

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN EFICIENTES EN COSTO Y PLAZO DE PUENTES METÁLICOS Y MIXTOS

Dipl.-Ing. Reiner Saul.

Socio Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI,
GmbH Stuttgart. Berlin. Dresden. Erfurt. (Alemania).

RESUMEN

Los puentes metálicos y mixtos ocupan solamente una parte pequeña del mercado total de los puentes. No obstante, el peso reducido de los puentes metálicos y la favorable rigidez de los puentes mixtos, dan lugar a muchas aplicaciones interesantes de dichos sistemas, especialmente, si se combinan con métodos de construcción ingeniosos

ABSTRACT

Metallic bridges and those of mixed construction make up only a small part of the total bridge market. The relative lightness of metallic bridges, however, and the good rigidity of the mixed type, give rise to a number of interesting applications of the two systems, particularly if they are combined using ingenious methods of construction.

1. INTRODUCCIÓN

En muchos países, la mayoría de los puentes están contruidos de hormigón pretensado.

No obstante, si se considera:

- ▼ la altura y la longitud de los terraplenes en función del canto del puente.
- ▼ la capacidad de pilas existentes y el dimensionamiento de las cimentaciones en suelos blandos.
- ▼ el comportamiento bajo terremotos.
- ▼ el tiempo de construcción.
- ▼ el costo durante la vida útil del puente incluyendo su reemplazamiento.

El coste global de los puentes metálicos y mixtos puede resultar más económico incluso en situaciones en las que la superestructura de hormigón pretensado aislada fuese más económica.

En el capítulo 2 se dan ejemplos de diseños eficaces de costo y en el capítulo 3 se presentan métodos de construcción especiales que permiten reducir el tiempo de construcción de puentes metálicos y mixtos en comparación con el tradicional método de montaje "por segmentos".

2. DISEÑO

2.1 PUENTES METÁLICOS

2.1.1 Generalidades

En muchos países, los puentes con losa ortótropa han sido el tipo empleado para grandes luces hasta aproximadamente 1960. Debido a su costo relativamente elevado han sido sustituidos por puentes de hormigón pretensado y puentes mixtos. Hoy en día, los puentes con placa ortótropa

Continuará en el próximo artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de septiembre de 1998.

Recibido en ROP:
junio de 1998

Figura 1. Puente Galata en Estandul, Turquía.
a) Conjunto.
b) Sección del puente basculante.

pa se construyen solamente en situaciones especiales; p. e. como puentes móviles, puentes con canto muy reducido y puentes con luces muy grandes, especialmente en casos de puentes colgantes.

2.1.2. Puentes móviles

2.1.2.1.

Generalidades

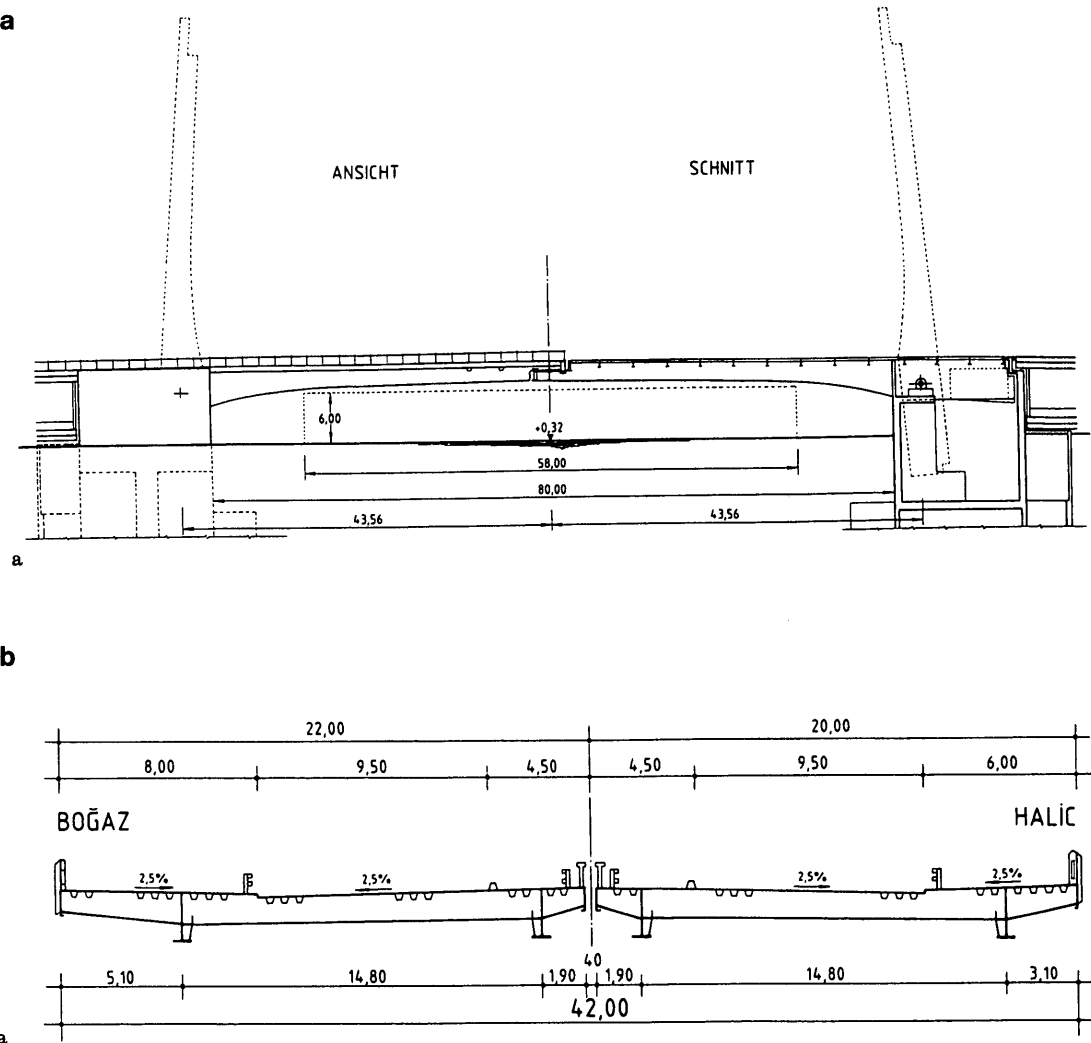
Para puentes móviles –especialmente para puentes levadizos y basculantes– el peso reducido de la placa ortótropa es una ventaja decisiva pues reduce el contrapeso y las masas a mover.

2.1.2.2. Ejemplo: Puente Galata en Estandul, Turquía. (Figura 1).

El nuevo puente Galata cruza el “Cuerno de Oro” con una longitud de 465 m y un ancho de 42 m. Consta de:

- ▼ el puente principal basculante, con luz de 80 m; tiene 2 x 2 hojas con sección T y placa ortótropa.
- ▼ las pilas.
- ▼ los viaductos de acceso, de doble piso y luces de 8 x 22,3 m.
- ▼ los estribos.

Debido a la presencia de agua con profundidad hasta 40 m y suelos blandos en otros 40 m, el puente está cimentado mediante pilotes metálicos hincados, con longitudes de 85 m y



diámetro de 2 m. Las hojas basculantes emplean unos 1.600 t de peso y los pilotes 7.700 t. de acero.

Dicha alternativa fue considerablemente más económica y funcional que la solución licitada, un puente flotante con pontones de hormigón armado.

2.1.3. Puentes de esbeltez extrema

La esbeltez de puentes carreteros de canto variable resulta:

Viga	Canto	
	Canto	Apoyos
Placa ortótropa	L/60	L/30
Viga mixta	L/45	L/24
Hormigón	L/40	L/20

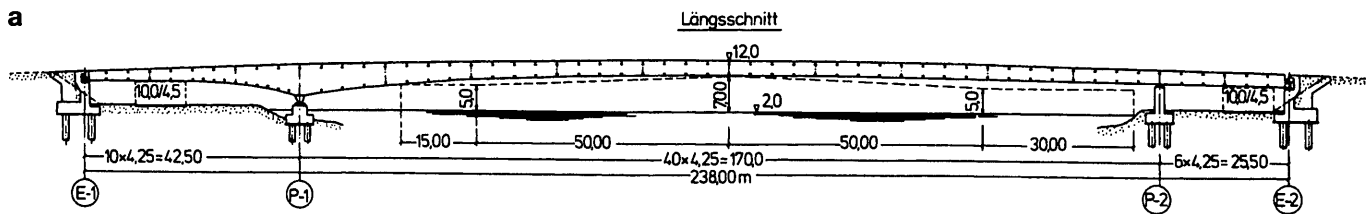


Figura 2. Puente La Cartuja en Sevilla, España.
a) Conjunto. b) Sección.

de 26,4 m a 52,8 m, agregándose un tercer plano de cables. Para evitar tensiones inadmisibles en el cable central, la losa de hormigón fue reemplazada por una placa ortótropa y las rios tras transversales se modificaron en tal forma que parte de la carga fue transferida desde el cable central a los dos cables externos.

