

# Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia

Hugo Corres Peiretti  
Alejandro Pérez Caldentey



## 1. Introducción

Una adecuada combinación de los materiales estructurales disponibles puede dar lugar no solamente a un mejor comportamiento estructural, sino que también puede contribuir a minimizar los medios auxiliares necesarios para la construcción y dar lugar a soluciones estructurales más económicas y elegantes.

Un posible ejemplo de este tipo se puede encontrar en el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls, en Valencia.

Las características topográficas del barranco hacen que sea difícil acceder a la estructura desde el fondo del mismo, mientras que su altura hace poco económico el uso de una cimbra.



Figura 1. Vista de la estructura terminada.

Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia

En estas condiciones, queda claro que se requiere una solución prefabricada. Dentro de éstas, son descartables las soluciones de vigas pretensadas, debido a que la luz resultante es de 56.00 metros.

La solución finalmente adoptada, una estructura en celosía espacial con una losa superior de hormigón armado y con un pretensado exterior, es el resultado de un estudio tipológico de las posibles alternativas.

A continuación, se hace una breve referencia a este estudio tipológico y se presentan algunos aspectos importantes del diseño de la estructura, incluyendo los desviadores y algunas consideraciones relativas a la fatiga.

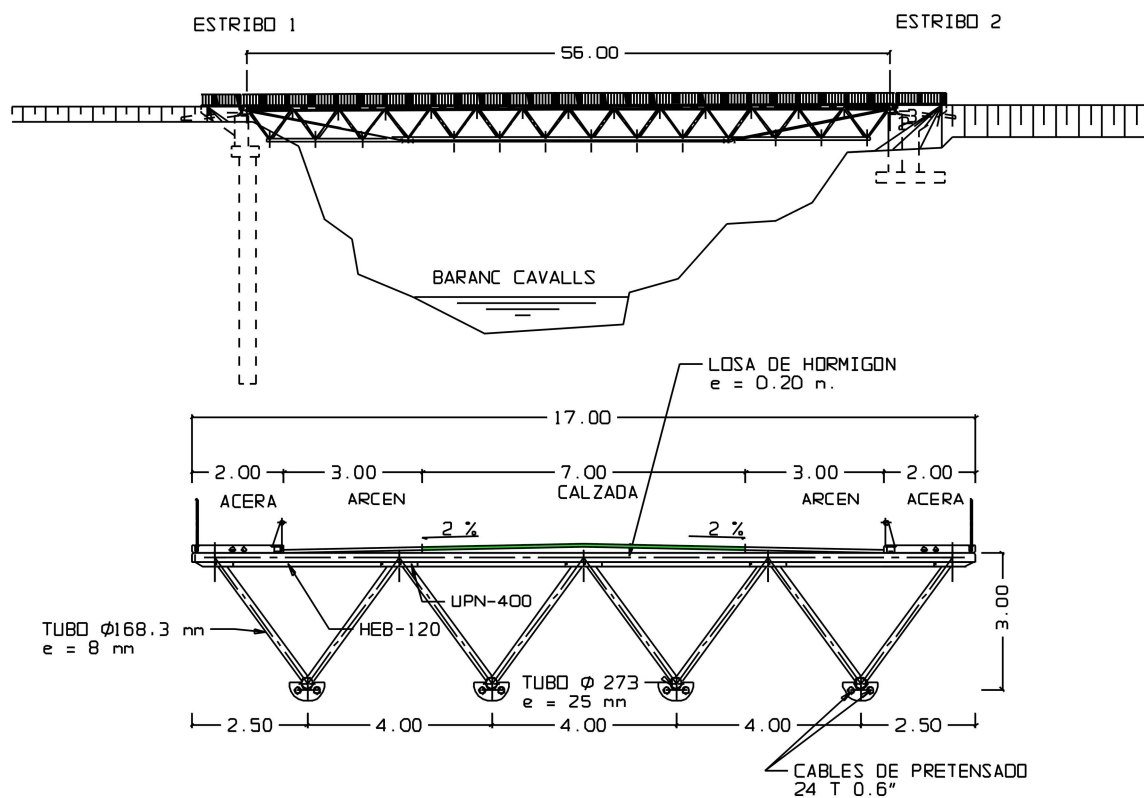


Figura 2. El nuevo puente sobre el barranco de Cavalls

## 2. Descripción de la estructura. Estudio tipológico.

### 2.1. Descripción

El puente sobre el barranco de Cavalls (ver figura 1) es una estructura de un solo vano, de 56.00 metros de luz. El tablero se compone de una losa de hormigón armado, de 20 cm de canto, soportada por una

Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia

estructura metálica espacial, formada por tubos. El conjunto se pretensa con cables exteriores.

La estructura espacial está constituida por cuatro vigas que soportan la losa superior y que se conectan, transversalmente, en los nudos superiores, cada cuatro metros.

