

## Algunos métodos constructivos de puentes de gran luz



**Susana López Manzano**  
Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos.  
Dirección Técnica de Dragados



**Felipe Tarquis Alfonso**  
Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
Dirección Técnica de Dragados

### Resumen

Este artículo va dedicado a los métodos constructivos utilizados en varios puentes singulares. Comienza dando un repaso enumerativo de los sistemas constructivos más comunes. A continuación, se acomete los métodos constructivos de tres puentes, todos ellos con múltiples métodos constructivos: el puente de Tamaraceite (1994, Las Palmas de Gran Canaria), el puente del Tercer Milenio (2008, Zaragoza) y el puente de Ferrocarril en la desembocadura del río Ulla (2015, entre Catoira y Rianxo, Pontevedra-La Coruña).

### Palabras clave

Puentes, métodos constructivos, arcos, celosía, mixto, hormigón, empuje, izada, avance por voladizos

### Abstract

*This paper mainly addresses the construction methods used to build several iconic Bridges. Firstly, a short introductory enumeration of most used construction methods for Spanish Bridges is presented as a starting point. Secondly three multi-construction-methods-Bridges are briefly presented, those being: The Tamaraceite Bridge (1994, Las Palmas de G.C.), the Tercer Milenio Bridge (2008, Zaragoza) and the Railway Bridge over Ulla River Stuary (2015, between Catoira and Rianxo, respectively at Pontevedra and A Coruña Provinces).*

### Keywords

*Bridges, construction methods, arches, trusses, composite, concrete, incremental launching, heavy lifting, balanced cantilever*

### Introducción

Como introducción a los casos concretos que expondremos, comenzaremos por enunciar una clasificación de entre las muchas posibles basada en el método constructivo del tablero. Seguidamente analizaremos varios casos reales dentro del rango de las grandes luces, todos ellos con varios métodos constructivos aplicados en diferentes zonas del puente o en diferentes momentos de su construcción.

### Métodos constructivos, clasificación general no exhaustiva

Por lo general, los métodos constructivos van muy unidos a la tipología estructural del puente especialmente la del tablero del puente. No existe un criterio único para la clasificación de los puentes y de sus sistemas constructivos.

Consideremos la clasificación siguiente, en la que los puentes/procedimientos se agrupan en tres subgrupos directamente relacionados con el orden de magnitud de las luces. Los denominaremos de luces cortas, medias y altas.

En él se clasifican los puentes por sus tableros y métodos constructivos (tabla 1):

- Luces cortas 15-60 metros:
  - Puentes losa de hormigón in situ, con diferentes tipos de cimbras según la altura de las pilas y la longitud de las luces.
  - Tableros de vigas prefabricadas, normalmente pre-tesadas con secciones en artesa o doble T.
  - Tableros cajón y similares de hormigón in situ. Caben dos sistemas clásicos de construcción, cimbrados o empujados.
  - Dovelas prefabricadas por vanos. Para este rango de luces típicamente se ejecutan vano a vano e isostáticas.
- Luces medias 60-160:
  - Mixtos de varios tipos y sistemas de ejecución. Cabe prácticamente todas las posibilidades: empuje, montaje con grúa, avance en voladizo e izado por tramos.
  - Voladizos sucesivos in situ y de dovelas prefabricadas, además de la posibilidad de tableros mixtos por voladizos sucesivos antes mencionada.

- Luces altas 160-1000 metros:
  - Voladizos sucesivos in situ de canto fuertemente variable, y voladizos sucesivos mixtos.
  - Puentes arco. Aquí hay bastantes posibilidades, combinables entre sí.
  - Puentes atirantados. Las dos modalidades clásicas son con tablero apeado o en voladizos sucesivos.
- Puentes atípicos:
  - Puentes poco usuales y con frecuencia complejos y singulares. Como por ejemplo los puentes móviles.

Los órdenes de magnitud de las luces se refieren a la práctica más usual, existiendo algunos casos fuera de los límites expuestos.

**Métodos a enfatizar**

La posible complejidad de un método constructivo puede estar tanto en el método propiamente dicho, por su complejidad o la complejidad de los elementos auxiliares necesarios, como en obtener una estructura con la geometría final deseada, pudiéndose presentar los dos casos juntos.