Debido a este proceso, la ocupación de terreno se pudo reducir al mínimo lo cual fue decisivo para la aceptación pública del ensanchamiento.

2.2. PUENTES MIXTOS

2.2.1. Generalidades

Los puentes mixtos combinan las ventajas de los puentes metálicos y de los puentes de hormigón: la robustez y el menor costo de la losa de hormigón armado con el peso reducido de las vigas de acero.

En algunos países, la aplicación de dicho sistema se veía impedido por el requerimiento de limitar la tensión de tracción en la luz de hormigón del tablero sobre las pilas intermedias mediante pretensado, o mediante elevación de las vigas metálicas y posterior descenso de las vigas mixtas. Debido a la fluencia lenta del hormigón, ambos procedimientos resultan poco eficientes y, consecuentemente, caros.

Ensayos estáticos y dinámicos con vigas mixtas unidas en las zonas de apoyos (tracción en la losa de hormigón armado) han demostrado que:

- ▼ las fisuras del hormigón son uniformemente distribuidas con espaciamiento de unos 15 cm, y no superan el ancho de 0,2 mm al final de un ensayo de fatiga con $2 \cdot 10^6$ ciclos.
- ▼ las tensiones de tracción de la armadura y del cordón superior de la viga metálica, así como las deformaciones, quedan por debajo de los valores válidos para el hormigón totalmente fisurado.
- ▼ la viga puede cargarse después del ensayo de fatiga hasta el momento plástico.

Como consecuencia de dichos ensayos, el criterio de "limitación de la tensión de tracción en el hormigón" fue reemplazado por la "limitación del ancho de fisura", lo que mejoró notablemente la economía de los puentes mixtos y dio lugar a numerosas aplicaciones de dicho tipo de puentes.

En los casos en los que las condiciones locales requieren esbelteces extremas y no se permiten arcos, tirantes, etc. por encima de la calzada, los puentes metálicos con placa ortótropa son entonces la única solución viable.

2.1.3.2. Ejemplo: Puente de La Cartuja en Sevilla, España. (Figura 2).

El puente de La Cartuja sobre el Guadalquivir, construido para la Expo 92 en Sevilla, tiene una luz principal de 170 m y luces laterales de 42,5 m y 25,5 m respectivamente. Tiene canto variable con esbelteces notables de 1/57 en la luz y 1/28 sobre la pila en el lado de la Expo.

Fue ganador del primer premio en una competición internacional de proyecto y construcción.

2.1.4. Puentes colgantes

En puentes colgantes, el peso de la superestructura incide más que linealmente en el peso de los cables y en las dimensiones de los estribos. El peso reducido de la placa ortótropa es entonces decisivo para la economía de los puentes colgantes, especialmente para luces muy grandes.

2.1.4.2. Ejemplo: Puente Köln-Rodenkirchen, Alemania. (Figura 3)

Dicho puente colgante, con luz principal de 378 m, fue construido entre 1938 y 1941. Después de su bombardeo y destrucción en 1945, se reconstruyó entre 1951 y 1954 con un tablero mixto. De 1990 a 1994, el ancho del puente se duplicó

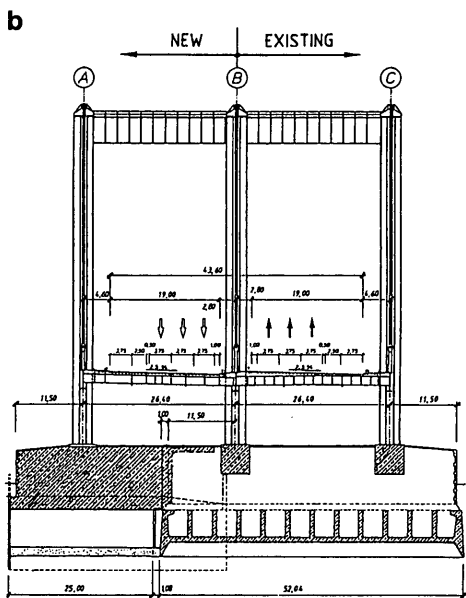
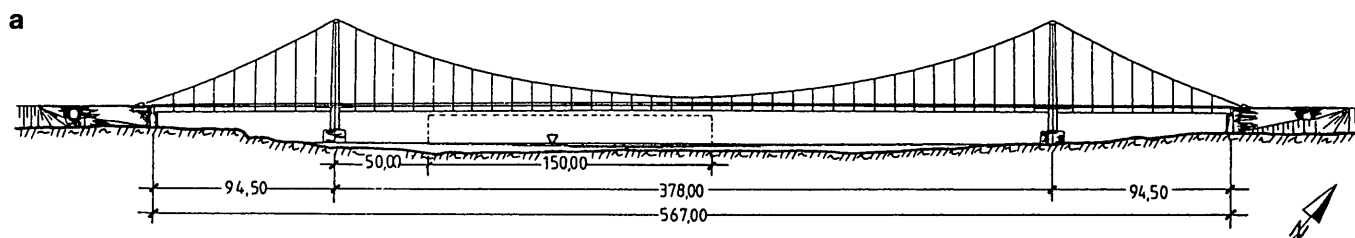


Figura 3. Puente Köln-Rodenkirchen sobre el Río Rin, Alemania. a) Conjunto. b) Torres. c) Secuencia de construcción.

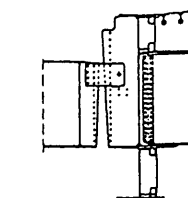
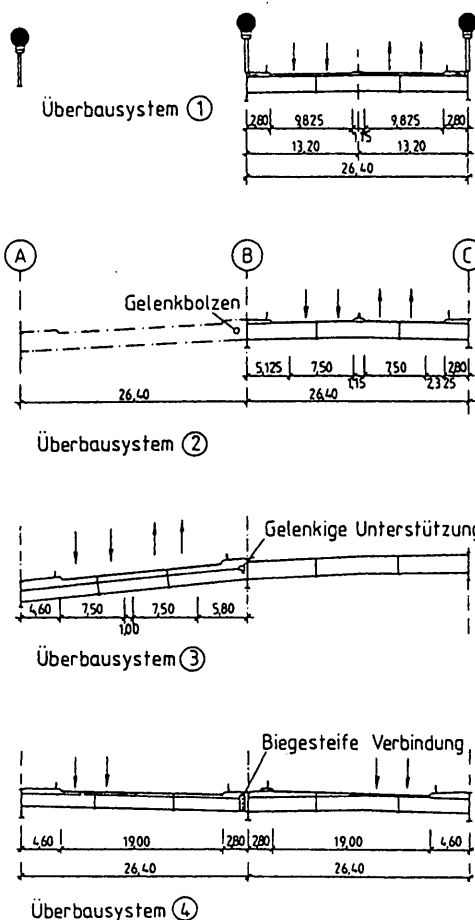
2.2.2. Reemplazamiento de puentes sobre valles

2.2.2.1. Generalidades

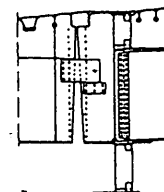
Para el reemplazamiento de puentes sobre valles, los puentes metálicos y mixtos tienen la ventaja de que su peso —considerablemente inferior al mismo caso de puentes de hormigón— permite mantener las viejas pilas de mampostería que en muchos lugares son protegidas como herencia cultural.

2.2.2.2. Lanzamiento transversal del puente para una calzada: Puente de autopista sobre el valle del río Werra, Alemania. (Figura 4).

