

ORIGEN E HISTORIA DE LOS PUENTES EXTRADOSADOS

José Antonio TORROJA CAVANILLAS

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

José M^a DE VILLAR LUENGO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Javier GAMINO PALOMO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Álvaro MAZARIEGOS BOROBIO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

TORROJA INGENIERÍA S.L.

correo@torroja.es

RESUMEN

En 1927 se finaliza el acueducto de Tempul, concebido por Eduardo Torroja, toda una innovación estructural sin precedentes en la construcción de puentes. Casi un siglo después, y sobre todo en los últimos 30-40 años, ha proliferado el diseño y construcción de puentes con ciertas tipologías innovadoras que no responden a los tipos convencionales. Existen numerosas soluciones que cabalgan por la difusa frontera existente entre las extendidas y archiconocidas tipologías convencionales de vigas continuas de hormigón pretensado, plenamente desarrolladas a lo largo del siglo XX, y las hoy en día asentadas y cada vez más frecuentes tipologías de puentes atirantados. En el empeño por tratar de clasificar estas estructuras intermedias nace el término “extradosado” para tratar de abarcar a la mayoría de estas realizaciones, pero aún existen y surgen nuevos casos que escapan de cualquier clasificación, si bien se encuentran similitudes formales y conceptuales en tipologías más antiguas que pueden considerarse precursoras.

PALABRAS CLAVE: Extradosado, Pretensado Exterior, Pretensado Extradorsal, Pretensado Intradorsal, Pretensado Ambidorsal, Presolicitud, Tirante, Atirantamiento

1. INTRODUCCIÓN. TIPOLOGÍAS INNOVADORAS

El desarrollo a lo largo del siglo XX del hormigón pretensado y su aplicación al diseño y construcción de puentes ha dado lugar hoy día a infinidad de tipologías y posibilidades, y al alcance de luces cada vez mayores con soluciones cada vez más esbeltas y ligeras. Todas las tipologías de tableros tipo viga continua de hormigón pretensado son ampliamente conocidas y aplicadas para todo tipo de realizaciones (carretera, ferrocarril, pasarelas peatonales, acueductos). Freyssinet, Maillart, Nervi, Leonhardt, y por supuesto, Torroja, son hoy día figuras indudables y merecidamente ligadas a la historia del desarrollo de este material.

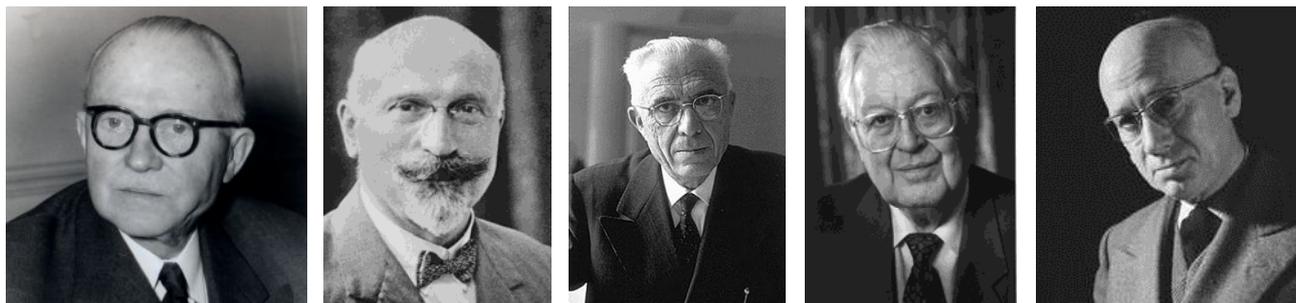


Figura 1. Freyssinet, Maillart, Nervi, Leonhardt y Torroja.

Hoy en día las tipologías de hormigón pretensado convencionales están en general perfectamente clasificadas, existiendo numerosos documentos, tablas y ábacos construidos estadísticamente en base a la infinidad de realizaciones existentes, que orientan en la concepción precisa de nuevos diseños.

A partir de la segunda mitad del siglo XX comenzó también el desarrollo, en menor medida, de los puentes atirantados. No obstante, hoy en día estos puentes son muy comunes y están muy extendidos a nivel mundial al representar la solución idónea cuando las exigencias de grandes luces limitan el uso del hormigón pretensado. El comportamiento de este esquema estructural es también ampliamente conocido, al igual que es conocida su percepción, en la mayoría de los casos, de solución estéticamente elegante. También existen hoy día ratios geométricos y cuantías comunes que permiten la clasificación, el encaje y el predimensionamiento bastante aproximado de este tipo de estructuras.

Sin embargo, en los últimos 30-40 años han venido proliferando nuevas tipologías que, utilizando los elementos propios de los puentes tipo viga continua de hormigón pretensado y de los puentes atirantados, escapan de las clasificaciones convencionales establecidas para estas dos tipologías. Se trata de soluciones que podrían clasificarse como “intermedias” entre las anteriores, pero en muchos casos existen desviaciones conceptuales que tampoco permiten realizar tal generalización, aunque cabe destacar que muchas de estas tipologías se basan en ideas y formas estructurales mucho más antiguas.

Se ha establecido la clasificación de puente “extradosado” para aunar a la mayoría de estas realizaciones sin igual, pero aun así es difícil aún enmarcar todas estas innovadoras y audaces soluciones en un determinado tipo de puente, y existe un todo un debate abierto en el sector sobre dónde están los límites de clasificación de estos puentes, atendiendo tanto a su forma como a su comportamiento estructural.

