

Construcción de vanos de 90m con cimbra autolanzable – un caso práctico

Construction of 90m span bridge decks with Movable Scaffolding Systems – a practical case

Pedro Pacheco^a, Diogo Carvalho^b, Hugo Coelho^b, Pedro Borges^b

^a Prof. Dr. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Porto, CEO BERD S.A.

^b Ingeniero de Estructuras, BERD S.A.

RESUMEN

Hasta la década pasada, la generalidad de los puentes con longitud de vano comprendida entre los 75 y 94 m se construía esencialmente con tablero metálico; por voladizos sucesivos (dovelas prefabricadas o hormigonadas in situ) o alternativamente mediante izaje del tablero de concreto integralmente prefabricado. En la década pasada, culminando un trabajo multidisciplinar de investigación y desarrollo, se empleó por la primera vez una cimbra autolanzable en la construcción de un puente con múltiples vanos de 90m. En este artículo se presenta este proyecto pionero, incluyendo una descripción concisa del proceso constructivo y su influencia en el diseño del puente.

ABSTRACT

Until the last decade, most bridges with spans ranging from 75 to 94 m were mainly erected with steel decks, by free cantilever method (precast or in-situ) or by precast full-segment elevation method. In several countries worldwide, steel decks were and are still systematically adopted. In the past decade, in the sequence of a long-term R&D multidisciplinary project, a Movable Scaffolding System was applied for the first time for construction of a multi-span viaduct with 90m long spans. This paper describes this pioneer project, focusing the bridge construction method and its impact in the overall bridge design.

PALABRAS CLAVE: Construcción de puentes, cimbra autolanzable, grandes luces

KEYWORDS: Bridge construction, movable scaffolding system, large spans

1. Introducción

La optimización del dimensionamiento de los tableros de puentes y viaductos presupone la elección de un método constructivo adecuado y la integración del proceso constructivo en la concepción y dimensionamiento del puente. Hasta la década pasada, la generalidad de los puentes con longitud de vano comprendida entre los 75 y los 94 m se construía esencialmente con tablero metálico; por voladizos sucesivos (dovelas prefabricadas o

hormigonadas in situ) o alternativamente mediante izaje del tablero de concreto integralmente prefabricado.

En algunas publicaciones anteriores [1], se concluyó que la construcción de tableros de puentes con hormigonado in situ de vanos completos (vano a vano) es una metodología constructiva que permite una reducción muy expresiva de los momentos flectores en fase constructiva (en comparación con la

metodología alternativa de construcción por voladizos sucesivos). Adicionalmente, se enumeran otras ventajas de la construcción vano a vano como sean la simplificación del proceso de control geométrico y la disminución de la relevancia de los efectos de la fluencia, entre otros.

Hasta el 2013, el estado de arte de este método constructivo estaba limitado a vanos máximos de 78m o incluso menos [2]. Uno de los aspectos críticos que había que superar para romper este límite estaba relacionado con el peso de las cimbras autolanzables de gran vano cuyo valor excesivo se presentaba como condicionante para el dimensionamiento del tablero, conduciendo a la obtención de soluciones poco económicas. Este ha sido el caso, por ejemplo, del puente sobre el valle Ahr, construido en Alemania en los años 70, con múltiples vanos con 78m de luz y un vano singular con 106m de luz. Para su construcción se ha empleado una cimbra autolanzable cuyo peso rondaba las 2000 toneladas [3][4]. Aunque el desafío técnico tenga sido claramente superado en esta aplicación [5], la verdad es que en los 40 años que se siguieron, la construcción de vanos múltiples con esta magnitud no ha sido replicada. Esto se ha debido, muy probablemente, al peso del equipo constructivo – posiblemente, la cimbra autolanzable ha sido condicionante para el dimensionamiento del puente, resultando en costes de materiales expresivos. Unos años después del término de la construcción, ha sido publicado un estudio en el cual se presentaron los indicadores económicos del proyecto, concluyendo que la utilización de una cimbra autolanzable no ha sido económicamente eficiente [3].