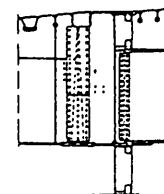
Este puente de autopista cruza el valle del río Werra con luces de 80 – 96 – 96 – 80 – 64 = 416 m y tenía un ancho total de 22,3 m y vigas de alma llena con canto de 6 m. La intensifica-



a Während der Montage des neuen Decks A-B



b Unter Verkehrsbelastung auf dem neuen Deck A-B



c Biegesteife Verbindung im endgültigen System

ción del tráfico requirió a principios de los años 80 el ensanche del puente a 37,5 m. La nueva superestructura tiene una viga cajón trapezoidal y una losa de hormigón armado longitudinalmente y pretensada transversalmente. El canto de 5,85 m corresponde a 1/16,4 de las luces más grandes.

Al principio se construyó la primera superestructura nueva —para el tráfico hacia el sur— al oeste del puente existente y luego el tráfico completo se desvió a la misma. Después del desmontaje de las superestructuras viejas y la remodelación de los estribos y de las pilas, la segunda superestructura nueva se pudo construir en su eje definitivo. Después, el tráfico completo se

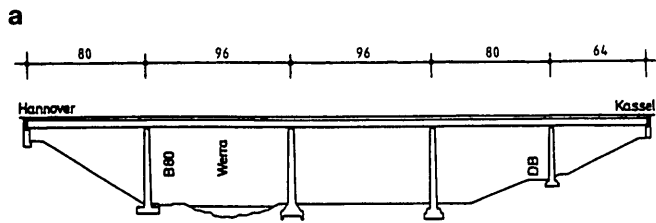
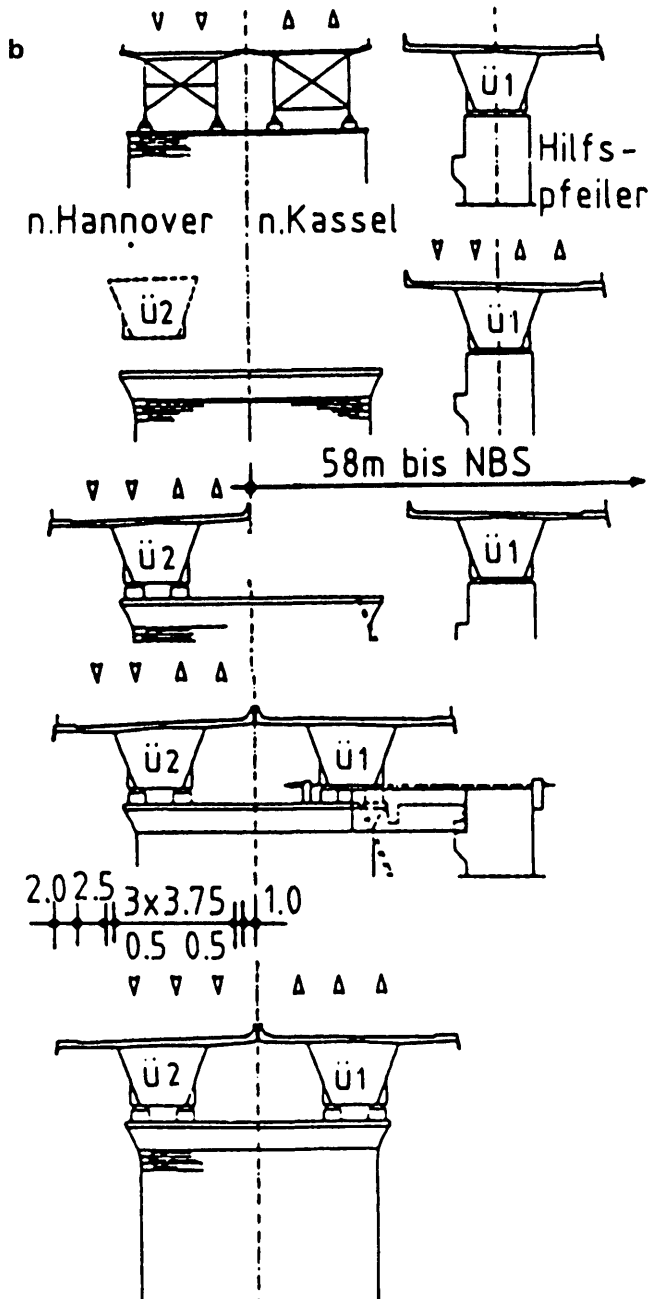


Figura 4. Puente de autopista sobre el valle del río Werra, Alemania. a) Conjunto. b) Secuencia de construcción.

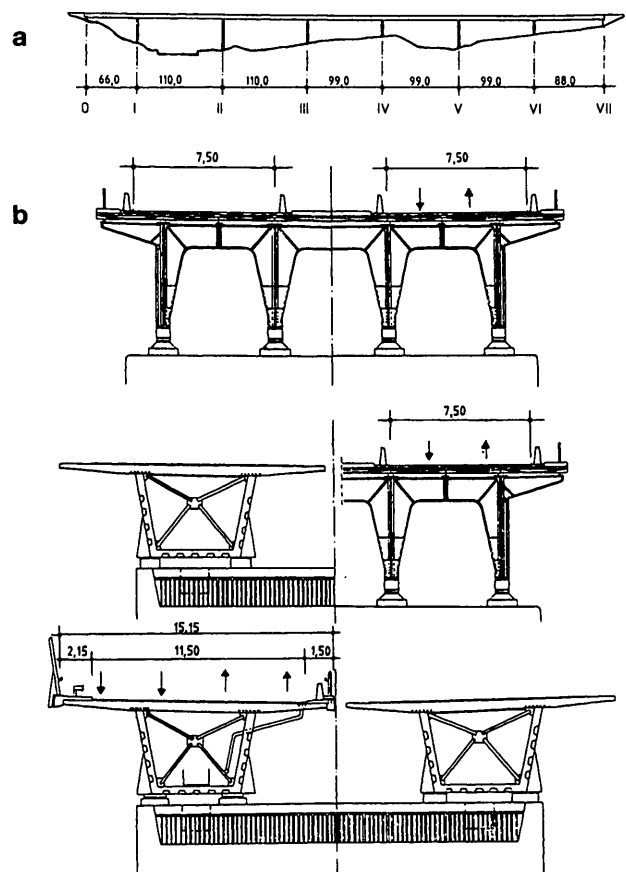


desvió a la misma y la primera superestructura se ripó transversalmente hasta su posición definitiva.

2.2.2.3. Construcción de la primera superestructura nueva después del desmontaje parcial del puente existente: Puente de autopista Wilkau-Haßlau, Alemania. (Figura 5).

El puente, construido en 1938/39, cruza el valle del río Zwickauer Mulde con luces de 69,9 – 110,0 – 110,0 – 99,0 – 99,0 – 99,0 – 88,0 = 674,9 m. La superestructura tenía un ancho de 24,5 m, un canto de 6,2 m = $L/17,7$ y 4 vigas principales de alma llena. Dado que la autopista adyacente no se había habilitado totalmente, el tráfico pasaba solamente por la calzada norte del puente. El puente nuevo tiene un ancho de 30 m y, como en el caso anterior, dos superestructuras con viga cajón trapezoidal y un canto de 5,08 m = $L/21,6$. En un primer paso, el medio puente sin tráfico fue desmantelado. Luego, la primera mitad de los estribos y de los cabezales de las pilas se adaptaron a la situación nueva y el primer medio puente se construyó en su eje definitivo. El segundo medio puente y las partes correspondientes de estribos y pilas se construyeron como el primero.

Figura 5. Puente de autopista Wilkau-Haßlau, Alemania. a) Conjunto. b) Secuencia de construcción.



