

Una revisión biográfica y significativa de las estructuras mixtas de hormigón y acero estructural

A biographical and significant review of composite concrete and structural steel structures

Julio Martínez Calzón^a

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Recibido el 17 de febrero de 2019; aceptado el 9 de septiembre de 2020

RESUMEN

El artículo plantea una revisión histórica y personal de la evolución de las estructuras mixtas en España vista por el autor, que fue uno de los iniciadores de esta disciplina en España.

Se repasan los inicios de la disciplina, las principales referencias bibliográficas, las obras fundamentales del autor y aquellas innovaciones que se han llevado a cabo para mejorar el comportamiento estructural o los procesos constructivos.

© 2021 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Estructura mixta, conexión, puente, lanzamiento, innovación.

ABSTRACT

The article proposes a historical and personal review of the evolution of the composite structures in Spain seen by the author, who was one of the initiators of this discipline in Spain.

The beginnings of the discipline are reviewed, the main bibliographical references, the author's fundamental works and those innovations that have been carried out to improve the structural behavior or the constructive processes.

© 2021 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Composite structure, connection, bridge, launching, innovation.

0.

PLANTEAMIENTO

Esta exposición retrospectiva del mundo de las estructuras mixtas, como ámbito sobre el que estuve trabajando insistentemente durante algo más de cincuenta años, quiere ser, por una parte, algo testamental y biográfica, mediante una especie de radiografía analítica del camino recorrido a través del estudio y praxis de dicha tipología estructural, a la que así rindo, también, un particular homenaje por lo que supuso para mí realización profesional.

Y por otra, como intención primordial, desea transmitir, aunque sea someramente, el inmenso mundo de soluciones y posibilidades que un uso profundo y conocedor de dicho campo puede suscitar, de manera que las ideas e innovaciones que personalmente haya podido lograr tengan solo el carácter de semillas de otras muchas posibles realizaciones.

Finalmente, y no menos importante, aspira a ofrecer una mirada decidida y penetrante sobre los aspectos propios y singulares que estimo se dan en el ámbito estético-artístico de esta tipología, a causa de la subyugante combinación de los

* Persona de contacto / *Corresponding author*.
Correo-e / *email*: alvaro.serrano@mc2.es (Álvaro Serrano Corral).



Figura 1. a) Nave de ensayos original. b) Nave de ensayos nueva.

dos materiales más dominantes y extraordinarios que, en los casi dos siglos de su existencia, han propiciado e impulsado de forma admirable el quehacer global humano.

Para poder cumplimentar en la mejor forma tales objetivos, escribo el presente artículo, de carácter más o menos convencional, que se divide en dos partes diferenciadas, aunque muy relacionadas entre sí:

- La primera sigue el carácter biográfico antes señalado, no exento de aspectos técnicos o analíticos aclaratorios de temas muy diversos.
- La segunda, a partir de un momento dado prescinde, por irrelevante, de ese carácter biográfico, transformándose la narración en una exposición sistematizada y cronológica de los conceptos e ideas innovadoras que considero haber aportado a los sistemas mixtos, de manera que el artículo entre en una línea más propia de la revista técnica en la cual se presenta.

Asimismo, los artículos, conferencias, presentaciones, libros, revistas, manuales, etc., que –publicados o pronunciados en su momento– y localizables, al menos parcialmente, en repositorios digitales, permitirán a aquellos lectores interesados un acercamiento pormenorizado a las ideas, planteamientos y realizaciones descritos sucintamente en el artículo.

De esta manera, la percepción del ámbito expuesto puede ser, a la vez que meramente descriptiva, también pedagógica; no solo por la visión general y/o lectiva, que los temas puedan aportar, sino por la exposición más comprometida y profunda de los aspectos con los que intenté, en todo momento, avanzar en el conocimiento de esta disciplina.

1. EVOLUCIÓN BIOGRÁFICA

Antes de concluir la carrera, en 1960, practiqué por las tardes en el Estudio BABOR Ingenieros de Madrid¹, dedicado al pro-

1.- Juan Batanero García-Geraldo y Ramiro Rodríguez-Borlado, dos renombrados ingenieros especialistas en estructuras metálicas: catedrático de la Escuela de Caminos en dicha rama, el primero, y ayudante de la cátedra el segundo.

yecto de estructuras metálicas, donde colaboraría hasta 1964.

Al término en 1962 de los estudios en la Escuela de Caminos de Madrid, por entonces la única existente en España, ingresé en el Instituto Eduardo Torroja como investigador. Pronto fui nombrado jefe de la Sección de Ensayos Mecánicos, cuyas dos naves considero que fueron lugares esenciales en mi formación (figura 1), por la percepción directa que obtuve de las propiedades intrínsecas del comportamiento de los materiales en todas sus fases resistentes; contrastando la preparación analítica inicial de los ensayos con el posterior análisis y estudio del proceso de rotura de los mismos, en todo tipo de estructuras, piezas y probetas, generalmente de hormigón: en masa, armado o pretensado.

Fruto de esta doble experiencia instituto-estudio de ingeniería, vislumbré la posibilidad de aunar el trabajo de ambos tipos de materiales: el hormigón, en todas sus facetas y versiones, y el acero estructural en las suyas, para conseguir –mediante un trabajo combinado y sinérgico– resultados muy superiores a los de su acción por separado, empleando selectivamente las cualidades intrínsecas positivas de cada uno y reduciendo conjuntamente las debilidades, por su apoyo en el otro.

Al indagar en la formidable biblioteca técnica del Instituto sobre la eventual bibliografía relativa a esta posibilidad encontré, además de tres artículos de la revista *Der Stahlbau* sobre sendos magníficos puentes alemanes: Wuppertal, Kauppen y Flutbett, una obra de 1958 (figura 2) del profesor estadounidense Ivan Viest [1], a quien tuve el placer de conocer posteriormente con ocasión de mis actividades como miembro de la Comisión AIPC-CEB-CECM-FIP “Construcciones Mixtas de Hormigón y Acero”.

Pero especialmente, el libro del profesor austriaco Konrad Sattler [2] (figura 3), un tratado técnico de gran alcance que traduje para mí mismo y que me proporcionó, sin duda, la base primordial analítica y conceptual sobre esta tecnología, cuyo origen se remonta al año 1926, cuando el americano A. Khan patenta la primera versión de una viga mixta, formada con un perfil laminado al que levanta entallas alternadas en su ala superior a modo de conectadores.

No encontré, sin embargo, referencia alguna en todo el mundo latino, a excepción de una exposición de Eduardo Torroja sobre el puente de Tordera, en el cual empleó la conexión

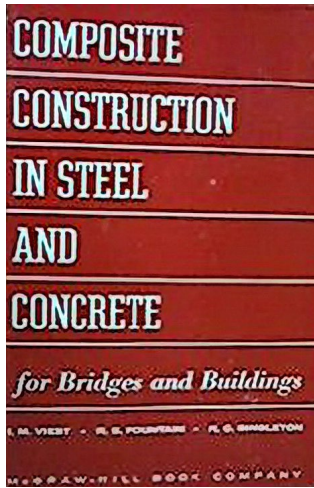


Figura 2. Portada del libro.

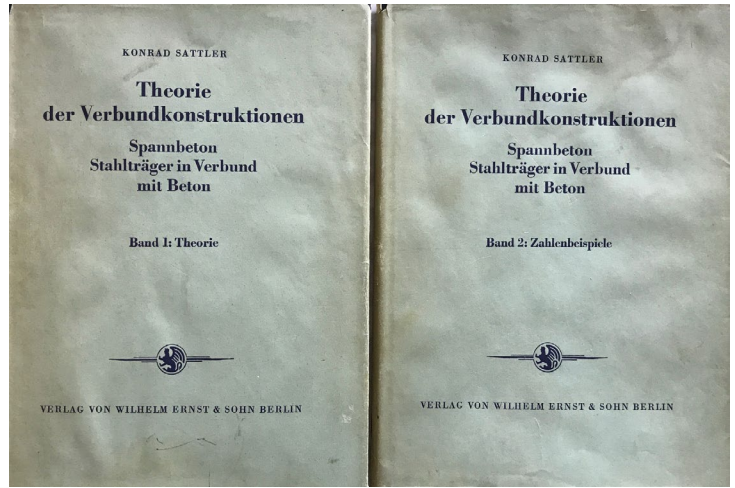


Figura 3. Portadas de los dos volúmenes.

entre materiales como mejora de la rigidez inercial de la obra, pero sin cuantificar esta aportación, ni tener en consideración ningún incremento de resistencia por el trabajo conjunto de los mismos.

Por supuesto que el acervo de potencialidades positivas antes expresado, encerraba también otros aspectos desfavorables, algo más ocultos, que al principio determinaron reducciones del aprovechamiento global del sistema. Principalmente, a causa de los métodos de cálculo en tensiones admisibles entonces vigentes; pero también por otras cuestiones analíticas todavía en esos tiempos no plenamente resueltas: variación de la rigidez de los elementos de hormigón en tracción por la fisuración (*tension stiffening*); alternancia del signo de los esfuerzos en las zonas de hormigón (deformaciones superpuestas); etc.

Pero ya en aquellos años 1964-65 la resolución de estos problemas estaba en marcha y pronto serían instaurados los métodos de cálculo en Estados Límites, que permitieron obtener un mejor aprovechamiento y control de la seguridad y la fiabilidad de los sistemas mixtos, al conseguir que los dominios elastoplásticos de los materiales pudieran ser aprovechados y no descartados, como sucedía con los métodos clásicos. Así, desde muy tempranamente consideré indudable el incorporar dichos procesos elastoplásticos para el mejor diseño de las estructuras mixtas.

En paralelo con los estudios analíticos antedichos, tuve la fortuna de vincularme con el arquitecto Jesús Martitegui, quien de manera intuitiva se había acercado a los sistemas mixtos para su aplicación en el ámbito de las estructuras de edificación.

Para poder garantizar de la mejor manera esta posibilidad de empleo, desarrollamos conjuntamente una patente de conexión, Nex-T, realizando un exhaustivo programa de ensayos privados de dicha conexión en tipos muy diversos de elementos estructurales típicos de esta tipología, que nos permitieron una comprobación muy completa de todas las respuestas posibles, determinando una incorporación muy beneficiosa a las obras de edificación y, poco después, a los puentes, con unas soluciones simples y económicas. Esta conexión en T competía entonces muy favorablemente con los pernos tipo Nelson de soldadura semiautomática, a causa del reducido coste de la mano de obra respecto al coste de los materiales. Cuando esta

relación se invirtió los pernos volvieron a ser más operativos; pero, aún hoy en día, considero que en muchas ocasiones en que han de emplearse, tanto en edificación como en puentes, disposiciones muy tupidas de pernos, la solución de elementos en T puede resultar operativa y económicamente bastante más favorable.

