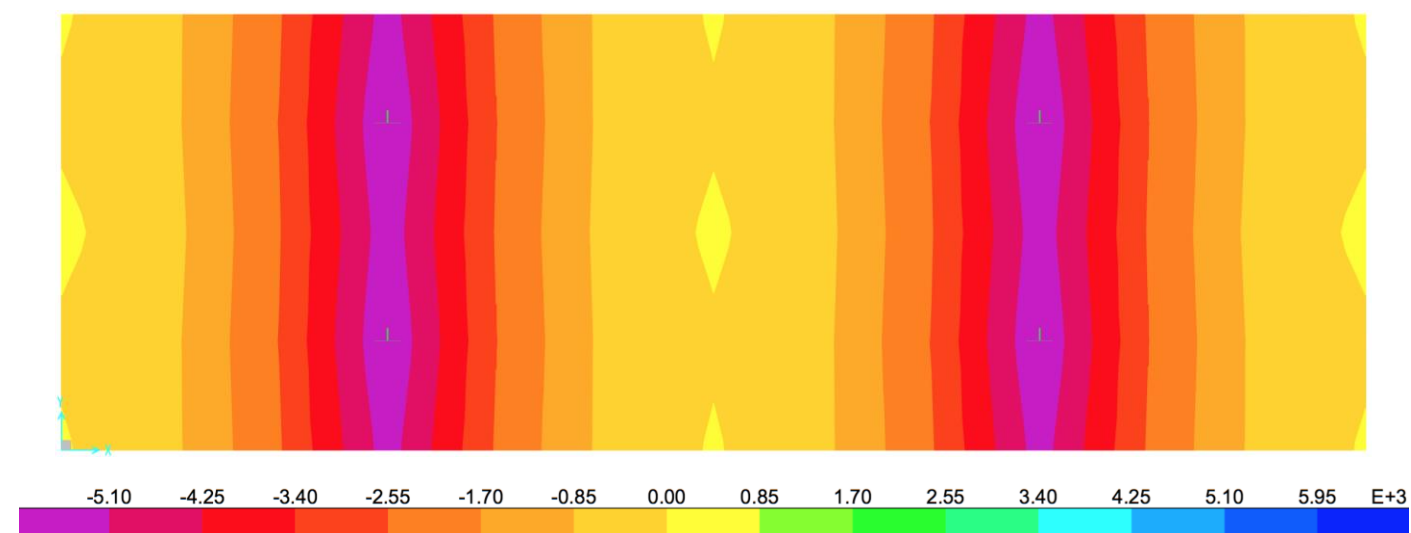


Figura 65 Tensiones longitudinales en cara inferior de losa de piso

A la vista de los resultados, se comprueba que la pieza no fisura durante todo el proceso de manipulación.

5.2.- Verificación de las fases de tesado

5.2.1.- Tensiones inducidas por la secuencia de tesado

Como se ha descrito en el Apartado 4, la primera fase corresponde a un pretensado inicial en las vigas longitudinales que compense las tracciones debidas al peso propio del arco una vez sea liberado de los sistemas de apeo provisional. Se ha elaborado un modelo de barras para determinar el valor de las reacciones en los extremos de la pasarela y cuyos resultados se muestran en la siguiente figura:

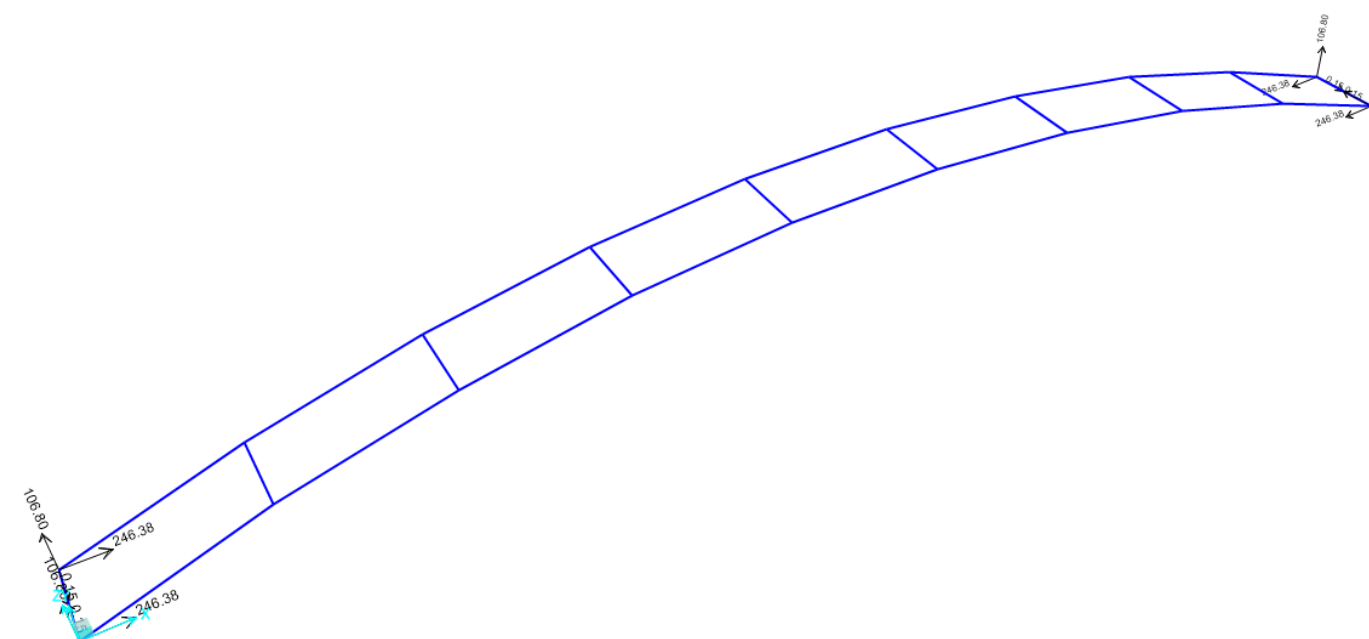


Figura 66 Reacciones debidas al peso propio del arco

Se obtiene un esfuerzo de tracción en torno a 250 kN que, mayorado para tener en cuenta las pérdidas instantáneas, se traduce en un esfuerzo de pretensado necesario de $250 \cdot 1.1 = 275$ kN. Teniendo en cuenta que la fuerza de tesado para la que se ha calculado la estructura es de 130 kN por cordón y que se disponen seis cordones por cada una de las cuatro vainas de la viga longitudinal, el pretensado a inducir en la primera fase representa la siguiente proporción:

$$\%_{1^a \text{ fase}} = \frac{275}{0.9 \cdot 130 \cdot 6 \cdot 4} \cdot 100 = 10\%$$

Estableciendo, a su vez, la secuencia de tesado de las distintas vainas, se determina el incremento de tensión en la pieza a partir de una distribución lineal.

$$\Delta\sigma = \frac{N}{A} + \frac{\%_{1^a \text{ fase}} \cdot P \cdot e}{I} \cdot y$$

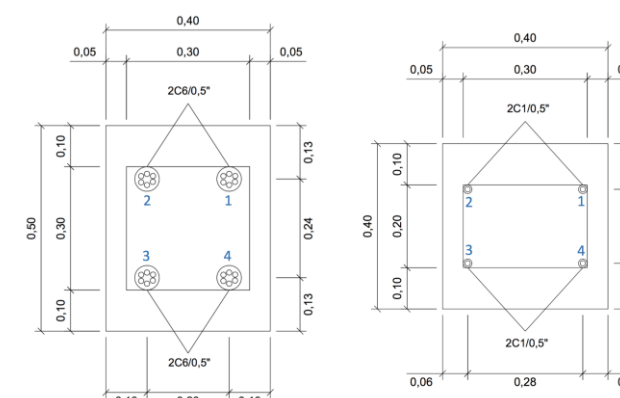


Figura 67 Secuencia de tesado en viga longitudinal y arco

La excentricidad del esfuerzo axil respecto del centro de gravedad de las piezas se determina en ambas direcciones. Los resultados obtenidos para cada una de las fases se muestran en la siguiente tabla, en donde las tensiones de tracción son minoradas por un factor de 0.9 por ser favorables, mientras que las tensiones de compresión son mayoradas por 1.1.

