

Anejo I

Estado del Arte

ÍNDICE

1.-	INTRODUCCIÓN	2
2.-	ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBRE-REINFORCED CONCRETE	2
	2.1.- PROPIEDADES DESTACABLES DEL UHPFRC	2
	2.2.- CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PARA DISEÑO	3
	2.2.1.- Compresión	3
	2.2.2.- Tracción	3
	2.2.3.- Flexión	4
	2.3.- EFECTOS DIFERIDOS	4
	2.3.1.- Retracción	4
	2.3.2.- Fluencia	4
3.-	VENTAJAS DEL UHPFRC EN LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES	5
4.-	APLICACIÓN ACTUAL DEL UHPFRC EN PUENTES Y PASARELAS	5
	4.1.- PASARELA SOBRE EL RÍO FULDA, KASSEL (2007)	5
	4.2.- APLICACIONES EN JAPÓN (PASARELAS)	6
	4.2.1.- Pasarela Sakata-Mirai (2002)	6
	4.2.2.- Pasarela Akakura Onsen Yukemori (2004)	7
	4.2.3.- Pasarela Hikita (2007)	7
	4.2.4.- Pasarela Mikaneike (2007)	7
	4.3.- APLICACIONES EN JAPÓN (PUENTES DE CARRETERA)	7
	4.3.1.- Puente Horikoshi C-Ramp (2005)	7
	4.3.2.- Puente Torisalogawa (2006)	8
	4.4.- APLICACIONES EN EEUU (US HIGHWAY)	8
	4.4.1.- Puente Mars Hill (2006)	8
	4.4.2.- Puente Cat Point Creek (2008)	9
	4.4.3.- Puente Jakway (2009)	9
	4.4.4.- Puente sobre la Ruta 31 (2009)	9
	4.4.5.- Paneles Waffle	9
	4.5.- APLICACIONES EN ESPAÑA	10
	4.5.1.- Pasarela sobre el Barranco de las Ovejas (Alicante)	10
	4.5.2.- Pasarela sobre la V-21 (Puçol)	12
	4.6.- PUENTE WILD, AUSTRIA (2011)	12
5.-	PUENTES ARCO ATIRANTADO TIPO BOWSTRING	13
	5.1.- COMPORTAMIENTO	13
	5.2.- PUENTES TIPO BOWSTRING EN LA ACTUALIDAD	14
	5.2.1.- Puente arco sobre la Rambla del Cañuelo en Roquetas de Mar	14
	5.2.2.- Puente arco sobre el río Deba en Guipúzcoa	14
	5.2.3.- Puente arco sobre el río Guadalquivir en Palma del Río	14
	5.2.4.- Puente arco sobre el río Dambovită en Bucarest	15
	5.2.5.- Pasarelas bowstring del Anillo Verde Ciclista de Madrid	15
6.-	REFERENCIAS	16

1.- INTRODUCCIÓN

El presente anejo pretende proporcionar un análisis detallado del estado del conocimiento del material UHPFRC (Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete) que en el contexto nacional se conoce como HMAR (Hormigón de Muy Alto Rendimiento). Para ello, se parte de una visión global acerca de la experiencia y recomendaciones establecidas a nivel internacional, para concluir con el caso particular del material desarrollado en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la ETSICCP de la UPV.

A continuación, se describen las ventajas del UHPFRC en la construcción de puentes y pasarelas, además de presentar una serie de aplicaciones actuales del material, entre las que destaca el puente WILD en Austria, cuyos elementos modulares sirven de referencia para la pasarela objeto de este proyecto.

Por último se describe el comportamiento estructural de los puentes atirantados tipo bowstring, tipología escogida en este trabajo, además de presentar una serie de puentes y pasarelas ejecutadas o proyectadas recientemente utilizando dicha tipología.

2.- ULTRA HIGH PERFORMANCE FIBRE-REINFORCED CONCRETE

A diferencia del hormigón convencional, la ausencia de una normativa internacional que defina completamente el material UHPFRC en cuanto a composición, comportamiento y empleo, conlleva a la ramificación de numerosas líneas de investigación y, por tanto, gran variedad de dosificaciones en función de objetivos diferentes que resultan en comportamientos distintos. Es por ello por lo que el presente trabajo se centra en la experiencia propia del grupo de trabajo del ICITECH.

2.1.- Propiedades destacables del UHPFRC

Una común clasificación de este material es que presta un comportamiento híbrido entre los materiales convencionales acero y hormigón compartiendo las principales ventajas entre ambos que suelen traducirse en el proyecto de elementos esbeltos de alta resistencia a compresión y mejor comportamiento a tracción que el hormigón convencional. Ello es debido a la alta resistencia, autocompactabilidad y el empleo de fibras.

Para conseguir dichas altas prestaciones, los aspectos de: materias primas, proceso de fabricación y niveles de control, deben estar estrechamente relacionados entre sí y en donde, apostar por asegurar una excelente calidad en su combinación, con el consecuente coste económico, supone la creación de un material que, en su conjunto, resulta ser muy competitivo en estética, eficiencia estructural y, además, economía, ya que se sitúa en un coste intermedio entre el acero y el hormigón convencional. Por lo tanto, resulta indispensable el empleo de materias primas exclusivas (fibras de alto límite elástico, aditivos de tercera generación o reducidos tamaños máximos de áridos), fabricación en plantas convencionales de prefabricados con procesos de alta energía de fabricación y curado al vapor con altos niveles de control en cuanto a contenidos de agua, humedad, secuencias y direcciones de vertido (orientación de fibras), precisión de espesores, recubrimientos...

El grupo de trabajo define las características principales del material de la siguiente manera:

- Elevada resistencia a compresión a largo y a corto plazo. En 24 horas, tras el vertido, se alcanzan resistencias a compresión medias del entorno de los 80 MPa, mientras que para un plazo de 28 días, se obtienen valores de resistencia a compresión, para probetas cúbicas, por encima de los 130 MPa.
- Resistencias a tracción suficientes como para tenerlas en cuenta en el cálculo seccional, además de cubrir los esfuerzos debidos a la retracción e incluso frente a sollicitaciones tangenciales suprimiendo cuantías mínimas geométricas y cercos de cortante con un consecuente ahorro importante en armado pasivo y en labores de ferrallado.
- Ambas mejoras resistentes justifican las importantes reducciones en sección transversal y, por tanto, volumen total de material empleado (del orden del 60-75% del equivalente hormigón convencional),

lo que supone que, junto con el empleo de subproductos industriales como las cenizas volantes o el humo de sílice, se trate de un material más sostenible medioambientalmente, a pesar de que el empleo de cemento sea del orden de tres veces superior, pues en un cómputo global el volumen empleado es mucho menor. A todo ello debe añadirse el hecho de la menor necesidad del empleo de áridos, pues la resistencia viene dada por el propio conglomerante siempre en busca de una mayor compacidad. Gracias al empleo de materiales finos y el uso de superplastificantes en la mezcla, se consiguen propiedades autocompactantes.

- De todo lo anterior se deduce la ventajosa posición de este material en la industria del prefabricado, reduciendo plazos y áreas de acopio. La importante disminución de volumen tiene relación directa con el peso, por lo que la manipulación de piezas es una labor mucho más sencilla y requiere de maquinaria menos pesada, lo que se traduce en un importante ahorro económico.
- La distribución aleatoria de fibras en la totalidad del material favorecen la adecuada redistribución de esfuerzos internos, favoreciendo un comportamiento muy dúctil con grandes deformaciones previas a la rotura. Dicha fase de descarga representa la pérdida de adherencia entre las fibras (fundamentalmente la conocida como fibra corta) y el hormigón que se manifiesta como un deslizamiento entre ambas partes hasta, finalmente, alcanzar la rotura. Este proceso dota a estas estructuras de una mayor seguridad.
- Estrechamente relacionado con la redistribución de esfuerzos, es posible explicar el hecho de que las fisuras se presenten mucho más distribuidas y de menor abertura que en el hormigón convencional. Este fenómeno recibe el nombre de microfisuración y se puede definir como el desarrollo de multitud de fisuras con un espaciamiento muy reducido y de abertura mínima únicamente perceptible para deformaciones entorno al 2.5-3‰. Dicha deformación está en el orden de magnitud de la plastificación del acero y consecuentemente, cercana al agotamiento de la pieza favoreciendo el cumplimiento de los Estados Límite de Servicio.
- Compaginando la gran ductilidad del material con su alta resistencia a compresión, permite un mayor aprovechamiento del pretensado.
- El hecho de conseguir acabados tan compactos, junto con el efecto de la microfisuración, conllevan al proyecto de estructuras con excelente respuesta en cuanto a durabilidad (incluso para los clases de exposición más agresivas), resistencia a los rayos UV, buenos comportamientos frente a impactos y posibilidad de realizar uniones mecanizadas que realza, una vez más, su idoneidad en la industria del prefabricado. Todos estos aspectos conllevan a una mayor vida útil y, por tanto, menores recubrimientos de armaduras, tal y como se explica en el Anejo IV: "Diseño Estructural".
- Finalmente, otro factor que cada vez tiene mayor peso en los análisis multicriterio entre diferentes alternativas, es la componente estética. A pesar de contener cierta perspectiva subjetiva, la forma de la estructura debe responder a la lógica de su percepción, es decir, cuando se proyecta una estructura eficiente se entiende que la acción principal es la que confiere la forma final a la estructura y suele estar directamente relacionado con estructuras ligeras y esbeltas. Además, el acabado superficial del UHPFRC puede adaptarse a gran variedad de geometrías de los moldes debido al alto contenido en finos.

En resumen, se puede afirmar que el UHPFRC permite la fabricación de piezas esbeltas próximas a las secciones que se consiguen en estructuras metálicas con la ventaja de que son moldeables con multitud de geometrías y sin juntas frías. Además, permite exprimir al máximo las posibilidades del pretensado, que además asegura el contacto entre los distintos elementos prefabricados.

Por el contrario, cabe indicar que su comportamiento frente al fuego es peor que el del hormigón convencional, dado que la rápida pérdida de humedad, con un acabado tan compacto, provoca estallidos en la matriz del material.

Sin embargo, la falta de experiencia en la proyección de estructuras con hormigones de muy alto rendimiento, su elevado coste por metro cúbico y el nivel tecnológico, de control y conocimiento que requiere dificulta todavía su implantación como alternativa real en el proyecto de estructuras.

2.2.- Caracterización del material para diseño

Si bien, como se indica en el Anejo IV: "Diseño estructural", para llevar a cabo el diseño de la pasarela se ha seguido el documento *Recommendations for UHPFRC* publicado por AFGC/SETRA, las ecuaciones constitutivas del material no se adoptan de dicha recomendación, ya que el grupo de trabajo del ICITECH ha caracterizado el comportamiento del UHPFRC ofreciendo leyes de tracción y compresión en numerosas publicaciones que abarcan desde Trabajos Fin de Máster hasta artículos científicos recientes.

2.2.1.- Compresión

Dentro de los hormigones de altas prestaciones, el UHPFRC se clasifica como aquél capaz de alcanzar resistencias a compresión máximas entre 150 y 200 MPa. Sin embargo, existen fluctuaciones importantes en dichos valores en función de la dosificación, medios y metodología de curado durante su fabricación y el porcentaje de fibras empleado.

Hasta un 70-80% de la resistencia a compresión, el UHPFRC muestra un comportamiento lineal. Tras alcanzar la máxima resistencia, de no tener fibras, el material experimentaría un comportamiento explosivo sin rama de descenso.

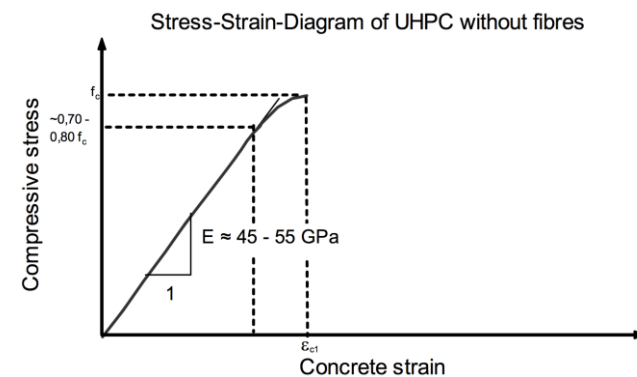


Figura 1 Ley constitutiva a compresión del UHPC sin fibras [Fehling 2004]

Con la adición de fibras, la pendiente de la rama de descenso depende de los siguientes aspectos:

- Contenido en fibras
- Geometría de las fibras (longitud y diámetro)
- Longitud de las fibras en relación con el tamaño máximo del árido
- Rigidez de las fibras (en caso de mezcla de fibras)
- Orientación de las fibras

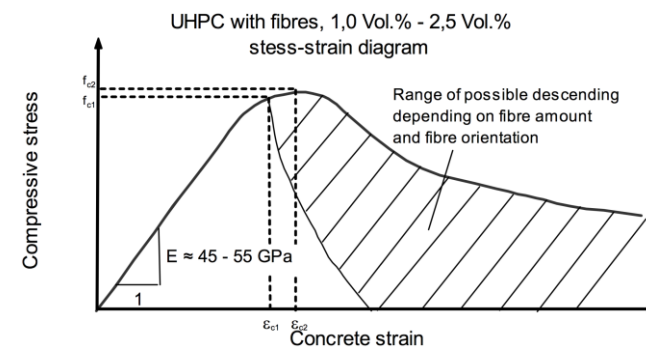


Figura 2 Ley constitutiva a compresión del UHPFRC con fibras [Fehling 2004]

Aunque numerosos autores coinciden en que la deformación máxima puede alcanzar valores entorno al 5‰, como se indica en el Anejo IV: "Diseño estructural", se limita la deformación a un máximo del 3.5‰ de acuerdo con las recomendaciones francesas que plantean un diagrama constitutivo elástico perfectamente plástico marcando el final de la rama elástica al 85% de la resistencia característica máxima a compresión simple.