Los antedichos ensayos nos permitieron precisar que en el rango de dicho conector en T podría oscilar entre rígido y semielástico (figuras 4 y 5), en función de los espesores y restantes dimensiones de las chapas constituyentes; contrastando, por otra parte, que el elemento horizontal de la T regulaba el deslizamiento acero-hormigón, al introducirse durante el proceso deformativo unas contradeformaciones favorables, así como una compresión vertical del hormigón sobre la superficie del acero. De manera semejante a lo que sucede precisamente en los pernos, aunque en las T con mayor eficacia debido al mayor brazo que se pone en juego.

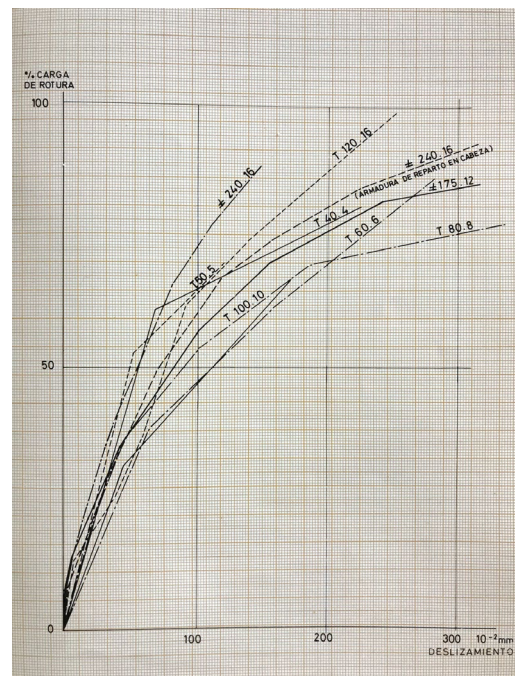


Figura 4. Resultados en los ensayos de conectores Nex-T.

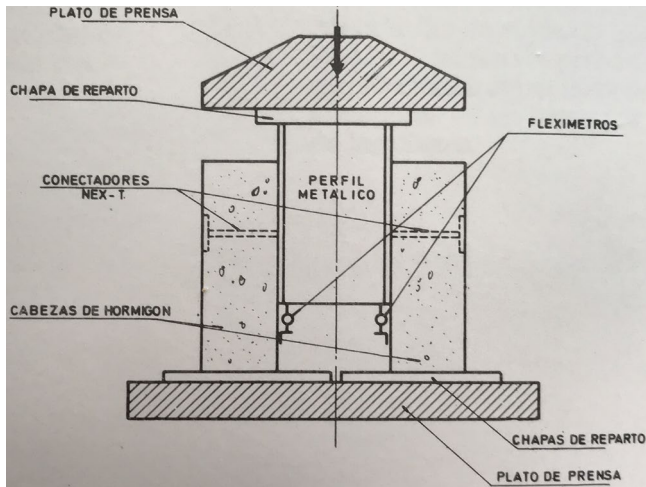


Figura 5. Disposición de los ensayos de cizallamiento de la conexión Nex-T.

El empleo de aquel conector fue clave para el desarrollo de muchos procesos y métodos constructivos en la edificación –y más tarde también en los puentes–, que se plasmaron en un interesante manual interno de análisis, utilización y métodos de las piezas mixtas, así como toda una empresa dedicada al análisis y a la construcción de estructuras mixtas de edificación: MART-2, utilizando dicha conexión Nex-T.

En este período pude llevar a cabo en 1967 y 1968 la ejecución sucesiva de dos obras mixtas relativamente modestas, pero de gran importancia en aquellos momentos: los pasos inferiores madrileños de la calle Velázquez (primero en construirse en la ciudad), seguido del de la plaza de Roma (figuras 6-a y 6-b).



Figura 6-a. Paso inferior Alcalá-Velázquez (Madrid).



Figura 6-b. Paso inferior de la Plaza de Roma (Madrid).

Posteriormente, desarrollaríamos el sistema Nex-Ten de vigas mixtas pretensadas (figura 7), de extraordinaria versatilidad para su empleo autoportante en puentes cortos, estructuras industriales y de edificación con grandes cargas o luces. Sistema que tuvo una activa difusión y uso, solo roto por la crisis que a principios de los 80 determinó la caída del mercado y el cierre de las instalaciones de la empresa citada en 1983².

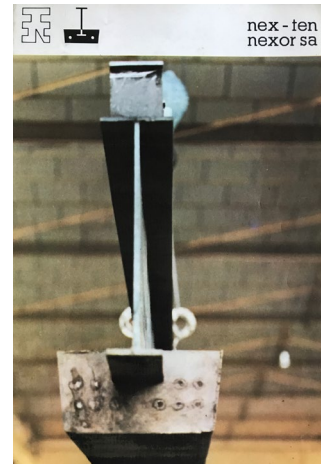


Figura 7. Sistema Nex-Ten.

En 1966, completé el libro Estructuras Mixtas [3] (figura 8), que sería la primera publicación en lenguas latinas sobre esta tipología estructural. En la misma se incluía, como primicia, el estudio de los Estados Límites para el análisis de tales sistemas. La obra teórica se completaba con un volumen de tablas de uso de secciones mixtas, que permitían el rápido control resistente y deformativo de piezas de este tipo.



Figura 8. Portada de los volúmenes del libro “Estructuras Mixtas”.

En ese mismo año, la revista Informes de la Construcción n° 182 incluyó el artículo “Las estructuras mixtas de acero y hormigón” y poco más tarde la revista Hormigón y Acero n° 90 (1969) otro acerca de las “Estructuras metálicas y mixtas pretensadas”.

La fortuna a veces acompaña a las ideas. En 1968 se convocó el concurso para el proyecto de un paso superior entre las calles de Juan Bravo y Serrano sobre la Castellana de Madrid.

2.- A finales de 2010 recibí de una industria italiana una propuesta de reactualización de este tipo de piezas y aunque en principio estimé muy posible tal actuación, el gran número de proyectos y compromisos que en esa época me obligaban, hizo que desistiera de aquella posibilidad, quizá desacertadamente.

El lugar no podía ser más atractivo y fue el momento oportuno para poner en práctica todos los recursos que había ido acumulando en aquellos seis primeros años de estudio y análisis de sistemas mixtos. Todo lo aprendido y ensayado fue empleado en aquella ocasión para presentar un proyecto plenamente novedoso, que resultó ganador. Su realización posterior (1970) (figura 9), puso en marcha, verdaderamente, la construcción de puentes mixtos en España.



Figura 9. Paso superior Juan Bravo-Eduardo Dato (Madrid).

Aquella obra fue un hito importante, no solo por su diseño, sino por las innovaciones que incorporaba:

- Sistemas cajón de acero con placas de hormigón totalmente prefabricadas.
- Pretensado preconexión de la losa del tablero del tramo continuo central del puente, pretensado y prefabricación que eliminaban prácticamente las deformaciones diferidas y

reducían notablemente las elásticas, permitiendo lograr una buscada esbeltez para el vano principal sobre la Castellana, proporcionando una gran ligereza visual a la estructura.

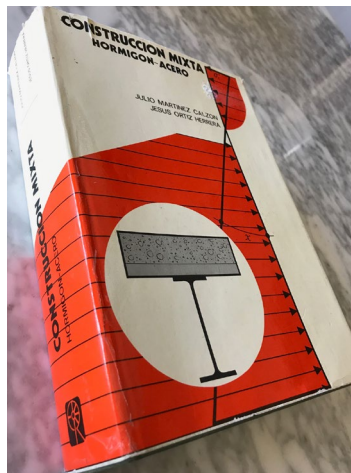
- Empleo por vez primera en España del acero tipo COR-TEN, autorresistente a la corrosión e importado de Alemania, al no ser por entonces fabricado todavía en España.
- Empleo iniciático del hormigón blanco estructural, tanto en las placas del tablero como en las pilas buscando sobre todo una presencia cromático-textural de ambos materiales y lograr, mediante formas de gran classicismo: columnas con capiteles, grandes artesonados en el fondo del tablero, impostas y barandillas especialmente diseñadas, completar una expresión estética que eliminara radicalmente las nociones de fealdad con que se tildaba a este tipo de estructuras en los ámbitos urbanos.

Esta estructura y más tarde otras posteriores, pusieron en marcha en el ámbito de los puentes españoles un sentido nuevo de creación estética, resaltando el potencial que los sistemas mixtos ofrecen al ingeniero estructural para la innovación y el diseño cuidado, debido a las posibilidades de esbeltez, texturas diferenciadas y empleo del contraste cromático entre materiales, para acoplarse muy apropiadamente al ámbito del diseño.

Aunque seguidamente proyecté otras diversas obras, no sería hasta 1974 cuando construiría el segundo puente mixto, en este caso el viaducto denominado del Diablo sobre el río Llobregat en Martorell, en colaboración con José Antonio Fernández Ordóñez. Un enclave histórico en el que se situaban: un puente de piedra romano y gótico (figura 10), aunque muy reconstruido; y otro metálico de carácter clásico, de primeros del siglo XX, al cual debía sustituir la nueva obra. También en esta ocasión la oportunidad fue aprovechada para aportar otras importantes novedades:



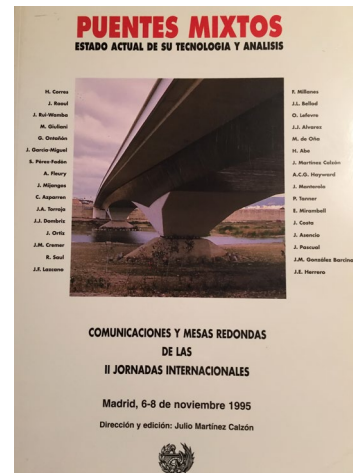
Figura 10. Puente del Diablo sobre el río Llobregat con el puente romano-gótico detrás.



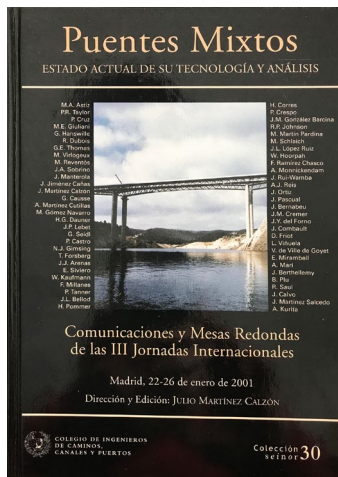
a



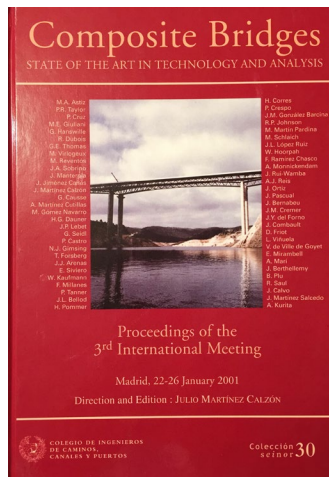
b



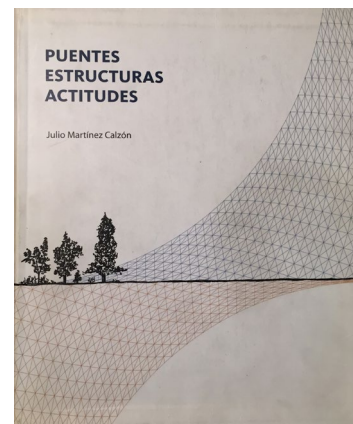
c



d



e



f

Figura 11. Portadas de las publicaciones de Julio Martínez Calzón (1978-2006).

