

# Puentes arco con armadura rígida portante

## Concrete arch bridges with rigid reinforcement

**Jorge Bernabeu Larena.** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Ingénieur des Ponts et Chaussées  
*Ingeniería Idom Internacional. jbl@idom.es*

**Holger Eggemann.** Dr. Ing.  
*RWTH Aachen, Lehrstuhl für Tragkonstruktionen. eggemann@extra.rwth-aachen.de*

**Karl-Eugen Kurrer.** Dr.-Ing.  
*Redactor jefe de la revista «Stahlbau». KKurrer@ernst-und-sohn.de*

**Resumen:** El sistema desarrollado por el ingeniero austríaco Joseph Melan a finales del XIX permitía la construcción de bóvedas de hormigón sin necesidad de cimbras. Los encofrados se colgaban de una estructura metálica, portante durante el hormigonado, que quedaba finalmente embebida dentro del hormigón. El sistema se extendió por Europa y EEUU permitiendo la construcción de un gran número de puentes arco. Después de la Segunda Guerra Mundial la solución se abandonó durante casi medio siglo para ser retomada nuevamente en los años 90. Los arcos mixtos de estructura metálica vista pueden entenderse también como construcciones heredadas del sistema Melan en las que la armadura rígida ha salido al exterior.

**Palabras Clave:** Puentes arco, Historia de la construcción, Arcos de hormigón, Arcos mixtos, Sistema Melan, Armadura rígida

**Abstract:** Concrete arch bridges with rigid reinforcement are mostly known as the Melan System. It was invented by the Austrian engineer Joseph Melan at the end of the 19th century. Its main advantage was the simplification of erection: the so called rigid reinforcement could bear the concrete loads, so that no further scaffolding was needed. The Melan system was used in Europe and the United States, where a great number of bridges of this type was built at the beginning of the 20th century. After Second World War, the idea of rigid reinforced arches remained forgotten during four decades until it had a revival in the 1990s. Modern composite arch bridges using a visible steel framework can also be seen as successors of the Melan system. In this case, one could say that the rigid reinforcement of the Melan system has been turned inside out.

**Keywords:** Arch bridges, Construction History, Concrete Arches, Composite Arches, Melan Arches, Rigid Reinforcement

### Introducción

La puesta a punto de los primeros hormigones experimentó un empuje decisivo cuando Joseph Aspdin reguló los componentes del cemento Portland en 1824. Fabricado en masa ya con los nuevos cementos, a mediados del siglo XIX, el hormigón comenzó a sustituir paulatinamente a las bovedillas de ladrillo y a los recubrimientos de yeso en las estructuras de edificación.

En el forjado plano de la casa de François Coignet, construida en 1853, el constructor francés percibió el potencial del hormigón como material de construcción de carácter monolítico y resolvió su falta de resistencia a la flexión embebiendo elementos metálicos para constituir losas de piso. Ese mismo año en Gran Bretaña, Fox y Barrett, pusieron a punto un sistema en el que las vigas de

hierro forjado recibían en su ala inferior listones de madera. Sobre este encofrado de madera se vertía una losa de hormigón, quedando las vigas metálicas parcialmente embebidas (Brown 1967, 136).

A partir de esos años se planteó una variada gama de sistemas con secciones metálicas parcial o totalmente embebidas en hormigón (Gould 2003, 277): Donath, mediante vigas T invertidas; Holzer, con vigas I; Hyatt, con chapas verticales perforadas para el paso de alambres; Melan, con vigas I; Bordenave, con vigas I; Wünsch, con vigas en T; Bonnam, de secciones cruciformes; la patente de William Moss e hijos, de perfiles de chapas unidos en L. En muchas de ellas se evidencia un decidido propósito de aprovechar la potencialidad de los perfiles de acero no solo en su utilización como refuerzos para la resistencia a flexión de losas y forjados, sino de facilitar el proceso

constructivo al permitir sujetar los encofrados directamente de los perfiles, evitando la necesidad de disponer apeos o cimbras. En algunos casos, incluso, el acero tiene como misión principal facilitar el proceso, y solo secundariamente se reconoce su colaboración resistente (Bernabeu 2005, 134).

El sistema Melan destacó entre todas ellas debido a su amplia difusión y a la magnitud de las realizaciones. Su inventor, Joseph Melan, no se limitó a los forjados planos de edificación sino que resolvió la ejecución de bóvedas y puentes arco mediante suspensión de los encofrados de estructuras metálicas de geometría curva.



Fig. 1. Joseph Melan (1853-1941). (Nowak 1923, Portada).

## 2. El sistema Melan

### 2.1. Joseph Melan (1853-1941)

Joseph Melan (fig. 1) está considerado el ingeniero proyectista de puentes más importante de Austria. Nació en Viena el 18 de noviembre de 1853, donde estudió ingeniería civil de 1869 a 1874 en la Escuela Técnica Superior. Al finalizar sus estudios, fue asistente del Profesor Emil Winkler (1835-1888) en la cátedra de ferrocarriles y construcción de puentes, donde obtuvo su habilitación en 1880 con la tesis: «Theorie des Brücken- und Eisenbahnbaues». Simultáneamente, trabajó en las oficinas técnicas de varias empresas constructoras en Viena. En 1888 publicó uno de los primeros estudios sobre los efectos de la teoría de segundo orden (Melan 1888). El libro fue traducido al inglés por D. B. Steinman en 1912. En 1890 fue nombrado catedrático de mecánica y estática gráfica en la Universidad de Brünn (en la actualidad: Brno, República Checa), área a la que había estado adscrito hasta entonces como profesor titular. Cinco años más tarde, obtuvo la cátedra de construcción de puentes, ocupándola de 1902 a 1923 en la Universidad de Praga. Como experto de reconocido prestigio, Melan participó en los proyectos de construcción de algunos de los grandes puentes colgantes de Nueva York (Kurrer 2002, 72-74). Murió en Praga el 6 de febrero de 1941 (Kurrer 2002, 480).

