

Puentes mixtos de hormigón y acero

Por **Javier Rui-Wamba Martija**
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos



Puente en arco de 95 m de luz en la N-323 Granada-Motril, en servicio.

1. Introducción

EN mayo de 1988, en el seno de unas jornadas promovidas por Ensidesa, el autor de este artículo reflexionó sobre las causas que podrían estar en el origen del escaso número de puentes metálicos y mixtos que se construyen en nuestro país, por contraste con lo que ocurría en países tecnológicamente avanzados como Norteamérica y Japón, y con la tendencia que, crecientemente, se manifestaba en los países de la Comunidad Europea.

Ahora, en el otoño de 1992, cuatro años y medio más tarde, es patente que la situación en nuestro

país ha evolucionado sustancialmente. La mayor parte de los grandes puentes construidos en Sevilla con motivo de la Expo, son metálicos o mixtos. Entre las obras de infraestructuras construidas en Barcelona con ocasión de los Juegos Olímpicos, se encuentran numerosos puentes mixtos. Tanto la Administración Central como las Administraciones Autonómicas, han construido puentes de hormigón y acero. La gran mayoría de los profesionales orientados al proyecto de puentes, adornan ya su "currículum" con alguna obra de esta naturaleza. Prácticamente la totalidad de los grandes constructores, han experimentado el interés de la solución y están impulsando nuevas obras con esta tecnología.

Ensidesa, por otra parte, ha promovido la redacción, por el ilustre Ingeniero de Caminos, Luis Viñuela, de unas Recomendaciones para el Proyecto de Puentes Metálicos, y la Dirección General de Carreteras del MOPT, tiene ya muy avanzada la redacción de una Instrucción de Puentes Metálicos y Mixtos, que tomará el relevo de la última norma oficial de la que el autor tiene noticia y que fue publicada en junio de 1992.

Ciertamente, el panorama del sector de puentes ha evolucionado rapidísimamente y ahora, desde la experiencia acumulada en estos últimos años, es una buena ocasión para repasar los rasgos más significativos de los puentes de estructura mixta.



Fig. 1. Puentes mixtos proyectados por Eduardo Torroja.

2. Apuntes para una historia

Nunca está de más ir reuniendo datos que permitan en su día a los estudiosos, rastrear el origen, evolución y normativas de los puentes de hormigón y acero, a los que, sin duda, habrá que dedicar un capítulo en cualquier texto que trate, en el futuro, de la historia de los puentes.

Refiriéndonos a los puentes modernos, y de forma muy esquemática, se puede decir que en 1779, con la construcción del primer puente de fundición, en Coalbrookdale (Inglaterra) por Abraham Darby III, da comienzo la era de los puentes de acero que, prácticamente, monopoliza la construcción de estas estructuras hasta finales del siglo XIX, en el que irrumpen con fuerza los puentes de hormigón armado. El acero continúa sin embargo siendo el material empleado con mayor frecuencia en las grandes obras de ingeniería y, entre ellas, las correspondientes al importantísimo desarrollo de los

ferrocarriles. Las obras y trabajos de Freyssinet difunden y dan credibilidad a las obras de hormigón pretensado que, a partir de 1940 en Europa y con diez años de retraso en EE.UU., tiene un espectacular desarrollo coincidiendo, por otra parte, con la escasez de acero utili-

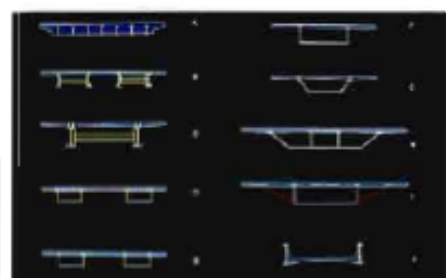


Fig. 2. Secciones transversales de puentes mixtos.

zable en la construcción, debido a la II Guerra Mundial y a sus evidentes secuelas.

La escasez de acero por un lado y la abundancia de mano de obra, contribuyeron, particularmente en Europa, a que el hormigón pretensado resultase muy competitivo. El número y calidad de los profesionales que se interesaron por esta

“**E**n 1970 se construye el Puente de Eduardo Dato, de José Antonio Fdez. Ordóñez y Julio Martínez Calzón, que por su calidad la importancia de su emplazamiento, la utilización de acero resistente a la corrosión, y la personalidad de sus autores, supone la presentación en Sociedad de los puentes de estructura mixta.”

tecnología y la brillantez de algunas de sus obras, situaron al hormigón pretensado en el lugar privilegiado que le corresponde.

Cuando se habla de las estructuras de hormigón armado y pretensado, estamos realmente hablando de una estrechísima y eficaz colaboración de dos materiales: el hormigón y el acero, en la que este último, discreta pero estratégicamente escondido en el hormigón, hace posible su existencia. Por ello, se podría decir que el hormigón armado y el pretensado son dos ejemplos de construcción mixta. También podría decirse que, transcurrido el tiempo, han surgido estructuras en las que la colaboración del acero con el hormigón se ha exteriorizado, y que el acero se ha vestido sus mejores galas para lucir sus posibilidades: los puentes atirantados con tablero de hormigón y los puentes con pretensado

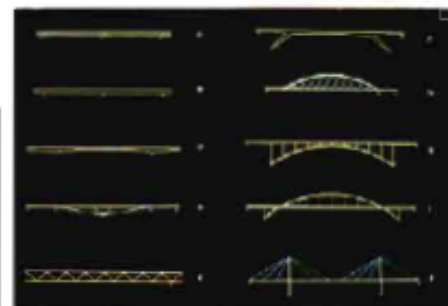


Fig. 3. Tipologías estructurales de puentes mixtos.

exterior, son manifestación de lo dicho. En definitiva, es evidente que el acero y el hormigón tienen vocación de convivencia y están acostumbrados a trabajar juntos en armonía. Por tanto, es natural que haya surgido la tecnología de las construcciones mixtas, en las que el hormigón completa las cualidades de la estructura de acero y, probablemente, se podrían encontrar ejemplos de construcciones mixtas desde los primeros tiempos de desarrollo de la técnica del hormigón. Quizás, las dificultades para conocer el comportamiento de las conexiones que aseguren el trabajo común entre el hormigón y el acero, han limitado la utilización de la estructura mixta. Razones históricas ya apuntadas y las dificultades que originan cambios de hábitos, han contribuido también, a que podamos asignar el calificativo de "joven" a esta tecnología.

A mediados de los años 30, en Australia, se proyectaron y construyeron diversos puentes de estructura mixta. En los años 50 se construyeron algunos puentes mixtos en Inglaterra, pero fue en la década prodigiosa de los 60 cuando se comenzaron a construir importantes puentes mixtos en Francia, Alemania, Suiza, Italia, Inglaterra, Japón y otros países. Los graves accidentes de algunos puentes metálicos ocurridos en el entorno de los años 70, supusieron un importante freno al desarrollo de la construcción de puentes metálicos y mixtos, pero fueron, al tiempo, el motor que impulsó los trabajos de investigación, necesarios para conocer con mayor rigor el comportamiento de estas estructuras, lo que, en definitiva, ha sido capital en su posterior desarrollo. A partir de los años 80, los puentes mixtos compiten con los puentes de hormigón armado en toda Europa y en Norteamérica y se construyen gran número de ellos. Pero es quizás en los últimos años, donde se percibe el gran impulso que ha tenido la construcción de puentes mixtos.

En nuestro país, en 1970 se construye el Puente de Eduardo Dato, de José Antonio Fdez. Ordoñez y Julio Martínez Calzón, que por su calidad plástica, la importancia de su emplazamiento, la utilización de acero resistente a la co-

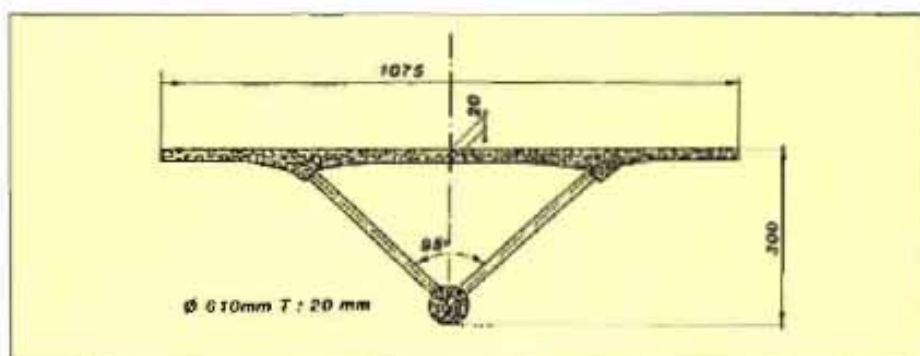


Fig. 4. Sección transversal. Puente Charolles, Francia (1987).

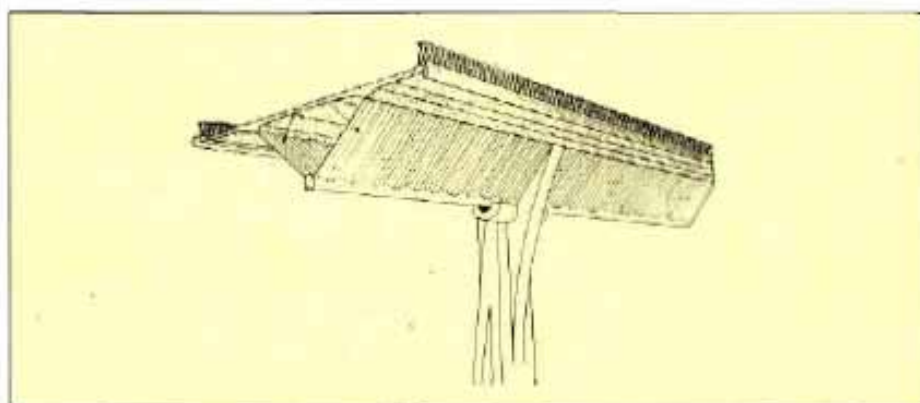


Fig. 5. Detalle Puente Charolles. Luz máxima: 50,40 m.

