

# Proyecto y construcción del puente colgante de Elche

José Romo Martín  
Hugo Corres Peiretti



## 1. Introducción

En julio de 1990, la Consellería d'Obres Públiques de la Generalitat Valenciana y el Ajuntament d'Elx convocaron un concurso internacional de anteproyectos para un nuevo puente de la Ronda Norte de Elx.

De acuerdo con las bases del concurso, se trataba de poder determinar la tipología estructural más adecuada para un puente que, basándose en los condicionantes urbanísticos existentes, tuviera un marcado carácter singular. En mayo de 1991 se resolvió el concurso otorgando el primer premio y, consecuentemente, la redacción del proyecto de construcción a la solución propuesta por FHECOR Ingenieros Consultores. [1]

En julio de 1993 y siendo los trabajos dirigidos por D. Lorenzo Mataix de la Consellería d'Obres Públiques de la Generalitat Valenciana se completó la redacción del citado proyecto de construcción. [2]



Figura 1. Imagen virtual del puente.

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche

En mayo de 1998, la Generalitat Valenciana adjudicó a la empresa FCC la construcción de las obras, siendo Director de las Obras por parte de la Consellería d'Obres Públiques a D. Adolfo Roca, y la Asistencia Técnica FHECOR Ingenieros Consultores.

## 2. Concepción general del proyecto

### 2. 1. Ideas rectoras para el diseño del puente

El proyecto de construcción del puente ha seguido fielmente las ideas rectoras que estaban en las bases del concurso y sirvieron para la elección de la solución del anteproyecto.

La ubicación del puente, tanto respecto a la trama urbana de Elche, como al cauce del río Vinalopó, presentaba una serie de singularidades que condicionaban la propuesta que se iba a realizar. Así, la luz total que se debía de salvar era del orden de 160 m y la profundidad del río en relación con la rasante de la nueva Ronda Norte era de aproximadamente 35 m

Las dos márgenes del río presentan unos condicionantes orográficos, sociales y culturales completamente diferentes. Así, la margen derecha presenta una orografía mucho más escarpada, correspondiendo a una zona de expansión de la ciudad, con una población socialmente deprimida. Por el contrario, en la margen izquierda, la ladera excavada por el río es mucho más suave, y en ella se encuentra el Palmeral y un poco más alejado el casco histórico de Elche.

Por otra parte, la ciudad, que se encuentra atravesada de norte a sur por el río Vinalopó, presenta toda una serie de puentes de diferentes épocas fiel reflejo del espíritu constructivo de cada una de ellas. El nuevo puente, de acuerdo con las bases del concurso, debería ser un puente singular, que supusiese una respuesta acorde con los tiempos, al problema planteado por la nueva Ronda Norte en su cruce sobre el río.

Con estos condicionantes, se planteó una obra que pudiera erigirse como un símbolo moderno para la ciudad de Elche: distinto, racional acorde con la tecnología punta de este final de siglo y, asimismo, bello.

Por otra parte, se trataba de proyectar un puente que salvando el problema viario tuviera una escala humana, dando un protagonismo especial no sólo a los conductores sino también al resto de ciudadanos usuarios del mismo: vecinos y peatones. Así, se trató de favorecer la comunicación peatonal entre ambas márgenes de la ciudad, y entre éstas y el río, con el menor impacto visual posible.

Por último, aprovechando las vistas que existen desde el emplazamiento del puente, tanto de la parte histórica de la ciudad, como de los palmerales vecinos, surgió la idea de poder utilizar la estructura para dar a los ciudadanos una nueva visión de la ciudad.

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche

## 2. 2. Estudios preliminares

A partir de un estudio tipológico se fueron analizando el cumplimiento de las ideas rectoras de las diferentes posibilidades estructurales.

Durante el desarrollo del estudio tipológico, se descartaron las soluciones con pilas múltiples en el río ya que suponían soluciones poco transparentes. Asimismo, se descartaron las soluciones en arco ya que suponían la rotura de la continuidad visual del río y, a pesar de su elegancia, no disponían de la singularidad necesaria según las bases del concurso [3]. Por último, se estudiaron soluciones atirantadas o colgadas que permitían salvar el cauce con un vano único, lo que eliminaba los problemas de interferencia visual indicados anteriormente.

Dentro de este grupo de alternativas, se planteó la realización de un puente asimétrico, ya que el cauce del río no se encuentra en el centro del valle, y se pretendía evitar colocar una pila de gran altura en la margen donde se sitúa el Palmeral y el casco histórico de la ciudad.