### 2.2. El Comité Austríaco de Bóvedas (1889-1892)

El sistema desarrollado por Joseph Melan para la construcción de bóvedas de hormigón reforzadas con hierro es resultado de la experiencia obtenida por el autor como miembro del Comité Austríaco de Bóvedas. Este

comité nació a demanda de los constructores, como una entidad evaluadora de los nuevos sistemas constructivos de la época.

En 1882, dos amigos, el barón Adolf Pittel y el ingeniero Victor Brausewetter, decidieron fusionar sus empresas constructoras para trabajar juntos, con el nombre de «Pittel & Brausewetter», en el nuevo campo del hormigón. Adolf Pittel había construido hasta entonces varios proyectos militares con hormigón apisonado que adolecían según Brausewetter (1925, 213) de un “conocimiento de las condiciones estáticas”. Por su parte, Brausewetter ya había realizado en 1879 ensayos de bóvedas de hormigón sin armadura en su taller en Preßburg (en la actualidad: Bratislava, Eslovaquia).

El 23 de marzo de 1889 Brausewetter dio una charla ante la Asociación de Ingenieros y Arquitectos de Austria (ÖIAV) sobre sus experiencias con el nuevo material, y solicitó al colegio que realizara “ensayos en las mismas condiciones sobre bóvedas de hormigón apisonado y bóvedas del sistema Monier” (Brausewetter 1925, 214). El colegio no solo aceptó la propuesta sino que decidió extender los ensayos a los tipos de bóvedas más usuales de la época. De esta forma, el 22 de marzo de 1890 se constituyó el llamado «Gewölbeausschuß», Comité de Bóvedas. Entre los ilustres 21 miembros del comité encontramos a Joseph Melan, reconocido ya como experto en la teoría de las bóvedas y en la construcción de puentes de hierro. Su función era el tratamiento e interpretación de los resultados (ÖIAV 1895, 1-2).

Durante los veranos de 1891 y 1892 se realizaron 17 ensayos con cuatro sistemas diferentes de bóvedas y luces de 1,35 m a 4,05 m (ÖIAV 1895, 1). Entre los sistemas de bóvedas destacaban: bóvedas de ladrillo y de hormigón apisonado sin armadura, el famoso sistema Monier y el entonces conocido sistema Wünsch. El sistema patentado por el ingeniero húngaro Robert Wünsch en 1884 resolvía la ejecución de arcos de hormigón mediante dos capas de armadura rígida que se empotraban en un pilar metálico vertical en los estribos. Con su sistema, Wünsch construyó en Hungría al menos seis puentes de carretera hasta 1894 (Emperger 1894, 443). No parece muy aventurado suponer que la idea de Melan surgiera a raíz de su trabajo en el Comité de Bóvedas y, particularmente, como simplificación del sistema Wünsch.

Así, el 20 de diciembre de 1891 Melan pidió una solicitud a la oficina de privilegios (hoy: patentes) en Viena, titulado: «Nuevo tipo de construcción de pisos formado

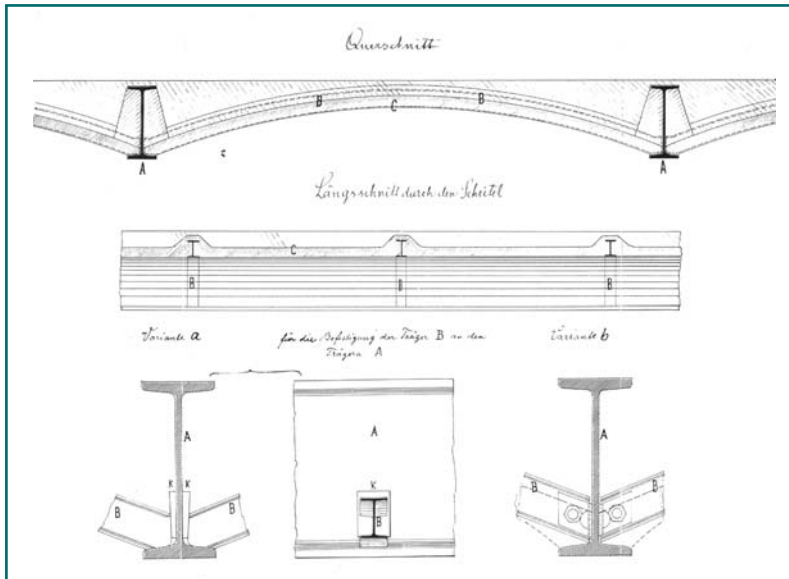


Fig. 2. Privilegio (Patente) de Melan. (Melan 1892).

por arcos de hierro en combinación con bóvedas de hormigón» (Melan 1892). Según Melan, el refuerzo estaba especialmente justificado para hacer frente a las tensiones de tracción causadas por cargas asimétricas.

Además, los arcos permitían simplificar las cimbras que sostenían los encofrados durante el hormigonado. el ingeniero austriaco señaló cuatro ventajas principales del sistema:

1. Menor peso propio que en los sistemas habituales de bóvedas de ladrillo u hormigón para igual o mayor capacidad de carga.
2. Posibilidad de resolver vanos de mayor luz.
3. Mayor seguridad durante la construcción al soportar cargas asimétricas sin apuntalamiento adicional.
4. Ejecución ligera y barata, evitando el uso de cimbras.

Melan incluyó en su solicitud todas estas ventajas que, como veremos, serán las responsables del éxito posterior del sistema. Asimismo reivindicó como novedad de la patente la solución de empotramiento de los arcos mediante cuñas o ángulos remachados y, principalmente, la unión de arcos portantes de estructura metálica con una bóveda de hormigón que embebía a los arcos de forma parcial o completa.

Como constató Brausewetter (1925, 250), el sistema Melan, en su forma primitiva, mostraba ya su aptitud para su aplicación en la construcción de puentes, como poco después se pondría de manifiesto.