El ancho de la estructura es de 17,00 metros y el canto es de 3,00 metros. La solución final es el resultado del análisis y comparación de distintas propuestas, cuyo detalle se recoge en el siguiente apartado.

## 2.2. Estudio tipológico

Se consideraron cuatro alternativas principales:

### 1. Una viga mixta simplemente apoyada y de canto constante.

La primera solución considerada es una viga de tablero mixto y de canto constante, igual a 3.00 metros. Para el esquema estructural del tablero se consideraron dos posibilidades:

- Cuatro vigas armadas, en doble T, unidas por una losa de hormigón superior.
- Un cajón cerrado con 4 almas.

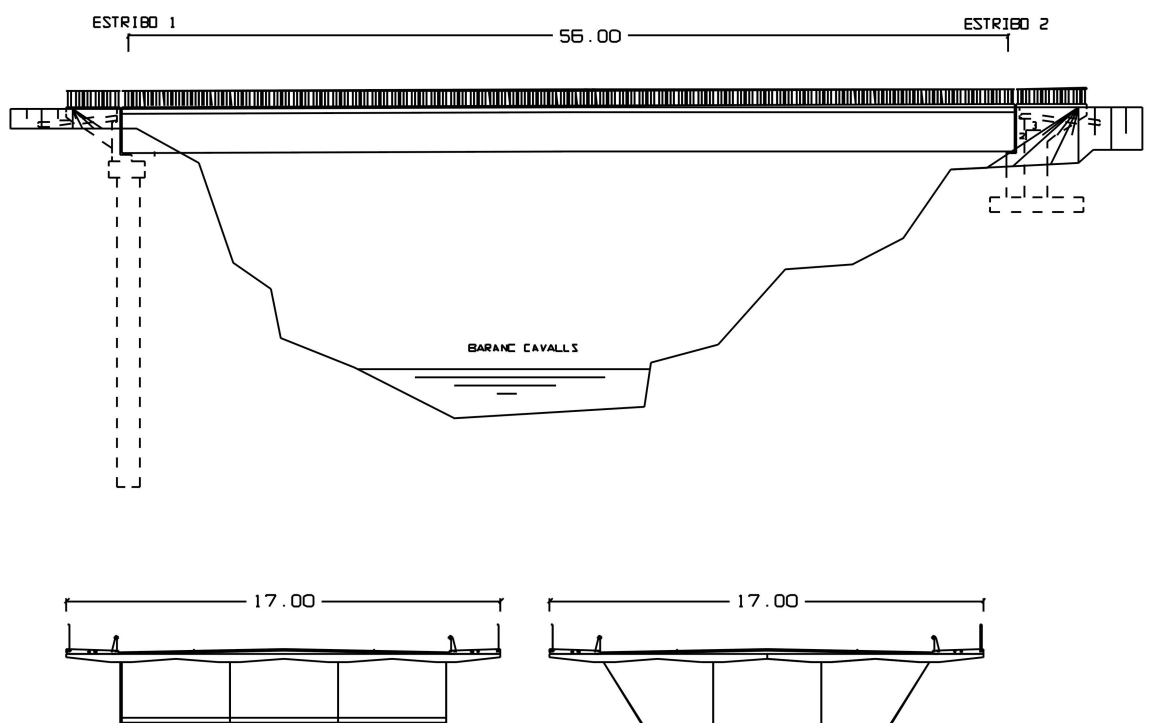
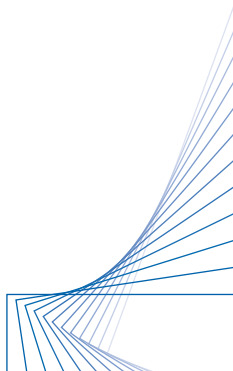


Figura 3. Solución nº1. Viga mixta simplemente apoyada, de canto constante

El resultado (ver Figura 2) es una estructura un tanto pesada y difícil de optimizar desde un punto de vista económico, debido a la necesidad de mantener unos espesores mínimos de las chapas metálicas.

Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia



2. Una viga mixta simplemente apoyada de canto variable.  
Con objeto de remediar los defectos de la solución anterior es posible adoptar una solución con canto variable. El resultado es mucho más aceptable desde un punto de vista estético (ver Figura 3).
3. Una estructura continua con vanos laterales de pequeña luz anclados en contrapesos.  
Otra posibilidad es anclar la estructura en los estribos. El resultado es también una viga de canto variable, aunque, esta vez, el canto máximo se dispone en la sección de los estribos (ver figura 4). Se trata, sin embargo, de una solución más costosa, por la necesidad de disponer contrapesos o anclajes al terreno.
4. Una estructura tubular espacial.  
Con objeto de aumentar la transparencia de la estructura, se consideró, finalmente, una estructura en celosía (ver figura 5). Esta solución