2.2.2.- Tracción

Este apartado resume el trabajo realizado por López, Serna, Navarro y Coll (2016).

Mientras que la matriz de hormigón sin fibras es extremadamente frágil, se establece que el límite inferior para el cual se adquiere un comportamiento dúctil a tracción es el correspondiente a un contenido en fibras del 2%. Sin embargo, otros parámetros como la distribución de fibras o su tipología pueden conllevar a respuestas de endurecimiento por deformación con menores contenidos en fibras (factor k de efectividad de fibra).

A pesar de que el UHPFRC puede desarrollar un comportamiento de ablandamiento por deformación bajo determinadas condiciones en algunos elementos estructurales, los ensayos llevados a cabo muestran un comportamiento de endurecimiento por deformación gracias a la favorable ordenación de fibras a lo largo de la longitud de la probeta. En este caso, el comportamiento se caracteriza por el fenómeno de microfisuración, descrito en el Apartado 1.2, que se da tras aparecer la primera fisura y antes de la localización de la macrofisura.

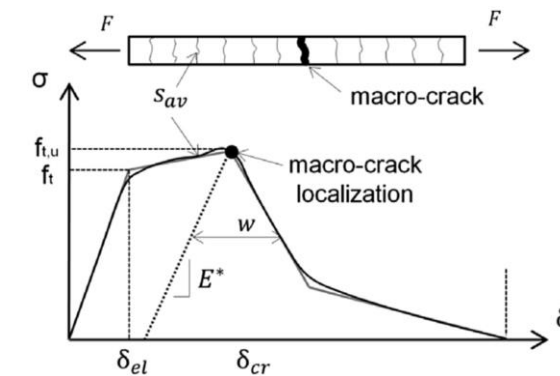


Figura 3 Respuesta de endurecimiento por deformación del UHPFRC [J.A. López et al. 2016]

El límite de la primera rama elástica coincide con la rotura de la matriz (f_t) para una deformación muy inferior a la última.

Con el incremento de deformaciones pasado el tramo elástico, aparece cierto endurecimiento por deformación, en donde $f_{t,u} \geq f_t$. Este importante aumento de las deformaciones es debido a la microfisuración basada en la formación de una gran cantidad de fisuras cosidas por las fibras. En función de la cantidad de fibras, su esbeltez y tipología, la deformación para la cual se alcanza la fisura localizada puede variar entre el 2 y el 3.5‰. Esta fase tiene gran relevancia en las verificaciones de los Estados Límite de Servicio.

Cuando la energía necesaria para que aparezca una nueva fisura supera a la energía necesaria para continuar desarrollando una única fisura, comienza la rama de ablandamiento que coincide con el comienzo de la plastificación de la armadura pasiva. Esta última rama se caracteriza con la relación tensión-abertura de fisura. Sin embargo, para simplificar el cálculo, las recomendaciones francesas plantean incluir la rama de ablandamiento en una única ley de tensión-deformación introduciendo el concepto de longitud característica que depende de la longitud del elemento, asignando a la región fisurada un comportamiento medio y, por tanto, no es una propiedad intrínseca del material.

El equipo de trabajo ha planteado caracterizar las propiedades a tracción del UHPFRC a través de ensayos a flexión de cuatro puntos a los que se les aplica un análisis inverso basados en suponer una ley de comportamiento del material y mediante un cálculo numérico, simular el ensayo carga-desplazamiento realizado para posteriormente ajustar los parámetros del modelo numérico que hagan coincidir la solución con el ensayo real. La metodología consiste en la formulación analítica de la ley momento-curvatura para ley constitutiva del UHPFRC que varía para cada uno de los estados definidos anteriormente.

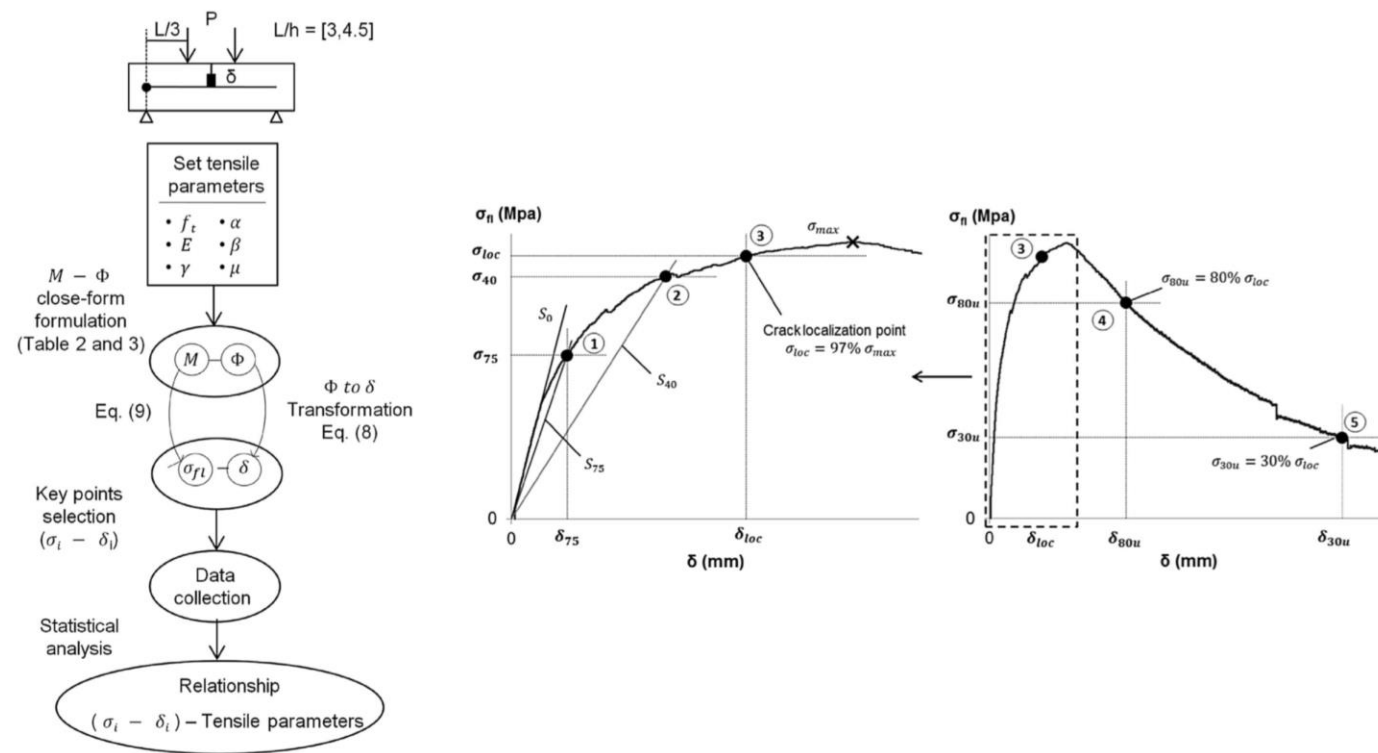


Figura 4 Secuencia del método del análisis inverso y los cinco puntos empleados [J.Á. López et al. 2016]

2.2.3.- Flexión

Para explicar el comportamiento a flexión del UHPFRC, se distinguen una serie de zonas tal y como se indica en la siguiente figura:

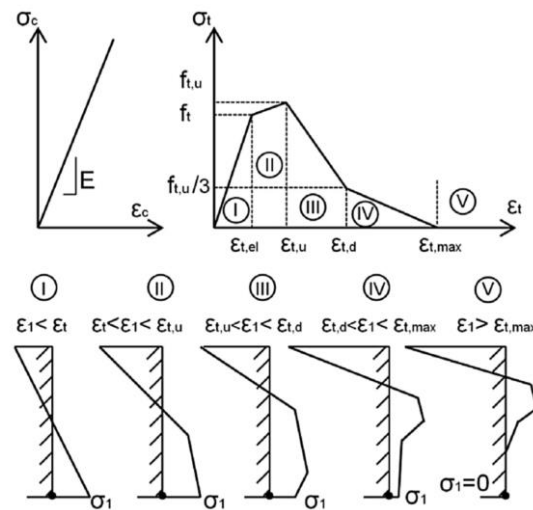


Figura 5 Leyes constitutivas asumidas para el análisis inverso [J.Á. López et al. 2016]

Como se puede observar, el método se ha planteado sin incluir la rama plástica de la ley constitutiva de compresión del UHPFRC ya que, para las probetas a partir de las cuales se pretende caracterizar la resistencia a tracción, no se alcanza dicho estado.

En la primera zona, el material trabaja con un comportamiento totalmente elástico hasta la aparición de la primera fisura. Esta fase representa entre un 35 y un 40% de la resistencia total a flexión.

Seguidamente se produce la microfisuración en donde la pieza trabaja en régimen no lineal. Este endurecimiento a flexión puede originarse incluso en piezas sin endurecimiento a tracción directa por lo que

se distingue entre endurecimiento por deformación y endurecimiento por deflexión a flexión del material. El final de esta rama coincide con la formación de una macrofisura localizada.

Como se ha comentado, el comportamiento del material viene influenciado por el porcentaje en volumen empleado de fibras (V_f), la longitud de la fibra (l_f) y su diámetro (d_f). Todo ello viene relacionado por el factor de efectividad de fibra k :

$$k = \frac{V_f \cdot l_f}{d}$$

En la siguiente gráfica se refleja dicha influencia en la resistencia a flexión:

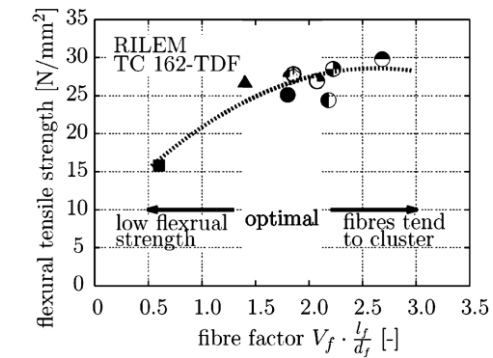


Figura 6 Factor de fibra frente a resistencia a flexión [Viet 2012]

Las conocidas como fibras cortas actúan en el proceso de microfisuración mientras que las fibras largas trabajan más tras la formación de la macrofisura. Por otro lado, la fibra fina proporciona mayor resistencia global de la pieza, pero un comportamiento menos dúctil con pendiente de rama de ablandamiento más acusada. Para controlar el proceso de fisuración y asegurar suficiente ductilidad, el plantear hormigones híbridos se presenta como la mejor opción, perjudicando la trabajabilidad del mismo y la segregación de las fibras largas.

2.3.- Efectos diferidos

Para concluir con la definición del material, se muestra una breve descripción de los efectos diferidos.

2.3.1.- Retracción

En primer lugar se produce la retracción autógena causante de que el volumen total de los productos hidratados de cemento y humo de sílice sea aproximadamente un 8% inferior al volumen inicial de los componentes. Dicha reducción de volumen es debida al bloqueo de los áridos a la libre circulación de la pasta, lo que supone la aparición de huecos de aire y una consecuente pérdida de la humedad relativa de los poros produciéndose el fenómeno de la autodesecación hasta valores de humedad relativa del 75% en donde la retracción autógena se estabiliza.

La retracción de secado es debida a la evaporación del agua por los poros capilares del hormigón durante los primeros 20 días tras el hormigonado. Sin embargo, los valores alcanzados son muy inferiores a los de la retracción autógena debido a la baja relación agua/cemento.

2.3.2.- Fluencia

La fluencia es el fenómeno por el cual aumentan las deformaciones en el hormigón en el tiempo frente a carga constante. Mediante el coeficiente de fluencia es posible evaluar dicha acción, el cual depende del momento de aplicación de la carga. Cabe indicar que con un tratamiento térmico, dicho coeficiente se reduce drásticamente hasta 0,2.