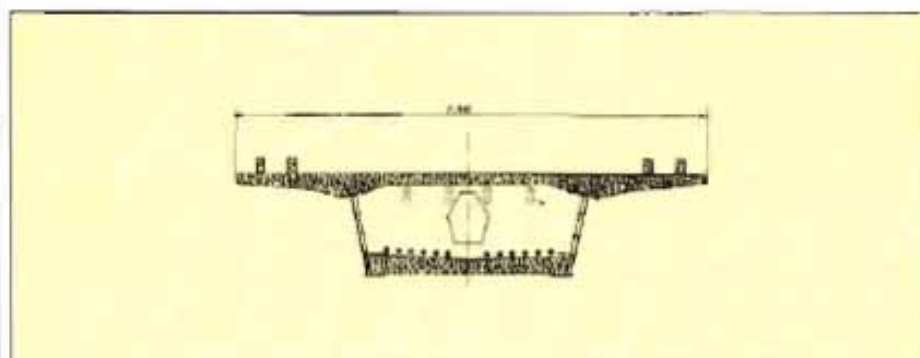


Fig. 6. Puente Salbris con pretensado exterior.

rosión, y la personalidad de sus autores, supone la presentación en Sociedad de los puentes de estructura mixta.

Posteriormente, han existido aquí y allá puentes mixtos construidos, más debido a impulsos individualizados que a un auténtico interés por esta tecnología, por el colectivo de profesionales envueltos en la planificación, proyecto y construcción de puentes. Las dificultades por las que ha atravesado la industria siderúrgica, que en otros países ha impulsado eficazmente la promoción del acero en puentes, ha impedido que tal impulso se haya dado en nuestro país.

Este poco alentador panorama

ha cambiado, sin embargo, de una manera verdaderamente espectacular en los últimos cuatro años. Los puentes para la Exposición Universal de Sevilla en el 92, las obras de infraestructuras de la Barcelona Olímpica, los ambiciosos programas de construcción de Autovías, han generado directa e indirectamente la construcción de numerosos puentes mixtos con sus variadas tipologías, con secciones transversales muy diversas, utilizando procedimientos de montaje muy diferentes, en plazos, en muchos casos, extraordinariamente estrictos. Son ya numerosos los proyectistas que han diseñado puentes mixtos y prácticamente,

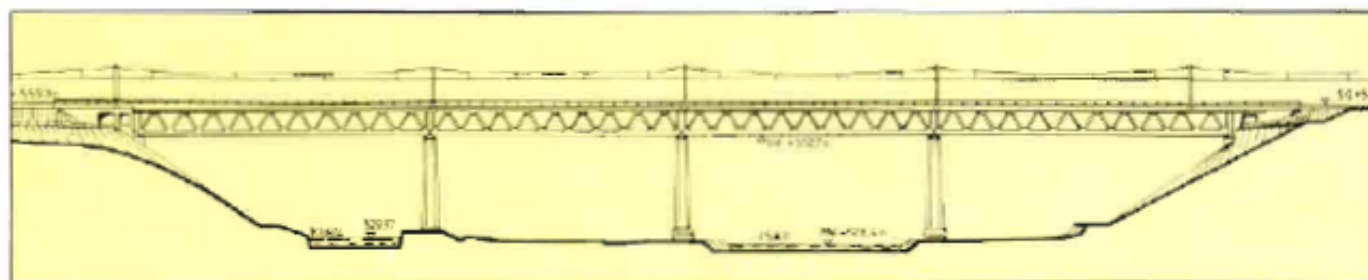


Fig. 7. Puente de FF.CC. sobre el río Isar (Alemania).

todas las grandes empresas constructoras han participado en su construcción. Parece que definitivamente se ha superado la imagen de los proyectistas de puentes y constructores orientados, exclusivamente, hacia las estructuras de hormigón. Por ello, puede ser esta una buena ocasión para analizar cuál puede ser el origen de dicha imagen.

Entre 1850-1900, con el desarrollo del FF.CC., se construyen en España numerosos puentes de fundición, hierro pudelado y los primeros puentes de acero por compañías extranjeras, belgas y francesas, principalmente.

A finales del siglo XIX, la construcción de puentes de acero se encuentra en muy buen momento, lo que se manifiesta, por ejemplo, con la publicación de dos libros de Eugenio Rivera: "Puentes de hierro económicos" y "Estudio sobre el empleo de acero en los Puentes".

En la *Gaceta de Madrid* de 5 de junio de 1902, se publica la *Instrucción para redactar los proyec-*

tos de puentes metálicos, de la "Dirección General de Obras Públicas" por Real orden de 25 de mayo, "haciendo preceptivas las disposiciones de la Instrucción en la redacción de toda clase de proyectos de puentes metálicos, ya se destinen a carreteras del Estado, ya a los ferrocarriles de servicio general".

Al igual que en otros países, la deficiente calidad de los materiales empleados en la construcción de estos primeros puentes metálicos, obliga a su sustitución tras un período de servicio de 40 ó 50 años. En general, los defectos constatados, en una época coincidente con el desarrollo del hormigón, y la escasa evolución de la siderurgia española, desplaza el interés de la ingeniería española hacia este último material. Entre 1925 y 1932, Eugenio Rivera publica los 4 tomos de su nuevo libro "Puentes de Fábrica y Hormigón Armado" como un claro síntoma de su evolución del metal al hormigón. En el citado libro se puede leer:

"Puede decirse que ya se han

eliminado, tanto en ferrocarriles como en carreteras, los puentes de sillería y que sólo en casos muy especiales se recurre al empleo de tramos metálicos, ya sea para impedir el despido de obreros en los talleres en que se construyen, o ya por rapidez de sustitución de los tramos metálicos deficientes, por otros más robustos".

De manera que en los años anteriores a la Guerra Civil, se ha producido un rechazo de las soluciones metálicas y el hormigón armado, por el contrario, ha sido muy bien acogido. El hecho de que las construcciones de hormigón requieran una mano de obra mucho menos calificada que las obras de acero, debió contribuir en forma muy destacada a que tal cosa ocurriese. Yo creo que toda la historia más reciente de la construcción de puentes de España, arranca de la situación expuesta. El relevo de Rivera nos trajo a Eduardo Torroja, que impuso su magisterio hasta 1961.

Es frecuente atribuir a Torroja un interés por las estructuras de

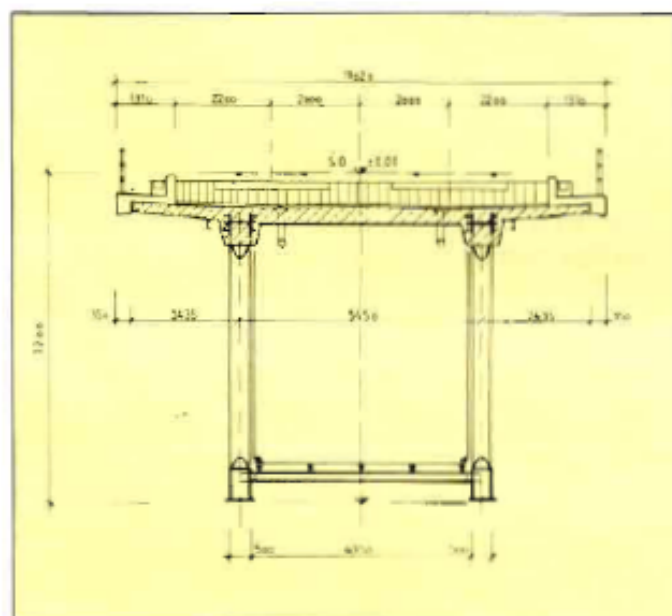


Fig. 8. Sección transversal del puente sobre el río Isar.

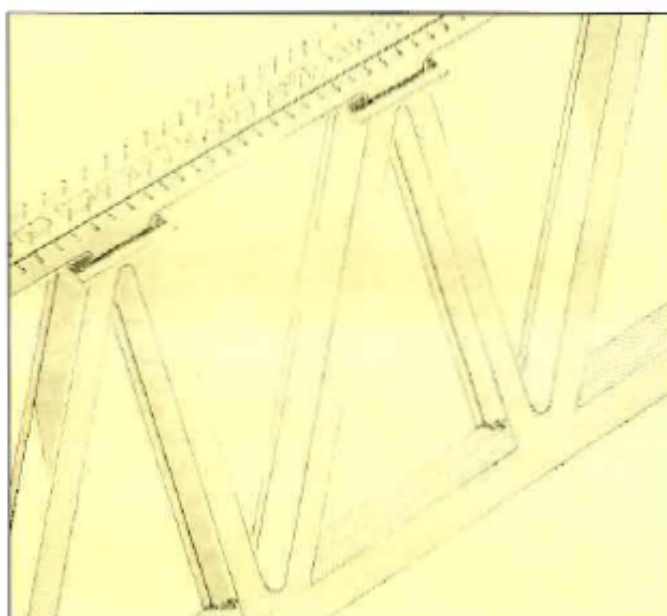


Fig. 9. Detalle puente sobre el río Isar.

“**A**provechar, al tiempo, el excelente comportamiento del hormigón a compresión y del acero a tracción, ha sido el objetivo sistemáticamente perseguido en todas las estructuras de hormigón pretensado y es, también, el objetivo esencial que pretende las estructuras mixtas.”

hormigón, y, como contraste, una incomodidad ante el uso del acero, que ha podido extenderse a las nuevas generaciones que él contribuyó a formar. Yo creo que un análisis de esta naturaleza es incorrecto. Eduardo Torroja en los años 39 y 40, proyectó y construyó diversos puentes metálicos y mixtos (figura 1), y proyectó y construyó estructuras metálicas importantes, como hangares, cubiertas de estadios, etc. Sin embargo, sus posibilidades de creación estaban mucho más limitadas por la escasez y falta de fiabilidad de materiales, de mano de obra cualificada, y por el limitado desarrollo de las técnicas de las uniones, en general, y de la soldadura en particular. Las construcciones de hormigón eran mucho menos dependientes de factores que él no podía controlar: existía abundante y poco costosa mano de obra. Y el tiempo todavía no era oro..., ni siquiera acero.