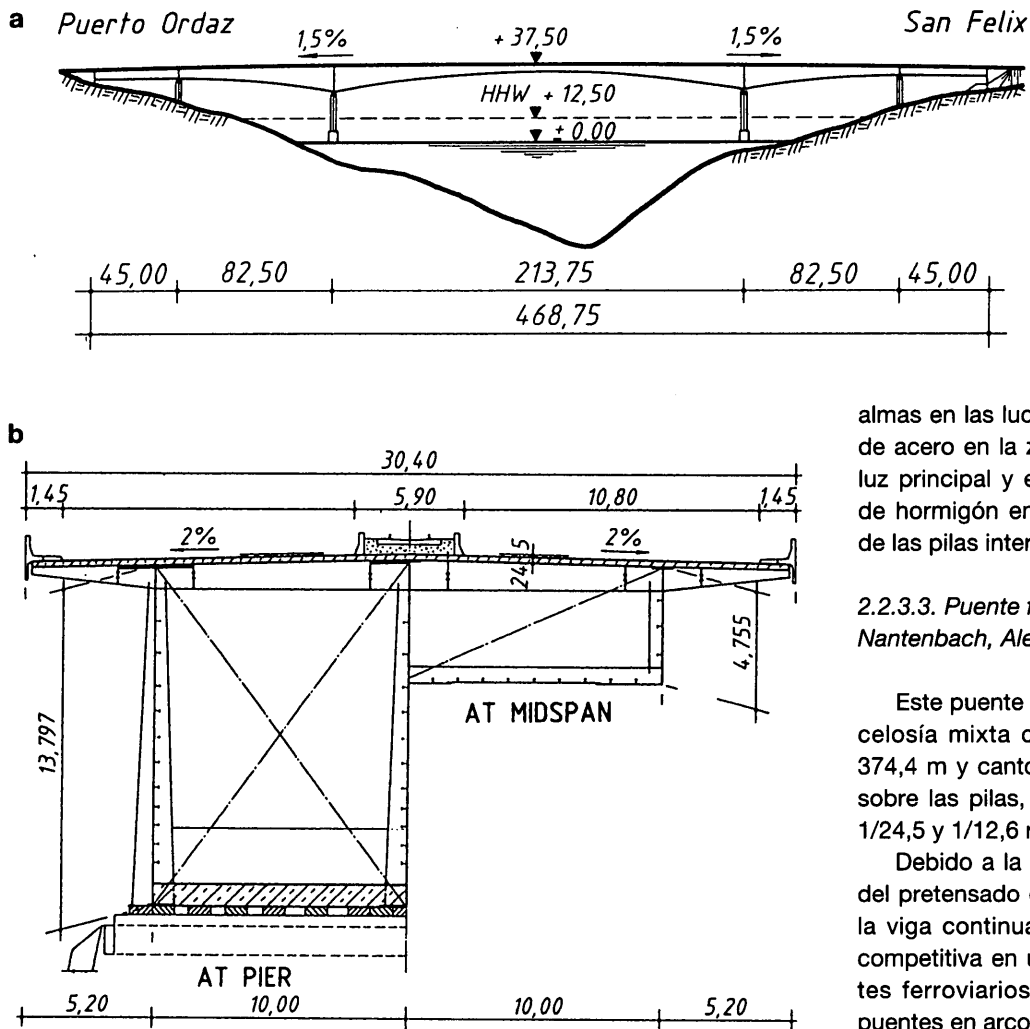


Figura 6. Puente carretero-ferroviario sobre el río Caroni en Ciudad Guayana, Venezuela. a) Conjunto. b) Secciones.

pilas principales, correspondiendo a esbelteces de 1/43 y 1/15 respectivamente. La sección es una viga cajón de 2 células en la luz principal y las luces laterales grandes, y una viga I con 3

almas en las luces pequeñas. El cordón inferior es de acero en la zona de momentos positivos de la luz principal y en las luces laterales pequeñas; y de hormigón en la zona de momentos negativos de las pilas intermedias.

2.2.3.3. Puente ferroviario sobre el río Main en Nantenbach, Alemania. (Figura 7).

Este puente ferroviario de 2 vías es una viga de celosía mixta con luces de $83,2 - 208 - 83,2 = 374,4$ m y cantos de 8,5 m en el centro y 16,5 m sobre las pilas, correspondiendo a esbelteces de 1/24,5 y 1/12,6 respectivamente.

Debido a la doble acción mixta y el abandono del pretensado de la losa superior sobre las pilas, la viga continua mixta ha sido económicamente competitiva en un rango de luces que para puentes ferroviarios venía siendo dominado por los puentes en arco y tableros con losa ortótropa.

2.2.3. Puentes con doble acción mixta

2.2.3.1. Generalidades

Los puentes con doble acción mixta tienen –además de la losa del tablero– un cordón inferior de hormigón en las losas sobre las pilas. Dado que el cordón inferior de una viga con canto variable típica está comprimido aproximadamente en la quinta parte de la luz, el peso adicional en dicha zona afecta los esfuerzos en la estructura solo marginalmente.

2.2.3.2. Puente carretera-ferroviario sobre el río Caroni en Ciudad Guayana, Venezuela. (Figura 6).

Dicho puente tiene 2 calzadas de 3 carriles cada una y un ferrocarril central de 1 vía. La estructura principal es una viga continua con luces de $45 - 82,5 - 213,75 - 82,5 - 45 = 468,75$ m. El canto es de 5 m en el centro y de 14 m sobre las

2.2.4. Puentes en arco (vigas Langer)

En puentes en arco autoanclados, la losa trabaja a tracción debido al empuje horizontal del arco y en flexión y cortante debido a las cargas locales entre las vigas riostra transversales. Ensayos estáticos y dinámicos efectuados con losas de hormigón armado bajo tracción, flexión y corte han demostrado que –con la fuerte armadura necesaria para la flexotracción– la capacidad a cortante es mucho mayor que lo indicado en los códigos debido a que el cortante está transmitido –hasta la rotura– por el mecanismo de indentación de los granos y no por el efecto pasador de la armadura.

2.2.4.2. Puente carretero sobre el río Elbe in Tangermünde, Alemania. (Figura 8).

Este puente carretero de 2 calzadas cruza el río con una luz de 185 m y bajo un ángulo de 84° . Los arcos son ligeramente inclinados y tienen altura de $28 \text{ m} = L/6,6$. Las vigas

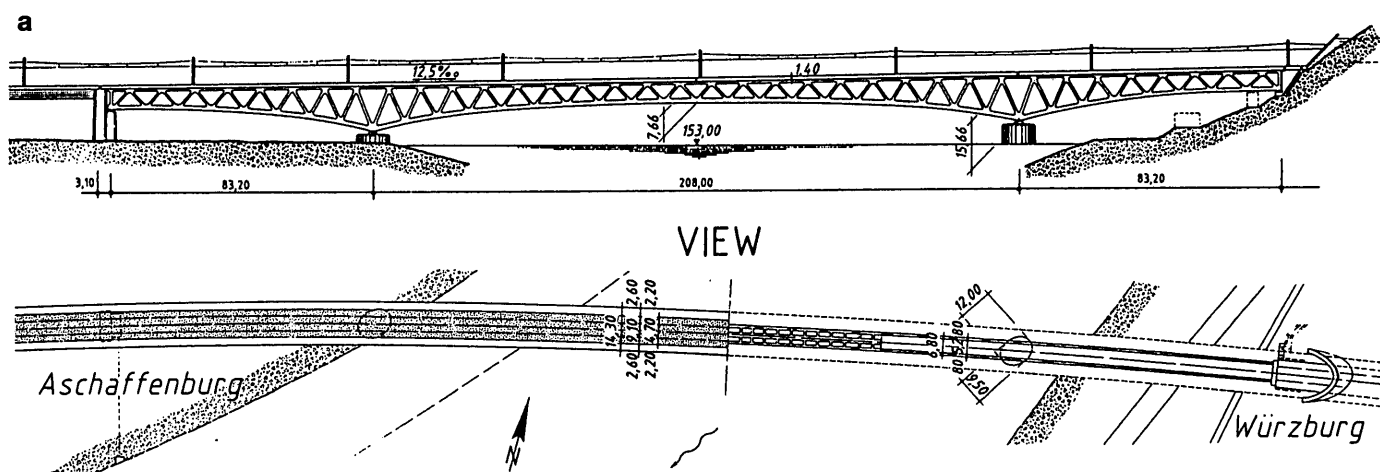
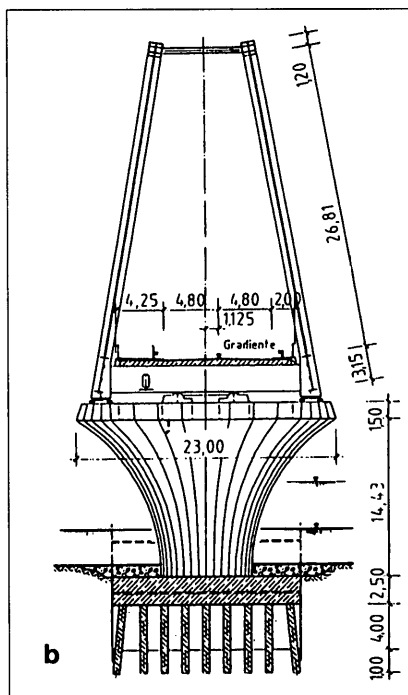
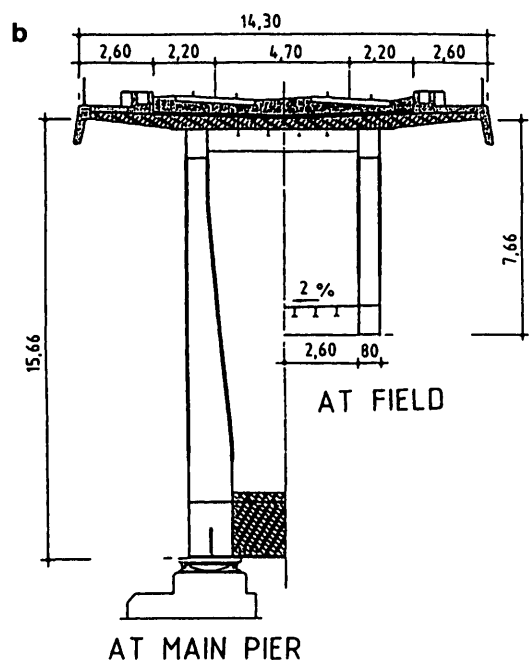