- Empleo combinado, con unión empotrada, de pilas de hormigón-pretensado de grandes dimensiones con dinteles mixtos en los vanos para constituir un sistema de tipo aporticado continuo (sistema híbrido).
- Construcción mediante el método de voladizos sucesivos aplicado a grandes dovelas metálicas autoportantes en las zonas pretensadas, correspondientes a las solicitaciones de momentos flectores negativos; combinado con el cierre, mediante dovelas aún mayores y también autoportantes, situadas tanto en la clave del vano central como en los extremos de los vanos laterales, zonas ambas solicitadas por momentos flectores positivos.
- Tratamiento estético conjunto del diseño del puente y de un muro de contención fluvial, para conformar un enclave urbanístico de calidad, regenerador de una zona urbana periférica muy degradada de la ciudad de Martorell.

Desafortunadamente, con posterioridad, en la misma zona fue construido el gran viaducto de la Autopista Madrid-Barcelona que, con sus enormes proporciones, desvirtuó notablemente las cualidades logradas previamente para aquel entorno.

La obra descrita inauguró la tipología híbrida para el diseño de puentes mixtos, caracterizada por el empleo de grandes elementos portantes de hormigón (de carácter escultórico y valores estéticos muy cuidados, buscando constituir la imagen

representativa de estas obras) combinados con dinteles mixtos esbeltos, usualmente en acero CORTEN, para conseguir, a través de su contraste cromático con las pilas, un diseño original y poderoso, de gran expresividad, para puentes con luces principales comprendidas en el orden de 100 a 250 m, aproximadamente.

Considero que el potencial de este tipo de sistemas no ha sido suficientemente explotado; porque, aunque yo mismo y también algunos otros compañeros –especialmente discípulos míos– hemos llevado a cabo diversas obras de esta tipología, su expansión real creo que aún no se ha producido, teniendo en cuenta las formidables cualidades resistentes, constructivas, económicas y estéticas que posee. Confío en que, en algún momento, estos valores sean debidamente percibidos y puedan realizarse soluciones extraordinarias con esta tipología.

Algo después, en 1978 se publicó el libro “Construcción Mixta Hormigón-Acero” [4] (figura 11-a), escrito conjuntamente con Jesús Ortiz Herrera, un extraordinario ingeniero de caminos que colaboró conmigo hasta el cierre del Gabinete MART2 en 1983. Esta obra estableció, con todo rigor, los aspectos determinantes del conocimiento preciso y completo del comportamiento deformativo-resistente de las estructuras mixtas, preparando el terreno para el posterior tratamiento mediante programas de cálculo electrónico de todo tipo de

análisis de secciones y estructuras; y se ha mantenido como clásica publicación de referencia hasta nuestros días.

Otras publicaciones de interés vendrían bastante más tarde:

- Primeras Jornadas Internacionales de Puentes Mixtos (1992) [5] (figura 11-b).
- Segundas Jornadas Internacionales de Puentes Mixtos (1995) [6] (figura 11-c).
- Terceras Jornadas Internacionales de Puentes Mixtos (2001) [7] (figuras 11-d y 11-e).
- Puentes, estructuras, actitudes (2006) [8] (figura 11-f).

A partir de este momento, resulta preferible cambiar la línea cronológico-biográfica de la narración hasta aquí seguida, por otra de carácter más técnico, que vaya relacionando en forma sucesiva las diferentes innovaciones analítico-constructivas, desarrolladas paso a paso a lo largo del tiempo, para lograr una mejor utilización de las estructuras mixtas aplicadas a los puentes. Una visión muy amplia y bien analizada de los puentes mixtos, para aquellos que tengan interés en esta tipología, se presenta en la tesis doctoral de Jorge Bernabéu Larena [9].

Aunque también fueron aportadas otras innovaciones en el ámbito de las estructuras mixtas en la edificación, su incidencia resulta hoy en día mucho menos operativa y no se estima necesario describirlas expresamente en este trabajo, exponiéndose con algún detalle en la referencia anterior.

2. INNOVACIONES ANALÍTICO-CONSTRUCTIVAS

De acuerdo con este nuevo criterio de exposición, debe señalarse que la solución híbrida inaugurada en Martorell fue, posteriormente, empleada en una serie de proyectos construidos, introduciendo en cada uno novedades secundarias que irían perfeccionando los aspectos originales básicos del método:

- Puente de Tortosa sobre el río Ebro (1987) (figura 12), en colaboración con José Antonio Fernández Ordóñez y Francisco Millanes Mato. En esta obra la ejecución del vano central fue realizada exclusivamente mediante voladizos sucesivos, culminándose el cierre de ambos semivanos con una operación previa de empuje en clave, que introdujo una redistribución de momentos muy favorable que reducía notablemente las flexiones descompensadas en los fustes de las pilas traspasando momentos positivos al vano central principal, perfectamente preparado para este tipo de esfuerzos, al acoplarse a las envolventes de esfuerzos usuales en puentes pórtico, como era este caso.

En los vanos laterales, sin embargo, sí se aplicó el montaje de una gran dovela extrema como cierre de estos, en forma semejante a Martorell.

Para esta obra fue creado el método DIFEV de análisis evolutivo de secciones y sistemas mixtos complejos, que permitían llevar a cabo un cuidadoso control analítico y constructivo de este tipo de estructuras.

- Puente en el cinturón de circunvalación de Valencia (*bypass*) (figura 13) sobre el río Turia (1991), en colaboración con Francisco Millanes Mato.

En este caso, además de emplear la disposición de fustes



Figura 12. Puente de Tortosa (Tarragona).



Figura 13. Puente sobre el río Turia (Valencia).



Figura 14. Puente del Arenal sobre el río Guadalquivir (Córdoba).

inclinados para las pilas, la solución híbrida del sistema incorporó como novedad que los dinteles de las mismas no fueran totalmente en hormigón pretensado, sino almas híbridas; es decir, mitad inferior, comprimida, en hormigón, y mitad superior, traccionada, en acero. Se logra así una disposición de materiales plenamente ajustada a los signos de la distribución de tensiones presentes en cada zona, a la vez que una nueva expresividad formal de gran calidad, mayor economía y una gran facilidad constructiva.

- Puente del Arenal en Córdoba sobre el río Guadalquivir (1993) (figura 14), en colaboración con José Antonio Fernández Ordóñez.



Figura 15. Puente de Mengibar sobre el río Guadalquivir en la Autovía Bailén-Jaén.

La solución antedicha de almas híbridas fue también aplicada en este puente en las zonas de pilas, aunque eliminando completamente las piezas de fuste, al estar la rasante del puente muy baja sobre el cauce del río. Las almas en esas zonas fueron nuevamente divididas: inferior en hormigón blanco y superior en acero corten, pero planteadas con una disposición global de tipo viga continua de canto ampliamente variable.

- Puente de Mengibar sobre el río Guadalquivir (1995) (figura 15).

En esta oportunidad las pilas carecen de brazos horizontales, limitándose a un gran fuste de hormigón, de espesor y anchura crecientes de arriba abajo; fuste al cual se empotran a cada lado los vanos mixtos del puente. La innovación especial de esta obra correspondió a la tipología del tablero, con el empleo de voladizos prefabricados de hormigón pretensado dispuestos a distancias regulares, sobre los cuales apoyaban placas prefabricadas semirresistentes de hormigón armado. Esta disposición determinaba que la losa de dicho tablero estuviera bastante elevada por encima de las platabandas superiores del cajón metálico, formalizándose la conexión mixta con dicho cajón mediante un nervio longitudinal hormigonado *in situ* conjuntamente con la capa superior de las placas, para conseguir una vinculación de total continuidad de los subsistemas incluidos en el conjunto, así como la adecuada conexión de los mismos a la sección de acero del cajón.

- Viaducto del río Nalón, en la Autovía del Cantábrico (2006) (figura 16), en colaboración con Álvaro Serrano Corral de MC2.



Figura 16. Viaducto del río Nalón (Asturias).

En esta obra las pilas del vano principal sobre el río se constituyen mediante dos bielas casi verticales y casi paralelas, que

provocan el potente empotramiento buscado para el tablero, el cual se une directamente con cada una de las bielas a través de las losas de hormigón de fondo del cajón situado sobre las mismas.

- Puente de Villanueva de la Serena, sobre el río Guadiana (figura 17), en colaboración con Ginés Ladrón de Guevara de MC2.



Figura 17. Puente de Villanueva de la Serena (Badajoz).

Una sola pila central de gran dimensión, que sigue los mismos principios base que las del Arenal en Córdoba, aunque formalmente muy diferente.

- Puente para el AVE sobre la autopista A-31 y el ferrocarril en Albacete (2012) (figura 18), en colaboración con Álvaro Serrano Corral.



Figura 18. Puente para el AVE sobre la A-31 (Albacete).

En línea formal semejante al anterior, pero con muy diferente concepción interna.

En este concepto tipológico de sistemas híbridos podrían incluirse algunas soluciones de interés no construidas entre los que parece oportuno citar los siguientes: Nuevo puente de Mérida sobre el Guadiana (1989) (figura 19), paso superior sobre la A-6 en Majadahonda (1994) (figura 20) y puente de Alcalá de Guadaíra sobre el río Guadalquivir (2001) (figura 21).

La siguiente innovación, empleada por vez primera en el mundo, fue la doble acción mixta en 1978, en el puente sobre la ría de Ciérvana (Vizcaya) (figura 22).



Figura 19. Proyecto nuevo puente sobre el Guadiana (Mérida).



Figura 20. Esquema del paso superior de Majadahonda (Madrid).



Figura 21. Proyecto puente de Alcalá de Guadaíra (Sevilla).

Consiste en el empleo de hormigón comprimido en los fondos de las zonas sometidas a momentos flectores negativos en los puentes continuos. Estas losas inferiores de hormigón se conectan a las platabandas que cierran inferiormente las vigas cajón de acero, reduciéndose el espesor resistente de estas últimas al mínimo necesario, junto con la correspondiente rigidización, imprescindible para hacer frente a los esfuerzos en tales secciones metálicas simples, durante las fases de montaje, previas al hormigonado de las referidas losas.

El resto de las compresiones provocadas por las solicitaciones posteriores, tanto permanentes como de las sobrecargas, actúan ya sobre este sistema mixto inferior. Asimismo, el análisis en agotamiento considera las redistribuciones elastoplásticas entre materiales, contribuyendo por tanto todo el conjunto de ambos materiales en la capacidad resistente de la sección.