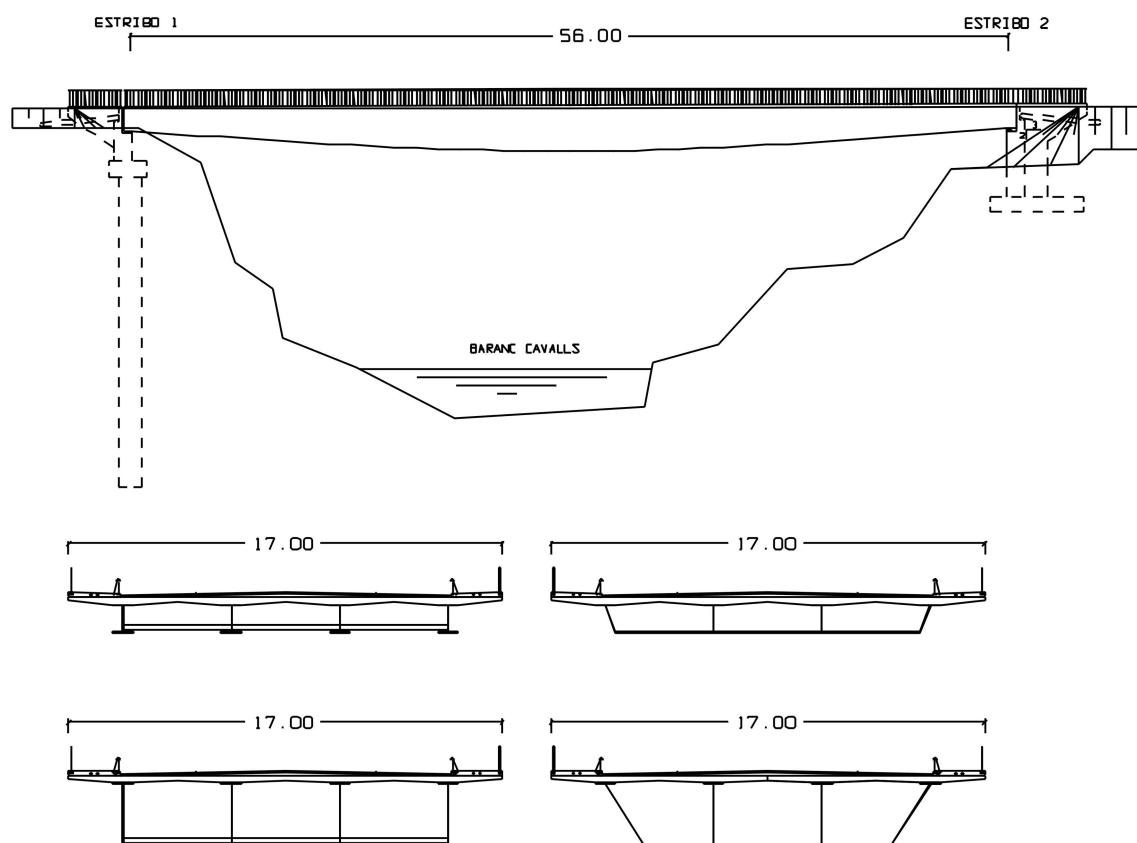
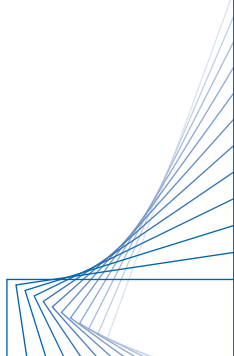


Figura 4. Solución nº 2. Viga mixta de canto variable.

resulta, no solamente más transparente y mejor integrada en el entorno, sino que además resulta más económica. En una primera fase, no se consideró la posibilidad del pretensado exterior. Sin embargo, un estudio más detallado puso de manifiesto la conveniencia de introducir dicho pretensado. Estas razones se recogen a continuación.

Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia



### 2.3. Razones para utilizar un pretensado exterior.

La razón del pretensado exterior, debe buscarse en consideraciones económicas. Como es sabido, el acero de pretensar no es mucho más caro que el acero estructural, mientras que su resistencia es del orden de 5 veces mayor. Esta circunstancia (siempre que se pueda contar con toda, o la mayor parte de la resistencia del pretensado) permite reducir el coste de la estructura, remplazando una parte del acero estructural por acero de pretensar.

De esta manera, la cuantía de acero estructural viene determinada por dos condiciones:

- La rigidez mínima de la estructura en servicio.
- El proceso constructivo, durante el cual, el acero estructural debe ser capaz de soportar el peso propio de la estructura (ver apartado 2.5).

