

Diseño de tablero con sección en U en el tramo 4 de Alta Velocidad de California

Design of bridges with U section in the Construction Package 4 of the California High Speed Rail Project

Pablo Loscos Areoso ^a, Pere Villalba Izquierdo ^b, Juan José Sánchez Ramírez ^c,
Carlos Bajo Pavía ^d

^a Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Ferrovial-Agromán SA. Coordinador proyectos de Estructuras.

^b Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Ferrovial-Agromán US. Coordinador proyectos de Estructuras.

^c Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Ferrovial-Agromán SA. Jefe de Departamento de Estructuras.

^d Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Ferrovial-Agromán SA. Jefe de Área de Estructuras.

RESUMEN

Como parte del contrato del Diseño y Construcción del tramo 4 de alta velocidad en California, ubicado en el valle central de dicho estado, la Dirección Técnica de Ferrovial-Agromán se encargó del diseño de la sección transversal tipo de una serie de estructuras cuyo tablero presentaba sección en U. Dicha sección se plantea con la idea de reducir al máximo la distancia entre carril y fibra inferior de la estructura. De esta forma, la vía se soporta en la losa inferior y pasa entre las almas de la U. A diferencia de las soluciones típicas en alta velocidad, la sección resistente del tablero queda por encima del nivel de la vía, lo cual permitió rebajar su perfil, reduciendo considerablemente el impacto en tierras, muros y expropiaciones.

ABSTRACT

As part of the Design and Build contract of the Construction Package 4 of the California High Speed project, located in California central valley, Ferrovial-Agromán Technical office was in charge of the design of several bridges with a U cross section. The idea was to reduce the distance between top of rail and bottom of deck as much as possible. That way, the rails are supported on the bottom slab and pass through the inside of the webs of the U. Consequently, and in opposite to typical solutions in High Speed, the structural resistant section of the bridge is located above the rails, what allowed to reduce the vertical profile of the rail, reducing considerably the impact of earthworks, walls and right of way.

PALABRAS CLAVE: Alta velocidad, Secciones en U, pretensado, comportamiento dinámico.

KEYWORDS: High speed, U sections, posttension, dynamic behaviour.

1. Proyecto de Alta Velocidad de California.

El programa de la Alta Velocidad de California pretende, en una primera fase, unir las ciudades de San Francisco y los Ángeles y, en una segunda fase, extender la línea hacia el norte hasta la

ciudad de Sacramento y hacia el sur hasta la ciudad de San Diego. La distancia entre San Francisco y Los Ángeles es de 382 millas en coche y se tarda unas 6h sin tráfico. La Alta Velocidad de California pretende conectar en una primera fase estas grandes urbes con la zona más deprimida del valle central, reduciendo el tiempo de desplazamiento a 2h40min.

El *Construction Package 4 (CP4)* se encuentra ubicado en el valle central entre los condados de Tulare y Kern, quedando al norte de la ciudad de Bakersfield. Es el tercer *Construction Package* tipo *Design and Build* dentro del programa, y el situado más al sur. El proyecto consta de 21 millas de longitud, discurriendo mayoritariamente en terreno agrícola y atravesando la ciudad de Wasco.



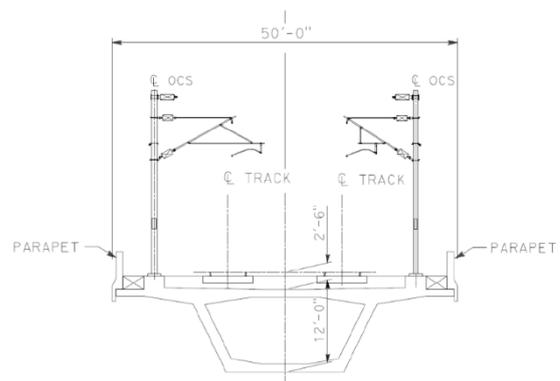
2. Condicionantes en la propuesta

El valle central de California es una zona muy plana que transcurre mayoritariamente en terreno agrícola. En el planteamiento original del proyecto, propuesto por el cliente, el perfil vertical de la alta velocidad iba lo más cercano posible al nivel de tierra y los cruces con carreteras locales se salvaban modificando el perfil de la carretera para que ésta pasara por encima de la alta velocidad. La vía va electrificada con catenaria, por lo que el galibo mínimo es de 27ft (aprox. 9 metros). Salvar este galibo mínimo significaba una gran afección a las carreteras locales.

