

PASARELAS BOWSTRING DEL ANILLO VERDE CICLISTA DE MADRID

Francisco MILLANES MATO

Prof. Dr. Ingeniero de Caminos

IDEAM, S.A.

Presidente

general@ideam.es

Luis MATUTE RUBIO

Ingeniero de Caminos

IDEAM, S.A.

Director General

luis.matute@ideam.es

Jorge NEBREDÁ SÁNCHEZ

Ingeniero de Caminos

IDEAM, S.A.

Ingeniero de Proyectos

jorge.nebreda@ideam.es

Resumen

Dada la necesidad de atravesar tres carreteras principales de parten de Madrid, fue preciso construir 3 pasarelas de tipología arco atirantado que dieran continuidad al Anillo Verde Ciclista.

Las luces de los arcos (52, 60 y 80 m) quedaron condicionadas por la anchura de las vías existentes. El proyecto se desarrolló tras la seria consideración de los siguientes factores:

1. Diseño único y estéticamente cuidado que constituyera un referente formal del Anillo Verde.
2. Necesidad de salvar grandes luces sin apoyos intermedios y cumpliendo las restricciones de gálibo.
3. Rápida redacción del proyecto y facilidad de montaje dentro de un plazo muy ajustado.
4. Capacidad para la colocación definitiva de la estructura en menos de 5 horas y de noche para minimizar las molestias al tráfico, ya que as vías atravesadas son arterias principales.

Palabras Clave: Pasarela, estética, arco atirantado, configuración Nielsen, disposición Network, péndolas.

1. El sistema de arco atirantado Network

Las tres pasarelas se diseñaron como respuesta a los condicionantes anteriores recurriendo a arcos atirantados (bowstring) constituidos por tubos huecos de acero como elementos estructurales principales (2 arcos inclinados y las vigas longitudinales de atado).

El tablero consiste en una serie de vigas transversales mixtas en vientre de pez ubicadas a intervalos regulares de 5.0 m y articuladas en las vigas longitudinales de atado.

El aspecto más relevante de este diseño se halla en se eficacia estructural y estética al recurrir a péndolas oblicuas, bien en una configuración tipo Nielsen (para las luces de 52 y 60 m), bien en una disposición tipo Network (80 m).

En 1926 Octavius F. Nielsen patentó la evolución de la tipología convencional de péndolas verticales para los arcos atirantados mediante barras oblicuas de acero, dispuestas en V, lo que le permitió convertir el arco en una estructura equivalente a una viga biapoyada en la cual las péndolas se llevan el cortante causado por distribuciones de carga no antifuniculares. Se logra así reducir drásticamente la flexión en el arco y vigas de atado. La principal limitación de este sistema proviene de las compresiones que pueden aparecer en las péndolas cuando la relación sobrecargas/cargas permanentes es elevada, como ocurre en puentes de ferrocarril y en estructuras ligeras (pasarelas).

En los años 50, Prof. Ing. Per Tveit (Noruega) desarrolló el concepto de arco atirantado network. En un artículo publicado en el número de junio de 1966 de The Structural Engineer, lo definió como "un sistema que emplea péndolas inclinadas con múltiples intersecciones en el plano del arco". Recurriendo a una mayor complejidad y a una mayor cuantía de acero en el sistema de péndolas, reduce muy notablemente el riesgo de que las péndolas entren en compresión bajo distribuciones de carga no simétricas, lo cual hace a esta tipología susceptible de ser empleada en puentes ferroviarios y en pasarelas extremadamente ligeras.

El puente de Steinkjer (Fig 1), construido en Nimega en 1963, con una luz de 80 m, fue su primer proyecto con esta tipología, que ha alcanzado un rápido desarrollo en países como Noruega, alemania, Estados Unidos y Japón.

El ejemplo más destacable es el bonito y renombrado puente de Fehrmarsund (Fig 2), en el mar Báltico, puente mixto par uso tanto de vehículos como ferrocarriles con una luz de 248 m. Construido en 1963, aún conserva el récord de luz en su tipología.



Fig. 1 Puente de Steinkjer (1963)



Fig. 2 Puente de Fehrmarsund (1963)

El sistema network proporciona una respuesta estructural muy eficiente y conduce a un dimensionamiento homogéneo de las péndolas (sección transversal prácticamente constante a lo largo de la estructura) así como a la minimización de la flexión en el arco y vigas longitudinales de atado. También mejora las condiciones de pandeo tanto en el plano como fuera de él. Tanto el arco como el tablero están sometidos casi exclusivamente a esfuerzos axiales, lo cual permite alcanzar altos valores de esbeltez y gran economía de materiales.