Durante el verano de 1893, el Comité de Bóvedas puso a prueba una bóveda del tipo Melan. La bóveda no colapsó debido a cargas simétricas, sino bajo cargas asimétricas, soportando solicitaciones de tres a cuatro ve-

ces mayores que con los otros sistemas investigados (ÖIAV 1895). De esta forma, las bóvedas del sistema Melan obtenían un reconocimiento oficial y demostraban su potencialidad de aplicación.

En 1892, Melan cedió a Brausewetter el derecho de construir con su sistema en Austria, Hungría y Alemania (Brausewetter 1925, 250). Para Brausewetter suponía la posibilidad de poder competir con las patentes de Hennebique y Monier, en manos de otros empresarios. Hasta 1894 la empresa «Pittel & Brausewetter» construyó unos 100.000 m<sup>2</sup> de edificación y almacenes con bóvedas Melan, así como tres puentes de carretera de luz pequeña en las antiguas Bohemia y Silesia (Emperger 1894, 456-57).

Este primer desarrollo del sistema se debió a la unión de la solución tecnológica de Melan y de la capacidad empresarial de Brausewetter. Faltaba aún el impulso de una administración pública que permitiera construir obras mayores.

### 3. Transferencia tecnológica a EEUU

El ingeniero austriaco Fritz von Emperger (1862-1942) adquirió los derechos del sistema Melan para EEUU. El 4 de abril de 1894, en una conferencia en la ASCE en Nueva York titulada: «The development and recent improvement of concrete-iron highway bridges» (Emperger 1894), describió las ventajas del sistema Melan para la construcción de puentes e informó a sus colegas sobre las pruebas del «Comité de bóvedas» y los primeros puentes del sistema Melan en Europa. Según Emperger este tipo de puentes podría alcanzar luces como los puentes de hierro, únicamente se precisaba (Emperger 1894, 457):

The right man and the right place, but also a third one, a right official, who will give his permit. Those



Fig. 3. Bóveda del sistema Melan después de la rotura. (ÖIAV 1895, fig. 12).



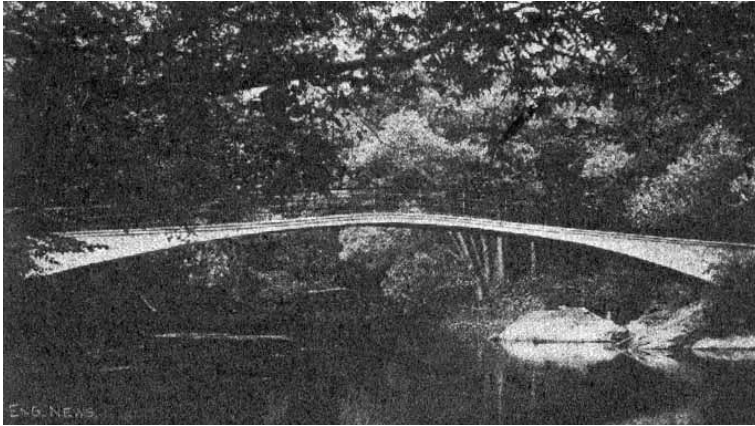


Fig. 4. Puente en Stockbridge, Mass., 1894. (Spitzer y Nowak 1908, 73).

three have not yet met (en Europa) ... and on this account the engineers of this country have a good opportunity to surpass European structures.

Con esta visión Emperger fundó una empresa constructora llamada «Melan Arch. Constr. Company» y construyó los primeros puentes en el verano de 1894. Entre ellos, el puente de Rock Rapids en el estado de Iowa (Moore 1987, 1) y el puente sobre el río Housatonic en Stockbridge, Mass., de 30 m de luz (fig. 4).

Aunque en 1897 Emperger regresó a Viena, su empresa siguió construyendo bajo el nombre «Concrete Steel Engineering Co.» (Foerster 1908, 33-34). En el oeste de EEUU, Edwin Thacher fue representante de Emperger, y construyó el primer puente con arcos de celosía sobre el río Kansas en Topeka, 1897, con 5 luces de 30 m a 38 m (Emperger 1896, 337). Hasta 1924 se construyeron más que 5.000 puentes arco con armadura rígida en EEUU, según documenta Spangenberg (1924, 503).

Fig. 5. Puente en Steyr, Austria, llamado «Schwimmschulbrücke», 1898. (Fritsche 1948, 437). A la derecha, fig. 7. Puente «Chauderon-Montbenon» en Lausanne, 1906 (Melan 1906, 5).

## 4. Desarrollo en Europa

### 4.1. Realizaciones de Joseph Melan

Emperger (1895) publicó su éxito con el sistema Melan en América en la revista de la ÖIAV, lo que fue de-

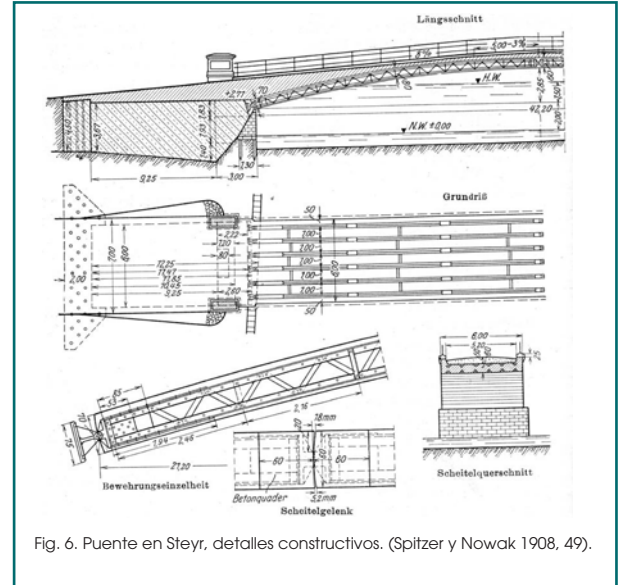
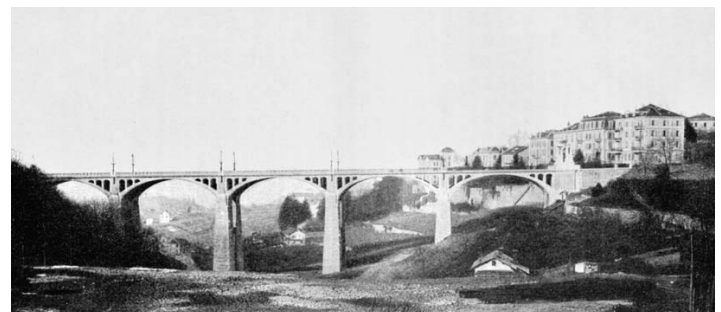