Como parte de la propuesta presentada en fase de concurso, la Oficina Técnica de Ferrovial Agromán estudió la posibilidad de que la alta velocidad pasara por encima de las carreteras locales con unos vanos típicos entre 100 y 120 pies (33 y 40 metros). Considerando una esbeltez habitual de 1/10 para tableros de hormigón tipo vigas o sección cajón en la alta velocidad, 2.83 pies de altura de balasto y carril, y siendo el galibo mínimo de 16 pies (5.33 metros), resulta que en el cruce con la carretera local, el perfil vertical debe ir 28.83 pies (9.61 metros) por encima del suelo para un vano de 100 pies.

Considerando que la pendiente vertical recomendada es de 1.25%, cualquier cruce con una carretera local tiene una afección de unos 2.300 pies a ambos lados. Este hecho conlleva un impacto muy significativo a considerar en tierras, muros y líneas de propiedad.

Como consecuencia de este hecho, en la Oficina Técnica de Ferrovial Agromán se empezaron a estudiar alternativas estructurales con el objeto de reducir al máximo el canto resistente por debajo de la vía. Para ello se planteó como condicionante que el tablero fuera de hormigón armado y/o pretensado, ya que es el material preferido por la Autoridad de la alta Velocidad, que fuera lo más robusta posible y cuyo proceso constructivo fuese sencillo.



Considerando todo lo anterior, se decidió proponer una sección en U, quedando la losa inferior como plataforma donde apoyar las vías, y las almas en los laterales por encima de

aquellas. Con esta sección, para un vano de 100 pies se consiguieron cantos estructurales por debajo de 2.25 pies, reduciendo el perfil vertical en 7.75 pies respecto al de la solución típica en sección cajón. Con ello la afección al norte y sur del cruce pasa de 2.300 a 620 pies.

La introducción de la sección en U hizo económicamente viable la posibilidad de que la alta velocidad pasara por encima de las carreteras locales, lo que significó una afección mínima a éstas, y una propuesta mucho más atractiva que el diseño original. Un inconveniente que trae consigo esta nueva sección es la necesidad de tener en cuenta la posibilidad de un impacto del tren de alta velocidad en las mismas, al quedar por encima de la vía, ya que ahora son elementos estructurales y no simplemente sistemas de contención del vehículo.

Ferrovial-Agromán presentó esta ATC (*Alternative Technical Concept*) a la Autoridad, fue aceptada y formó parte de la propuesta final. Una vez concluida la fase de concurso, Ferrovial-Agromán fue finalmente adjudicatario del contrato y los puentes en sección en U están hoy en día en construcción.

3. Puentes con sección en U en el CP4.

En el contrato del CP4 se han diseñado cinco puentes con sección en U, siendo cuatro de ellos tableros de un único vano simplemente apoyados con luces variables entre 100 y 122 pies, y el quinto un puente de tres vanos continuo, condicionado por la presencia del cauce de un arroyo protegido.

La Tabla 1 muestra una relación de los mismos con su nombre, la distribución de luces y su longitud total.

Tabla 1. Puentes con sección en U en el CP4.

Estructura	Vanos	Distribucion	Longitud
Garces	1	102' 4''	102' 4''
Pond	1	121' 4''	121' 4''
Peterson	1	102' 4''	102' 4''
Poso Creek	3	74'9''- 90'-74'9''	239'6''
Kimberlina	1	117'6''	117'6''

Aunque en puntos siguientes se desarrollará con más profundidad, se mencionan aquí los principales condicionantes que se tuvieron en cuenta a la hora de diseñar una sección transversal tipo de manera que resultase válida para todos los tableros con dicha sección:

- Distancia mínima horizontal para el paso del tren de 40 pies y 2 pulgadas. (*Dynamic envelope and structural gauge*). Dicha distancia no puede ser invadida en ningún caso por elementos de la sección transversal, sean o no estructurales.
- Drenaje tipo bombeo invertido, con un 2% hacia el centro del tablero.