Debido a la curvatura en planta, la aplicación de esta innovación fue analizada también en relación con la torsión del sistema para garantizar la total colaboración conjunta en este otro tipo de solicitación.

Las evidentes condiciones favorables de esta tipología hicieron que fuera empleada en todos y cada uno de los proyectos de puentes realizados posteriormente, sin importar las dimensiones de la obra, el proceso constructivo, la tipología, etc.

En particular, su empleo a renglón seguido en los puentes curvos gemelos del centro comercial del Jarama (1981) (figura 23), tuvieron una favorable influencia en el control del comportamiento deformativo torsional a causa del reducido radio en planta de este doble paso superior.

En paralelo con esta innovación y precisamente para poder realizar de la mejor manera el aprovechamiento elastoplástico en rotura de estas grandes platabandas inferiores mixtas, fue incorporada otra novedad del máximo interés: las células de rigidez inferiores (figura 24). Piezas metálicas en forma angular que, al adosarse y soldarse en taller, tanto al interior de las

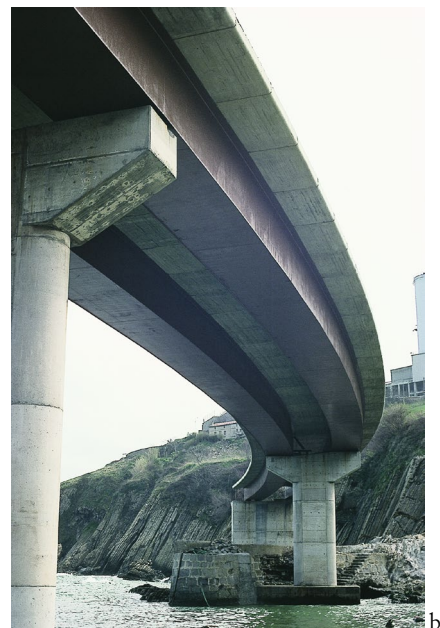
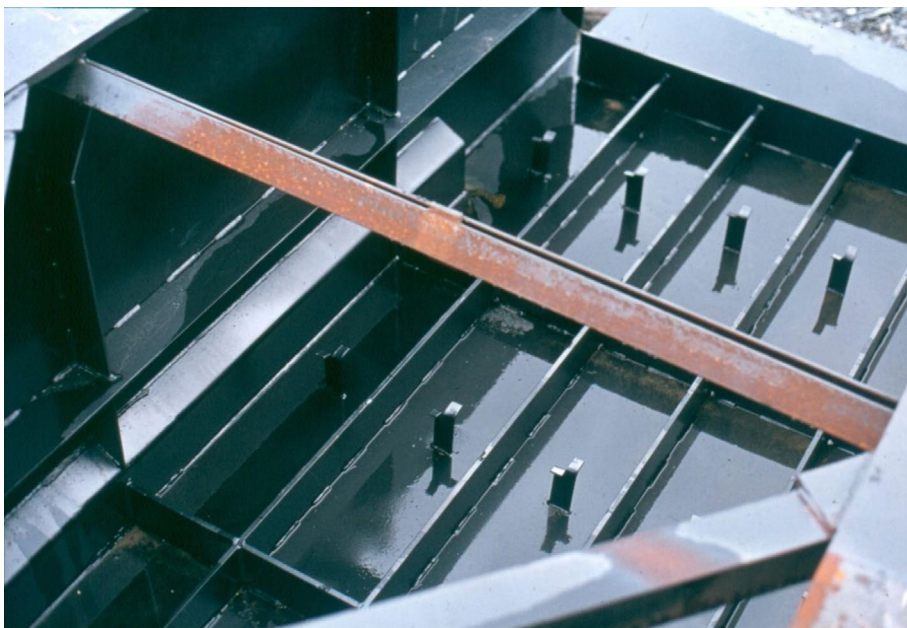


Figura 22. Puente sobre la ría de Ciérvana. a) Vista de la zona de fondo del cajón metálico, con sus células, antes del hormigonado de fondo. b) Vista inferior del puente terminado.



Figura 23. Puentes curvos gemelos del centro comercial del Jarama.

almas como a las platabandas metálicas inferiores, producen unas zonas celulares, trapeciales o rectangulares, que determinan varias características funcionales muy importantes:

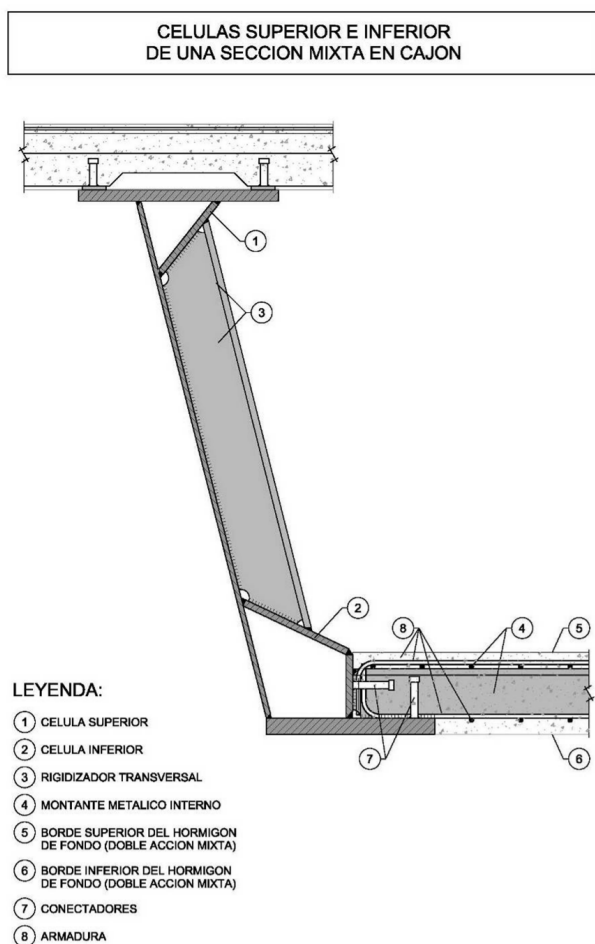


Figura 24. Disposición de células de rigidez en zona de doble acción mixta.

- Por una parte, mejoran apreciablemente las condiciones del hormigonado y conexión de las losas de fondo al cajón, al poder disponer conectadores en los tramos verticales de dichas células, que se intercalan con los dispuestos en los extremos laterales de la chapa de fondo.

- Por otra, y especialmente importantes, acortan sensiblemente la altura de las zonas de almas en compresión, y reducen por tanto el valor de las tensiones máximas en los puntos inferiores de dichas almas.

Obviamente, las tensiones más elevadas se sitúan en el panel que ahora forma parte de la célula, pero su reducida altura determina que no sean críticas desde el punto de vista de la abolladura.

Estas circunstancias, no solo permiten mantener los espesores de las almas en sus valores resistentes estrictos –sin influencia apreciable del efecto de la abolladura– sino que posibilita que tales almas puedan ser consideradas compactas (clase 1) o como caso más desfavorable semicompactas (clase 2), pudiéndose emplear, sin restricciones, los métodos elasto-plásticos con total aprovechamiento; imposible de otra manera en los sistemas que no incorporan tales células, por las elevadas esbelteces que en tales casos tendrían las almas metálicas.

Esta presencia de las células de rigidez determina una clara reducción de espesores y rigidización de dichas almas metálicas, aportando las propias células su capacidad última a la flexión en agotamiento, lo cual mejora sensiblemente todo el conjunto;

- Finalmente, pero no con menor importancia, esta disposición de células de rigidez resulta esencial en los casos de puentes empujados, sobre todo cuando se emplean almas inclinadas en los cajones metálicos para favorecer la estética del conjunto y reducir la anchura del fondo de tales cajones, mejorándose el aprovechamiento del ancho colaborante del fondo de los mismos.

En tales casos, la acción de las células durante las fases de paso sobre los aparatos de apoyo deslizantes –especialmente en los puntos centrales entre diafragmas sucesivos de la viga cajón– resultan cruciales por tres motivos:

- Incrementan extraordinariamente la capacidad frente a la abolladura local al producir una coacción muy favorable al pandeo local del alma sobre el apoyo deslizante.
- Introducen una rigidez torsional local muy activa en las esquinas inferiores, que redistribuye los efectos puntuales trasladando mediante este mecanismo parte de los mismos a las cartelas de fijación de los diafragmas de celosía al cajón.
- Favorecen el comportamiento de las diagonales de los citados diafragmas, al incorporar una disposición de extremo prácticamente empotrado.

En los casos de almas verticales, aunque la aportación de las células resulta menor, se siguen manteniendo la mayor parte de las mejoras señaladas, creándose otras adicionales favorables, por ejemplo: la eliminación de depósitos de agua en las zonas de unión alma-platabanda, especialmente si la célula presenta levemente inclinada su chapa superior.

Correlativa de esta innovación fue la aplicación de células de rigidez superiores. De manera menos trascendente, ofrecen también ventajas en los aspectos correlacionales antedichos; muy en especial, en los casos de zonas en flexión positiva de la sección metálica aislada, tanto durante las fases de lanzamiento por empuje acompasado como en el resto de las fases de montaje anteriores a la conexión con la losa superior del tablero.

Prosiguiendo el proceso innovador de la doble acción mixta, y especialmente aplicable a los puentes mixtos continuos de luces medio-bajas, desarrollé una nueva tipología variante denominada puentes en cajón estricto (figura 25).

DISPOSICION TIPICA DE
CAJON ESTRICTO EN ZONAS DE APOYOS

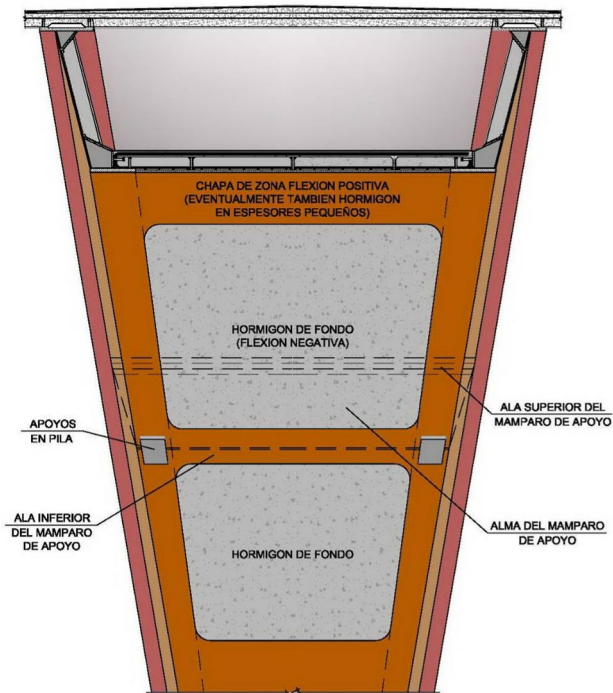


Figura 25. Cajón estricto mixto.