En el inicio del siglo, los autores empezaron un proyecto de investigación y desarrollo de largo plazo en el cual se analizó el potencial incremento de la eficiencia estructural de las cimbras autolanzables mediante incorporación de un sistema de pretensado activo (OPS) [6][7]. Como consecuencia directa del aumento de la

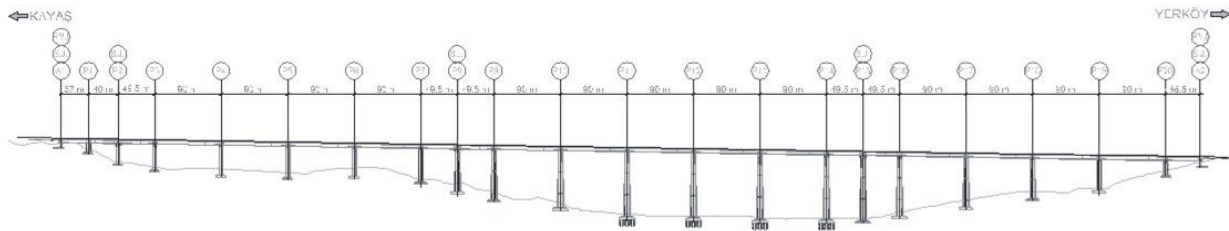
eficiencia estructural, se comprobó la posibilidad de reducir el peso de y de aumentar el alcance de las cimbras autolanzables.

En el mismo período, se publicaron estudios sobre estadísticas de construcción y gastos de materiales asociados a distintos métodos constructivos [1][8], en los cuales se concluye que el método de construcción de tableros vano a vano con hormigonado in situ puede resultar en una reducción significativa de las cantidades de los materiales del puente, en comparación con otros métodos constructivos. Esta tendencia aumenta con incremento del vano, siendo destacada la posibilidad de una optimización relevante para vanos con luz superior a 70 m.

Con esta premisa, en 2011 los autores iniciaron el estudio de un concepto de cimbra autolanzable (M1) para alcanzar luces comprendidas entre 70 y 100m [9]. El M1 ha sido desarrollado entre 2011 y 2015, periodo en el cual se realizó la evaluación numérica y experimental de la solución [10][11]. En el mismo año del 2015, surgió la oportunidad de aplicar la cimbra M1 a la construcción de 4 viaductos de la línea ferroviaria de alta velocidad en Turquía, con vanos de 90 m de longitud. Los estudios preliminares indicaban que el cambio del método constructivo - de la construcción por voladizos sucesivos (inicialmente prevista) para la construcción vano a vano - y las consecuentes modificaciones en el proyecto del puente, podrían posiblemente conducir a un ahorro de materiales muy expresivo (la previsión inicial apuntaba para un ahorro del orden de los 35%). La modificación del proyecto sería finalmente aprobada. La cimbra autolanzable desarrollada para esta aplicación ha sido designada como M1-90-S (en el presente artículo se utilizará esta designación por facilidad de redacción y lectura). El primero viaducto construido con el M1-90-S ha sido concluido en el 2018. Además del ahorro previsto en las cantidades de materiales del viaducto, la implementación ha sido bien sucedida desde el punto de vista de seguridad y productividad.

2. Caso práctico – 4 viaductos de la línea ferroviaria de alta velocidad (HSR) en Turquía

inseridos en la ligación Ankara-Sivas de la línea HSR de Turquía. La extensión total de los viaductos es de 6.3km y el área de construcción es ligeramente superior a 79.000 m². En la Figura 1 se representa uno de los viaductos. Los 4 viaductos habían sido inicialmente diseñados para construcción por voladizos sucesivos – hormigonado in situ con carros de avance.



En la fase de concurso, se evaluó una solución alternativa con construcción vano a vano utilizando cimbra autolanzable. Como condición del concurso, ha sido obligatorio mantener el planteamiento de vanos inicialmente previsto. En la Tabla 1 se presenta la disposición de vanos de los 4 viaductos.