Fig. 6. Puente en Steyr, detalles constructivos. (Spitzer y Nowak 1908, 49).

cisivo para el apoyo de la administración austriaca para la construcción de puentes. En 1898 se construyó en la localidad de Steyr el primer puente europeo de importancia con el sistema Melan. Proyectado por Melan y construido por Brausewetter, era un arco triarticulado de 42 m de luz, muy rebajado, con 1/16 de flecha (fig. 5). La estructura metálica soportaba la mitad de las cargas de construcción, encofrado y hormigón, mientras la otra mitad se recogía mediante puntales.

Con la empresa «Pittel & Brausewetter», Melan realizó numerosos puentes, entre los que destacan: Laibach (Ljubljana), Payerbach, Bielitiz y Döberney (Melan 1911, Prólogo). El sistema Melan recibió la medalla de oro en la exposición universal de París de 1900.

En 1901, Melan ganó el concurso del ayuntamiento de Lausanne para un puente sobre el valle del Flon. El viaducto, con una longitud total de 227 m, unía las zonas norte y sur de la ciudad (fig. 7). La solución planteada por Melan, con la colaboración de los ingenieros «Vallière & Simon» de Lausanne y construcción de «Bellorini & Rochat» es un bello puente de cinco arcos de 28,75 m de luz y ancho de plataforma de 18 m. Melan



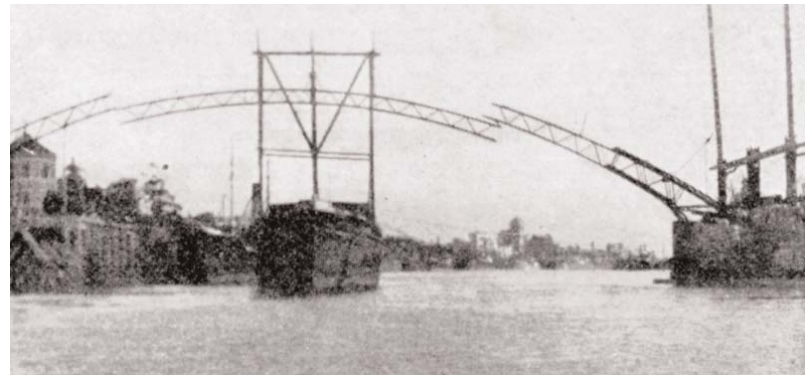
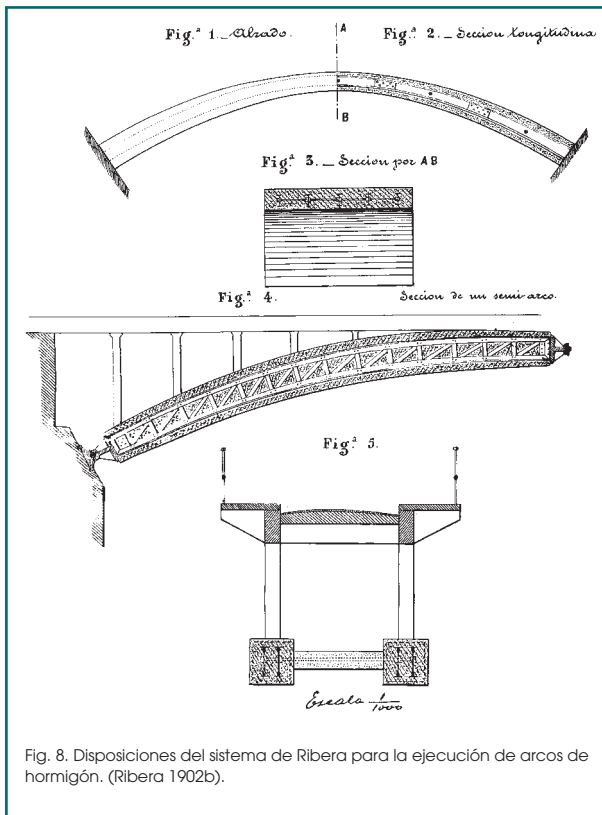


Fig. 9. Montaje del puente de San Telmo, 1922 (Ribera 1932, 87).

El hormigón entonces, una vez fraguado, tendrá que resistir a los esfuerzos producidos por el peso muerto del tablero y el de las sobrecargas.

Como las armaduras metálicas así constituidas resultan de muy poco peso, su montaje sólo requiere la instalación de un andamio muy ligero. Una vez montadas estas cerchas o armaduras metálicas, fácil es suspender de ellas los moldes corredizos que han de servir para verter el hormigón, y esta misma operación resulta entonces muy económica, puesto que no es necesario preocuparse de la situación de los hierros, ni sostener éstos durante el apisonado.

Así, según proyecto de Ribera, los primeros puentes de hormigón construidos en España incorporaban perfiles metálicos embebidos. Entre el buen número de arcos en el entorno de los 30 a 40 m de luz destacan el puente de Golbarado en Santander, el acueducto del Chorro en Málaga y el puente de San Telmo en Sevilla (fig. 9).

