
Puente sobre el río Ebro

.....
Javier Manterola Armisén
Antonio Martínez Cutillas
Miguel Angel Gil Ginés
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Carlos Fernández Casado, S.L.
.....

RESUMEN

Para el cruce sobre el río Ebro de la línea de ferrocarril de Alta Velocidad Madrid Barcelona-Francia se ha proyectado un puente continuo de hormigón pretensado con una luz principal de 120 m. La tipología de este puente es totalmente nueva, pues se trata de una viga cajón tipo Vierendel como adaptación de las grandes celosías metálicas al hormigón pretensado. Tras un resumen de los planteamientos previos se realiza una descripción de la obra y se analizan los problemas específicos de su cálculo y comportamiento estructural, así como de su construcción.

ABSTRACT

A continuous prestressed concrete bridge with a main span of 120 m has been designed over the Ebro river for the High Speed Railway Madrid Barcelona-French border. A new typology has been proposed. It is a Vierendel box girder as an adaptation from the steel trusses to a prestressed concrete structure. After a brief review of the preliminary constraints a description of the structure is performed. The specific problems arising during the analysis are summarized and the main features from its structural behaviour and construction are discussed.

1.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA*

La línea de alta velocidad Zaragoza-Lérida cruza el río Ebro en las proximidades de Aguilar de Ebro, en un paraje donde el río tiene unos 120 m de anchura. Con un determinado valor ecológico, la Administración trataba de tener un puente digno, tecnológicamente avanzado, estéticamente correcto y que produjese el menor impacto sonoro en las orillas del río. Un puente singular para el cruce del tren más avanzado sobre el río más caudaloso de España.

Se empezaron considerando varias soluciones en diversos estudios de aproximación a la solución definitiva, todas ellas salvando el río de orilla a orilla. En un primer intento se plante-

aron: una solución en arco con tablero inferior, utilizando como viga de rigidez el dintel recto correspondiente a los vanos de aproximación, una segunda solución en celosía metálica y la que finalmente ha resultado la solución elegida, una viga Vierendel de hormigón pretensado circunscrita a una celosía triangular virtual interior.

Este primer estudio de soluciones hubo que repetirlo, pues por circunstancias medioambientales, se decidió cambiar el lugar de emplazamiento del puente. El nuevo cruce era muy parecido al anterior, un río con 120 m de anchura, con una zona, en la margen izquierda, de obligada protección sonora. Se volvió a realizar un nuevo estudio comparativo.

La primera solución, Fig. 1.1, consistía en un dintel continuo de hormigón pretensado formado por 7 vanos de 48 m + 5 x 60 m + 48 m. Con una sección lenticular de 4,25 m de canto, introducía dos pilas en el centro del río.

* Este proyecto ha sido realizado para el GIF y ha sido dirigido por los Ingenieros Leonardo Torres Quevedo y Alberto Reguero.

La segunda solución, Fig. 1.2, consistía en una solución atirantada de 400 m de longitud formada por seis vanos 44 m + 66 m + 180 m + 66 m + 44 m, siendo los tres centrales la zona atirantada. Esta solución, para satisfacer las exigencias de deformabilidad del tren de alta velocidad, necesita una rigidez a flexión significativa, lo que se consigue con un dintel más rígido que el correspondiente a un puente de carretera.

La tercera solución es la aplicación de la solución elegida, en el primer tanteo de soluciones, acoplada al nuevo emplazamiento. Es la solución tipo Vierendel aligerada lateral y superiormente (Figs. 1.3. a 1.7.).

De la comparación de las soluciones la que presentaba un conjunto de ventajas respecto a las demás fue la solución adoptada por las siguientes razones:

- ▼ 1. Presentaba la mejor de las protecciones acústicas de las orillas que debían ser protegidas. Son tres las fuentes de contaminación que produce un tren de alta velocidad: aquellas ligadas a la rodadura, las causadas por el funcionamiento mecánico y las debidas a la aerodinámica del vehículo. Cada una de estas fuentes predominará sobre las restantes

