

Puente ferroviario sobre el Río Grande en Brasil

Railway bridge over Rio Grande in Brazil

Francisco Millanes Mato^a, Daniel Martínez Agromayor^b, Pablo Solera Pérez^c, Fu Lei Zhou^d, Pedro Fradique Morujão^e

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Presidente. IDEAM, S.A.

^bMáster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de Departamento. IDEAM, S.A.

^c Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Proyectos. IDEAM, S.A.

^d Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero Proyectista. IDEAM, S.A.

^e Máster Ingeniero Civil. Gerente. Adão da Fonseca Eng.Consultores

RESUMEN

El Viaducto sobre el Río Grande recientemente construido es un puente de ferrocarril cuyo tramo principal consiste en un puente mixto de 250 m de longitud total con un vano central de 125 m y vanos laterales de 62.5 m. La mayor singularidad del proyecto consiste en salvar 125m de luz principal, siendo un puente de ferrocarril, con una solución de tablero mixto. Entre otros aspectos relevantes del viaducto destacan las pilas empotradas en el tablero y el proceso constructivo mediante empuje.

ABSTRACT

Rio Grande is a recently built 250 m long steel-concrete composite railway bridge, comprising a 125 m long main span, and two lateral 62.5 m long lateral spans each. The most outstanding feature is the 125 m main span, a rather uncommon length for a steel-concrete railway bridge. Some other special aspects are the monolithic deck-pier connection, as well as the launched erection process.

PALABRAS CLAVE: Puente mixto, doble acción mixta, puente ferroviario, empuje.

KEYWORDS: Steel composite bridge, double composite work, railway bridge, launching.

1. Introducción

El Viaducto sobre el Río Grande se enmarca dentro de la actuación de la Ferrovia Norte Sul-Extensão Sul (Brasil), más concretamente en el tramo Belém (PA)- Panorama (SP), subtramo Ouro Verde de Gomas (GO)- Estrella do Este (SP). El puente cruza el Río Grande, y se trata de un puente de ferrocarril y consta de 4 tramos: Tramo I (70 m) + Tramo II (250 m) + Tramo III (70 m) + Tramo IV (105 m).

Los tramos I, III y IV se resuelven con tableros de vigas doble T y luces de 35m. El

tramo II (250m) tiene una solución de doble acción mixta con 125m de luz principal y vanos laterales de 62.5 m. El presente artículo se centra en dicho tramo II.

El proyecto fue realizado por Ideam S.A. a través de empresa ADEAM perteneciente a Adão da Fonseca Eng.Consultores, RDA e Ideam S.A. La propietaria de la obra fue TIISA. El proyecto se realizó en 2014, la obra se empezó dicho año. No obstante, debido a la situación económica en Brasil la obra ha sufrido

varios parones, estando a fecha de hoy prácticamente finalizada. El vano principal viene determinado por el gálibo necesario para la circulación de tráfico fluvial (95m). Este gálibo, unido a los cartabones (15 m a cada lado del eje de las pilas centrales) los cuales reducen la altura libre y con ello el gálibo horizontal, determinan la luz principal de 125 m entre ejes de pilas (figura 1).

La singularidad de la obra reside en salvar los 125.00 m de luz principal con una solución de doble acción mixta, siendo un puente de ferrocarril. Para salvar la citada luz, se utiliza

una solución de cartabones de hormigón sobre los cuales se conecta la estructura metálica. Esta solución ha sido empleada tanto por Ideam, como por otros proyectistas (MC-2), para puentes de carretera y puntualmente ferrocarril. En este caso, adicionalmente, gracias a esta solución de cartabones, se ha podido salvar los 125m de luz, empleando a su vez un proceso constructivo empujado. A continuación se incluye una tabla con un resumen de soluciones de puentes similares.