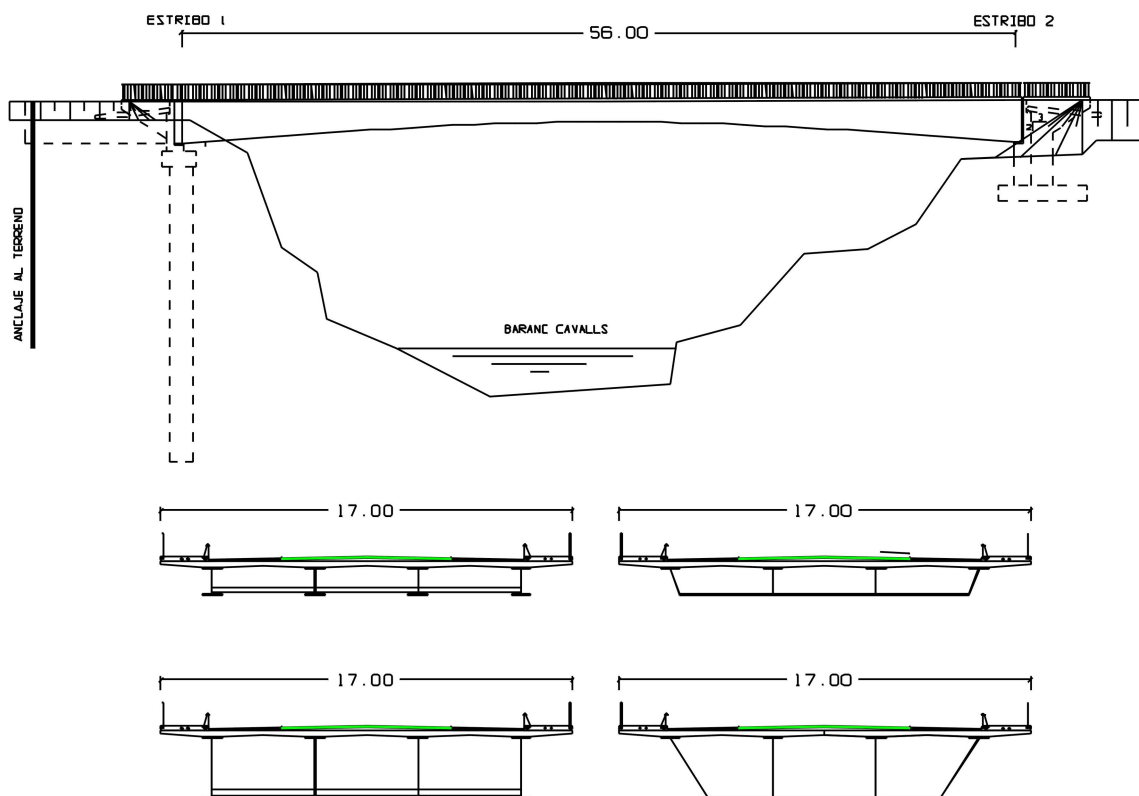


Figura 5. Solución nº 3. Viga biempotrada mediante anclajes en los estribos.

La capacidad resistente adicional, necesaria para resistir las solicitaciones debidas a la sobrecarga, se consigue por medio del pretensado exterior. Como resultado de este equilibrio, se han dispuesto 8 cables (2 por viga longitudinal) de 24 tendones de 0.6".

### 2.4. Diseño de los desviadores

El pretensado exterior se ancla en los estribos y se desvía en dos puntos intermedios, situados a 14.00 metros de los ejes de apoyos. Los desviado-

Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia

res de muestran en la Figura 6. Están formados por un tubo de 170 mm de diámetro y 10 mm de espesor. El tubo tiene la forma de un arco de circunferencia, de 5.00 metros de radio, y está apoyado sobre 3 chapas semicirculares que se sueldan, a su vez, al cordón inferior de cada viga.

Con objeto de evitar concentraciones de tensiones a la entrada y a la salida de los desviadores, se practican unas rendijas longitudinales, de 5 cm, al tubo del desviador. Ello reduce la rigidez de este último en estos puntos y permite que el tubo se ajuste a la geometría del cable.

## 2.5. Proceso constructivo

La solución adoptada para el tablero simplifica notablemente el proceso constructivo. La estructura metálica se prefabrica en taller dividida en 8 elementos principales que se transportan a la obra. Cada pieza corresponde a la mitad de una viga longitudinal, tal como se definió anteriormente.