Considerando lo anterior se estudió una sección en U que fuese válida para las cinco estructuras y fuese lo más homogénea posible. Después de los estudios realizados, tratados con mayor profundidad en los puntos siguientes, se escogió la siguiente geometría para todos los tableros (Tabla 2).

Tabla 2. Geometría tableros en U en el CP4.

Estructura	Vanos	Longitud vano L	Ancho inferior	Ancho superior	Ala superior	Canto H	H/L	Esp losa	Esp alma
Garces	1	102' 4''	45'	52' 8''	1'10''x6'3''	15' 0''	1/6.82	2'-3''	1'10''
Pond	1	121' 4''	45'	52' 8''	1'10''x6'3''	17' 9''	1/6.83	2'-3''	1'10''
Peterson	1	102' 4''	45'	52' 8''	1'10''x6'3''	15' 0''	1/6.82	2'-3''	1'10''
Poso Creek	3	90' 0''	45'	56' 10''	1'10''x8'2''	12' 0''	1/7.5	2'-3''	1'10''
Kimberlina	1	117' 6''	45'	52' 10''	1'10''x6'3''	17' 3''	1/6.81	2'-3''	1'10''

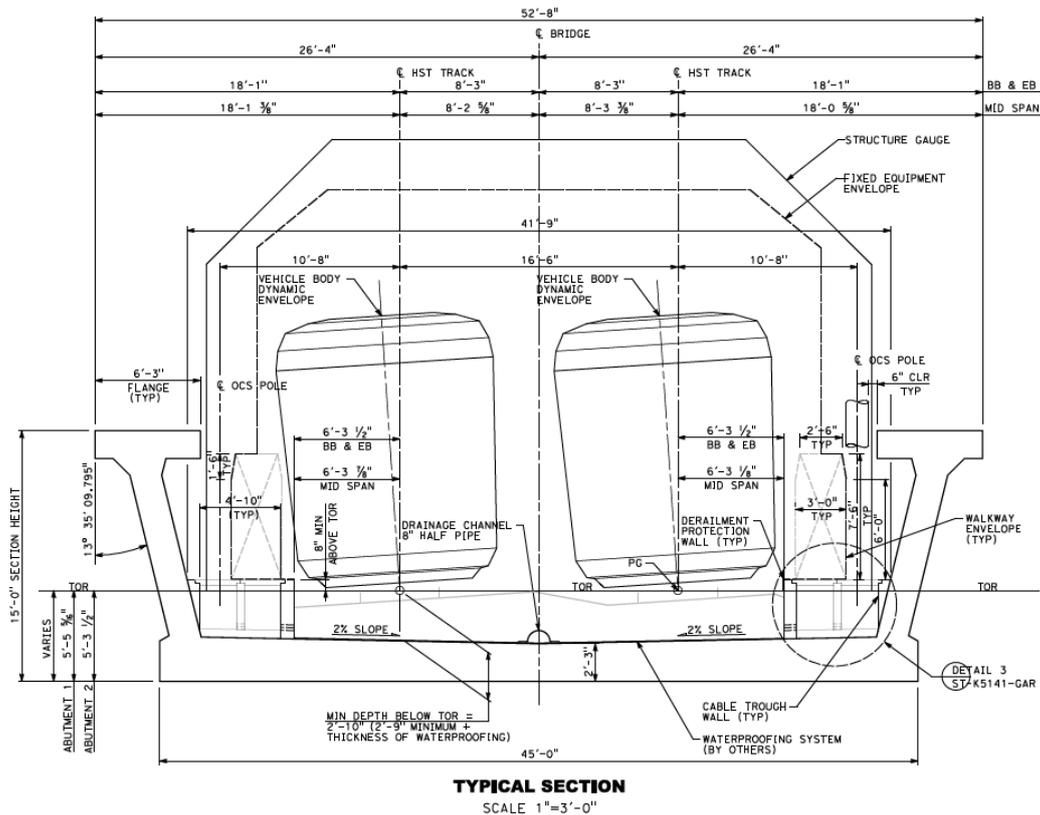


Figura 3. Sección transversal de Garces – Envoltorio del vehículo.