Tabla 1. Resumen realizaciones similares

Viaducto	Año	Luz principal	Empresa	Tipología
Puente del Arenal (Córdoba)	1993	110,00 m	MC-2	Puente de carretera
Puente de Retamar sobre el Río Guadarrama [1]	1998	70,00 m	IDEAM S.A	Puente de carretera
Puente sobre el río Cangas (Asturias) [2]	2005	80,00 m	IDEAM S.A	Puente de carretera
Puente sobre el río Nalón (Asturias) [3]	2007	110,00 m	IDEAM S.A.	Puente de carretera
Viaducto de Alta Velocidad sobre la A-31 en Albacete	2011	76,00 m	MC-2	Puente de ferrocarril
Viaducto sobre el Río Tajo en Talavera de la Reina. (Toledo) [4]	2015	114,00 m	IDEAM S.A.	Puente de carretera
Puente ferroviario sobre el Río Grande en Brasil	2020	125,00 m	IDEAM S.A.	Puente de ferrocarril

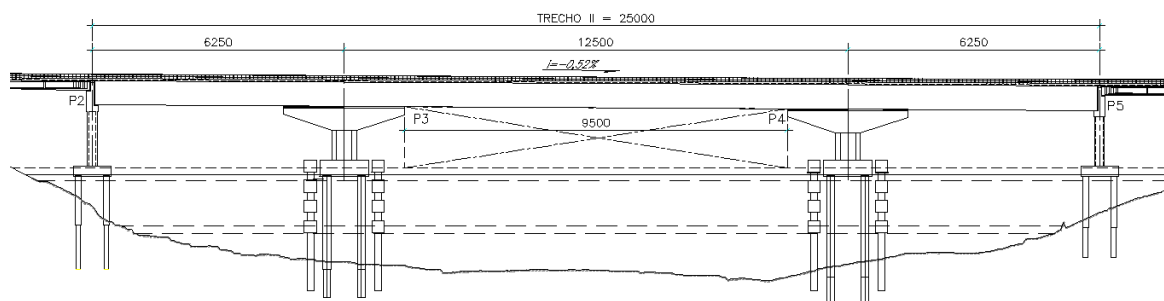


Figura 1. Alzado general del tramo principal del puente.

2. Descripción de la estructura

El puente se proyecta para dar servicio a una única vía de ferrocarril, por lo que la anchura del tablero es pequeña, concretamente la anchura de la losa estructural estricta es de 6.0 m, a la que se añaden 0.45 m a cada lado para dar cabida a unos refugios espaciados cada 10 m.

El tramo principal del viaducto está formado por un tablero mixto empotrado a una subestructura de morfología singular que se describe más adelante.

El tablero tiene dos partes claramente diferenciadas en lo que a su sección se refiere: la zona en la que el tablero se empotra al cartabón de hormigón de canto variable, y el resto de la longitud del puente de canto constante. En la zona de canto constante correspondiente a secciones sometidas a flexión positiva en servicio, la sección es la clásica sección bijácena con vigas metálicas doble T, conectada mediante pernos tipo “stud” a la losa de hormigón. La particularidad que presenta frente a los casos más habituales es que la relación entre el ancho de la losa y el canto de la viga es muy baja, lo que da lugar a que la sección transversal de la losa tenga un espesor mayor del habitual y del estricto para resistir las flexiones transversales. En concreto, la losa tiene un espesor de 64 cm sobre las platabandas superiores de las vigas metálicas y 40 cm en el eje del tablero. De este modo la losa tiene área suficiente para resistir la compresión debida a la flexión y la fibra neutra para flexión positiva sube de modo que mejora la compacidad de las secciones. El canto de la bijácena metálica queda en 5.36 m, siendo el canto total de 6.0 m por tanto, lo que supone una esbeltez en el vano principal de $L/20.83$. La sección bijácena tiene doble célula inferior para mejorar la resistencia a paxth loading durante el empuje del tablero, del que se hablará más adelante, y célula simple superior mejorando el pandeo

transversal del ala comprimida en las fases de sección metálica a positivos, además de reducir la altura del alma comprimida mejorando su comportamiento frente a la abolladura (figura 2).