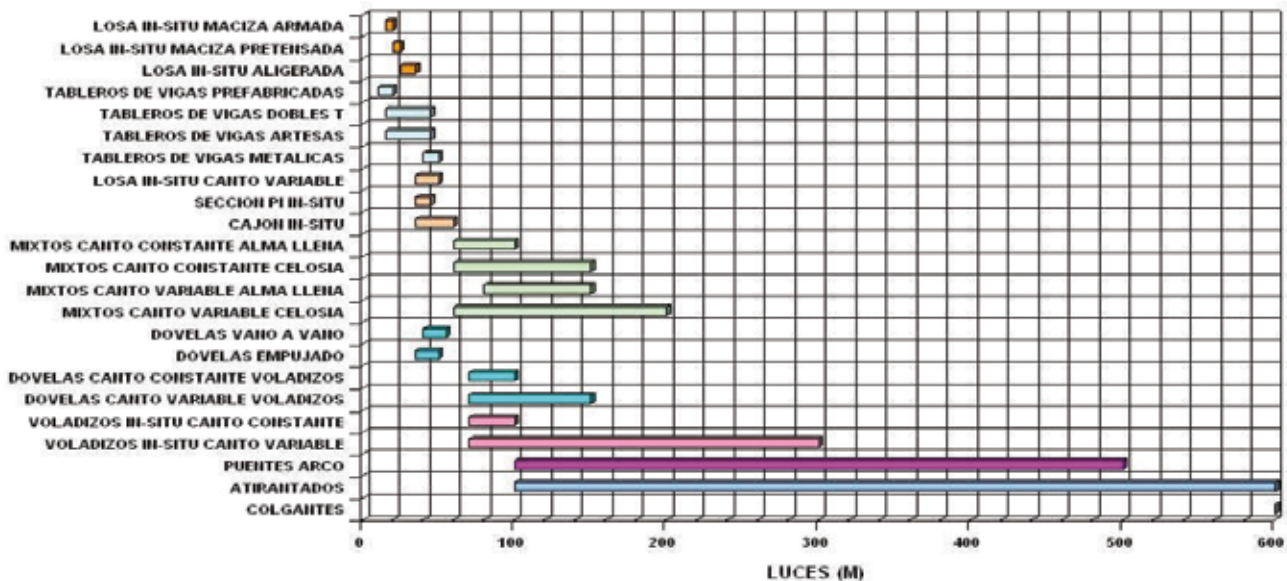
Destacaremos ahora algunos de los métodos que contemplaremos más abajo, haciendo notar que algunos pueden ser

considerados atípicos, mientras que otros se han convertido en universales.

De entre los métodos más utilizados, caben destacar el empuje, los voladizos sucesivos y las maniobras de izada como tres de los más versátiles y, en muchas ocasiones, formando parte de los elementos auxiliares.

Como muestra, los puentes que veremos a continuación, presentan los siguientes procesos de construcción:

- Puente de Tamaraceite: zonas extremas del tablero cimbrado, parte metálica del arco mixto por avance en voladizo del arco con atirantamiento provisional, izado de dovelas y cierres de distintos tipos.
- Puente del Tercer Milenio: tablero empujado sobre apeos provisionales en el río, arco cimbrado mediante cimbra descansando sobre el tablero y apertura en clave para poner en carga las péndolas.
- Puente de ferrocarril sobre el río Ulla entre Catoira y Rianxo: un acceso empujado, el otro izado y las luces principales ejecutadas mediante avance en voladizo compensado para terminar mediante cierres.



Rango de luces: 0 a 600 m

15-60 m	Cimbra	Cimbra Autoport.	Grúas	Viga de lanzam.	Empujado	Vano a vano
Puentes losa de hormigón in situ	X					
Tableros de vigas prefabricadas			X	X		
Tableros cajón in situ	X	X			X	
Dovelas prefabricadas por vanos					X	X
60-160 m	Grúas	Empujado	Viga de lanzam.	Carros de encofrado	Carros de elevación	
Mixtos por vanos	X	X				
Voladizos dovelas	X		X		X	
Voladizos in situ				X		
Voladizos mixtos	X				X	
160-1.000 m	Cimbrado apeado	Voladizo con tirantes	Voladizo sin tirantes			
Puente arco	X	X	X			
Puente atirantado	X	X				

Tabla 1. Clasificación de puentes por luces, tableros y métodos constructivos

**Puente de Tamaraceite (Las Palmas de Gran Canaria, 1994)**

El puente arco de Tamaraceite se encuentra en la isla de Gran Canaria y forma parte del acceso desde el norte de la isla a su capital, Las Palmas de Gran Canaria.

Es un puente arco de tablero intermedio con una longitud de 211 metros y una luz de 167 metros, correspondiendo al arco. Se encuentra junto a la costa, en la desembocadura del barranco de Tamaraceite.

Su diseño se realizó teniendo en cuenta los métodos constructivos posibles y las preferencias de las empresas contratistas, Dragados y Cubiertas MZOV, coordinadamente con los proyectistas. El viaducto de Tamaraceite fue terminado en 1994.

*Descripción de la estructura*

Se trata de un arco mixto con tablero intermedio de hormigón pretensado colgado de aquel mediante dos planos de péndolas situados en la mediana de la plataforma. El tablero se

sustenta además mediante dos apoyos directos en el arco, dos pilas y los estribos. La plataforma consta de tres carriles de 3,50 metros por sentido y arceos de 0,50 m, con una anchura total de 30 m.

El arco es mixto, de 162 m de luz y 41 m de flecha. Su sección es rectangular de 3,60 m de anchura (excepto en los 18,30 m más cercanos a los arranques, donde crece hasta alcanzar 6,50 m) y canto variable (4 m en arranques, 2,75 m en clave) (figura 1 VT).

La parte exterior del arco es metálica (excepto en su fibra superior, donde la chapa es interior) y sirve de encofrado colaborante a las losas y almas de hormigón. Estas almas tienen un espesor de 30 cm mientras que en las losas superior e inferior el canto varía de 45 a 65 cm, creciente hacia los arranques del arco.