Hemos tenido la oportunidad de proyectar y construir los primeros grandes puentes arco de esta tipología (network) en España: Deba y Palma del Río. De extrema esbeltez, se prestó especial atención a aquellos elementos con mayor impacto estético y visual: ordenamiento geométrico de las dos familias de péndolas inclinadas en cada plano, detalles de anclaje al arco y vias de atado y, especialmente, el diseño específico de aparatos anti-fricción para permitir el cruce de las péndolas (Figs 3 a 5).



Fig.3 Puente de Palma del Río. Detalle del anclaje de péndola(2008)

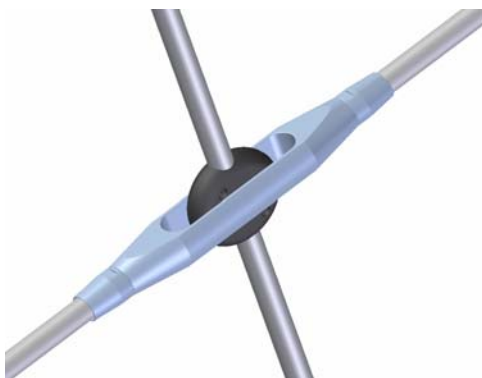


Fig.4 Puente de Deba. Aparato para cruce de péndolas



Fig.5 Puente de Palma del Río. Aparato de cruce de péndolas

1. Puente sobre el río Deba (Figs 6 y 7), de 110 m de luz y flecha 20 m, con arcos gemelos metálicos tubulares de 90 cm de diámetro, tablero con sección cajón mixta de 1.30 m de canto y barras por péndolas.



Fig.6 Puente de Deba. Vista frontal (2006)

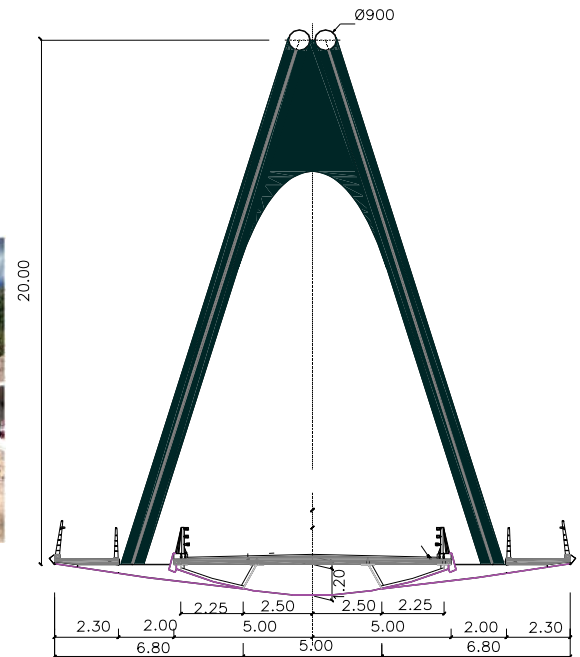


Fig.7 Puente de Deba. Sección transversal (2006)

2. Puente sobre el Guadalquivir en Palma del Río (Figs 8 y 9), de 130 m de luz y flecha de 25 m. Tanto los arcos como las vigas longitudinales son tubos metálicos de 90 cm de diámetro. El tablero es mixto con vigas transversales. Este puente constituye el embrión de las pasarelas del Anillo Verde.



Fig.8 Puente de Palma del Río. Vista frontal (2008)



Fig.9 Puente de Palma del Río. Vista transversal (2008)

2. Descripción de las estructuras

Como parte del anillo ciclista que rodea Madrid, fue necesario diseñar tres estructuras que salvaran tres de las más importantes vías que conectan Madrid con las principales ciudades de España: M-500 (Carretera de Castilla), N-VI (Carretera de la Coruña) y N-II (Carretera de Barcelona), todas ellas con gran intensidad de tráfico.

En este contexto, las pasarelas no sólo debían ser lo más ligeras posible, para permitir una fácil colocación, sino que además debían ser estéticamente atractivas, puesto que cada día estarán expuestas a cientos de miles de personas.

La tipología elegida fue el arco atirantado, con luces de 52 m (M-500), 60 m (N-VI) y 80 m (N-II) y una anchura de tablero de 5 m para las dos primeras y 6 m para la última (Figs 10 a 17).

