

PUENTE ARCO SOBRE EL RÍO DEBA

Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Presidente

general@ideam.es

Antonio CARNERERO RUIZ

Dr. Ingeniero de Caminos

Resumen

Se describe el viaducto mixto sobre el río Deba, una de las obras más relevantes acometidas por la Diputación Foral de Gipuzkoa en la pasada legislatura.

Consta de un viaducto de acceso y un arco tubular metálico con un tablero mixto. El diseño de las péndolas de cuelgue con doble familia de péndolas cruzadas, tipo network, permite el diseño de arcos bowstring de gran esbeltez y mínimas cuantías de acero.

Se cuidó especialmente el diseño del arco, viaducto de acceso, pilas y estribos al ubicarse la actuación en un entorno paisajístico de especial belleza.

Palabras Clave: Puente mixto de carretera, arco atirantado mixto, sistema network, péndolas.

1. Introducción

El paso a nivel de la carretera GI-638 de acceso a Mutriku con el ferrocarril de San Sebastián a Bilbao, situado al final del antiguo puente sobre la ría del Deba y junto a la intersección con la carretera N-634 y la estación del ferrocarril de Deba, era causa de frecuentes congestiones y de algunos accidentes.

La Diputación de Gipuzkoa, titular de las carreteras, y el Gobierno Vasco, titular del ferrocarril, han desarrollado una nueva conexión entre ambas carreteras, desplazada un kilómetro más aguas arriba en la ría para eliminar el citado paso a nivel y recuperando el antiguo puente para su uso exclusivamente peatonal.



Fig. 1 Vista aérea del puente y del viaducto de acceso

La nueva conexión de 680 metros de longitud arranca en una nueva glorieta en la N-634, bajo la cual cruza el ferrocarril, y se inicia con un salto de toda la vega y la ría en estructura que enlaza con un túnel que desemboca nuevamente en la actual carretera GI-638.



Fig. 2 Vista aérea de la ubicación de la actuación

2. Condicionantes medioambientales

El alto valor medioambiental de la ría y de su vega, de la que una parte es inundable y con vegetación marismeña, obligó a realizar diferentes estudios de alternativas de trazado que finalmente desembocaron en una solución absolutamente respetuosa con el medio ambiente, al realizarse totalmente en estructura el cruce de la vega, mediante un viaducto de acceso, y el de la ría propiamente dicha, con un único vano de 110 metros de luz sustentado por un arco superior para evitar apoyos en el cauce.

Asimismo, para evitar desmontes impactantes junto a la ría, se optó por disponer el resto del trazado en un túnel de 300 metros de longitud que desemboca finalmente en la carretera GI-638, junto al puente antiguo ya en el municipio de Mutriku.



Figs.3a y 3b Vista del arco desde el exterior y desde el interior del túnel

Además, todas las superficies afectadas por la construcción del viaducto, que fueron restringidas a las mínimas imprescindibles, han sido posteriormente recuperadas, incluyendo una zona de restauración de la marisma, provocando su inundabilidad y trasplantando las plantaciones de juncos para acelerar su regeneración.

La actuación incluía asimismo el acondicionamiento de un paseo de ribera, que discurre a lo largo de la margen izquierda de la ría del Deba. El diseño de la plataforma de la estructura, tanto en el tramo del viaducto como en el del arco, a lo largo de los 190 m. que conectan dicha margen con la glorieta ubicada en la margen derecha, y que constituye el final de la actuación, se ha planteado de manera que permitiera alojar el citado paseo de ribera, dándole continuidad entre ambas márgenes en su salto sobre la ría y la zona de marisma adyacente. Con objeto de mantener su carácter lúdico, de paseo, se buscó alejarlo del tráfico rodado, distanciándolo dos metros en planta, a ambos lados de la plataforma viaria. Las aceras, de 2,30 m. de ancho, discurren longitudinalmente apoyadas sobre el extremo de unas impresionantes costillas laterales, que cada 5 metros surgen en voladizo como prolongación de la propia sección transversal del tablero. El espacio vacío entre tablero y aceras, de 2 m. de ancho, se recubre con una rejilla protectora tipo tramex.