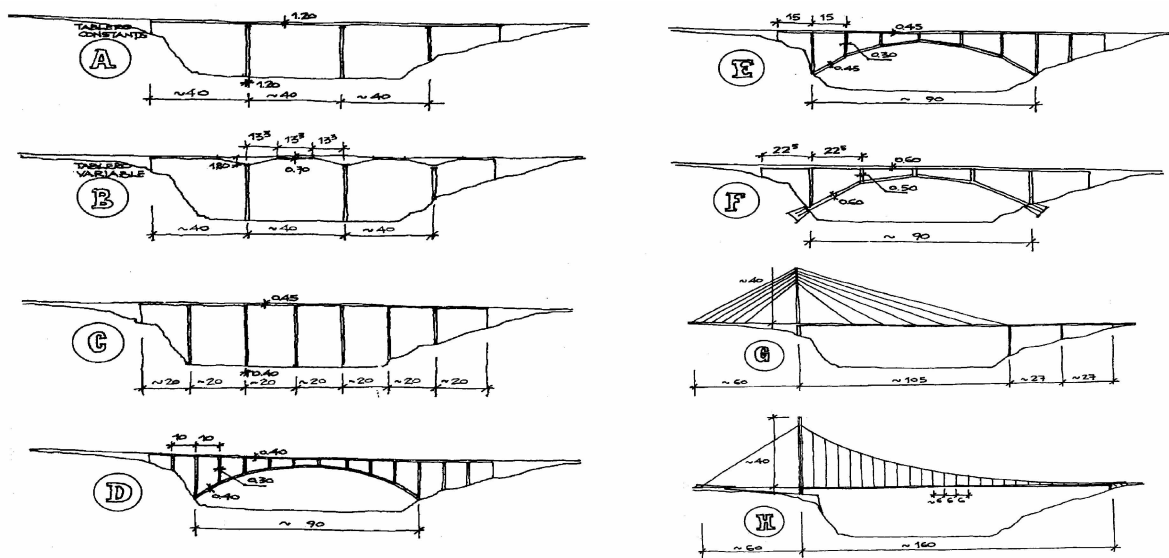


Figura 2. Estudio tipológico.

En la margen derecha, donde el Plan General situaba una glorieta, suponía un punto óptimo para situar una pila y el correspondiente contrapeso, siendo además allí donde era más necesaria la realización de actuaciones encaminadas a dignificar los aledaños de la obra.

Por todo ello, se decidió proponer un puente colgante asimétrico, con una única pila situada en la margen derecha del río que cumplía con todas las ideas rectoras indicadas anteriormente.

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche

### 2.3. Solución adoptada.

La solución finalmente adoptada fue un puente colgante asimétrico de 164.50 m de luz, con un ancho total de tablero de 23.00 m.

La sección transversal alberga cuatro carriles de 3.50 m de ancho, dos aceras laterales de 3.00 m de ancho y una mediana de 2.00 donde se situarán dos tuberías de abastecimiento de la ciudad.

El tablero está sustentado por dos conjuntos de cables situados según dos planos inclinados que se anclan en sendos contrapesos, estando situado el de la margen derecha del Vinalopó bajo la glorieta de conexión de la ronda norte, con el viario urbano según los requerimientos del Plan General. Esta disposición de cables permite situar una única pila en esta misma margen, dejando pasar a cada lado de la misma cada sentido de circulación del tráfico.

En general, los cables principales de los puentes colgantes son un único elemento construido “in situ” mediante la colocación de alambres uno a uno. Como alternativa a este sistema, cuyo coste es muchas veces desconocido a la hora de redactar el proyecto, se ha proyectado un cable principal constituido por un conjunto de cables comerciales. [4] El desarrollo de la fabricación en serie de cables cerrados de hasta 180 mm de diámetro y cargas de rotura de 30.000 kN, permite un conocimiento ajustado “a priori” del coste del sistema de suspensión del puente.

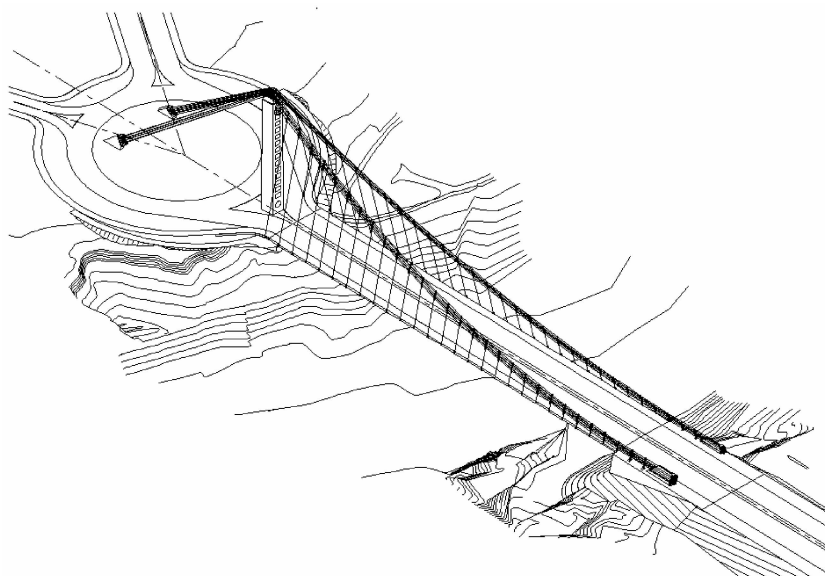
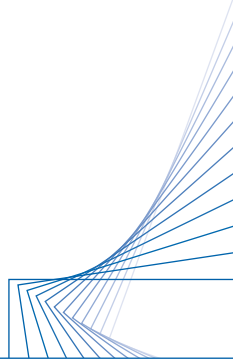


Figura 3. Vista general.

Otra ventaja en el uso de este tipo de cables principales consiste en que cada cable individual puede ser reemplazado en el futuro, evitando los problemas que se plantean en los puentes colgantes con un único cable portante. Por todo ello, se ha adoptado una tipología de cable principal formado por un conjunto de 8 cables cerrados de 125 mm de diámetro, que llegan a estar sometidos a una carga total de 62950 kN bajo cargas de servicio.

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche



Las péndolas son también cables cerrados de 60 mm de diámetro situadas cada 6.00 m, con una sollicitación máxima en servicio de 1023 kN.

La sección transversal del puente con un ancho total de 23.00 m y un canto máximo de 0.90 m tiene una relación canto/luz longitudinal= $1/184$ , y una relación canto/luz transversal= $1/25.6$

El tablero es mixto, con un canto transversal variable desde 0.60 m en sus bordes laterales, hasta un máximo de 0.90 m en el eje del mismo.