El objeto de esta comunicación es revisar el estado actual de esa discusión sobre la naturaleza y clasificación de estas tipologías poco convencionales aunque cada vez más frecuentes, así como dar una breve visión histórica de su evolución. Se finaliza la comunicación con una breve exposición realizada por el propio J. A. Torroja sobre el acueducto de Tempul, de Eduardo Torroja, considerado por algunos autores el ejemplo precursor de estas estructuras.

2. ETIMOLOGÍA Y PLANTEAMIENTO

¿Qué es un puente extradosado? El término extradosado es la combinación de las palabras “extra” y “dorsal”, que vendrían a significar “más allá del dorso”. En el campo de la ingeniería de puentes, los elementos extra-dorsales se aceptan como elementos resistentes del tablero o superestructura que emergen, por encima o por debajo, de los límites del canto del tablero. Pero, ¿dónde está el límite del canto del tablero?

En un puente atirantado queda bien claro qué es el tablero, claramente sustentado por los tirantes. Pero estos tirantes, ¿son elementos extradorsales? Se ha dicho en la anterior definición que los elementos extra-dorsales son elementos resistentes del propio tablero. Los tirantes sustentan al tablero, pero está claro que no son parte de él. En un puente viga continua de hormigón pretensado de canto constante también es evidente cuál es el tablero. Si su luz aumenta y ello obliga a variar el canto, aún se sigue identificando perfectamente el tablero. Pero se asume que ese canto varía siempre por debajo de la rasante. Pero si por exigencias de gálibo inferior fuese

necesario aumentar el canto por encima de la rasante, con almas que sobresaliesen sobre la cara superior del tablero, ¿seguirían siendo esas almas parte del tablero, o serían elementos extradorsales del tablero?

Estos planteamientos dan pie a la discusión que se aborda más adelante en esta comunicación, la discusión sobre dónde poner el límite a lo que se considera extradorsado o no, y sobre cómo clasificar estas estructuras.

3. DEFINICIONES Y CLASIFICACIONES EXISTENTES DE PUENTES EXTRADOSADOS

El término de “puente extradorsado” se asocia comúnmente a los puentes con atirantamiento superior que, siendo aparentemente similares a los atirantados, se distinguen de éstos por poseer torres mucho más bajas, tirantes más tendidos y tableros más rígidos. Esta tipología es la que definió Mathivat en 1988 para el concepto de puente extradorsado. En lo sucesivo, en este artículo se va a denominar a esta tipología extradorsado “clásico” o “convencional”.



Figura 2. Puente de Erne (Irlanda)

Pero ya se adelantado en el apartado anterior que este concepto puede considerarse mucho más extenso. En general, se puede considerar como extradorsado cualquier puente que tenga elementos resistentes propios del tablero, pero que se desarrollan fuera de los límites de su canto, ya sea por encima o por debajo del mismo. Es decir, cuenta con elementos resistentes “extra-dorsales” al tablero.

Los elementos más comúnmente aceptados como extra-dorsales son los tirantes o tendones. Algunos autores consideran que para hablar de puente extradorsado, los tirantes o elementos extra-dorsales deben contar con cierta presolicitación. También se asume que para que un puente sea extradorsado, su tablero ha de ser continuo.

Atendiendo al trabajo de Ana María Ruiz Terán, existe una clasificación que podría denominarse “clásica” de puentes presolicitados mediante tendones o tirantes. Esta tabla incluye además otros criterios de clasificación aparte de la disposición de los tirantes.

Ubicación de los tendones	Tipos de armaduras activas	Tipos de puentes	Tipos de anclajes	Material
Tendones dentro del canto de la sección	Pretensado adherente con armaduras pretesas	Puentes prefabricados	Anclaje por adherencia	Hormigón
	Pretensado convencional con armaduras postesas	Puentes pretensados convencionales	Anclajes convencionales	
	Pretensado exterior	Puentes con pretensado exterior	Anclajes convencionales	Hormigón y/o acero
Tendones fuera del canto de la sección	Tirantes superiores	Puentes atirantados	Anclajes de alta resistencia a fatiga	
	Pretensado extradorsal	Puentes con pretensado extradorsado	Anclajes convencionales	

Tabla 1. Clasificación clásica de puentes presolicitados

Según los diferentes autores consultados, se observa que a día de hoy hay consenso en considerar como extradosados los siguientes tipos de puentes:

- Extradosados convencionales o con atirantamiento extra-dorsal superior: los descritos por Mathivat. Se asemejan a un atirantado pero tienen torres más bajas, tirantes más tendidos, y tableros con más canto
- Extradosados con atirantamiento inferior o intra-dorsal. Tienen tirantes y puntales debajo del tablero, que suele ser de canto constante. Los puntales, por la acción de presolicitación de los tirantes, introducen una reacción vertical al tablero simulando el efecto de una pila.
- Extradosados con atirantamiento combinado o ambi-dorsal. Son una combinación de los dos tipos anteriores.



Figura 3. De izquierda a derecha y de arriba abajo, puente sobre el río Vistula (Polonia), puente de Obere Argen (Alemania), y paso superior Truc de la Fare (Francia).

4. DISCUSIÓN SOBRE LOS PUENTES EXTRADOSADOS

A pesar de las definiciones y clasificaciones descritas en el punto anterior, existen aún muchos tipos de estructuras que quedan fuera de ellas pese a contar con muchas de sus características. Debido a las discrepancias encontradas entre autores a la hora de clasificar estas estructuras, se deja abierto este “cajón de sastre” para otras tipologías en las que existen elementos resistentes que pueden considerarse extra-dorsales y que no son necesariamente tirantes presolicitados. Esta es la base de la discusión que se desarrolla a continuación acerca de qué son, qué no son, y qué pueden ser los puentes extradosados.

