

Sistema innovador para la construcción vano a vano de puentes con luces de más de 100 m con vigas autolanzables

An Innovative Span-by-Span Construction System with Self-Launching Gantries for span lengths above 100 m

Javier Muñoz-Rojas ^a, Celso Iglesias ^b, Sara Fernández ^c, Pedro Pacheco ^d, André Resende ^e, Hugo Coelho ^f,

^{a b c} Ingenieros de Caminocs, Canales y Puertos Carlos Fernández Casado S.L. Madrid

^{d e f} Civil Engineers. BERD. Oporto. Portugal

RESUMEN

Las compañías BERD y CFC han desarrollado conjuntamente un sistema para la construcción industrializada vano a vano con viga autolanzable de puentes con luces de hasta 100 m. El sistema es aplicable a la ejecución in-situ o con dovela prefabricada. Para optimizar el diseño de la viga el montaje se realiza en dos fases: primero sendos voladizo de 0.25L desde la pila pretensados con cables superiores. Luego la zona central que se conecta con la fase anterior con cables inferiores. El sistema ha sido propuesto en dos viaducto de dovelas prefabricadas: el primero de 3.5 km en Colombia con vanos de 100 m y el segundo de 10 km con solución extradósada en la India con vanos de 124 m.

ABSTRACT

BERD and CFC have developed jointly an innovative system for the industrialized construction of bridges with spans lengths over 100 m with the technique of span-by-span construction with launching gantry. It may be applied to in-situ or precast construction. In order to optimize the gantry the erection is done in two stages: first 0.25L long cantilevers extending at both sides of the pier prestressed with cables located in the upper slab. Then the central area connecting the previous section and the rear cantilever with continuity cables located in the lower slab. Two proposals are presented: a 3.5 km long viaduct in Colombia with 100 m spans and a 10 km long extradosed viaduct in India with 124 m spans.

PALABRAS CLAVE:

Vano a vano, viga lanzamiento autolanzable, dovela prefabricada, extradósado, innovación

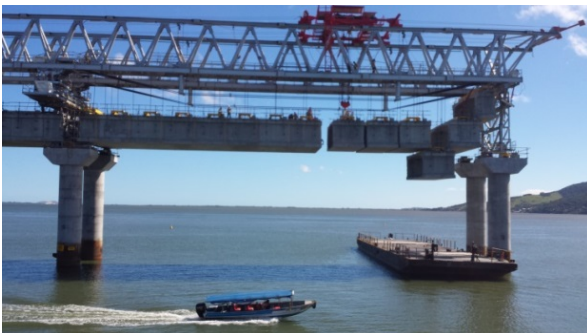
KEYWORDS:

Span-by-span construction, launching gantry, precast segments, extradosed bridge, innovative system

1. Introducción. Antecedentes

En viaductos de gran longitud con luces medias (50-100 m) una solución muy competitiva es la construcción de secciones cajón de hormigón pretensado in-situ o con dovelas prefabricadas. La construcción puede realizarse vano a vano o por avance en voladizo. En el primer caso pueden emplearse vigas de lanzamiento, o apoyar el encofrado o las dovelas sobre apeos provisionales si las condiciones bajo el tablero lo permiten. En el caso del montaje por voladizos puede recurrirse a vigas de lanzamiento también, y en el caso de dovelas prefabricadas emplear pórticos de izado en el frente de avance o izar las dovelas directamente con grúas desde la parte inferior si las condiciones bajo el tablero lo permiten.

Centrándonos en el sistema de las vigas de lanzamiento - solución que permite los mayores rendimientos, la independencia de las condiciones existentes bajo el tablero y facilita un acceso al frente de obra desde lo ya construido, las luces máximas de la solución vano a vano o de la de voladizos sucesivos vienen lógicamente condicionadas en gran medida por las capacidades y coste de la maquinaria auxiliar de montaje.



Los equipamientos habituales llevan a que el rango económico en la construcción vano a vano esté actualmente en el entorno de 50 m en tanto el vano completo debe colgarse de la viga (Fig.1). En la solución con voladizos, donde sin embargo sólo es necesario colgar una o pocas dovelas de la máquina, lógicamente las luces son mayores, en el entorno de 70-90 m, con algunas realizaciones que han alcanzado luces superiores a 100 m (Fig.2).