La parte metálica del tablero está constituida por una chapa inferior de fondo continua, sobre la que se sitúa un emparrillado formado por 9 almas longitudinales, y almas transversales situadas cada 6.00 m coincidentes con las secciones en cuyos extremos se encuentran las péndolas. Sobre todas estas almas se sitúan platabandas superiores a modo de alas de las mismas.

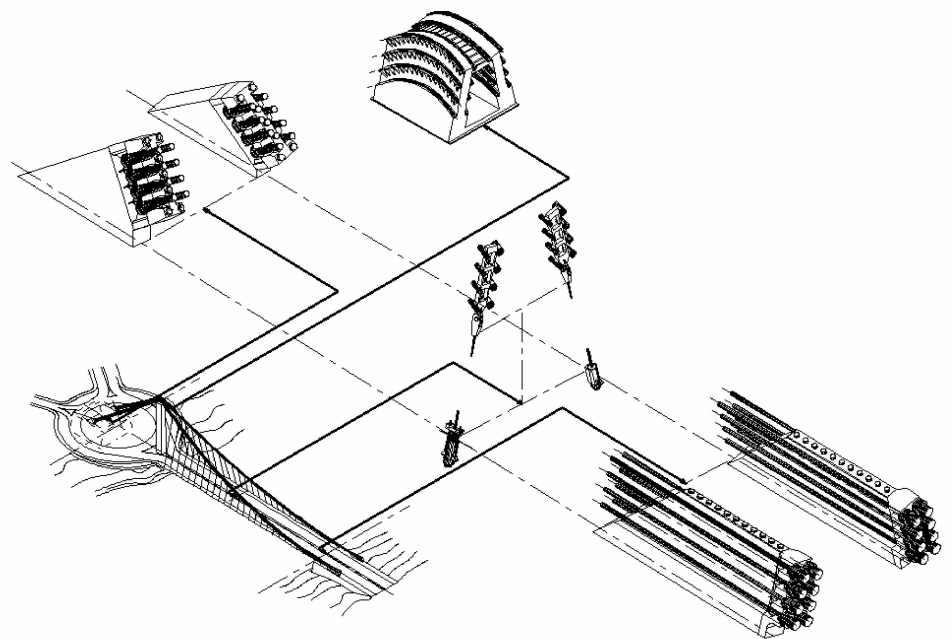


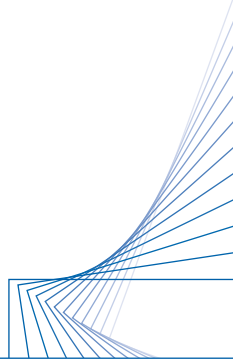
Figura 4. Sistema de suspensión.

Sobre la estructura metálica se hormigona una losa de 0.20 m de espesor que distribuye las cargas locales hasta la estructura metálica.

Este tablero mixto se completa con un tramo de 5.00 m situado en la inmediación de pila, que corresponde a la zona de ancho variable donde el puente comienza a formar parte de la glorieta, que vuela desde los muros que configuran el borde exterior de la glorieta. Bajo esta zona del tablero y aprovechando el encepado de la pila, existe un mirador al cauce y se encuentra el punto de acceso al interior de la pila.

El tablero mixto se encuentra fijado longitudinalmente en el contrapeso de la margen opuesta a la pila. Por otra parte, tanto en dicho punto como en su conexión al hormigón en las inmediaciones de la pila, se

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche



sitúan los aparatos de apoyo y topes antilevantamiento, así como un tope transversal en cada uno de los extremos del tablero.

La pila tiene una altura de 44.50 m y está constituida por dos pantallas de hormigón armado de ancho y espesor variable, que se arriostran entre sí mediante una serie de dinteles coincidentes con las mesetas de la escalera metálica que se aloja en el interior de la pila, para dar acceso al mirador situado en su parte superior.

La pila está sometida a un axil máximo de 174000 kN y un momento flector longitudinal de 306000 kNm en E.L.U.

La relación altura de pila - luz del puente es de 0.28, que corresponde a un óptimo económico para esta tipología de puente asimétrico [5].

Los cables principales se anclan en cada margen en sendos contrapesos de hormigón armado, rellenos con un material (suelo) de densidad controlada. Para el diseño de estos elementos complejos se han desarrollado unos modelos específicos de bielas y tirantes, para establecer el flujo de fuerzas y diseñar la armadura [6].