Viaducto	Vanos	Equipo
V7	6×42m	M55-S
	2×(49.5m+3×90m+49.5m)	M1-90-S
	18×45m	M55-S
V9	15×45m	M55-S
	2×(49.5m+3×90m+49.5m)	M1-90-S
	8×45m	M55-S
	50m	M55-S
	(46.5m+4×90m+49.5m)+ (49.5m+5×90m+49.5m)+ (49.5m+4×90m+49.5m)+ (40m+37m)	M1-90-S
V15	(3×40m)+ (49.5m+4×90m+49.5m)+ 2×(49.5m+3×90m+49.5m)+ (3×40m)	M1-90-S

Mientras que el M55-S es una cimbra autolanzable convencional, con dimensiones y pesos standard, no había realizaciones de referencia que pudiesen comprobar pesos, acciones e interfaces del M1-90-S.

Como tal, ha sido necesario un desarrollo conjunto del proyecto de los viaductos y de la cimbra autolanzable, preestableciéndose un peso límite de 1500 toneladas para el M1-90-S para que el equipo no resultase condicionante para el diseño del tablero [10]. Los estudios seguidamente presentados no constituyen los elementos oficiales utilizados en la construcción, pero sí los elementos del estudio previo incluidos en el proceso concursal y que estuvieron en la base de la elección del proceso constructivo.

La sección de tablero alternativa ha sido diseñada estableciendo su altura en 5.0 m (lo que corresponde a $L/18$, siendo L la luz máxima). En las Figuras 2 y 4 es posible observar la

significativa reducción de altura del tablero en sección de pila, en comparación con el proyecto original (5.0 m versus 8.0 m).

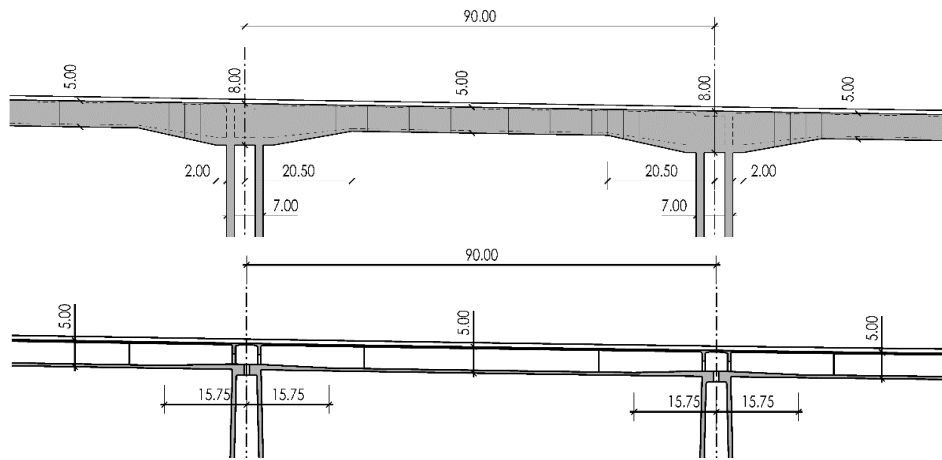


Figura 2. Alzado de un vano tipo de 90m – solución original de voladizos (en cima); alternativa vano a vano (abajo)