Como en toda actividad, la evolución tecnológica y la competencia industrial tienden inexorablemente a empujar y modificar los límites existentes de cada momento. Una de los sistemas surgidos estos últimos años que ha abierto la puerta a ello es el sistema OPS de la casa BERD [2], que por medio de un pretensado activo en la viga de lanzamiento permite reducir las necesidades de acero en la estructura metálica de las vigas, a la vez que proporciona un control más efectivo y activo de las deformaciones durante el montaje entre otras ventajas.

Basándose en este sistema, CFC ha explorado en colaboración con BERD la

aplicación del sistema a diversas obras con luces grandes.

La primera experiencia fue el proyecto del Nuevo Puente Pumarejo en Barranquilla (Colombia) donde se planteó para los accesos una construcción vano a vano [3] [4]. La singularidad en este caso no era sólo la luz del vano tipo (70 m) sino el gran peso a soportar por la viga dado las dimensiones extraordinarias del tablero (38 m ancho). Los estudios comparativos mostraron que la solución con dovela prefabricada se mostraba en principio más económica que una construcción in-situ con autocimbra (Fig. 3).

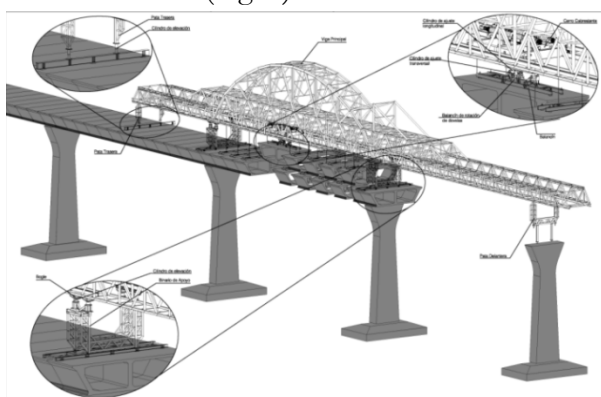


Fig. 3. Solución para la construcción vano a vano con dovelas prefabricadas de los accesos del nuevo puente Pumarejo. Luz 70 m (CFC-BERD 2013)

2. Planteamiento del sistema.

La experiencia en el diseño del puente Pumarejo fue un ejemplo del fructífero resultado al que lleva la interacción en la fase de proyecto entre los ingenieros responsables del diseño y las empresas suministradoras de equipos de construcción, así como el campo que abre a poder empujar los límites de algunos sistemas industrializados de construcción de puentes.

Esto abrió la puerta a abordar otros estudios que CFC llevaba tiempo explorando como la ejecución de viaductos de gran longitud con múltiples vanos empleando sistemas alternativos al de voladizos sucesivos - ensayado por ejemplo en propuestas de puentes empujados para líneas de alta velocidad con luces de más de 90 m-.

Aprovechando las ventajas que proporciona el sistema OPS desarrollado por BERD para aumentar las dimensiones de las vigas de lanzamiento se estudió la posibilidad de construir vano a vano luces de hasta 100 m.

Aunque esta opción se mostró factible sin embargo la repercusión de una viga de lanzamiento de tal capacidad –con la limitación adicional de no ser abordable de forma práctica con vigas pasivas sin OPS- llevó a plantear una solución intermedia o híbrida entre el montaje en voladizo y el montaje vano a vano, como solución de compromiso entre el objetivo de conseguir rendimientos y rapidez de montaje asimilable a una construcción vano a vano con el de un coste de la viga de lanzamiento más reducido.