Figura 7. Puente ferroviario sobre el río Main en Nantenbach, Alemania. a) Conjunto. b) Secciones.



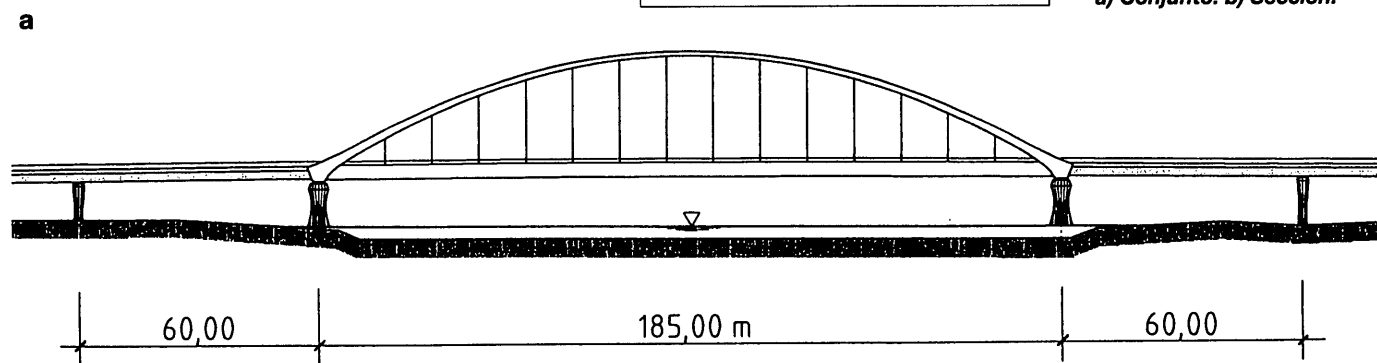
principales tienen un canto de 3,15 m y las vigas transversales –espaciadas a 3,9 m– de 1,8 m. La losa tiene un espesor de 30 cm.

2.2.5. Puentes atirantados

2.2.5.1. Generalidades

Los puentes atirantados con tablero mixto son un sistema económico para luces entre 400 m y 700 m. Para luces hasta 400 m, un tablero de hormigón es más económico y para luces superiores a 700 m, tableros metálicos.

Figura 8. Puente carretero sobre el río Elbe en Tangermünde, Alemania. a) Conjunto. b) Sección.



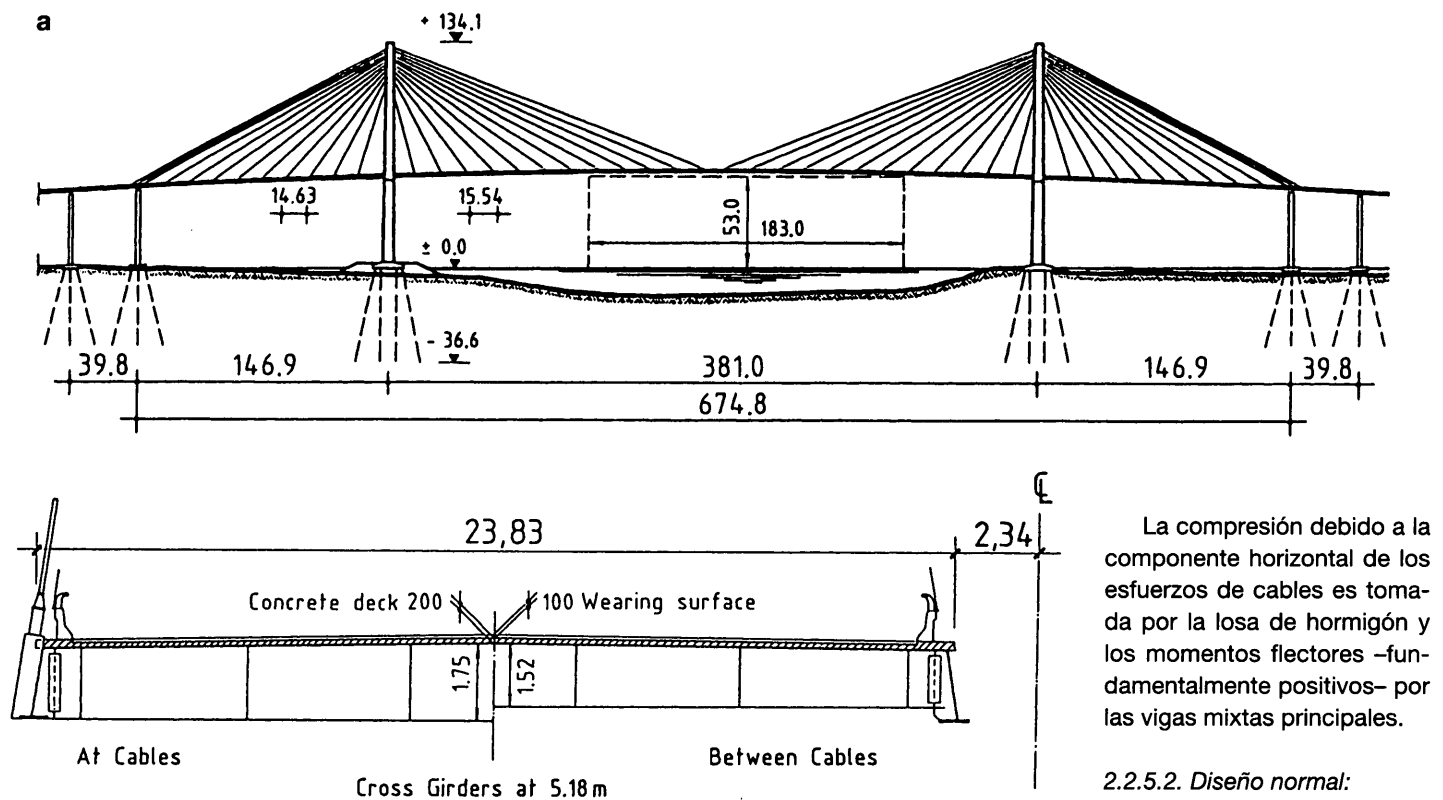
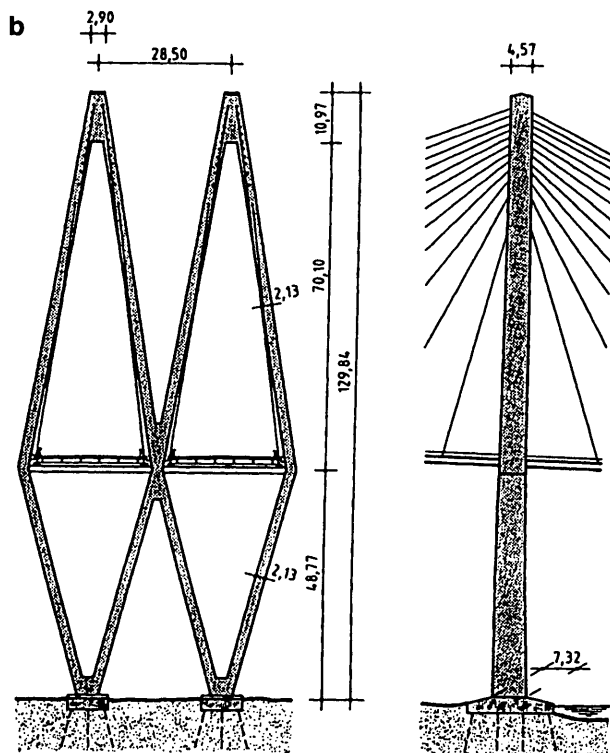


Figura 9. Puente en Baytown, Texas, EEUU. a) Conjunto. b) Sección.