El tablero tiene 211 m de longitud, con luces de 22-167-22 m. Consta de dos vigas cajón asimétricas de 12,75 m de



Fig. 1 VT. Arco montado

anchura situadas a cada lado del arco y separadas entre sí 4,10 m para permitir el cruce con el mismo. Van unidas entre sí mediante vigas transversales (travesas) en los puntos de suspensión y de apoyo. Tanto las vigas longitudinales como las transversales son de hormigón postesado.

El tablero se cuelga del arco mediante 12 parejas de péndolas que sustentan las vigas transversales. Las doce parejas de péndolas se anclan en la losa superior del arco y en las travesas de hormigón postesado que unen las dos calzadas del tablero. La separación longitudinal entre puntos de anclaje es de 10,15 m. Longitudinalmente, las péndolas se encuentran en planos verticales, y transversalmente, inclinadas desde el arco hacia el exterior del tablero.

Las pilas y estribos son convencionales, de hormigón armado. El arco se empotra en grandes zapatas, que comparte con las pilas.

#### Proceso constructivo

Se ejecutó primeramente el arco por dovelas en avance en voladizo con atirantamiento provisional y posteriormente se construyó el tablero colgado de las péndolas.

Se decidió ejecutar primero el avance en voladizo de la sección metálica del arco, cerrar después el mismo con su dovela de clave y hacer trabajar a éste, como arco y sin tirantes, durante el proceso de hormigonado que configura la sección mixta definitiva.

La sección metálica del arco se construyó en taller, en trece dovelas, por lo que se ejecutaron 4.200 kN de acero. La dovela más pesada tenía 450 kN y las longitudes variaban entre 4 y 22,50 m. La construcción se realizó sobre bancada que permitía el montaje en blanco. Las dovelas fueron transportadas por barco y a pie de obra donde, previo a su montaje, fueron reforzadas con la armadura pasiva correspondiente a la sección de hormigón, por lo que se obtuvo un peso de montaje de 550 kN.

La parte metálica del arco se montó con grúas y por avance en voladizo con tirantes y torres provisionales contrapesadas por los estribos, que consistía en: izado de la dovela hasta su posición con el auxilio de dos grúas, una de celosía y una telescópica con 1.200 kN de capacidad y 54,72 m de pluma, después se realizaba una presentación, ajuste y nivelación de la pieza, bloqueándola con la precedente por medio de unos dispositivos metálicos. La soldadura se realizó con la inmovilización de las grúas. Posteriormente, se montaron los tirantes y anclajes de atirantado provisional. El tesado de los mismos estuvo pensado para mantener el máximo equilibrio de esfuerzos horizontales en la torre, al tiempo que se mantuvo la posición del arco lo más ajustada posible a su directriz teórica y se descargaron las grúas. El ciclo completo duró dos días por dovela y se realizó alternando una dovela de cada semiarco hasta la colocación de la dovela de cierre, de 2,50 m de longitud. Toda la operación contó con el auxilio de una grúa torre montada sobre carriles situados a lo largo del arco (figura 2 VT).

Tras quedar cerrado el arco, se procedió a desmontar el sistema de atirantamiento y se hormigonó simétricamente desde los arranques hasta la clave, por lo que el arco mixto estaba preparado para recibir las cargas del tablero (figura 3 VT).

La construcción del tablero se dividió según dos partes claramente diferenciadas, por un lado, los dos accesos al vano central (desde los estribos hasta los cruces con el



Fig. 2 VT. Montaje del arco, próximo al cierre en clave



Fig. 3 VT. Izado de una dovela de tablero desde el arco

arco) y por otro, el propio vano central. Los dos accesos, de unos 55 m de longitud en cada estribo, se hormigonaron in situ sobre cimbra y se ejecutaron uno a continuación del otro para aprovechar los encofrados y la cimbra. Terminados los accesos y una vez postesadas sus riostras, se descimbraron y quedaron apoyados en los estribos, pilas y apeos provisionales a la espera de las péndolas extremas (figura 4 VT).

El tramo central, de unos 100 m, se dividió en cinco dovelas de 18,20x30 m y unos 6500 kN de peso unitario con juntas húmedas de 1,80 m entre ellas. Estas dovelas fueron prefabricadas en el suelo bajo la vertical del tablero. Se construyeron dos bancadas paralelas, de tal forma que los cajones de cada dovela se hormigonaban independientemente y en dos fases, dejando juntas de hormigonado a cada lado

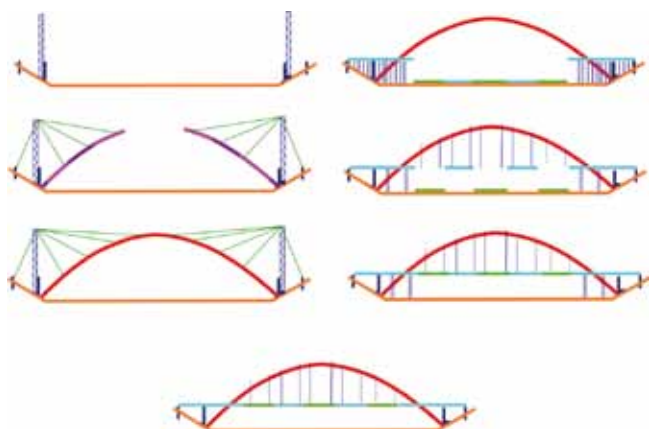


Fig. 4 VT. Fases de construcción

de sus dos riostras que eran construidas en la última fase. Por medio de tres carretones se consiguió un ciclo de una semana por tramo de cajón.