El sistema consiste esquemáticamente en una construcción con una viga de lanzamiento capaz de salvar la luz del gran vano (100 m o más) para con ella realizar in-situ o con dovelas prefabricadas el vano en dos fases (Fig. 4):

- En primer lugar se realizan voladizos simétricos desde la pila de longitud cada uno en el entorno de $\frac{1}{4}$ del vano, pretensados con cables superiores
- Posteriormente se completa el tramo central que conecta el tramo anterior con el voladizo trasero, cosiendo ambos con cables de continuidad inferiores

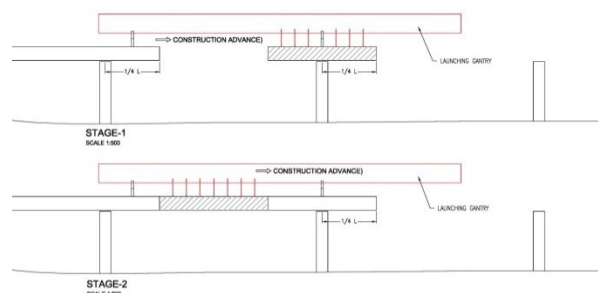


Figura 4. Secuencia esquemática de la construcción

La configuración de la estructura en las dos fases permite optimizar en gran medida la distribución del pretensado en tanto los esfuerzos durante las fases del montaje no difieren en exceso con los de la estructura

continua. La primera fase es pretensada con cables superiores como en un voladizo convencional. La segunda fase se pretensa con cables de continuidad inferiores que la conectan con los dos frentes en voladizos de los tramos previamente ejecutados (Fig. 5).

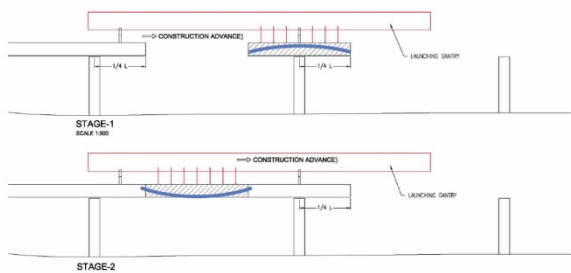


Figura 5. Distribución esquemática del pretensado

A raíz de este estudio, se detectó también la posibilidad de aprovechar este sistema para aplicarlo a luces superiores con configuraciones en las que el tablero tuviera un sistema de sustentación auxiliar al del propio pretensado interno.

Se comprobó que es fácilmente aplicable en puentes extradados multivano. El encaje pasaba por realizar la obra de una forma no convencional: Normalmente los tirantes se van montando durante la ejecución en voladizo en combinación con parte del pretensado. Una vez cerrado se introduce el pretensado de continuidad. En el nuevo sistema se hace lo contrario, se introduce inicialmente en la construcción vano a vano todo el pretensado – diseñado para sustentar todo el peso propio lógicamente- y posteriormente se añaden los tirantes que proporcionan la capacidad adicional para resistir el resto de cargas. De esta manera el montaje de los tirantes no afecta al ciclo y se aumenta notablemente el rendimiento.

De la misma manera este principio puede extenderse a otras configuraciones como arcos múltiples, atirantamiento extradado inferior...etc. (Fig. 6).

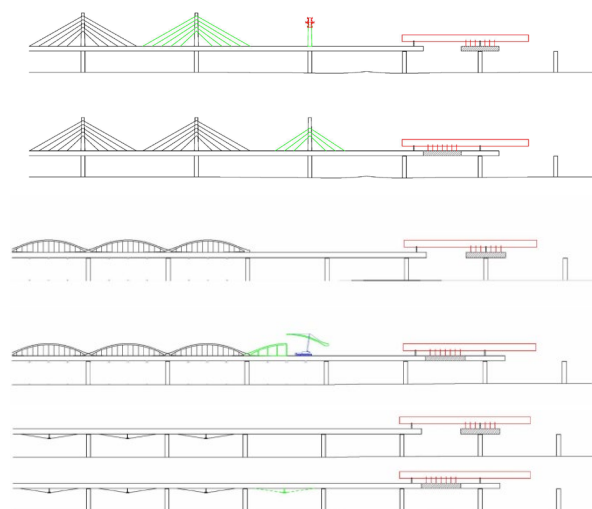


Figura 6 Aplicación del sistema a soluciones de grandes luces con sistemas resistentes de sustentación auxiliar del tablero

Se presentan a continuación un ejemplo de aplicación para cada una de las situaciones descritas: un viaducto tipo viga de canto variable y un viaducto multivano extradado. En ambos la solución se desarrolló con construcción prefabricada, no obstante las conclusiones serían en general extrapolables para la construcción in-situ.