La facilidad constructiva tenía en Ribera una vocación económica. Justificaba el coste de los perfiles metálicos como «gasto a favor de la obra», frente al coste y los peligros de las cimbras, «gastos muertos», de importe superior al de la estructura de acero embebida. El método de cálculo que proponía en sus arcos, racional y sencillo, no aprovechaba el trabajo conjunto de los materiales. La sección de hormigón tenía capacidad por sí sola para hacer frente a todas las sollicitaciones de la estructura; de hecho, la sección metálica exenta podría aguantar gran parte de las acciones. Los arcos mixtos de Ribera presentaban, por tanto, mecanismos resistentes redundantes, cuya razón de ser era fundamentalmente constructiva. La estructura metálica, «gasto a favor», aportaba no obstante una seguridad adicional a la obra.

Mientras Melan era consciente del trabajo solidario del hormigón y del hierro en la sección resistente y centró su atención en la capacidad de carga y en la respuesta estructural de la bóveda, Ribera dio prioridad a las ventajas constructivas de la ejecución sin cimbras, aprovechándolas en toda consecuencia.

publicó el análisis completo del puente, según la teoría elástica, para el que aplicó una relación de módulos de elasticidad  $E_{\text{hierro}} \div E_{\text{hormigón}} = 11$ . Las tensiones máximas para el dimensionamiento de la sección del arco fueron calculadas en el estado II, considerando las secciones fisuradas (Melan 1906, 17-24).

#### 4.2. Realizaciones de José Eugenio Ribera

José Eugenio Ribera era conocedor de la diversidad de patentes y sistemas de la época (Ribera 1902a, 3-4): Monier, Cottancin, Coignet, Hennebique, Tedesco, Bonna, Melan, Wayss, Dubois, Boussiro, Mattraï, Glodding, Bordenave, Unciti. Su espíritu constructivo y economicista le llevó a patentar un sistema, «perfeccionando el sistema Melan», para la ejecución de arcos de hormigón armado. El sistema, más que un verdadero «perfeccionamiento» o avance, era una mera adecuación al mercado español de la solución de Melan (Ribera 1905, 2-5):

Consiste en constituir la armadura metálica de las bóvedas por vigas en doble T, sencillas o armadas, que tengan por sí solas resistencia y solidaridad suficiente para sostener el peso muerto del hormigón en que han de envolverse.





Fig. 10. Puente Cappelen Memorial (Cleveland State University Library, página web).

## 5. Realizaciones de gran luz

Hasta la Segunda Guerra Mundial la ejecución de arcos con armadura rígida portante resultaba una solución competitiva con la que se fueron resolviendo vanos de luces cada vez mayores.

### 5.1 Puente Cappelen Memorial, Minneapolis (1923)

Construido entre 1919 y 1923, el nuevo puente sobre el Mississipi en Minneapolis salvaba con tres arcos los 300 m de anchura del cauce. Le dio nombre su proyectista y primer constructor, el ingeniero Frederick W. Cappelen, y sus 122 m de luz del vano central supusieron el récord del mundo de arco de hormigón de la época. El nuevo puente sustituyó a la antigua celosía metálica con una intención de monumentalidad que subrayaba la belleza del paisaje (fig. 10). La ejecución con armadura rígida permitió un montaje sencillo y una gran exactitud en su calibración geométrica (Engineering News Record 1923).

### 5.2 Puente de Echelsbach (1929)

En 1924, en una conferencia ante la junta general del «Deutscher Beton-Verein» en Berlín, el ingeniero alemán Heinrich Spangenberg (1879-1936) explicó las ventajas del sistema Melan, especialmente la posibilidad de evitar las cimbras, aplicado por ejemplo en el puente Grande Eau cerca de Les Planches en Suiza, que proyectó Melan. En ese caso los arcos de acero se colocaron mediante un andamio ligero, que se desmontó al cerrar los arcos, lo que permitió ahorrar un 30 % del coste al aligerar la cimbra. A Spangenberg le preocupaba del proceso cons-

tructivo que no se pudiera determinar exactamente la distribución de las tensiones entre acero y hormigón. Durante la ejecución los esfuerzos del arco crecían al avanzar el hormigonado, y así el hormigón en los sectores primeros, ya fraguados, recibía más tensión que el resto. Para evitar esta incertidumbre propuso un nuevo esquema constructivo. Según él, una precarga de la estructura metálica con una cantidad de grava equivalente al peso de la sección de la bóveda presolicitaría el acero de forma controlada. Durante la construcción se podría sustituir la grava por el hormigón fresco sector a sector, sin variar el estado tensional de la estructura metálica (Spangenberg 1924, 503-04).

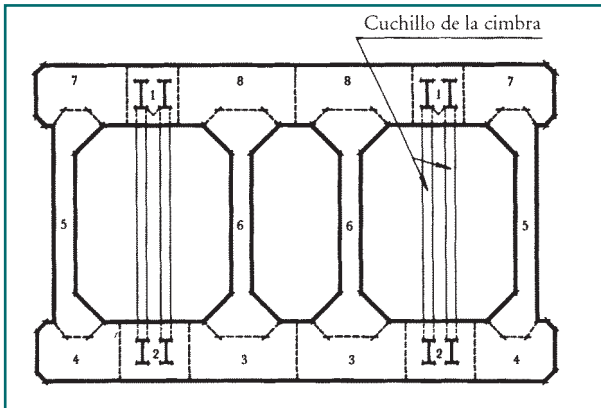
El procedimiento se aplicó en el puente sobre el Ammer en Echelsbach, Baviera, en 1929. El arco, biarticulado, tenía 130 m de luz y 31,8 m de flecha. En la fig. 11 se ve la suspensión del encofrado de la estructura metálica. El puente sobrevivió a la guerra y está en servicio todavía. Una placa informa al público que es el puente de mayor luz construido con el sistema Melan en Alemania (Eggemann, Kurrer 2005, 383).