4. Diseño de la sección transversal

La sección transversal de los puentes en U referidos en el punto anterior fue diseñada por la Dirección Técnica de Ferrovial Agromán con dos propósitos principales: por una parte, se trató de optimizar el diseño de manera que cada uno de los elementos que intervienen en el mismo alcanzase un equilibrio entre economía de materiales y simplicidad constructiva. Por otra parte, se pretendía facilitar a las tres ingenierías involucradas en el diseño de este tipo de puentes un conjunto de directrices que debían seguir para desarrollar sus diseños, con ciertos parámetros fijos y otros abiertos, con el objeto de obtener resultados homogéneos en todos los puentes de esta tipología y dotar de consistencia a los paquetes entregados al cliente.

4.1. Condicionantes de diseño

La sección transversal de los puentes en U se parametrizó de manera que verificase dos tipos

de condicionantes principales: geométricos y estructurales:

4.1.1. Condicionantes geométricos

Las secciones en U diseñadas para este contrato debían respetar gálibos verticales bajo el tablero con respecto a vías de comunicación o accidentes geográficos según el caso.

Adicionalmente, y afectando a la propia geometría interna de la sección, el contrato definía una envolvente respecto a la vía, es decir, una caja o contorno alrededor de la vía y del vehículo de diseño dentro de los cuales no se podía incluir ningún elemento (*Dynamic envelope and structural gauge*). Este último condicionante se traducía en dos líneas verticales separadas unos 40 pies entre sí y simétricas respecto al eje de la sección, y una línea horizontal a la altura de los carriles. Estas tres líneas definían una caja que no se podía invadir con elementos estructurales.

4.1.2. Condicionantes estructurales

La sección transversal diseñada debía verificar todas las comprobaciones estructurales incluidas

en los diferentes niveles normativos establecidos en el contrato (*AASHTO LRFD, California Amendments y Design Criteria Manual*), tanto resistentes como de confort de pasajeros. Por su relevancia en el diseño se han de mencionar las dos siguientes:

- Ausencia de tracciones en secciones pretensadas. Se trata de un requerimiento muy restrictivo, incluido directamente en el contrato, que modifica los documentos normativos de aplicación general, que permiten cierto nivel de tracciones en las fibras extremas.
- Limitación de aceleraciones verticales con el paso del tren de pasajeros. Por tratarse de vía sobre balasto, las aceleraciones verticales frente al paso del tren a las velocidades establecidas en proyecto no debían superar en ningún caso los 0.35g.

4.2 Encaje estructural preliminar de los tableros con sección en U

El primer paso para conseguir el objetivo de obtener una sección transversal en U lo más esbelta posible, parametrizada y válida para todos los puentes del contrato, consistió en determinar, mediante cálculos preliminares con modelos lineales de elementos barra, los requerimientos mínimos de área e inercia que debían verificar dichas secciones en función de la luz. Para ello se impuso la condición de ausencia de tracciones en servicio.

En los modelos de cálculo inicial se fueron variando las propiedades mecánicas de las secciones de manera que las cargas permanentes, el pretensado introducido y los pesos de los vehículos de mantenimiento con su correspondiente coeficiente de impacto dieran como resultado una sección totalmente comprimida.

Las cuantías de pretensado introducidas de manera preliminar fueron obtenidas realizando extrapolaciones a partir de otras realizaciones bien contrastadas en España.