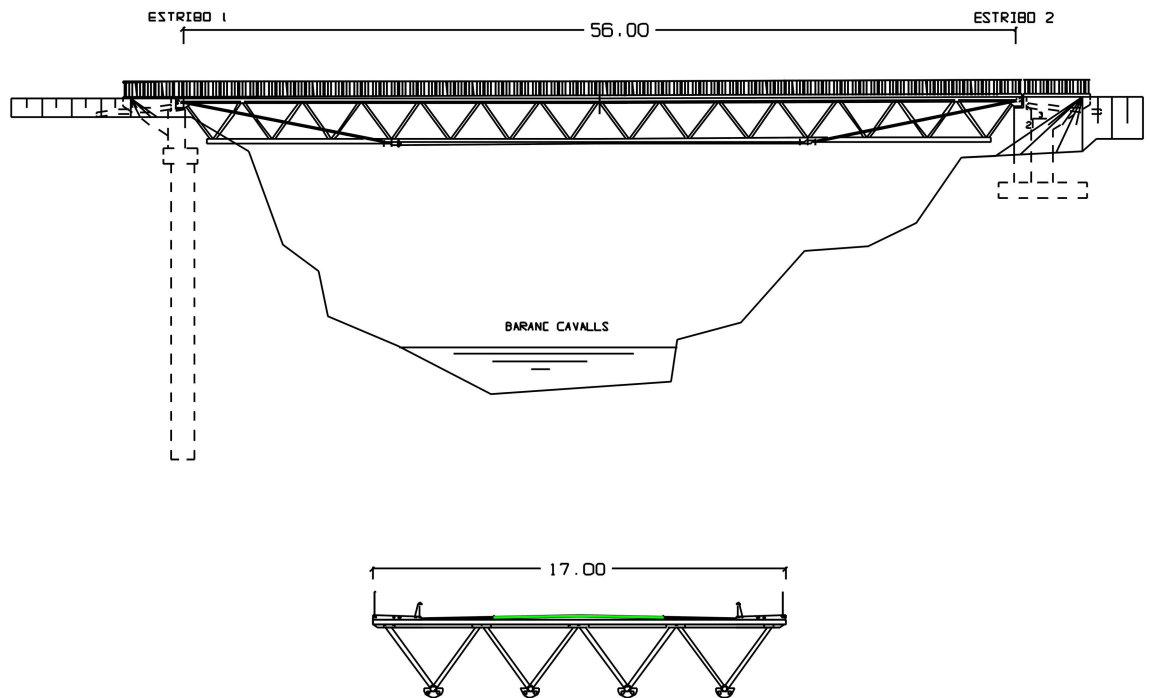


Figura 6. Solución n° 4. Celosía espacial, simplemente apoyada.

A pie de obra se sueldan las dos mitades de cada viga. A continuación, las vigas se sitúan en su posición definitiva, mediante una grúa y se solidarizan transversalmente mediante chapas auxiliares que permiten corregir las posibles imperfecciones. La losa superior se hormigona en dos fases. La primera fase es necesaria con objeto de aumentar la capacidad a compresión del nervio superior antes de la aplicación de la totalidad del peso de la losa de hormigón.

Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia

En las figuras 7 y 8 se muestra la secuencia del proceso constructivo.

### 3. Algunas consideraciones respecto de la máxima tensión admisible en el pretensado exterior

Como se ha indicado anteriormente, el uso de pretensado exterior da lugar a una reducción de los costes de material, siempre y cuando sea posible contar con la totalidad (o la mayor parte) de la resistencia del pretensado. En el diseño de una estructura de este tipo se plantea, por lo tanto, una pregunta importante: ¿cuál es la máxima tensión que se puede admitir en el pretensado en servicio con un comportamiento adecuado del mismo? En la práctica, se utilizan criterios muy diferentes dependiendo del tipo de estructura de que se trate:

- En secciones en cajón con un pretensado exterior dentro del canto de la sección transversal, la tensión inicial del pretensado está comprendida entre el 70% y el 80% de la carga de rotura, igual que en una estructura con pretensado adherente convencional.
- En puentes atirantados, la máxima tensión se limita en servicio al 45% de la carga de rotura del acero de pretensar.