3.- VENTAJAS DEL UHPFRC EN LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES

Con respecto a las ventajas que supone la utilización del UHPFRC en el diseño y cálculo de puentes y pasarelas, Fehling et al. (2009) presentan la siguiente relación:

- En elementos sometidos a flexión simple o compuesta, puede tenerse en cuenta la resistencia a tracción que aportan las fibras, asegurando un comportamiento dúctil de los elementos. En los casos donde se compute dicha resistencia, deben introducirse factores que tengan en cuenta la distribución espacial no homogénea de las fibras. Para elementos delgados, la principal dirección de orientación de las fibras es paralela a la dirección de hormigonado.
- El armado pasivo convencional y las fibras pueden ser utilizados conjuntamente de forma eficiente
- El UHPFRC puede desarrollar tensiones de adherencia muy altas (hasta 50 MPa), lo que lleva a considerar longitudes de anclaje o solape mucho menores que en el hormigón convencional.
- La resistencia frente a fatiga del UHPFRC bajo compresiones cíclicas representa alrededor del 40% de la resistencia a compresión estática. Esto supone un comportamiento similar al del hormigón convencional.
- El uso de áridos con un tamaño máximo (TMA) de 1 a 2 mm mejora la homogeneidad de la matriz. Sin embargo, en elementos de UHPFRC con dimensiones considerables, pueden utilizarse áridos con mayor TMA, llegando incluso hasta 8 mm.
- La prefabricación es altamente recomendable para obtener elementos estructurales de gran calidad. En el caso de que las piezas se sometan a tratamientos de calor (curado al vapor o similares), se pueden eliminar los efectos principales de la retracción autógena, así como reducir el coeficiente de fluencia de $\phi = 0,8$ a $\phi = 0,2 - 0,3$.
- El pretensado de los elementos con armaduras activas, ya sean pretesas o postesas, puede ser utilizado de manera muy eficiente, buscando aprovechar al máximo la alta resistencia del UHPFRC. Además, el comportamiento en servicio de la estructura mejora significativamente (se minimiza o incluso evita la fisuración, se reducen las flechas debidas a los efectos diferidos, etc).
- La resistencia frente al fuego del UHPFRC puede ser mejorada sustancialmente si se sustituyen los áridos de cuarzo por áridos de basalto. La utilización de fibras de polipropileno pueden proveer espacios de expansión para el vapor de agua.
- Debido a la alta resistencia a tracción (hasta 10 MPa) y a la estructura densa de los elementos de UHPFRC, se trata de un material apto para ser pegado. Esto abre la puerta a la realización de uniones pegadas, ya sea entre elementos de UHPFRC o con elementos de otros materiales.

4.- APLICACIÓN ACTUAL DEL UHPFRC EN PUENTES Y PASARELAS

4.1.- Pasarela sobre el río Fulda, Kassel (2007)

Las primeras pasarelas de UHPC en Alemania se construyeron en Niestetal, cerca de Kassel. Las secciones transversales de estas pasarelas, de 7, 9 y 12 m de luz respectivamente, consistían en una U invertida en el caso de la pasarela de 12 m y secciones en π en el resto. Las secciones se encontraban pretensadas en las almas, mientras que en el resto de la pasarela no se dispuso ningún tipo de armado pasivo, a excepción de las zonas de anclaje. Estas pasarelas presentaban una curvatura en su parte inferior, lo que provoca la variación del centro de gravedad en cada sección. Esto permitió que la utilización de cables de pretensado rectilíneos originase una variación de momentos curvilínea, ajustándose de este modo a la ley de momentos flectores. La figura 7 muestra la pasarela de 9 m de luz.



Figura 7 Pasarela con sección en π y 9 m de luz en Niestetal [Fehling 2009]

En el parque federal de la ciudad de Kassel, existía hasta 2005 una pasarela de 132 m de longitud construida en madera en 1981 para ofrecer una conexión a peatones y ciclistas entre las dos márgenes del río Fulda, la cual tuvo que ser clausurada debido a los importantes daños que presentaba tras sufrir durante años ataques por hongos. El ayuntamiento de la ciudad de Kassel, como propietario de la pasarela, buscaba una solución durable y ligera para sustituirla, lo que fue visto como una oportunidad por la Universidad de Kassel, que llevaba tiempo investigando sobre el UHPC, un material innovador que prometía una durabilidad superior en comparación con otros materiales como acero, madera u hormigón convencional.

Para el diseño conceptual se tuvo en cuenta como principal condicionante que las pilas existentes debían ser utilizadas en la nueva pasarela, ya que la concepción de una solución de gran luz habría incrementado el coste del proyecto sustancialmente. Como las antiguas subestructuras tenían que reutilizarse, la nueva superestructura no podía resultar mucho más pesada que la existente en madera. Frente a soluciones en hormigón convencional pretensado, que difícilmente cumplirían la limitación anterior, se plantearon distintas soluciones que utilizaban elementos unidimensionales de UHPC.

Principalmente, se plantearon diseños en puente viga y puente atirantado, siendo este último descartado debido al mantenimiento y supervisión que requerirían los cables. Dentro de los puentes viga, se optó por una solución de viga continua en celosía, lo que permitiría reducir problemas de vibraciones en comparación con un sistema de vigas isostáticas. La figura 8 muestra el alzado de la pasarela propuesta:

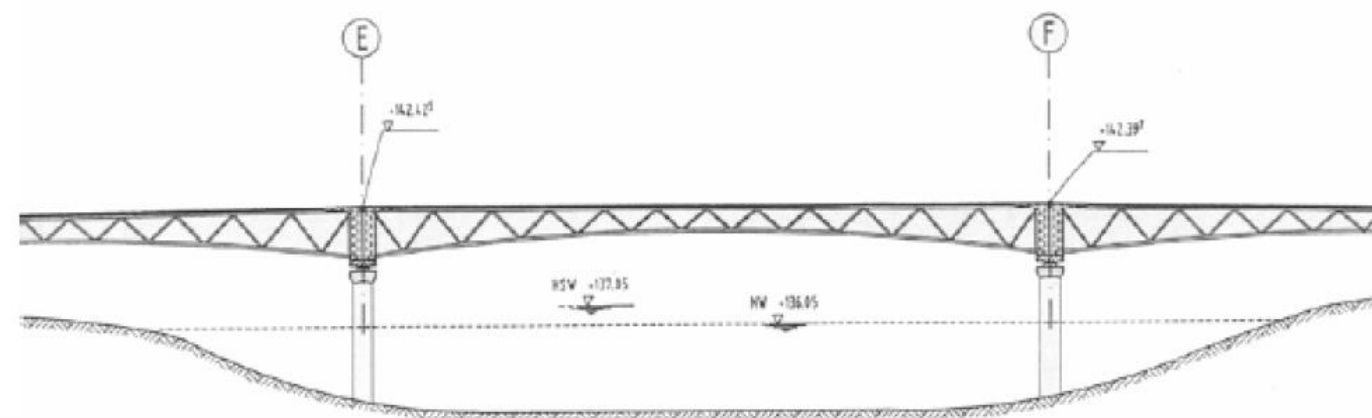


Figura 8 Alzado longitudinal de la pasarela sobre el río Fulda [Fehling 2009]

En cuanto a la sección transversal de la celosía, se optó por una sección triangulada. En un diseño preliminar, se concibió que la celosía estuviera constituida por diagonales de acero y cordones superior e inferior de UHPC. El cordón inferior podría constituirse por una viga pretensada de UHPC ya que, teóricamente, la alta resistencia y las correspondientes deformaciones elevadas permitirían que la pieza trabajase sin fisurarse. Sin embargo, ya que en ese momento aún no existían experiencias prácticas en ese sentido, se decidió utilizar elementos de UHPC únicamente en el cordón superior de la celosía y en el tablero, utilizando acero también en el cordón inferior. La figura 9 muestra la sección transversal propuesta inicialmente y la sección transversal final.

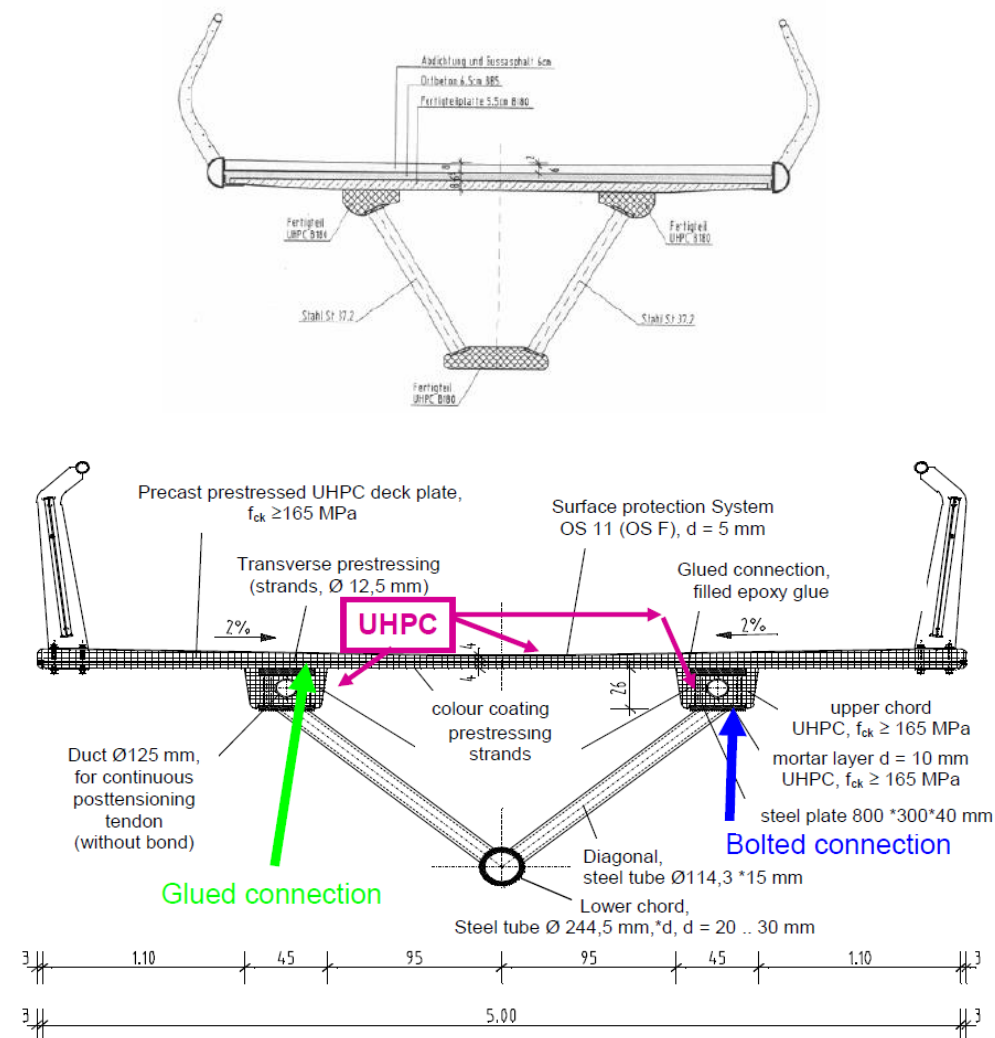


Figura 9 Sección transversal propuesta inicialmente y sección transversal final [Fehling 2009]

Por último, deben comentarse una serie de aspectos relativos a las uniones entre elementos. Respecto a las uniones entre las diagonales de acero y el cordón superior de UHPFRC, éstas se llevan a cabo mediante placas de anclaje embebidas en el hormigón. Para materializar la unión entre el tablero y el cordón superior, se decidió la utilización de pegamento ya que la utilización de conectores de acero habría requerido de un recrecido en las placas de UHPC, ya que se encuentran pretensadas transversalmente. En cuanto a las uniones entre los cordones superiores de los tramos de celosía, dado que se trata de una viga continua y en los apoyos aparecen flectores negativos, debe realizarse un pretensado de los cordones de modo que se asegure que en servicio no se produce la descompresión de la unión. Para llevarlo a cabo, se emplea un proceso muy interesante denominado doble pretensado. En primer lugar, se realiza un pretensado de los cordones superiores de UHPC en planta de prefabricado, mediante armadura pretesa, de modo que se asegura que las secciones se encuentran suficientemente comprimidas para las fases de producción, transporte y montaje. Dicha armadura no se ancla, a la espera de un posterior postesado en obra. Una vez montada la pasarela, se aplica un postesado continuo en los cordones superiores de la misma, de modo que se asegura el adecuado cumplimiento del Estado Límite de Servicio. La figura 10 muestra una vista de la pasarela ejecutada.

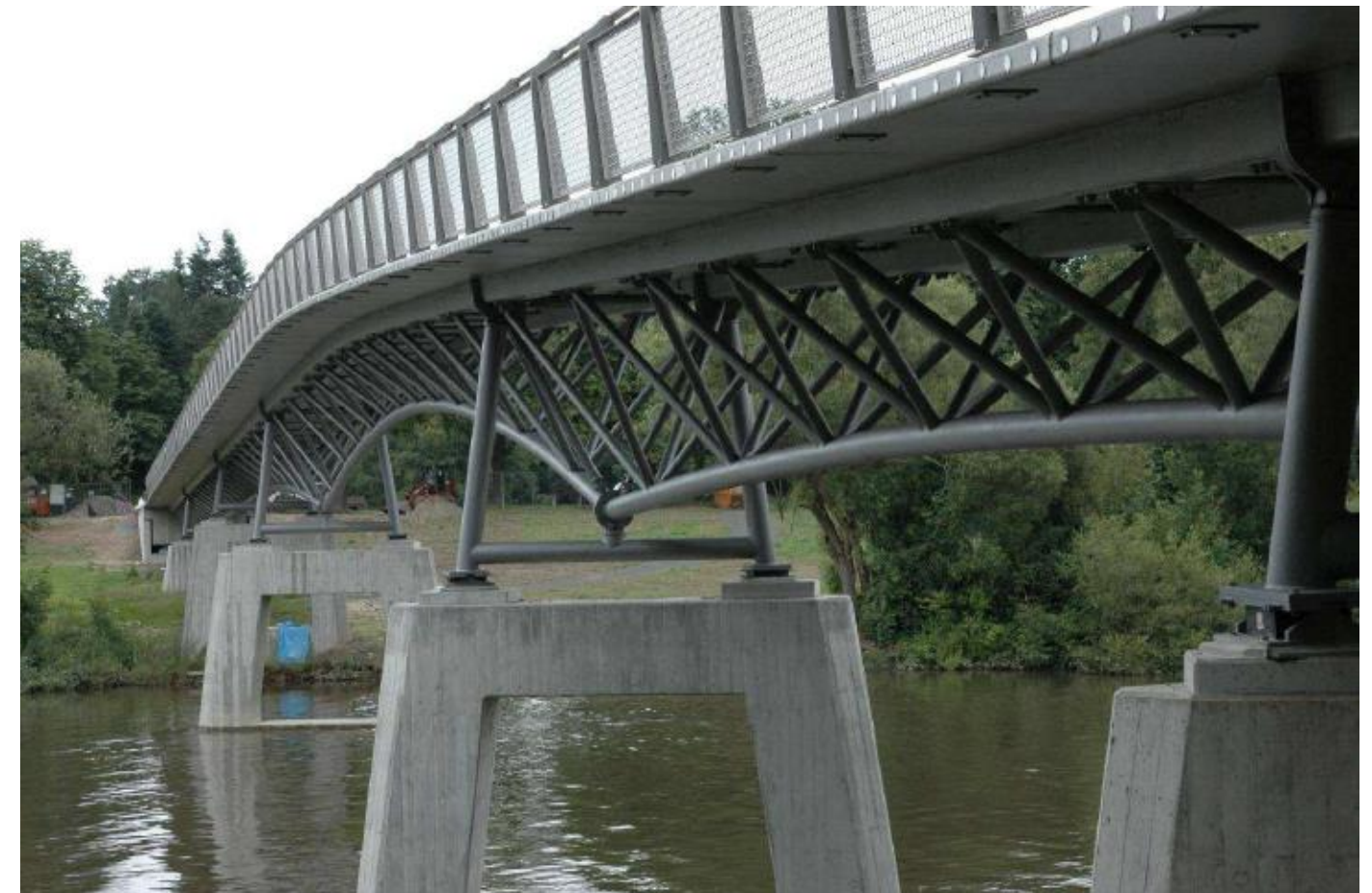


Figura 10 Pasarela sobre el río Fulda en Kassel [Fehling 2009]