Dicha discusión es necesario abordarla desde un punto de vista formal, atendiendo a los elementos que pueden o no considerarse extra-dorsales de un tablero, pero también desde el punto de vista del comportamiento estructural del conjunto de dichos elementos junto con el tablero al que hacen servicio, es decir, atendiendo a cómo se comporta el conjunto del tablero y sus elementos extra-dorsales. Para ello se analizan en primer lugar los puentes extradosados convencionales y después se da paso a otras tipologías.

4.1. Puentes extradados convencionales

Estos puentes se pueden considerar como un paso intermedio entre los atirantados y los puentes de viga continua de hormigón pretensado, y se puede decir que deriva de dichas tipologías. Es por eso que se analizan en clave comparativa con aquéllas tipologías.

4.1.1. Características geométricas

De acuerdo con los numerosos ejemplos existentes, y comparando con las tipologías de las que deriva, se pueden generalizar las siguientes características de los puentes extradados convencionales.

- Canto del tablero: es en general más esbelto que el de un puente viga de hormigón pretensado de luces similares, pero menos que el de un atirantado. Esto se debe a que requiere de cierta rigidez propia para soportar las cargas permanentes y sobre todo las sobrecargas. Así pues, se habla de ratios h/L del orden de $1/45-1/55$ en el tablero (mayores en pilas si hay acartelamiento). En puentes viga de hormigón pretensado de gran luz, asumiendo canto variable, ese ratio sólo sería alcanzable en el centro de vano, mientras que en pilas debe aumentarse (reducirse la esbeltez) a ratios del orden de $1/18-1/22$. En el caso de los puentes atirantados, no existen valores tan generalizados, pero es fácil hablar de esbelteces del orden de $1/200$ e incluso $1/400$.
- Tipología del tablero: en la mayoría de las realizaciones existentes los tableros son vigas cajón continuas de hormigón armado o pretensado. Se advierte que, a pesar del canto requerido para conferir rigidez, al tratarse de tableros en los que la mayor parte de la presolicitación se da por fuera con los tirantes, se reducen considerablemente las cuantías de pretensado convencional requeridas en el tablero, y por tanto se pueden reducir las dimensiones de las almas, aligerándose la estructura.
- Inclinación de los tirantes: los tirantes están mucho más tendidos que en los puentes atirantados convencionales, midiendo el ángulo de inclinación con respecto al tablero. Mientras que en un puente atirantado convencional la inclinación de tirantes, caso de disposición en abanico, puede ir de valores cercanos a la verticalidad (90°) en la cercanía de pilas hasta valores de 20° o 25° en el caso de los más alejados, los tirantes de los puentes extradados alcanzan inclinaciones del orden de 15° e incluso menores, de acuerdo con varios autores.
- Consecuencia inmediata de lo anterior es la altura de las torres. Mientras que en los atirantados convencionales las torres se alzan por encima de la rasante del tablero en una altura del orden de $L/5$ (según varios autores), siendo L la luz entre dos torres, en el caso de los puentes extradados clásicos esta altura se reduce aproximadamente a la mitad, existiendo alturas de $L/8$, $L/10$ e incluso $L/12$, según varios autores.

4.1.2. Comportamiento estructural

En un puente atirantado los tirantes proporcionan al puente la rigidez vertical de la que carece el esbelto tablero. La presolicitación de los tirantes es tal que, frente a cargas permanentes, deben tratar de dejar el tablero en su rasante, sin flecha, y con un esquema estático según el cual el tablero se comporta como una viga continua apoyada en los puntos de anclaje de los tirantes. En estas condiciones, se considera que los tirantes soportan el 100% de las cargas permanentes.

Esto hace que sean muy eficaces frente a las sobrecargas, lo que significa que las absorben también prácticamente por completo. Como consecuencia de esto, el acero de los tirantes está sometido a fuertes variaciones tensionales y se deben por tanto limitar sus tensiones máximas. Además, tanto los tirantes como sus anclajes requieren gran resistencia a fatiga dada la amplitud de sus variaciones tensionales en servicio.

En los puentes de hormigón pretensado, el tablero aporta con su canto toda la rigidez vertical para resistir las cargas permanentes y las sobrecargas. Sin embargo, debido a la presolicitación del pretensado, las variaciones tensionales producidas en los tendones son muy bajas. Ello permite aprovechar más el acero activo tesándolo a tensiones más cercanas a la de rotura, y al mismo tiempo los anclajes no requieren gran resistencia a fatiga dados los bajos rangos de variación tensionales que soportan.

El esquema extradadosado convencional está, pues, a medio camino entre estos comportamientos. En primer lugar, partiendo del esquema atirantado, cuanto más se tienden los tirantes (menor inclinación con la rasante del tablero), menores son sus variaciones tensionales debido a las sobrecargas, pero esto se debe a que esta disposición implica una disminución de su eficacia frente a las sobrecargas. Como consecuencia de la pérdida de eficacia vertical de los tirantes, el tablero debe hacer frente a las sobrecargas con su rigidez propia, de ahí que su canto aumente en comparación con el de los puentes atirantados para hacer frente a las flexiones producidas por la sobrecarga y no absorbidas por los tirantes.