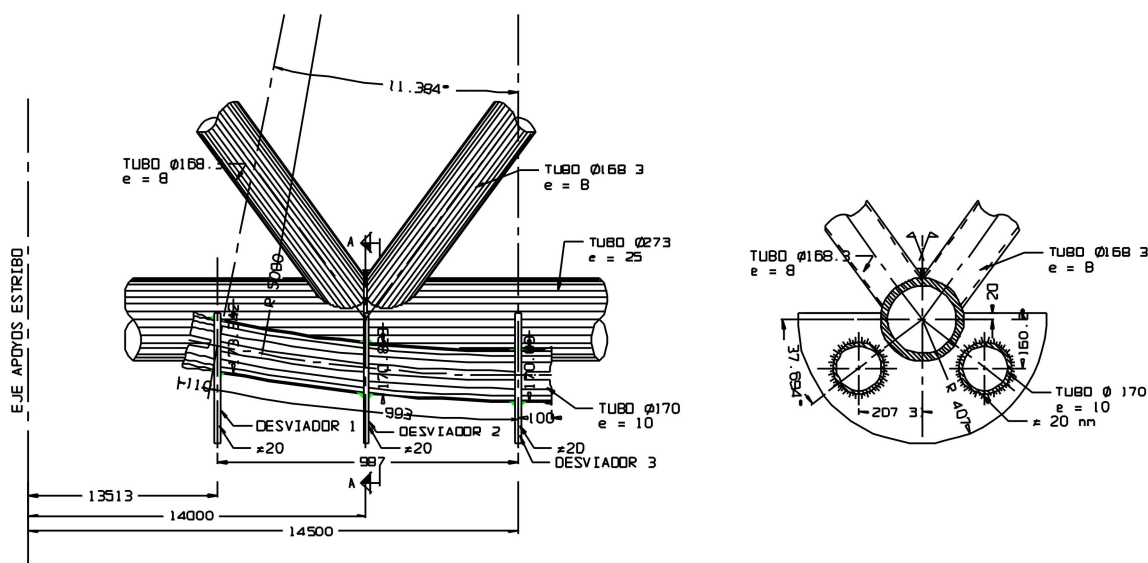


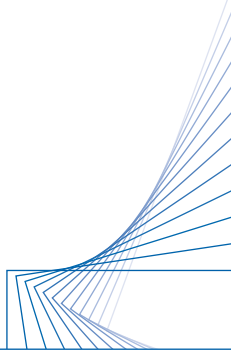
Figura 7 - Geometría de los desviadores.

El problema planteado es, por lo tanto, cuál es el criterio que debe aplicarse a casos intermedios.

M. Virlogeux (1993) [1] ha hecho un planteamiento interesante en este sentido, estableciendo dos posibles criterios para decidir:

- El primer criterio consiste en determinar la importancia que tienen los cables a efectos de proporcionar rigidez a la estructura. Para ello,

Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia



propone comparar la flecha de la estructura debida a la sobrecarga en la estructura con cables y sin cables. Si la diferencia es muy importante, la estructura debe ser diseñada como un puente atirantado, mientras que si la diferencia es pequeña, el pretensado puede considerarse como un pretensado convencional.

—El segundo criterio es un criterio de fatiga. Se trata, en este caso, de cuantificar el valor de la variación de tensiones debida a la sobrecarga.

M. Virlogeux ha utilizado estos criterios para comparar tres estructuras distintas. Estas estructuras son:

- Una estructura de hormigón pretensado en cajón con pretensado exterior situado dentro de la sección transversal: el Viaducto de Souvain.
- Un puente atirantado: el puente de Evipros.
- Una losa suspendida por debajo: el puente de Truc de la Fare.



Figura 8 .Colocación de las vigas en obra.

Esta comparación se ha completado incluyendo el puente sobre el barranco de Cavalls y se presenta en las tablas 1 y 2. En la tabla 1, se indica, en la columna 2, la flecha de cada estructura, debida a la sobrecarga, teniendo en cuenta la rigidez de los cables, y en la columna 3, sin tener en cuenta su rigidez. La Tabla 2 muestra la variación de tensión en el pretensado debido a la totalidad de la sobrecarga y también, para el puente sobre el barranco de Cavalls, la variación de tensión debida a la carga de fatiga definida en la IAP-96 [2].



Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia

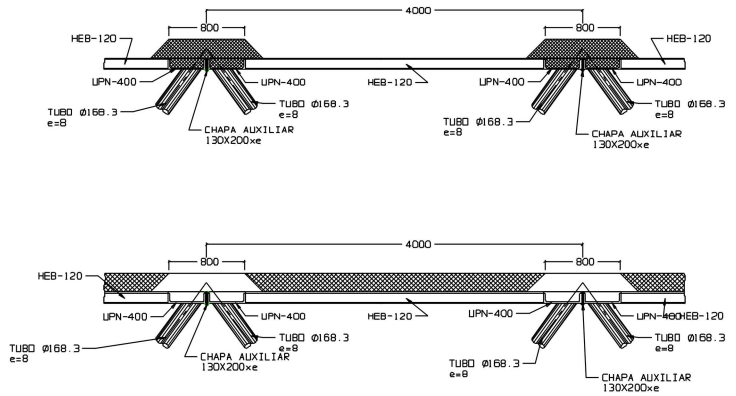
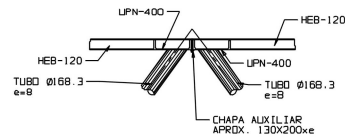
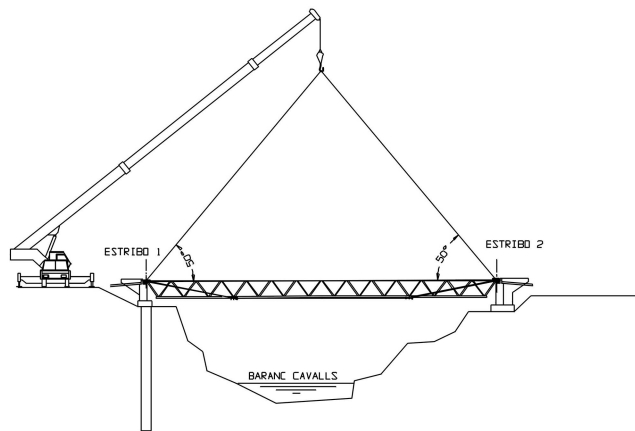
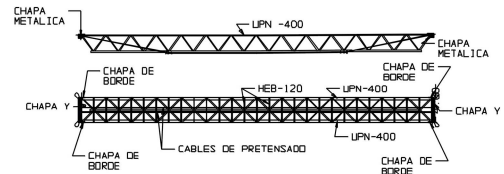
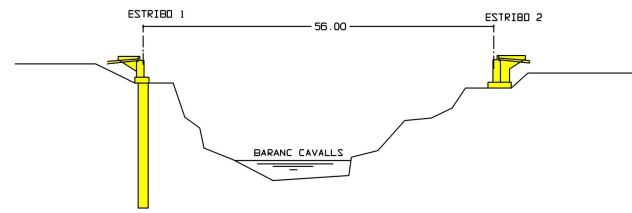
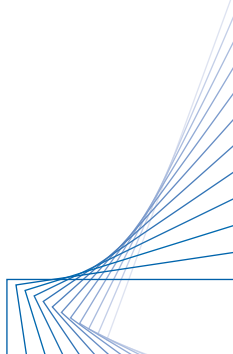