El puente de 8 vías tiene luz principal de 381 m y luces laterales de 146,9 m. Debido al ancho total de 48 m, las dos calzadas tienen superestructuras independientes con ancho de 24 m y vigas principales con canto de 1,9 m; vigas transversales separadas 5 m y losa de espesor de 20 cm.

2.2.5.3. Tablero y tráfico mixtos: Puente Kap Shui Mun en Hong Kong. (Figura 10).

Dicho puente tiene una tablero de 2 pisos, una luz principal de 430 m y luces laterales de 2 x 80 m en cada lado. El tráfico carretero está en el piso superior y el tráfico ferroviario, más los carriles de emergencia, en el piso inferior. El tablero es mixto en los 387 m centrales y de hormigón pretensado en el resto.

3. CONSTRUCCIÓN

3.1. GENERALIDADES

Los puentes metálicos y la estructura metálica de los puentes mixtos se han montado tradicionalmente “por segmentos” mediante grúas derrick; es decir, que cada elemento nuevo se conecta a la estructura ya montada en su posición definitiva. Dicho procedimiento requiere mucho trabajo y mucho tiempo.

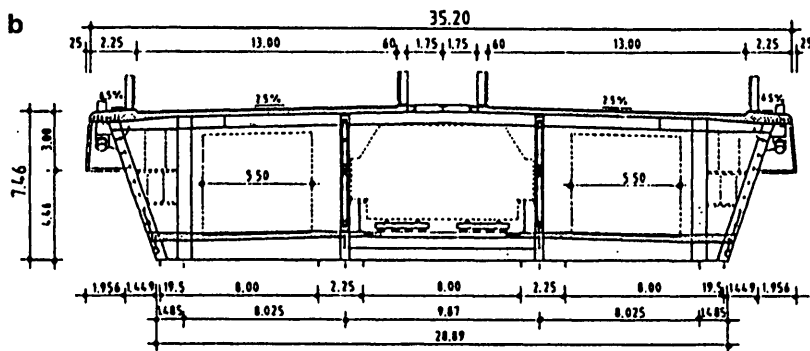
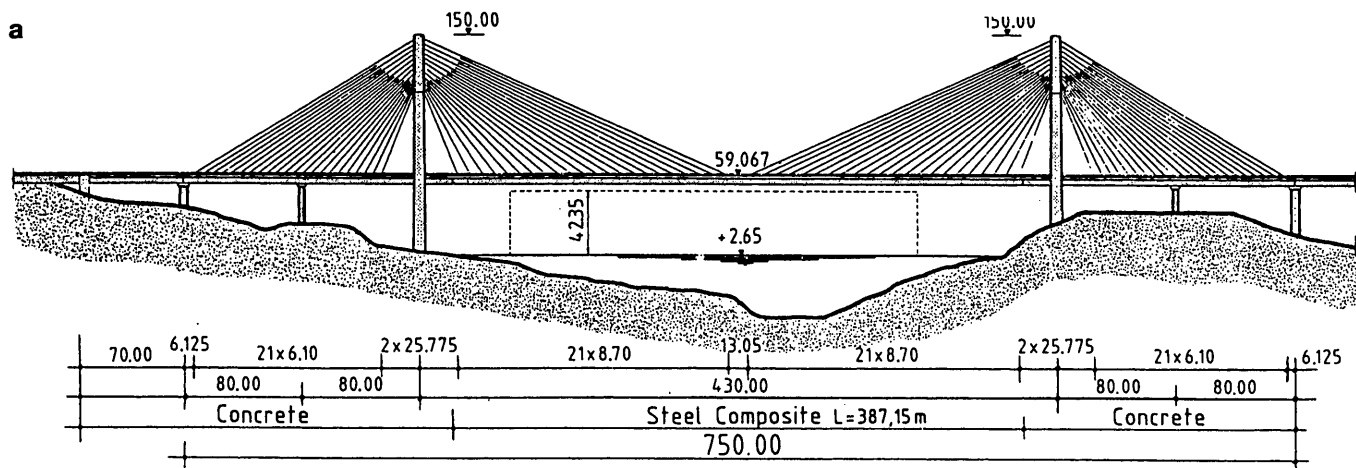


Figura 10. Puente Kap Shui Mun en Hong Kong.
a) Conjunto. b) Sección de la luz principal.

Ambos, trabajo y tiempo, se pueden reducir considerablemente si la estructura metálica se ensambla fuera de su posición definitiva y luego se lleva a la misma mediante empuje, izaje, rotación etc.

3.2. EMPUJE

3.2.1. Estructura Metálica: Puente de autopista sobre el valle del río Werra, Alemania. (Figura 11).

Debido a consideraciones ambientales, la estructura metálica fue empujada sin pilas auxiliares intermedias y luego la losa de la calzada se hormigonó con la secuencia de "paso del peregrino"; es decir, primero en los vanos y luego sobre las pilas.

3.2.2. Sección Completa: Puente de autopista Wilkau-Haßlau, Alemania. (Figura 12).

Dado que se han requerido pilas auxiliares para el desmontaje del puente existente, la sección completa fue empujada sobre las pilas definitivas y las auxiliares. Esto permitió reducir el tiempo de construcción de la superestructura en aproximadamente un 50 %.

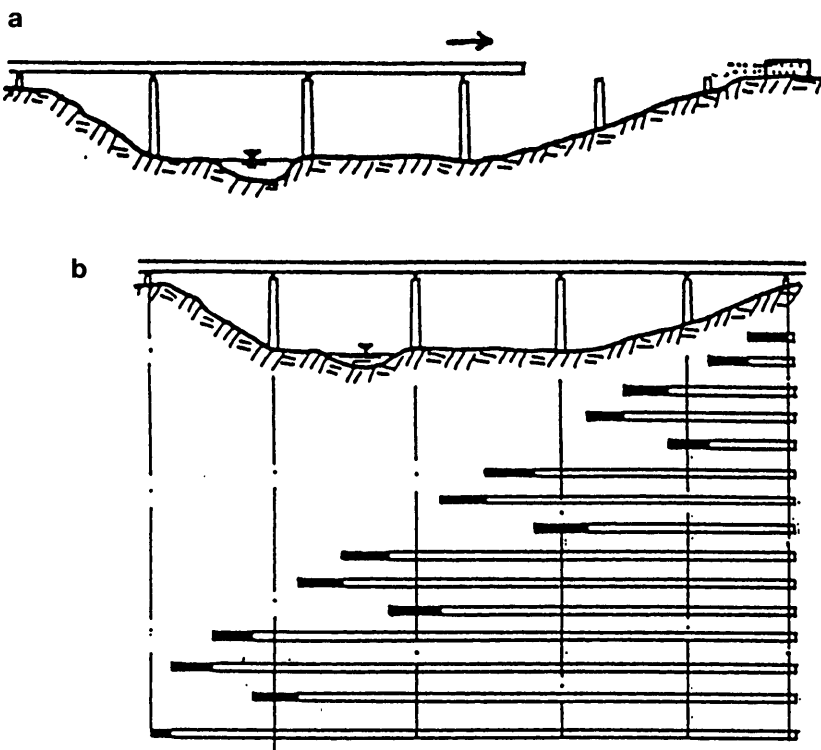


Figura 11. Puente de autopista sobre el valle del río Werra, Alemania.
a) Lanzamiento de la estructura metálica. b) Secuencia de hormigonado de la losa.