GEOMETRÍA	
Po (kN)	130
%instantáneas	0.1
P (kN)	117
A (m²)	0.11
I1 (m⁴)	3.49E-03
I2 (m⁴)	1.99E-03
h (m)	0.5
b (m)	0.4
e,arriba (m)	0.12
e,abajo (m)	-0.12
e,derecha (m)	0.1
e,izquierda (m)	-0.1

Tabla 2 Datos de partida y geometría de la viga longitudinal

	FASE 1				FASE 2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
% de tesado	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	0.9	0.9	0.9
n	6	6	6	6	6	6	6	6
N	70.2	70.2	70.2	70.2	631.8	631.8	631.8	631.8
M1	8.424	8.424	-8.424	-8.424	75.816	75.816	-75.816	-75.816
M2	7.02	-7.02	7.02	-7.02	63.18	-63.18	63.18	-63.18
Δσn (MPa)	0.702	0.702	0.702	0.702	6.318	6.318	6.318	6.318
Δσsup (MPa)	0.66	0.66	-0.54	-0.54	5.97	5.97	-4.89	-4.89
Δσinf (MPa)	-0.54	-0.54	0.66	0.66	-4.89	-4.89	5.97	5.97
Δder (MPa)	0.78	-0.63	0.78	-0.63	6.98	-5.71	6.98	-5.71
Δizq (MPa)	-0.63	0.78	-0.63	0.78	-5.71	6.98	-5.71	6.98
σsup,der (MPa)	2.14	2.87	3.81	3.33	22.60	29.18	37.59	33.31
σsup,izq (MPa)	0.73	2.87	2.40	3.33	9.91	29.18	24.90	33.31
σinf,der (MPa)	0.93	0.46	2.60	3.33	11.74	7.47	26.73	33.31
σinf,izq (MPa)	-0.48	0.46	1.19	3.33	-0.94	7.47	14.05	33.31

Tabla 3 Tensiones de secuencia de tesado en la viga longitudinal

Como se puede observar, el pretensado total requerido por esfuerzos de servicio se aplica en un 10% en la primera fase mientras que el 90% restante se induce una vez se realiza el pretensado completo del arco y el sellado y fijación final de las péndolas.

La tensión máxima de compresión se localiza en la esquina inferior izquierda alcanzando un valor máximo de 33.32 MPa.

GEOMETRÍA	
Po (kN)	130
%instantáneas	0.1
P (kN)	117
A (m²)	0.1
I1 (m⁴)	1.93E-03
I2 (m⁴)	1.69E-03
h (m)	0.4
b (m)	0.4
e,arriba (m)	0.09
e,abajo (m)	-0.09
e,derecha (m)	0.14
e,izquierda (m)	-0.14

Tabla 4 Datos de partida y geometría del arco

	FASE 1			
	1	2	3	4
% de tesado	1	1	1	1
n	1	1	1	1
N	117	117	117	117
M1	10.53	10.53	-10.53	-10.53
M2	16.38	-16.38	16.38	-16.38
Δσn (MPa)	1.287	1.287	1.287	1.287
Δσsup (MPa)	1.20	1.20	-0.98	-0.98
Δσinf (MPa)	-0.98	-0.98	1.20	1.20
Δder (MPa)	2.13	-1.74	2.13	-1.74
Δizq (MPa)	-1.74	2.13	-1.74	2.13
σsup,der (MPa)	4.61	5.36	7.79	6.36
σsup,izq (MPa)	0.74	5.36	3.92	6.36
σinf,der (MPa)	2.43	1.00	5.61	6.36
σinf,izq (MPa)	-1.44	1.00	1.74	6.36

Tabla 5 Tensiones de secuencia de tesado en el arco

Para una única fase de tesado en el arco y estableciendo la misma secuencia que en la viga longitudinal, la tensión máxima alcanzada es de 6.36 MPa.

Como se muestra en el Anejo V: “Diseño estructural”, las tensiones alcanzadas en las secciones del UHPFRC se alejan de la limitación tensional indicada en la normativa. Sin embargo, serán empleadas para la estimación de pérdidas tratada en el siguiente epígrafe.

5.2.2.- Estimación de las pérdidas instantáneas

A partir de los siguientes datos facilitados por el fabricante con un deslizamiento de cuñas a = 5 mm, se procede al cálculo de las pérdidas instantáneas a lo largo de la viga longitudinal.