No hubo una actitud previa negativa, sino que las circunstancias en que se desarrolló su labor y la del conjunto de la ingeniería, propició el desarrollo del hormigón y restó protagonismo al acero. Con todo, a finales de los años 50, todavía persistía el rescoldo del interés por el acero, en un foco tan importante como el Instituto Torroja, lo que produjo la excelente Instrucción EM-62. Realmente este rescoldo de interés se acabó apagando tras su fallecimiento, aunque ha

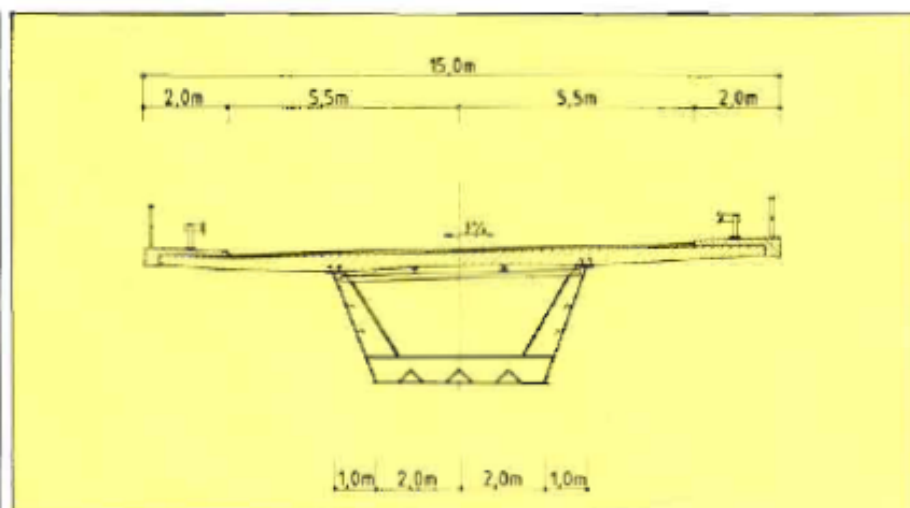


Fig. 10. Puente sobre Autopista en Alemania con pretensado transversal.

vuelto ahora a brotar con evidente fortaleza.

3. Ventajas e inconvenientes de los puentes de estructura mixta

Las cualidades y los defectos de los puentes de estructura mixta son consecuencia de los materiales, hormigón y acero, que utilizamos para su construcción. Y otro tanto sucede con los puentes dichos de hormigón, que necesitan imperiosamente del acero para ser viables. Por ello, los rasgos diferenciales de cada tipología estructural son consecuencia de las características de los materiales utilizados en su construcción, y es a éstos, a los que conviene referirse al enumerar ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de puentes.

Con carácter general se puede

decir que no existe un material perfecto. De haberlo, no se utilizaría ningún otro. El hormigón tiene cualidades y defectos. El acero también. Aprovechar, al tiempo, el excelente comportamiento del hormigón a compresión y del acero a tracción, ha sido el objetivo sistemáticamente perseguido en todas las estructuras de hormigón armado y de hormigón pretensado y es, también, el objetivo esencial que pretenden las estructuras mixtas.

Entre las ventajas de las construcciones metálicas, se pueden citar:

- Altas resistencias mecánicas y, por ello, secciones resistentes muy esbeltas y elementos estructurales muy ligeros.*
- Facilidad de transporte y de montaje debido a su ligereza, lo que es muy ventajoso, por ejemplo, cuando se trata de*

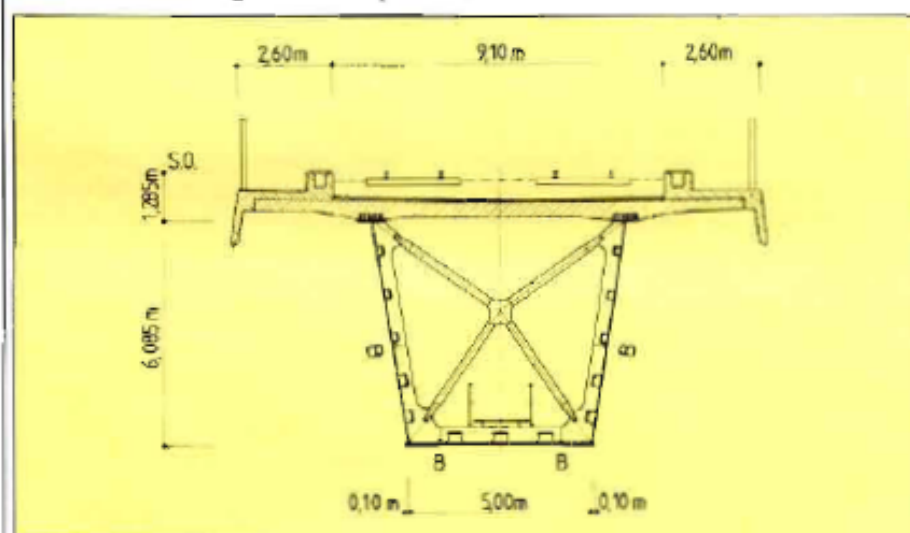


Fig. 11. Puente FF.CC. en Alemania. Sección transversal.

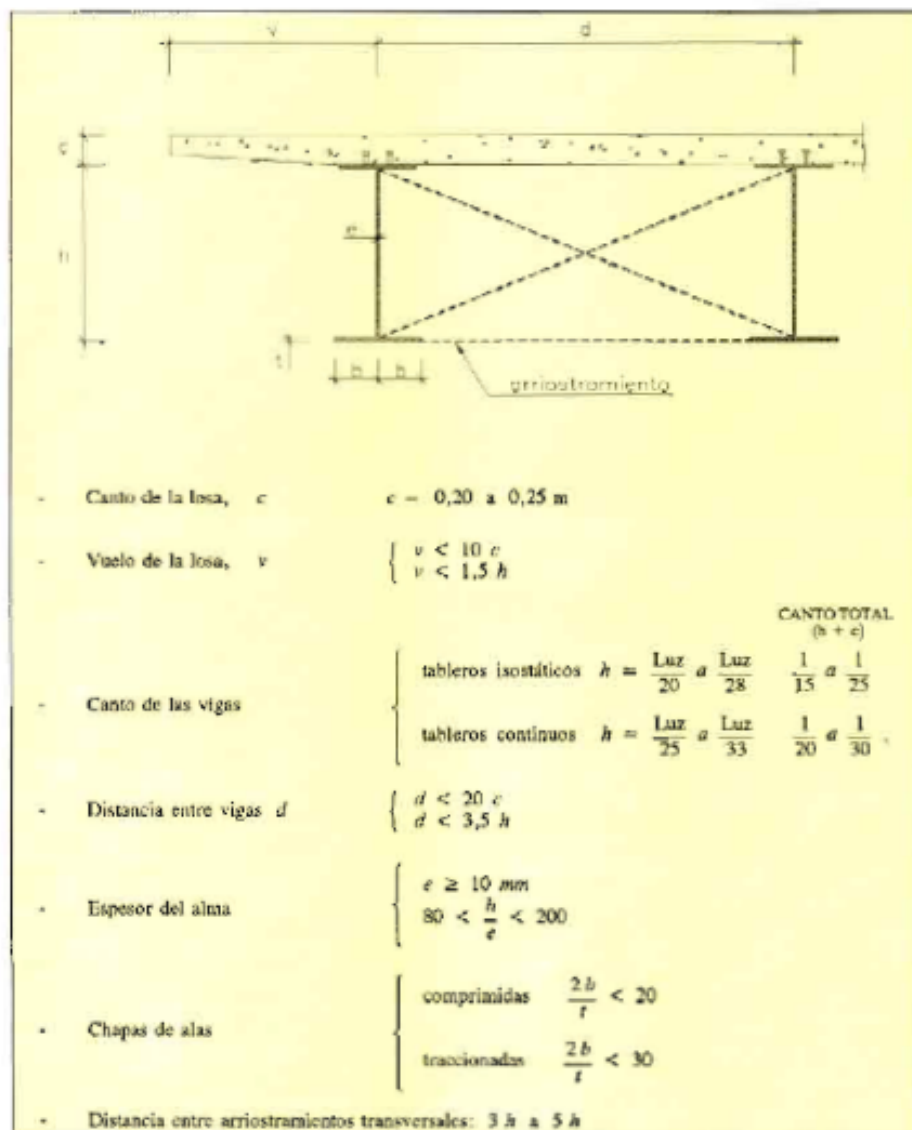


Fig. 12. Sección transversal con vigas. Datos para anteproyecto.

- proyectar una estructura que haya que construir en parajes distantes o aislados.
- c) *Reducido peso propio*, lo que las hace prácticamente insustituibles en aquellos casos en que el peso de la estructura es una parte sustancial de la carga total, como por ejemplo, en naves industriales, puentes de grandes luces, grandes voladizos para cubiertas de estadios, etc.
- d) *Rapidez de ejecución*, por cuanto se elimina el tiempo necesario para el fraguado, colocación de encofrados, etc., que exigen las estructuras de hormigón.
- e) *Facilidad de refuerzos y/o reformas* sobre la estructura ya construida, tanto si está en uso como si no.
- f) *Ausencia de deformaciones diferidas*.

- g) *Valor residual y escasez de escombros*. En toda construcción en la que se utilice estructura metálica, y que haya de ser destruida, existe la posibilidad de reutilizar o vender como chatarra la parte de estructura metálica.
- h) *Prefabricación*. Las estructuras metálicas tienen todas las ventajas inherentes a la prefabricación, por tratarse en definitiva, de un sistema muy flexible con elementos fabricados en taller y conexiones (tornillos o soldadura) perfectamente resueltas.

Entre los inconvenientes, se suelen citar habitualmente:

- a) *Coste más elevado*.
- b) *Sensibilidad frente a la corrosión*.
- c) *Sensibilidad frente al fuego*. Las características mecánicas del acero disminuyen muy rápi-

damente cuando se eleva su temperatura, por encontrarse próximo a un foco de fuego.

- d) *Inestabilidad*. Dada la ligereza de los elementos que componen una estructura metálica, un gran número de accidentes se han producido por inestabilidad total o local, sin haberse agotado su capacidad resistente.
- e) *Dificultades de adaptación a formas plásticas*.
- f) *Excesiva flexibilidad*, lo que supone:
- Resistencia desaprovechada al limitar las deformaciones máximas.
 - Vibraciones, causando falta de confort, entre otras cosas.
- g) *Sensibilidad a la rotura frágil*. Una inadecuada selección del material, un desacertado diseño, unas incorrectas especificaciones o una defectuosa ejecución de las uniones soldadas, pueden provocar la fragilización del material y la consiguiente rotura brusca e inesperada de las estructuras metálicas.

En el caso del hormigón, en el catálogo de *ventajas*, suele figurar:

- a) *Su menor coste*.
- b) *Su posibilidad de adaptación a formas plásticas*. El Profesor



Fig. 14. Puente de hormigón.

Alfredo Páez nos ha recordado en su último libro ("Hormigón Armado", Editorial Reverte), que la palabra "hormigón" deriva de "formicus", porque fórmico o formáceo es, según la literatura castellana del siglo XVI, todo aquello que es susceptible de ser moldeado para darle la forma apetecida. Nos recuerda también, que la expresión "concreto", proviene, como su equivalente inglés "concrete", de la palabra latina "concretus", de la que deriva asimismo "concreción", definida en el Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua, como la acumulación de diversas partículas para formar masa. Quizás no sea inadecuado el recordario aquí.