Las péndolas se prefabricaron en bancada a pie de obra y se procedió a su montaje con grúa torre dejándolas suspendidas del arco a través de los anclajes activos, a la espera de la izada del tablero.

La suspensión de las cinco dovelas prefabricadas se realizó en tres etapas de carga simétrica. En las dos primeras se colgaron del arco, a la vez, dos dovelas simétricas con respecto a la clave del mismo (dovelas 2+4, y dovelas 1+5), para finalmente en la tercera fase colgar, en la clave del arco, la dovela central del vano prefabricado (dovela 3). Cada una de las dovelas fue izada con ayuda de cuatro tirantes provisionales anclados en sus dos riostras en puntos próximos a los anclajes de las dos péndolas, y suspendidos desde el arco a través de unos gatos hidráulicos apoyados en unas estructuras provisionales situadas en los planos de anclaje de las péndolas (figura 3 VT). Toda la maniobra estuvo monitorizada, controlando las cargas y la situación relativa de las dovelas. Las fases de izado comprenden el accionamiento simultáneo y por escalones en ambas dovelas, hasta el despegue y suspensión del suelo de forma isostática cada dovela, consiguiendo una nivelación hasta situarlas en posición paralela a la definitiva. Una vez izada la dovela unos 20 m del suelo, en un punto próximo a la posición definitiva, se enfilaron las cabezas de anclaje inferior de las péndolas. Una vez posicionada la dovela, se tesaron estas con gato unifilar desde los anclajes superiores en el arco, y se descendió con los gatos hasta transferir la carga a las dovelas y liberar los cables de izado.



Fig. 5 VT. Viaducto terminado

Las actividades restantes fueron: el ajuste de geometría de las dovelas ya izadas, la ejecución de juntas y pretensado de continuidad (tendones de 211 metros). Fue necesario enfilar con caletín y tiro directo a pesar de ser rectos.

Este puente es un caso de estructura atípica, aunque tipificable, y múltiples métodos de ejecución. El control geométrico de la ejecución resultó ser de gran utilidad, consiguiéndose una estructura próxima a la teórica, lo que resulta un éxito para un puente tan atípico (figura 5 VT).

#### **Puente del Tercer Milenio (Exposición Internacional de Zaragoza, 2008)**

El puente del Tercer Milenio, que cruza el río Ebro al oeste de la ciudad de Zaragoza, fue el principal acceso rodado al recinto de la Exposición Internacional que se celebró en 2008.

El diseño del puente es resultado del esfuerzo del equipo de ingeniería de Arenas & Asociados, y su compleja construcción, por parte de Dragados S.A., con el uso de grandes volúmenes de un nuevo hormigón (hormigón blanco autocompactante de altas prestaciones, con resistencias características teóricas de 75 MPa en arco y 60 MPa en tablero) y el empleo de métodos de construcción altamente singulares con geometrías complejas incluyendo el empuje del tablero de 34 m de ancho con cara inferior en vientre de pez, curvatura longitudinal y 200.000 kN de peso, y una apertura en clave del arco con una fuerza horizontal de 120.000 kN.

#### *Descripción de la estructura*

Responde a la tipología de arco atirantado de tablero inferior (*bow-string*). Está construido casi íntegramente con hormigón blanco de alta resistencia y sus dimensiones son 270 m

de longitud con una luz principal de 216 m, 36 m de altura del arco sobre el tablero y un ancho global de éste de 43 m. El diseño del puente queda configurado por un arco central atirantado de directriz parabólica de segundo grado que cubre los 144 m centrales con pórticos de entrada en forma de A, donde el arco se divide en dos pies inclinados unidos por una traviesa completando los 216 m de luz principal. El ancho del tablero aumenta hasta un máximo de 68 m en las lajas triangulares que se diseñaron como elemento de unión y transferencia de esfuerzos entre pies inclinados de arco y tablero (figura 1 P3M).

El tablero cuelga del arco desde sus bordes laterales mediante 32 pares de péndolas distribuidas cada 6 m en forma de V invertida. Las péndolas son de cable cerrado de 100 mm de diámetro con tres capas de alambres con sección en Z galvanizados en caliente. Los terminales de estos cables son de tipo mazarota, siendo pasivos los superiores con forma de horquilla para su enhebrado y embulonado a través de los palastros dejados embebidos en el arco. Los terminales inferiores, activos, son roscados, tesándose desde el paramento inferior del tablero.

El tablero del puente (recto en planta y con alzado circular de 5.000 m de radio) alberga seis carriles de circulación (tres por sentido) y dos pistas para ciclistas por sentido a ambos lados de los carriles para tráfico rodado. Los peatones son protegidos en el vano principal de las inclemencias meteorológicas, por medio de una cubierta acristalada de perfil curvo con estructura de acero inoxidable.