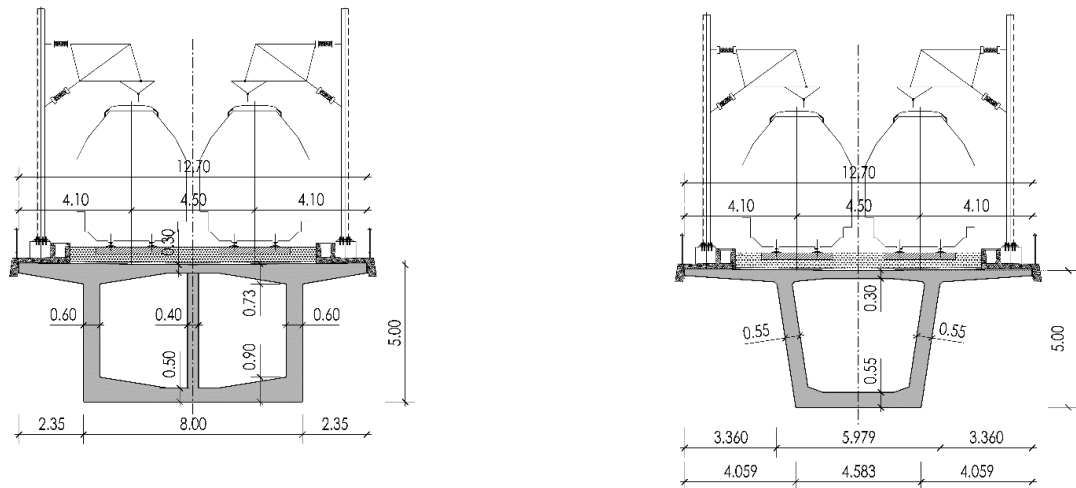


Figura 3. Sección transversal en medio vano– solución original (izquierda); solución alternativa (derecha)

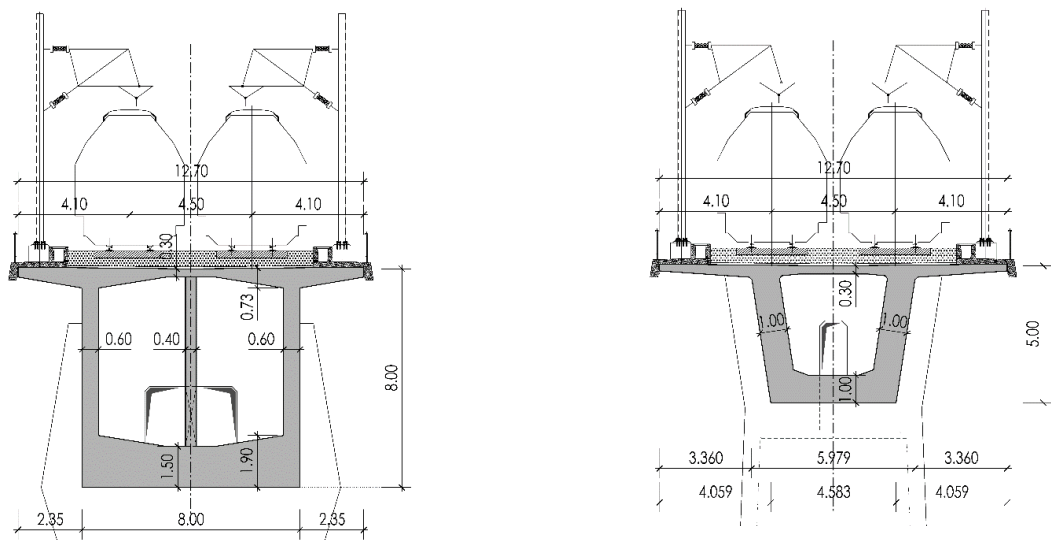


Figura 4. Sección transversal sobre la pila - solución original (izquierda); solución alternativa (derecha)

En la sección de medio vano – ver Figura 3 – la altura del tablero es la misma en las 2 soluciones, pero en la sección de pila – ver Figura 4 – más que la reducción de altura, en la solución alternativa se puede observar una reducción de área muy significativa. En la solución alternativa, la sección ha sido diseñada con 2 almas (versus 3 almas de la solución original).

En seguida se enumeran los factores con mayor contribución para la reducción de gastos con material de la solución alternativa con respecto a la solución original:

- Factor 1 – Es un dato documentado que las tensiones producidas en el proceso constructivo de un tablero construido por voladizos pueden superar significativamente las tensiones del mismo en la fase de servicio [12]. Este factor indicia una oportunidad para reducción de materiales simplemente con el cambio de método constructivo [1].

- Factor 2 – Relacionado con el Factor 1, es expectable una reducción del volumen de hormigón en los diafragmas y los *blisters* (sobre todo debido a la reducción del número de anclajes de pretensado y debido a la reducción de altura de la sección sobre pila).

- Factor 3 – Los factores 1 y 2 son referentes a la reducción del volumen de hormigón de la sección transversal. No obstante, pueden tener un impacto muy importante en los gastos de materiales de pilas y cimentaciones. La reducción de la masa del tablero tiene como consecuencia directa la reducción de la acción sísmica sobre pilas y cimentaciones.