Por otro lado, si se compara con un puente de hormigón pretensado, estos tirantes rebajados son como un pretensado con un gran brazo mecánico (fuera de la sección del tablero). Estos tirantes no están sometidos a variaciones de tensión tan altas como las de los tirantes de un puente atirantado, pero sus incrementos de tensión tampoco son tan bajos como los de un pretensado convencional. No obstante, los rangos de variación de tensión en los que se mueve permiten la utilización de anclajes convencionales de pretensado exterior en lugar de los poderosos anclajes de los tirantes de puentes atirantados.

Comparando con cifras, se puede decir que en los puentes atirantados convencionales los tirantes trabajan al 45% de su límite elástico, en los extradadosados al 55%, y en los puentes pretensados sus tendones trabajan al 80% de su límite elástico.

En resumen, y en referencia al trabajo de G. Chio Cho (revista Tecnura [4]), en los puentes extradadosados convencionales la presolicitación de sus tirantes puede llegar a compensar el 90% de las cargas permanentes, pero son poco eficaces frente a las sobrecargas, y ahí es donde entra en juego la rigidez propia del tablero.

4.2. Puentes extradadosados no convencionales

Al analizar las tipologías menos convencionales, echando la vista atrás con perspectiva histórica se encuentran tipologías antiguas en las que podría decirse que sus tableros cuentan con elementos que de algún u otro modo podrían calificarse como precursores de los elementos extradorsales modernos. Es el caso de muchas tipologías de puentes metálicos en celosía.

Cuando se habla de puentes en celosía, se asocia rápidamente al concepto de “viga en celosía”. Es fácil identificar vigas en celosía en puentes metálicos antiguos (así como en algunos modernos), ya sean isostáticas o continuas, con canto constante o canto variable. Pero si nos fijamos en algunos ejemplos encontramos que su configuración nos hace dudar a la hora de

calificar sus tableros como vigas. Es el caso por ejemplo de los puentes con vigas en “vientre de pez”, como los puentes de Tordera y Posadas, de Eduardo Torroja, o el caso de muchos de los grandes puentes metálicos que se suceden por EEUU, como el puente de Queensboro en Nueva York.



Figura 4. Puente de Posadas (E. Torroja) y puente de Queensboro, Nueva York.

En los puentes con vigas en vientre de pez como los mencionados de Eduardo Torroja podría decirse que tienen un tablero claramente diferenciado, la losa de hormigón, sustentado por unos elementos extradorsales, que serían los cuchillos metálicos en vientre de pez. En el caso de los puentes metálicos americanos también se distingue un tablero de canto constante sustentado por una vasta estructura metálica que incluso recuerda a los cables y péndolas de un puente colgante. Estos elementos también podrían considerarse como elementos extra-dorsales.

Pero atendiendo al funcionamiento estructural de estas estructuras, y de acuerdo con las definiciones antes proporcionadas de puente extradosado, estos ejemplos no tendrían cabida dentro de ese saco. En el caso de las vigas en vientre de pez no existe presolicitación de ningún tipo en el cordón inferior traccionado de los cuchillos metálicos, lo cual para algunos autores es un requisito para que se considere un elemento extra-dorsal del tablero. Dicho cordón sería un elemento por tanto pasivo. Por otro lado, se trata de vanos isostáticos sin continuidad en pilas.

En el caso de los puentes americanos mencionados, su funcionamiento es en realidad el de una gran viga en ménsula. Estas tipologías son muy similares en forma y funcionamiento a la del puente Firth of Forth de Escocia, que siempre se ha definido como un puente “cantilever”. Asimismo, en estos puentes no hay presolicitación ninguna, con lo cual no se podrían llamar puentes extradosados.

No obstante, hoy en día se siguen encontrando ejemplos modernos de tipologías que recuerdan a estas y que, al no contar con una clasificación tipológica concreta, podrían caer en el saco de los puentes extradosados, como el caso de la propuesta de Torroja Ingeniería para el paso de la bahía de Junk en Hong Kong (figura [X]).

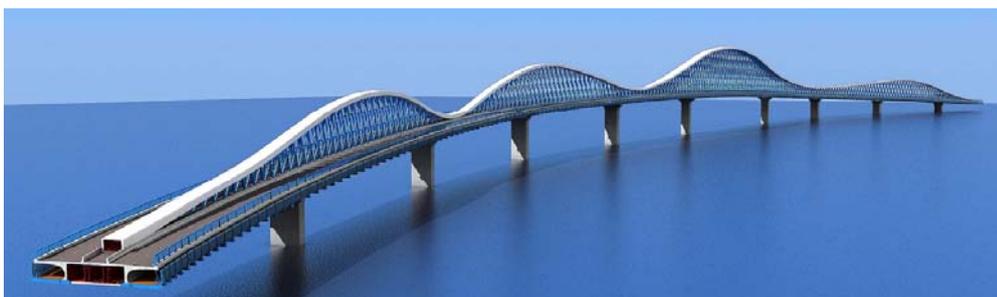


Figura 5. Propuesta de puente de Torroja Ingeniería para la bahía de Junk en Hong Kong.

Se discuten a continuación casos de puentes con elementos extra-dorsales de hormigón que responden al tipo extradosado, aunque algunos autores no los consideran como extradosados.

Para esta discusión se analizan dos ejemplos. Por un lado el puente de Ganter, de Christian Menn (Suiza, 1980), y por otro el puente de Texcapa (Mexico). El primero cuenta con unas pantallas de hormigón pretensado, con tendones interiores, que sobresalen por encima de la rasante del tablero en la zona sobre pilas-torre y se anclan sobre estas, recordando mucho a la disposición convencionales. El segundo es muy similar, pero con la diferencia de que los pseudo-tirantes de hormigón pasan a ser pantallas completas o “velas” de hormigón.