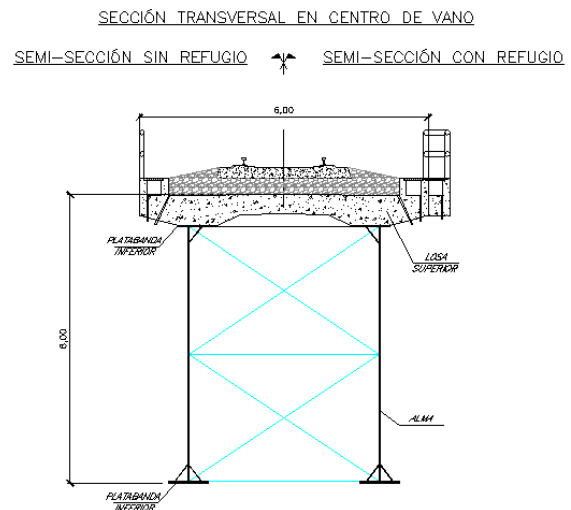


Figura 2. Sección transversal por centro de vano

Las vigas doble T metálicas se encuentran separadas 4.0 m entre sí. La unión entre ambas se realiza mediante la losa superiormente, y mediante una losa inferior u hormigón de fondo en las zonas próximas al cartabón. Además, se disponen dos planos de celosías horizontales, una a media altura de la sección y otra a la altura de las platabandas inferiores. La necesidad de la celosía horizontal intermedia viene condicionada por la relación canto/ancho de la bijácena ya comentada, que requiere rigidizar en horizontal a media altura para que las celosías transversales tengan sus perfiles con ángulos y longitudes que resulten efectivas (figuras 3 y 4).



Figura 3. Vista del interior del cajón

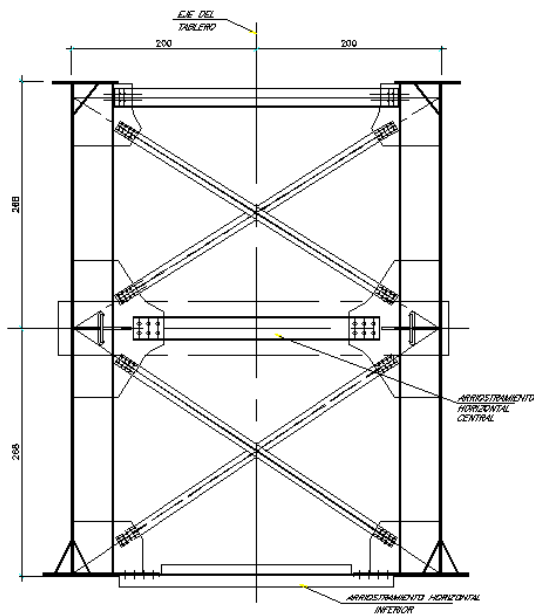


Figura 4. Esquema de celosías de la sección metálica.

Las uniones entre celosías se realizan atornilladas. Dado el gran canto de la viga metálica, no se puede transportar a obra la sección bijácena, sino que se transportan dovelas con una sola jácena y se ensambla en la obra la sección bijácena completa. La elección de unión atornillada frente a soldada reduce los tiempos de ejecución y garantiza mayor control de calidad.

En las zonas donde la sección está sometido a flexiones negativas más allá de la zona de cartabón que describiremos a continuación, se dispone de una losa inferior de hormigón entre vigas de 60 cm de espesor, materializando así la doble acción mixta.

La sección bijácena descrita se une a los cartabones de hormigón de canto variable y sección en U que a su vez se empotran en las pilas centrales. La unión de la sección metálica al cartabón se realiza mediante soldadura de la platabanda inferior a una chapa metálica embebida en el hormigón de la sección de hormigón del cartabón (figura 5).

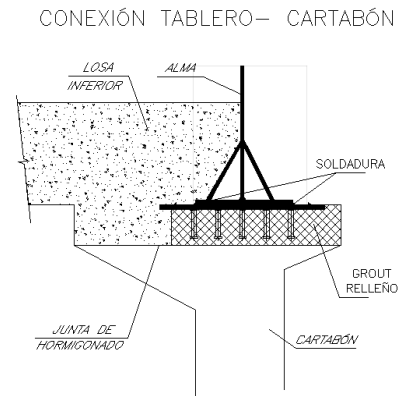


Figura 5. Detalle de unión bijácena metálica-cartabón de hormigón.

Una vez unida la viga metálica al cartabón de hormigón trabaja la sección completa mixta con un canto máximo de 12 m (6 m de losa + viga metálica y 6 m de cartabón de hormigón).