4.2.- Aplicaciones en Japón (pasarelas)

4.2.1.- Pasarela Sakata-Mirai (2002)

Se trata de una pasarela que salva un único vano de 49 m de luz mediante una viga constituida por segmentos prefabricados de sección en cajón, unidos monolíticamente mediante un pretensado externo. El peso total de la pasarela es de tan solo 540 kN, alrededor de una quinta parte del peso que tendría una pasarela equivalente en hormigón convencional. Esto es debido al poco espesor de los elementos que forman el cajón: por ejemplo, la losa superior tiene un espesor de 5 cm mientras que las almas tienen un espesor de 8 cm. La relación canto-luz de la pasarela es 1/90 en apoyos y 1/32 en centro luz. La figura 11 muestra una imagen de la pasarela.



Figura 11 Pasarela Sakata-Mirai [Tanaka et al. 2009]

4.2.2.- Pasarela Akakura Onsen Yukemori (2004)

Se trata de una pasarela que salva un único vano de 36 m mediante una viga con sección en cajón. El espesor de la losa superior es de 7 cm mientras que el canto total de la viga es de 95 cm, lo que lleva a una relación canto-luz de 1/40. A diferencia de la pasarela anterior, donde la viga estaba formada por segmentos celulares, en este caso la sección en cajón se constituye mediante elementos prefabricados de forma separada: una losa superior y una viga con sección en U. Para la unión entre la viga en U y la losa superior se han utilizado conectores *perfobond* (conocido también como PBL). Estos conectores consisten en una placa perforada de acero con barras de acero que se embeben en orificios practicados en la losa, de modo que al hormigonar la unión se asegura la transferencia del rasante. La figura 12 muestra un detalle de la unión con conectores *perfobond*, los cuales permiten ejecutar uniones más compactas que los conectores convencionales dada su mayor rigidez a cortante, así como muestra una imagen de la pasarela.

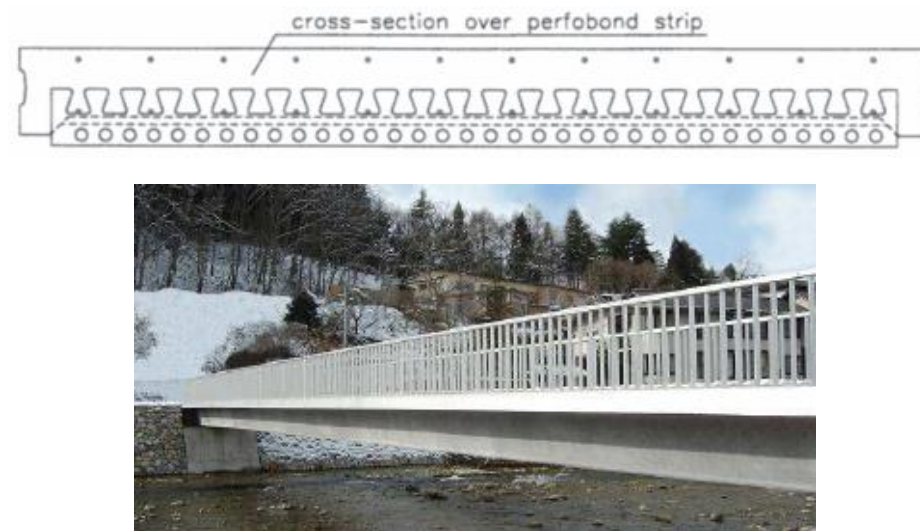


Figura 12 Detalle de unión con conectores *perfobond* (PBL) y vista de la Pasarela Akakura [Tanaka et al. 2009]

4.2.3.- Pasarela Hikita (2007)

Se trata de una pasarela que salva un vano de 63 m de luz mediante una viga constituida por segmentos prefabricados de viga artesa. Cuando se construyó se trataba del puente de viga artesa hecho con UHPFRC más largo del mundo. Los segmentos, con espesores de alma y losa inferior de 12 y 25 cm respectivamente, se unieron monolíticamente en obra mediante junta húmeda y pretensado exterior. Al igual que en la pasarela Sakata-Mirai, se ejecutan aberturas circulares en las almas a modo de aligeramiento. La figura 13 muestra una imagen de la pasarela.



Figura 13 Pasarela Hikita [Tanaka et al. 2009]

4.2.4.- Pasarela Mikaneike (2007)

Se trata de una pasarela de 81 m de longitud que salva dos vanos de 40,5 m mediante una viga continua con sección en cajón. Se trata de la primera pasarela constituida por una viga continua en cajón realizada en UHPFRC. El canto total de la viga es de 1 m, lo que conlleva una relación canto-luz de 1/40. La losa superior tiene un espesor de 7 cm, la losa inferior tiene un grosor de 8 cm y el espesor de las almas varía de 8 a 20 cm. La viga cajón está constituida por segmentos de viga en U, unidos entre sí mediante junta húmeda y postesado exterior, unidos a una losa superior mediante conexiones PBL. La figura 14 muestra una imagen de la pasarela.



Figura 14 Pasarela Mikaneike [Tanaka et al. 2009]

4.3.- Aplicaciones en Japón (puentes de carretera)

4.3.1.- Puente Horikoshi C-Ramp (2005)

Este puente de carretera, que cuenta con un único vano de 16 m, fue inicialmente diseñado mediante una losa aligerada pretensada de hormigón convencional. Posteriormente el diseño se cambió, resultando en un puente compuesto formado por vigas prefabricadas de UHPFRC y una losa hormigonada in situ de hormigón convencional. Este puente de carretera fue el primero en Japón en utilizar UHPFRC para las vigas principales. El puente está compuesto por cuatro vigas en I prefabricadas y pretensadas unidas a una losa hormigonada in-situ mediante conexiones PBL. En comparación con la solución equivalente en hormigón convencional, se redujo el número de vigas necesarias de 11 a 4, resultando un puente un 30% más ligero que el diseño original. Además, el peso de cada una de las vigas se redujo de 120 a 50 kN, permitiendo la utilización de grúas más ligeras. La figura 15 muestra el momento del izado de las vigas mientras que la figura 16 muestra una imagen del puente terminado.



Figura 15 Izado de las vigas en I [Tanaka et al. 2009]



Figura 16 Puente Horikoshi C-Ramp [Tanaka et al. 2009]



Figura 18 Nariz de lanzamiento durante proceso constructivo [Tanaka et al. 2009]

4.3.2.- Puente Torisalogawa (2006)

Este puente de carretera, de 554 m de longitud, cuenta con 11 vanos, teniendo 56 m de luz el más largo de ellos. El puente está constituido por una viga en cajón formada por almas de acero corrugado y losas de hormigón convencional. El proceso constructivo del puente se realizó mediante empuje del mismo. Sin embargo, en vez de utilizar una nariz de lanzamiento provisional en acero, se decidió construir una sección frontal de la viga en cajón mediante almas de acero corrugado, cordones superiores de acero y cordones inferiores de UHPC, de modo que se consiguiera aligerar la nariz. Una vez se completó el lanzamiento, estos elementos pasaron a ser elementos permanentes del puente. La utilización del UHPC en los cordones inferiores, que se prefabricaron y se unieron entre sí mediante junta húmeda, permitió que la sección transversal de la nariz de lanzamiento fuera más pequeña y por tanto más ligera que si se hubiese ejecutado con hormigón convencional. La figura 17 muestra un detalle del cordón inferior de UHPC mientras que la figura 18 muestra la nariz de lanzamiento.



Figura 17 Cordón inferior de nariz de lanzamiento en UHPC [Tanaka et al. 2009]

4.4.- Aplicaciones en EEUU (US Highway)

La Administración Federal de Autovías de los Estados Unidos (o FHWA por sus siglas en inglés) lleva investigando las aplicaciones del UHPC en la infraestructura vial de EEUU desde el año 2001 y aplicando dicha tecnología desde 2002. Uno de los principales puntos del programa de UHPC de la FHWA ha sido el desarrollo de componentes modulares de UHPC que permitan acelerar el proceso constructivo de los puentes del mismo modo que constituyan estructuras durables y que requieran un mínimo mantenimiento a lo largo de su vida útil. Otro de los puntos principales ha sido el desarrollo de sistemas de sustitución de tableros que permitan el desmantelamiento del tablero existente y la rápida restitución por elementos modulares de UHPC. A continuación se muestran algunas de las aplicaciones principales.

4.4.1.- Puente Mars Hill (2006)

Este puente de carretera, situado en el condado de Wapello (Iowa) fue el primer puente en utilizar una superestructura de UHPC construido en EEUU. El puente salva un vano de 33 m mediante 3 vigas pretensadas de sección en I con un canto de 1,07 m. La utilización de UHPC permitió construir vigas con dimensiones menores a las indicadas en los estándares americanos para hormigón convencional. Además, se prescindió de los cercos de cortante, habituales en este tipo de vigas, dado que la resistencia ofrecida por las fibras de acero fue suficiente para resistir las cargas de diseño. La unión entre las vigas y la losa, ejecutada in situ con hormigón convencional, se realizó mediante conectores. La figura 19 muestra una imagen del puente terminado.



Figura 19 Puente Mars Hill [Graybeal 2009]

4.4.2.- Puente Cat Point Creek (2008)

Este puente de carretera, situado en el condado de Richmond (Virginia) fue el segundo puente en utilizar una superestructura de UHPC construido en EEUU. El puente está compuesto por 10 tramos isostáticos que salvan una luz aproximada de 25 m cada uno mediante 5 vigas pretensadas de sección en I con un canto de 1,14 m, donde, a diferencia del puente anterior, sus dimensiones no presentan modificaciones respecto a los estándares americanos. Al igual que en el anterior puente, se prescindió de la armadura de cortante y la unión entre la losa y las vigas se materializó a través de conectores. La figura 20 muestra una imagen del puente terminado.



Figura 20 Puente Cat Point Creek [Graybeal 2009]

4.4.3.- Puente Jakway (2009)

Este puente de carretera, situado en el condado de Buchanan (Iowa) fue el tercer puente en utilizar una superestructura de UHPC construido en EEUU y el primero en utilizar una sección en π . El puente, con una longitud de 32 m, salva el vano central de 15,5 m de longitud mediante 3 vigas con sección en π , con un canto de 0,84 m. Las vigas se conectaron entre sí longitudinalmente a través de una llave de cortante continua, con pasadores dispuestos cada 46 cm. Además, se dispusieron diafragmas de acero para minimizar la distorsión en cada tercio del vano. La figura 21 muestra una imagen del puente terminado mientras que la figura 22 muestra la sección transversal del puente en 1/3 de vano.



Figura 21 Puente Jakway [Graybeal 2009]

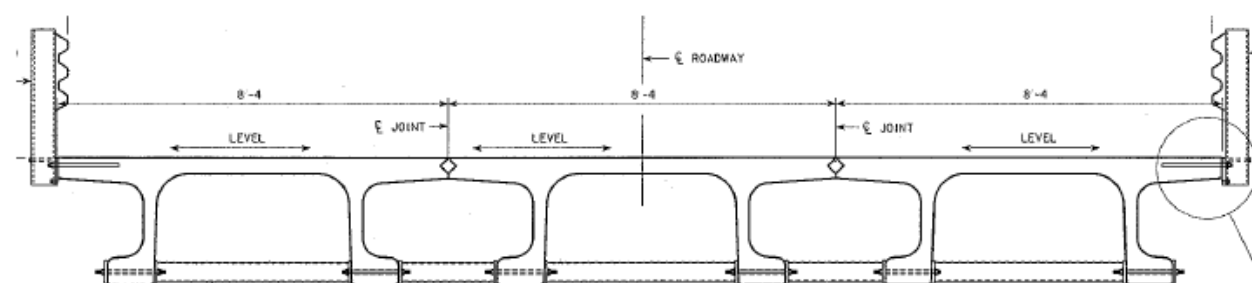


Figura 22 Sección transversal del puente a 1/3 de vano [Graybeal 2009]

4.4.4.- Puente sobre la Ruta 31 (2009)

Este puente de carretera, situado en Lyons (Nueva York) constituye la primera aplicación del UHPC como material de unión entre elementos del tablero de un puente en EEUU. El puente, que salva una luz de 26 m, está formado por 8 vigas prefabricadas pretensadas de sección en doble T de hormigón convencional. El detalle de unión entre vigas consiste en una llave de cortante longitudinal con forma de diamante, dentro de la cual se incluyen pasadores. Gracias a la utilización del UHPC se consigue reducir la longitud de solape necesaria entre pasadores a 152 mm. La figura 23 muestra un detalle de la unión.