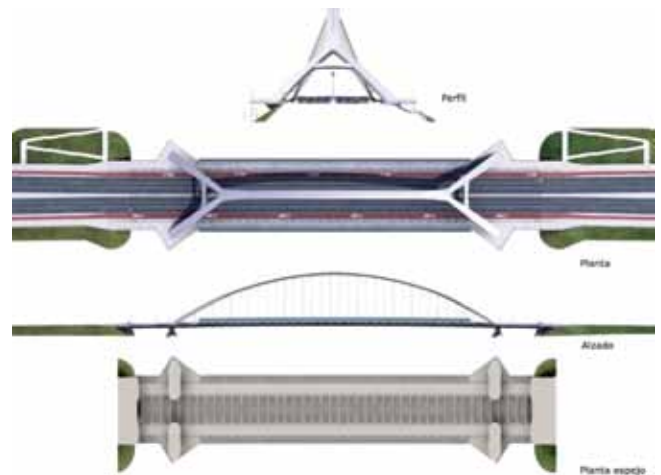


Fig. 1 P3M. Alzados y plantas del puente del Tercer Milenio

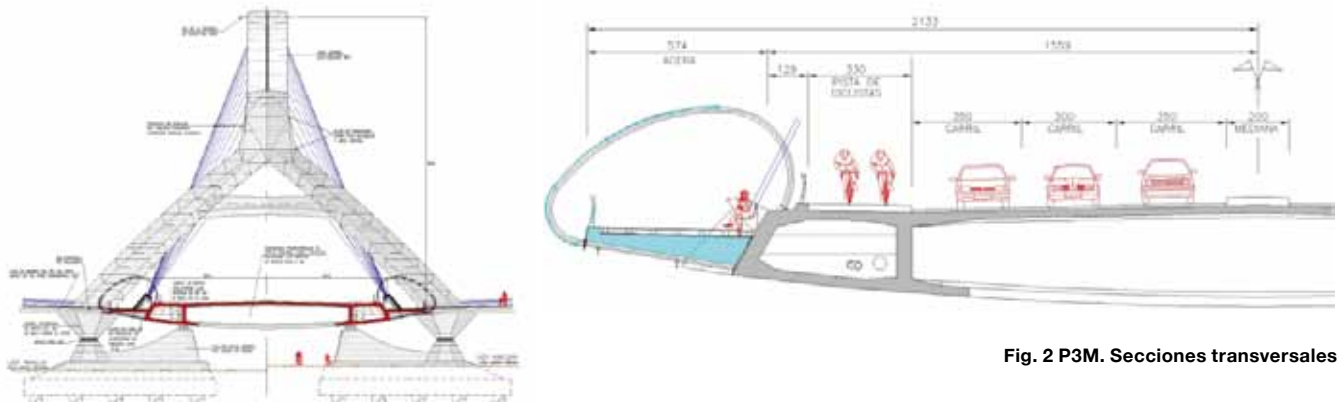


Fig. 2 P3M. Secciones transversales

La sección principal del tablero es de hormigón pretensado con un ancho de 33 m y un canto variable entre 2 y 3,20 m con cara inferior en vientre de pez. Esta forma responde a los momentos flectores transversales derivados de su extraordinaria anchura. Esta sección se estructura en dos nervios de borde extremos trapezoidales de sección exterior constante, interiormente huecos a excepción de 9 m a cada lado de los apoyos del tablero en pilas. Estos nervios de borde se vinculan cada 6 m por medio de diafragmas con sección doble T asimétrica que los atraviesan. Para minimizar las cargas de peso propio se reducen al máximo los espesores de los distintos elementos (figura 2 P3M).

La cimentación es profunda, con 10 pilotes de 2 m de diámetro y menos de 45 m de profundidad en el caso de las pilas. Mención aparte merecen también los pilotes de 2 m de diámetro para las pilas provisionales situadas en el río con 49 m de profundidad.

#### Proceso constructivo

Se resume en construcción de pilas y estribos, construcción del tablero mediante empuje desde el estribo 2, construcción del arco y pies inclinados, y colocación y puesta en carga de péndolas. Dadas las características de la obra, se destacan las singularidades en el sistema de empuje, cimbra y encofrado del arco sobre el tablero, y puesta en carga de las péndolas.

#### Fabricación y empuje del tablero

El tablero consta de 12 dovelas de 24 m de longitud cada una salvo las dos extremas. La ejecución de las dovelas se realizó en una instalación fija, parque de dovelas, situada tras el estribo 2. Para permitir los máximos rendimientos en el ciclo de ejecución de cada dovela, los diafragmas y las prelasas del tablero (zona central de la sección) se hormigonaban in-

dependientemente. El desplazamiento de estos elementos a su posición final en el encofrado de la dovela se realizó por medio de un pórtico grúa de 25 m de luz y 500 kN de capacidad. El hormigonado de la sección se realizó en tres fases: en las dos primeras se hormigonó la losa inferior y las almas de cada uno de los nervios de borde, y una última comprendió la losa superior de la sección completa del tablero. La ferralla se prefabricó lo máximo posible, habida cuenta de su complejidad y cuantía. Las grúas torre móviles cubrían toda la planta de la dovela así como las áreas de prefabricación de ferralla y acopio de los encofrados (figura 3 P3M).