4.3. Encaje geométrico de la sección transversal

Para determinar la geometría óptima de la sección transversal se fijaron en primer lugar una serie de parámetros geométricos de referencia, fijados por los requerimientos geométricos del contrato y que hacían referencia al contorno de la envolvente definida por el vehículo y la vía, ya comentado en el apartado anterior. Estos parámetros fijos eran los siguientes:

- Un punto de paso de la cara interior de cada alma, coincidente con la intersección de la línea horizontal de referencia de la vía y la línea vertical que contenía la envolvente del vehículo.
- Las propias líneas verticales que delimitaban la envolvente del vehículo, que definían automáticamente la cara interior de las alas superiores.
- La distancia mínima a respetar desde la línea de referencia de la vía a la losa inferior, que definía los puntos de paso extremos de la cara superior de la losa inferior.
- El peralte de la losa inferior del 2% hacia el centro de la sección.
- Los espesores de ala superior, inferior y almas debían verificar, para cada canto, el área y la inercia obtenidas en el cálculo preliminar anterior. Se utilizaron valores constantes para estos espesores, de manera que las propiedades mecánicas resultantes de las secciones para cada canto fuesen similares en todos los casos a los arrojados por el cálculo.

Con todos estos parámetros fijos, se podía construir ya una sección transversal con una única variable, el canto. A partir de la luz del tablero, y atendiendo a los resultados del análisis preliminar, el canto quedaba fijado y la sección automáticamente diseñada.

5. Disposición del pretensado

Como se ha comentado anteriormente, la definición del pretensado se realizó en dos fases: un análisis preliminar con modelos lineales de tipo barra, arrojó resultados que se utilizaron para determinar los cantos más adecuados en función de la luz. Posteriormente, una vez diseñada la geometría de la sección transversal, se desarrollaron modelos de láminas para determinar de una manera más precisa la distribución más idónea de dicho pretensado dentro de la sección transversal, respetando en la medida de lo posible las cuantías determinadas en el análisis preliminar anterior.

Se desarrollan en este apartado las conclusiones más importantes de los análisis realizados, diferenciando el pretensado longitudinal y el transversal.

5.1. Pretensado longitudinal

El pretensado longitudinal diseñado de manera general para todos los tableros con sección en U se ha dividido en dos familias: pretensado de almas y pretensado de losa inferior.

El pretensado de almas presenta las siguientes características:

- 4 tendones por alma.
- Un máximo de 22 cordones por cada tendón, quedando fijado de esta forma el tamaño de las vainas.
- Posiciones fijas en centro de luz, respetando las distancias mínimas entre tendones fijadas normativamente, comenzando en la posición más baja posible sin interferir con el pretensado transversal de ala inferior.
- Posiciones fijas en extremos, de manera que el centro de gravedad del paquete coincidiese con el centro de gravedad de la sección.

Por su parte, la familia de pretensado longitudinal de losa inferior se define de la siguiente manera:

- Un mínimo de 8 tendones.
- Una distancia fija entre el primer y el último tendón.
- Un máximo de 19 cordones por tendón, fijando de esta manera el tamaño de las vainas.
- Una posición lo más baja posible, por encima de las vainas de pretensado transversal que se definirán en el siguiente punto.
- Una separación constante entre tendones.

Cada diseñador, en cada uno de sus tableros, recibió esta información y la desarrolló adaptando las variables a las necesidades de cada caso particular.

5.2. Pretensado transversal

Debido a la importante anchura que presenta la sección transversal, y dado que las almas han de situarse por fuera de la envolvente del vehículo, la losa inferior presentaba una anchura tal que fue necesario disponer una familia de pretensado transversal, compuesta por tendones que discurren de lado a lado de la losa inferior. Sus características principales son las siguientes:

- Tendones de 12 cordones, de manera que el tamaño de vaina queda fijado.
- Definición de tres tramos, uno central y dos extremos.
- Separaciones constantes entre tendones dentro de cada tramo.
- Trazado de los tendones compuesto por un tramo central situado de tal manera que verifica estrictamente el recubrimiento mínimo de hormigón respecto a la cara inferior de la losa.
- Dos tramos laterales que, mediante curva y contracurva, de radio el mínimo establecido por el sistema de pretensado utilizado, alcanzaban la altura suficiente para realizar los anclajes y salvar las dos familias de pretensado longitudinal (almas y losa inferior).