Fig. 4 Vista de las aceras voladas laterales

La separación descrita entre los tráficos rodado y peatonal, que en el puente arco queda acentuada por el aislamiento psicológico que los planos de péndolas cruzadas establecen entre ambos ámbitos, favoreciendo la inserción de los paseantes en el bello paisaje circundante de espaldas al tráfico rodado que discurre por el "interior" del arco y sus tirantes, marcó con rotundidad el diseño formal y la respuesta resistente de la estructura proyectada.



Fig. 5 Vista desde aguas abajo

3. Las estructuras: Glorieta, Viaducto y Arco

La estructura salva la ría del Deba y sus marismas aledañas, uniendo la glorieta de conexión de la N-634 y la GI-638 con el túnel situado al este de la ría.

La estructura presenta tres zonas muy definidas:

- La zona de la glorieta en sí misma, afectada por el paso del ferrocarril y los caminos y rampas de acceso, resuelta mediante un tablero de hormigón formado por un emparrillado de vigas artesa prefabricadas, que se ajusta a la forma y geometría de la glorieta.
- La zona de la marisma, formada por un dintel mixto continuo de luces 20 +30+30, con amplios voladizos situados a ambos lados de un cajón único de 5 m. de ancho máximo.
- La zona de la ría, salvada por un arco metálico de tablero inferior de 110 m. de luz.

Separando la glorieta de los vanos de acceso al puente arco se sitúa el estribo E1. Este estribo se caracteriza principalmente por servir de elemento diferenciador entre ambas estructuras, para lo que se le ha dotado de una anchura apreciable, que además de permitir alojar con comodidad la llegada de las vigas prefabricadas por su lado oeste, y del puente metálico por el este, actúa como elemento de soporte de la escalera de acceso a las aceras del puente.

Los vanos de acceso se ubican entre el estribo 1 y la pila 3. Su situación queda acotada por la zona que temporalmente es cubierta por el agua, dejando para la zona de cauce permanente del río el puente arco. Dada su función de estructura de transición, sus características están fuertemente influenciadas por las del tablero del puente arco de la estructura principal. Al igual que esta última, se ha planteado una solución de tablero mixto hormigón-acero con luces moderadas: 20+30+30.

Como se puede apreciar en las figuras adjuntas, el diseño proyectado se orientó en la búsqueda de la mayor continuidad formal y geométrica de las secciones transversales de las plataformas de tablero del viaducto de acceso y del arco atirantado: losas de aceras y calzada, costillas transversales y elemento resistente longitudinal (cajones mixtos), cuya sección transversal se inscribía perfectamente en el contorno geométrico común a ambas zonas.