Las pilas centrales están empotradas al cartabón. Éstas están formadas por dos tabiques de canto longitudinal de 1.2 m separados 5 m entre ejes, la longitud transversal de dichos tabiques es variable. Esta tipología de pila flexibiliza frente a las deformaciones impuestas del tablero, reduciendo los esfuerzos generados (figuras 6 y 7)

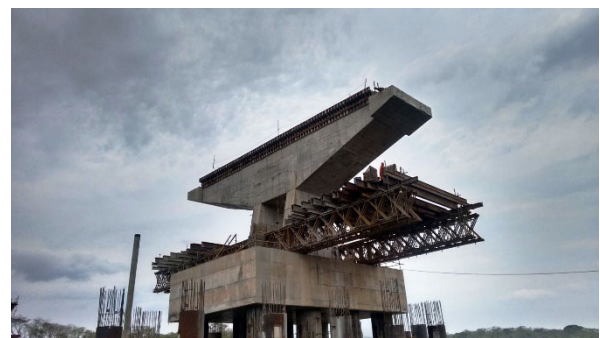


Figura 6. Pila central terminada



Figura 7. Pila central durante la construcción

Las cimentaciones de las pilas centrales son pilotadas, teniendo los encepados a una altura que quedan vistos en función del nivel del río. Se disponen 8 pilotes de $\text{Ø}1800$ en cada pila con encepados de $18.5 \times 12.0 \times 4.0$ m. Además, se disponen unos recintos alrededor de los encepados que sirven para evitar el choque de las embarcaciones con el viaducto en caso de accidente.

Las pilas extremas tienen un fuste único de sección rectangular hueca con un cabecero que da cabida a los apoyos del tramo principal de un lado y de los tramos de tableros de vigas contiguos.

3. Proceso constructivo del tablero

La principal singularidad de la construcción del puente es el empuje del tablero metálico (figuras 12, 13 y 14). Éste viene determinado por las condiciones de accesibilidad al mismo. El viaducto cruza el Río Grande cuyas

dimensiones no permiten trabajar en la sombra del tablero. El proceso constructivo y la tipología elegida están íntimamente ligadas, pues la solución mixta anteriormente detallada, con la viga de canto constante sobre los cartabones de hormigón de las pilas vienen determinadas por la construcción del tablero mediante empuje.

En el parque de empuje se construye la viga bijácena metálica por dovelas de 20-25 m que se van uniendo con soldadura a tope en los tramos en los que posteriormente se empujará (figura 8). Además de la sección metálica completa y la nariz de lanzamiento se empuja el tablero con las prelosas inferiores para facilitar su colocación, que resultaría muy complicada una vez dispuesta la viga en su posición definitiva sobre el río. La carga a empujar es de unos 11000 kN aproximadamente.



Figura 8. Primera dovela y nariz en el parque de empuje

La principal particularidad del empuje del tablero que nos ocupa es que los puntos donde apoya durante el empuje dan lugar a luces muy dispares frente la habitual luz tipo de un viaducto continuo de vanos iguales o similares. Concretamente, además de los apeos del parque de empuje los apoyos para el empuje se sitúan en las pilas extremas del tramo principal (P2 y P5) y dos por cada pila central (P3 y P4), uno en cada extremo. Las luces para el empuje quedan, por tanto: $70+48.5+28+97+28+48.5$ m (figura 10).

La fase de mayor voladizo tiene una ménsula de 97 m, lo que supone unos esfuerzos y deformaciones excesivos en el caso de empujar el tablero con la sección bijácena, por lo que se dispone de una nariz para el empuje formada por dos cuchillos en celosía que reducen los esfuerzos, de modo que el empuje no sea dimensionante de manera generalizada frente a la fase de explotación, reduciendo la incidencia del empuje en el dimensionamiento del tablero al máximo (figura 9).

Estas luces son muy asimétricas, por lo que las deformaciones del tablero junto a las contraflechas de ejecución provocan levantamientos en algunos apoyos y que las reacciones sean muy divergentes en cada apoyo, y sección a lo largo del empuje. La reacción máxima es de 43000 kN en el apoyo de la pila

P3 del lado del vano central (situación de máximo voladizo), siendo la reacción en el resto de apoyos muy inferior, llegando a ser la reacción máxima para el dimensionamiento de los apoyos finales del empuje de 10000 kN. Se disponen aparatos de apoyos con rótulas y teflones con longitudes de patín de 1.0, 1.5 y 2.0 m en función de la reacción.