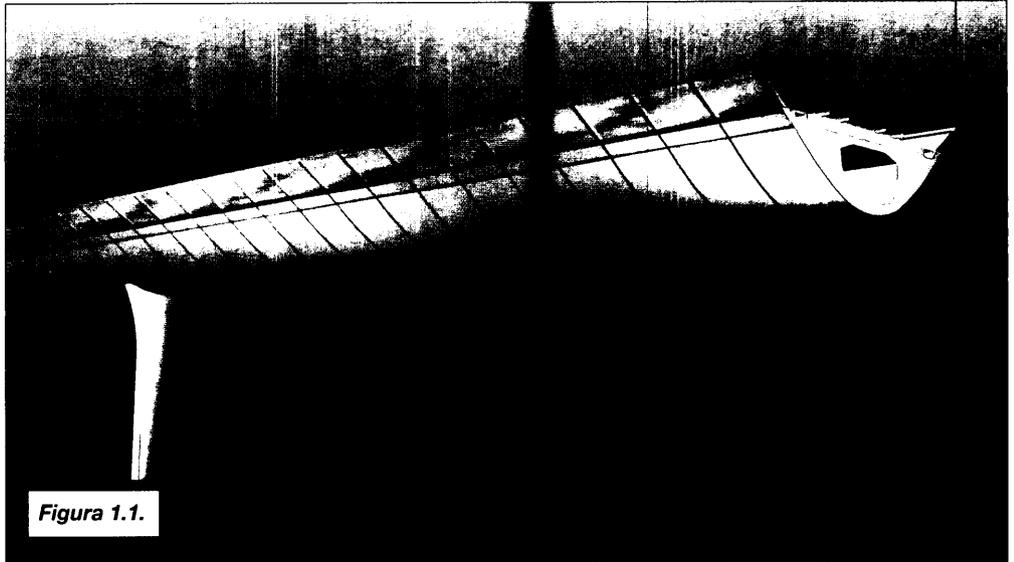


Figura 1.1.

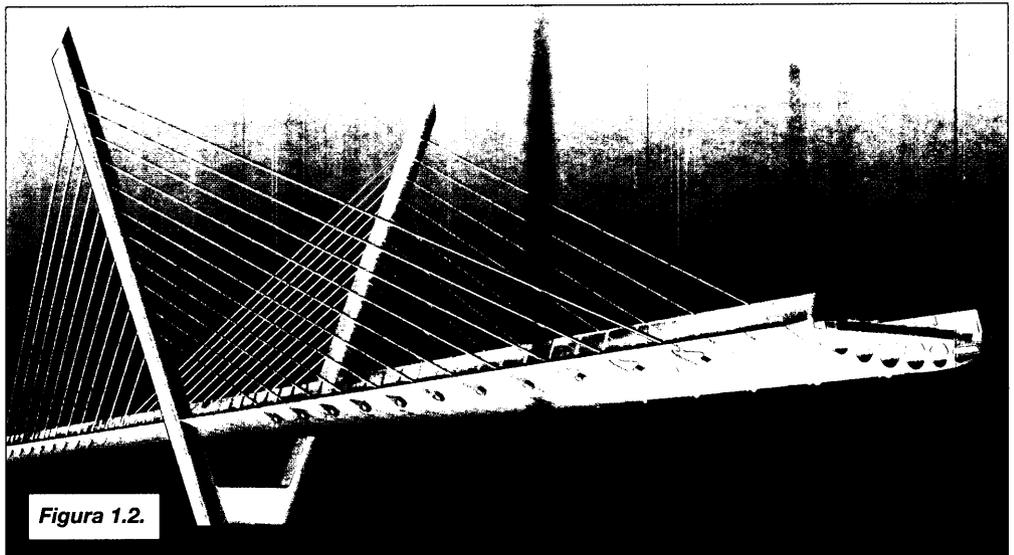


Figura 1.2.