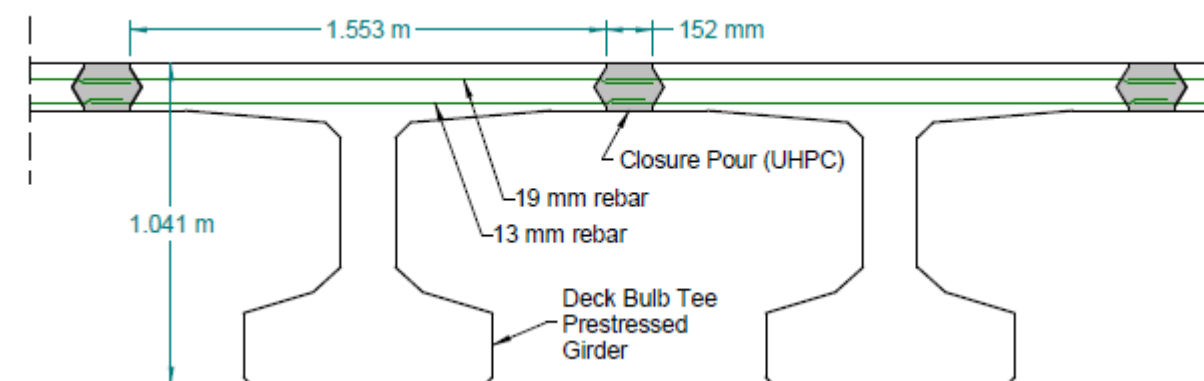


Figura 23 Detalle de la unión entre vigas longitudinales mediante UHPC [Graybeal 2009]

4.4.5.- Paneles Waffle

Como se ha mencionado anteriormente, dentro del programa impulsado por la FHWA se han hecho grandes esfuerzos en desarrollar sistemas de sustitución de tableros que permitan el desmantelamiento del tablero existente y la rápida restitución por elementos modulares de UHPC. Este hecho viene motivado por tres aspectos: en primer lugar, el deterioro de los tableros es el principal problema de mantenimiento al que se enfrentan los propietarios de puentes en EEUU; en segundo lugar, la durabilidad del UHPC ha demostrado ser significativamente mejor que la del hormigón convencional; por último, la posibilidad de emplear elementos modulares prefabricados agiliza en gran medida el proceso constructivo, permitiendo reducir plazos de reparación de puentes. Como resultado del proceso de investigación de la FHWA, se adaptaron los paneles tipo Waffle utilizados durante décadas en la industria de la edificación (forjados reticulares) a su utilización en tableros de puentes, llegando incluso a publicar una guía de diseño (Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections).

Los elementos tipo Waffle consisten en paneles modulares con familias de nervios ortogonales, pretensadas en sentido longitudinal, los cuales se unen entre sí mediante llaves de cortante longitudinales y transversales y a las vigas longitudinales mediante conectores embebidos en orificios practicados en el propio panel, rellenados todos ellos in situ con UHPC. El proceso constructivo a seguir se detalla a continuación:

1. Demolición del tablero de hormigón convencional existente
2. Eliminación de la armadura de rasante existente en las vigas longitudinales
3. Disposición de los nuevos conectores en las vigas longitudinales
4. Diseño, fabricación y transporte de los paneles tipo Waffle
5. Colocación de los paneles sobre los conectores de las vigas longitudinales
6. Hormigonado de uniones viga-panel y panel-panel

La figura 24 muestra una visión general de los paneles tipo Waffle.

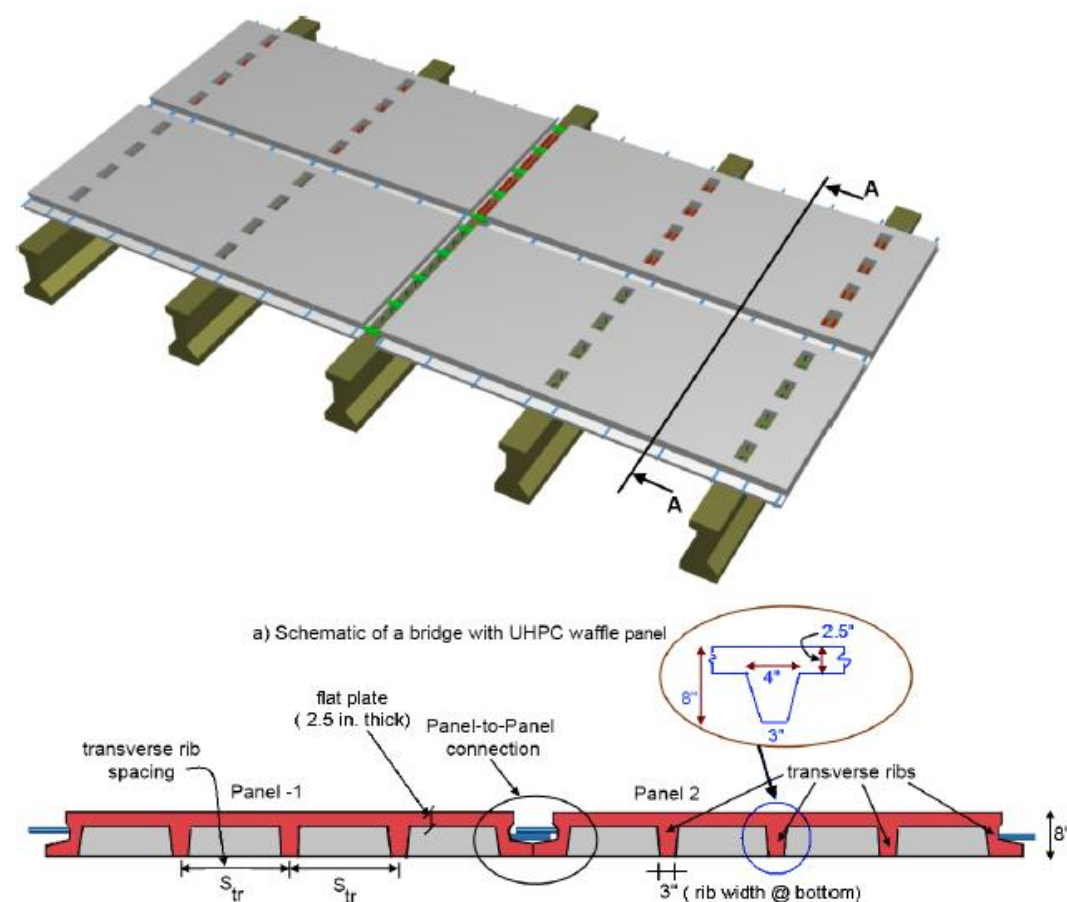


Figura 24 Visión general de los paneles tipo Waffle [FHWA 2013]

Por último, respecto a este tipo de elementos debe indicarse que, fruto de una Beca de Colaboración concedida al autor de este documento en la Unidad de Materiales del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), se desarrollaron unos paneles tipo Waffle, en módulos de 2,40 x 5,00 m cuyas dimensiones detalladas se muestran a continuación.

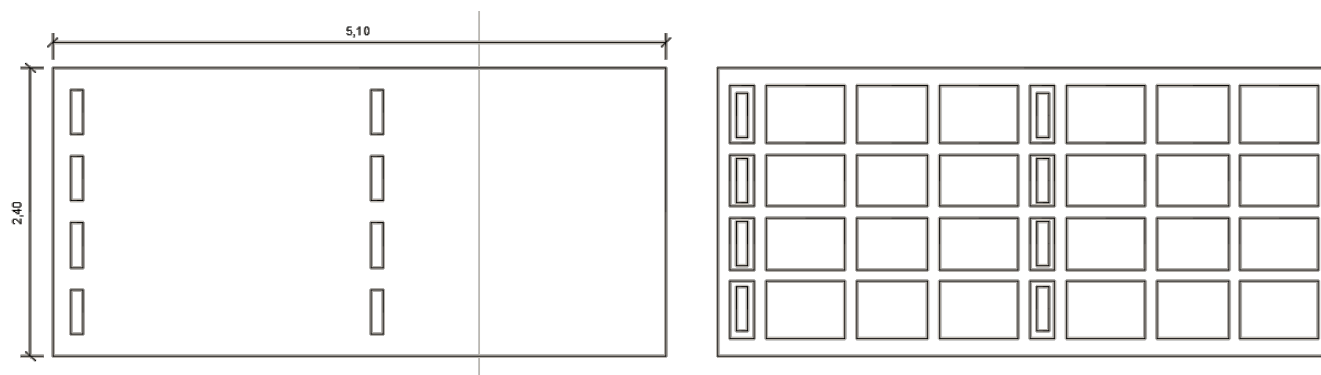


Figura 25 Geometría general de los Waffles diseñados por el autor de este documento [Tarín 2015]

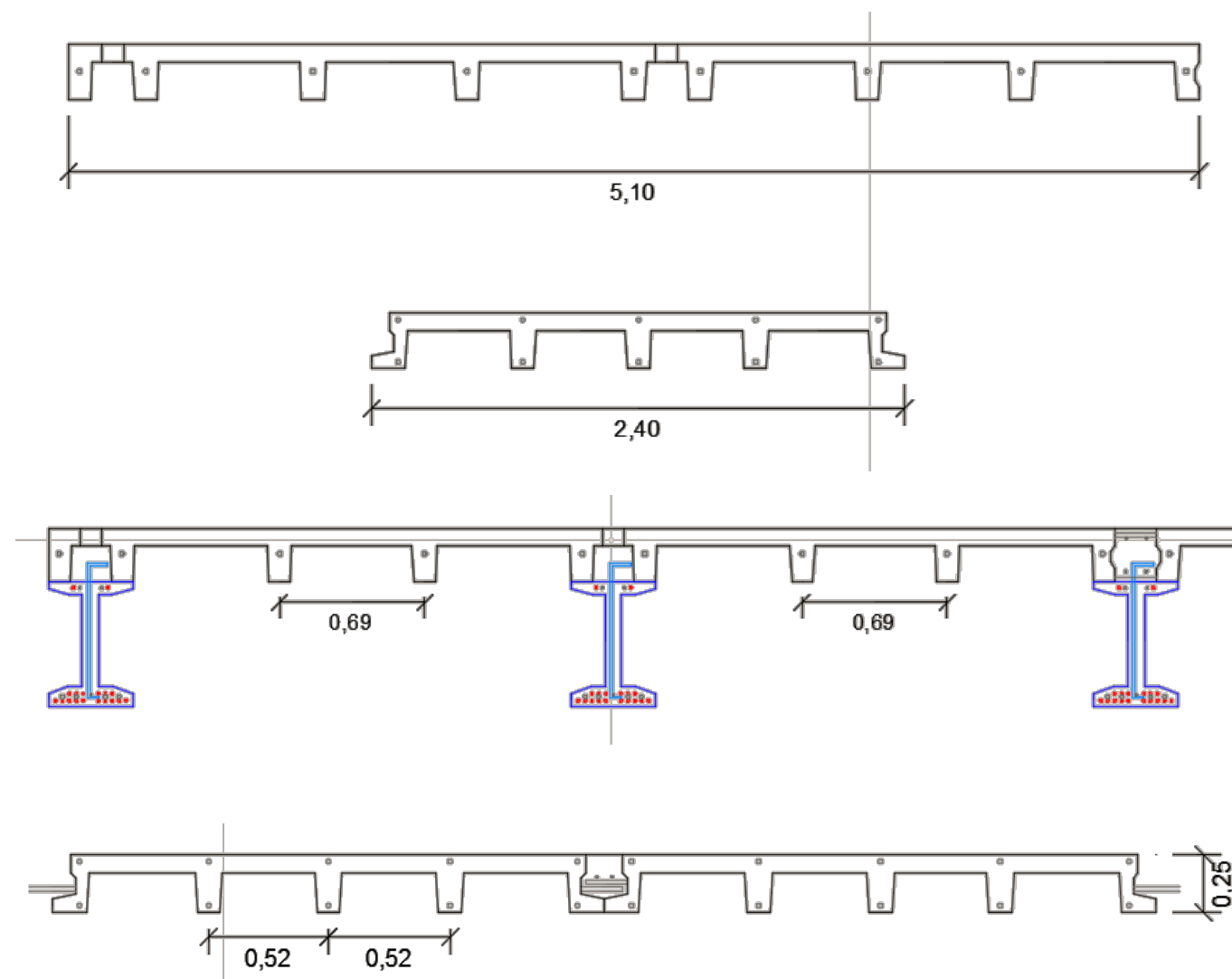


Figura 26 Secciones tipo de los Waffles diseñados por el autor de este documento [Tarín 2015]

4.5.- Aplicaciones en España

4.5.1.- Pasarela sobre el Barranco de las Ovejas (Alicante)

Dentro del proyecto de acondicionamiento del Barranco de las Ovejas en su tramo final, en Alicante, se planteó la ejecución de una pasarela peatonal en la zona próxima a la desembocadura del mismo, la cual fue ideada inicialmente como una viga Vierendeel metálica de canto variable. Sin embargo, durante una fase del proyecto surgieron una serie de dudas respecto a la idoneidad del acero como material estructural, puesto que la pasarela se encontraba en un entorno marino. Esta incertidumbre se agravó debido a la clausura de una pasarela de acero por problemas de durabilidad situada en un entorno muy similar en la localidad de El Perelló (Valencia).