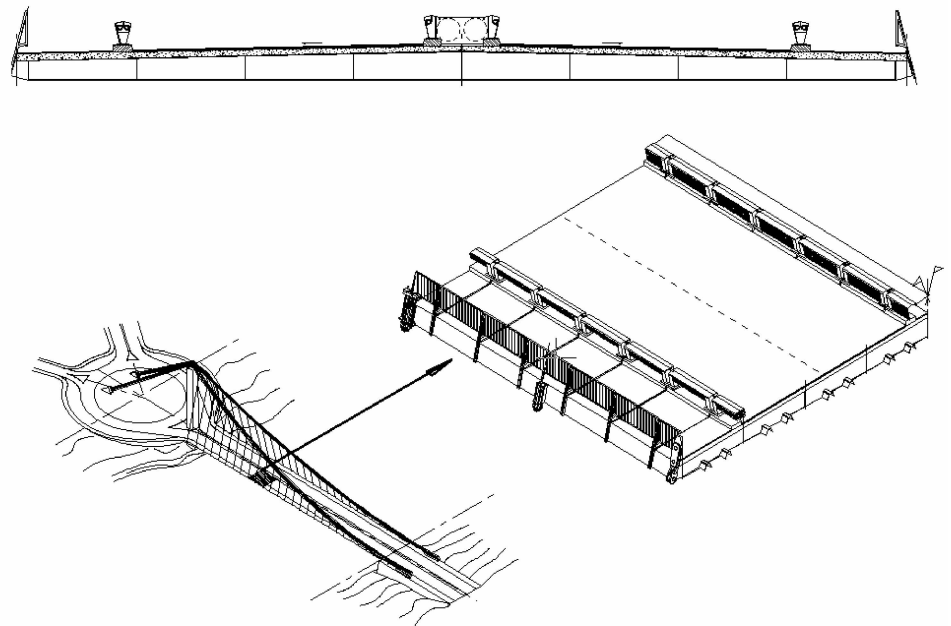


Figura 5. Sección transversal.

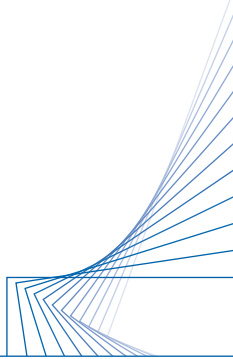
### 3. Comportamiento estructural.

#### 3.1. Estática

##### 3.1.1. Estado permanente ideal

El diseño del puente se ha realizado de forma que el tablero para el estado de cargas permanentes tenga una ley de momentos flectores similar a la que tendría una viga continua, apoyada en los puntos correspondientes a las péndolas.

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche



Esta ley de flectores que se pretende obtener después del proceso constructivo supone que no existirá una redistribución de esfuerzos, bajo el punto de vista de la flexión longitudinal, por fluencia de la losa de hormigón del tablero.

Para conseguir esta situación, los cables han de construirse con una longitud más corta de la esperada en el estado permanente, para compensar el alargamiento que sufrirán durante el procedimiento constructivo consecuencia de la actuación de las cargas permanentes.

Los cables para esta situación adoptarán la geometría correspondiente al antifunicular de las cargas, que será aproximadamente una parábola de segundo grado contenida en el plano de los cables.

Esta geometría correspondiente al antifunicular de una carga uniformemente distribuida se ve modificada por la presencia de cargas puntuales debidas al peso de las conexiones péndolas -cable principal, que hace que el cable se salga ligeramente del plano teórico inclinado donde se inscribe, y que la curva teórica de partida se vea ligeramente modificada.

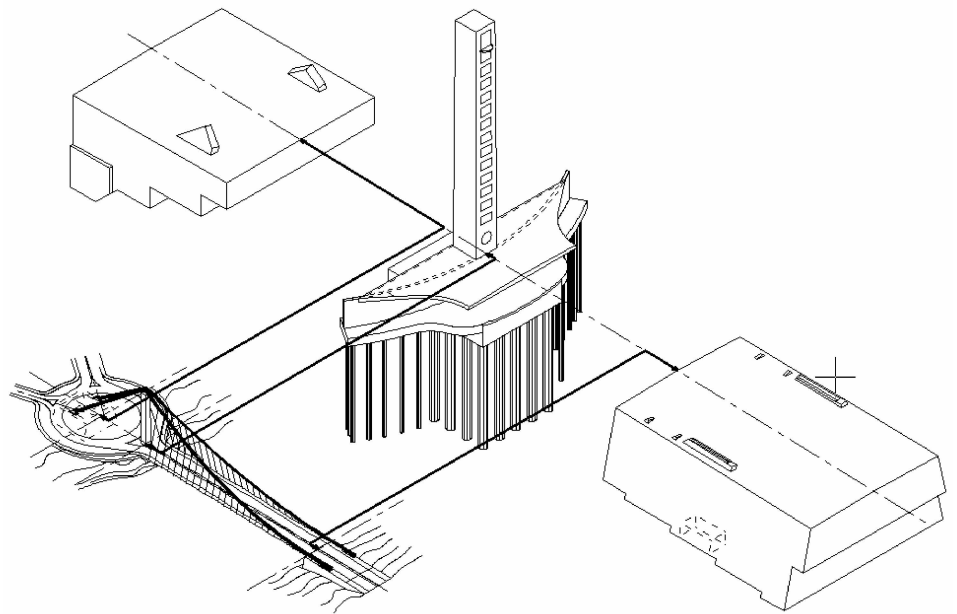
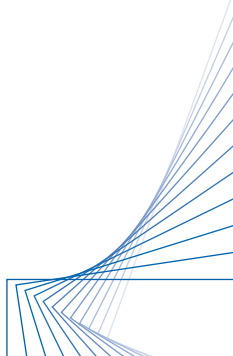


Figura 6. Pila y contrapesos.

En esta situación de cargas permanentes, la pila se encontrará sometida tan sólo a esfuerzo axial, sin flexión longitudinal. Esto se garantiza mediante el equilibrio de las cargas horizontales entre los cables principales en el vano principal y en la retenida.

Por ello, durante el procedimiento constructivo se ha controlado especialmente este aspecto asegurando la verticalidad de la pila y las fuerzas en los cables.

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche



### 3.1.2. Sobrecargas de uso

En relación con la sobrecarga de uso, el tablero funciona longitudinalmente como una viga apoyada elásticamente en los puntos de cuelgue.

Durante estas hipótesis de carga, la tracción de los cables principales en el vano, se ve fuertemente incrementada y, como consecuencia, se produce un fuerte incremento de la carga horizontal en la cabeza de la pila. Esta carga se transmite en un 6% como cortante a la pila a través de la silla superior, mientras que el 94% restante se transmite por tracción de los cables en su tramo de retenida hasta el contrapeso trasero.