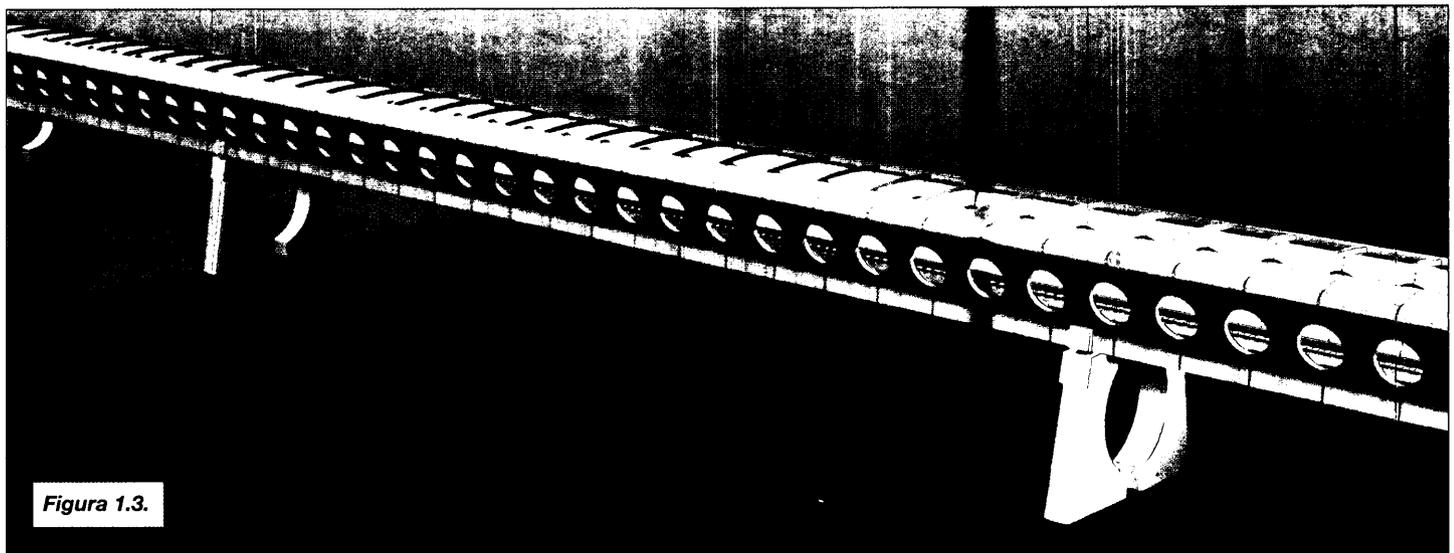


Figura 1.3.

en función del tipo de convoy, el diseño de sus partes (ruedas, bogies, carrocería y unidad motriz), el diseño y aparejo de las vías, de las características de cargas, sobre todo, y de la velocidad de paso de éste. En general en las composiciones ferroviarias tradicionales, el foco de emisión acústica principal se debe a la rodadura: conjunto vía-carril, características y disposición de las vías, traviesas, soportes, diseño de los bogies, etc. Sin embargo, en trenes modernos, a la vista de cuidadosísimo estado de las vías para la gran velocidad, el foco principal de emisión sonora se debe al ruido aerodinámico.

Las tres soluciones fueron objeto de un estudio acústico realizado por Transvalor Medio Ambiente, añadiéndoles a las soluciones recta y atirantada pantallas laterales de protección acústica de 5 m de altura. Así y todo la solución elegida era la mejor y podría optimizarse su rendimiento, todavía mas, si se le añadían pantallas de metacrilato cerrando los óculos laterales.

▼ 2. Desde un punto de vista económico, la solución de 60 m de luz era algo más barata que la adoptada, pero per-

día ventajas económicas con la adición de la pantalla acústica. En cuanto a la solución atirantada era más cara.

▼ 3. Tecnológicamente la solución más nueva e interesante era la solución elegida.

▼ 4. Estéticamente presentaba unas características y aceptación mejor. Razones todas estas que nos llevaron a adoptar esta solución. Es una solución nueva, estética y resistentemente hablando.

2. SOLUCIÓN ADOPTADA

Se trata de una viga continua de 546 m de longitud sobre la que discurre y penetra el tren de alta velocidad.

La viga cajón en celosía metálica, dentro de la cual discurre el tren, es una solución típica de los grandes puentes de ferrocarril a lo largo de su historia. Toda la estructura se convierte en soporte de la gran carga que se produce al pasar un tren. Es una solución rigurosamente tecnológica a la que se llega cuando se extreman las posibilidades resistentes. Además es