Esta solución fue desarrollada buscando una alternativa mucho más económica y favorable a las soluciones de doble viga (*bi-poutre*) francesas, utilizadas de manera magistral en la realización de los tramos ferroviarios del TGV (*Train a Grande Vitesse*), pero que encierran numerosos puntos delicados en las zonas de momentos flectores negativos.

La primera aplicación de esta innovación se produjo durante el proyecto de los pasos superiores de nueva planta de Vilobi (figura 26-a) y La Roca (figura 26-b), sobre la A-7 en Barcelona (1994), que debían asemejarse en lo posible a los sistemas de luces ampliadas, aplicadas en un número importante de casos en el mismo tramo de la autopista.



Figura 26. a) Paso superior de Vilobi sobre la A-7.
b) Paso superior de la Roca sobre la A-7.

El desarrollo y características de esta tipología fueron presentados en el Congreso de Puentes de Pittsburg (1995) [10] pero creo que no fue muy comprendida, a excepción de por los expertos franceses del tipo de puentes antedichos, como posteriormente se tuvo ocasión de discutir con ellos en las sucesivas Jornadas de Puentes Mixtos.

Dicha denominación indica con claridad el objetivo perseguido: emplear el acero estructural en los puentes mixtos con vigas cajón de una manera estricta, situándose este material exclusivamente en las zonas netamente favorables a dicho material.

Así, la chapa inferior de fondo de los cajones metálicos resulta prácticamente eliminada a lo largo de todo el puente, sustituyéndose por losas de hormigón de espesor adecuadamente variable, siguiendo el diagrama envolvente de flexiones, conservándose tan solo dos relativamente estrechas platabandas metálicas en los bordes laterales de la viga cajón—centradas bajo las almas o, preferentemente, por estética y conservación, dispuestas hacia el interior del cajón—; chapas en las cuales se sitúan, además de las células de rigidez, usualmente empleadas, los necesarios conectadores para vincular las losas de fondo en hormigón.

El hormigonado de estas losas de fondo, suele venir confinado entre las paredes verticales de las células de rigidez inferiores y se puede efectuar en las zonas de momentos flectores negativos con notables espesores de dos maneras diferentes:

- Mediante sencillos encofrados inferiores temporales; apropiadamente suspendidos de las platabandas inferiores antedichas, cuando se trata de puentes cortos o viaductos montados *in situ* mediante segmentos metálicos apropiados.
- Mediante un encofrado vertical retráctil, situado en el parque de lanzamiento por empuje, cuando este es el procedimiento constructivo empleado.

En este último caso, el fondo del vano situado al frente del empuje no se hormigona, para no introducir un peso desfavorable en zonas que además no han de resistir esfuerzos importantes durante la maniobra, dado que perjudicarían notablemente las flechas en el extremo (“nariz”) del frente de avance. Dicho tramo se hormigona al término del proceso de empuje, una vez que toda la estructura se encuentra en su posición definitiva.

El resto de estas losas de fondo, sucesivamente hormigonadas durante el proceso de empuje, deben ser convenientemente armadas: longitudinalmente, para evitar la fisuración excesiva de las mismas durante las fases de aplicación de momentos flectores positivos en el empuje, y garantizar el apropiado cierre de tales microfisuras al cambiar el signo de tales esfuerzos, en las posiciones de apoyo durante el empuje; y transversalmente, para hacer frente a las solicitaciones de flexión por peso propio y a las torsionales globales del sistema mixto.

Esta disposición con las losas de fondo exclusivamente situadas en las zonas de flexión negativa fue posteriormente aplicada en numerosas ocasiones, por su efectividad y economía:

- Variante de las Casas sobre la SO-20 en Soria (1998) (figura 27).
- Puente de Santa Lucia, sobre la ría del mismo nombre en Montevideo (Uruguay) (2005) (figura 28).
- Viaducto del estrecho de Paredes en la A-40, Cuenca (2010) (figura 29), en colaboración con Ginés Ladrón de Guevara de MC2.
- Viaducto del Nalón (2006) (figura 30).



Figura 27. Variante de las Casas sobre la SO-20 (Soria).



Figura 28. Puente de Santa Lucía, Montevideo (Uruguay).



Figura 29. Viaducto del estrecho de Paredes en la A-40 (Cuenca).

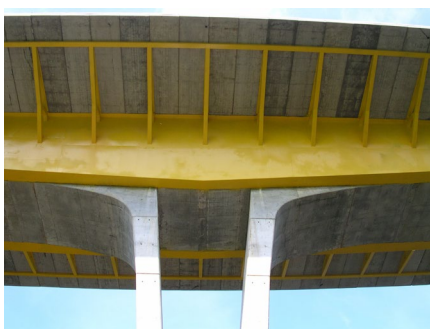


Figura 30. Viaducto del Nalón (Asturias). a) Vista general inferior. b) Fondo del cajón en pilas principales. c) Fondo del cajón en pila tipo.

Pero la principal innovación aportada por este tipo de soluciones en cajón estricto, y especialmente favorable en los casos en que se requieran condiciones muy rigurosas de deformabilidad, corresponde al empleo de dicho tipo de losas inferiores de hormigón en vigas cajón, también en las zonas de momentos flectores positivos, lo cual parece en principio una contradicción. Sin embargo, y tal como seguidamente se describe, esta solución ofrece un enorme interés y muchas posibilidades.

En estos casos, la chapa de acero que usualmente cerraba inferiormente las vigas cajón metálicas de los puentes continuos mixtos en las zonas centrales de los vanos, solicitadas por momentos flectores positivos, es sustituida –de manera semejante a lo expuesto para las zonas de apoyo con flectores negativos– por una losa, en este caso muy delgada, de hormigón armado, compuesta por:

- Una placa prefabricada de tipo semirresistente, de pequeño espesor, en la parte inferior;
- y una capa superior hormigonada *in situ*, también de espesor reducido.

En ambas zonas se incluyen las oportunas armaduras pasivas necesarias para hacer frente, con mínimas fisuraciones a las tensiones principales de tracción provocadas por las sollicitaciones torsionales del sistema, combinadas con las de flexión positiva, tanto transversales como longitudinales. En este último caso de flexión positiva global del cajón, sin embargo, la aportación en rotura de la armadura longitudinal en las placas no se considera, siendo tal esfuerzo encomendado exclusivamente a la resistencia de las platabandas inferiores de acero dispuestas en los laterales de la viga cajón y las armaduras incorporadas a la capa de hormigón sobre dichas placas.

En servicio, especialmente en lo relativo a las inercias que gobiernan los valores de las flechas, las losas inferiores de

hormigón sí se consideran con el valor de la rigidez fisurada (*tension stiffening*), lo cual incrementa muy apreciablemente la inercia del conjunto, que reduce las citadas flechas en servicio, así como limitando notablemente los efectos dinámicos de vibración; aspectos ambos de la mayor importancia en la funcionalidad de los puentes ferroviarios de las líneas de alta velocidad.

Empleadas también por vez primera en los citados pasos superiores de Vilobi y La Roca, tuvieron su mayor importancia en el diseño del viaducto del “Arroyo de las Piedras” para el AVE en Málaga (2006) (figura 31), en colaboración con Francisco Millanes, entonces en IDEAM; empresa que dirigiría posteriormente la obra y que, más tarde, llevaría a cabo otros grandes proyectos con este tipo de soluciones en cajón estricto para importantes viaductos en los trayectos del AVE.

La siguiente innovación corresponde a las pilas mixtas, incluyendo los pilonos de puentes atirantados. Esta solución responde, en general, más que a una utilización técnica propiamente dicha, a un diseño estético-constructivo, aunque en casos singulares, especialmente en pilonos, el sistema mixto sí puede aportar aspectos esenciales de carácter muy variado; resistente, deformacional, ductilidad, fatiga, etc. favoreciendo expresamente este tipo de soluciones.

Su empleo se inició en los pasos superiores de los accesos al centro comercial del Jarama (1982) (figura 23), en las pilas de hormigón, a las cuales se incorporaron rebordes metálicos de acero CORTEN. Su empleo en este caso, como antes se ha mencionado, respondió más a lograr una profunda visión dialéctica entre esos dos materiales, que a incrementar la capacidad resistente de las piezas. Diálogo en el cual fueron también incluidas las impostas y barandillas en acero corten, para incrementar la intensidad visual del conjunto.



Figura 31. Viaducto de las Piedras (Málaga).

Posteriormente, este tipo de pilas fue utilizado en muy diversas ocasiones, entre las cuales pueden destacarse:

- Paso superior de la calle Torrelaguna sobre la A-2 en Madrid (1983) (figura 32), en la que predominaron los aspectos estéticos y de unificación de elementos.
- Paso superior de Marqués de Suanes sobre la A-2 en Madrid (1987) (figuras 33 y 34). Mediante este diseño combinado, las pilas se transformaron en verdaderos objetos escultóricos de tipo suprematista.
- Pasos superiores de Vilobi (figura 35) y La Roca (figura 36) (1994).
- Doble puente de Sant Adrià sobre la Ronda Litoral de Barcelona (1991) (figura 37), con idéntica disposición que en el caso de marqués de Suanes.
- Puentes E-23 y E-25 en la circunvalación de Valencia sobre la salida de la A-3 hacia Madrid (1991) (figura 38).
- Puente para el AVE sobre la calle Comercio en Madrid (2012) (figura 39), en colaboración con Álvaro Serrano Corral de MC2.

Una versión especial, de cierto interés, corresponde a la pila mixta de acero inoxidable y hormigón ligeramente armado en el interior de las barras diagonales comprimidas, del puente del parque tecnológico de Granadilla en Tenerife (1997) (figura 40); cumpliendo no solo una labor de imagen singular (concurso de proyectos), sino funciones de importancia en los aspectos constructivos y de durabilidad, al favorecer activamente la ejecución y actuar magníficamente frente a la corrosión marina y las tormentas de arena, muy usuales en ese enclave, manifestando con gran claridad los posibles empleos favorables de este tipo de elementos estructurales en casos especiales.

En el puente de las Américas sobre la autovía de acceso al aeropuerto internacional de Montevideo, Uruguay (2005)

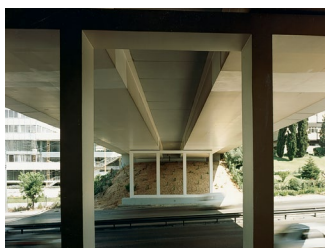


Figura 32. Paso sobre la A-2 c/ Torrelaguna (Madrid).



Figura 33. Paso sobre la A-2 c/ Marqués de Suanes (Madrid).



Figura 34. Paso sobre la A-2 c/ Marqués de Suanes (Madrid).



Figura 35. Pasos superiores de Vilobi (Girona).



Figura 36. Pasos superiores de La Roca.



Figura 37. Puente de Sant Adria (Barcelona).



Figura 38. Puentes E-23 y E-25 (Valencia).



Figura 39. Puente para AVE c/Comercio (Madrid).