### 3.2. Comportamiento dinámico

Para estudiar el comportamiento dinámico del puente, se ha efectuado, en primer lugar, un estudio de sus modos de vibración teniendo en cuenta el efecto de rigidización de los cables, producido por los axiles de tracción existentes en los mismos (mediante la matriz geométrica).

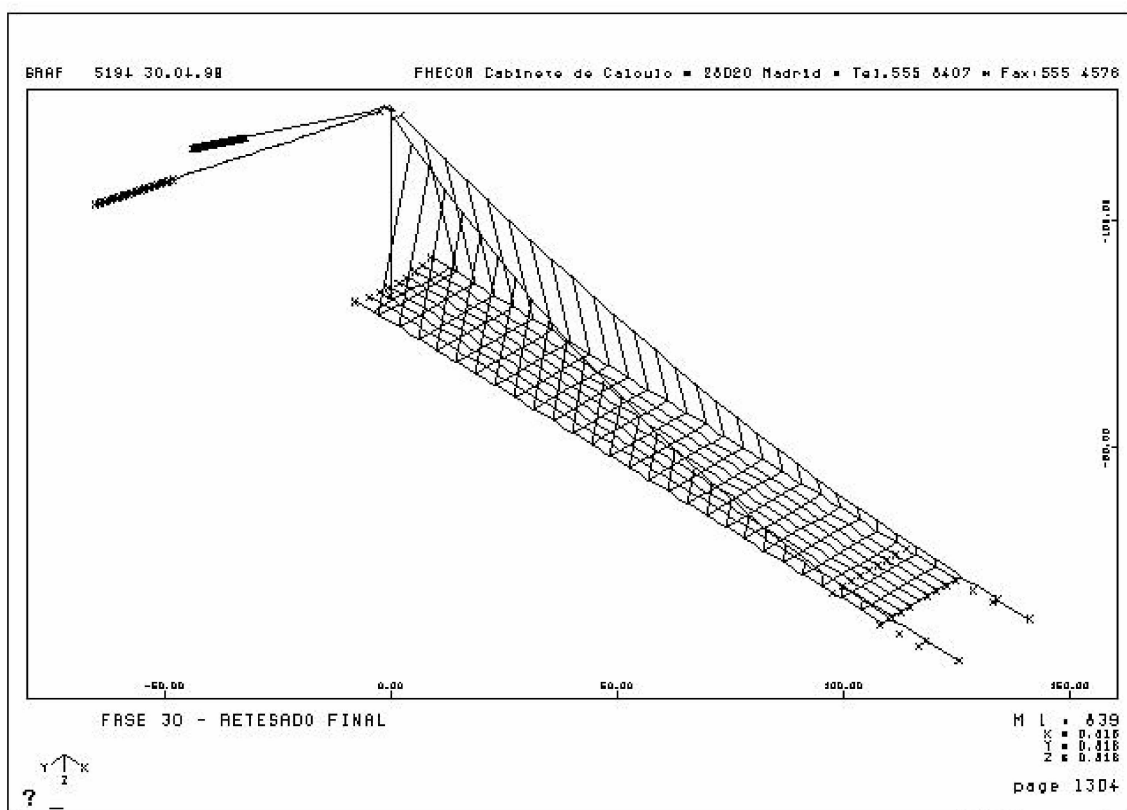


Figura 7. Modelo general de cálculo.

### 3.2.1. Viento

Con el fin de conocer la respuesta del puente frente a la acción del viento se ha realizado un estudio seccional del puente en un túnel de viento.

Los diagramas siguientes recogen las fuerzas estáticas equivalentes bajo diferentes ángulos de ataque del viento en la hipótesis de régimen laminar y turbulento del mismo.



Proyecto y construcción del puente colgante de Elche

En las figuras siguientes se recoge la respuesta dinámica del tablero, frente a valores de viento de hasta 80 m/s. [7] Se puede observar que no se presenta inestabilidad aerodinámica por debajo de 51 m/s, que es la velocidad estimada asociada a un periodo de retorno de 120 años.

**3.2.2. Sismo**

A pesar de estar en zona sísmica (aceleración máxima 0.219g), la flexibilidad de este tipo de puentes minimiza la acción del sismo (para el primer modo de vibración con un periodo de 2.98 s, la aceleración se reduce a 0.067g). De esta forma, los momentos flectores en la pila, que es el elemento más sensible a la acción sísmica no llegan a ser el 10% del total de la sollicitación sobre la pila.

**3.2.3. Vibraciones**

El carácter urbano de la obra supone el uso conjunto del puente por el tráfico rodado y el peatonal. Por ello, se han realizado una serie de estudios específicos para simular el comportamiento dinámico de la estructura al paso del tráfico.