Figura 6. Puentes de Ganter (Suiza) y de Texcapa (Mexico)

Aunque se parecen formalmente, estructuralmente no funcionan del mismo modo. En el puente de Ganter, si se toma una sección por la zona cercana a pilas, se vería el cajón del tablero, y a cierta altura por encima la sección de las pantallas pretensadas separadas del resto del tablero. Esto implica que no hay transmisión de cortante entre ambos elementos. En el segundo caso, una sección por zona similar nos mostraría un tablero con un alma continua que sobresale por encima del tablero, pero que es capaz de resistir a cortante. En el puente de Ganter sus pantallas-tirante pueden considerarse elementos extradorsales (aunque hay autores que no califican a este puente como extradosado). Sin embargo, en el puente de Texcapa la pantalla sobre pilas podría considerarse como una parte más de la sección del tablero, no necesariamente un elemento extradorsal. De hecho, si dicho aumento de canto se desarrollase bajo el tablero en lugar de sobre este, resultaría más evidente que ese puente responde más a la tipología de viga continua de hormigón pretensado de canto variable.

Esta última comparativa pone una vez más de manifiesto la dificultad de enmarcar ciertas tipologías estructurales dentro del saco de los puentes extradosados, ya que se encuentran en la difusa frontera existente entre los puentes atirantados y las vigas continuas de hormigón pretensado.

5. BREVE REPASO HISTÓRICO DE LOS PUENTES EXTRADOSADOS

Algunos autores consultados coinciden en señalar como primera realización de esta tipología el acueducto de Tempul, descrito al final de esta comunicación. Sin embargo, para empezar a hablar de puentes extradosados o “similares” hay que avanzar hasta finales de la década de 1970 y principios de la década de 1980. En pleno desarrollo de las tipologías de hormigón pretensado y avanzado desarrollo de los puentes atirantados, aparecen las primeras realizaciones de puentes con el concepto de extradosado.

Como primer ejemplo de realización extradrosada sin igual, se hace referencia al Viaducto de Weitingen sobre el río Neckar, en Alemania (1978). Este viaducto, diseñado por la oficina de Fritz Leonhardt, es uno de los primeros ejemplos notables del empleo de atirantamiento inferior. A continuación se destaca también el ya mencionado y descrito viaducto de Ganter, de Christian Menn, en Suiza (1980).

Del mismo modo, se suceden algunos otros ejemplos que suponen tímidas aunque innovadoras incursiones con tipologías sin precedentes que utilizan los elementos propios de los puentes viga de hormigón pretensado y los puentes atirantados.

En 1988 Mathivat introduce el concepto y definición de puente extradrosado convencional, y poco después, en 1994, aparece el que se considera el primer puente de estas características de la historia. Se trata del puente de Odawara Bluebay, en Japón, también descrito anteriormente. No obstante, en 1993 se había finalizado el puente de los Socorridos, en Madeira (Portugal), con la singularidad de que sus tirantes están agrupados dentro de paneles.

La tipología de extradrosado clásico empieza a extenderse a partir de entonces entre las décadas de 1990 y 2000, proliferando varios ejemplos de puentes que siguen dicho esquema convencional. Asimismo, siguen también realizándose otros puentes con atirantamiento inferior, y algunos puentes con otras formas de presolicitación fuera del canto del tablero (ambidorsal), de la mano de ingenieros de la talla de Jörg Schlaich, como el antes mencionado puente de Obere Argen (Alemania, 1990). Es así como va progresando el empleo de tipologías innovadoras que cada vez se introducen con más solidez. Se destacan viaductos como el de Sunniberg (también de C. Menn, en Suiza, 1998), el puente de los Trillizos (Bolivia, 2006).



Figura 7. De izquierda a derecha y de arriba abajo, Puentes de Weitingen (Alemania), Odawara (Japón), Sunniberg (Suiza) y Socorridos (Portugal).

Inicialmente, estas tipologías no convencionales se desarrollan en Alemania y, especialmente, en Japón, donde existe gran concentración de puentes extradosados. Pero rápidamente se extienden a todas partes del mundo, encontrando ejemplos incluso en EEUU y Canadá, como el caso del puente de Brazos River Bridge, en Texas (2014).

En España también existen varios ejemplos de estos tipos de estructuras. Así, se tienen entre otros el puente sobre el río Deba (Guipúzcoa, 2003) y el puente del Teror (Gran Canaria, 2011), ambos extradosados convencionales proyectados por J.A. Llombart. También están el puente de Osormort (Cataluña, 1997), de atirantamiento inferior, y el puente de Andalucía sobre el Guadalquivir (Córdoba, 2004), extradosado convencional, ambos obra de J. Manterola.



Figura 8. De izquierda a derecha y de arriba abajo, puente sobre el río Deba, puente de Teror, viaducto de Osormort, y puente de Andalucía.

En las últimas dos décadas el número de realizaciones de puentes extradosados clásicos se ha ampliado considerablemente, y del mismo modo lo ha hecho el conocimiento de su comportamiento y ventajas, que ya está ampliamente desarrollado. Pero del mismo modo no han dejado de proliferar más y más ejemplos de los otros tipos de estructuras con otras modalidades de atirantamiento extradorsal.

6. VENTAJAS E INCONVENIENTES FRENTE A OTRAS TIPOLOGÍAS

6.1. Ventajas

- El canto de la sección para la solución extradosada es aproximadamente la mitad que para la solución tipo “viga” de hormigón pretensado y el doble que para una solución atirantada. Esto unido al hecho de que las almas pueden tener espesor más reducido produce que la colocación tanto de la armadura activa como pasiva sea más sencilla, así como un aligeramiento de la sección.
- Al presentar una solución más rígida que los tableros atirantados, supone una solución más viable para puentes de ferrocarril.