- μ = 0.21 m⁻¹
- k/μ = 0.006
- k = 0.006·0.21 = 0.00126 m⁻¹

5.2.2.1.- Pérdidas por rozamiento

Al tratarse de un pretensado externo a la sección, las pérdidas por rozamiento se deben únicamente al contacto de los cables entre sí. La estimación se obtiene a partir de la siguiente expresión modificada para obtener valores en porcentaje en donde $P_{max} = 6 \cdot P_0 = 6 \cdot 130 = 780 \text{ kN}$:

$$\Delta P_{\mu} = \frac{P_{max} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot \theta - k \cdot x})}{P_{max}}$$

Tomando el valor del ángulo girado como nulo, se obtiene un porcentaje máximo de pérdidas por rozamiento del 7% en el extremo opuesto al apoyo de inducción del pretensado. Este valor corrobora la necesidad de tesar exclusivamente desde un único apoyo.

5.2.2.2.- Pérdidas por penetración de cuñas

Bajo la hipótesis de aproximación lineal ($\mu \cdot \theta + k \cdot x \leq 0.3$), se obtiene el siguiente valor de la coordenada c , teniendo en cuenta que la variación angular media es nula:

$$c = \sqrt{\frac{a \cdot E_p \cdot A_p}{P_{max} \cdot (\mu \cdot \alpha_m + k)}} = 24.1 \text{ m} < 60 \text{ m} \rightarrow \text{cable largo}$$

De donde:

- $E_p = 190000 \text{ MPa}$
- $A_p = n \cdot 100 = 6 \cdot 100 = 600 \text{ mm}^2$

Formulando las pérdidas por penetración de cuñas para obtener un valor en porcentaje, se deduce un máximo del 6% en el punto de inducción del pretensado anulándose en la coordenada c .

$$\Delta P_{sl} = 2 \cdot P_{max} \cdot (\mu \cdot \alpha_m + k) \cdot (c - x)$$

En la siguiente gráfica se muestran los resultados obtenidos:

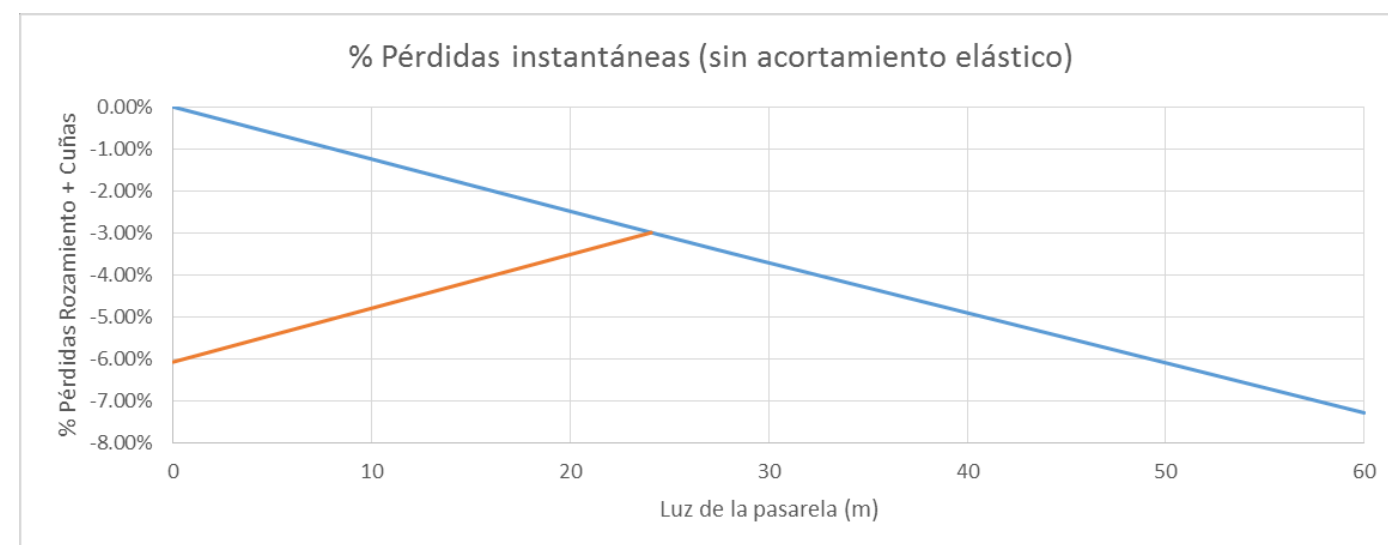


Figura 68 Pérdidas instantáneas a lo largo de la pasarela sin acortamiento elástico