Tabla 1 Esquema organizativo del proyecto

Función	Agente
Propiedad	Ayuntamiento de Madrid
Dirección del proyecto	Javier Maestro
Contratista	Acciona Infraestructuras
Trabajos metálicos	Talleres Centrales
Diseño de la estructura	Francisco Millanes, Luis Matute, Mónica Alonso, Jorge Nebreda (IDEAM)

La tipología elegida fue el arco atirantado, con luces de 52 m (M-500), 60 m (N-VI) y 80 m (N-II) y una anchura de tablero de 5 m para las dos primeras y 6 m para la última (Figs 10 a 12).



Fig.10 Pasarela sobre la M-500 (52 m). Vista transversal (2007)



Fig.11 Pasarela sobre la N-VI (Nielsen, 60 m). Vista frontal (2007)



Fig.12 Pasarela sobre la N-II (network, 80 m). Vista frontal (2007)

Los arcos consisten en dos tubos huecos de acero de 508 mm de diámetro para las pasarelas sobre la M-500 y N-VI, y 610 mm para la de la N-II, con un espesor máximo de 25 mm en arranque. La relación de esbeltez (luz/canto) es de 131, con un rebajamiento (flecha/luz) de 1/7, resultando en una flecha máxima de 11.50 m para el arco de la N-II. La inclinación de los arcos respecto a la vertical es de unos 18°, con una separación de 8.50 m en arranque y 1.00 en clave.



Fig.13 Pasarela sobre la N-II (80 m).Detalle de anclaje de péndola



Fig.14 Pasarela sobre la N-II. Detalle lateral

Longitudinalmente los arcos se hallan arriostrados otros dos tubos huecos metálicos de igual diámetro que los arcos y espesor máximo 16 mm. El arriostramiento transversal de los arcos se materializa mediante una chapa rigidizada en clave que gradualmente se convierte en una celosía en K o simplemente la celosía (Fig 15).

El tablero consta de una losa de 20 cm de espesor (26 cm para la pasarela sobre la N-VI, como ya explicaremos), de los cuales 6 cm corresponden a las prelasas que descansan sobre las vigas transversales metálicas espaciadas 5 m, cuyo canto variable (en vientre de pez, entre 300 y 500 mm) suaviza la vista longitudinal y atenúa la percepción del canto de las vigas longitudinales de atado (Fig 16).

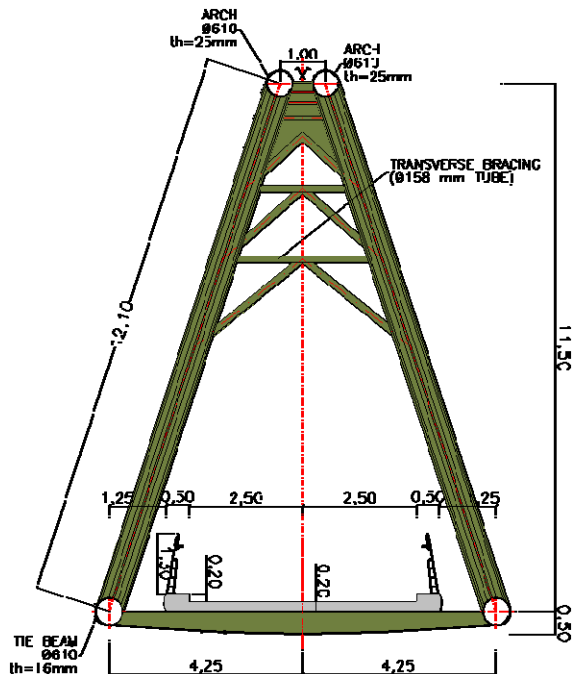


Fig.15 Pasarela sobre la N-II (80 m). Sección transversal



Fig.16 Pasarela sobre la N-VI. Vista inferior

El vínculo longitudinal entre el arco y el tablero se establece mediante péndolas de 42 mm de diámetro en barras de acero S 460 N (Figs. 13 y 14). En el caso de las pasarelas sobre la M-500 (52 m de luz) y la N-VI (60 m), se adoptó una distribución típica de celosía Nielsen (Fig 17), mientras que en la de la N-II se dispuso el sistema Network (Fig 18). La necesidad de resistir el cortante mediante las péndolas para alcanzar una esbeltez adecuada en el arco y el tablero así

como para evitar compresiones en las péndolas no permitía implementar la solución Nielsen en el citado arco, ya que la excesiva verticalidad de las péndolas conduciría a compresiones inadmisibles bajo casos de carga no simétrica.