Ante esta situación, se propuso modificar el diseño de la pasarela, buscando asegurar un coste de mantenimiento mínimo dentro de un ambiente marino así como manteniendo tanto el coste de la estructura inicial como el peso de la misma, para evitar aumentar los costes de la cimentación. De este modo, 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) se planteó la utilización de hormigón de muy alto rendimiento (HMAR), otorgando además un carácter innovador a la obra al tratarse de la primera pasarela realizada con HMAR en España.

Desde el punto de vista técnico, la pasarela contaba con una serie de condicionantes, tal y como indican Serna et al. (2015), como por ejemplo el hecho de salvar una luz de 42,81 m sin apoyos intermedios, no superar el coste de la estructura inicialmente proyectada o constituir la barandilla mediante la propia estructura resistente de la pasarela.

Teniendo en cuenta los condicionantes indicados, así como la experiencia internacional en UHPFRC, que indica que este material obtiene su máximo potencial en aplicaciones prefabricadas, se plantearon una serie de alternativas, desde una viga de canto constante hasta una sección cerrada en cajón. Asumiendo como principios de diseño la transparencia, esbeltez y economía, finalmente se planteó la utilización de la tipología viga con sección en artesa y almas aligeradas, dando lugar a una celosía. Como exponen Serna et al. (2015), la utilización de un alma aligerada da una mayor transparencia, ofreciendo una mayor sensación de esbeltez, además de un mayor ahorro y optimización del material. Por otro lado, un alma en celosía con un tablero intermedio ofrece mayores problemas de estabilidad en el cordón superior. 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 fueron factores predominantes por encima de la eficiencia estructural. A continuación se realiza la descripción de la pasarela finalmente diseñada a través de la síntesis de la descripción realizada en Serna et al. (2015).

La pasarela finalmente diseñada salva una luz libre de 42,81 m en eje, mediante un elemento de 43,51 m de longitud total en eje, con ambos apoyos esviados y con una sección transversal en artesa. Las almas de esta artesa quedan constituidas por 2 celosías Warren modificadas de canto variable, desde 1,44 m en apoyos hasta 2,07 m en el centro. 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 m del cordón superior, que hace las veces de barandilla. Las diagonales, tanto comprimidas como traccionadas, que forman la celosía Warren modificada, tienen una sección rectangular de 0,12 m de ancho y 0,15 m de canto. Todas las diagonales se encuentran reforzadas con 4 Φ 20 sin cercos transversales.

Los cordones comprimidos tienen una geometría variable en longitud, variando el ancho según las necesidades estructurales de la pasarela desde 0,21 m en apoyos hasta 0,40 m centro luz. Además, los cordones se encuentran aligerados con el fin de disminuir el volumen de material necesario, reducir el peso e incrementar su radio de giro.

Los cordones traccionados de la artesa tienen un canto de 0,15 m y un ancho de 0,60 m alojando en su interior un total de 18 cordones Y1860S7 cada uno de ellos. Estos cordones forman parte de la celosía inferior en X que conecta ambas celosías laterales. Sus diagonales tienen una sección rectangular de 0,10 m de ancho y 0,15 m de canto, incluyendo 4 Φ 12 sin cercos transversales.

El tablero tiene un ancho libre mínimo para el tránsito de peatones de 2,80 m. A lo largo de cada celosía lateral y a una distancia de 1 m desde el borde superior de la artesa, un nervio longitudinal, de 0,12 m de ancho y 0,15 m de canto con 4 Φ 12, marca la traza del tablero.

Conectando ambos nervios longitudinales, se disponen una serie de nervios transversales de 0,12 m de ancho y 0,15 m de canto reforzados con 4 Φ 12. Se encuentran ubicados en la intersección de los nervios longitudinales con las diagonales de la celosía lateral y a una distancia que en ningún caso excede los 1,82 m. La estructura de nervios longitudinales y nervios transversales genera unos marcos sobre los que se apoyan en continuidad un conjunto de losas de 3 cm de espesor, que constituyen la superficie pisable del tablero.

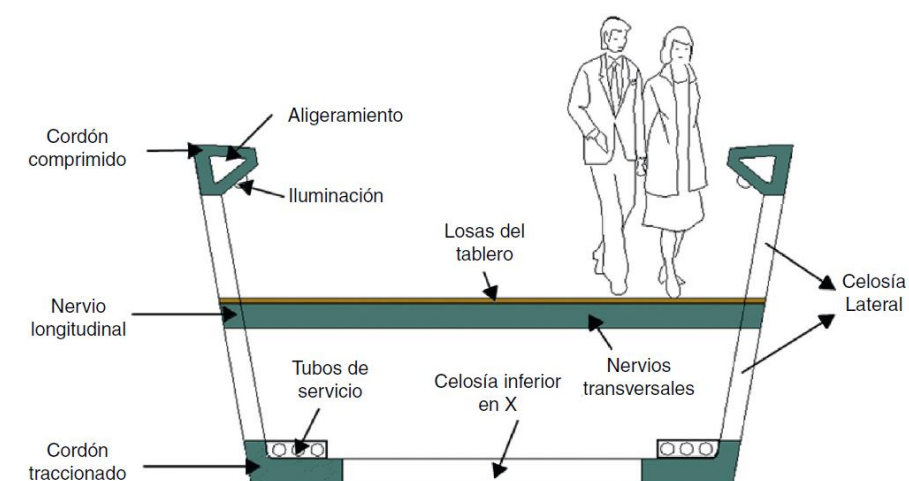


Figura 27 Sección transversal en centro-luz [Serna et al. 2015]

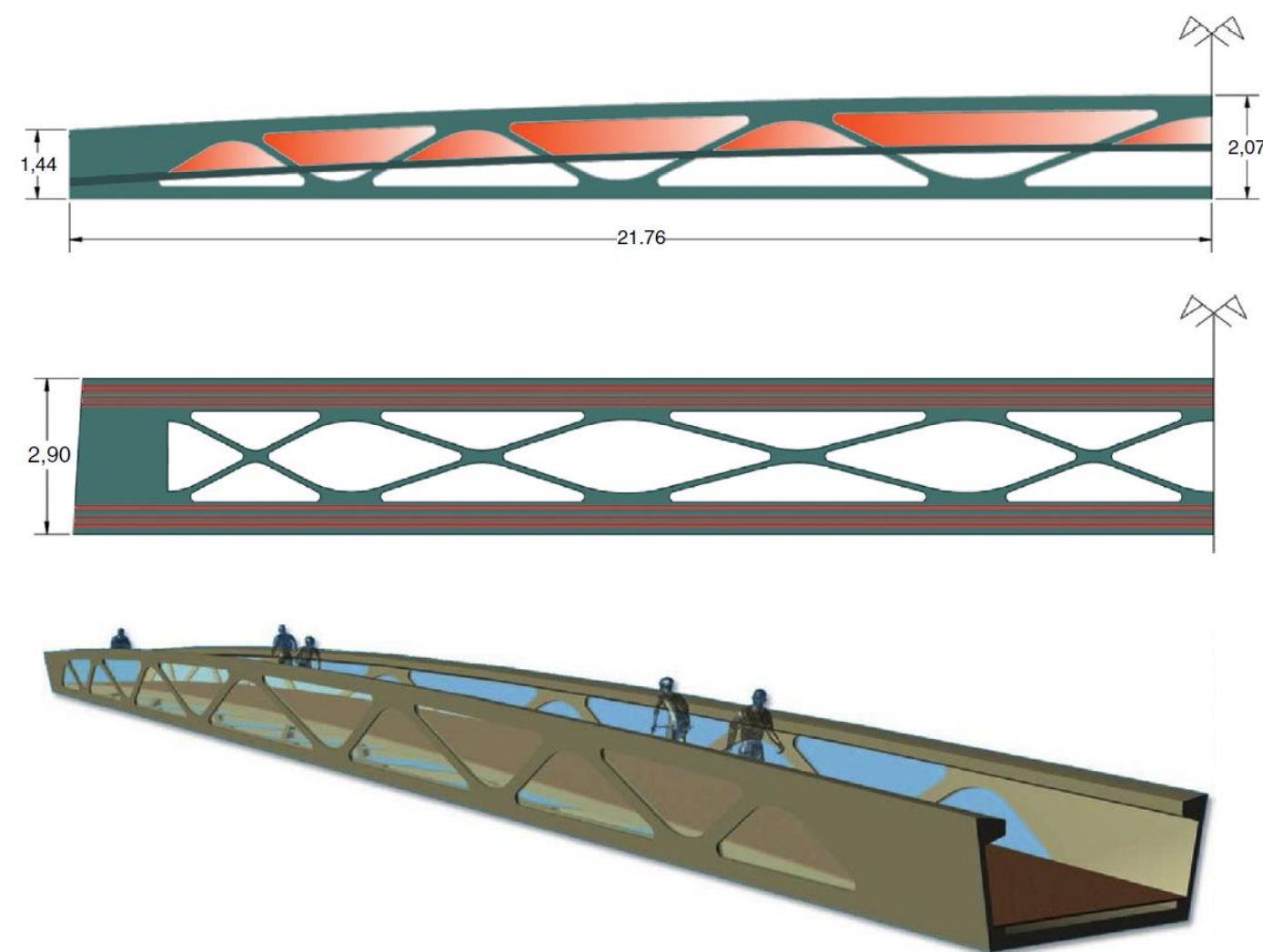


Figura 28 Alzado, celosía inferior y vista 3D de la pasarela [Serna et al. 2015]

4.5.2.- Pasarela sobre la V-21 (Puçol)

La pasarela sobre la V-21 en Puçol salva dicha autovía y permite recuperar una antigua vía pecuaria por la que actualmente transcurría el camino hacia la playa. Al igual que en la pasarela sobre el Barranco de las Ovejas en Alicante, es la cercanía al mar la que hace que una solución en HMAR sea la óptima desde el punto de vista de la durabilidad, dado que el material requiere un mantenimiento muy reducido.

Esta pasarela, que es la segunda en España realizada con Hormigón de Muy Alto Rendimiento, salva una luz máxima de 33 metros y cuenta con tres vanos centrales, además de rampas de acceso con barandillas realizadas con el mismo producto en tonos madera.



Figura 29 Vista de vano central formado por celosía de HMAR [RDC 2016]



Figura 30 Vista de rampa de acceso con barandillas de HMAR [RDC 2016]

4.6.- Puente WILD, Austria (2011)

El puente WILD se trata de un puente de carretera tipo arco inferior construido mediante elementos modulares de UHPC. El puente, cuyo vano principal es salvado por un arco de 69 m de luz, tiene una longitud total de 157 m.

Debido al mecanismo de transmisión de cargas que poseen, los puentes tipo arco permiten una óptima utilización del UHPC, pues permiten aprovechar su elevada resistencia a compresión. Además, la elevada rigidez que aporta su propia geometría ofrece ventajas comparativas frente a los puentes tipo viga, donde los estrictos límites de deformaciones a menudo impiden que se consiga un óptimo aprovechamiento de las secciones.

El vano central del puente consiste en dos arcos paralelos poligonales de 69 m de luz, formados por segmentos rectangulares huecos de tan sólo 6 cm de espesor, unidos entre sí mediante elementos de conexión o elementos *knee*, 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. La figura 31 muestra una sección transversal del puente en su vano central mientras que la figura 32 muestra un resumen esquemático de los distintos elementos que forman el arco.