- c) Su excelente resistencia a la compresión.
- d) Su mayor peso propio, lo que es una ventaja cuando facilita la estabilidad estructural (caso de muros o cimientos, por ejemplo).
- e) Su robustez, debido a las generosas dimensiones que, en muchos casos, son consecuencia de exigencias constructivas.
- f) Su estabilidad frente a los ataques químicos.

Entre los inconvenientes:



arco, N-323 Granada-Motril. Durante la construcción.

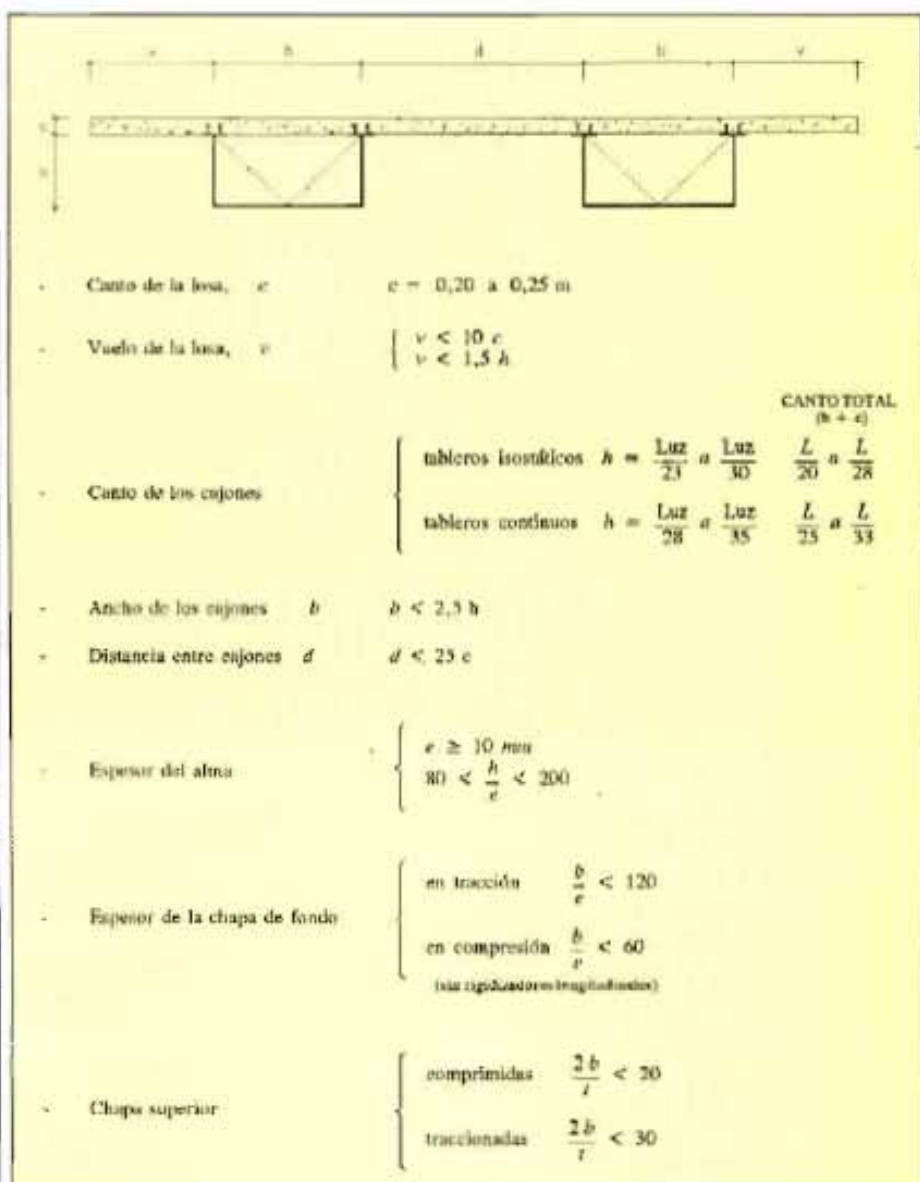


Fig. 13. Sección transversal con cajones. Datos para anteproyecto.

- a) Su incapacidad para resistir tracciones.
- b) Su elevado peso propio, que puede suponer un importante porcentaje de la carga total.
- c) Su peso y dimensiones, lo que dificulta el transporte y montaje de elementos prefabricados.
- d) El coste creciente de moldes y encofrados singulares, lo que limita las posibilidades de diseño.
- e) La irregularidad y defectos de los acabados superficiales.
- f) Las dificultades y el costo de su demolición.

Naturalmente, esta lista de ventajas e inconvenientes del hormigón y del acero, tiene un carácter relativo y su mayor o menor importancia, su grado de realismo, depende de las circunstancias y de

la naturaleza de la estructura que se trata de diseñar, proyectar y construir.

Hay dominios, por ejemplo, el de los grandes puentes colgantes, donde el acero no tiene competencia. Y no es probable, por el contrario, un macizo de anclaje en cuya construcción no sea el hormigón el material escogido.

La técnica, por otro lado, ha tratado de minimizar los inconvenientes de cada material. Incorporar el acero al hormigón para superar su incapacidad para absorber tracciones, permitió primero, el desarrollo del hormigón armado, y más adelante del hormigón pretensado. Con la incorporación del acero al hormigón, se limitaron, por otra parte, los riesgos de corrosión y la preocupación por el fuego.



Fig. 16. Puente sobre La Meridiana. Cinturón litoral de Barcelona. Vista aérea.

Paralelamente, en el campo de las construcciones metálicas, se han desarrollado técnicas (pintura, galvanizado, protección catódica), para limitar los efectos de la corrosión, y se han desarrollado aceros débilmente aleados, con resistencia mejorada a la corrosión ("weathering steel").

4. Tipologías de puentes de estructura mixta

Si, en buena medida, las tipologías de los puentes de hormigón han seguido los caminos previamente recorridos por los más veteranos puentes metálicos, las tipologías empleadas en los puentes de estructura mixta son, asimismo, reflejo de la enorme experiencia acumulada en el proyecto y construcción de puentes metálicos y de puentes de hormigón. En realidad, se podría decir que las tipologías de los puentes mixtos son, o pueden ser, más variadas que las de sus homólogos de hormigón o acero, porque además de utilizar las tipologías comunes a ambos tipos de puentes, permiten el recurso a soluciones específicas para aquellos tipos de puentes (celosías en puentes metálicos y losas en puentes de hormigón, por ejemplo). Existen, incluso, algunas realizaciones recientes que aportan algu-

na novedad tipológica en este dominio de los puentes mixtos.

Como referencia podemos citar algunas de las soluciones utilizadas en este tipo de puentes:

- *Vigas o perfiles metálicos embebidos en el hormigón*, solución con frecuencia utilizada en pequeños puentes de ferrocarril, por la rapidez de ejecución y por el limitado canto necesario, con lo que se podrán alcanzar luces superiores a los 40 metros con relaciones luz/canto que pueden superar el índice 30.
- *Vigas o perfiles metálicos, con tablero conectado de hormigón*. Es la solución más competitiva, es la de una sección transversal con dos vigas metálicas, unidas por un sencillo arriostramiento, y con losa de hormigón colaborante, que se construye sin necesidad de cimbras. Con este tipo de soluciones se han resuelto secciones transversales de hasta 30 metros de anchura y se han alcanzado luces de hasta 180 metros, variando el canto de la viga. Las soluciones más clásicas corresponden a tableros de hasta 12,00 metros de anchura y luces entre 30 y 80 metros, con vigas de canto constante.
- *Secciones en cajón de una o*

varias células, muy adecuadas para resolver puentes de marcada curvatura en planta o cuando se dispone de un canto muy reducido o cuando, como en puentes de carácter urbano, la calidad estética de la obra es uno de los factores que es imprescindible tomar en consideración. En puentes de luces medias se están utilizando también secciones en cajón cerradas, de manera que la chapa superior sirve de encofrado durante el hormigonado de losa, con lo que se facilita mucho la construcción del tablero y se pueden conseguir elevados ritmos de ejecución en obras de geometría complejas, evitando el uso de cimbras y, al menos parcialmente, encofrados.

Es relativamente frecuente, también, cuando las exigencias de galibo exigen reducir al máximo el canto bajo tablero de la estructura, recurrir a soluciones de tablero inferior, con dos vigas laterales: soluciones en forma de artesa, que transversalmente se comportan como "U" rígidas que impide el pandeo transversal de la cabeza comprimida de las vigas. En estos casos, cuando las luces son más importantes, las vigas laterales se pueden sustituir por celosías.

También en los puentes de tablero superior, se han recurrido a celo-

sías para salvar grandes luces, en carreteras o ferrocarriles en las que la rasante va muy elevada y, por tanto, no hay condicionantes prácticos para el canto de la estructura.

Todo este conjunto de tableros suelto, en general, ir apoyados sobre pilas de hormigón, por intermedio de apoyos elastoméricos o alguna de sus variantes. Es posible, también y en algunos casos puede ser ventajoso, recurrir a soportes metálicos o mixtos, que pueden tener una gran flexibilidad y una mayor facilidad de construcción.

Cuando los pilares se integran en la estructura del tablero, eliminando juntas entre ambos elementos estructurales, surgen las distintas soluciones pórtico, con pilas verticales o inclinadas, con las que se han construido algunas notables estructuras mixtas.

Ha sido, bien perceptible, en los últimos años, la proliferación de soluciones arco, tanto de tablero inferior ("bow-string") como de tablero superior, tras un largo período en el que dicha tipología, por otra parte llena de posibilidades, se había prácticamente abandonado.

También se ha producido una evidente eclosión de los puentes atirantados, en los que los tableros de estructura mixta compiten con las soluciones de tableros de hormigón, habiendo quedado relegados, en general, los tableros metálicos con losas ortótropa, a luces muy grandes o cantos muy estrictos.

En los últimos años, por otra parte, se han construido en Francia, con un carácter fundamentalmente experimental e innovador, algunas estructuras singulares, en las que se han utilizado almas de chapa plegada. Otras con cordones inferiores del tablero constituidos por tubos de acero rellenos de hormigón o, bien, con losa de hormigón postensado conectados a almas, o celosías metálicas. Se ha recurrido también al pretensado exterior, encajado en el canto del tablero y formando parte de éste.

A esta multitud de variables tipológicas, habría que añadir las que resultan del propio proceso constructivo, que puede ser, asimismo, extraordinariamente variado, tanto en lo que se refiere al montaje de la estructura metálica como a la ejecución del tablero de hormigón.