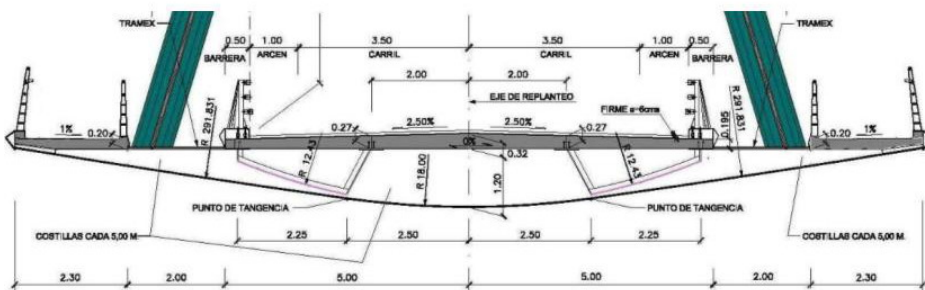


Fig. 6 Sección transversal tablero del arco

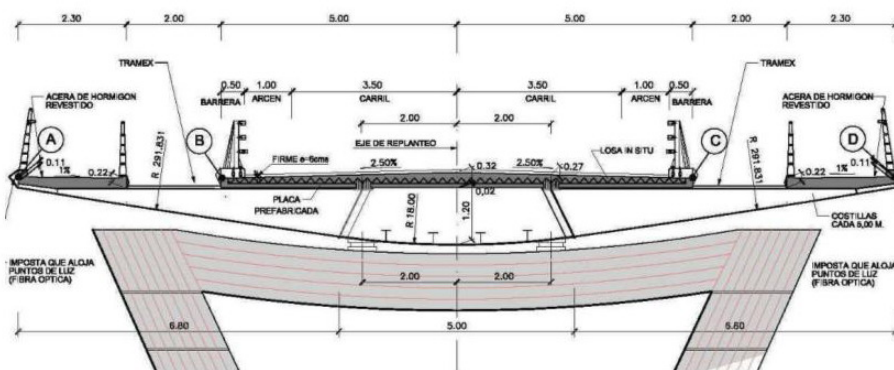


Fig. 7 Sección transversal vanos de acceso

Así pues, en el viaducto de acceso se proyectó un cajón mixto único central, de sección transversal trapezoidal, de 4,0 m. de ancho superior y 5,0 m. de ancho inferior, cuyo fondo metálico tiene un contorno circular, de 12,43 m. de radio, en prolongación y tangencia con el perfil curvo inferior de las costillas metálicas transversales, de canto variable, dispuestas cada 5,0 m. y con un vuelo de 6,30 m. a cada lado del cajón central.

El canto máximo del tablero, en la sección del eje de la plataforma, alcanza los 1,52 m. La anchura total de plataforma es de 18,60 m., de los que sólo los 10,00 m. centrales corresponden a la calzada.

La geometría descrita se adapta a las exigencias resistentes derivadas de su papel estructural como tirante traccionado que equilibra el empuje de los dos arcos laterales inclinados. Se disponen así, en este caso, dos cajones mixtos de sección transversal trapezoidal, de 2,75 m. de ancho, con dos almas de muy diferente altura: la exterior, vertical, de 0,20 m. de altura, y la interior, de 0,95 m. de altura, inclinada $27,8^\circ$ y que se ubica en prolongación estricta de las almas laterales inclinadas del monocajón de los viaductos de acceso. El fondo metálico se proyecta curvo, recogiendo la diferencia de cantos entre ambas almas. La sección del citado monocajón coincide estrictamente con la del hueco entre los dos cajones mixtos del tablero del arco atirantado.



Figs. 8a y 8b Vista inferior del tablero

Se prestó especial cuidado al diseño de las formas y geometría de los alzados de pilas y estribos, con superficies alabeadas de curvatura variable que, como puede verse en las figuras y fotos adjuntas, buscaban la máxima esbeltez visual, al mismo tiempo que la integración formal con el resto de los elementos (tablero, estribos y arco) desde múltiples y diferentes puntos de vista (inferior, alzados lateral y esviados, etc.). Durante las obras se cuidaron especialmente los acabados, mediante encofrados machihembrados con contramoldes de soporte con marcos metálicos de gran rigidez, con atención al despiece de los berenjenos horizontales, de cuidada modulación, y con una elección de áridos y cementos que permitió obtener un hormigón de color gris perla claro, muy uniforme y de gran calidad visual.



Figs. 9a, 9b y 9c Pilas del puente principal y de los vanos de acceso

Para la zona sobre el río se proyectó una solución de puente arco tipo "bowstring" en el que el tablero situado por debajo del arco actúa como tirante de éste, recogiendo los esfuerzos horizontales que el arco transmite en sus extremos y transfiriendo a la cimentación exclusivamente fuerzas verticales. La tipología adoptada:

- permite salvar una luz de 110 m. con una solución limpia, esbelta y transparente, dotando a sus elementos principales: arco y tablero, de cantos muy reducidos;
- resulta una estructura enormemente atractiva, tanto para el posible paseante que la atraviese andando como para los vehículos que penetran en ella antes de introducirse en el túnel, o bien, circulando en sentido contrario, la encuentren al salir del mismo;
- crea un hito de referencia con el que se identifica la zona donde se encuentra y la vía que se recorre;
- transmite exclusivamente cargas verticales al terreno;
- al no quedar unida a los vanos de acceso, permite independizar la construcción de dichos vanos de la del resto del puente.