### 5.3 Arco del Esla (1939)

Eduardo Torroja, discípulo aventajado de Ribera, se enfrentó al mismo problema de ejecución del arco pero con una dimensión mucho mayor en la construcción del gran arco sobre el Esla en Zamora. El proyecto inicial del difunto ingeniero Martín Gil proponía un arco de 209,84 m de luz, 64,75 m de flecha y una altura en clave de 110 m sobre el fondo del embalse, récord de luz de arcos de hormigón en su momento. Su construcción se inició en plena Guerra Civil con el montaje de una cimbra de madera. Interrumpido el avance de las obras durante la guerra, el deterioro de la cimbra hizo imposible su aprovechamiento (Fernández y Navarro 1999, 232).

Fig. 11. Puente de Echelsbach en construcción. (Duell y Gerhart 1929, 57).





Torroja conocía el sistema Melan utilizado por Ribera y era consciente de su trabajo posterior en la sección resistente del arco (Torroja (1958) 1999, 71):

Actualmente ya es práctica común situar la cimbra dentro del propio arco que se va a construir. Además la cimbra se diseña de tal modo que, una vez ha cumplido su cometido inicial, puede continuar funcionando eficazmente como armadura permanente del hormigón.

Pero la magnitud del vano exigiría una cimbra muy pesada si ésta debiera soportar todo el peso propio del arco. La necesidad de definir cuidadosamente el método de hormigonado para que provocara las menores solicitaciones en la cimbra, llevó a Torroja a proyectar una construcción evolutiva en la que se hormigonaban secciones parciales del arco en roscas completas que se incorporaban sucesivamente a la sección resistente (fig. 12; Torroja (1958) 1999, 72):

Se adoptó el sistema de hormigonar el arco del Esla por cordones o capas longitudinales de cada vez mayor espesor, ya que, al fraguar el hormigón colocado con anterioridad, la cimbra podía soportar mayores esfuerzos conforme avanzaba la operación.

Torroja reúne el espíritu constructivo de Ribera y la minuciosidad analítica de Melan culminando ambas aportaciones en la definición precisa de un proceso evolutivo de construcción motivado por un sentido de lo estricto en el empleo de los materiales.

El arco del Esla cierra el primer ciclo de realizaciones basadas en el sistema Melan. Después de la Segunda Guerra Mundial, tanto en España como en EEUU, el sistema Melan dejó de aplicarse. Entre las causas de su abandono cabe citar el encarecimiento del acero, el

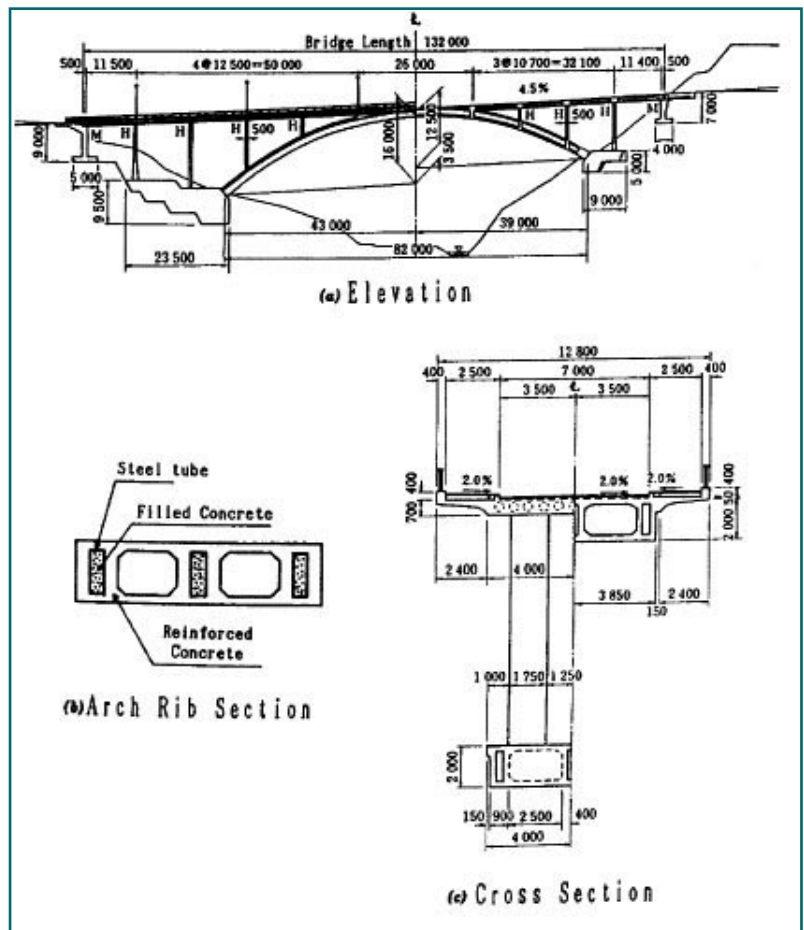
Fig. 12. Sección transversal del arco del Esla, orden de ejecución de los cordones. (Torroja (1958) 1999, 75).

desarrollo y difusión de la tecnología del pretensado, así como la apuesta por otras tipologías estructurales y procesos constructivos: avance en voladizo, empuje, prefabricación, soluciones atirantadas, etc. La armadura rígida portante en la ejecución de arcos quedará olvidada durante casi medio siglo.

## 6. Recuperación de la estructura metálica portante en la ejecución de arcos

A comienzos de los 90, un conjunto de realizaciones japonesas retomó procesos constructivos basados en el sistema Melan (Ohura y Masafumi 1993). Lo que definieron como CLCA (Concrete lining with preerected composite arch) venía a ser una reinterpretación de la construcción evolutiva planteada por Torroja en el arco del Esla. El método consistía en la ejecución de arcos de acero muy ligeros de sección tubular que se rellenaban posteriormente de hormigón conformando una sección mixta. Los arcos mixtos servían posteriormente de estructura portante de los encofrados y vertido del hormigón, quedando fi-

Fig. 13. Puente Joshi en Japón (Kawamura et al. 1990).