El empuje del tablero se realizó mediante un sistema de tiro directo con barras de alta resistencia. Cada línea de deslizamiento coincidía con el eje de las almas verticales de los nervios de borde. Se establecieron dos ejes de tiro con una capacidad de tiro de 3.000 kN cada uno. El peso total a empujar fueron unos 200.000 kN, y el peso máximo de dovela unos 20.000 kN. Dada la curvatura del paramento inferior, la pendiente transversal del tablero a lo largo de las líneas de deslizamiento era de un 8 %; asimismo la pendiente longitudinal era variable con valores entre el 0 % y el 3,7%. Un sistema de deslizamiento de dovelas a través de chapas deslizantes con la dovela sobre carriles no era admisible dada la elevada carga a transmitir, sin olvidar los elevados rozamientos. Para evitar estos problemas se dispusieron cuatro apoyos adicionales, dos por línea de deslizamiento dentro del parque de forma que la dovela se hormigonaba directamente sobre ellos. Se construyeron 8x2 pilas provisionales en el cauce, separadas 24 m. Los apoyos de empuje fueron tipo pot fijo con bandejas superiores en cuña definiéndose su superficie en función de la carga máxima prevista, con una longitud mínima derivada del proceso de llegada a pila del pescante, la recuperación de flecha y el



Fig. 3 P3M. Panorámica del parque de empuje

espacio para la colocación inicial de almohadillas. El guiado transversal, debido a la geometría de la sección, se realizó por el interior del nervio de borde (figura 4 P3M).

#### *Cimbra y encofrado*

La concepción de la cimbra del arco se basa en una estructura soporte a base de perfiles de alta capacidad portante sobre los que se dispone cimbra tupida. Se consideraron en el diseño múltiples hipótesis conjugando las sucesivas fases de hormigonado con la aplicación más desfavorable de cargas de viento, o excentricidad de acuerdo a las recomendaciones vigentes. El apoyo de la cimbra al arco sobre el tablero

se realiza de forma que las cargas vayan directamente a los diafragmas. Este mismo criterio se sigue para la definición de los caminos de rodadura de las dos grúas torre que se instalaron sobre el tablero para la ejecución del arco.

Especial mención tiene el diseño y posterior montaje de la cimbra y encofrado en la zona del nudo o entronque de los dos pies del arco, por sus superficies alabeadas, el cambio de geometría, las inclinaciones y el reparto de cargas mayores entre la cimbra de la zona aperturada de los pies y la cimbra del arco. El encofrado de arranque del arco en zona de laja tuvo que colocarse con precisiones más estrictas



Fig. 4 P3M. Empuje del tablero





Fig. 5 P3M. Cimbra, ferrallado y hormigonado arco

que en construcciones convencionales de hormigón para asegurar la buena alineación de las patas del arco. Esta pieza se hormigonó a la vez que la laja para evitar tener una junta horizontal. El desmontaje de la cimbra (después de la puesta en carga de péndolas) es más limitante que el montaje debido a la restricción del espacio por los planos de péndolas ya en carga y la continuidad de los trabajos de remates de galerías y acabados del puente (figura 5 P3M).

*Colocación y puesta en carga de péndolas*

Se colocaron inicialmente 52 péndolas de las 64. Mediante un puente de tesado y gatos de 600 kN se dio una carga mínima

(de unas 200 kN) para hacer poco apreciable el efecto de la catenaria.

La carga del tablero que inicialmente estaba sobre pilas provisionales debía traspasarse a las péndolas, produciendo por tanto el desapeo del tablero. Para ellos se realizó la apertura en clave del arco (se dejó sin hormigonar 1,65 m de longitud), por medio de gatos hidráulicos con 120.000 kN de capacidad total, mediante seis gatos de 2.000 kN de capacidad, (ensayados a 3.000 kN). Estos seis cilindros se colocaron centrados en chapones de refuerzo (más de 90 mm de espesor) diseñados con cunas de apoyo para la fácil colocación de los mismos.



Fig. 6 P3M. Chapones de refuerzo y gatos para apertura en clave

La maniobra se controló por movimientos de carrera de los seis gatos agrupados en tres parejas, de forma sincronizada por medio de transductores de carrera y carga. Se instrumentaron las péndolas, así como varias secciones del arco, y se colocaron clinómetros para conocer los giros en plano vertical. Toda la información se recogía en una pantalla de ordenador, al igual que el sistema de control topográfico automatizado que permitía conocer movimientos y giros (figura 6 P3M).

La maniobra de apertura en clave se realizó en un día. Con la aplicación de 120.000 kN se abrió lo esperado, 180 mm y en cota vertical se levantó unos 80 mm.

#### **Puente de ferrocarril en la desembocadura del río Ulla (Catoira-Rianxo, 2015)**

El puente de ferrocarril en la desembocadura de la ría de Arosa constituye la actuación de mayor alcance del Eje Atlántico de Alta Velocidad entre Pontevedra y La Coruña. Tiene una longitud total de 1.620 m con una distribución de luces de 50+80+3x120+225+240+225+3x120+80 m.

##### *Descripción de la estructura*

El tablero es una celosía de doble acción mixta de canto variable en los cinco vanos principales con 17,90 m de canto total sobre apoyos y 9,15 m en centro de vano. Los vanos de los viaductos de acceso son celosías mixtas con canto constante total de 9,15 m. Las cuatro pilas centrales (P5 a P8), con forma de copa están rígidamente vinculadas a la celosía mixta del tablero, configurando un pórtico mixto. El resto de las pilas de los vanos de acceso son convencionales con

sección rectangular y dimensiones variables en longitudinal y transversal (figura 1 PFU).