El puente sobre el río Deba, con 110 m. de luz, se proyectó con dos arcos metálicos tubulares, inclinados $17,3^\circ$ con respecto al plano vertical, de geometría parabólica y 20 m. de flecha vertical en clave, lo que supone una relación flecha/luz de 1/5,5. La sección tubular de los arcos, en acero S355 como el resto del acero de cajones y costillas del tablero, tiene un diámetro exterior de 800 mm. y espesores de chapa comprendidos entre 45 mm. (en arranques) y 25 mm. (en clave).

Su gran esbeltez, 1/137,5 de la luz, y reducidos espesores de chapa son consecuencia de la gran eficacia resistente del esquema estructural proyectado, con arcos inclinados unidos entre sí en la zona de clave y un sistema de cuelgue tipo "network", mediante doble familia de péndolas inclinadas a 45° , lo que permite reducir drásticamente tanto los efectos de 2º orden por inestabilidad de los tubos de los arcos como el nivel de las flexiones en arco y tablero bajo cualquier hipótesis de sobrecargas móviles, incluso para aquellas muy alejadas de las condiciones de antifunicularidad.

4. El sistema network para las péndolas de arcos atirantados

En 1926 Octavius F. Nielsen patentó una variante al sistema convencional de péndolas verticales para el cuelgue de los tableros de arcos atirantados, tipo bow-string, mediante barras de acero inclinadas, según una configuración en V, que transformaban el esquema resistente tipo arco en otro tipo viga, en el que el sistema de péndolas inclinadas en V recogía las fuerzas cortantes derivadas de distribuciones de cargas y sobrecargas alejadas de la funicularidad, lo que permitía reducir drásticamente el nivel de las flexiones en arco y tablero, que pasaban a trabajar fundamentalmente a compresión/tracción cuasi-centradas y, por tanto, con la máxima eficiencia resistente. La principal limitación del esquema tipo Nielsen surge de la posibilidad de entrada en compresión, y por tanto de inestabilidad, de una o varias péndolas cuando la relación entre sobrecargas y cargas permanentes es elevada, lo que es el caso de los puentes de ferrocarril, pasarelas o estructuras ligeras con sobrecargas de cierta entidad.

En los años 50 el profesor e ingeniero noruego Per Tveit desarrolló el concepto "network", que en su artículo publicado en The Structural Engineer en junio de 1966 definió como un sistema que utiliza "péndolas inclinadas con múltiples intersecciones en el plano del arco". A costa, lógicamente, de una mayor complejidad y cuantías en el diseño del sistema de cuelgue se reduce notablemente el riesgo de entrada en compresión de las péndolas bajo distribuciones no uniformes de sobrecargas, lo que permitía la extensión del sistema Nielsen a los tableros de las tipologías antes citadas.

El puente de Steinkjer, construido en Noruega en 1963, con 80 m. de luz, fue el primer proyecto de esta tipología, que alcanzó inmediatamente un rápido desarrollo en países como Noruega, Alemania, Japón o Estados Unidos, siendo especialmente relevante el conocido Fehmarnsund Bridge, en el Mar Báltico, arco atirantado metálico con tablero mixto,

y uso combinado para carretera y ferrocarril, terminado en 1963 y que, con 248 m. de luz, pensamos que todavía sigue ostentando el record del mundo de su tipología.