Figura 9. Proceso constructivo.

Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia



El resultado de este análisis resulta poco concluyente para el puente sobre el barranco de Cavalls. Mientras que el criterio de rigidez parece indicar que es apropiado un diseño como pretensado convencional, la variación de tensiones resultante de la sobrecarga total resulta, en este puente, comparable a la del puente atirantado.

Tipo de Estructura	$f_{cc}$ [m]	$f_{sc}$ [m]	$f_{sc}/f_{cc}$
Sección Cajón (Viaducto de Souvain)	0,0457	0,0461	1,001
Puente Atirantado (Évipros)	0,283	39,410	139,260
Puente suspendido inferiormente (Truc de la Fare)	0,082	0,216	2,634
Puente tubular con pretensado exterior (Barranco Cavalls)	0,097	0,123	1,270

Tabla 1. Criterio de rigidez.

Tipo de Estructura	$\Delta\sigma_{sc}$ [MPa]	$\Delta\sigma_{fat}$ [MPa]
Sección Cajón (Viaducto de Souvain)	14.5	
Puente Atirantado (Évipros)	130	
Puente suspendido inferiormente (Truc de la Fare)	136	
Puente tubular con pretensado exterior (Barranco Cavalls)	105	30

Tabla 2. Criterio de fatiga.

La fatiga, ¿es, por lo tanto, realmente un problema?

En primer lugar, debe recordarse que los problemas de fatiga son debidos fundamentalmente a la acción de cargas variables frecuentes, por lo que no parece razonable calcular la variación de tensión para la sobrecarga total. En la IAP-96 [2] se define una carga de fatiga. Con ésta carga, la variación de tensión en el pretensado del puente sobre el barranco de Cavalls es de sólo 30 MPa (ver columna 3 de la tabla 2).

Además, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

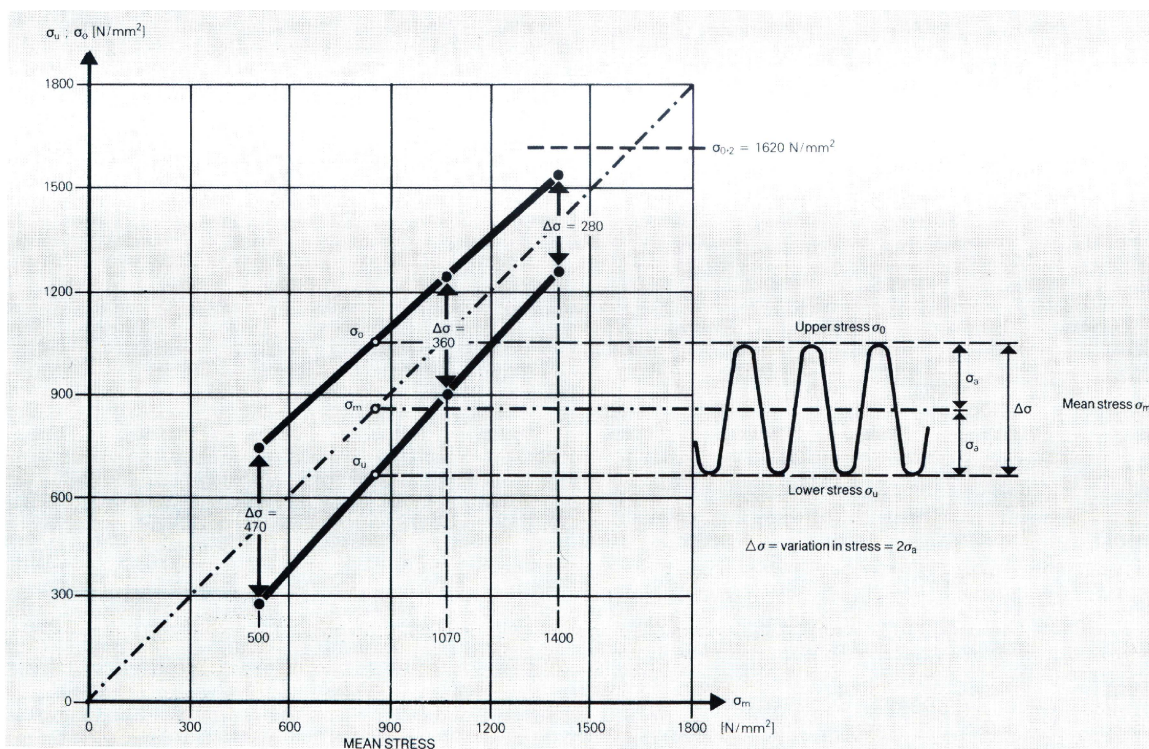
1. El rango de variación de tensiones obtenido, incluso con la sobrecarga total, es menor que el límite de fatiga del acero de pretensar (ver figura 10).
2. Los ensayos de fatiga llevados a cabo por Fouré y Hoang (1993) [4] indican que, incluso para altas tensiones iniciales (del orden del 70% de la carga de rotura) y variaciones de tensiones impor-

Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia

tantes (del orden de 100 MPa), no se detectaron problemas de fatiga, ni utilizando anclajes de pretensado convencionales, ni con anclajes para cables reemplazables.

El hecho de que los criterios propuestos por M. Virlogeux hayan dado lugar a resultados poco concluyentes, parece sugerir que, para casos intermedios, es necesaria la aplicación de algún otro criterio.

Una primera observación en este sentido es que el límite del 45% de la carga de rotura utilizado en el diseño de puentes atirantados se establece con objeto de minimizar el riesgo de fallo de un cable que, en ese tipo de estructura, podría afectar sustancialmente a su seguridad. Por lo tanto, parece que otro posible criterio para decidir sobre este problema podría ser si la estructura puede o no resistir su peso propio (y una determinada sobrecarga) en caso de fallo de los cables de pretensar (o al menos de alguno de ellos, ya que todos los cables no fallarán a la vez).



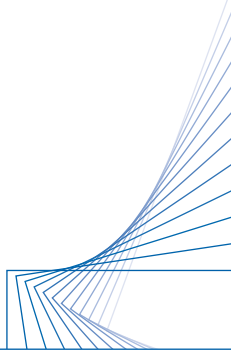
108

Figura 10. Límite de fatiga según la referencia [3].

¿El fallo de los cables, implica el fallo de la estructura?, o por el contrario, ¿puede la estructura soportar su peso propio y permitir su reparación sin un coste excesivo? En este último caso, la economía del diseño podría justificar el uso de criterios menos conservadores, al ser el riesgo mucho menor.

Siguiendo esta filosofía, la máxima tensión de servicio del pretensado exterior del puente sobre el barranco de Cavalls ha sido limitada al 65% de la carga de rotura.

Un ejemplo de estructura mixta combinada  
con pretensado exterior:  
el nuevo puente sobre el barranco  
de Cavalls en Valencia



## 4. Consideraciones finales

El puente sobre el barranco de Cavalls es el resultado de un análisis cuidadoso de las distintas posibilidades estructurales para salvar un vano de 56,00 metros de longitud, situado a una altura importante sobre el terreno natural. La combinación de distintos materiales (acero estructural, acero de pretensar y hormigón armado) ha permitido desarrollar una solución económica y fácil de construir.

Respecto del diseño del pretensado exterior en estructuras poco convencionales como ésta, se ha sugerido un nuevo criterio que consiste en evaluar las consecuencias de un fallo en un cable de pretensado. Si dichas consecuencias sólo dan lugar a riesgos pequeños, se sugiere que es posible utilizar criterios menos conservadores (que los utilizados en el diseño de puentes atirantados).

En cualquier caso, este tema debe ser objeto de investigaciones en profundidad, que deberían llevarse a cabo teniendo en cuenta el comportamiento de estructuras reales construidas, como la descrita en este trabajo.

La estructura sobre el barranco de Cavalls pertenece al Distribuidor Comarcal Sur de Valencia. La propiedad corresponde a la Generalitat Valenciana siendo el Director de la Obra Adolfo Roca.

La construcción está a cargo de Dragados S.A., siendo Jefe de Obra José Antonio Martínez. La estructura metálica ha sido elaborada en Asturias en los Talleres de AUGESCON, S.L.

## 5. Bibliografía

- [1] M. Virlogeux. "Some Elements for a Codification of External Prestressing... and of Precast Segments". En External Prestressing in Structures. SaintRémylèsChevreuses. Francia. Junio 1993.
- [2] Ministerio de Fomento. "IAP-96 Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera". Madrid, 1996.
- [3] R. Walther, B. Houriet, W. Isler, P. Moia. "Cable Stayed Bridges". Thomas Telford. Londres, 1988.
- [4] B. Fouré, L. H. Hoang. "Fatigue Tests of Anchorages for External Prestressing". En External Prestressing in Structures. SaintRémylès Chevreuses. Francia. Junio 1993.