5. Criterios básicos de proyecto

5.1. Criterios generales

La geometría de un puente y la tipología estructural más adecuada, suele venir dictada, fundamentalmente, por las características de la carretera a la que sirve y por la naturaleza del terreno que lo soporta.

De la colaboración del ingeniero estructural desde las primeras etapas del Proyecto de una carretera, debe resultar un diseño optimizado, considerando los aspectos económicos, constructivos, estéticos, ambientales y la necesidad de conservación posterior a la obra.

En el caso específico de los puentes de estructuras mixtas, conviene tomar en cuenta lo siguiente:

- Evitar en lo posible los trazados en curva y reducir el esvía-je del puente, aunque ciertamente debe ser la funcionalidad de la obra el criterio finalmente determinante.

la altura de los estribos, aumentando la longitud del tablero.

- Desde el punto de vista estructural, los vanos laterales de un tablero continuo deben estar en el entorno del 75% del vano próximo. Por debajo del 50% hay que adoptar medidas (contrapesos, anclajes), para evitar que se levante el extremo libre.
- El canto variable se justifica, en general, para vanos por encima de los 60 metros. Variando el espesor de las chapas, se pueden ajustar las secciones a los esfuerzos que soliciten a la estructura, evitando variaciones en el canto que complican fabricación, transporte y montaje.
- Reducir el número de vigas de la sección transversal del tablero. Soluciones con dos únicas vigas, cuando la geometría de la sección lo permita, suelen aversearse las más económicas. Las soluciones en cajón son, en general, más caras, pero pue-



Fig. 17. Puente sobre La Meridiana. Vista del cajón y pilas metálicas.

- Los tableros mixtos compiten, en general, cuando las luces varían entre 25 y 100 metros. Esta cifra tiene tendencia a aumentar.
- Los puentes continuos son estructuralmente más ventajosos, limitan el número de juntas de dilatación y reducen las dimensiones y esfuerzos en las pilas.
- Conviene, en general, reducir

den estar justificadas, en particular, en zonas urbanas por razones estéticas y, en ocasiones, por la facilidad de montaje y por su adaptabilidad en geometrías curvas y variadas.

5.2. Tablero con vigas mixtas

En la figura 12 se muestran órdenes de magnitud de las dimen-

siones más características de un tablero con vigas metálicas, que pueden servir de base para un primer encaje de la estructura.

El espesor más frecuente para la losa de hormigón, suele estar comprendido entre 20 y 25 centímetros. Espesores mayores se utilizan cuando los vuelos o las distancias entre vigas son excepcionales. En estos casos suele ser habitual variar el canto de la losa, con el valor máximo situado entre las vigas.

El vuelo máximo de la viga no suele ser, habitualmente, mayor que diez veces su canto. Vuelos máximos de 2,00 y 2,50 metros no suelen superarse con cantos de 20 y 25 centímetros. Por otro lado, la magnitud del vuelo no suele ser tampoco mayor que 1,50 veces la altura de la viga.

El canto de las vigas suele estar comprendido entre $1/20$ y $1/28$ de

xión, necesarios para la transmisión de cargas a las vigas. Generalmente, dicha distancia no supera 20 veces el canto de la losa. Con los espesores considerados, llegamos así a distancias máximas de 4,0 y 5,0 metros.

Por otro lado, las vigas no suelen estar separadas una distancia superior a 3,5 veces su canto, lo que puede ser un condicionante en el caso de vigas de reducido canto.

Para puentes de luces reducidas se pueden utilizar perfiles laminados, como vigas de los tableros mixtos. En España, por ahora, el canto máximo de los perfiles que se laminan son de 600 mm, con lo que se pueden resolver tableros isostáticos con luces de hasta 16,0 metros aproximadamente y tableros continuos que pueden alcanzar los 20,0 metros. En Europa ya se laminan perfiles que pueden supe-



Fig. 18. Puente sobre La Meridiana. Traslado por terraplén.

la luz del tablero, cuando éste es isostático, lo que corresponde a un canto total del tablero (vigas + losas) que se suele situar entre $1/15$ y $1/25$ de la luz. Cuando se trata de un tablero continuo, el canto de la viga suele estar comprendido entre $1/25$ y $1/33$ de la luz, y el canto total del tablero entre $1/20$ y $1/30$.

La distancia entre vigas está condicionada, fundamentalmente, por la capacidad de la losa para absorber los esfuerzos locales de fle-

rar los 1000 mm, con los que se pueden superar luces de 30,00 metros.

Para luces mayores, hay que utilizar vigas soldadas. El espesor del alma viene dictado por el riesgo de abollamiento bajo la sollicitación simultánea de un momento flector y de un esfuerzo cortante. No es frecuente que el espesor de la chapa descienda de los 10 milímetros. Sin rigidizadores, en el caso de vigas isostáticas, se suelen alcanzar



Fig. 19. Puente sobre la carretera.

esbelteces (altura del alma/espesor del alma), de hasta 180. A ello contribuye el que la fibra neutra, debido al trabajo conjunto de la losa y de la viga, se eleva en relación con la posición de la fibra neutra de la viga metálica aislada. Por ello, buena parte del alma se encuentra traccionada, lo que reduce el riesgo de abollamiento. En la zona próxima a los apoyos de los tableros continuos, no sucede así y al ser, por otra parte, la zona de máximos esfuerzos suele exigir, bien aumentar el espesor de la chapa del alma, bien disponer rigidizadores longitudinales, bien ambas cosas a la vez.

El vuelo de las chapas de cabeza en las vigas metálicas tiene que tener, por un lado, ancho suficiente para poder situar los conectores. Por otro, al estar comprimidos, en particular en la fase de construcción, debe prevenirse el riesgo de abollamiento local. Suele ser habitual que el vuelo de la chapa no supere diez veces su espesor. En la chapa traccionada, caso de la chapa inferior de los tableros isostáticos, el vuelo no suele superar quince veces el espesor.

Los datos anteriormente cita-



meridiana. Posición intermedia durante el traslado.

dos, tienen solamente un valor indicativo y pueden servir para encajar una solución a nivel de anteproyecto, pero en cada caso será necesario ajustarlos de acuerdo con las características del puente en proyecto y, naturalmente, para atender las exigencias reglamentarias.

Las vigas metálicas, constituidas por perfiles laminados o fabricados mediante chapas soldadas, deben arriostrarse para asegurar su estabilidad durante la construcción (empujes de viento, pandeo lateral originado por inestabilidad de su cabeza comprimida), para favorecer el reparto de cargas disimétricas y limitar la deformabilidad transversal del tablero.

5.3. Tableros con cajones metálicos

En general, los puentes de estructura mixta resueltos con cajones metálicos son más costosos que los ejecutados con vigas. Hay muchos casos, sin embargo, en los que su utilización está justificada. Así ocurre, por ejemplo, en el caso de puentes urbanos, en los que las consideraciones estéticas pueden tener una importancia preponde-

rante. O cuando sea necesaria una gran rigidez torsional, como es el caso de los tramos en curva. Su mayor rigidez facilita el transporte y montaje. Están mejor protegidos de la corrosión y el mantenimiento suele ser, por ello, más sencillo. Exigen, a igualdad de luz, menos canto que las vigas.

En la figura 13 se muestran algunas dimensiones que, con frecuencia, se utilizan para encajar un tablero de este tipo, a nivel de anteproyecto.

En cuanto al canto de la losa, vuelos máximos y máxima luz transversal posible, la situación es análoga a la ya descrita para los tableros de vigas. Espesores constantes entre 20 y 25 centímetros son normales para la losa. La distancia libre entre cajones puede llegar a ser igual a 25 veces el espesor de la losa, debido al mayor grado de empotramiento que ofrece la rigidez torsional de los cajones. El canto de estos suele situarse entre $1/23$ y $1/30$ de la luz en el caso de los tableros isostáticos y

cas. El espesor mínimo de chapas suele ser, en general, de 10 mm. Sin rigidizadores longitudinales se suelen alcanzar relaciones canto/espesor de alma hasta 180. Con rigidizadores longitudinales dicha cifra puede cuadruplicarse.

La chapa superior tiene también la misma problemática que en el caso de las vigas. La chapa inferior, de cierre del cajón, estando comprimida, puede tener esbelteces $1/60$. Con rigidizadores longitudinales, esta limitación es aplicable a la distancia entre dichos rigidizadores y de ellos, con las almas.

Inclinando las almas del cajón se puede mejorar el aspecto estético del tablero y, al tiempo, reducir el vano transversal que debe salvar la losa y limitar el número de cajones. Es frecuente resolver económicamente el tablero con un único cajón. Las secciones trapezoidales tienen también la ventaja de reducir el ancho de la chapa inferior de cierre, lo que favorece su estabilidad en las zonas sobre apoyos de



Fig. 20. Puente sobre La Meridiana. Traslado nocturno sobre autopistas A-17 y A-18.

entre $1/28$ y $1/35$ en los tableros continuos. Considerando la altura total (losa + cajón), la relación canto/luz pasa a ser de $1/20$ a $1/28$ en los primeros y de $1/25$ a $1/33$ en los segundos. Las almas de los cajones tienen análogas limitaciones que las comentadas anteriormente para las almas de las vigas metáli-

tableros continuos, donde las compresiones pueden ser muy importantes.

5.4. Soluciones especiales

Además de las soluciones clásicas a las que nos hemos referido en los apartados anteriores, existen otras tipologías diferentes, a las

“En el caso de puentes de grandes luces, en los que no exista limitación de canto, puede ser muy competitiva la solución de dos vigas celosías, con una losa conectada en cabeza.”

que merece la pena referirnos siquiera brevemente.

En la figura 2A se observa una solución tradicionalmente utilizada, en particular, en el caso de puentes de ferrocarril. Se trata de los tableros con perfiles embebidos en hormigón. Los ferrocarriles franceses han venido utilizando esta solución para luces entre 5 y 20 metros aproximadamente. La distancia entre perfiles metálicos no suele sobrepasar los 0,65 metros, ni ser superiores a dos veces la altura del perfil. También se debe prestar atención a que entre las alas superiores de las viguetas, quede espacio suficiente para el hormigonado. Se suelen disponer armaduras transversales para mejorar el trabajo conjunto acero-hormigón.

En ocasiones, el gálibo disponible exige limitar al máximo el espesor estructural. En tal sentido, se pueden disponer las vigas a ambos lados del tablero, con el canto hacia arriba y disponer un tablero mixto apoyado entre ellas. El canto estructural queda reducido al que se necesite para salvar la anchura del tablero (entre 1/10 y 1/15 de dicha anchura generalmente). En la figura 2j se muestra un esquema de esta solución. Si en lugar de vigas laterales de alma llena, se disponen vigas en celosía, se pueden alcanzar luces de 80 metros con un espesor estructural, a efectos de gálibo, de unos ochenta centímetros y sin necesidad de arriostrar el cordón superior de la celosía.