Figura 9. Nariz de empuje llegando a una pila central

La viga metálica se empuja unos 45 cm por encima de la cota de rasante hasta llegar a su posición definitiva en longitudinal. Posteriormente, se baja con ayuda de unos gatos dispuestos en las secciones de los apoyos del empuje hacia el interior. Una vez que se sitúa el puente a la altura definitiva se hace la unión mediante soldadura de la platabanda inferior de la viga con la chapa metálica que queda embebida en el cartabón. A continuación, se hormigonan los últimos 20 cm superiores del cartabón. El objetivo de dejar estos últimos 20 cm sin hormigonar (figura 11) es que se ajuste la cara superior del cartabón con la platabanda inferior de la viga metálica como finalmente quede tras el empuje con la geometría real definitiva que, debido a las tolerancias de ejecución y deformaciones por efectos térmicos, puede diferir de la geometría teórica, consiguiendo así el apoyo continuo viga metálica-hormigón del cartabón.

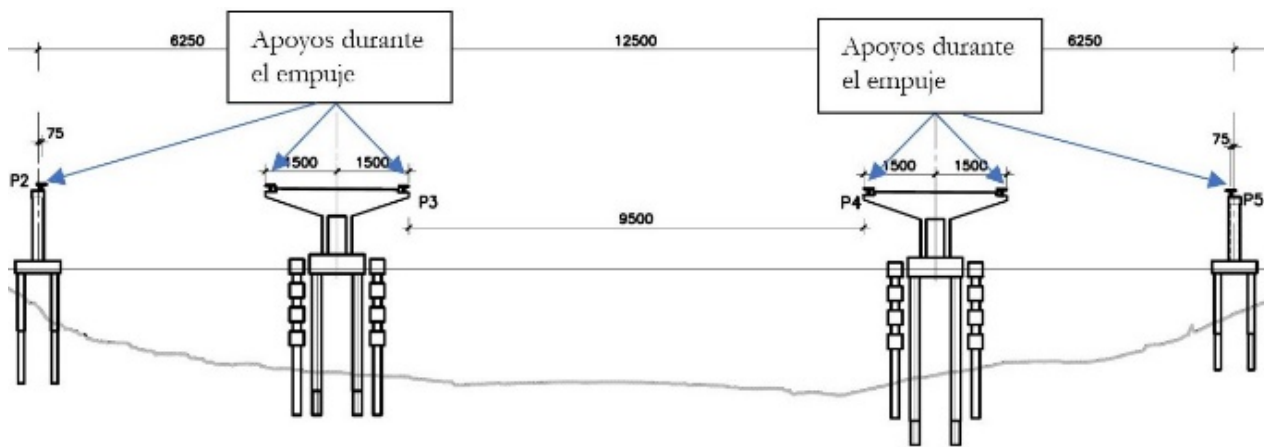


Figura 10. Apoyos provisionales durante el empuje

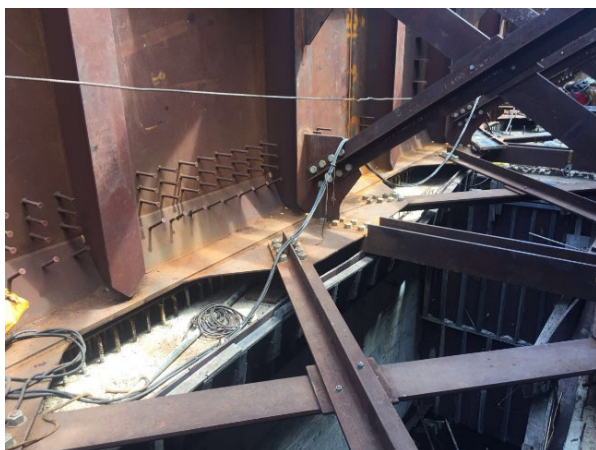


Figura 11. Detalle del hueco para nivelación metal viga-hormigón cartabón

3.1 Afecciones del empuje en el diseño y dimensionamiento del tablero

Como ya se ha comentado, la elección de la sección mixta viene casi obligada por la construcción por empuje, puesto que el peso del tablero de hormigón con la luz principal que tiene el puente sería excesivo para realizar el empuje. Pero más allá de la propia tipología del tablero, el empuje determina varios aspectos del diseño y dimensionamiento de la sección.