5.2.2.3.- Pérdidas por acortamiento elástico

Como se ha explicado al comienzo del presente apartado, se realizan un total de cuatro operaciones de tesoado, una para cada vaina de 6 cordones. Adoptando el valor de tensión máxima de 33.31 MPa obtenido anteriormente, se deduce el siguiente porcentaje de pérdidas por acortamiento elástico:

$$\Delta P_{el} = \frac{n-1}{2 \cdot n} \cdot \frac{E_p \cdot A_p}{E_{cm}} \cdot \sigma_{cp} \cdot \frac{1}{P_{max} \cdot n} = 4\%$$

5.2.3.- Conclusiones

A la vista de los resultados obtenidos, se puede confirmar que la asunción de un 10% de pérdidas instantáneas es válida, así como la estimación de un 30% de pérdidas totales del pretensado que incluyen las pérdidas diferidas.

Por lo que respecta al arco, se trata de un cordón envainado engrasado por lo que no existen pérdidas por rozamiento. Por ello, se consideran más desfavorables las pérdidas calculadas para la viga longitudinal y se asumen del mismo valor para toda la estructura respetando, por otro lado, el radio de curvatura en los codos del arco que aconseja el fabricante.

5.2.4.- Evaluación de la necesidad de tesoado en el arco

Como se indica tanto en el Anejo I: "Estado del Arte" como en el Anejo IV: "Diseño estructural", una de las principales premisas de diseño que deben adoptarse al proyectar estructuras mediante elementos modulares es asegurar que no se produzca la descompresión de las uniones de los mismos. Si bien en las vigas longitudinales resulta evidente la necesidad de disponer un pretensado que compense la tracción a la que se van a ser sometidas debido al atirantamiento del arco, la necesidad de disponer cables de pretensado en el interior del arco debe ser evaluada con detenimiento.

Como no puede ser de otro modo atendiendo a la tipología estructural adoptada, los elementos que forman el arco siempre van a estar sometidos a un axil de compresión bajo cualquier combinación de carga. Por otro lado, gracias a la geometría parabólica del mismo, bajo la mayoría de hipótesis de carga el nivel de flexiones o cortantes será reducido. Sin embargo, en ciertas fases del proceso constructivo pueden producirse flectores de entidad en el arco, que en caso de no contar con un nivel de compresión suficiente, produzcan la descompresión de las uniones. En caso de darse esa situación, el pretensado del arco se revela como una solución para conseguir la estabilidad de la estructura en fase constructiva, aumentando el nivel de compresiones en las secciones de unión e impidiendo su descompresión.

En concreto, para evaluar la necesidad de pretensar el arco, se estudia la fase correspondiente al tesoado final de la viga longitudinal. El tesoado final de los 4 cables de 24 cordones de 0,5", correspondiente al 90% del pretensado total previsto, provoca el levantamiento de la pasarela, tal y como se ve en la figura 69, siendo éste el instante a partir del cual la pasarela empieza a trabajar como un arco atirantado tipo bowstring. Bajo esta hipótesis de carga, las únicas acciones actuantes corresponden al peso propio de los elementos estructurales de la pasarela y al pretensado dispuesto en las vigas longitudinales. Como se ve en la figura 70, el levantamiento de la pasarela origina fuertes flectores negativos en los extremos del arco que pueden provocar la descompresión de las uniones entre elementos en su parte superior.

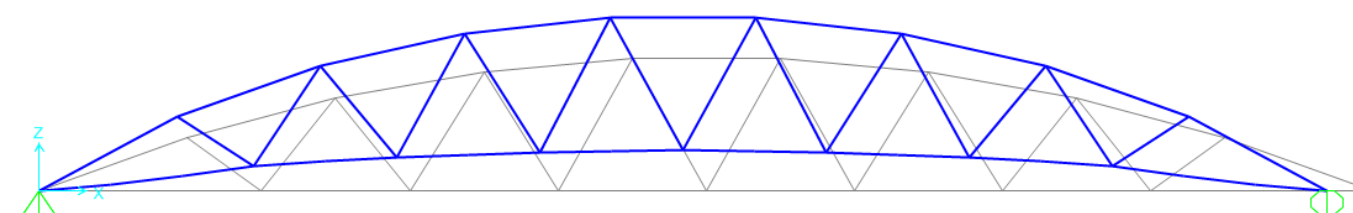


Figura 69 Levantamiento de la pasarela tras tesoado final de vigas longitudinales