5.3. Consideraciones sobre el cálculo en servicio de secciones en U

En el apartado 4 se comentó el proceso de cálculo seguido para diseñar la sección paramétrica de los tableros con sección en U. Se desarrollaron diversos modelos de cálculo, tanto con elementos lineales como con elementos lámina, en diferentes fases de desarrollo del diseño. A partir de los análisis realizados se pudieron extraer una serie de conclusiones acerca del comportamiento de tableros con secciones de este tipo:

En cuanto al comportamiento longitudinal, se detectó que la influencia del pretensado dispuesto por las almas no alcanzaba apenas la zona central de la losa inferior. Esto era debido la conocida pérdida de eficacia de las partes de la sección transversal situadas lejos de las almas. Al tratarse de tableros con una relación muy baja entre la luz y el ancho, existía un cierto comportamiento longitudinal local de esa zona central de la losa inferior, que la hacía trabajar mediante flexión entre apoyos (longitudinal) y no entre almas (transversal), con un canto muy reducido. Este hecho provocaba la aparición de pequeñas tracciones en la fibra inferior, no permitidas en el contrato.

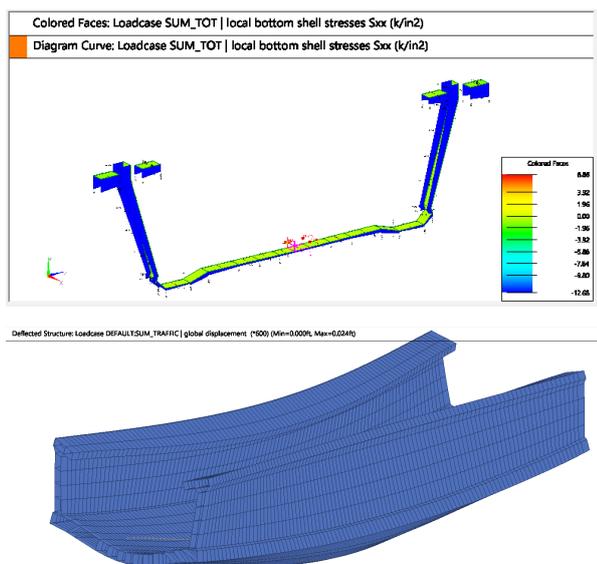


Figura 7: Distribución de tensiones longitudinales en la sección transversal (arriba) y deformada estática frente al paso del tren (abajo)

Para poder eliminar estas tracciones, se dispuso el pretensado longitudinal repartido en la zona central de la losa inferior, tal y como se describe en el punto anterior.

Con objeto de hacer primar el comportamiento transversal frente al longitudinal en la losa inferior, se propuso disponer una serie de costillas que, además de alojar los tendones de pretensado transversal, permitían reducir el espesor de la losa inferior, de manera que su comportamiento longitudinal quedaba prácticamente restringido a la distancia entre costillas. De esta forma se conseguía eliminar la tracción con menor cuantía de pretensado longitudinal. Esta propuesta no se llevó a la práctica debido a la mayor complejidad del diseño e instalación del armado pasivo y la mayor superficie de encofrados.

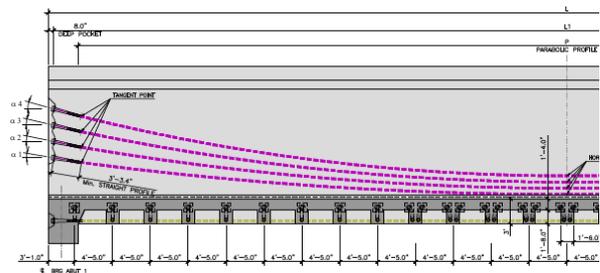


Figura 8: Propuesta de losa inferior nervada

Como se aprecia en la tabla 1, uno de los puentes con sección en U no presenta un único vano, sino que se desarrolla en 3 vanos inferiores a los 100 pies. La distribución de vanos vino condicionada por la situación del Arroyo que debía salvar la estructura, una zona protegida con espacios que no se podían invadir con elementos permanentes.