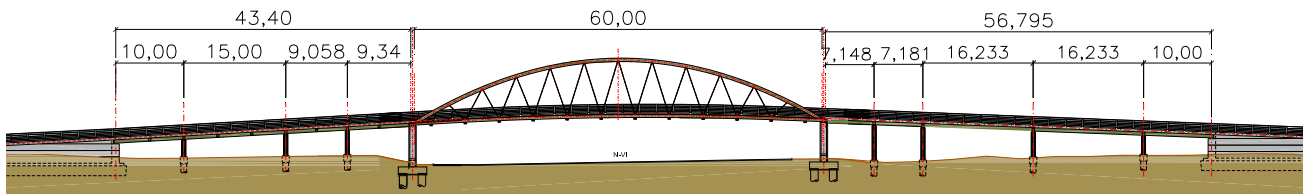


Fig. 17 Pasarela sobre la N-VI (60 m). Vista frontal

La solución adoptada en este caso fue un sistema de 3 familias de péndolas coplanarias con anclajes cada 5 m tanto al arco como al tablero (coincidiendo con la unión al mismo de las vigas transversales). El cruce se resuelve mediante un dispositivo similar al ojo de una aguja que permite el paso de una péndola a través de la otra (Fig 19). Los anclajes extremos de las péndolas son iguales para ambas tipologías.

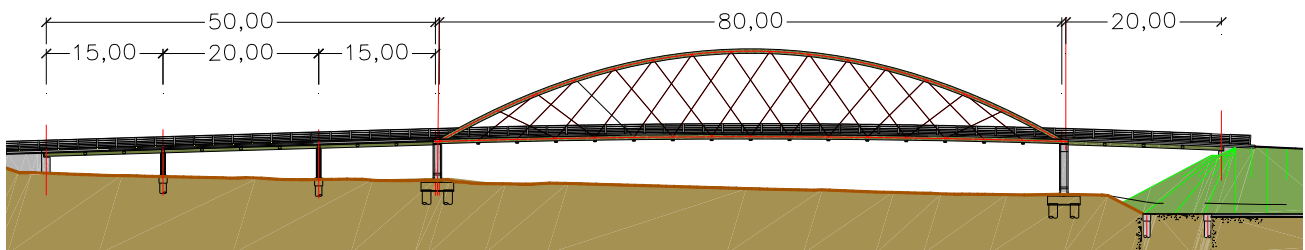


Fig. 18 Pasarela sobre la N-II (80 m). Vista frontal

La conexión local entre el arco y las vigas de atado consiste en una chapa intermedia (Fig 20) que, por tensión tangencial, transfiere la compresión del arco a las vigas longitudinales.



Fig. 19 Pasarela N-II (80 m). Dispositivo de cruce de péndolas



Fig. 20 Pasarela N-VI (60 m). Arranque de arco

Los apoyos del arco son convencionales, de neopreno zunchado. Las pilas sobre las que descansan son trapecios invertidos huecos de hormigón armado, para lograr la mayor permeabilidad visual.

3. Comportamiento estructural

Tanto la tipología Nielsen como la Network conducen a estructuras eficientes en el aspecto estructural, en las cuales los elementos longitudinales (arco y vigas de atado) apenas reciben esfuerzos de flexión. Para la pasarela sobre la N-II la máxima compresión en ELU es de 4600 kN (localizada a cuartos de la luz) con un flector concomitante de 200 m·kN. El pésimo flector de cálculo es de 570 m·kN (en arranque) con un axil concomitante de 4380 kN

En cuanto a las péndolas, se concluye que, para solicitaciones no simétricas y según aumenta la flecha, la configuración Nielsen no logra impedir que algunas péndolas entren en compresión, lo cual hace que los elementos longitudinales pasen a resistir una flexión adicional allí donde las péndolas dejan de trabajar. Por su parte, la disposición

Network demuestra tener un comportamiento mucho mejor ya que las péndolas se hallan en compresión en todos los casos (con esfuerzos axiales de 31 kN a 142 kN en servicio y 13 kN a 350 kN en rotura), siempre con un amplio margen de seguridad (carga última 509 kN).