En el caso de puentes de grandes luces, en los que no exista limitación de canto, puede ser muy competitiva la solución de dos vi-



Fig. 21. Propuesta puente en arco con tablero mixto para Expo' 92.

gas celosías, con una losa conectada en cabeza.

En Bélgica se desarrolló en su día el sistema Preflex, que utiliza una viga metálica plectada en taller. El talón en tracción se envuelve en hormigón. Al eliminar la causa que ha provocado la plectación, la viga tiende a volver a su posición original, impidiéndolo en parte el talón de hormigón, que así queda comprimido, resultando un efecto equivalente al del pretensado. La viga se fabrica en taller. El



Fig. 22. Tablero puente FF.CC. en el tramo norte del by-pass. Madrid.

talón comprimido se dispone en la parte inferior traccionada de la viga. Al hormigonar la losa se revisita también el alma de hormigón, con lo que se protege el acero de la corrosión. A un resultado análogo se llega pretensando el talón hormigonado de la viga, solución que se ha empleado también con alguna frecuencia.

También se han construido y están en construcción puentes con arcos de estructura mixta, en los que el acero laminado tiene al tiempo función estructural y sirve como cimbra del hormigón durante la fase de construcción. En otros casos, el arco y las pilas del puente son metálicos, mientras que el tablero es mixto.

6. Otros aspectos a tener en cuenta en el proyecto

6.1. Medios de conexión

El trabajo solidario del hormigón y del acero en las estructuras mixtas, exige la disposición de conectores que reduzcan o eliminen el desplazamiento relativo entre los dos materiales.

Con tal fin se utilizan diversos tipos de conectores. Entre ellos, los pernos conectores son los de más extendido uso, debido a la comodidad y rapidez de colocación que se lleva a cabo automáticamente, mediante una pistola que, con una técnica análoga a la de soldadura por arco eléctrico, produce la fusión del extremo del perno y de la superficie del metal, produciéndose la unión entre ambos. El arco se protege mediante un anillo cerámico. La operación suele durar un segundo y un operario con experiencia, puede colocar del orden de 100 pernos en una hora. La calidad de ejecución se puede controlar eficazmente, de acuerdo con los métodos establecidos en diferentes normativas. En las Normas se establecen también las condiciones que se deben cumplir al dimensionar los conectores (geometría, capacidad resistente, distancia entre ellos y a los bordes de la chapa a la que se suelde, espesores de ésta y su relación con el diámetro de los pernos, posibles secciones de rotura que deben ser verificados, criterios de armado, etc.).

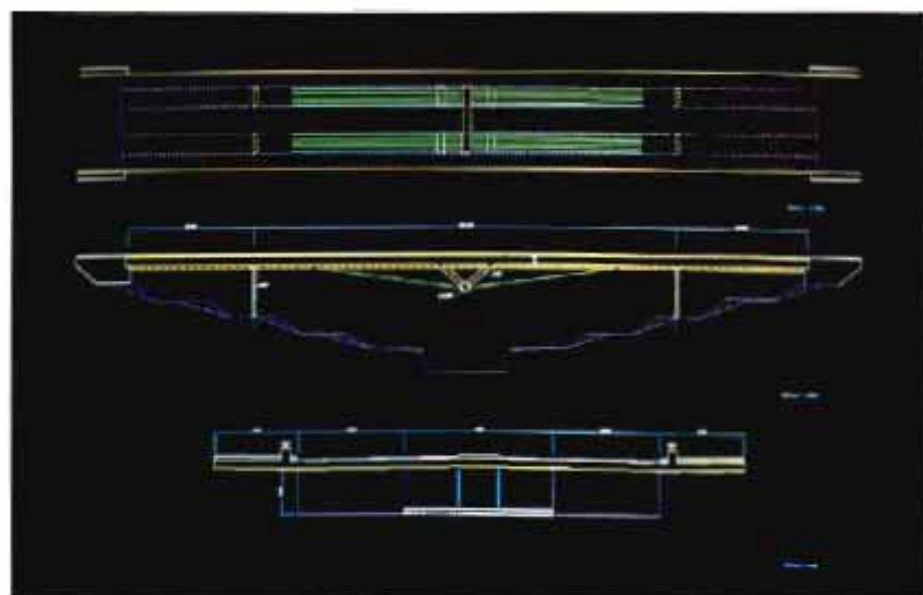


Fig. 23. Puente mixto sobre el río Vinalopó en Elche, para concurso.

En ocasiones, cuando la losa de hormigón ha estado constituida por placas prefabricadas, se han utilizado tornillos de alta resistencia que han cosido transversalmente hormigón y acero, recurriendo al rozamiento entre ambos materiales (proporcional a la compresión creada), para asegurar la transmisión de los esfuerzos rasantes.

6.2. Control de fisuración en las zonas de momentos negativos

En el caso frecuente de los tableros continuos, en la zona de apoyos, el hormigón está solicitado en tracción, lo que, entre otras cosas, puede provocar fisuras inaceptables.

Para solucionar este problema, se pueden utilizar diversos procedimientos que enunciamos a continuación:

- a) **Pretensado longitudinal de la losa de hormigón por medio de cables.** En general la losa se conecta a la viga metálica tras la puesta en tensión.
- b) **Desnivelación de apoyos.** La estructura metálica se eleva por medio de calzos en los apoyos intermedios. La losa se hormigona en esta posición y, tras su endurecimiento, se produce el descenso del conjunto del tablero hasta su posición definitiva. Así se provocan unos esfuerzos que comprimen la losa de hormigón.
- c) **Independizar la losa de la viga en la zona de apoyos,** disponiendo sólo conectadores en

la zona de momentos positivos.

- d) **Aceptar la fisuración del hormigón,** limitando la anchura de fisuras, armando correctamente la zona de losa solicitada en tracción y estableciendo un adecuado orden de hormigonado de la losa. Es la solución

riencia y funcionalidad de las obras.

Con tal finalidad, suele ser necesario establecer contraflechas de ejecución para la parte metálica de la estructura, que compense el efecto del peso del hormigón fresco cuando dicha estructura no esté apeada, y en otro caso, el efecto de las deformaciones diferidas de fluencia. También hay que compensar las deformaciones debidas a la retracción y a las cargas muertas.

Los procesos de soldadura inducen, asimismo, deformaciones de la estructura metálica que hay que controlar.

En cuanto a la limitación de flechas provocadas por la sobrecarga, en el texto actual del borrador de Instrucción de Puentes Mixtos (IPX-91) que se está debatiendo, figura lo siguiente:

"Se comprobará que la flecha correspondiente a la parte de las sobrecargas de la combinación frecuente ($\psi = 0,5$), no supera los siguientes valores:



Fig. 24. Puente del Diablo. Martorell (Mtez.-Calzón y Fdez.-Ordoñez).

más frecuente y, salvo casos especiales, probablemente la más lógica.

6.3. Deformabilidad y contraflechas

Hay que verificar que la geometría de la estructura, tras el proceso de construcción por una parte, y bajo el efecto de las sobrecargas por otra, sea adecuada para la apa-

L/800 en puentes de carretera

L/1000 en puentes urbanos con aceras accesibles y en pasarelas peatonales"

En diferentes Normas internacionales existen también criterios para controlar las vibraciones de los puentes, y evitar que afecten al comportamiento o funcionalidad de la obra.

7. Procedimientos de construcción

Como es natural, para la parte metálica de una estructura mixta se utilizan las técnicas habituales de las construcciones metálicas. Conviene fabricar y montar en taller los mayores tramos posibles, compatibles con las exigencias de transporte y con los medios de montaje. Se trata de reducir al menor número posible las uniones en obra. El cuadro siguiente nos da una idea de las dimensiones límites que pueden ser transportadas por carretera (en realidad, las dimensiones máximas dependen de la normativa de cada país, de las condiciones de la red de carreteras y de los medios de transporte disponibles):

	Anchura máxima	Longitud máxima
• Libre circulación.....	2,9 m	18,3 m
• Con autorización y escolta.....	4,3 m	27,3 m
• Transporte especial.....	más de 4,3 m	más de 27,3 m

En cuanto a la altura de las piezas, en general hasta 3,0 metros, no se plantean dificultades.

En cuanto al peso de las piezas, está limitado por la magnitud de las grúas necesarias para su manipulación. En general se recomienda no superar las 100 toneladas de peso, con un máximo absoluto de 150 toneladas.

En cuanto a los procedimientos de montaje en obra, se pueden citar entre los más habituales:

- Montaje con grúa**, adecuado cuando las dimensiones y peso de la pieza son reducidos, la accesibilidad al emplazamiento del puente, buena, y la altura del tablero, moderada.
- Lanzamiento de la estructura metálica con diferentes modalidades**. Este tipo de soluciones son particularmente interesantes cuando se trata de puentes de gran longitud, con el tablero a gran altura y cuando se trata de salvar un río, una playa de vías u otros obstáculos que impiden o dificultan el posicionamiento de las grúas.

También se utiliza, en el caso de puentes de grandes luces, el avan-

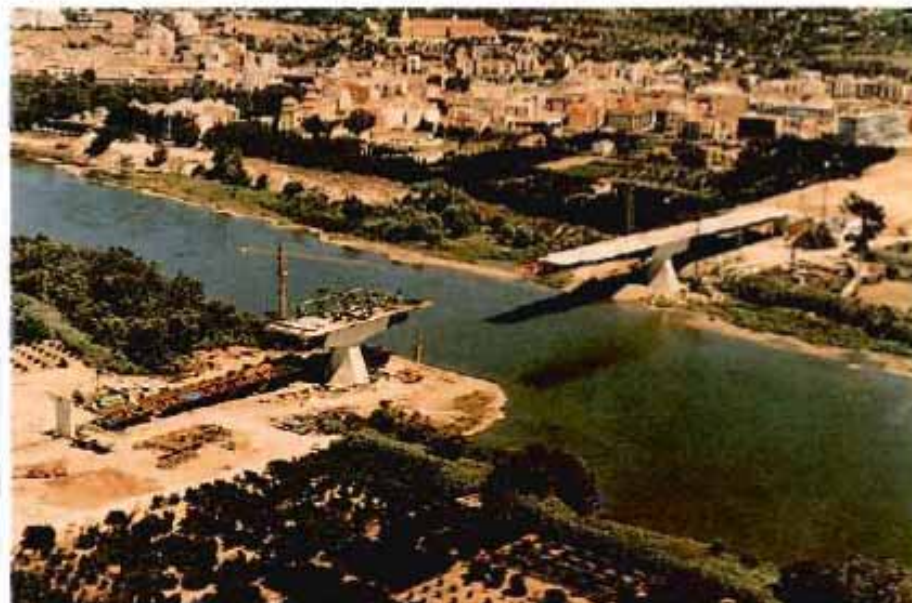


Fig. 25. Puente de Tortosa en construcción (Mtez.-Calzón y Fdez.-Ordoñez).

ce por voladizos, con dimensiones más importantes que en el caso de los puentes de hormigón. En el caso de que el puente cruce un curso de agua navegable, el transporte en barcaza de grandes tramos del puente para izarlo posteriormente, una vez situado en su emplazamiento definitivo, es otra solución que se ha utilizado con alguna frecuencia.