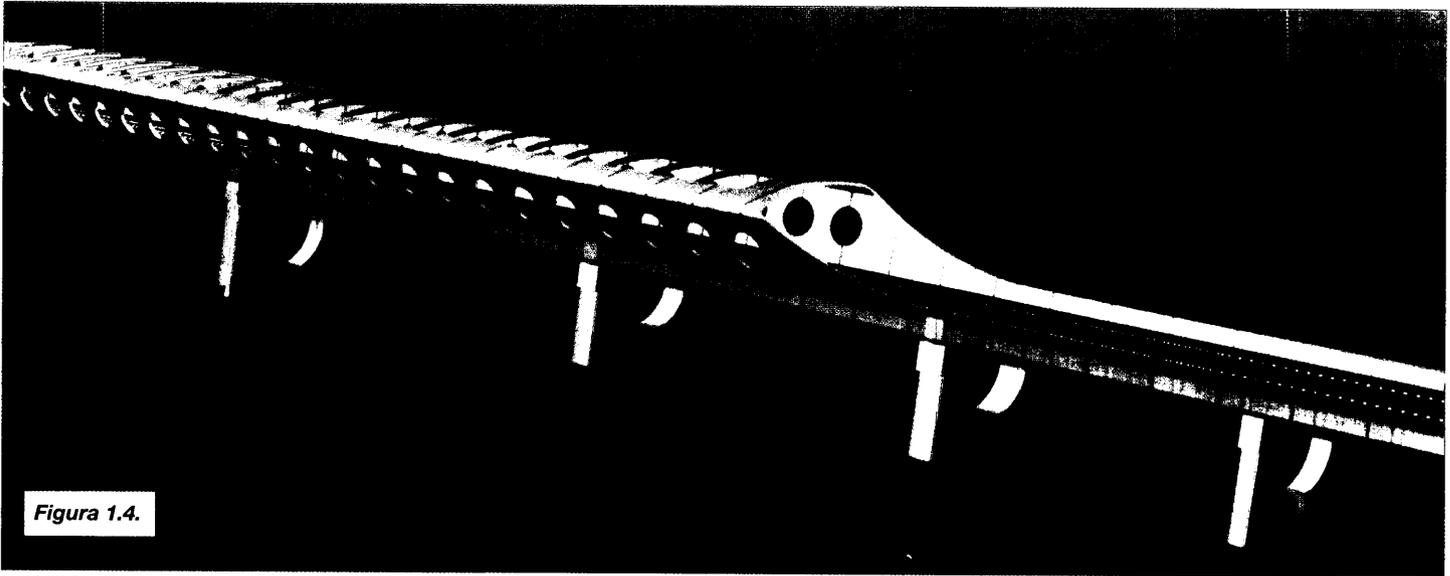


Figura 1.4.

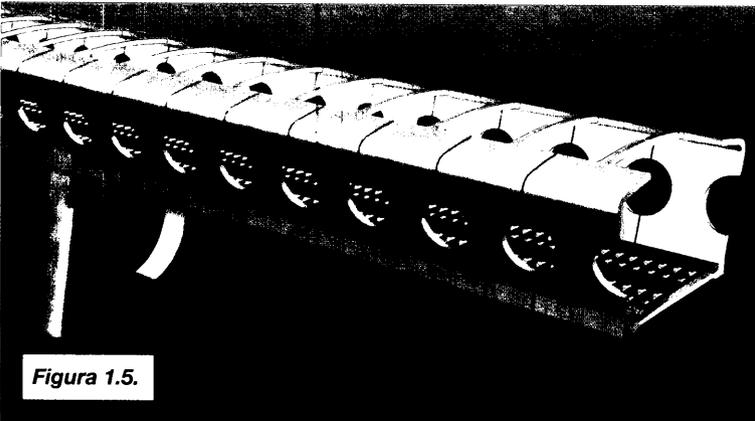


Figura 1.5.

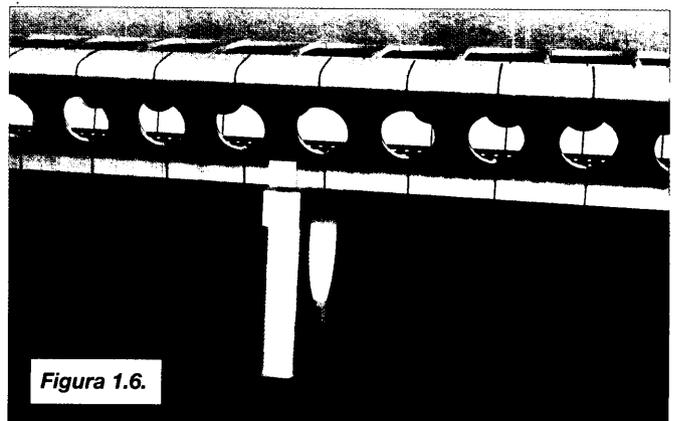


Figura 1.6.



Figura 1.7.

obligatoria cuando, como en este caso, la rasante a la que discurre el puente sobre el río es pequeña.

En el caso de que se hubiese decidido realizar una típica solución resistente bajo las vías, habría sido necesario o bien reducir la luz, como ocurre en la Fig. 1.1. y así reducir el canto necesario, o levantar el terraplén si se quisiera ir a luces que saltan el río de lado a lado, con el correspondiente incremento de coste del terraplén a lo largo de mucha longitud por la poca adaptabilidad que tiene el tren de alta velocidad a los cambios de rasante.

Penetrar dentro de las estructuras tenía además el atractivo, en este caso, de actualizar en hormigón pretensado, la vieja gran celosía metálica de la historia.

Una condición de necesidad funcional, la rasante baja, una condición resistente, el gran canto necesario para salvar 120 m de luz y una actualización de la viga cajón de gran dimen-

sión es lo que ha conducido a la solución elegida que por otro lado se encuentra dentro de proposiciones económicas razonables.