Figura 40. Puente de Granadilla (Tenerife).

(figura 41) el empleo de una solución mixta para el pilono atirantado resultó absolutamente inmejorable ya que, aparte de permitir configurar con nitidez la imagen de su compleja y esbelta forma, buscada para constituir un icono –de carácter escultórico y muy estético, que impulsara la regeneración de una zona urbana muy deprimida– sus aportaciones en el plano técnico fueron esenciales:

- Por una parte, permitió, como se ha dicho, una ejecución rápida, precisa y perfecta de la forma buscada.
- Por otra, favoreció la ejecución de un pretensado vertical excéntrico al fuste, capaz de establecer una igualdad de flexiones alternadas idénticas entre la fase permanente (con solicitaciones de compresión casi simple) y la fase de máximas sobrecargas excéntricas sobre el fuste; consiguiéndose de esta manera un coste global muy económico para una realización completa y atractiva.

En proyectos no construidos:

- Puentes de Sama de Langreo (1987) (figura 42) y río Lézrez, Pontevedra (1991) (figura 43), ambos atirantados. En esta tipología el pilono mixto central resulta una solución de gran esbeltez y elegancia.
- Grandes pilas en delta (figura 44) y abanico (figura 45) de las soluciones propuestas para el 2º puente sobre el canal



Figura 41. Pila del puente de las Américas (Montevideo).



Figura 42. Proyecto del puente de Sama de Langreo (Asturias).



Figura 43. Proyecto del puente de Lerez (Pontevedra).



Figura 44. Proyecto de puente sobre el canal de Panamá. Solución delta.



Figura 45. Proyecto de puente sobre el canal de Panamá. Solución abanico.

de Panamá (2000), en colaboración con Jorge Bernabéu Larena de MC2.

- Una innovación muy singular, a mitad de camino entre la estética y la técnica, fue empleada en los grandes fondos de las vigas cajón mixtas de canto variable de los vanos del puente de Cerdeña en Barcelona (1991), empotrados en los muros del túnel de enlaces ferroviario existente en la zona y al cual cruzaban.

En este caso, además de plantear una visión inferior totalmente en CORTEN, incluyendo los fondos de los voladizos del tablero y sus impostas, y emplear –por supuesto– la doble acción mixta, se buscaba conseguir un artesanado especial de tales fondos (figuras 46-a y 46-b), en la línea estética neoclasicista del arquitecto inglés Robert Adams (fi-

gura 46-c). Para ello, se dispusieron listeles rehundidos que, a la vez que determinaban la presencia de dicho artesanado, eran también rigidizadores longitudinales o transversales, según las zonas.

Aunque la ejecución de estos paneles era ligeramente más laboriosa que en la solución tradicional, el efecto logrado respondió al objeto estético buscado, reduciendo la pesadez visual que unos paneles planos y de gran ancho pueden producir, transformándolos en unos elementos atractivos y singulares.

- Innovación aplicada a las ampliaciones de luces de pasos superiores en la A-7 en Barcelona (1991) (figuras 47, 48 y 49).

Esta necesidad funcional, que se va acrecentando a medida que los sistemas viales requieren incrementar las capacidades



Figura 46. a) zona inferior en el estribo. b) zona inferior en el empotramiento de la plaza central. c) artesanado de un salón de Robert Adams.



Figura 47. Paso superior típico.



Figura 48. Paso superior con doble cajón de hormigón.



Figura 49. Paso superior con cajón muy ancho sobre hormigón.

de su tráfico rodado, puede realizarse:

- Mediante un pretensado exterior de gran potencia, que conlleva operaciones muy complejas y unos resultados estéticos francamente deplorables, por su acritud y dureza.
- Con la innovación del denominado método de las "parihuelas". Solución combinado-mixta, consistente en disponer acopladas colateralmente a los elementos del cajón existente de hormigón pretensado, dos vigas cajón romboidales de acero corten para poder, posteriormente a la realización en el hormigón de unas perforaciones transversales a media altura, introducir en las mismas barras de pretensado apropiadas que, cruzando el cajón de hormigón, pretensan transversalmente todo el sistema conjunto. Estos grupos de barras, situados sobre los puntos de apoyo del paso superior en las pilas que han de eliminarse, efectúan, por rozamiento, el traspaso de las fuerzas de reacción a las vigas metálicas antedichas, mediante la transferencia por elevación de estas últimas. De esta manera, el sistema queda apoyado sobre las nuevas pilas de carácter

mixto, con zonas metálicas extremas conectadas con el resto del hormigón que completan los fustes, recibiendo las nuevas reacciones, pero pasando el cajón de hormigón sobre las mismas, sin apoyar inicialmente. En dicho momento las pilas originales pueden ser demolidas al estar completamente descargadas.

Al quedar el sistema de hormigón con las mismas reacciones y geometría iniciales, los esfuerzos en el mismo son idénticos a los previos. Las variaciones posteriores de los esfuerzos debidos a las sobrecargas, al experimentar las vigas parihuela leves asentamientos en los antiguos puntos de apoyo, son muy pequeñas y pueden incluso reducirse, efectuando una leve sobre-elevación durante la transferencia, de manera que se puedan compensar tales efectos.

Asimismo, pueden colocarse apoyos muy elásticos del cajón de hormigón sobre las nuevas pilas, de manera que, a partir de un cierto estado, aparezcan reacciones capaces de garantizar que las envolventes finales del sistema de hormigón en rotura se acoplan a las capacidades del mismo.



Figura 50. Pasos superiores de luces ampliadas con solución en pescante.

Otra versión de esta tipología fue empleada en el caso de las ampliaciones de luces de los pasos superiores del *by-pass* de Valencia (figura 50), así como en otras estructuras de la autopiستا del Cantábrico en Guipúzcoa y en la zona de Galicia.

En tales casos, al no existir pila central, las vigas parihuela fueron sustituidas por sendas piezas mixtas en pescante que recogían, en los extremos del dintel horizontal volado, las reacciones de la estructura inicial sobre las antiguas pilas. Los mecanismos de cosido y transferencia resultan en todo momento idénticos a los casos anteriores, garantizando el nuevo proceso resistente del sistema.

Otra innovación definida como continuidad mixta, de grandes piezas de hormigón pretensado en cajón abierto superiormente (“artesas”), consistió inicialmente en incorporar a elementos de este tipo, con canto variable entre un máximo en los extremos y un mínimo en el centro, dos elementos laterales inferiores en L de acero corten, situados en las esquinas inferiores del cajón en taller y conectados al mismo; así como elementos verticales y horizontales en los extremos, de manera que se pueda conseguir que, al contactar *in situ* dos de estas piezas, el espacio dejado se pueda rellenar de hormigón, para conectar ambas piezas entre sí y al sistema metálico antedicho, estableciendo una continuidad global.

En ese momento, el sistema se pretensa de manera exenta (pretensado exterior) mediante cables inclinados dispuestos en el interior de ambos cajones, quedando el conjunto preparado para recibir el sistema de placas prefabricadas semirresistentes y el posterior hormigonado *in situ* de la capa superior, que conecta toda la losa del tablero al sistema cajón previamente descrito.

Tanto este grupo de cargas, como el resto de acciones permanentes y sobrecargas, determinan un estado de tensiones en las vigas cajón que no provocan fisuración de las mismas y que, colaborando en agotamiento, las armaduras de pretensar conjuntamente con las armaduras superiores pasivas dispuestas en la losa superior del tablero, para garantizar la resistencia requerida.

Esta solución fue aplicada, buscando una visión estética adicional muy marcada, en el puente de Valencia sobre el río Turia en 1992, en la zona denominada el Jardín (figura 51).



Figura 51. Puente sobre el río Turia (Valencia).

Posteriormente, esta aplicación se adaptaría a elementos artesa de hormigón pretensado, utilizando en obra un pretensado exterior horizontal dispuesto en las cabezas superiores sobre las

zonas de apoyos, para conseguir idénticas condiciones a las antedichas en el sistema parcial continuo. Esta versión se aplicó en los viaductos de La Clamor y El Gallo en la línea del AVE Madrid-Barcelona (1999) (figura 52).



Figura 52. Viaducto de La Clamor, L.A.V. Madrid-Barcelona.

La siguiente innovación de importancia corresponde a las denominadas células elásticas de empotramiento, planteada por vez primera en el puente del Arenal en Córdoba (1993) (figura 53). En este puente, como ya se ha expuesto al describir los sistemas híbridos, se deseaba lograr el canto más estricto posible, para favorecer el desagüe del vano central y la disposición de pasos peatonales situados bajo los vanos laterales en sus encuentros con los estribos.



Figura 53. Ejecución de la zona de célula elástica.

Para lograr este fin, se consideró que el vano principal debía tener un empotramiento mayor al que los vanos laterales en continuidad le proporcionaban. Para ello, se incorporaron en cada pila unos empotramientos elásticos regulables de gran capacidad, integrados en las mismas; de tal manera que una gran parte de los momentos flectores negativos máximos de dicho vano central se transmitieran a las cimentaciones de las pilas, “filtrando” la transferencia de tales momentos negativos a los vanos laterales, para lograr que el valor de estos esfuerzos fuera del mismo orden que los provocados en dichos vanos en la hipótesis de máximas sobrecargas actuando sobre los mismos.

El mencionado filtro lo producen las células de empotramiento elástico, constituidas por un doble sistema de diafragmas en cada pila, con una separación de 2.50 m entre sí, análoga a la longitud visual horizontal del fondo de dichas pilas (figura 54).

Tales pilas en realidad actúan como grandes piezas cajón longitudinales; es decir, como una importante “expansión”

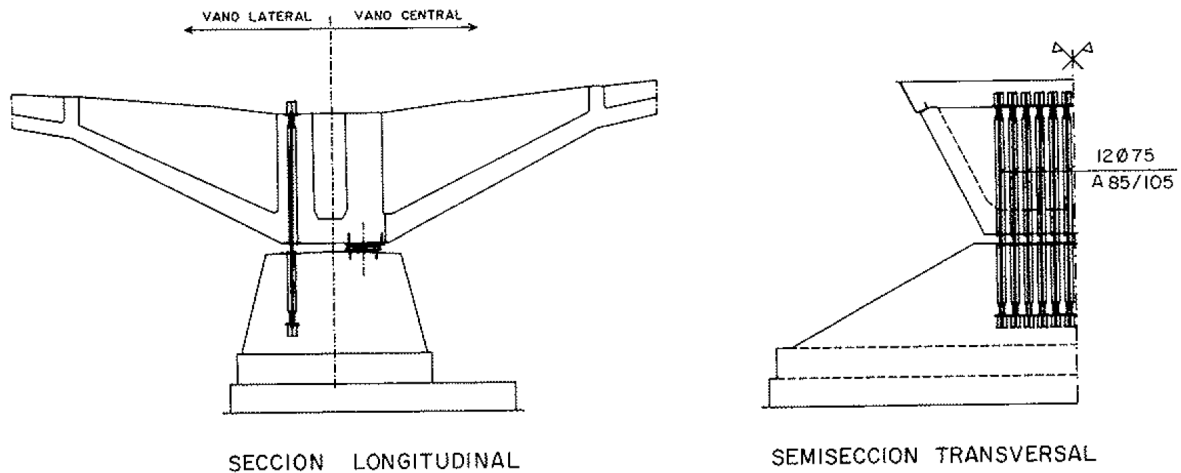


Figura 54. Esquema de célula de empotramiento elástico.

geométrica del canto variable diseñado para los vanos del puente, estando constituidas las vigas en tales zonas por un cajón de hormigón con almas híbridas: con una zona inferior correspondiente a la pseudo pila en hormigón; y otra superior en acero estructural, en continuidad resistente y visual con los vanos mixtos del puente.