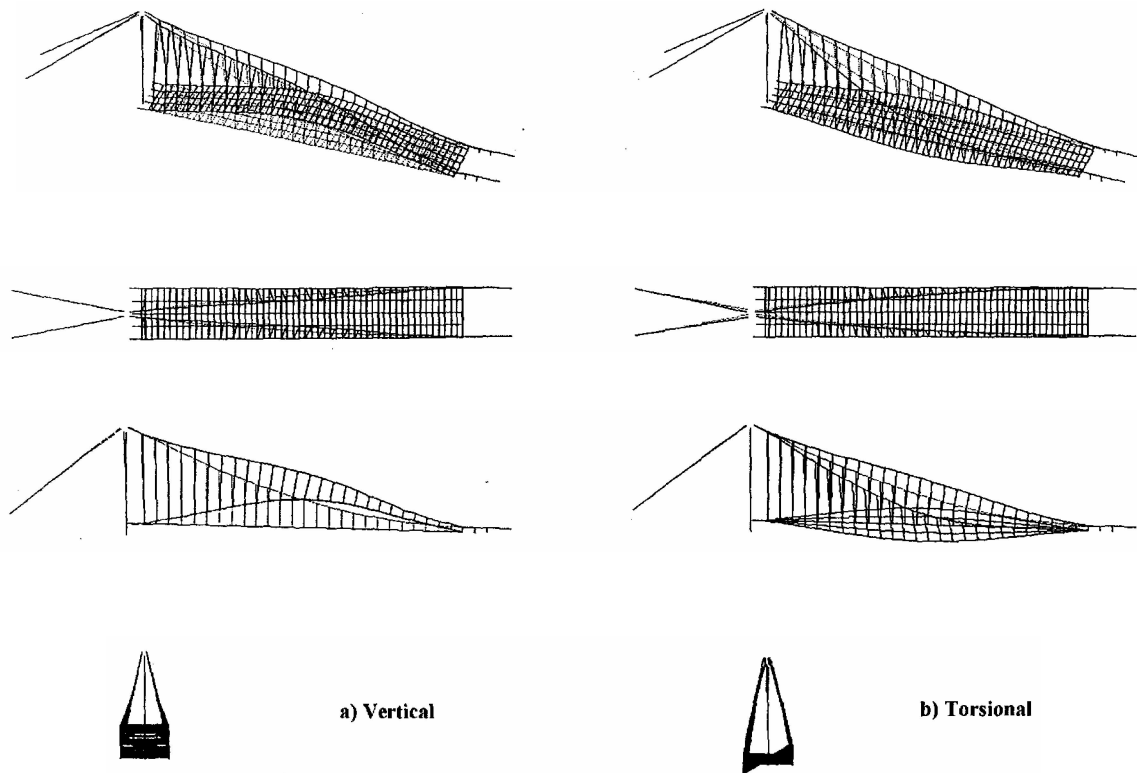


Figura 8. Modos de vibración.

Como resultado de estos análisis se ha obtenido un valor máximo de aceleración vertical de 0.26 m/s<sup>2</sup> para un amortiguamiento de 0.008, al paso de un vehículo de 300 kN a una velocidad de 80 km/h, valor éste que se encuentra dentro de los recomendados en la bibliografía especializada. [8] [9]

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche

### 4. Procedimiento constructivo

El procedimiento constructivo de la obra, de forma resumida, consta de las siguientes fases principales:

- Ejecución de la infraestructura del puente: Contrapesos, cimentación y alzado de pila.
- Colocación de los cables principales.

Los cables se van desenhebrando uno a uno de cada bobina, haciéndolos pasar por la silla situada en la cabeza de la pila. Los cables principales del puente se enhebran a unos cables de pretensado que trasladan la tracción al fondo del contrapeso de retenida situado tras la pila, donde existe una cámara desde donde es posible tesar el sistema.

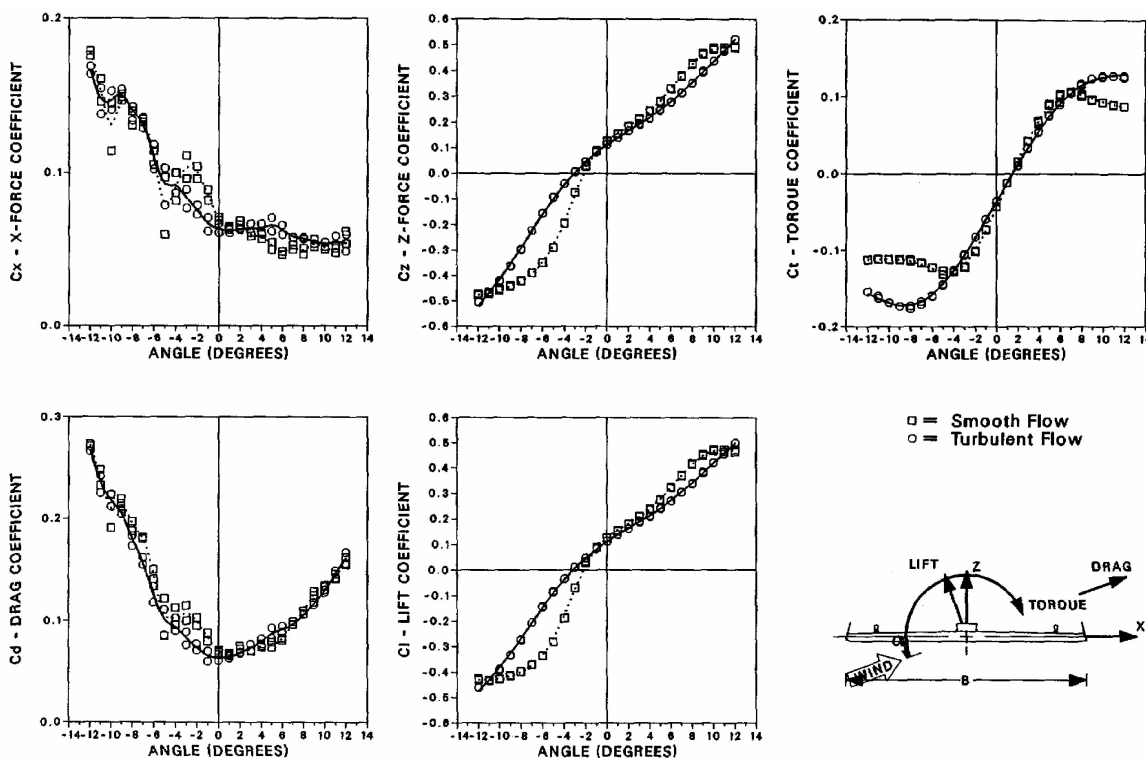


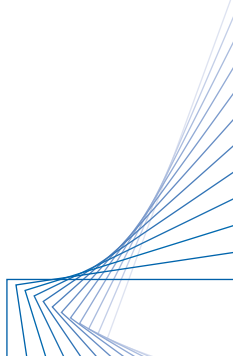
Figura 9. Coeficientes de empuje estático.