En hormigón, la celosía metálica toma las características de la viga Vierendel. Sus formas son mucho más adecuadas para facilitar los encofrados y su comportamiento resistente es bastante mejor. Existe la opinión de que las vigas Vierendel tienen gran deformación por esfuerzo cortante y por consiguiente concentración de flexiones secundarias junto a los apoyos en las pilas y en sus proximidades. Sin embargo si se trata de una celosía triangulada esa opinión no existe. Y no es verdad. En el caso que nos ocupa los aligeramientos circulares están en el exterior de una hipotética celosía triangulada que se puede desarrollar en su interior de la viga. De manera que la viga Vierendel es más rígida que una hipotética viga triangulada interior, cosa que además, fue la primera aproximación a

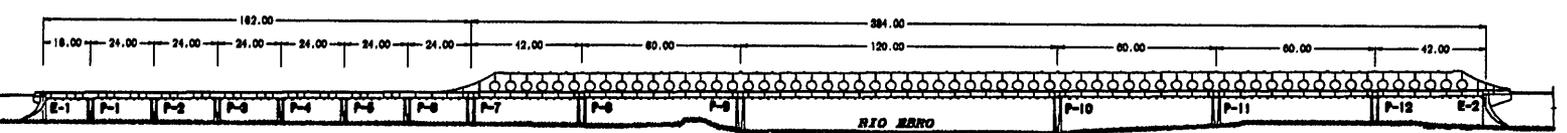


Figura 3.1.a.

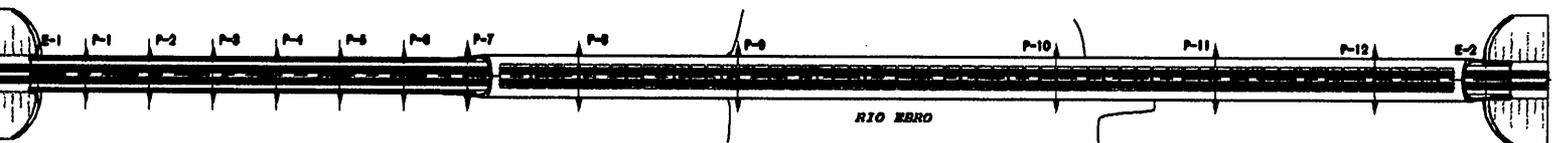


Figura 3.1.b.

este diseño. Simplificar una viga en celosía lineal para poder realizarla en hormigón.

El acceso se realiza con vanos cortos, de 24,00 m de luz y sirve como tramo de desagüe de las grandes avenidas del río Ebro. La estructura resistente no es sino la parte inferior de la gran viga cajón que cruza el río, la cual se convierte en dos vigas laterales que franquean el tren, lo soportan y protegen los alrededores de la contaminación acústica proveniente de la rodadura.

La transición entre una y otra tipología viene automáticamente resuelta con un borde curvo que establece la unión entre las partes. La luz pasa de 24,00 a 42 m y de esta, por medio de un vano de compensación de 60 m, se pasa al gran vano sobre el río de 120 m de luz.

3. DESCRIPCIÓN

Los 546 m de longitud total se dividen en dos zonas. La primera correspondiente al tramo de avenidas, tiene 162 m de longitud y está formada por un vano de 16 m y seis vanos de 24 m. La segunda tiene una longitud de 384 m. Esta zona se

transforma en el gran puente sobre el río, el cual está constituido por seis vanos de 42 m + 60 m + 120 m + 2 x 60 m + 42 m. Ambas zonas se unen entre sí totalmente, sin junta alguna (Figs. 3.1.a y b).

La gran viga Vierendel tiene un canto total de 9,15 m. La sección transversal tiene una forma trapecial (Fig. 3.2). En la parte superior tiene una anchura máxima de 16,56 m. y 12,90 m. en su parte inferior. Las almas están aligeradas con orificios circulares de 3,80 m. de diámetro cada 6,00 m. El espesor varía entre 0,50 m. y 0,60 m. en la zona de apoyos. La losa inferior tiene un espesor que varía desde los 0,30 m. en su unión con las almas hasta los 0,39 m. en el centro. Tiene un conjunto de vigas transversales con un canto de perfil circular separadas 3,0 m. con una sección trapecial de ancho variable desde 0,50 a 0,60 m. En la parte superior del cajón se introducen costillas de alzado circular que siguen la trayectoria de las paredes curvas superiores manteniendo el espesor de éstas. Están situadas cada 6 m. y tienen una anchura de 0,60 m. salvo las situadas sobre las pilas que tienen 1,00 m. Sobre el eje de apoyo en el estribo 2 y en la zona de transición con los vanos de acceso mide 3,30 m.