- Factor 4 – Los factores 1, 2 y 3 contribuyen para la reducción de la rigidez de las pilas y cimentaciones y, dependiendo de la reducción de masa, contribuyen tendencialmente para la reducción de la frecuencia de los modos de vibración horizontales (transversal y longitudinal) – lo que potencia una disminución aún más significativa de la acción sísmica.

Cumplido el estudio previo de la solución alternativa, la previsión de ahorro de materiales en los viaductos – superior al 35% - ha sido presentada a las partes interesadas que han decidido tomar la decisión de alterar el método constructivo – los viaductos V7, V9, V10 y V15 serían construidos con cimbra autolanzable.

3. La cimbra autolanzable M1-90-S

3.1 *Desafíos del proyecto*

El diseño del M1-90-S ha sido pautado por algunos desafíos técnicos. Se enumeran en seguida algunos de los más relevantes:

- Efecto de escala. Necesidad de identificación de fenómenos de escala que pudiesen justificar un abordaje diferenciado en el análisis estructural.

- Limitación de peso del equipo. Para garantizar que el equipo no sería condicionante para el dimensionamiento del tablero, se impuso como límite un peso máximo desplazable de 1500 toneladas.

- Deflexión máxima. Se definió un límite de $L/2000$ para la deformación de la viga principal de la autocimbra. Planteando-se una construcción en 2 fases del tablero, este requisito de rigidez salvaguardaba el efecto colaborante del tablero de primera fase durante el hormigonado de la segunda fase.

- Rendimiento del equipo. Se definió como objetivo un ciclo de trabajo de 14 días [45m/semana] de manera a superar el rendimiento de 4 pares de carros de avance [30m/semana], considerando que cada carro de avance produciría un segmento de 3.8 m por semana (datos del constructor encuadrados con la práctica local).

- Estabilidad del equipo constructivo en frente a acciones horizontales. El área expuesta a la acción del viento, la sismicidad de la zona y el tiempo de movilización del equipo recomendaba un estudio detallado de las fuerzas

horizontales y una concepción criteriosa de los apoyos del equipo. Los coeficientes de fuerza para la celosía y para el encofrado han sido determinados en un primer momento mediante aplicación de las normativas vigentes de referencia (EN1991-1-4, IAP-11) con las debidas adaptaciones. En una fase posterior, se hizo una validación de los coeficientes de fuerza mediante análisis con un modelo CFD, complementado por ensayos en túnel de viento (Figura 5).