En el caso particular de la pasarela sobre la N-VI, de 60 m de luz y sistema Nielsen, la carga permanente era tan baja para su luz y flecha que fue necesario disponer una losa de 26 cm de espesor para ganar un peso adicional de modo que la tracción de las péndolas compensara la compresión inducida por ciertos casos de sobrecarga no simétrica. Esto nos muestra que, para valores de flecha elevados y una separación fija de péndolas, la verticalidad de las péndolas les impide trabajar adecuadamente. A raíz de esta circunstancia, fue indispensable pasar a una tipología Network para la pasarela de 80 m de luz.

Dada la gran esbeltez de los arcos, se acometió un estudio de efectos de segundo orden en el que se concluyó la eficiencia del sistema de arriostramiento transversal frente al pandeo tanto dentro como fuera del plano. La carga crítica de pandeo se halla bastante por encima de la de agotamiento.

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.

4. Proceso constructivo

Las tres pasarelas se construyeron siguiendo el mismo proceso:

1. Premontaje en taller de las vigas de atado y arcos en tres elementos cada uno. Se prestó especial atención a la chapa de conexión entre arco y viga.
2. Transporte de los elementos estructurales a la obra.
3. Cierre de la estructura metálica empleando apeos temporales (Figs 21 a 23).



Figs 21, 22 y 23 Pasarela M-500 (52 m) y rampas de acceso. Trabajos metálicos in situ

4. Colocación de prelosas, cubriendo entre el 50 y el 100% de la superficie del tablero.
5. Ajuste de péndolas y operaciones de tesado.
6. Izado y posicionamiento final, de noche (Fig 24).

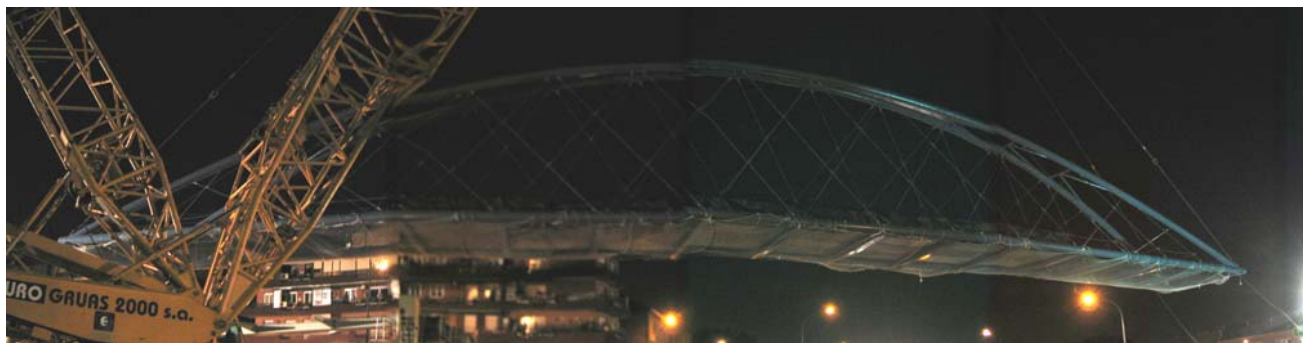


Fig 24 Pasarela sobre la N-II (80 m). Izado

7. Colocación de las prelosas restantes (en esa misma noche).
8. Montaje de las armaduras restantes y hormigonado.
9. Remates finales

El tesado de las péndolas se estudió para alcanzar el estado ideal de arco biapoyado sometido a la carga permanente total. Se decidió que el mejor proceso era actuando desde el centro y simétricamente. Las fuerzas aplicadas variaban entre 28 y 57 kN. Tras el primer par de operaciones de tesado las vigas de atado se separaron de los apeos.

Dada la ligereza de estas estructuras, fue posible izarlas con las prelosas ya colocadas y parte de la armadura de la losa también montada (para la pasarela de 80 m, el izado se acometió sólo con la mitad de las prelosas).

Mediante este procedimiento industrializado, fue posible minimizar la ocupación de espacio así como la obra metálica in situ. El izado, que se realizó con sólo una grúa, de noche y en menos de 5 horas, apenas perturbó la circulación.

5. Conclusiones

La aplicación de la tipología arco atirantado (bowstring), bien en su configuración Nielsen, bien en una disposición Network, ha sido una exitosa elección para las tres pasarelas del Anillo Verde Ciclista. Con su destacable esbeltez y ligereza, constituyen una solución que combina un comportamiento estructural óptimo, facilidad constructiva, economía de medios y materiales y calidad estética.