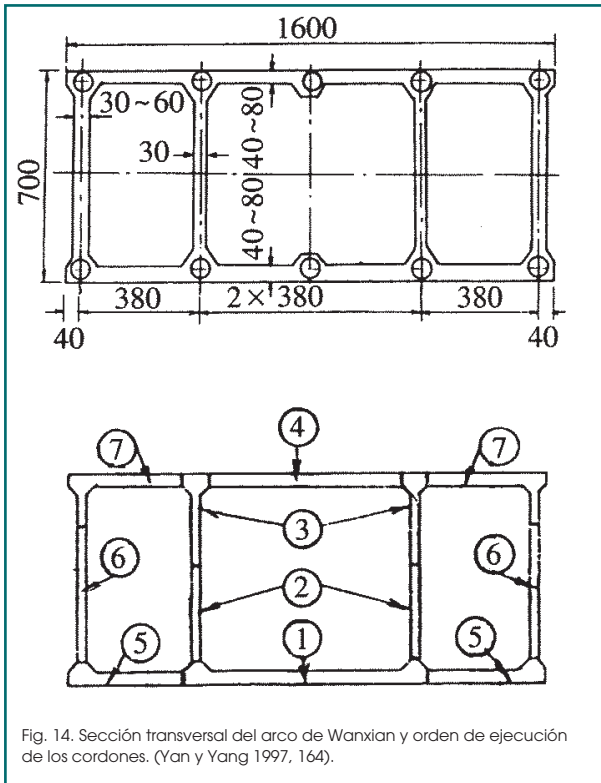


Fig. 14. Sección transversal del arco de Wanxian y orden de ejecución de los cordones. (Yan y Yang 1997, 164).

nalmente embebidos dentro de la sección (fig. 13). Con este procedimiento se construyeron varios puentes de luces medias entre los que destacan las primeras realizaciones de 1990: el puente Ashi en Fukushima, de 58 m de luz, y el puente Joshi en la isla de Sado, de 82 m de luz (Kawamura et al. 1990). Los mismos autores plantearon soluciones similares superando los 200 m de luz.

Pero la mayor luz se alcanzaría en otro país asiático. Con una similitud extraordinaria al proceso constructivo del arco del Esla, en 1997 se construyó en China el actual récord del mundo de luz de puente arco de hormigón. El arco de Wanxian sobre el río Yangtze en la provincia de Sichuan, de 420 m de luz, se montó sobre una autocimbra de estructura metálica de celosía sobre la que se fue hormigonando el arco por roscas completas, conformando una sección mixta evolutiva (Yan y Yang 1997; fig. 14).

Además de algunas realizaciones alemanas e italianas, nos ha llamado la atención un pequeño puente en Austria puesto en servicio en el año 2000: el «Stampfgrabenbrücke» sobre el río Lesach en la provincia de Carintia, de 70 m de luz. Su autor, el veterano ingeniero austriaco Peter Schallaschek, recordó el sistema Melan de sus años de formación cuando se enfrentaba al diseño de la cimbra del arco. El montaje de la estructura metálica mediante abatimiento de los dos semiarcos (fig. 15) y la ejecución sin cimbras resultaron más competitivos (Schallaschek 2003). Aun-



Fig. 15. Puentes sobre el Lesach, abatimiento de la estructura metálica (Peter Schallaschek).



Fig. 16. Arco de Ricobayo (Pérez Fadón 1995, 145).



Fig. 17. Arco del Escudo (Manterola 2001, 173).



que lo más atractivo del proyecto es esa aproximación del autor, tan cercana a la fuente originaria.

Esta recuperación de la armadura rígida portante se debe enmarcar en el contexto del renovado interés por la tipología de arco que se produce en todo el mundo en los años 90. Casi puede decirse que los arcos le arrebataron al puente atirantado su estatus de «tipología estructural del momento». La versatilidad constructiva de la construcción mixta fue en gran parte responsable de esta proliferación. La estructura metálica, aún bajo sollicitaciones de compresión, empezó a resul-

tar competitiva frente al hormigón por su facilidad de ejecución. Las secciones metálicas tubulares podían además hormigonarse en su interior reduciendo las cuantías de acero. La estructura metálica era en estos casos nuevamente portante del vertido del hormigón y definía además el propio encofrado y la superficie vista de la sección (figs. 16 y 17). Estas realizaciones de arcos mixtos pueden entenderse como una actualización del sistema Melan en las que la estructura metálica asume un nuevo protagonismo. La armadura rígida portante ha salido al exterior. ♦