3. Propuesta para el “Gran Viaducto” de Cartagena de Indias (Colombia)

3.1 Descripción de Obra

La primera aplicación del sistema se desarrolló para el concurso de un gran viaducto en Cartagena de Indias (Colombia) con la empresa OHL. Se trata de una obra de 3.5 km de longitud con vanos de 102 m de luz, resultando pues más de 30.

El tablero es una sección convencional en cajón de canto variable de 5.10m en apoyos y 2.40m en centro de vano con sección cajón que tiene una losa superior de 11.70m y una losa inferior de 5.80m. Para optimizar la maquinaria y los elementos de manipulación de dovelas se ha previsto que los vuelos se ejecuten en una segunda fase desfasados con el frente de avance uno o dos vanos. (Fig. 7)

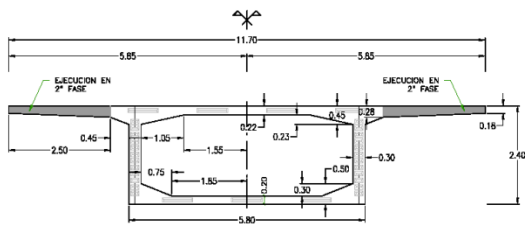


Figura 7. Sección tipo Gran Viaducto

Se trataba de resolver la ejecución de casi 50.000 m² de tablero en una obra con vanos inicialmente previstos para ejecutar con el sistema de voladizos sucesivos con dovelas in-situ, pero donde el plazo, dado que se trataba de una concesión, era un factor muy importante.

Las ventajas de una industrialización con construcción prefabricada mostraron pues rápidamente que era la opción más adecuada. La imposibilidad de modificar la luz, obligó

pues a pensar en una solución para salvar 102 m de la forma más eficiente posible.

Como se ha referido anteriormente la ejecución de un vano se realiza en dos fases, primero las "T" simétricas desde la pila y posteriormente se completa el tramo central con las dovelas restantes, que se cosen con los sendos voladizos a ambos lados.

La colocación de dovelas se realiza por medio de una viga de lanzamiento superior en celosía de una longitud aproximada 1.5 veces la del vano (Fig. 8). Dadas las características de la obra, el apoyo delantero de la viga se realiza directamente sobre las cimentaciones y el trasero en el extremo del voladizo del tablero construido previamente. Para optimizar el pretensado de esta ménsula, este apoyo se realiza a 20 m del eje de la pila

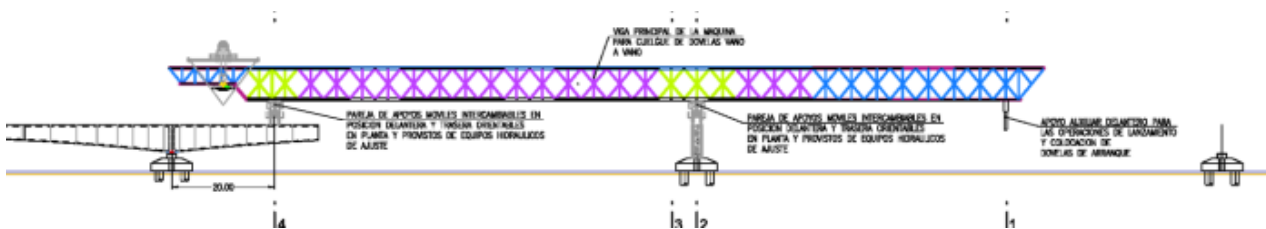


Figura 8. Alzado viga de lanzamiento para vanos de 100 m

Las dovelas son alimentadas desde el tablero ya construido por carros-efante siendo a continuación colgadas y transportadas por un cabrestante que discurre por el cordón superior hasta su posición definitiva de donde son colgadas con elementos regulables

3.2. Secuencia Detallada

- La secuencia de realización de un vano se inicia con el posicionamiento de la viga apoyada en sus binarios delanteros.
- A continuación se coloca la dovela de arranque sobre pila. Se trata de la unidad de mayor canto y por ello para aligerar su

peso se realiza de una dimensión reducida -3.0 m- sin el diafragma que se ejecuta posteriormente una vez colocada (Fig. 9).