Todo el tramo de acceso tiene la misma losa inferior que el tramo principal, con el mismo contorno inferior, para que se establezca la continuidad entre ambos de una forma automática. El canto de las vigas laterales es de 2,20 m y su anchura máxima 1,05 m. (Fig. 3.3).

Las pilas están formadas por dos fustes independientes que se obtienen de una sección curvilínea con una cimentación común formada por pilotes de 2,0 m de diámetro cuyo número varía en 10, 6 ó 4 dependiendo que se trate de las pilas del vano de 120 m, 60 ó 24 m respectivamente.

Los estribos están formados por un muro frontal de 14,60 m de longitud y dos aletas curvas de 13,50 m y 19,20 m de longitud en el estribo 1 y 2 respectivamente. Los estribos están cimentados con pilotes de 2,0 m y unidos al parque de fabricación de dovelas.

El tablero se ancla al estribo E2 para resistir las fuerzas horizontales producidas por el frenado y las reacciones de los movimientos de temperatura, fluencia y retracción.

4. ASPECTOS RELEVANTES DE SU CÁLCULO

La particularidad de esta tipología obligó a considerar con detenimiento tanto la metodología como los elementos de cálculo adecuados. Al tratarse de un tablero con una sección no homogénea longitudinalmente, tiene un comportamiento claramente tridimensional que hace imprescindible la utilización de técnicas de elementos finitos. Este comportamiento especial lo provoca la presencia de aligeramientos circulares en las almas así como las costillas superiores discontinuas.

Aunque la técnica de los elementos finitos se encuentra muy consolidada, es una herramienta de cálculo muy costosa

Figura 3.2.

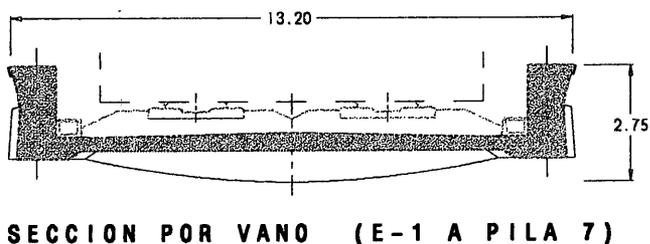
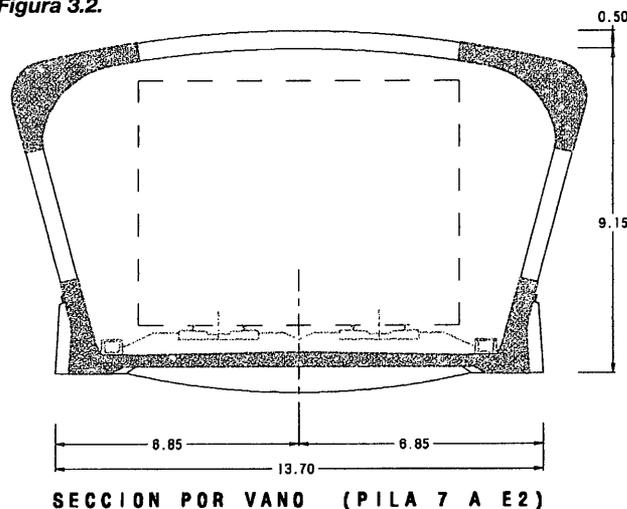


Figura 3.3.