La celosía se modula en segmentos de 15 m con los nudos del cordón superior separados en transversal 6 m y las diagonales inclinadas en la zona de canto constante unos 45° respecto de la horizontal. Los cordones superior e inferior son paralelogramos formados por chapas de acero con 0,80 m de ancho y cantos de 1,00 y 1,20 m, respectivamente. Las diagonales tienen una sección similar al cordón superior.

Las casi 200.000 kN de acero de la celosía son de calidad S-355-J2+N y S-355-K2+N (para chapas con espesores superiores a 60 mm) para los vanos de acceso y de calidad S-460-M y S-460-ML (para chapas con espesores superiores a 65 mm) en los tres vanos centrales de canto variable y mayor luz.

La losa superior tiene un ancho de 14 m y un canto variable entre 0,46 y 0,25 m. El hormigón in situ HA-35 se coloca sobre losas prefabricadas colaborantes de ancho de sección completa. El hormigón de fondo se coloca entre los cordones metálicos inferiores de la celosía conectándose a los mismos en las zonas de flexión negativa. En las zonas de centro de vano también se ejecuta hormigón para cerrar formalmente la vista y facilitar las labores de inspección y mantenimiento.

##### *Proceso constructivo*

La ejecución del tablero se realiza mediante tres procesos constructivos diferentes.



**Fig. 1 PFU. Vista general del viaducto terminado**



Fig. 2 PFU. Vista general del lanzamiento (izquierda) y detalle de apoyo deslizamiento sobre apeo provisional

#### - Lanzamiento

El lanzamiento de los vanos 3 y 4 de canto constante del viaducto de acceso de la margen izquierda (entre pilas P2 y P4), respetó los criterios de mantener una estructura resistente en viga continua, empleando la zona entre E1 y P2 como parque de ensamblaje de dovelas en altura sobre apeos ante la imposibilidad de utilizar la plataforma detrás del estribo. La celosía se dividió en dovelas en función de los pesos y la optimización de la posición de los apeos. Primero se ejecutó el montaje modular del vano 4 (120 m) con grúa autopropulsada capaz de realizar pequeños desplazamientos cargada con las dovelas, a continuación se empujó hasta P3. Después se montó el vano 3 unido al vano 4 para posteriormente lanzar los dos tramos hasta P4. Las dos etapas del lanzamiento seguían una directriz curva en planta (radio 5116 m) y se realizaron mediante cable pretensado que era traccionado por dos unidades hidráulicas de tiro de 1.200 kN de capacidad unitaria y 550 mm de carrera, ubicadas en estructuras auxiliares ancladas a P2 y a la celosía a través de unas orejetas de conexión a cada lado. Debido al 1,8 % de pendiente descendente, se colocó un sistema de cable de retenida en el E1 para acompañar el movimiento, permitiendo lanzar 240 m de estructura y un peso de 27.500 kN (figura 2 PFU).

El proceso de lanzamiento buscó minimizar los refuerzos de la estructura metálica y limitar las reacciones en los apeos a unos 10.000 kN. Además estuvo condicionado por la gran rigidez de la celosía metálica que la hacía muy sensible a las imperfecciones geométricas. Se utilizaron las almas interiores de los cordones inferiores como líneas de apoyo. La distribución de patines hidráulicos de deslizamiento permitieron conocer y controlar las reacciones hiperestáticas en diferentes fases del proceso (mediante

fases estáticas de gateo que buscaban obtener la geometría y el nivel tensional de viga continua).

#### - Izado

El izado de los vanos 10, 11 y 12 (120+120+80 m de luz) comprendidos entre pilas P9-P10-P11 y estribo E2, consistió en el izado vano a vano de la estructura metálica utilizando las dovelas '0' sobre pilas (previamente montadas in situ) a modo de balancines que se contrapesan, bien con anclajes externos (E2), bien con una retenida anclada al vano contiguo.

Los vanos se montaron apeados en el terreno en la vertical de su posición definitiva rigidizados en sus extremos con un sistema metálico de tracción-compresión. Las dovelas '0' se montaron sobre apoyos rotulados deslizantes a cota definitiva de 10.000 kN cada uno, quedando empotradas (mediante marcos con ocho gatos de 3.000 kN cada uno) tanto a desplazamientos como a giros.

Los pesos a izar fueron 4.620 kN el vano 12, 9.000 kN el vano 11 y 9.640 kN el vano 10. Se emplearon seis unidades hidráulicas de izado con cable de 5.000 kN de capacidad cada una, controladas por ordenador apoyadas en tres parejas de vigas principales situadas en la coronación de las dovelas 0.

Las fases de izado consistieron en: una primera fase de estabilización de las dovelas sobre pilas (dovelas 0), mediante un tesado inicial controlado de los cables de izado y retenida, liberando el marco de empotramiento al giro de la dovela; una segunda fase de izado del vano completo, previamente desapeado de los apoyos intermedios sobre la plataforma y controlado topográficamente que, tras el izado, el vano ocu-



Fig. 3 PFU. Vista del izado del vano 10 (entre P9 y P10)

paría una posición dentro de tolerancia –al comienzo del izado se eleva el vano hasta copiar la pendiente del mismo–; y una tercera fase de conexión del vano con la dovela ‘0’ mediante carretes de 1 m de longitud teórica en cada una de las 12 uniones de la celosía (figura 3 PFU).