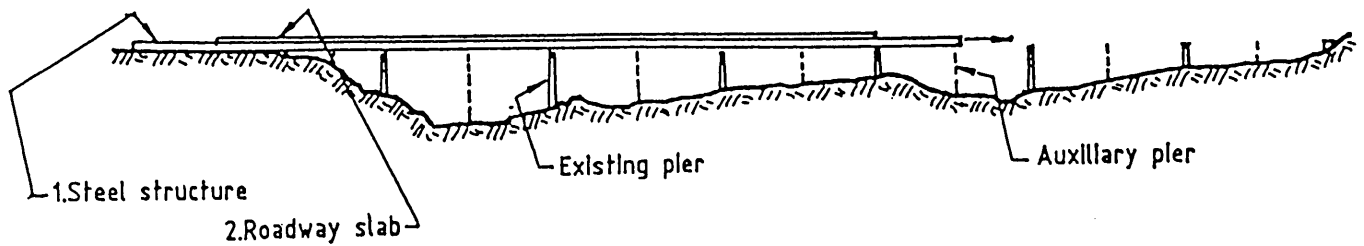
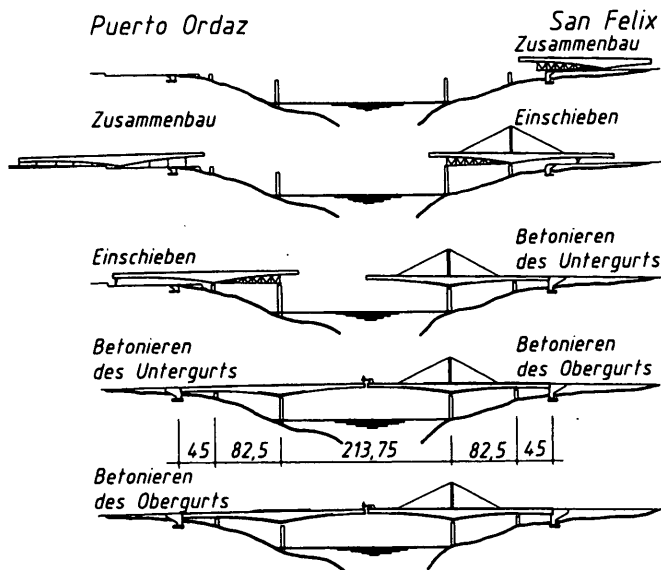


Figura 12. Puente de autopista Wilkau-Haßlau, Alemania. Construcción de la superestructura.



3.2.3. Viga de canto variable: Puente carretero-ferroviario sobre el río Caroni en Ciudad Guayana, Venezuela. (Figura 13).

Para evitar la soldadura in situ de los cordones superiores, con sección de hasta 3.000 x 85 mm, en un montaje de voladizos sucesivos, la empresa constructora decidió ensamblar la estructura metálica detrás de los estribos y luego empujarla. Durante el lanzamiento, la popa de la estructura metálica se soportó con una pila auxiliar fijada al puente y deslizando sobre una pista, mientras que la luz principal deslizó sobre el estribo y las pilas, compensándose el canto variable mediante una viga de celosía auxiliar. Antes de hormigonar la losa inferior en longitudes de aproximadamente 14 m, la punta de la

Figura 13. Puente carretero-ferroviario sobre el río Caroni en Ciudad Guayana, Venezuela. Secuencia de construcción..

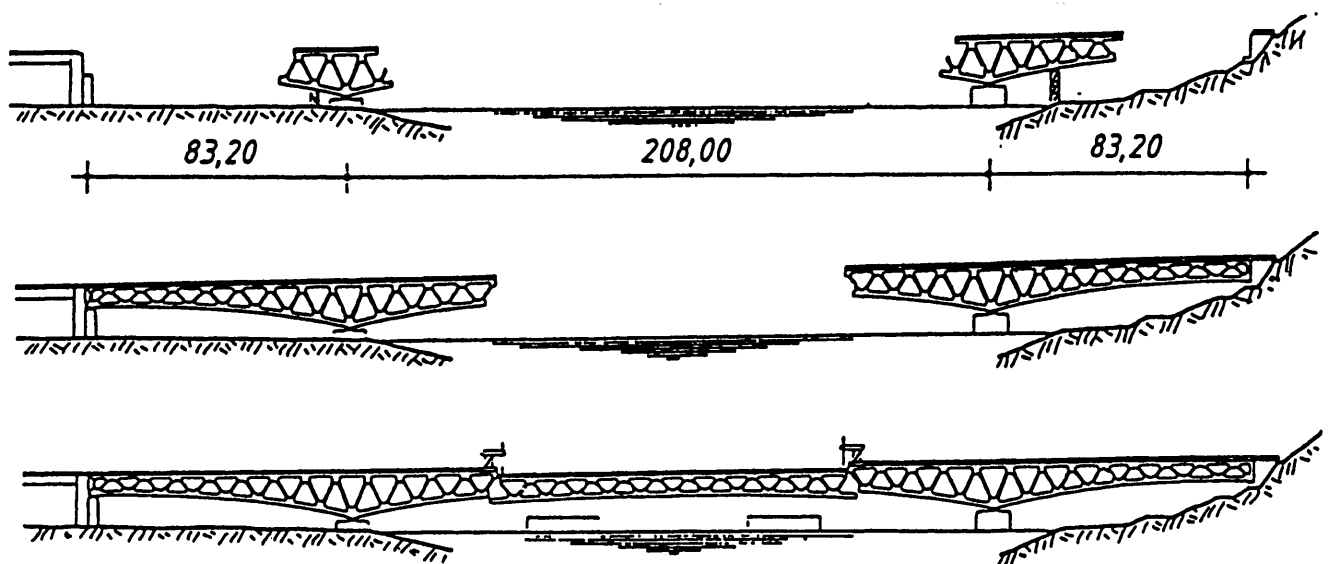


Figura 14. Puente ferroviario sobre el río Meno en Nantenbach, Alemania. Secuencia de construcción.

estructura tuvo que izarse para reducir las tensiones en la misma a prácticamente cero. Dicha elevación se realizó en el lado de San Félix mediante un sistema de atirantado auxiliar y en el lado de Puerto Ordaz mediante un sistema de acople en el centro.

3.3. IZAJE

3.3.1. Izaje parcial: Puente ferroviario sobre el río Main en Nantenbach, Alemania. (Figura 14).

Las luces laterales y los primeros 44 m metros de la luz principal se han montado con grúa sobre orugas con capacidad de 800 t. Después del hormigonado de la losa inferior, la parte central de la luz principal, con una longitud de 140 m y peso de 1600 t, se llevó flotando y se izó. Una vez cerradas las uniones, la losa superior se hormigonó desde el centro hacia los estribos.