En los puentes en arco se suelen utilizar métodos de montaje singulares, en los que se trata de aprovechar la flexibilidad y escaso peso de la estructura de acero.

Una vez montada la parte metálica, la ejecución de la losa de hormigón puede llevarse a cabo también, utilizando diferentes sistemas. En primer lugar, hay que plantearse la posibilidad y la conveniencia de apuntalar provisionalmente la estructura metálica, de manera que el peso propio de la losa no actúe sobre la estructura metálica sola. La solución apuntalada permite, por un lado, reducir las dimensiones de la sección de las vigas o cajones. Por otro, exige un andamiaje provisional, que se reti-

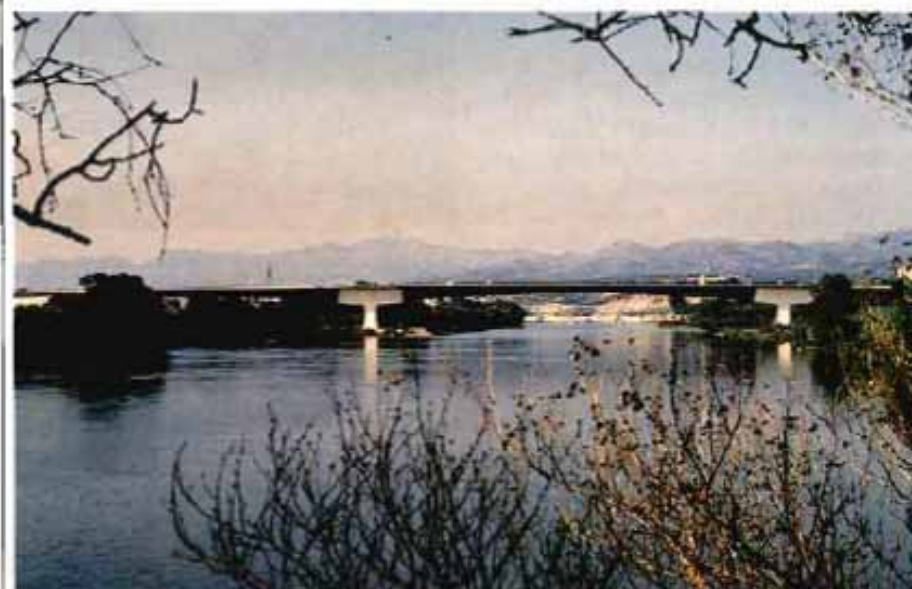


Fig. 26. Puente de Tortosa en servicio.

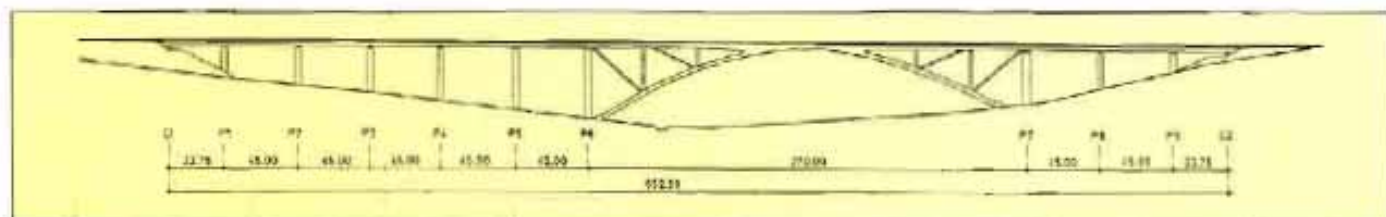


Fig. 27. Viaducto "Eau Rouge", Bélgica (Consultor: Bureau d'études Greish S.A.).

ra tras el fraguado del hormigón de la losa. Para que este sistema tenga interés, es necesario que la altura del apuntalamiento necesario sea reducida, que no haya problemas de cimentación y que no se perturbe sensiblemente el tráfico, cuando el puente se construya sobre una carretera en servicio. En otro caso, hay que diseñar la estructura de manera que la parte metálica sea capaz de soportar el peso del hormigón fresco, evitándose el andamiaje. Es la solución, generalmente, más lógica, por cuanto el mayor coste de los materiales se suele compensar con el menor coste de las cimbras.

En cuanto a la ejecución de la losa, en cualquiera de los dos casos, los procedimientos más habituales, son los siguientes:

- Ejecución "in situ".** Generalmente el encofrado para el hormigonado de la losa entre las vigas y cajones metálicos, se apoya en éstos. El hormigonado de los voladizos exige estructuras auxiliares apoyadas en las vigas o cajones metálicos. En el caso de puentes de gran longitud, el sistema de encofrado puede estar previsto para ir avanzando con el hormigonado del tablero.
- Utilización de prelosas de hormigón armado o pretensado,** colaborantes estructuralmente o como simple encofrado perdido.
- Losas prefabricadas de hormigón con cajetines para alojar los pernos conectadores y que,** en general, requieren un pretensado de los módulos en las zonas de apoyos.
- Chapas metálicas nervadas,** utilizadas como encofrado perdido.

8. El coste de los puentes de estructura mixta

El coste de la estructura de un

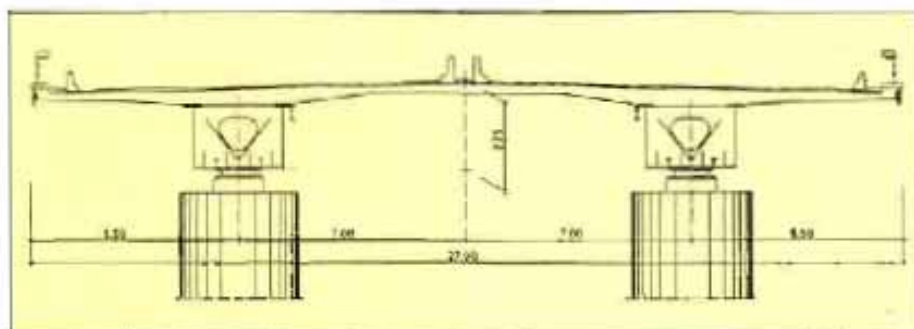


Fig. 28. Sección transversal. Viaducto "Eau Rouge".

puente tiene dos componentes fundamentales: las cuantías de los materiales y el precio unitario aplicable a cada uno de ellos.

En el caso de los puentes de estructura mixta, tenemos por un lado el coste de la losa y por otro, el del acero.

cuantías de los tres elementos característicos (hormigón, acero pasivo y encofrado), pueden ser:

Los precios unitarios de hormigón y acero suelen variar poco. No así el del encofrado que, incluyendo el andamiaje necesario, puede variar entre márgenes muy amplios

• Hormigón	0,20	a	30 m ³ /m ²	de	tablero
• Acero pasivo.....	25	a	40 kg/m ²	"	"
• Encofrado.....			1 m ² /m ²	"	"

Para la losa, a efectos de tanteos previos y considerando que la ejecución se realiza "in situ", las

en función de las características y ubicación de la obra.

En cuanto a las cuantías de ace-



Fig. 29. Montaje del arco del viaducto "Eau Rouge".

ro (A510) para la parte metálica de la obra, unas órdenes de magnitud pueden ser las siguientes:

- Luces de 30,0 m..... $100 \pm 15 \text{ kg/m}^2$
- Luces de 60,0 m..... $150 \pm 15 \text{ kg/m}^2$
- Luces de 90,0 m..... $200 \pm 15 \text{ kg/m}^2$

En Suiza, basándose en datos de puentes reales, sugieren la siguiente expresión para estimar los kilogramos de acero por m^2 de tablero, en función de la luz media ponderada del puente ($L_m = \sum L_i^2 / \sum L_i$) y del ancho de la calzada b :

$$g = 10 + \frac{2 L_m}{0,6 + 0,35 b}$$

con g en kg/m^2 , y L_m y b en metros.

En la literatura francesa se encuentra otra expresión, ciertamente más barroca, y que conduce a resultados muy diferentes. Es la siguiente:

$$g = 0,105 L_m^{1,6} + 100$$

en donde, para determinar el valor ponderado L_m se asigna a la luz de los vanos laterales de un tablero continuo y a la de los vanos isostáticos, un valor equivalente 40% superior al real.

En la literatura inglesa se encuentran otros valores característicos de cuantías de acero, que difieren también de los anteriores. Los diferentes tipos de cargas en los diferentes países, las diferencias en las reglamentaciones nacionales y los hábitos propios de los profesio-



Fig. 30. Puente mixto con losas prefabricadas postensadas longitudinalmente sobre la autopista A-19. Barcelona.

nales de cada país, explican las diferencias que se han expuesto.

El precio unitario del acero depende de muchos factores: calidad del acero, tipología estructural, dificultades de fabricación, protección contra la corrosión, transporte, sistema de montaje. Un orden de magnitud con el porcentaje correspondiente a los conceptos básicos que intervienen en el coste, se muestra en el cuadro siguiente. Dichas cifras se refieren al coste en taller, al que hay que añadir, según la naturaleza del contrato de ejecución de obras, el coeficiente del contratista general. En los últimos años el precio del material se ha mantenido prácticamente constante, mientras que el de la mano de obra, se ha incrementado notable-

mente. Por ello, la tendencia generalizada es, desde el punto de vista del coste, diseñar estructuras con mayores espesores de chapa para reducir o eliminar rigidizadores y detalles de costosa ejecución.



Fig. 31. Vista general del nudo de Trinidad en Barcelona.