*- Avance de voladizos compensados*

El tramo de canto variable (entre pilas P4 y P9) se ejecutó en avance de voladizos compensados desde las pilas, mediante pórticos de izado, capaces de desplazarse con la dovela cargada. El inicio del avance fue precedido por la verticalización e izado de las dovelas sobre pilas (cabeceros) de las pilas P5 a P8. Mediante dispositivos de izado hidráulicos ubicados en

una estructura pórtico sobre la coronación de las pilas, estas dovelas con forma de W y del orden de 3.600 kN cada una se verticalizaron desde la posición horizontal de montaje a cota de terreno y se izaron por parejas de forma simultánea sobre cada pila hasta ser apoyadas en la coronación de las mismas (figura 4 PFU).

Partiendo de los cabeceros, la estructura metálica a ejecutar por avance en voladizos compensados se dividió en dovelas de 15 m de longitud y ancho completo, con un decalaje de 7,5 m entre el extremo superior y del cordón inferior, para facilitar las labores de ensamblaje en altura. Se colocan 37 dovelas y cinco cierres.



Fig. 4 PFU. Verticalización del cabecero (imagen izquierda) y del izado (imagen derecha)



**Fig. 5 PFU. Vista de los pórticos de izado**

El ensamblaje de las dovelas se realizó en cadena con dovelas ejecutadas por pares, con montajes en blanco físicos cada dos dovelas de forma que se pudieron asegurar desde tierra el perfecto ajuste posterior en altura de los dos cordones superiores, las dos diagonales y los dos cordones inferiores. El diseño de las dovelas ‘abiertas’ requirió el arriostramiento provisional de los extremos traseros del cordón en voladizo, que se reutilizó. Este sistema que facilitó el transporte e izado, permitió además la regulación de la posición final para realizar el ajuste en geometría previo al soldeo de la dovela con la precedente.

El transporte de las dovelas desde los talleres de obra a su posición para el izado se realizó mediante el empleo de pla-

taformas autopropulsadas (SPMT) con dos carros independientes (uno por cuchillo de la dovela).

Se emplearon dos parejas de carros por pila, uno denominado fijo, de posición fija anclada al tablero y con movimiento del mismo en vacío, y otro, denominado móvil, capaces de recoger una dovela en la base de la pila, izarla parcialmente, trasladarla hasta su ubicación final en el extremo del voladizo e izarla hasta su posición final para el soldeo con la anterior, requeridos para el vano central (P6-P7) de vía libre para la navegación (figura 5 PFU).

Durante el proceso de posicionamiento se actúa sobre los gatos de izado, y del balancín de ajuste (en los carros fijos) o en los gatos de tensión de los cables de rigidización (en los carros móviles). Tanto los trabajos de acople como los trabajos de soldadura se realizan desde plataformas de soldeo protegidas del aire y la lluvia.

Para la realización de los cierres, se realizó el ajuste en cota mediante el desplazamiento analizado de los pórticos de izado, así como los carros de hormigonado de la losa de fondo y el carro de repintado que se empleaban en el ciclo de ejecución del tablero. Se diseñaron unos blocajes metálicos, que junto con soldaduras parciales y el estudio de temperaturas permitieron el análisis de los esfuerzos a transmitir en la unión de las dovelas de cierre, optimizando las operaciones (figura 6 PFU).



**Fig. 6 PFU. Vista carros y plataformas sobre tablero en voladizo, y grúa torre sobre tablero en primer plano**

### Control geométrico

Los controles suelen ser directos y sencillos, bastando con asegurar que las dimensiones generales, así como las cotas y alturas están dentro de tolerancia. Esto, que es lo más habitual, tiene una excepción notable en el caso de los voladizos sucesivos.

Normalmente se pueden separar fácilmente los elementos que componen la estructura, pudiéndose actuar en casi cualquier circunstancia y paliar las divergencias que se presenten cuando sea preciso.

Por propia experiencia sabemos que las estructuras más complejas de controlar geoméricamente son los voladizos sucesivos.

La principal diferencia es que, mientras que en la mayoría de las estructuras se interpola entre puntos existentes, durante el avance en voladizos sucesivos se extrapola constantemente. **ROP**

### Fichas técnicas de los tres puentes

<b>Puente de Tamaraceite (Las Palmas de Gran Canaria, 1994)</b>	
Propiedad	Gobierno Autónomo de Canarias – Consejería de O. P.
Proyectista	Torroja Ingeniería - Intecsa
Constructor	Dragados - Cubiertas MZOV (Acciona)
Asistencia Técnica Construcción	Servicios Técnicos de Dragados

<b>Puente del Tercer Milenio (Exposición Internacional de Zaragoza, 2008)</b>	
Propiedad	Zaragoza Alta Velocidad 2002
Proyectista	Arenas y Asociados
Constructor	Dragados
Asistencia Técnica Construcción	Arenas y Asociados + Dirección Técnica de Dragados

<b>Puente de ferrocarril en la desembocadura del río Ulla (Catoira-Rianxo, 2015)</b>	
Propiedad	Ministerio de Fomento - Dirección General de FF. CC.
Proyectista	Ideam
Constructor	Dragados
Asistencia Técnica Construcción	Fhecor + Dirección Técnica de Dragados