3.3.2. Izaje Completo: Puente Galata en Estambul, Turquía. (Figura 15).

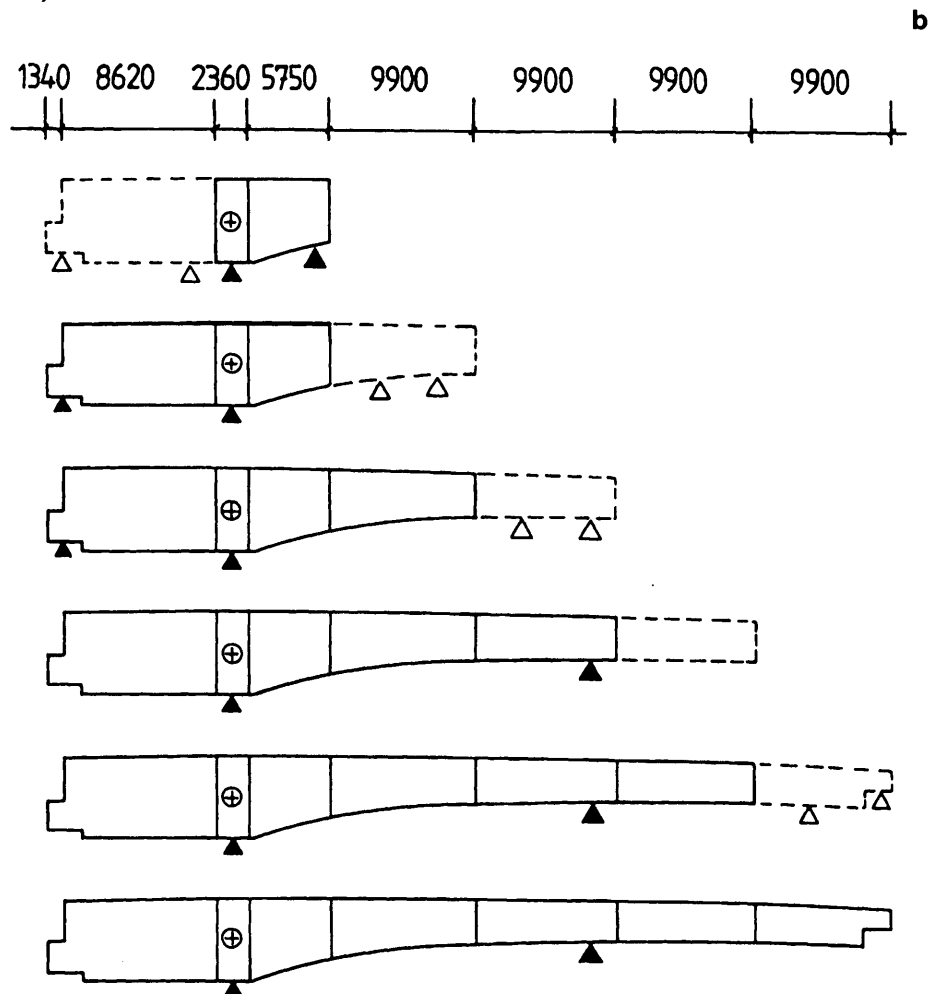
Las 4 hojas se ensamblaron unos 30 km lejos de la obra. Luego, 2 hojas, con un peso de 450 t cada una, se trasladaron a un pontón de 15.000 t, se flotaron hasta la obra y se fijaron provisionalmente mediante gatos y tendones.

3.4. LANZADO E IZADO: PUENTE KAP SHUI MUN EN HONG KONG, CHINA. (Figura 16).

Las luces laterales se construyeron con el proceso de empuje acompasado, con una longitud de las secciones del orden de 18,3 m, estando constituido el pescante de avance frontal por los primeros 3 tramos de la estructura metálica de la luz principal. El resto de la superestructura mixta de la luz principal –o sea la estructura metálica más las 2 losas–, con un peso de unos 500 t, se montó en voladizos sucesivos, simultáneamente desde ambas pilas.



Figura 15. Puente Galata en Estambul, Turquía. a) Flotado de una hoja. b) Secuencia de armado en tierra.



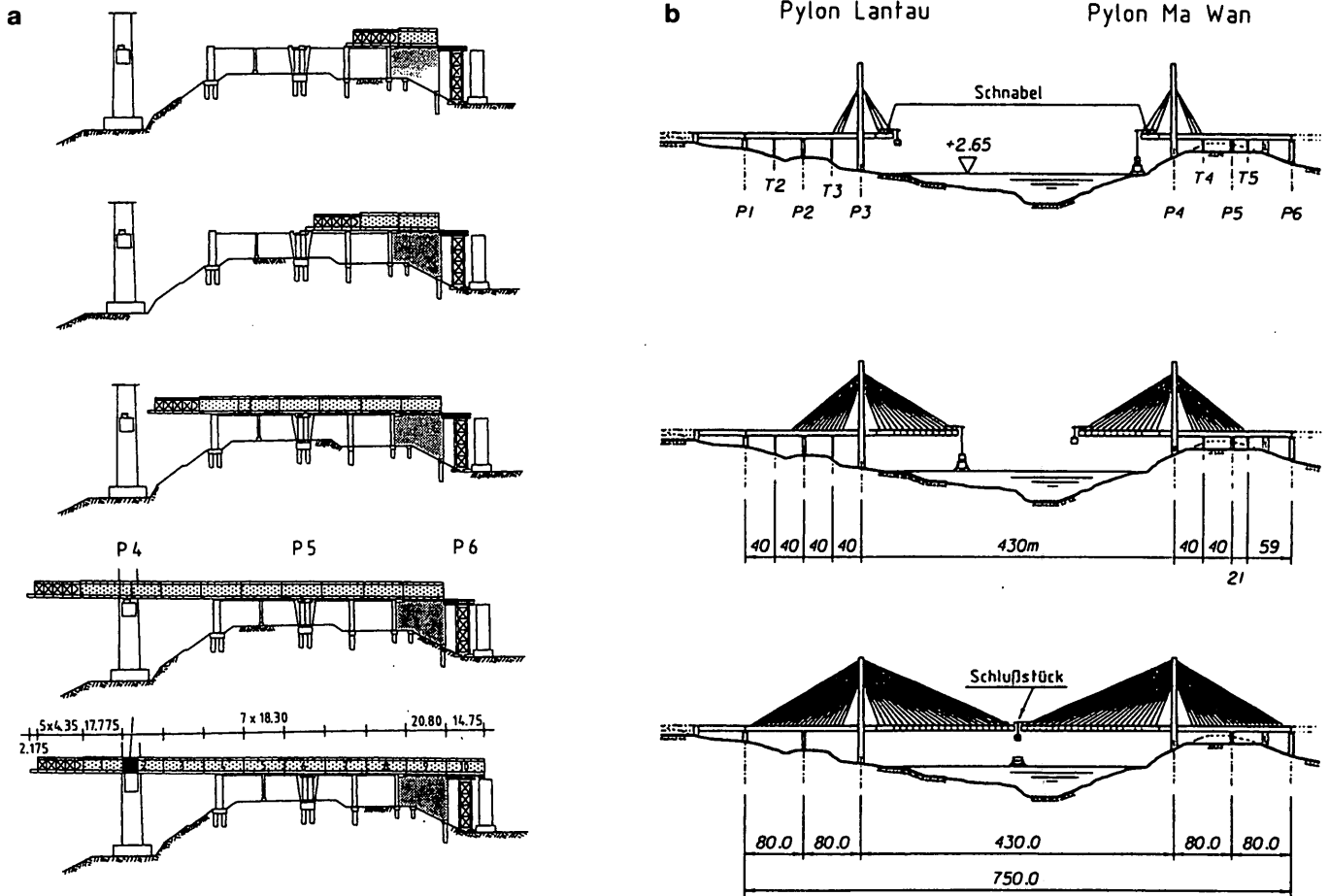


Figura 16. Puente Kap Shui Mun en Hong Kong. a) Lanzado de la luz lateral lado Ma Wan. b) Montaje de la luz principal.

3.5. ROTACIÓN: PUENTE LA CARTUJA EN SEVILLA, ESPAÑA. (Figura 17).

El puente se ensambló paralelamente a la orilla y luego la punta se fijó a un pontón y se rotó a su posición definitiva. Esto permitió construir un puente con longitud de 240 m y esbeltez extrema en exactamente un año. ●

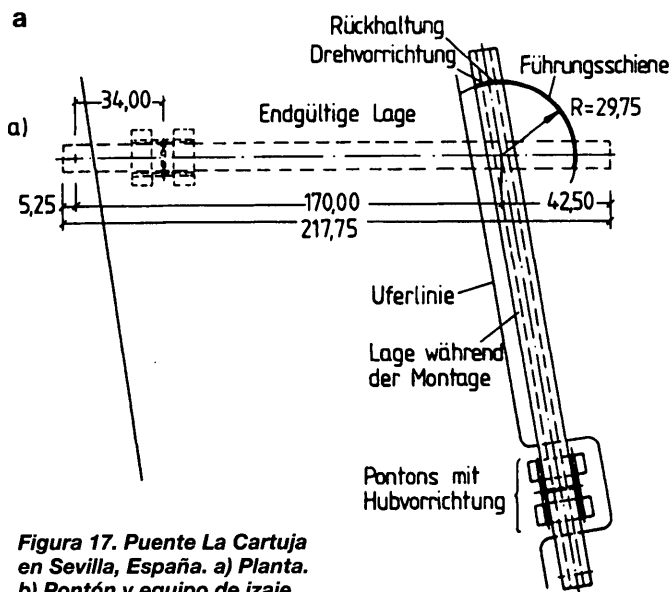


Figura 17. Puente La Cartuja en Sevilla, España. a) Planta. b) Pontón y equipo de izaje.