Por su otro extremo, los cables se van enhebrando al anclaje del contrapeso situado en la margen izquierda del río.

Para estas operaciones, se emplean una serie de dispositivos auxiliares diseñados para colocar sus cables en posición.

Una vez situados los cables principales se procede a colocar los bastidores de donde han de colgar las péndolas.

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche



Montaje del tablero

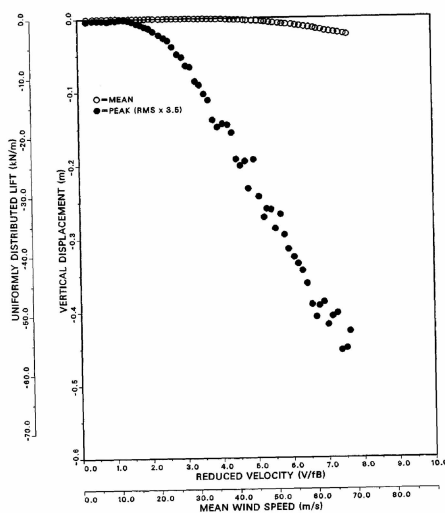
El tablero se monta con la ayuda de grúas desde el fondo del cauce. Se elevan piezas de 12.00 m de longitud que se enhebran en dos parejas de péndolas consecutivas, las dovelas se van conectando entre sí mediante unas articulaciones provisionales.

Una vez izadas todas las dovelas, se procede a darles continuidad mediante soldeo.

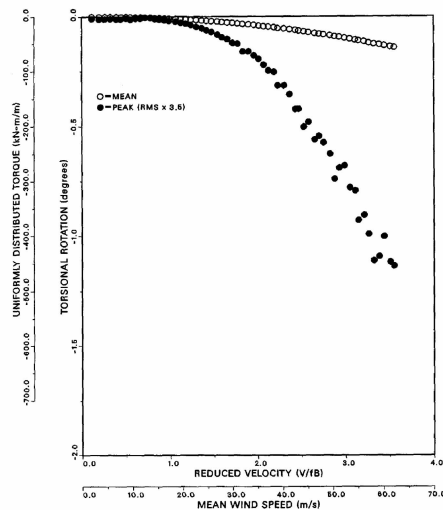
Por último, se procede a hormigonar el tablero.

Retesados

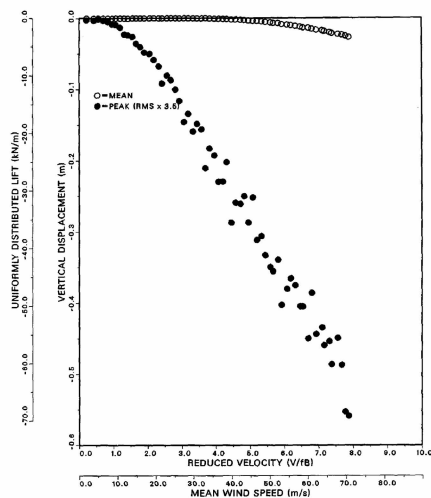
Durante estas fases, y ya que el peso propio de la estructura se ha



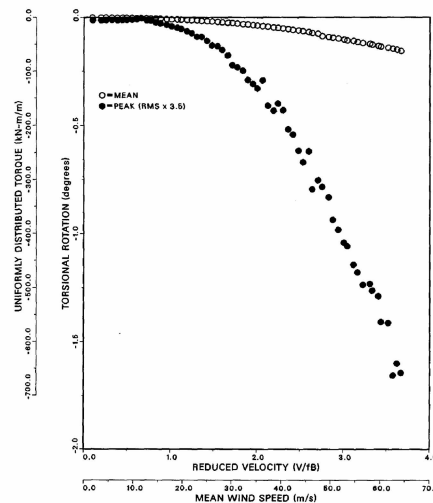
Elche Bridge - Vertical Response - Turbulent Flow -  $\zeta = 0.055$  Log. Dec.



Elche Bridge - Torsional Response - Turbulent Flow -  $\zeta = 0.055$  Log. Dec.



Elche Bridge - Vertical Response - Smooth Flow -  $\zeta = 0.055$  Log. Dec.



Elche Bridge - Torsional Response - Smooth Flow -  $\zeta = 0.055$  Log. Dec.

Figura 10. Respuesta aeroelástica.

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche



Figura 11. Vistas de la pila desde los contrapesos 1 y 2.

ido introduciendo gradualmente, es necesario ir aumentando la tracción en los cables de retenida tesando desde el contrapeso, para ir equilibrando las cargas horizontales en la cabeza de la pila hasta obtener una vez colocada la carga muerta el estado ideal de cargas permanentes.