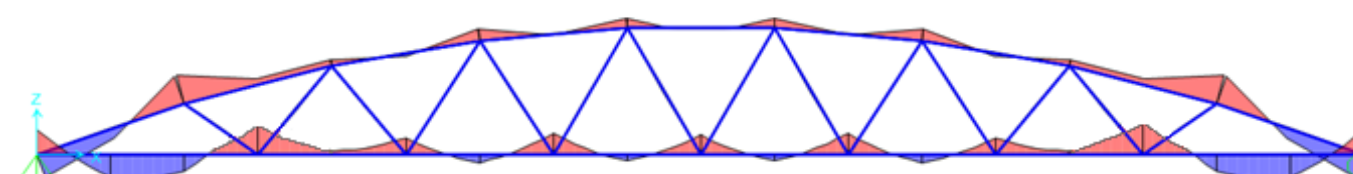


Figura 70 Ley de flectores originada tras tesoado final de vigas longitudinales (peso propio + pretensado vigas)

Tras evaluar el nivel de compresiones alcanzado en el arco, mostrado en la figura 68, se obtienen los siguientes resultados

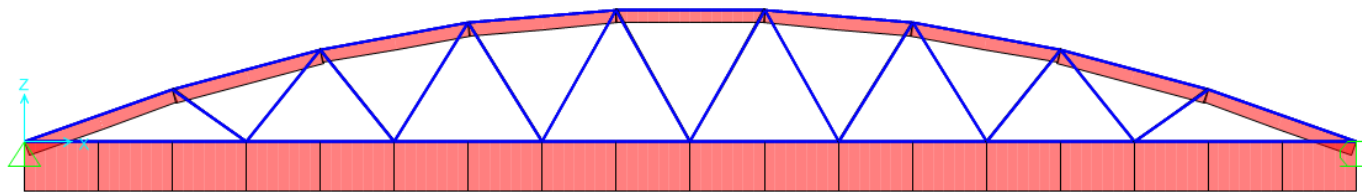


Figura 71 Ley de axiles originada tras tesado final de vigas longitudinales (peso propio + pretensado vigas)

$$Nd = 598 \text{ kN}$$

$$Md = -61 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$A = 0,1 \text{ m}^2$$

$$I = 0,00193 \text{ m}^4$$

$$h = 0,40 \text{ m}$$

$$\sigma_{c,min} = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = -0,341 \text{ MPa}$$

Tal y como se observa, en caso de no disponer pretensado en el arco, el nivel de compresiones alcanzados en el mismo tras la fase de tesado final de las vigas longitudinales es insuficiente para impedir la descompresión de las uniones entre elementos, causando un serio riesgo para la estabilidad de la estructura. De este modo, queda justificada la disposición de 4 cordones envainados engrasados de 0,5" en el interior de los elementos huecos que forman el arco. La disposición de 4 cordones obedece al deseo de disponer una fuerza de pretensado centrada que no origine flexiones adicionales. Tras evaluar el efecto del pretensado del arco, los resultados tensionales en la unión durante la fase estudiada son los siguientes:

$$Nd = 1019 \text{ kN}$$

$$Md = -61 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$A = 0,1 \text{ m}^2$$

$$I = 0,00193 \text{ m}^4$$

$$h = 0,40 \text{ m}$$

$$\sigma_{c,min} = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = 3,87 \text{ MPa}$$

Por último debe indicarse que el conjunto de verificaciones mostrado se ha realizado teniendo en cuenta los distintos criterios de mayoración o minoración de la acción del pretensado, esto es, considerando $P_{k,sup}$ en caso de que la acción del mismo sea desfavorable o $P_{k,inf}$ en caso de ser favorable.

6.- REFERENCIAS

GRÚAS RIGAR (2012). *Catálogo de transportes especiales*. Catálogo comercial. Valencia: GRÚAS RIGAR

INCOMSE (2011). *Catálogo técnico de puntales*. Catálogo comercial. Francia: INCOMSE COMMERCIAL SERVICE

LIEBHERR (2012). *Technical data sheet: mobile crane LTM 1400-7.1*. Catálogo comercial. Alemania: LIEBHERR

PHILIPP (2010). *Casquillo con agujero transversal PHILIPP*. Catálogo comercial. Alemania: INCOMIMEX – PHILIPP GROUP