El sistema "network" asegura una respuesta estructural de gran eficacia, que permite un dimensionamiento muy homogéneo, casi uniforme, del sistema de péndolas a lo largo de todo el tablero, al mismo tiempo que minimiza drásticamente el nivel de flexiones en arco y tablero lo que, al estar sometidos básicamente a esfuerzos casi exclusivamente axiales, hace posible diseños de elevadas esbeltez geométrica, reducidas cuantías de acero estructural y, si se cuidan los diseños de los detalles en encuentros arco/tablero/tirantes, elevadísimas cualidades estéticas, aspecto al que se dedicó especial atención en el puente sobre el río Deba, dado el impacto visual del elevado número de cruces entre péndolas con arco y tablero y de péndolas entre sí, con múltiples geometrías derivadas de las continuas variaciones de los ángulos de cruce e intersección entre elementos.

El diseño de los detalles debía resolver adecuadamente la citada problemática, no sólo por razones formales y estéticas sino, también, para hacer económica y técnicamente viable la necesaria seguridad resistente de los diseños proyectados con la viabilidad de procesos constructivos y de ejecución sencillos y aptos para absorber las inevitables tolerancias de geometría de la obra.

En este sentido queremos destacar la original propuesta alternativa, planteada por el nunca olvidado **Francisco Quintero**, de la Dirección Técnica de Dragados, para conseguir un cruce absolutamente coplanario de las barras pretensadas de las péndolas, que permitía materializar un único plano ideal de atirantamiento para la doble familia de péndolas inclinadas de cada arco. La propuesta, de gran rigor técnico y cuidada geometría, se adaptaba perfectamente al diseño general del proyecto, por lo que fue muy bien aceptada por el proyectista y la dirección de obra, y adaptada finalmente por **Mk 4**, incorporándola a su propio sistema de uniones de barra con horquilla (ver figura).



Figs. 10a y 10b Detalle del cruce de péndolas inclinadas y montaje

Además del cruce entre las dos familias coplanarias de péndolas se prestó también especial atención al diseño de los detalles de anclaje de las mismas en los tubos del arco (superior) y en las costillas voladas del tablero (inferior).

Dada la complicada geometría y multiplicidad de los ángulos de intersección de la doble familia de péndolas con los demás elementos, el acierto o no en el diseño de todos estos múltiples detalles, de enorme repercusión visual desde muy variados puntos de vista, tiene una influencia decisiva en la estética final de la solución. Se prestó especial cuidado al citado diseño que, entendíamos, debía conjugar la mayor simplicidad y limpieza en sus formas, con la seguridad y fiabilidad de su respuesta estructural y, necesariamente, la mayor sencillez constructiva.

En las figuras adjuntas se muestran los detalles de ambos anclajes:

- el superior, con el arco, a través de unas cuidadas y estrictas orejetas curvas en prolongación de una chapa diametral de transmisión de las cargas al arco a través de dos soldaduras a tope, en las generatrices inferior y

superior del tubo, que resultaron muy sencillas de ejecución, soldando siempre desde el exterior y evitando cortes transversales. Unos mínimos, y perfilados, rigidizadores transversales exteriores aseguraban la antiovalización de la sección tubular;



Figs. 11a y 11b Detalles de anclajes superiores e inferiores de las péndolas

- la inferior, sobre las costillas voladas del tablero y ubicadas entre el cajón de la calzada interior al plano de los arcos y las aceras en ménsulas exteriores al mismo, materializada mediante una pieza cilíndrica tubular, y que sirve a la vez de apoyo a la base de anclaje y de alojamiento al sistema antideflctor de las barras, que se suelda al alma de las costillas mediante soldaduras en ángulo a través de una pletina transversal a dichas ménsulas. La alineación de anclajes inferiores va reforzada por un ligero perfil longitudinal que garantiza la estabilidad lateral resistente de las mismas en caso de desequilibrio de los componentes horizontales de las dos péndolas confluyentes en cada nudo, lo que puede suceder bajo la actuación de las sobrecargas móviles o durante el tesado de las diferentes familias de péndolas.

Finalmente, se prestó también especial cuidado al diseño de la rigidización interna del nudo arco/tirante/riostra transversal/basa de apoyo que, a pesar de su gran simplicidad y limpieza exteriores, constituía un problema geométrico, resistente y de ejecución de enorme complejidad.