#### Referencias:

- (1) Bernabeu Larena, Jorge. 2005. Precedentes históricos de colaboración entre acero y hormigón en la construcción de puentes. *Actas del IV Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, ed. por S. Huerta. Instituto Juan Herrera, SEHC, COAC, COAATC: 133-142.
- (2) Brausewetter, Victor. 1925. Erinnerungen an die Entstehung und Entwicklung der Beton- und Eisenbetonbauweise in der Zeit von 1867 bis 1925. *Beton und Eisen* 24, 212-15; 250-52.
- (3) Brown, Joyce M. 1967. W. B. Wilkinson (1819-1902) and his place in the History of Reinforced Concrete. *Trans. Newcomen Soc.*, vol. XXXIX: 129-142.
- (4) Duell, Ferdinand; Gerhart, Rudolf: Die Echelsbacher Brücke. Berlin: Ernst & Sohn 1931.
- (5) Eggemann, Holger; Kurrer, Karl-Eugen. 2005. Puentes de arco del sistema Melan. *Actas del IV Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, ed. por S. Huerta. Instituto Juan Herrera, SEHC, COAC, COAATC: 377-388.
- (6) Emperger, Fritz von. 1894. The development and recent improvement of concrete-iron highway bridges. *Transactions, ASCE*, Vol. 31, No. 703, 437-57.
- (7) Emperger, Fritz von. 1895. Betonbrücken, "System Melan", in Nordamerika. *ZÖIAV* 47, 552-53.
- (8) Emperger, Fritz von. 1896. Eine monumentale Betonbrücke. *ZÖIAV* 48, 336-37.
- (9) *Engineering News Record* 1923. Design of 400-Ft. Concrete Arch of the Cappelen Memorial Bridge. Vol. 90, No. 4, 148-52.
- (10) Fernández Ordóñez, José A.; Navarro Vera, José Ramón. 1999. *Eduardo Torroja, Ingeniero*. Colección Monografías núm. 3. Ediciones Pronaos.
- (11) Foerster, M. 1908. Die Grundzüge der geschichtlichen Entwicklung des Eisenbetonbaus. En: *Handbuch für Eisenbetonbau*, Tomo primero. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- (12) Fritzsche, Josef. 1948. Massivbrücken. En: *Der Brückenbau*, Tomo II. Ed por Ernst Melan. Wien: Deuticke.
- (13) Gould, Michael. 2003. The Ritchie System of Reinforcement Concrete. *Trans. Newcomen Soc.*, 73, 2003: 275-291.
- (14) Kawamura, T.; Fujimoto, Y.; William, D.P. 1990. *Wrapping an arch in concrete*. *Concrete International* 12 (11), 26-31.
- (15) Kurrer, Karl-Eugen. 2002. *Geschichte der Baustatik*. Berlin: Ernst & Sohn.
- (16) Manterola Armisen, Javier. 2001. Puentes arco mixtos. *Puentes mixtos, estado actual de su tecnología y análisis*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección Senior, núm. 30: 171-186.
- (17) Melan, Joseph. 1888. Theorie der eisernen Bogenbrücken und der Hängebrücken. In: *Der Brückenbau. Handbuch der Ingenieurwissenschaften*. II. Band. Vierte Abteilung. Eiserne Bogenbrücken und Hängebrücken, bearb. v. J. Melan u. T. Schäffer, hrsgn. v. T. Schäffer u. E. Sonne, 2., umgearb. u. verm. Aufl., 1-144. Leipzig: Engelmann.
- (18) Melan, Joseph. 1892. Neuartige Deckenkonstruktion im Wesen bestehend aus der Verbindung von eisernen Bogenrippen mit Betongewölben. Privileg Nr. 42/3211. K. K. Privilegien Archiv.
- (19) Melan, Joseph. 1906. Die Beton-Eisen-Brücke Chauderon-Montbenon in Lausanne. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn 1906.
- (20) Melan, Joseph. 1911. Einige neuere Brückenausführungen in Eisenbeton nach Bauweise Melan. (zus. mit Konrad Kluge von der Betonbau-Unternehmung Pittel u. Brausewetter). Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn 1911. 2. erw. Aufl.
- (21) Moore, Walter P. 1987. An overview of composite construction in the United States. *Composite Construction in Steel and Concrete*. Proceedings of an Engineering Foundation Conference, New Hampshire, 1987. Edited by C. Dale Bucker and Ivan M. Viest, ASCE: 286-301.
- (22) Nowak, August (Editor). 1923. Joseph Melan zum siebzigsten Geburtstage. Gewidmet von seinen dankbaren Schülern. Leipzig, Wien: Franz Deuticke.
- (23) Ohura, Takashi; Kato, Masafumi. 1993. *Erection and field test of concrete arch bridge applying composite tube*. ASCE. *Journal of Construction Engineering and Management*. Vol. 119, No. 4, 666-680.
- (24) ÖIAV. 1895. Bericht des Gewölbe-Ausschusses. Veröffentlicht in der Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Vereines, 1895, Nr 20-34. Wien: ÖIAV.
- (25) Pérez Fadón, Santiago. 1995. Proyecto y construcción del arco de Ricobayo. *Puentes mixtos, estado actual de su tecnología y análisis*. II Jornadas Internacionales de Puentes Mixtos. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos: 131-145.
- (26) Ribera, José Eugenio. 1902a. *Hormigón y cemento armado, mi sistema y mis obras*, con prólogo de D. José Echegaray. Imprenta de Ricardo Rojas, Madrid.
- (27) Ribera, J. Eugenio. 1902b. Un procedimiento de construcción propio y nuevo, aplicable a bóvedas y puentes de hormigón armado. Patente de Invención, Oficina Española de Patentes y Marcas. 09 de junio de 1902. Expediente 29936.
- (28) Ribera, José Eugenio. 1905. *Puentes metálicos en arco y de hormigón armado*. Revista de Obras Públicas, Madrid.
- (29) Ribera, José Eugenio. 1932. *Puentes de Fábrica y Hormigón Armado*. Tomo IV: Puentes de Hormigón Armado. Madrid: Sucesores de Rivadeneyra.
- (30) Schallaschek, Peter. 2003. Die Stampfgrabenbrücke im Lesachtal/Kärnten – eine Melan-Bogenbrücke. *Stahlbau* 72, 196-99.
- (31) Spangenberg, Heinrich. 1924. Eisenbetonbogenbrücken für große Spannweiten. *Bauingenieur* 5, 461-68; 503-12.
- (32) Spitzer, J. Adolf; Nowak, August. 1908. Bogenbrücken und Überwölbungen. En: *Handbuch für Eisenbeton*. Dritter Band: Bauausführungen aus dem Ingenieurwesen. Dritter Teil: Brückenbau und Eisenbahnbau. Berlin: Ernst & Sohn.
- (33) Torroja Miret, Eduardo (1958) 1999. *Las estructuras de Eduardo Torroja*. Ministerio de Fomento. (Primera edición: F. W. Dodge Corporation, Nueva York.)
- (34) Yan, Guomin; Yang, Zhi-Hua. 1997. Wanxian Yangtze Bridge, China. *Structural Engineering International* 3/1997: 146-165.