- Al no estar afectados los cables por problemas de fatiga frente a acciones verticales, se pueden emplear anclajes convencionales en lugar de anclajes de alta resistencia empleados para las soluciones atirantadas.
- Se pueden disponer uno, dos o más de dos planos de atirantamiento, con lo cual se pueden conseguir tableros muy anchos. En el caso de los atirantamientos inferiores, además, existe la ventaja añadida de que se independiza la distribución de la calzada de los planos de atirantamiento. Esto es favorable de cara a futuras ampliaciones.
- Los atirantamientos inferiores con puntal permiten doblar luces para un mismo canto de tablero.
- La posibilidad de disponer atirantamientos tanto por encima como por debajo del tablero proporciona más flexibilidad de cara a encajar soluciones con gálibos estrictos.
- Estos puentes son competitivos para luces entre los 100 y los 250 m.

6.2. Inconvenientes

- Las soluciones extradadas son más económicas que las atirantadas, pero menos que las tipo “viga”. No obstante, en ocasiones, pueden resultar incluso más económicas que éstas si las limitaciones de gálibo inferior son estrictas.
- De cara a acciones transversales, como la acción del viento, los tirantes y anclajes tienen los mismos problemas de fatiga que los de un puente atirantado convencional.

7. ACUEDUCTO DE TEMPUL (POR JOSÉ ANTONIO TORROJA)

El acueducto de Tempul constituye uno de los ejemplos más tempranos sobre la forma en la que Torroja se enfrentaba a los problemas que planteaban sus concepciones estructurales. Mucha confianza debía tener José Eugenio Ribera en su alumno cuando, a sus 25 años, le encargó el desarrollo del estudio y la ejecución de una variante al proyecto original del acueducto.

7.1. Geometría y condicionantes

El proyecto originalmente consistía en catorce vanos de 20,00 m. El problema de esta configuración estribaba en que dos de las pilas se cimentaban en el lecho del río. Ante la dificultad de ejecutar estas cimentaciones, la Propiedad pidió eliminar estas dos pilas. Este hecho, fue resuelto por Torroja sustituyendo los apoyos del cauce por las componentes verticales de dos tirantes inclinados que pasando sobre las pilas situadas en las márgenes, sobreelevadas, se anclaban en los tramos laterales sobre el estribo de la margen derecha y sobre la pila contigua en la izquierda

Así, la configuración final del acueducto está formada por once luces rectas de 20 m y una tipo “cantiléver” de 57 m.

La sección transversal es una caja constituida por dos paredes o cuchillos de 1,50 m de alto por 0,15 m de espesor, unidos por dos losas del mismo grueso. Sobre la losa inferior se apoya la tubería de fundición por intermedio de camas de hormigón y a su vez la losa superior sirve de pasadera y de cabeza de compresión del tramo además de proteger de los agentes climáticos a la tubería de fundición.

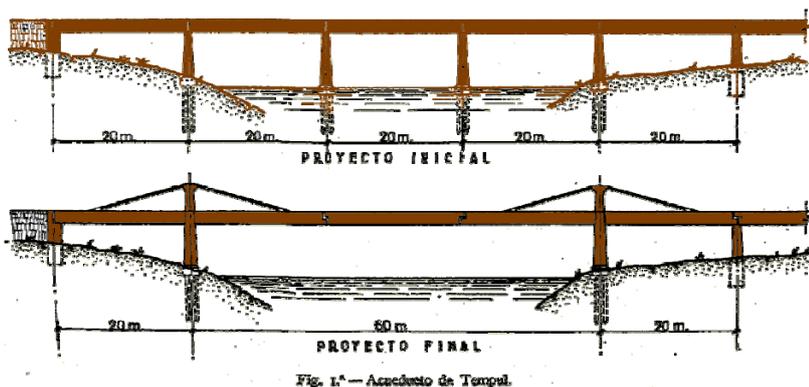


Fig. 1ª - Acueducto de Tempul.

Figura 9. Esquema del acueducto de Tempul.

La luz principal está compuesta por dos ménsulas de 20 m de voladizo y un tramo central de 17 m apoyado en ellas. Cada ménsula está constituida por dos tramos de 20 m, análogos a los del resto del acueducto, unidos por tirantes de hormigón. Los tirantes se apoyan sobre la pila a una altura de 5.80 m sobre el tramo. Los tramos que forman la cabeza de compresión de la ménsula llevan una rótula en la losa inferior sobre la pila, para suprimir los esfuerzos debidos a los cambios de temperatura o a los alargamientos del cable.

La obra comenzó en el otoño de 1925 y se entregó en enero de 1927, tras unos dieciséis meses de ejecución.

7.2. Particularidades y proceso constructivo

El problema principal al que Torroja tuvo que hacer frente para llevar a la práctica la idea de los tirantes fue el cómo materializarlos. La práctica normal en aquella época era la de tirantes de hormigón armado. Se sabía que, para tensiones en el acero del orden de 1.000/1.200 kg/cm² el hormigón era capaz de seguir las deformaciones de las barras lisas utilizadas con una fisuración aceptable. Pero Torroja no se fiaba de los empalmes y por aquel entonces la soldadura no estaba lo suficientemente desarrollada en España. Por lo anteriormente expuesto, pensó en utilizar cables trenzados de acero, que podían transportarse en grandes longitudes evitando la necesidad de empalmes. Además, la resistencia de estos cables era bastante mayor que la de las barras lisas por lo que podían hacerse trabajar a mayores tensiones, requiriendo menores secciones. Así llegó a la solución de "tirantes de cable hormigonado".