En cuanto al diseño de la sección, la principal característica que se debe al empuje es la disposición de doble célula inferior. La función de ésta es doble durante el empuje: reducción del panel del alma comprimido durante las fases que la sección se encuentre sometida a flexión negativa, mejorando su aptitud frente a inestabilidad; y reducción de la flexión transversal de la platabanda inferior en

su trabajo 'tipo basa' durante el apoyo de la viga bijácena sobre los patines para el empuje. Además, con la misma finalidad (mejora de la resistencia a flexión transversal propia de la platabanda inferior), se han dispuesto platabandas que sin sobrepasar los espesores que dan lugar a disminución de las resistencias del acero son lo más gruesas posibles reduciendo su anchura.

Por otra parte, la disposición de celosías horizontales en los planos medio e inferior de la sección viene dimensionado por la acción del viento durante el empuje.

En cuanto al dimensionamiento de las chapas principales del puente, se ha dispuesto de una nariz de lanzamiento que disminuye los esfuerzos de la fase crítica (máximo voladizo), y además se ha limitado las cargas del empuje de manera que el dimensionamiento de las chapas principales apenas se ve penalizado por el empuje. En cualquier caso, se han dispuesto rigidizadores transversales de alma más próximos en toda la longitud del viaducto en lugar de sólo en las zonas de mayor cortante en explotación con el fin de mejorar el comportamiento frente a patch loading de las secciones.



Figura 12. Viga metálica al final del empuje.



Figura 13. Empuje del vano principal

3.2 Afecciones del empuje en el diseño y dimensionamiento de la subestructura

Generalmente el procedimiento de empuje de un tablero no afecta a la subestructura puesto que las cargas a las que están sometidas las pilas habitualmente son menores a las cargas durante la fase de explotación de la estructura. Sin embargo, el empuje de nuestro puente sí que

afecta a las pilas centrales debido a su singularidad.

Las pilas centrales como se ha descrito anteriormente tienen un cartabón que se une a la bñácena del tablero formando una sección mixta de gran canto una vez que se realiza la unión de ambas subsecciones. Pero durante el empuje se disponen apoyos provisionales en los extremos del mismo para reducir la luz de flexión respecto a la configuración de apoyos en los ejes de las pilas centrales exclusivamente. Esto implica que la reacción vertical del tablero en las pilas centrales durante el empuje tenga una excentricidad muy grande en la pila (los 14 m entre apoyo deslizante provisional para el empuje y el eje de la pila) Esto da lugar a ciertos refuerzos.

Para reducir la excentricidad de la carga en la pila al cargar en los apoyos interiores de las pilas centrales durante el empuje, es decir, los apoyos hacia el vano central, se hormigona el interior de la sección en U del cartabón del lado opuesto compensando parcialmente la flexión longitudinal que se produce en las pilas centrales.

Además, debido a que la flexión es muy elevada, incluso con la compensación del macizado excéntrico del cartabón, el tabique de la pila que queda traccionado durante el empuje se pretensa con 4 cables de 31Ø0.6”



Figura 14. Alzado del puente durante el empuje.

Por otra parte, el apoyo del tablero durante el empuje en los extremos del cartabón produce una flexión negativa en la sección en U de hormigón muy importante que durante la explotación del puente no tiene lugar. Por ello, se proyecta un pretensado (2×3 tendones de 31 torones Ø0.6”) en la parte superior del cartabón para resistir esa flexión negativa y mantener la rigidez del cartabón.

Referencias

- [1] Millanes, F.; Alonso, M. “El Nuevo Puente Mixto de Retamar sobre el Río Guadarrama, en Madrid”. Ier Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Sevilla. Noviembre 1999.
- [2] Millanes, F.; Matute, L.; Martínez, D. “Puente sobre el río Sella en Cangas de Onís”. IIIer Congreso ACHE de Puentes y Estructuras. Zaragoza. Noviembre 2005.
- [3] Millanes, F.; Ortega, M.; Pascual, J. El viaducto sobre el Río Nalón, un puente mixto de carretera con un vano principal de 110 m de luz. Hormigón y Acero. 2009.
- [4] Millanes, F.; Matute, L.; Martínez, D.; Solera P.; Mansilla J. El viaducto mixto sobre el Río Tajo en Talavera de la Reina. Junio 2017.