Figura 5. Modelo reducido utilizado en los testes en túnel de viento

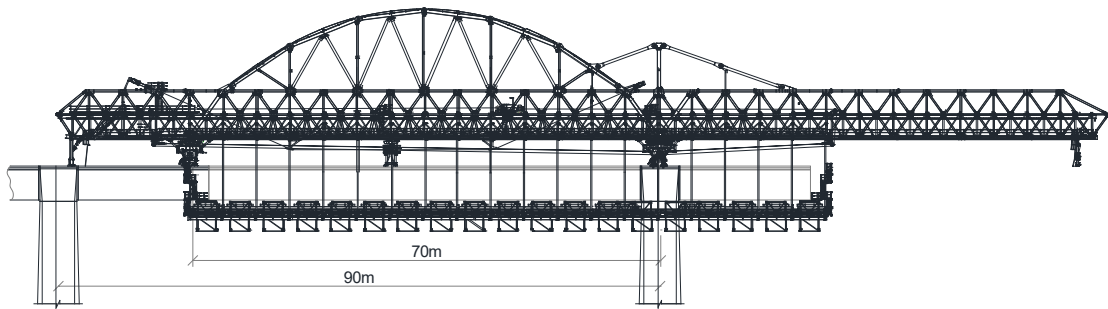


Figura 6. Alzado de la cimbra autolanzable M1-90-S

Tareas	Día 1	Día 2	Día 3		Día 4	Día 5	Día 6	Día 7	Día 8	Día 9	Día 10		Día 11	Día 12	Día 13	Día 14
			Día	Noche							Día	Noche				
Pretensado del tablero	■															
Abertura del Encofrado y Avance	■	■														
Cierre del Enfrado Exterior		■	■	■												
Colocación de acero (almas & losa inferior)	■	■	■	■	■	■										
Instalación de vainas y cables de pretensado					■	■										
Colocación del Encofrado Interior						■	■									
Hormigonado (primera fase)									■	■						
Desmontaje del Encofrado Interior										■	■					
Montaje del Encofrado de Losa Superior										■	■	■	■			
Colocación de acero de la losa superior										■	■	■	■	■	■	
Instalación de cables de pretensado													■	■		
Hormigonado (segunda fase)															■	■
Cura del Hormigón																■

Figura 7 Ciclo Tipo de la construcción de un vano de 90m

Los componentes del M1-90-S son muy semejantes a los de una cimbra del mismo tipo de dimensiones medianas. En seguida se hace

3.1 Descripción de la solución

El M1-90-S es una cimbra autolanzable concebida específicamente para el hormigonado in situ de tableros de puentes y viaductos de gran vano (90 m). La estructura principal del M1-90-S es una celosía de acero de altura variable, con un cordón superior arqueado (tipo *bow-string*) cuyas deformaciones son controladas activamente por el sistema OPS en fase de hormigonado (ver Figura 6). El hormigonado de la sección transversal se divide en 2 fases: en la primera fase se hormigona la losa inferior y las almas de la sección transversal; en la segunda fase se hormigona la losa superior. En la Figura 7 se representa el ciclo tipo idealizado.

una caracterización muy sumaria de los componentes principales (Viga Principal, Estructuras Transversales, Pórticos de Apoyo).

Las Estructuras Transversales se suspenden de la Viga Principal e soportan los paneles de encofrado exterior.

En la fase de hormigonado de los vanos de 90m, la Viga Principal está apoyada adelante en el Pórtico de Pila (Figura 8) – colocado sobre un “dovela cero” construida con la pila - y atrás en un Pórtico de Hormigonado Trasero que apoya directamente sobre el tablero previamente construido – la distancia longitudinal entre los 2 apoyos es de 70m. Para el hormigonado de los vanos menores o iguales a 49.5m se añade un tercer apoyo para reducir tensiones y deformaciones producidas en el tablero por el proceso constructivo. En esta fase, el encofrado está colgado de la Viga Principal por barras roscadas de alta resistencia.

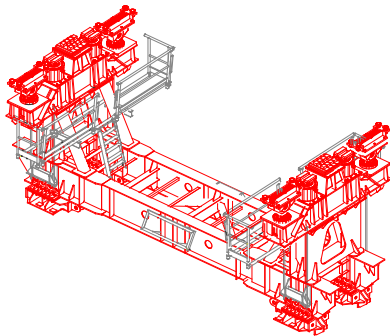


Figura 8. Representación 3D del Pórtico de Pila del M1-90-S

Después de aplicado el pretensado en el tablero, se hace el movimiento de descenso de la cimbra autolanzable actuando gatos hidráulicos ubicados en los pórticos. Con el descenso, se descarga la Viga Principal del peso de hormigón del vano recién hecho.

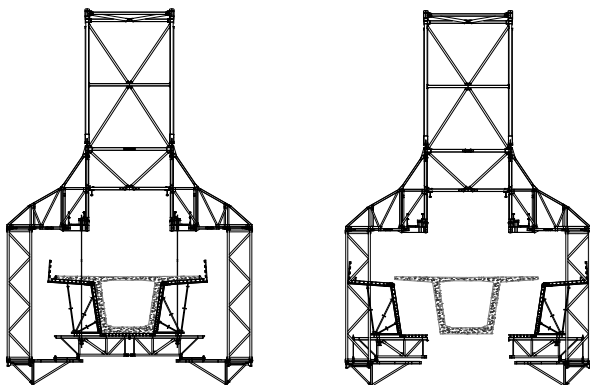


Figura 9. Sección transversal del M1-90-S: configuración de hormigonado (5zquierda) y configuración de avance (derecha)

Antes del avance, se desmontan las barras de suspensión del encofrado y se separan los paneles de encofrado con un movimiento de ripado transversal para garantizar que no ocurrirán colisiones con la pila durante el avance (ver Figura 9).