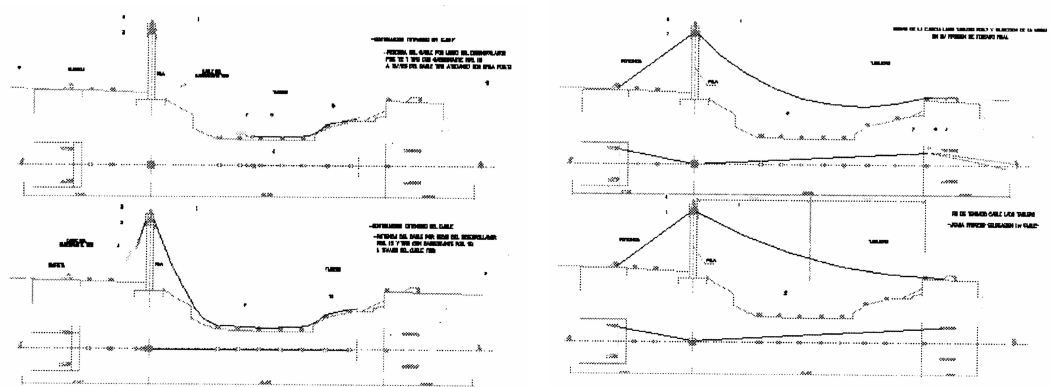


Figura 12. Proceso constructivo.

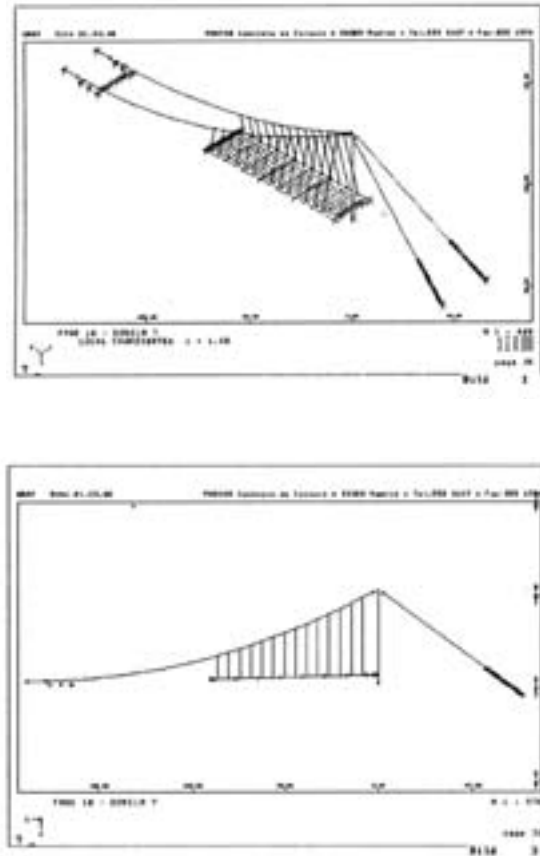
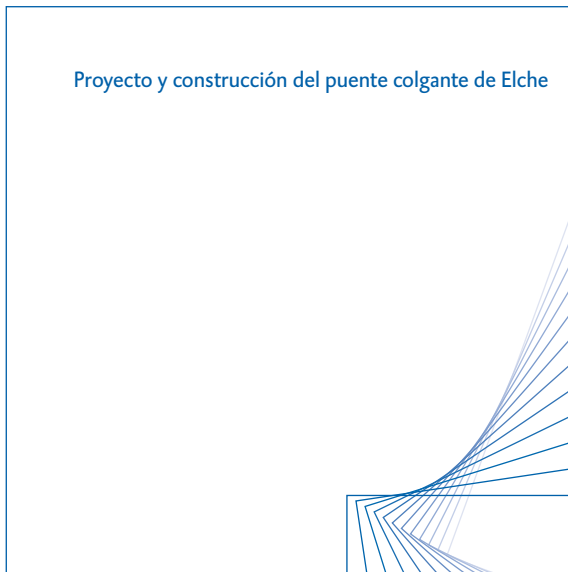


Figura 13. Modelo de cálculo para el estudio del montaje del tablero.

## 5. Referencias

- [1] Puentes I Concurso Internacional de Anteproyectos de Nuevo Puente sobre el Vinalopó en la Ronda Norte de la Ciudad de Elx. Hugo Corres, José Romo y Michael Schlaich. Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos 1991.
- [2] Proyecto de Construcción del Puente de la Ronda Norte sobre el Río Vinalopó en la Ciudad de Elche. Consellería d'Obres Publiques de la Generalitat Valenciana. 1993.
- [3] Typological Studies, Structural Conception and Design in Several Spanish Bridges. IASS. Stuttgart. Germany. October 1996. H. Corres, J. Romo. A. Pérez.
- [4] A new suspension bridge. IABSE. Cable-Stayed and Suspension Bridges. Deauville. France. 1994 H. Corres, M. Schlaich, J. Romo.
- [5] Aspectos específicos del diseño y análisis de puentes colgantes de luces bajas y medias. José Romo, Hugo Corres. Comunicación Asamblea del ATEP Logroño 1996.
- [6] Análisis de grandes elementos de hormigón armado. Aplicación práctica del método de las bielas y tirantes. José Romo, Michael Schlaich, Hugo Corres. Hormigón y Acero nº195 1995.

Proyecto y construcción del puente colgante de Elche

[7] A Study of Wind Effects For The Elche Bridge, Spain J.P.C. King A.G. Davenport. 1993 The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory Ontario.

[8] Vibration in Structures H.Bachmann. IABSE 1987.

[9] CEB Vibration Problems in Structures. Practical Guidelines 1991.