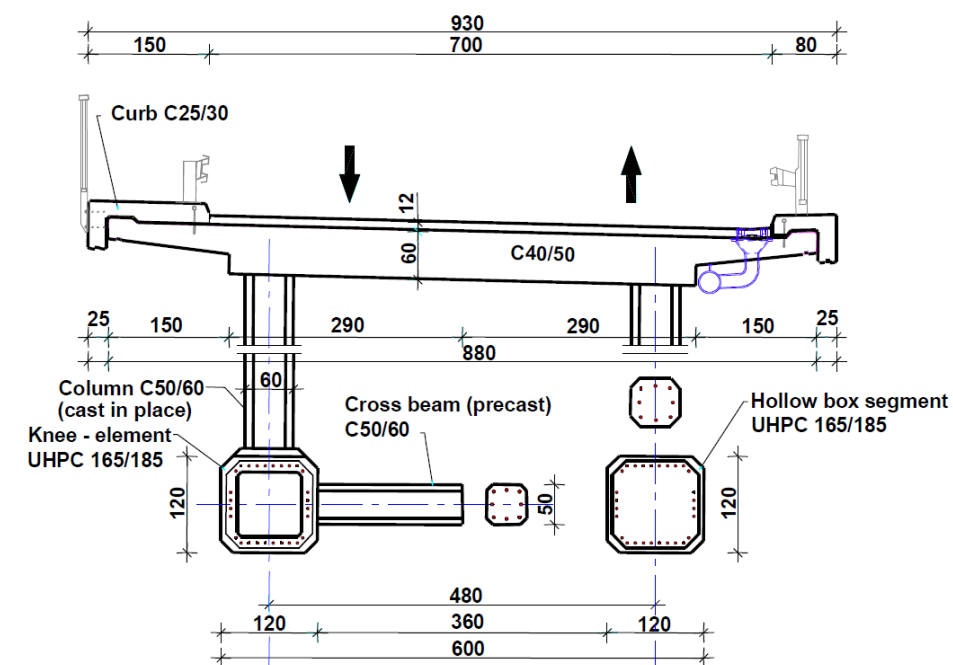


Figura 31 Sección transversal del puente en su vano central [Reichel, Sparowitz, Freytag 2011]

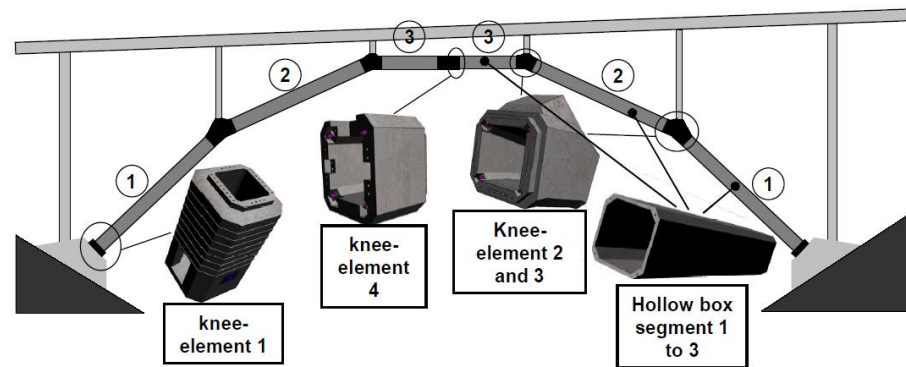


Figura 32 Resumen de elementos que forman el arco del vano central [Tue 2013]

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.

Debido al reducido espesor de las paredes de los elementos modulares, las cargas concentradas debidas a los aparatos de elevación durante la fase constructiva difícilmente pueden ser transmitidas, incluso utilizando elementos de elevación convencionales. Únicamente en los elementos de conexión fue posible la disposición de este tipo de elementos, desarrollándose elementos específicos de elevación para los elementos más vulnerables. La figura 33 muestra el proceso constructivo del vano central del puente mientras que la figura 34 muestra un elemento de conexión en la planta de prefabricado.



Figura 33 Proceso constructivo del arco del vano central [Reichel et al. 2009]



Figura 34 Elemento de unión o elemento knee [Reichel, Sparowitz, Freytag 2011]

5.- PUENTES ARCO ATIRANTADOS TIPO BOWSTRING

5.1.- Comportamiento

Desde tiempos remotos, el arco ha sido la tipología estructural predominante a la hora de realizar puentes con materiales pétreos, ya que se trata del único elemento estructural capaz de salvar un vano fundamentalmente a compresión. Utilizados durante siglos, la llegada de nuevos materiales supuso la aparición de nuevas tipologías estructurales en puentes como los puentes viga, los puentes atirantados, los puentes colgantes o los puentes losa. Sin embargo, pese a su antigüedad, puede afirmarse que los puentes arco continúan siendo hoy en día una tipología vigente, ya sea utilizando acero u hormigón armado.

Dentro de la tipología general de puentes arco pueden distinguirse tres subtipologías en función de la posición relativa del tablero respecto al arco:

- Puentes arco con tablero superior
- Puentes arco con tablero intermedio
- Puentes arco con tablero inferior

Además del condicionante impuesto por la altura de rasante necesaria bajo el puente, alrededor de los puntos donde se prevé la ubicación de los apoyos del arco, uno de los condicionantes principales para escoger una tipología u otra resulta ser de carácter geotécnico.

Los puentes arco con tablero superior transfieren las cargas del tablero a la cimentación mediante un empuje inclinado, el cual se descompone en un empuje vertical y en un empuje horizontal. La necesidad de resistir dichos esfuerzos requiere que el terreno sobre el que se cimiente el arco sea muy competente, limitándose habitualmente su aplicación a valles profundos. Si bien la tipología de puentes arco con tablero intermedio permite disponer un tirante gracias a la proximidad del propio tablero a los apoyos del arco, la tipología de puentes arco con tablero inferior o arco atirantado tipo bowstring resulta ser la idónea a la hora de proyectar un puente tipo arco en aquellas zonas donde no se disponga de un terreno de cimentación competente o bien no se quieran transmitir empujes horizontales al terreno. En efecto, es el propio tablero del puente quien atiranta al arco, absorbiendo el empuje horizontal del mismo y permitiendo que únicamente se transmitan al terreno cargas verticales. Este hecho explica la gran aplicación de esta tipología en entornos urbanos, donde habitualmente el terreno de apoyo no es competente o donde no quiere transmitirse cargas horizontales que originen problemas en las cimentaciones de las estructuras adyacentes. La siguiente figura muestra un esquema del comportamiento resistente de un puente arco atirantado tipo bowstring.

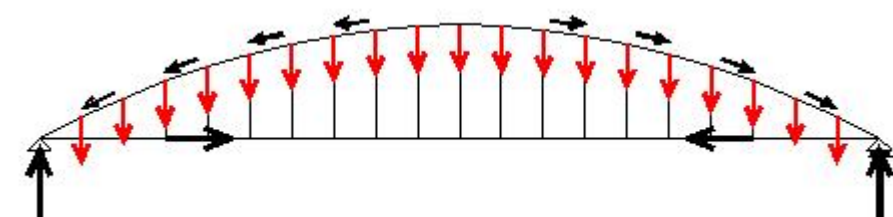


Figura 35 Comportamiento resistente puente arco atirantado tipo bowstring

Además de permitir su aplicación hasta en las peores circunstancias de cimentación, los puentes arco atirantados presentan una serie de particularidades respecto al resto de tipologías arco citadas. Según Manterola (2003):

“(La tipología de puente arco con tablero inferior) resalta, quizás con más intensidad, la relación entre la rigidez del arco y la rigidez del tablero, relación fundamentalmente la respuesta ante sobrecargas no simétricas. La tendencia de proporcionar al arco una rigidez a flexión considerable resulta lógica para utilizar las ventajas que tiene la compresión para resistir flexiones, muy importante, este hecho, en arcos de hormigón. En cambio, cada vez con más frecuencia, se tiende a minimizar la rigidez del arco y su tamaño en los arcos con tablero inferior, concentrando la rigidez del puente en el dintel, que con su rigidez a flexión gobierna tanto la respuesta ante las sobrecargas como la estabilidad ante el pandeo del arco en el plano y fuera del plano del mismo”

Como se detalla en el Anejo II: "Estudio de soluciones", en efecto la relación de rigideces entre el tablero y el arco se revela como un aspecto fundamental para el comportamiento global de la pasarela, tanto desde el punto de vista estático como dinámico. Por último, también debe destacarse la importancia fundamental del sistema de péndolas adoptado, pues de él también depende en gran medida la respuesta de la pasarela, tal y como se explica en el citado anejo.

5.2.- Puentes tipo bowstring en la actualidad

Este apartado recoge una serie de puentes y pasarelas tipo arco atirantado ejecutados o proyectados recientemente, recopilando las distintas geometrías adoptadas en las actuaciones realizadas en la actualidad.

5.2.1.- Puente arco sobre la Rambla del Cañuelo en Roquetas de Mar

El puente sobre la Rambla del Cañuelo, en Roquetas de Mar (Almería) está compuesto por tres vanos: dos laterales de acceso en losa de hormigón armado de 11,15 m de luz, y uno central mixto de 60,35 m de luz, suspendido de dos arcos metálicos exentos, verticales y paralelos tipo bowstring con 11 péndolas en cada arco. La sección de los arcos es variable, de ancho creciente y canto decreciente de arranques a clave. El tablero está formado por dos vigas cajón, una bajo cada arco, unidas entre sí por vigas transversales y con costillas triangulares exteriores que soportan las aceras de ambos lados.

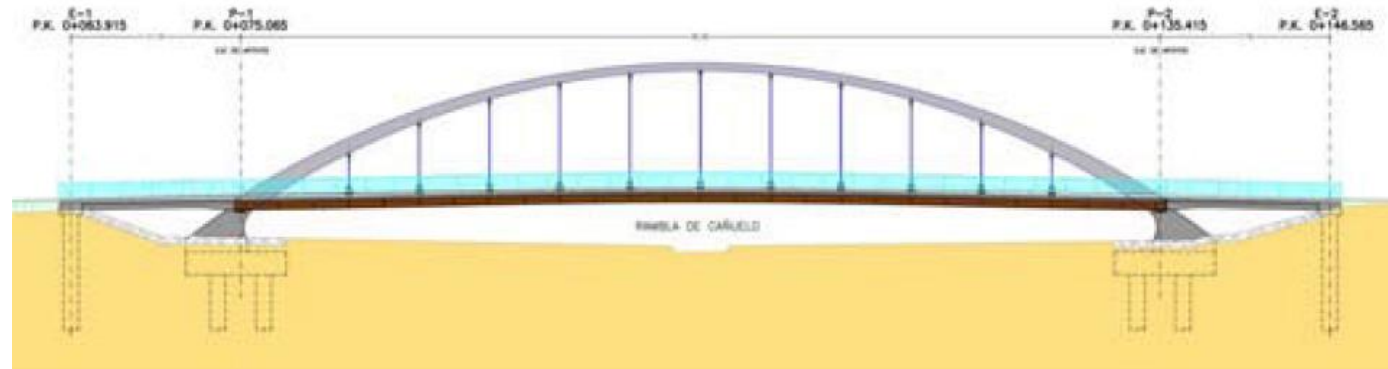


Figura 36 Alzado del puente arco sobre la Rambla del Cañuelo [Jorquera 2005]

La flecha máxima del arco situado en el vano central es de 8,60 m, lo que conlleva una relación flecha/luz de aproximadamente 1/7.

El tablero, de 25 m de ancho, está formado por dos vigas cajón longitudinales de sección trapezoidal separadas 17 m a ejes unidas por vigas transversales cada 2,30 m, sobre las que apoya la calzada. Estas vigas se prolongan con costillas de sección en T para formar los voladizos de 4,00 m de longitud sobre los que se disponen las aceras. El canto máximo es de 0,70 m, de los que 0,52 corresponden a las vigas metálicas y 0,18 a la losa de hormigón, ejecutada sobre chapa grecada dispuesta como encofrado perdido.

Por otro lado, el puente consta de dos arcos metálicos, verticales y exentos. Cada arco está situado en el plano vertical de cada una de las vigas longitudinales. La sección de los arcos es trapezoidal con variación lineal del ancho y del canto, y cambia desde un canto de 1,00 m y un ancho de 0,56 m en arranques a una sección de 1,25 x 0,50 m en clave, lo que ofrece una sección de área prácticamente constante según la directriz.

Por último, las vigas longitudinales se suspenden de los arcos mediante 11 péndolas verticales, distanciadas 4,60 m entre sí. Todas las péndolas tienen la misma sección, formadas por cables cerrados triple Z de 50 mm de diámetro.

5.2.2.- Puente arco sobre el río Deba en Guipúzcoa

El vano central del puente sobre el río Deba está formado por un puente arco atirantado tipo bowstring de 110 m de luz, el cual cuenta con un tablero de 18,60 m de ancho, de los cuales los 10 m centrales constituyen la calzada para el paso de los vehículos, disponiendo a ambos lados de los arcos unas vigas transversales a modo de cuchillas sobre las que disponer las aceras.



Figura 37 Vista del puente arco sobre el río Deba [Ortega 2010]

El tablero, de 1,25 m de canto, está formado por dos cajones separados entre sí 4,00 m, unidos entre sí mediante costillas transversales espaciadas 5,00 m.

Respecto a los arcos, ambos están forjados por dos tubos circulares de 80 cm diámetro, en acero S-355, con un espesor de 35 mm en arranques y 20 mm en clave. Los arcos se disponen en sendos planos inclinados, con una separación inicial entre ejes de 13 m, situándose casi tangentes en centro luz. La directriz de los arcos es parabólica, alcanzando una flecha máxima de 20 m, lo que conlleva una relación flecha/luz de 1/5,5. Los arcos se arriostran en la zona de clave mediante una chapa metálica continua de 20 mm de espesor.

Por último, contenidas en los planos inclinados que definen los arcos, se disponen las péndolas mediante una disposición en celosía cruzada, formando una malla tipo Network. Las péndolas están formadas por barras de acero de sección circular maciza de 56 mm de espesor.

5.2.3.- Puente arco sobre el río Guadalquivir en Palma del Río

El vano central del puente sobre el río Guadalquivir está formado por un puente arco atirantado tipo bowstring de 130 m de luz, el cual cuenta con un tablero de 16 m de ancho.



Figura 38 Vista del puente arco sobre el río Deba [Ortega 2010]

El tablero está formado por dos perfiles tubulares de 90 cm de diámetro y 40 mm de espesor a modo de vigas longitudinales, arriostradas entre sí por vigas transversales espaciadas 5,00, sobre las cuales se dispone una losa de hormigón de 25 cm de espesor.