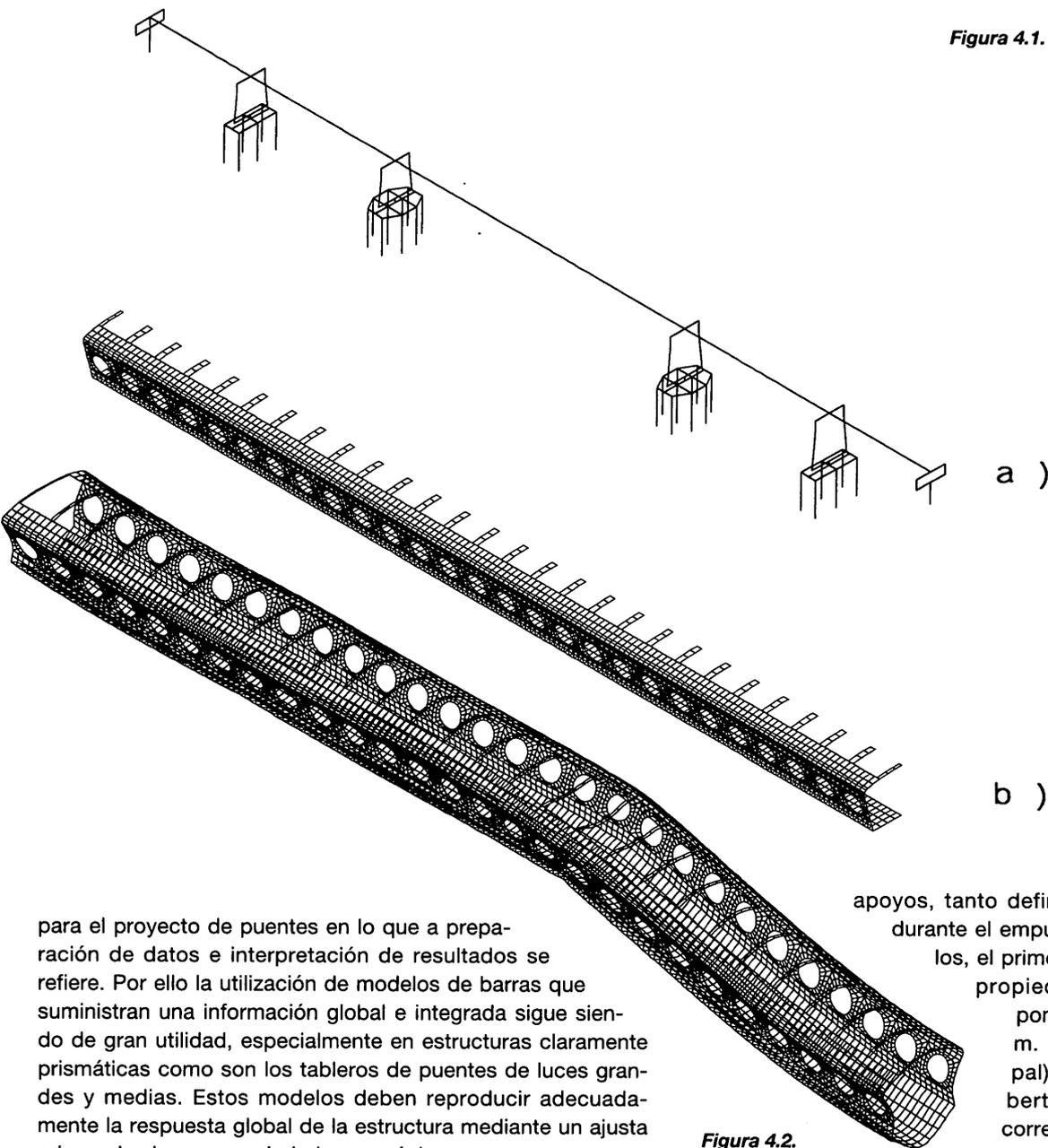


Figura 4.1.

dura pasiva de los nervios de la losa inferior para las hipótesis de carga de servicio y las accidentales de descarrilamiento.

Con los modelos de elementos finitos tridimensionales se calibraron adecuadamente las propiedades mecánicas de las barras del tablero del modelo longitudinal. Así mismo se obtuvo la respuesta resistente de las partes del tablero que no puede obtenerse de un modelo de barras: los esfuerzos en las costillas superiores, el estudio de la concentración de tensiones en los orificios circulares tanto por los efectos globales debido a las cargas exteriores, como los locales por la presencia de

apoyos, tanto definitivos como provisionales durante el empuje. Se utilizaron dos modelos, el primero para la obtención de las propiedades mecánicas, correspondiente a una longitud de 60 m. (un cuarto del vano principal), con 26016 grados de libertad Fig. 4.1.b; el segundo correspondió a un cuarto del tablero completo, con 70000 grados de libertad que, mediante la

para el proyecto de puentes en lo que a preparación de datos e interpretación de resultados se refiere. Por ello la utilización de modelos de barras que suministran una información global e integrada sigue siendo de gran utilidad, especialmente en estructuras claramente prismáticas como son los tableros de puentes de luces grandes y medias. Estos modelos deben reproducir adecuadamente la respuesta global de la estructura mediante un ajuste adecuado de sus propiedades mecánicas como se comenta más adelante.