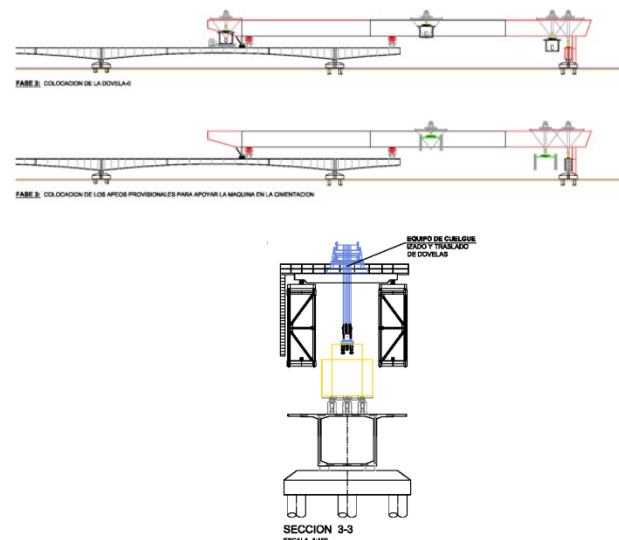


Figura 9 Secuencia de colocación de la dovela de arranque

- Una vez colocada esta se avanza la viga de lanzamiento y se apoya sobre los soportes definitivos para la colocación de dovelas apoyadas en las cimentaciones delanteras y en el voladizo trasero del tablero ya ejecutado (Fig. 10).

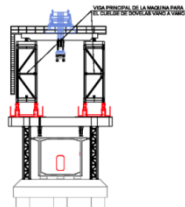
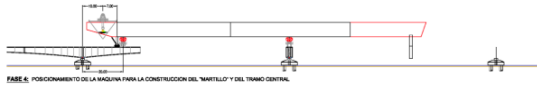
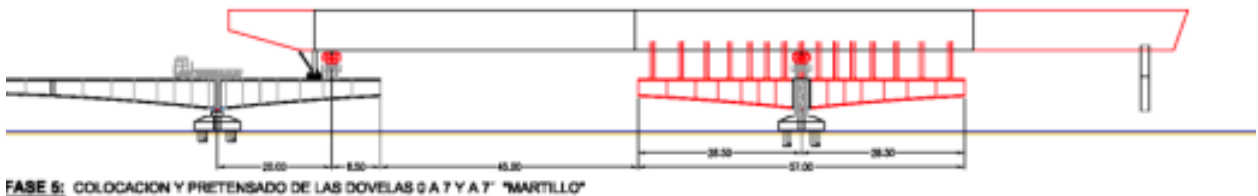


Figura 10

- Se procede entonces a la colocación del resto de dovelas con la secuencia descrita en dos fases:

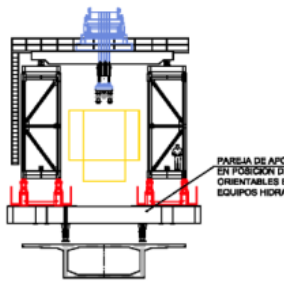


FASE 5: COLOCACION Y PRETENSADO DE LAS DOVELAS 9 A 7 Y A 7 "MARTILLO"



PRIMERA FASE DE PRETENSADO
ESCALA 1:200

Figura 11. Secuencia de la ejecución del primer tramo sobre apoyos



SECCION 4-4
ESCALA 1:150

Figura 12

- Una vez colocadas las dovelas y realizados los ajustes de geometría con la ayuda de dos juntas de 0.50 m realizadas in-situ en ambos extremos se coloca la segunda fase de cables de pretensado formada por dos grupos de cables: los situados en la losa inferior que cosen las dovelas centrales y una familia adicional de cables superiores en las secciones próximas a pilas que aportan la reserva de compresiones adicionales en estas secciones para resistir las acciones finales de la estructura (Fig. 13).