Respecto a los arcos, ambos están formados por dos tubos circulares de 90 cm de diámetro, en acero S-355, con un espesor de 50 mm en arranques y 25 mm en clave. Los arcos se sitúan sobre sendos planos inclinados $68,8^\circ$ respecto de la horizontal, apoyándose en clave. Según indica Ortega (2010), el funcionamiento estructural es completamente similar al de un arco situado en un plano vertical, con un único efecto añadido en los extremos, donde es necesario equilibrar la componente de fuerza horizontal en dirección transversal al eje del puente que genera la inclinación de los arcos.

La directriz de los arcos es parabólica, antifunicular de las cargas permanentes en el puente, a excepción del peso propio del arco, alcanzando una flecha máxima de 25 m, lo que conlleva una relación flecha/luz de 1/5,2.

Por último, contenidas en los planos inclinados que definen los arcos, se disponen las péndolas mediante una disposición en celosía cruzada, formando una malla tipo Network. Los puntos de apoyo de las péndolas están se disponen sobre las vigas transversales, esto es, cada 5,00 m. Según Ortega (2010), aumentar el número de péndolas permite disponer elementos de menor magnitud, simplificar las uniones y principalmente reducir tanto los esfuerzos flectores en el tablero como la longitud de pandeo de los arcos.

5.2.4.- Puente arco sobre el río Dambovita en Bucarest

La estructura del puente proyectado sobre el río Dambovita consiste en un doble arco metálico de tablero inferior que salva una luz de 117,7 m, contando además con un tablero de 21,3 m de ancho total.

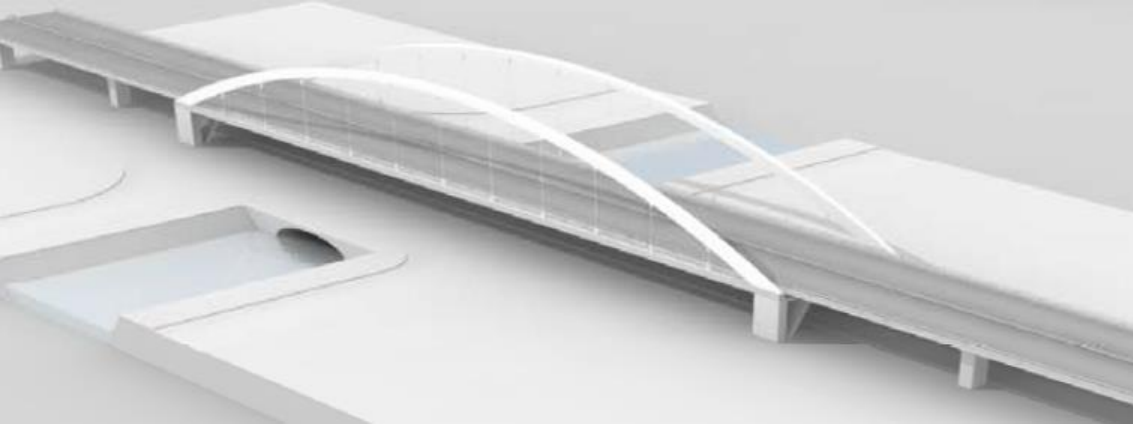


Figura 39 Alzado del puente arco sobre la Rambla del Cañuelo [Jorquera 2005]

La sección transversal del tablero está formada por dos cajones metálicos de sección rectangular de canto constante y dimensiones 50 x 50 cm, unidos entre sí mediante vigas transversales en doble T, también metálicas, espaciadas 3,33 m, sobre las cuales se dispone una losa de hormigón de 25 cm de espesor.

Los arcos, que se disponen en planos perpendiculares al tablero y por tanto paralelos entre sí, tienen una directriz parabólica y una sección transversal prismática de canto decreciente y ancho creciente de arranques a clave, proporcionando una gran rigidez transversal y por tanto permitiendo prescindir del arriostramiento de los arcos. La sección de los arcos en centro luz es un rectángulo de 1,00 x 2,25 m. La flecha máxima del arco es de 19 m, lo que conlleva una relación flecha/luz de 1/6,2.

Por último, debe indicarse que se disponen dos alineaciones de 10 péndolas verticales formadas por cables macizos, separadas 10 m entre sí.

5.2.5.- Pasarelas bowstring del Anillo Verde Ciclista de Madrid

Como parte del anillo ciclista que rodea Madrid, fue necesario diseñar tres estructuras que salvaran tres importante vías que parten de Madrid: la M-500, la N-VI y la N-II. Tras analizar los distintos condicionantes, se llegó a la conclusión de que era necesario proyectar pasarelas lo más ligeras posibles, que fueran estéticamente atractivas y que permitieran una fácil colocación. La tipología adoptada fue el arco atirantado tipo bowstring, con luces de 52 m (M-500), 60 m (N-VI) y 80 m (N-II), contando con una anchura de tablero de 5 m para las dos primeras y 6 m para la última.

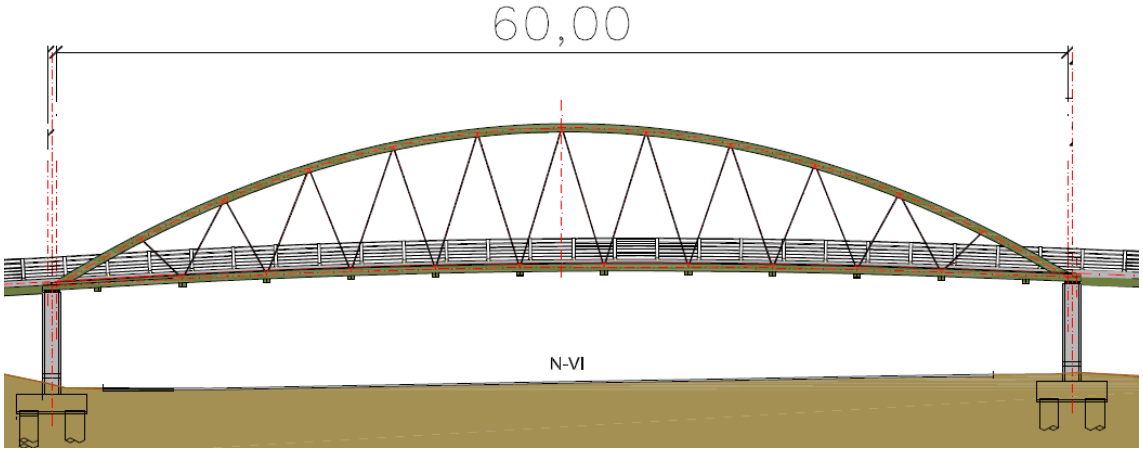


Figura 40 Vista frontal de la pasarela del Anillo Verde Ciclista de Madrid sobre la N-VI [Millanes 2008]

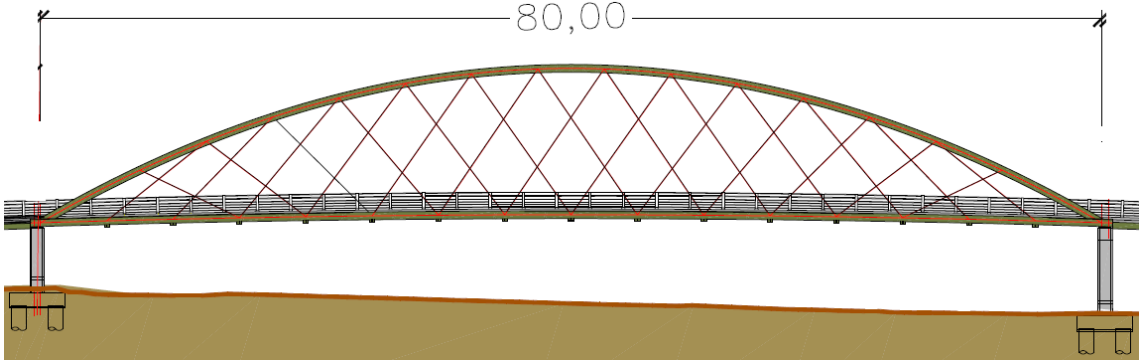


Figura 41 Vista frontal de la pasarela del Anillo Verde Ciclista de Madrid sobre la N-II [Millanes 2008]

Los arcos consisten en dos tubos huecos de acero de 51 cm de espesor para las pasarelas sobre la M-500 y la N-VI y de 61 cm para la de la N-II, con un espesor máximo en arranque de 25 mm. La relación de esbeltez o relación luz/canto es de 151, con una relación flecha/luz de 1/7. Transversalmente, los arcos se encuentran arriostrados mediante una celosía en K.

Longitudinalmente, los arcos se hallan arriostrados mediante tubos metálicos de igual diámetro que los arcos y espesor máximo de 16 mm, constituyendo por tanto dos vigas longitudinales. Sobre dichas vigas apoyan vigas transversales metálicas de canto variable (vientre de pez) dispuestas cada 5 m, sobre las que apoya una losa de 20 cm de espesor.

Respecto a las péndolas, debe indicarse que el arco y el tablero se relacionan entre sí mediante barras macizas circulares de acero S-460 y 42 mm de diámetro. Mientras que en las pasarelas sobre la M-500 y la N-VI se adoptó la disposición tipo Nielsen, en la pasarela sobre la N-II se adoptó el sistema Network dada su mayor luz, evitando las compresiones inadmisibles bajo caso de carga no simétrica que se producirían en caso de mantener el sistema Nielsen.

Debe indicarse que la pasarela sobre la N-VI ha constituido un claro referente para el dimensionamiento de la pasarela objeto de este proyecto, tal y como se recoge detalladamente en el Anejo II: "Estudio de Soluciones". La similitud tanto de la geometría como del tipo de acciones solicitantes (pasarela peatonal) ha permitido que la citada pasarela haya servido de ejemplo a la hora de tomar decisiones en un sentido u otro.

A este respecto, debe destacarse la gran importancia de la información recogida por Millanes, Matute y Nebreda en el artículo citado en relación con el análisis dinámico de la pasarela objeto de este proyecto. Si bien este tema se trata adecuadamente tanto en el Anejo II: "Estudio de soluciones" como en el Anejo IV: "Diseño estructural", en este anejo debe citarse la información indicada al respecto:

"Otro aspecto de especial relevancia es el comportamiento dinámico. En los tres arcos la frecuencia propia se halla en torno a los 2 Hz, valor similar al de paso de un peatón. Sin embargo, no resulta relevante dado que, además de estar solicitadas fundamentalmente a la circulación de bicicletas, se trata de estructuras muy rígidas y con bastante masa, por los efectos dinámicos se ven rápidamente atenuados."

Tras analizar la información presentada, puede concluirse que la pasarela sobre la N-VI constituye un ejemplo de pasarela peatonal de 60 m de luz tipo arco atirantado bowstring con una frecuencia propia del primer modo de vibración vertical alrededor de 2 Hz sobre la cual no se ha notificado ninguna incidencia al respecto en la bibliografía. Como se ve en los anejos citados, este aspecto resulta de gran relevancia a la hora de realizar la comprobación del Estado Límite de Servicio de Vibraciones.

6.- REFERENCIAS

FEHLING, E., BUNGE, K., SCHMIDT, M. (2009). "Gärtnerplatz - Bridge over River Fulda in Kassel- Multispan Hybrid UHPC - Steel Bridge" en *Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development* (2009. Marsella). París: AFGC.

FHWA (2013). *Design Guides for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections*. FHWA-HIF-13-032. Washington: FHWA.

GRAYBEAL, B. (2009). "UHPC in the U.S. Highway Infrastructure" en *Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development* (2009. Marsella). París: AFGC.

JORQUERA, J.J., ROMO, J. (2005). *Puente arco sobre la Rambla del Cañuelo en Roquetas de Mar*. Madrid: FECHOR

JORQUERA, J.J., GARCÍA, J., ROMO, J. (2005). *Puente arco sobre el río Dambovită (Bucarest)*. Madrid: FECHOR

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.

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.

REICHEL, M. et al. (2009). "Road Bridge WILD - UHPFRC for a segmental arch structure" en *Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development* (2009. Marsella). París: AFGC.

REICHEL, M., SPAROWITZ, L., FREYTAG, B. (2011). "Wildbrücke Völkermarkt – vorgespanntes Bogentragwerk aus UHFB-Segmentfertigteilen. Teil 1 – Entwurf und Bemessung" en *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 106, p. 760-769.

REICHEL, M., SPAROWITZ, L., FREYTAG, B. (2011). "Wildbrücke Völkermarkt – vorgespanntes Bogentragwerk aus UHFB-Segmentfertigteilen. Teil 2 – Bauausführung, begleitende Forschung und Qualitätssicherung" en *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 106, p. 827-835.

RESEARCH & DEVELOPMENT CONCRETES (RDC)

<<http://rdconcretes.com/proyecto-de-pasarela-de-hmar-sobre-la-v-21>> [Consulta: 12 de Mayo de 2016]

SERNA, P. et al. (2015). "Pasarela de hormigón de muy alto rendimiento sobre el Barranco de las Ovejas (Alicante)" en *Hormigón y Acero*, vol. 66, nº275, p. 23-42.

SETRA/AFGC (2013). *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete. Recommendations*. París: SETRA.

TANAKA, Y. et al. (2009). "Innovation and application of UFC bridges in Japan" en *Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development* (2009. Marsella). París: AFGC.

TARÍN, P., COLL, H. (2015). *Desarrollo de paneles tipo Waffle de UHPC para su aplicación en pasos superiores de carretera*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

TUE, N.V. (2013). *Modular constructions made of UHPC*. Graz: Graz University of Technology.

VIET, N. (2012). *Modular truss construction made of UHPC*. Graz: Graz University of Technology.