Figs. 12a y 12b Detalles de la transmisión arco/tirante/apoyos

5. El proceso constructivo

Sólo interesan reseñar algunos aspectos relativos a la construcción de la estructura singular del puente arco sobre la ría del Deba que, en cualquier caso, se planteó siguiendo un esquema convencional para dicha tipología:

- montaje de tablero metálico en subtramos completos a todo ancho, incluyendo las costillas transversales, sobre apoyos provisionales intermedios pilotados en el fondo del cauce de la ría;
- hormigonado de la losa del tablero con ayuda de prelasas colaborantes autoportantes apoyadas sobre la subestructura metálica;

- montaje de los arcos tubulares inclinados con apoyos intermedios sobre pilas provisionales metálicas apoyadas sobre el tablero inferior mixto todavía apeado;
- desapeo de los arcos una vez cerrados;
- montaje del sistema “network” de doble familia de péndolas inclinadas,
- desapeo del tablero, lo que permite una primera puesta en carga de las péndolas. El desapeo se efectuó de forma controlada mediante diferentes parejas de gatos conectados a una central hidráulica monitorizada que permitía establecer los necesarios escalones de carga en cada gato, con un perfecto control de las contraflechas y de las sucesivas transferencias de carga entre los diferentes pares de gatos y el sistema de péndolas;
- retesado de las péndolas con una secuencia estricta previamente estudiada para alcanzar los valores de proyecto;
- pavimentación de calzada, aceras y resto de cargas muertas.



Figs. 13a y 13b Secuencia de montaje

Conviene finalmente destacar el original sistema, puesto a punto por los Servicios Técnicos de Dragados, para proceder al montaje y enhebrado del complejo sistema de cruces e interferencias entre las diferentes familias de péndolas inclinadas y sus anclajes en las cartelas previstas en los tubos del arco y las costillas del tablero. Mediante la división del conjunto del sistema de péndolas en subconjuntos en “Y” y en “X”, y con una precisa y muy estudiada secuencia de montaje de los subconjuntos, se consiguió resolver con éxito el complicado problema geométrico, de ajuste y montaje planteado.



Fig. 14 Vista del arco y tablero apeados



Fig. 15 Vista del arco y tablero apeados

6. Ficha técnica

Nombre de la Obra: NUEVA CONEXIÓN DE LA CARRETERA GI-638 DE MUTRIKU CON LA N-634 EN DEBA

Promotor: Diputación Foral de Gipuzkoa (50%) + Gobierno Vasco (50%)

Ingeniero de Caminos, Director del Proyecto: José María Sarasola Yurrita (Diputación Foral de Gipuzkoa)

Ingeniero de Caminos, Director de Obra: Asís Hernando Aracama (Diputación Foral de Gipuzkoa)

Empresas consultoras Autoras del Proyecto: LKS + IDEAM (Francisco Millanes, Antonio Carnerero)

Empresas consultoras Asistencia Técnica para el Control de Obra:

IDEAM (estructuras) (Francisco Millanes, Antonio Carnerero)

EUROESTUDIOS (geotecnia)

Empresas constructoras: UTE ZUBI-DEBA (Dragados + Moyua)

Gerente de la UTE: Isidro Abeledo Franco

Ingeniero de Caminos, Jefe de Obra: Asier Lekube

Presupuesto total: 12.472.102,67 €

Principales características:

- Longitud total de la obra: 680 m.
- Longitud total del viaducto: 190 m.
- Luz del arco: 110 m.
- Altura del arco: 20 m.
- Canto del tablero: 1,60 m.
- Longitud del túnel: 300 m.

7. Referencias

- [1] MILLANES, F.; ORTEGA, M.; CARNERERO RUIZ, A. "Project of two metal arch bridges with tubular elements and network suspension system". *7th International Conference on Steel Bridges. Guimarães (Portugal). Junio 2008.*