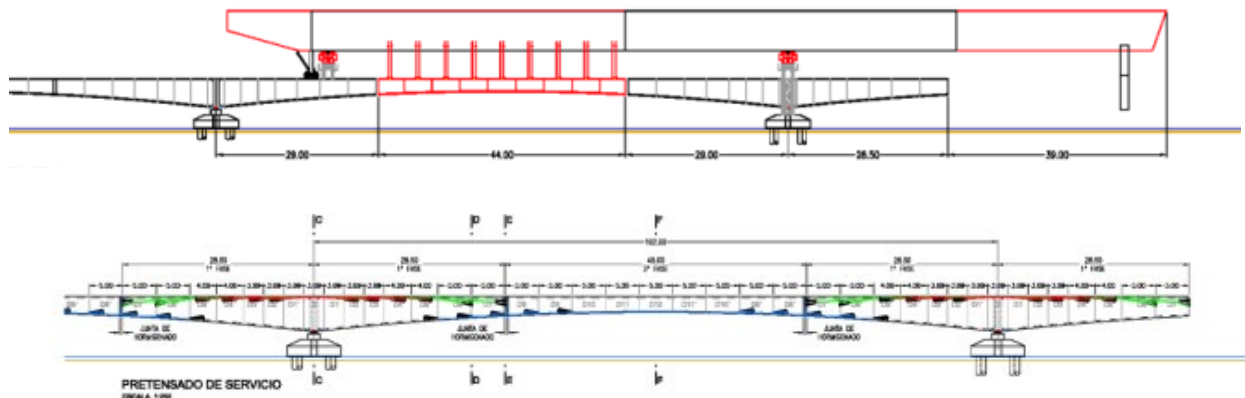


Figura 13. Secuencia de la ejecución del segundo tramo en la zona central

3.3 Ficha Técnica

- Propuesta para el Gran Viaducto y para el viaducto Gran Manglar en Cartagena de Indias. Colombia. 2014

3.4 Cuantías principales en tablero:

- Pretensado: 33 kg/m²
- Armadura pasiva: 125 kg/m²

4. Propuesta para el Puente “Green Field Six Lane extradosed Cable Bridge”

4.1 Descripción de la Obra

La segunda obra donde se estudió la aplicación del procedimiento constructivo fue un viaducto de enorme longitud, casi 10 km, sobre el río Ganges en la India para un concurso internacional actualmente suspendido. La modulación requerida imponía vanos de 123,5 m de luz a lo largo de toda la obra, que debían

realizarse con atirantamiento extradosado (Fig. 14).

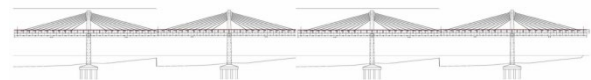


Figura 14. Alzado tipo

En este caso la gran anchura de la sección 29,40 m llevó a plantear la realización de la misma en dos fases, primero el núcleo central con dovelas prefabricadas conjugadas y encoladas, completándola en segunda fase con vuelos laterales de losas in-situ sobre puntales (Fig. 15).

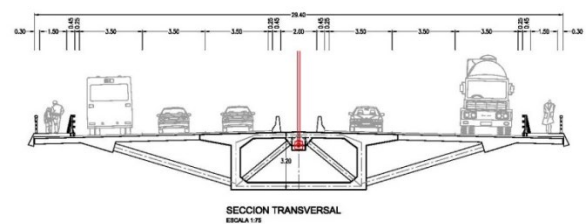


Figura 15. Sección tipo

Desde el punto de vista de la configuración longitudinal de la obra se ordenaba en 8 tramos de manera que en cada uno de ellos el tablero estaba empotrado en las dos pilas centrales para resistir las acciones longitudinales y se liberaba en el resto con apoyos deslizantes. Transversalmente se fijaba en todas las pilas.

Cada tramo desde la pila constaba de una dovela de arranque de 3,50 m y 12 dovelas de 5,00 m de longitud respectivamente. Las 9 dovelas centrales se atirantaban axialmente de una torre de 15 m de altura con una configuración de atirantamiento extradorado (Fig. 16).