Para el avance de la cimbra, se añade un tercer apoyo – el Pórtico de Avance. Los 3 apoyos son movidos y relocalizados durante el avance de manera a limitar los esfuerzos en la cimbra autolanzable y las cargas transmitidas al tablero. Los Pórticos son elevados y trasladados con los medios propios de la cimbra autolanzable – en este aspecto, el M1-90-S es totalmente autónomo.

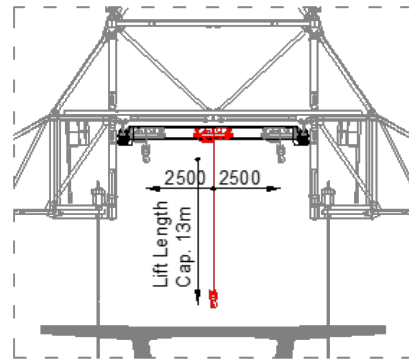


Figura 10. Representación de los puentes grúas del M1-90-S



Figura 11. Transporte de un módulo de acero de refuerzo con los puentes grúas del M1-90-S

Un aspecto particular con una gran influencia en la productividad es la integración de 2 puentes grúas (Figuras 10 y 11).

Además de auxiliar en las operaciones de elevación y traslado de los pórticos, los puentes grúas con una capacidad de elevación conjunta de 30 toneladas permiten el montaje de módulos de acero de refuerzo prefabricados de gran dimensión (hasta 12 m de longitud), lo que permite una gran industrialización del proceso. Con efecto, más del 80% del acero de refuerzo ha sido pre- montado en el parque.

4. Datos y hechos

En las tablas siguientes se hace un resumen de los números y características más relevantes de este caso práctico. En la Tabla 2 se presenta el consumo final de materiales en los 4 viaductos y se hace una comparación con la solución inicialmente prevista [13]. A su vez, en la Tabla 3 se hace un resumen de las características técnicas más relevantes de la cimbra autolanzable M1-90-S. En la Figura 12 se presenta una imagen del M1-90-S en operación.



Figura 12. Imagen del M1-90-S en fase operación

Tabla 2. Optimización del consumo de materiales – Línea HSR Ankara – Sivas – viaductos V7, V9, V10 y V15 [13]

Elemento Estructural	Solución original (voladizos)	Solucion ejecutada (vano a vano)	Optimización
Cimentaciones			
Hormigón (macizos y pilotes)	332976 m ³	146546 m ³	56%
pilotes	34714 m ³	27915 m ³	20%
macizos	298262 m ³	118631 m ³	60%
Acero (macizos y pilotes)	48250 ton	25417 ton	47%
pilotes	8284 ton	5018 ton	39%
macizos	39966 ton	20939 ton	49%
Pilas			
Hormigón	126476 m ³	67857 m ³	46%
Acero	35115 ton	17637 ton	50%
Tablero			
Hormigón	117300 m ³	81474 m ³	29%
Acero	33076 ton	25202 ton	24%
Acero de pretensado	4617 ton	4288 ton	7%
Optimización global ponderada	[13]		39%

Tabla 3. Características Técnicas del M1-90-S.

Variable	Caracterización
Tipo	Cimbra superior
Vano máximo	90 m
Capacidad (peso medio del tablero)	35 ton/m
Deformación de la viga en medio-vano (hormigonado)	28 mm
Máxima inclinación longitudinal	+/- 5%
Maxima inclinación transversal	+/- 4%
Radio mínimo en planta	2500 m
Velocidad de viento admisible en hormigonado (rajada)	60 km/h
Velocidad de viento admisible en avance (rajada)	60 km/h
Sistema de locomoción	Cabrestantes eléctricos (tipo <i>capstan</i>)
Sistema de ripado transversal	Gatos hidráulicos
Sistema de elevación	Gatos hidráulicos
Sistema de abertura del encofrado	Husillo mecánico (<i>leadscrew</i>)
Peso en avance ("masa" viajante)	1300 ton
Ciclo corriente	14 días
Mejor ciclo registrado	12 días

5. Conclusiones

Cada método constructivo tiene sus méritos y su campo de aplicación preferencial. El objetivo de este artículo no es hacer una comparación entre métodos constructivos, pero si presentar y divulgar un caso práctico en el cual se ha incrementando el campo de aplicación de un método constructivo con ventajas muy significativas.