Pero esta decisión conllevaba algunos problemas. En primer lugar, había que anclar los cables en el hormigón. Este problema lo resolvió utilizando unos cables de mayor longitud que la necesaria y que entrando por un alma del cajón, daban la vuelta y se prolongaban por el alma opuesta proporcionando así una longitud de anclaje de varios metros.

Por otra parte, con las disposiciones adoptadas en el proyecto, la tracción en los cables es del orden de 3.000 kg/cm² que suben hasta unos 3.700 kg/cm² por efecto del viento. A la vista de estas cifras, se comprende que la mayor dificultad es evitar que los cables cedan demasiado al entrar en carga y que este efecto pueda provocar la excesiva fisuración del hormigón. Torroja, para hacer frente a este problema decidió poner en carga los cables mediante la elevación, por medio de unos gatos situados sobre las pilas del vano principal, de las cabezas que sirven de silla a estos cables (Figura 11). El recorrido vertical de estas cabezas sería el necesario para levantar los extremos de los tramos sobre el cauce, consiguiendo así descimbrarlos directamente simplificando extraordinariamente la retirada de las cimbras.

7.3. Comportamiento estructural

Es interesante destacar que el proceso constructivo anteriormente descrito genera una puesta en carga previa de los cables que no representa ningún pretensado: la estructura resultante, en particular la compresión de los tramos entre tirantes, es absolutamente pasiva. Para comprobarlo se presentan los dos siguientes esquemas:

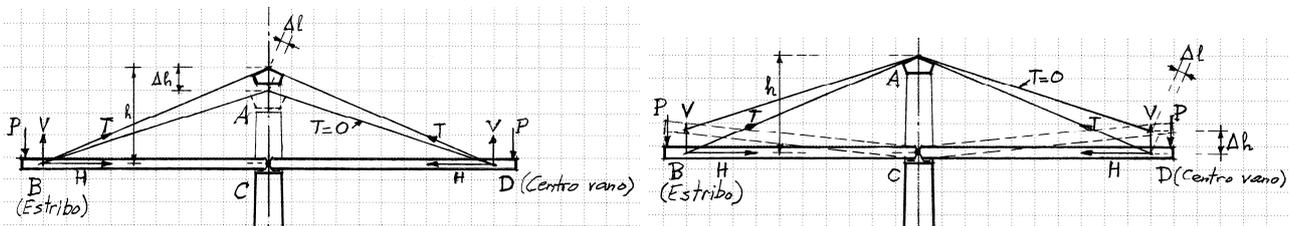


Figura 10. Esquema estructural acueducto de Tempul.

En la imagen izquierda de la Figura 10 se ha representado la solución de elevación de las cabezas de las pilas. Hay que tener en cuenta que los dos tramos atirantados equilibran su compresión H a través de una articulación dispuesta en la cabeza inferior de los cajones, apoyados a su vez independientemente sobre las pilas en C . Por simplicidad, se ha supuesto que esta articulación está centrada en los tramos, y que la carga P en el extremo D , que incluye el peso del vano central apoyado en este extremo. En estas condiciones, la elevación Δh de la cabeza A sobre la pila representa un alargamiento de los cables Δl , que tendrá que ser el necesario para producir una tracción T cuya componente vertical V sea igual a P .

Por otra parte, la imagen derecha de la Figura 10 representa otra posible forma de construcción, que es la típica de la "contraflecha" cuando queremos que la geometría de la estructura una vez descimbrada y deformada, sea la adecuada. Bastaría construir los tramos con una "contraflecha" igual al Δh antes indicado para que al descimbrar los tramos mediante cajas de arena, por ejemplo, se produzca en los cables el mismo Δl y quede la estructura con la misma situación anterior. En este caso, no se ha introducido ninguna puesta en carga previa de los cables.

Esta segunda solución, probablemente ni planteada por Torroja, se puede descartar rápidamente, al menos por dos razones: i) el proceso constructivo es mucho más complejo y ii) para que esta solución conduzca al resultado deseado, es necesario conocer previamente la deformabilidad de los cables de la época, mucho menos predecibles que los modernos cables de pretensar, para poder fijar el valor de Δh . Este dato es precisamente lo que Torroja no conocía y el que de alguna forma le interesaba comprobar.

De hecho, una vez terminada la estructura, este alargamiento resultó ser muy superior al que cabía esperar en función de la tensión a la que quedaron sometidos los cables alcanzando valores del 1% en lugar del 0,15% esperado.

En cualquier caso, la estructura resultante es pasiva. Basta con comprobar que si se suponen nulas todas las acciones exteriores, incluidos los pesos propios, es decir, $P=0$ ambos procesos representan que la estructura descargada quedaría en la posición indicada en la imagen inferior de la Figura 10 con contraflecha, sin tracciones en los cables ni compresiones en los tramos. Si Torroja hubiera dejado los tirantes como cables sin hormigón, al estilo de los modernos puentes atirantados, la operación de elevación de la cabeza de las pilas no hubiera introducido ningún pretensado, dada la isostaticidad de los tramos atirantados.