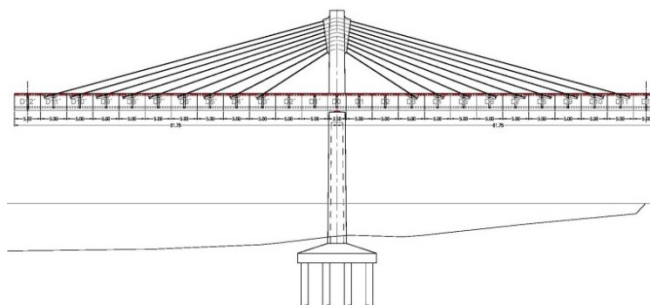


Figura 16. Alzado tipo de un tramo atirantado

Esta disposición permitía que el canto sea constante en todo el tablero pese a los 123.5 m de luz. De esta forma el molde para las dovelas es único en toda la obra.

4.2 Descripción del procedimiento de ejecución

Los dos objetivos seguidos para la construcción de este viaducto de casi 10 km de longitud era la de conseguir tajos lo más independientes posible para minimizar el camino crítico y conseguir la máxima prefabricación posible. Por ello se recurrió a un procedimiento similar a la desarrollada para la anterior obra realizada en dos fases, primero un voladizo simétrico desde pila y luego el tramo central, todo ello colgando las dovelas prefabricadas de la viga de lanzamiento.

El montaje se planteó vano a vano con viga lanzadora de dovelas, con el menor peso posible, por lo que se reducen al núcleo central de la sección transversal, de sólo 11 m de ancho. Una vez montada una viga continua con este núcleo central, se hormigonaban los vuelos sobre puntales prefabricados, para completar el ancho total de 29,40 m. Antes de hormigonar los vuelos se montaban las torres prefabricadas,

con sillas de paso para tirantes, tesados a continuación.

En esta obra se invirtieron los papeles del atirantamiento y del pretensado interior adherente. La gran ventaja es que así se facilitaba enormemente la ejecución de la torre y la instalación de los tirantes sin que esto ralentizara el ciclo ni interfiriera con el movimiento de la cimbra.

Para ello el peso del núcleo central de la dovela y las reacciones de la cimbra durante el lanzamiento se compensaban con pretensado interior convencional. Una vez montada la viga continua con el núcleo de las dovelas, el resto de peso propio (vuelos laterales sobre puntales prefabricados) y la carga muerta se soportaban con los tirantes.

4.3 Secuencia Detallada

- Lanzamiento de la cimbra metálica, cuelgue de dovelas y montaje de dovelas por grupos de 13 dovelas en el martillo de la pila frontal del frente de avance. Como orden de magnitud aproximado, el peso de las dovelas oscila en torno a unas 125 t de valor medio.

- Pretensado del grupo de dovelas de la T de la pila frontal del frente de avance (Fig. 17).

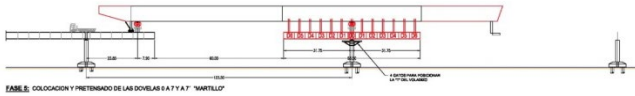


Figura 17. Ejecución del primer tramo sobre apoyos

- Cuelgue de dovelas y montaje de dovelas en grupos de 6 dovelas al cerrar el vano en curso (Fig. 18).
- Pretensado del grupo de dovelas al cerrar el vano en curso.

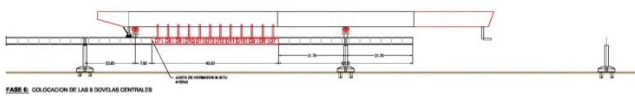


Figura 18. Ejecución de la zona central del vano

- Transporte y montaje con grúa de las torres de atirantamiento extradorsal, de 16 m de altura y 150 toneladas de peso (Fig. 19).

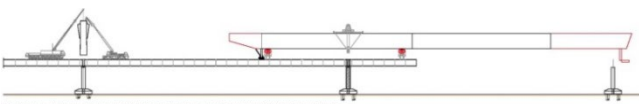


Figura 19. Avance de la viga de lanzamiento

- Atirantamiento del tablero (1ª fase de atirantamiento), constituido por el núcleo central (Fig. 20).