El caso presentado demuestra que, en determinadas circunstancias, el método constructivo de tableros de puentes con cimbra autolanzable puede ser una opción eficiente para puentes y viaductos con múltiples vanos de 90 m. Aun que el artículo no lo discuta, es posible

que la luz máxima para esta metodología constructiva se pueda aproximar de los 100 m en un futuro próximo.

El facto es que, en el caso práctico presentado, el ahorro con gastos de materiales de los viaductos rondó los 39 % y el cambio del método constructivo ha sido el factor determinante para alcanzar este resultado.

Además del impacto en los materiales, el caso práctico demuestra que la metodología constructiva vano a vano es una alternativa segura y con un potencial de productividad considerable.

Agradecimientos

Los autores desean enderezar un sincero agradecimiento a los proyectistas, constructor y contratista principal que participaron en el proyecto, en particular a STRENG, KMG, KAPPA, DOGUS y, en especial, a TCDD que ha tomado la decisión de avanzar con la alteración de proceso constructivo, contribuyendo de esa forma para un importante avance en el estado de arte de los métodos de construcción de puentes.

Los autores desean agradecer también a los consultores especializados que han dado un soporte esencial para este proyecto, nombradamente el Prof. Alp Caner y el Prof. Murat Dicleli, por parte de la compañía YUKSEL PROJE.

Referencias

- [1] M. Morim, Study on an In Situ Erected Prestressed Concrete Deck with 90m Span, master's thesis, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008. (in Portuguese)
- [2] M. Rosignoli, Bridge Construction Equipment, ICE Publishing, London, United Kingdom, 2013.

- [3] P. Matt, Status of Segmental Bridge Construction in Europe, PCI Journal V.28 No.3 (1983) 104-125.
- [4] P. Misch, K. Stinlat, Spannbeton im Strassenbrückenbau [Highway Concrete Deck], beton und Stahlbeton, V.77, 1978.
- [5] L. Majewski, Das Vorschubgerüst für die Ahrthalbrücke Der Bauingenieur [The Movable Scaffolding of the Ahr Valley Bridge], Springer-Verlag V.51 (1976) 25-28 (in German).
- [6] P. Pacheco, A. Fonseca, Organic Prestressing, ASCE Journal of Structural Engineering (March 2001) 400-405 (March 2001).
- [7] P. Pacheco, A. Guerra, P. Borges, H. Coelho, A scaffolding system strengthened with organic prestressing – the first of a new generation of structures, Structural Engineering International, Journal of IABSE 17(4) (2007) 314-321.
- [8] D. Konstantinidis, A. Maravas, Egnatia Motorway concrete bridges statistics, Proc. 31st ASECAP Study and Information Days, Portoroz, Slovenia, 2003.
- [9] P. Pacheco, H. Coelho, P. Borges, A. Guerra, Technical Challenges of Large Movable Scaffolding Systems, Structural Engineering International IABSE 21 (4) (2011) 450-455.
- [10] P. Pacheco, Multi-span Large Decks – the Organic Prestressing Impact, Proc. Multi-Span Large Bridges, CRC Press, Porto, 103-124, 2015.
- [11] A. Resende, H. Coelho, P. Pacheco, Preliminary assessment of wind actions in large span MSS, Proc. Multi-span Large Bridges, CRC Press, Porto, 655-662, 2015.
- [12] G. Lucko, J. Garca, Constructability Considerations for Balanced Cantilever Construction, ASCE Journal of Structural Design and Construction Vol. 8 Issue 1 (2003) 47.
- [13] P. Pacheco, P. Borges, H. Coelho H. (2018), Bridge engineering optimization opportunities through integrated solutions: design – constructive method, Proc. Istanbul Bridge Conference, Istanbul, 2018.