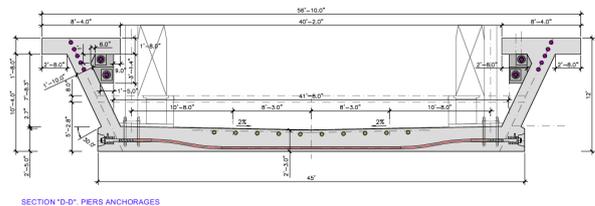


Figura 9: Sección transversal del puente sobre el Arroyo Poso (sección sobre pila)

Para adaptar la sección paramétrica a una estructura multi-apoyada se varió simplemente la definición del ala superior, haciéndola más ancha

hacia el exterior, para conseguir, por un lado, alojar los tendones de pretensado en la zona de negativos sobre pilas, y por otro, dotar de mayor rigidez transversal a la sección.

A continuación, se muestra a modo de visualización 3D, el aspecto final de los tableros con sección en U, tanto de uno como de tres vanos. Estos tableros fueron finalmente adoptados y desarrollados por cada diseñador hasta alcanzar el nivel de detalle necesario para completar los paquetes para construcción.

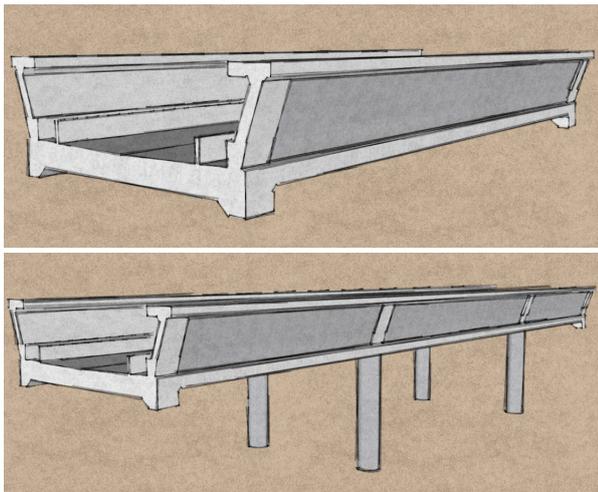


Figura 10: Vistas 3D de los tableros con sección en U de un vano y tres vanos



Figura 11: Fotografías de la construcción del tablero sobre *Garces Highway*

6. Análisis dinámico

Aunque no es objeto del presente artículo, se hace mención de algunas consideraciones acerca

de este tipo de análisis en tableros con sección en U.

Al igual que para el cálculo del tablero en servicio y encaje del pretensado, se desarrollaron modelos de cálculo de complejidad creciente según iba avanzando el diseño. En los análisis iniciales se realizó un cálculo tipo Rolling stock en modelos lineales de tipo barra, determinando que las aceleraciones verticales al peso del tren de pasajeros eran muy inferiores a los límites establecidos para vía sobre balasto.

Una vez concluyó la fase de encaje preliminar y se pasó al diseño detallado, se desarrollaron modelos de láminas, que simulaban más fielmente el comportamiento real del tablero. Los resultados de los análisis Rolling Stock sobre estos modelos fueron muy diferentes, aumentando las aceleraciones en casi un orden de magnitud. Esto se debe principalmente al hecho de que en el modelo lineal el tablero sólo trabaja mediante flexión longitudinal general, mientras que el modelo de láminas en tres dimensiones se combinan los trabajos de flexión longitudinal general, longitudinal local de la losa inferior, y flexión transversal de losa inferior, almas y alas superiores.

Otro fenómeno que quedó patente en los análisis de diseño detallado fue la aparición de picos de aceleración en la entrada y salida de la losa inferior. Para evitar estos valores extremos de aceleración, por encima de los límites admitidos, se diseñaron sendas riostras en ambos extremos de la losa inferior. Son riostras que ya eran necesarias para situar los apoyos bajo un elemento de mayor canto que el propio de la losa inferior, aunque su canto final vino determinado por la limitación de aceleración vertical máxima.