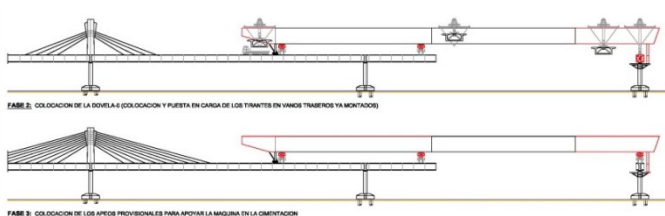


Figura 20. Ejecución de torres y atirantamiento

- Hormigonado de los vuelos laterales sobre puntales prefabricados y carros de ala.

- Atirantamiento del tablero (2ª fase de atirantamiento), constituido por la sección completa.
- Equipamientos: pavimento, aceras, barreras y barandillas.

4.4 Ficha Técnica

- Green Field Six Lane Extradosed Cable Bridge. NH30 Kachhi-Dargah/Bidupur. Distrito de Vaishali. India..2014
- Proyecto CFC-BERD / ISOLUX. (Javier Encinas, Pedro Vizeu).

4.5 Cuantías principales en tablero:

- Hormigón 0.68 m³/m²
- Pretensado: 33 kg/m²
- Tirantes: 7.1 kg/m²
- Armadura pasiva: 120 kg/m²

5. Conclusiones. Ventajas del Sistema

El sistema descrito para la construcción vano a vano con dovelas prefabricadas en dos fases se sale del procedimiento habitual de construcción vano a vano, pero se trata de la solución con la que es posible abordar luces hasta ahora reservadas a la construcción por voladizos. Aunque los dos proyectos dónde se estudió su aplicación práctica finalmente no fueron adjudicados al consorcio con el que colaboraba CFC, el estudio económico realizado mostró la competitividad de la solución. Las ventajas de esta solución se resumen en:

- Menor inversión en las vigas de lanzamiento como consecuencia de la menor luz a tener cargada en cada fase (reducción de acero estructural, reducción de longitud).
- Mejor aproximación de las leyes de esfuerzo durante la construcción a las de la estructura definitiva con la consiguiente

optimización la distribución y cuantía del pretensado.

- Mayor control geométrico durante el montaje en tanto permite por un lado corregir la alineación de la “T” inicial, y por otro, y por medio de las dos juntas de cierre, ajustar el montaje del resto de dovelas.

- La secuencia en dos fases no afecta al ciclo de forma importante. Según los estudios realizados se podrían alcanzar valores de un vano cada siete días para el viaducto de Cartagena (luz 102 m) y de dos vanos cada tres semanas para el puente extradosado de 125 m de luz.

El sistema descrito para la construcción vano a vano con dovelas prefabricadas en dos fases se sale del procedimiento habitual de construcción vano a vano, pero se trata de la solución con la que es posible abordar luces hasta ahora

- El sistema también es aplicable a una construcción in-situ con autocimbra con el objetivo de conseguir luces mayores a las habituales actualmente sin penalizar el diseño de la viga de lanzamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo y contribuciones recibidos de los servicios técnicos de OHL (Gonzalo García-Villalba, Mauricio Aguirre) y de ISOLUX CORSAN (Javier Cea) durante el desarrollo de los dos proyectos descritos en el artículo.

Referencias

[1] Javier Muñoz-Rojas, Celso Iglesias, Sara Fernández, Pedro Pacheco, André Resende, Hugo Coelho. “*An Innovative System of Precast Segmental Span-by-Span Construction for span lengths above 100 m*”. Proceedings of the International Conference on Multi-Span Large Bridges. 1-3 July 2015. Oporto. Portugal

[2] Pacheco, P. , Coelho, H. , Resende, A. , Soares I.. 2014. High productivity

in bridge construction – the OPS effect. *9th International Conference on Short and Medium Span Bridges, July 15-18 2014*. Calgary, Alberta, Canadá

[3] Manterola J, Muñoz-Rojas J, et al “*New Pumarejo bridge over the Magdalena River in Barranquilla. Colombia*”. Proceedings of the International Conference on Multi-Span Large Bridges. 1-3 July 2015. Oporto. Portugal

[4] Manterola J, Muñoz-Rojas J, et al “*Proyecto del nuevo puente Pumarejo sobre el río Magdalena en Barranquilla. Colombia*”. VIII Congreso ACHE. Junio 2020. Santander