Pero Torroja fue un paso más allá. Dado que disponía fácilmente de la posibilidad de sobrecargar los tramos mediante el llenado del tubo de la conducción soportada por este puente-acueducto, hizo lo siguiente según el artículo Núm. 2.477 de la Revista de Obras Públicas:

“Después de descimbrado y sobrecargado el tramo, se retiró la cimbra y se esperó veinte días, observando durante este período las deformaciones plásticas de los cables, que se amortiguaron completamente al cabo de diez días y que alcanzaron en total el 0,08 por 100. Después de esto, se hormigonó por partes los huecos que quedaban entre las pilas y sus cabezas, retirándose los gatos, y se vertió lechada por los pozos en que quedaban alojadas las barras verticales de la armadura.”

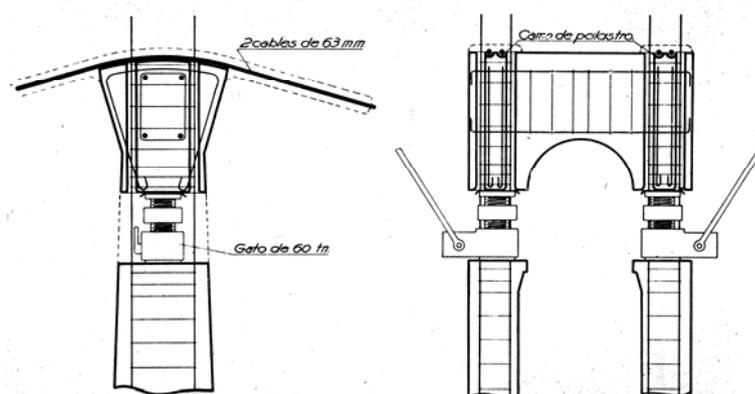


Figura 11. Ubicación de los gatos y tubos con armaduras pasantes.

“inmediatamente se procedió al hormigonado de los cables,... Para mayor seguridad se dejaron dos juntas próximas a los extremos del tirante y se hormigonaron después de 15 días.”

Y el resultado de esta última operación sí que representa un pretensado. Basta con comprobar que si sobre cualquiera de las imágenes de la Figura 10 se suponen nulas todas las acciones exteriores los cables no pueden ahora recuperar su alargamiento, quedando éstos en tracción y el hormigón de los tirantes en compresión, desde luego con resultante exterior nula. Se comprueba también que los tramos no quedan comprimidos: los únicos elementos pretensados son los tirantes. El resto de los elementos estructurales se comportan de forma pasiva, incluidas las pilas.

7.4. Conclusiones

A la vista de lo expuesto anteriormente y teniendo en cuenta el siguiente párrafo del artículo anteriormente citado, queda claro que Torroja fue muy consciente de que los únicos elementos pretensados eran los “cables hormigonados”:

“Como al descargar la tubería (única diferencia posible de sobrecarga en esta obra) la tensión en el tirante baja de 100 a 80 t, y esta diferencia la absorbe el hormigón en forma de compresión, y siendo la sección del tirante 0,20x0,25 m, resulta una carga de 40 kg/cm². A primera vista, en una pieza tan larga y estrecha, esta compresión parece suficiente para producir el pandeo, pero en seguida se comprende que no hay peligro ninguno por este lado desde el momento en que el esfuerzo total de la pieza es siempre de tensión (tracción)”

Toda una lección de “pretensado”. Pero no intentó generalizar lo que había obtenido, ni inventó por ello el concepto de pretensado ni el hormigón pretensado ni el puente extradadosado.

A sabiendas de que por la presencia de cables de acero “presolicitados”, por la geometría de las torres que sostienen estos cables y por la presencia de un tablero con una rigidez importante parece que sería posible encuadrar el puente-acueducto de Tempul como una estructura extradada, por todo lo descrito anteriormente se comprueba que en efecto no lo es.

Torroja no inventó el pretensado, ni fue consciente, en su momento, de ser un precursor. Pero, como se ha comentado en alguna ocasión, construyó, sin intentarlo, una de las primeras obras pretensadas, quizá la segunda, en el sentido moderno de esta técnica: armadura formada por cables de alta resistencia puestos en carga a tensiones elevadas –para su época- previamente al hormigonado del elemento.

8. REFERENCIAS

- [1] SIMÓN-TALERO J. M., “Structural concepts. Some comments and thoughts”. Master lecture en el MIT. Boston Febrero 2015.
- [2] VILLAR LUENGO J. M., “Curso de hormigón”. Universidad Politécnica de Madrid.
- [3] TORROJA MIRET, E., “Acueducto-sifón sobre el río Guadalete”. Revista de Obras Públicas Núm. 2.477. 15 de Mayo de 1927.
- [4] RUÍZ TERÁN A. M. y APARICIO BENGOCHEA A. C., “Puentes atirantados no convencionales - Comportamiento estructural y criterios de diseño”, Tesis Doctoral. Santander, Abril 2005.
- [5] MANTEROLA ARMISÉN J., SIEGRIST FERNÁNDEZ C. y GIL GINÉS M.A., “Puentes”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.
- [6] VV.AA., “Oras de paso de nueva construcción – Conceptos generales”, Ministerio de Fomento Dirección General de Carreteras. Madrid, Mayo 2000.
- [7] BENJUMEA ROYERO J. M., CHIO CHO G. y MALDONADO RONDÓN E., “Puentes extradados: evolución y tendencias estructurales”. Tecnura vol. 16 no. 33. Bogotá Julio/Septiembre 2012.
- [8] MERMIGAS K. K., “Behaviour and Design of Extradosed Bridges”. Thesis. University of Toronto, 2008.
- [9] LLOMBART J.A. y REVOLTÓS J., “Puente extradado sobre el río Deba (Autopista Vitoria-Gasteiz – Eibar)”. Revista Hormigón y Acero N° 231. 1^{er} trimestre 2004.