Se trataría, por tanto, de un concepto estético-técnico, de carácter postmodernista, al visualizarse la tipología resistente de una manera diferente al trabajo real del sistema.

Las parejas de mamparos o diafragmas de cada célula elástica en apoyos están constituidas de la siguiente forma:

- El mamparo interior al vano central, por un grueso tabique de hormigón armado que resiste las potentes compresiones de los pares de empotramiento recogidos por las células.
- El mamparo exterior, por una celosía metálica en su parte alta –coincidente con la zona de alma metálica–; combinado con otro tabique de hormigón en la zona inferior. En este último, y en paralelo con la celosía, se introduce en las vainas tubulares dejadas a tal efecto un conjunto de barras de pretensado que se anclan inferiormente en la cimentación y superiormente en el borde alto del citado semimamparo de hormigón.

Esta disposición de células proporciona un método constructivo muy favorable ya que, una vez construidas dichas piezas, y tras el tesado y fijación de las barras, el sistema pila es capaz de recibir, sin ningún tipo de apeos o elementos auxiliares, las acciones del montaje de los vanos; primero en articulación, al ser montados, y posteriormente como continuos, tras el soldeo de las juntas de unión entre dovelas metálicas.

La ejecución del tablero es, asimismo, de carácter totalmente autoportante, resistiendo el sistema híbrido pila-cajones metálicos, una vez pretensada la zona de losa del tablero sobre la pila, las acciones de construcción del tablero; contribuyendo así todos los subsistemas al mejor aprovechamiento posible de los materiales y a la facilidad de ejecución citada.

Esta innovación de células elásticas sería empleada más adelante en diversas ocasiones, con notable aportación de estas

a la estética de las obras y en los procesos constructivos de gran sencillez que procuran:

- 4º puente sobre el Urumea en San Sebastián (2000) (figura 55). En este caso las células se sitúan integradas en el interior de los muros que canalizan la ría, sin presencia visible, efectuando el empotramiento del vano único de 80 m de luz, para conferir una magnífica esbeltez a la obra. Las células permiten, inicialmente, colocar un tramo metálico corto en voladizo sobre cada una de las mismas; voladizos capaces de recoger en sus extremos a la dovela central flotante que cierra el cajón metálico, completándose así –tras el soldeo de dichas dovelas– el sistema autoportante que recibirá la losa completa de hormigón del tablero.



Figura 55. Puente sobre el Urumea (San Sebastián).

- De manera parecida, este tipo de células fueron dispuestas en los extremos del puente de Villanueva de la Serena sobre el río Guadiana (2008) (figura 56), complementando a la gran pila central para lograr un sistema de dos vanos semiempotrados, esbeltos y de menor coste.



Figura 56. Vistas de la pila central en la solución ideal proyectada.

Estas células elásticas no solo representan posibilidades técnicas y constructivas de interés en el diseño y la economía, sino que ofrecen la capacidad de reajustar, durante las fases isostáticas del proceso, las flechas de recepción y montaje de los tramos, garantizando el poder regular fácilmente eventuales errores de ejecución o rigideces reales frente a las teóricas consideradas para los elementos, eliminando rasantes incorrectas y evitando rellenos inadecuados de corrección.

La reposición de las barras de tesado de las células, las cuales incluyen rótulas esféricas en los extremos de las mismas, para impedir la presencia de esfuerzos parásitos transversales

causados por los movimientos longitudinales del puente, está contemplada a lo largo de toda la vida de la obra, para garantizar así su trabajo, de manera que estos sistemas funcionen como apoyos deslizantes en todo momento.

No como innovación, pero sí como aplicación activa de los sistemas mixtos, la rehabilitación del puente de Tordera (1996) (figura 57), proyecto de 1939 de Eduardo Torroja quién, de manera también innovadora, había introducido en esta obra una solución mixta, si bien no activamente considerada en la resistencia, sí favorecedora de las condiciones de rigidez frente a la deformabilidad. Ello permitió el empleo de subsistemas mixtos adecuados para ampliar el ancho de calzada y garantizar la seguridad frente a las nuevas acciones, superiores a las del diseño inicial, que el puente debía resistir; respetándose en todo momento la imagen original de la obra, aunque con apropiados refuerzos de sus elementos.

Empuje y volteo en el puente de Contreras (1998) (figura 58). La solución constructiva de esta gran obra en celosía mixta utilizó este procedimiento, no como innovación personal, sino como empleo del método planteado conjuntamente por la empresa LASTRA, especializada en este tipo de montajes, y el ingeniero proyectista Hugo Corres Peiretti, para la construcción de un puente sobre el Sil en León, más tarde realizado con dicho procedimiento.



Figura 57. Puente de Tordera (Gerona). Vista inferior del puente ensanchado y rehabilitado.



Figura 58. Viaducto de Contreras (Valencia).

Método Ábaco para empuje de puentes continuos de canto variable. Esta innovación, aplicada por vez primera en el puente de Santa Lucía en Montevideo (Uruguay) (2005), había sido planteada previamente para el proyecto de este tipo de obras en alguna ocasión previa no realizada; e incluso fue expuesta y descrita, de manera genérica, en un artículo presentado en la Jornada del Grupo Español del IABSE del año 2000 [11] incluyéndose entre una gama genérica de soluciones aplicables a puentes y edificios empleando procesos evolutivos autogenerativos muy diversos.

Este método considero que tiene –como he señalado antes para el caso de los sistemas híbridos– un recorrido importante en el caso de viaductos sobre zonas complejas: dársenas, grandes ríos, valles profundos, etc. o urbanas muy congestionadas con infraestructuras o edificaciones previas.

El concepto base es emplear para el tablero un sistema mixto de canto constante, fácilmente empujable, adoptando para todos los vanos unas longitudes ideales iguales o muy parecidas, al incorporar sobre los fustes de las pilas reales principales del viaducto, a modo de brazos de una T, elementos

volados de longitudes tales que las luces prácticas libres de los vanos entre extremos de dichos brazos resulten parecidas.

Una vez que estos sistemas en T están contruidos –que podrían serlo también con otras formas diferentes: en V, en ∇ delta, u otras; y de tipologías diversas: hormigón, mixtos, metálicos de alma llena, o de celosía, etc. – la disposición de los apoyos de rodadura en los extremos de estos brazos, permiten el empuje de un tablero de canto constante que salva dichas luces muy homogéneas con gran sencillez. Ello requiere, no obstante, un apoyo analítico muy especial, que tenga en cuenta la alta deformabilidad interactiva de tales piezas en T cuando reciben las cargas de paso en uno de los extremos, sin todavía ejercerse en el extremo opuesto del voladizo ningún tipo de acción; y combinado todo ello con las posibilidades de: cajones estrictos con sus losas de hormigón de fondo ya ejecutadas; eventual fisuración de elementos: fustes y brazos de pilas; etc. Análisis que ha de ser muy exactamente definido durante el desarrollo evolutivo del proceso.

Un aspecto de interés, que considero oportuno exponer, corresponde al diseño de la zona de cambio de canto en los extremos de los brazos volados de las pilas, una vez que ambos sistemas se conectan y pasan a formar uno en la obra definitiva. Se podría disponer el remate de estas piezas muy afinado, manteniendo el apoyo provisional de rodadura hacia al interior del brazo, y lograr así rigidez y resistencias apropiadas para responder en la fase de empuje más desfavorable; pero en tal caso, se requeriría una sobre elevación adicional de tal apoyo, para que el frente del avance no incidiera previamente en la punta del voladizo, con los problemas que esto añadiría a la evolución de flechas, elevación temporal de apoyos dorsales, etc. Este tipo de problemas en los sistemas de remate afinados (que también podrían ser inicialmente abatibles y luego recogidos) determina que, salvo en casos especiales, sea preferible el cambio brusco del canto de la estructura completa.

Con esta disposición, el flujo de esfuerzos en la estructura final completa da lugar a un importante desvío de las fuertes

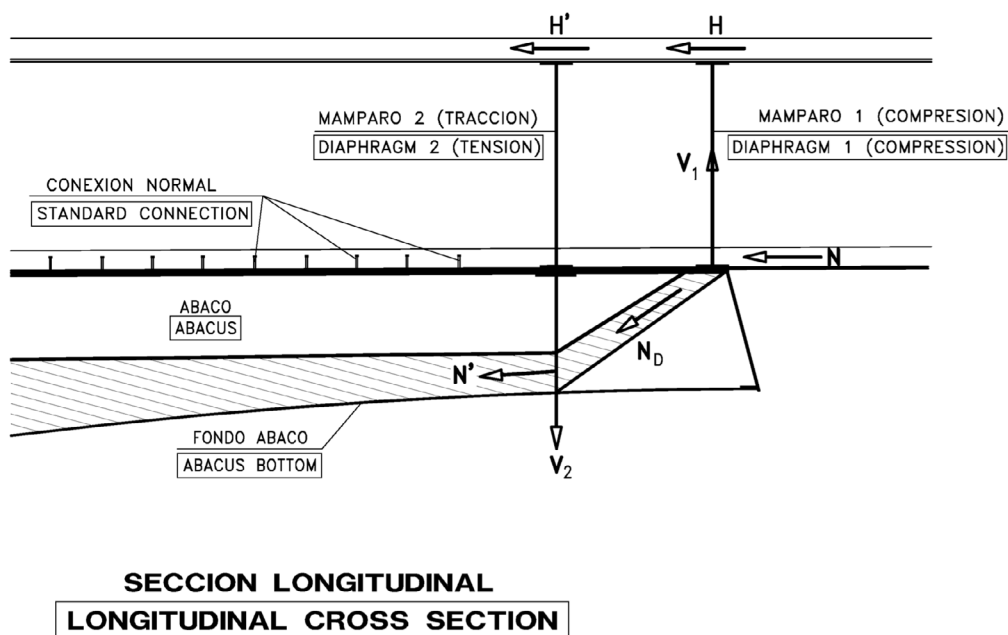


Figura 59. Esquema del desvío de fuerzas en la zona de unión tablero-ábaco.

compresiones que circulan por el cordón inferior, requiriéndose para ello un doble sistema (figura 59):

- Por una parte, dos diafragmas o mamparos en el extremo del brazo de las T, capaces de recoger las componentes verticales del doble desvío: uno, exterior, comprimido y el otro, interior, traccionado.
- Por otra, un elemento diagonal, normalmente una losa de hormigón, capaz de transmitir las fuerzas de compresión del mamparo exterior al interior.