Estimación de los componentes básicos del precio del kilogramo de acero

Punto	Sencillo		Normal		Complejo	
	Pts/kg	%	Pts/kg	%	Pts/kg	%
Materiales	70	38	70	28	70	22
Fabricación	60	32	90	36	120	38
Protección	20	11	25	10	30	10
Transporte	5	3	10	4	15	5
Montaje	20	11	40	16	60	19
Beneficio	10	5	15	6	20	6
Total	185	100	250	100	315	100

9. Plazos de ejecución

Uno de los grandes atractivos de las estructuras mixtas, es que pueden hacer posible una gran rapidez de ejecución.

Una gran parte de la obra se prefabrica en taller y se puede simultanear con la construcción de cimientos, pilas y estribos. El montaje de la estructura en obra, sobre todo en los casos en que se pueden utilizar grúas móviles, es muy ágil.

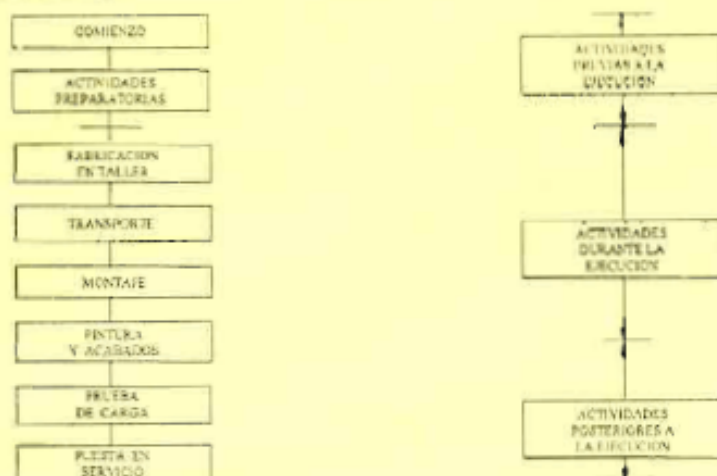
Estudiando adecuadamente el encofrado del tablero o con la utili-

“Uno de los grandes atractivos de las estructuras mixtas, es que pueden hacer posible una gran rapidez de ejecución.”

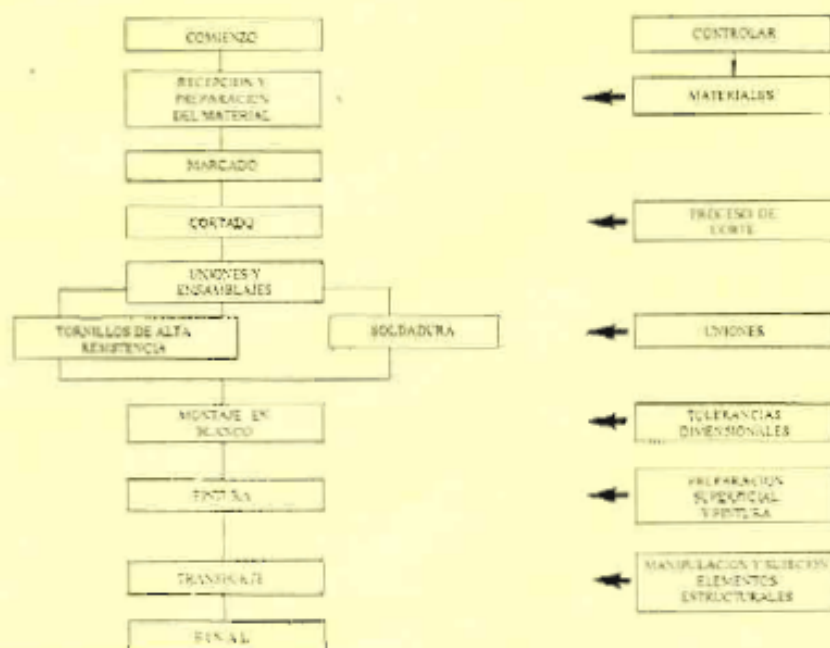
zación de prelosas, losas prefabricadas o chapa plegada, el hormigonado del tablero puede ser también muy rápido y se puede llevar a cabo, perturbando muy poco el eventual tráfico bajo la estructura.

No está de más, como referencias excepcionales, señalar que en el caso del Puente de La Meridiana en Barcelona, el primer croquis de la solución definitiva se gestó en mayo de 1991, y a finales de noviembre el complejo tablero metálico ya estaba en su posición definitiva. En el caso del Nudo de Trinidad, también en Barcelona, entre el comienzo del proyecto constructivo de la solución definitiva y la inauguración del conjunto de las estructuras mixtas, transcurrieron nueve meses, de septiembre del 91 a mayo del 92, con un invierno por medio. Naturalmente, son plazos excepcionales que se justifican en circunstancias excepcionales, pero que ponen de manifiesto las posibilidades de este tipo de soluciones.

PROCESO DE EJECUCION DE LA ESTRUCTURA METALICA DE UN PUENTE MIXTO



PROCESO DE FABRICACION EN TALLER DE LA ESTRUCTURA METALICA Y CONTROLES A REALIZAR



10. Control de ejecución

No se debe completar un texto de esta naturaleza sin hacer, siquiera muy someramente, referencia a este importante capítulo del proceso de ejecución de un puente mixto. En la ponencia presentada por el autor en la XVII Semana de la Carretera, que se celebró en Oviedo, en noviembre de 1989, expuse con algún detalle los aspectos más característicos del proceso de control de la parte metálica de este tipo de puentes. Aquí recogeremos los diagramas que enuncian las diferentes etapas de un control lógico, así como las actividades que son específicas de la etapa de ejecución.



Fig. 32. Tableros y pilas mixtas del nudo de Trinidad Barcelona.

11. Conclusión

La experiencia en países tecnológicamente avanzados y la que se ha acumulado en nuestro país en los últimos años, pone de manifiesto el interés de los puentes de estructura mixta.

La gama de soluciones posibles con esta tipología estructural es variadísima, como lo son las soluciones que son posible utilizar en la construcción.

En el texto que ahora concluye se ha incorporado información genérica y algunos datos que, con frecuencia, pueden ser de interés para quienes desde la Administración, el proyecto, la obra o el control, pueden estar involucrados en el futuro en alguna obra de esta naturaleza.

Referencias

1. Martínez Calzón, J. Ortiz Herrera, J., Construcción Mixta Hormigón-Acero. Editorial Rueda, Madrid 1978.
2. Lloyd C.P. Yam, Design of Composite Steel-Concrete Structures, Sarey University Press, London 1981.
3. De Miranda, Fabrizio, Ponti a Struttura D'acciaio, Italsider S.p.A. Génova 1971.
4. Johnson, R.P. Buckby, R.J., Composite Structures of Steel and Concrete, Volumen 2: Bridges, Collins Professional and Technical Books 1986.
5. Rockey, K.C., Evans, H.R. Editores, The Design of Steel Bridges, Granada Publishing, Gran Bretaña 1981.
6. Dubas, P., Gehri, E., Editors, Behaviour and Design of Steel Plated Structures, ECCS, Zurich 1986.
7. Guide Specifications for Horizontally Curved Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C. 1980.
8. Ponti in Struttura composta acciaio calcestruzzo (Esempi di calcolo), CISA, 1984.
9. Ponts Metalliques. Office Technique pour l'utilisation de l'acier, 1969.
10. Standard specifications for Highway Bridges, Association General Offices, Washington D.C. 1977.
11. Leonhardt, F., Brücken/Bridges, The Architectural Press Ltd: London 1982.
12. Composite Structures. ECCS, 1981.
13. Tordoff, D., Steel Bridges, The British Constructional Steelwork Association Ltd, 1985.
14. Eurocode nº 4: Common Unified Rules for Composite Steel and Concrete



Fig. 33. Encofrado y pernos conectadores de tableros mixtos en el nudo de Trinidad, Barcelona.

- Structures, Commission of the European Communities, 1985.
15. M.O.P.U., Colección de Puentes de Vigas Metálicas, MOPU 1984.
16. Rockey, K.C., Bannister, J.L., Evans, H.R., Editores, Developments in Bridge Design and Construction, Crosby Lockwood and Son Ltd, 1971.
17. Heins, C.P., Firmage, D.A., Design of Modern Steel Highway Bridges, John Wiley and Sons, New York 1979.
18. New Developments in Steel Construction, National Structural Steel Conference 1984.
19. Fauchart, J., Gerhault, M., La Construction Mixte Acier-Béton appliquée aux ponts, Office Technique pour l'utilisation de l'acier, 1967.
20. Eurocode Nº 3: Règles unifiées communes pour les Constructions en Acier, 1984.
21. Dal Pont, E., Nasce, V., Tecnica di Montaggio, CISA, 1975.
22. BS5400, Steel, concrete and composite bridges. Part 5: Design of composite bridges, 1979.
23. Eurocode Nº 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures. Part 1.1. General Rules and Rules for Building. Marzo 1992.
24. Propuestas de Instrucción para el Proyecto de Puentes Mixtos: IPX-91.



Fig. 34. Detalle de encofrados de tableros mixtos en el nudo de Trinidad, Barcelona.

- MOPT. Dirección General de Carreteras. (En estudio).
25. Propuestas de Instrucción para el Proyecto de Puentes Metálicos: IPM-91. MOPT. Dirección General de Carreteras. (En estudio).
26. Rui-Wamba, Javier, Curso Internacional de Carreteras: Puentes Mixtos de Hormigón y Acero.
27. Rui-Wamba, Javier, I Seminario de Ensidasa: Análisis comparativo acerca de la Construcción de Puentes en Acero en España y en otros países. Madrid, mayo 1988.
28. Rui-Wamba, Javier, XVII Semana de la Carretera: Control de Ejecución de Puentes Metálicos. Oviedo, noviembre 1989.
29. Rui-Wamba, Javier, Jornada sobre el Eurocódigo 4: Puentes Mixtos. Madrid, diciembre 1991.
30. Rui-Wamba, Javier, El Puente sobre la Meridiana y otros Proyectos Olímpicos. Revista O.P. Barcelona, otoño 1991.
31. IABSE Short Course Brussels 1990, Composite Steel-Concrete Construction and Eurocode 4. IABSE, volume 61, 1990.
32. IABSE Symposium Leningrad 1991, Bridges: Interaction between Construction Technology and Design. IABSE, volume 64, 1991.
33. Stahl-Information-Zentrum Stahlverbund-Brückenbau, 2., erweiterte Auflage, 1991, Düsseldorf.
34. SETRA. Ponts mixtes acier-béton bipoutres, guide de conception. Réimpression, 1990. Bagnaux Cedex.
35. La Modernidad en la Obra de Eduardo Torroja. Catálogo de la Exposición de junio 1979, Madrid. Colegio Ingenieros de Caminos, Ed. Turner ■

Javier Rui-Wamba Martija, Presidente de ESTEYCO, S.A.