7. Visión del proyecto desde la experiencia española en AVE

En todas las fases del proyecto, y comenzando ya desde los primeros trabajos durante el proceso de concurso, se estudió la posibilidad de

adaptar soluciones estructurales bien contrastadas a las que se ha llegado fruto de la experiencia de un gran número de diseñadores y constructores españoles.

Entre estas soluciones destaca la desarrollada en este artículo, los tableros con sección en U. Dicha solución fue utilizada por Ferrovial-Agromán en el viaducto del Congost, en Montmeló, para la línea de alta velocidad Madrid-Barcelona-Frontera francesa, y se está estudiando su empleo en el corredor Mediterráneo entre Murcia y Almería.

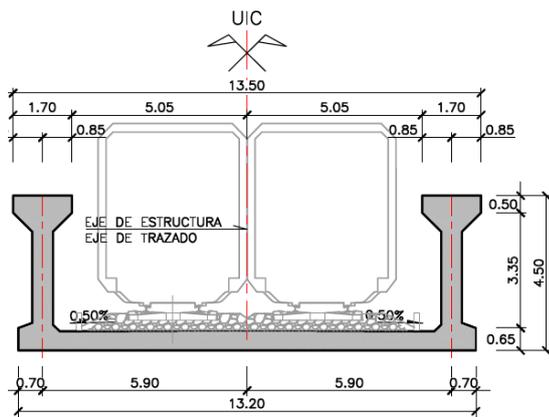


Figura 12: Viaducto sobre el Congost en Montmeló

Otra solución muy habitual en la alta velocidad española es el uso de las pérgolas para realizar los saltos del carnero. Esta solución formaba parte del diseño preliminar del cliente para el viaducto de Wasco.

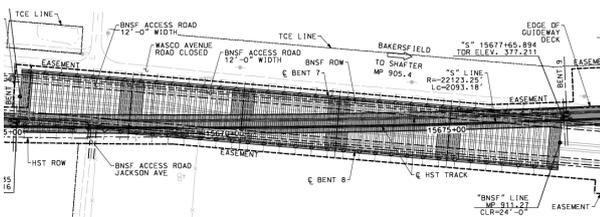


Figura 13: Diseño final del Viaducto de Wasco

Desde la dirección técnica de Ferrovial-Agromán se desarrollaron mejoras que permitieron reducir su longitud, modificar

algunos elementos estructurales y simplificar significativamente su proceso constructivo. El encargado de adoptar esta solución estructural y desarrollar los cálculos de detalle fue Engloser Inc., con la ayuda de Artec Eng.

Agradecimientos

En este apartado se debe mencionar a todo el equipo de diseño desplazado a California, que defendió con todo empeño el trabajo aquí descrito frente a los diseñadores y el cliente.

También merece especial agradecimiento todo el equipo de diseño de la Dirección Técnica que, con diferentes niveles de responsabilidad, llevó a buen término todas las propuestas de diseño que se plantearon.

Por último, también se debe mencionar la buena disposición mostrada por los diseñadores de los puentes incluidos en este artículo a la implantación de los diseños propuestos. Agradecemos por tanto a Sener, Louis Berger y Othon, el haber adoptado las propuestas y asumir la responsabilidad de desarrollarlas hasta el último detalle para conseguir la aprobación por parte del cliente.

Referencias

- [1] American Association for State Highway and Transportation Officials (AASHTO), AASHTO LRFD Bridge Design Specifications – Sixth Edition, USA, 2014.
- [2] California Department of Transportation (Caltrans), California Amendments to AASHTO LRFD Bridge Design Specifications – Sixth Edition, USA, 2014.
- [3] American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association (AREMA), Manual for Railway Engineering, USA, 2012.
- [4] California High-Speed Rail Authority, Request for Proposals for Design-Build Services for Construction Package 4, Book III, Part A-1, Design Criteria Manual, USA, 2016.