Debe tenerse muy en consideración, de manera precisa, la disposición de los nudos en que se producen tales desvíos: el primero más sencillo, al ser comprimido, pero el segundo mucho más delicado, al tratarse de un empuje al vacío, que requiere resistir la tracción vertical correspondiente.

Otros aspectos de importancia en estos sistemas son, aparte de la capacidad frente a las flexiones negativas y los fuertes cortantes, la eventual fisuración de los fustes, y la pérdida de rigidez que ello comporta, que podría llegar a la necesidad de grandes refuerzos pasivos o pretensados temporales o definitivos, en las soluciones con elementos de hormigón.

Finalmente, también es importante analizar los detalles constructivos para la conexión entre los sistemas de pilas y el cajón empujado, al término de las maniobras de empuje y del posterior descenso que se requiere tras la retirada de los aparatos deslizantes de apoyo, para que ambos sistemas, bordes superiores de los brazos de las T y cordones inferiores del cajón empujado, contacten. Se pueden contemplar soluciones muy variadas: rellenos de hormigón de cavidades en los que se albergan las conexiones, soldeo de platabandas de ambos subsistemas, tornillos de alta resistencia, etc.

Este método se aplicó posteriormente, utilizando ábacos mixtos, en el viaducto del estrecho de Paredes en Cuenca (2008) (figura 60), en colaboración con Ginés Ladrón de Guevara de MC2.



Figura 60. Llegada del tramo empujado al ábaco mixto.

Sistema de tablero semiinferior con alas metálicas superiores exentas pretensadas, empleado en el puente de Miraflores de Córdoba sobre el Guadalquivir (2003) (figura 61). Para reducir al mínimo la incidencia de dicho tablero en el desagüe del río, se dispuso un dintel de canto constante muy restringido, con la losa del tablero a mitad de altura y las alas superiores exentas en los laterales del sistema, situándose las almas a modo de barandillas o balaustradas.



Figura 61. Puente de Miraflores (Córdoba).

Se emplearon células de empotramiento elástico en los extremos de los dos vanos y empotramiento rígido en la pila central única, constituida por un potente elemento de hormigón. Se aprovechaba así al máximo la alta capacidad a flexión negativa de este sistema mixto, disponiendo además en los cordones superiores traccionados de tales zonas de apoyo un fuerte pretensado, mediante barras interiores a las células de rigidez superiores que forman tales cordones; células dispuestas para incrementar la capacidad frente al pandeo lateral en las cabezas exentas de las zonas con flexiones positivas.

El proceso constructivo utilizó también los mecanismos de empotramiento de voladizos en las células elásticas de extremo y del empotramiento rígido en la pila central, para reducir al mínimo los elementos auxiliares de montaje y construcción.

Sistemas de vigas escalonadas y quebradas. Esta innovación tiene su origen en el tratamiento de las almas híbridas ya descrito, y su objetivo es desdoblarse la sección cajón en dos zonas (figura 62):

- Una superior, de carácter constante a lo largo del puente, que propicia con su cordón inferior corrido la posibilidad de empujar el conjunto del puente con una rasante continua, como si de un puente de canto constante se tratara.
- Otra inferior, a modo de canto variable, que solo se presenta en las zonas de apoyo en las pilas y que queda remetida apropiadamente respecto a la parte superior, de manera que no interfiera durante el proceso de empuje. Esta parte inferior puede ser:
 - Metálica, con capacidad para incluir interiormente el hormigón inferior que se requiera, desde el punto de vista resistente, en el puente terminado.
 - Estricta, con alas metálicas extremas y losa de hormigón vista en toda la zona central inferior, empleando encofrados para su hormigonado.



Figura 62. Disposición y tipos de soluciones.

Las ventajas que este sistema presenta respecto al método ábaco, especialmente en luces medias o medio altas, radica en que no son necesarias las operaciones finales de descenso y conexión requeridas en tal método al completarse el empuje; sino que la estructura de canto variable queda completamente terminada y preparada para recibir el tablero superior a la simple conclusión de dicho empuje.

Los apoyos definitivos sobre pilas pueden mantenerse en el patín intermedio (cordón inferior de la zona de canto constante) o, preferiblemente, situarse bajo las zonas inferiores, favoreciendo la distribución interna de los esfuerzos locales.

Los proyectos planteados con esta posible solución no llegaron a realizarse. Incluso en el caso del puente sobre la A-31 en Albacete para el AVE, en el cual, debido a las dificultades del entorno se exigía una ejecución sin interrumpir en absoluto los diversos tráncos inferiores existentes. Finalmente, la Administración aprobó realizar cortes nocturnos reducidos, y el diseño se adaptó a una solución más sencilla de almas planas, manteniendo el resto del diseño.

Una versión parecida, aunque de carácter provisional, fue empleada para el empuje del tramo principal del puente del Nalón, introduciendo alas inferiores de rodadura provisionales, situadas al exterior de las almas, en las zonas de canto variable (figura 63); modificándose lateralmente en un momento dado las posiciones de los aparatos de rodadura de las fases de apoyo inferior a las más exteriores de los patines auxiliares.



Figura 63. Disposición de patín auxiliar en el inicio de la zona de canto variable.

La aplicación de los puentes mixtos al ámbito ferroviario, especialmente en los casos de líneas de alta velocidad, ofrece una

interesante lista de características muy favorables, tanto en los aspectos funcionales (rigidez muy elevada y activa respecto a la deformabilidad y a las vibraciones y efectos dinámicos vía-estructura, que mejoran sensiblemente el comportamiento de los sistemas), como de la constructibilidad y de la economía.

En términos generales, todas las innovaciones desarrolladas en el campo de la construcción mixta que han sido expuestas previamente fueron siempre planteadas con la intención predominante de conseguir mejoras apreciables en los ámbitos constructivos, económicos y funcionales, una y otra vez mencionados. Pero no lejos de ese objetivo primordial, esa búsqueda alentaba la pretensión intensa de lograr, también, una estética del mayor atractivo posible, empleando las combinaciones que la pareja de materiales puestos en juego aporta en todos sus registros: cromáticos, texturales, formales, históricos, emocionales, etc.

Para ello, la filosofía aplicada incluyó rasgos y enfoques tanto conceptuales como artísticos, tratados con el mayor empeño posible, y desarrollados a través de muy diversos artículos y conferencias.

Como colofón final, que trata de combinar todos estos últimos propósitos expuestos, no quiero dejar de referirme a la última publicación efectuada (figura 64), aun cuando la misma no se vincule en modo alguno con la actividad técnica que ha conformado toda la trayectoria profesional relatada, sino a una de esas otras “afinidades electivas” que he deseado mantener prolongadamente con la cultura, y que han sido actividades paralelas en mi recorrido vital; las cuales, sin duda, influyeron dialécticamente en todo cuanto en el campo de la técnica haya podido realizar.



Figura 64. Portadas de los volúmenes de “La pintura del siglo XIX”.

3. CONCLUSIÓN

La presentación previamente realizada de diversas innovaciones aplicables a los puentes mixtos de hormigón y acero estructural, muestra tan solo una pequeña parte de las muchas que encierran estos sistemas, cuando se analiza la enorme flexibilidad de diseño y constructiva que la combinación del acero estructural, los pretensados y el hormigón de fondo permiten. Esta flexibilidad citada no hace sino reflejar el núcleo intrínseco de posibilidades, tanto resistentes, como constructivas y estéticas que tales sistemas contienen y que están a la espera de la imaginación creativa de los ingenieros estructurales capaces de entender el lenguaje especial con el que esas posibilidades se expresan.

La recompensa de este artículo estaría en su eventual capacidad para estimular a los recientes ingenieros noveles –a quienes ya no tuve oportunidad de exponerles en clases mis ideas– a utilizar cualquiera de los procesos mostrados, mejorándolos o transformándolos en lo que resulte preciso, para lograr una nueva dimensión y experiencia en función de su creatividad.

Finalmente, y destinado a esos jóvenes ingenieros, o a aquellos no tan jóvenes que deseen ampliar sus conocimientos, resumiría todo lo antedicho señalando que “nada es tan simple y definitivo como a primera vista puede parecer en los sistemas empleados en la ingeniería civil”, debiendo por ello actuarse siempre con una mirada penetrante, tratando de comprender en verdadera profundidad los mecanismos puestos en juego y visualizar en qué manera podría favorecerse el trabajo total o parcial de los mismos, así como simplificar los procesos constructivos y de montaje requeridos, porque esa observación detenida puede revelar, a veces, aspectos inusitados.

Referencias

- [1] Viest, I.M. & Fountain, R.S., Singleton, R.C. (1958). *Composite construction in steel and concrete for bridges and buildings*. New York: McGraw-Hill and ASCE.
- [2] Sattler, K. (1959). *Theorie der Verbundkonstruktionen*. Berlin: Verlag von Wilhelm Ernst.
- [3] Martínez Calzón, J. (1966). *Estructuras mixtas, teoría y práctica*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento (IETCC).
- [4] Martínez Calzón, J., Ortiz Herrera, J. (1978). *Construcción mixta hormigón-acero*. Madrid: Editorial Rueda.
- [5] Martínez Calzón, J. (Ed.). (1992). Puentes mixtos, estado actual de su tecnología y análisis. *Comunicaciones y mesas redondas de las I Jornadas Internacionales*, Barcelona. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- [6] Martínez Calzón, J. (Ed.). (1995) Puentes mixtos, estado actual de su tecnología y análisis. *Comunicaciones y mesas redondas de las II Jornadas Internacionales*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- [7] Martínez Calzón, J. (Ed.). (2001) Puentes mixtos: Vol. I: Puentes mixtos, estado actual de su tecnología y análisis; Vol. II: Composite bridges, state of the art in technology and analysis. *Comunicaciones y mesas redondas de las III Jornadas Internacionales*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos.
- [8] Martínez Calzón, J. (2006). *Puentes, estructuras, actitudes*. Madrid: Editorial Turner.
- [9] Bernabeu Larena, J. (2004). *Evolución tipológica y estética de los puentes mixtos en Europa*. Tesis doctoral, E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). <http://oa.upm.es/269/1/04200415.pdf>.
- [10] Martínez Calzón, J. (1995). Strict box composite bridges. A new design of the optimum use of composite typology. *Proceedings 12th Annual International Bridge Conference*. Pittsburg, Pennsylvania (USA), 258-265.
- [11] Martínez Calzón, J. (2000). Innovaciones en construcción de puentes. Una exposición general de nuevos métodos de ejecución de puentes mixtos de hormigón y acero. *Comunicaciones de la Jornada "Tendencias en el diseño de puentes" del Grupo Español del IABSE*. Madrid: CEDEX.