Para el estudio del puente se utilizaron dos tipos de modelos: los modelos de barras y modelos de elementos finitos con elementos tipo lámina. Se utilizaron dos modelos de barras, uno para el estudio longitudinal y otro para el transversal. En el modelo longitudinal, Fig. 4.1.a, se estudió de forma conjunta el tablero, los aparatos de apoyo, las pilas, las cimentaciones y los estribos. En este modelo se estudiaron los esfuerzos globales para todas las hipótesis de carga, tanto en servicio como durante la construcción. Se dimensionó y ajustó el pretensado longitudinal. Con los modelos de barras para el estudio transversal se dimensionó tanto el pretensado como la arma-

Figura 4.2.

combinación de hipótesis simétricas y asimétricas permitió, estudiar los diferentes aspectos reseñados (Fig. 4.2.).

El ajuste de las propiedades mecánicas se realizó considerando la respuesta resistente global del tablero equivalente al de una pieza prismática homogénea con una importante deformación por esfuerzo cortante. Comparando los desplazamientos y giros de la estructura real con la de la pieza prismática homogénea para hipótesis simples de cargas, se obtuvieron las correspondientes áreas de cortante, inercias a flexión y la inercia a torsión. Esta equivalencia de desplazamientos y giros implica, en un comportamiento elástico, una

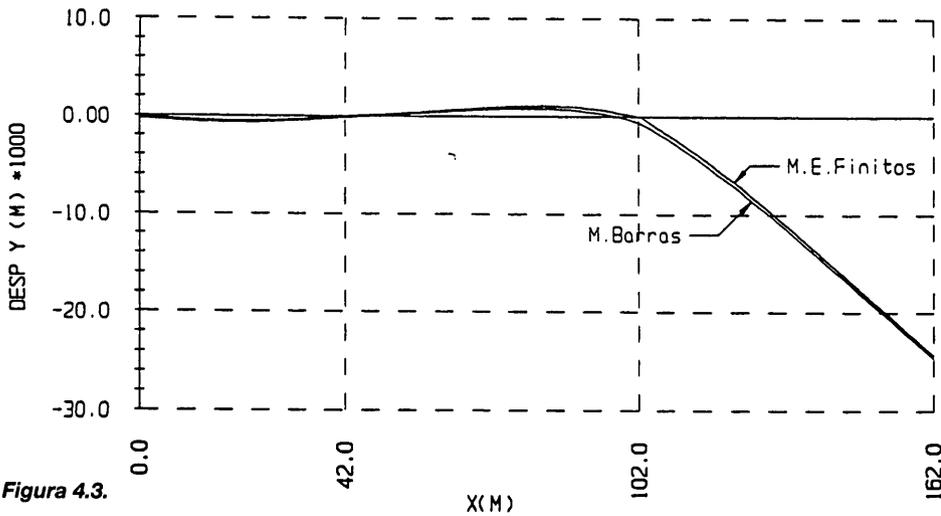


Figura 4.3.

equivalencia de la energía de deformación almacenada. Los resultados del ajuste fueron en determinados casos muy espectaculares, como es el caso de los desplazamientos de la máxima ménsula durante el empuje, Fig. 4.3. en el que el modelo de barras y el de elementos finitos se ajustan perfectamente, en ambos casos se aprecia la discontinuidad angular en el apoyo debido a la deformación por cortante.

5. CONSTRUCCIÓN

El sistema de construcción previsto para el tablero es el de empuje desde ambos estribos construyendo dos semipuentes independientes que se unen en el centro por medio de una do-

vela de cierre (Fig. 5.1.). Se estudió la posibilidad de empujar todo el tablero desde el estribo E1, utilizando una torre de atirantamiento provisional. Sin embargo la evaluación económica tanto del sistema de atirantamiento como del pretensado complementario indicó que era más favorable la construcción de un segundo parque de fabricación. Así mismo el empuje desde ambos estribos permite reducir claramente el plazo de construcción.

El parque de fabricación está adosado y a continuación del estribo. Tiene dos zonas bien diferenciadas: la zona de fabricación propiamente dicha, de 19.50 m. de longitud, donde se instalan las suelas, moldes exteriores e interiores y la zona de transición hacia el estribo, la cual es necesaria para la estabilidad durante el empuje.

Para facilitar las operaciones de llegada a las pilas se dispone una nariz de lanzamiento de 24 m. de longitud que se ancla al dintel. Para garantizar la estabilidad durante las primeras fases de empuje se construye un apoyo provisional consistente en una pila-pilote en el centro del primer vano.

Las dovelas del tablero tienen una longitud de 18 m, 15 ó 12 m dependiendo de su posición. El pretensado de las vigas transversales así como parte del pretensado longitudinal se tesa en el parque mientras que el pretensado transversal de las almas y el restante longitudinal se tesan una vez empujado el tablero. ●

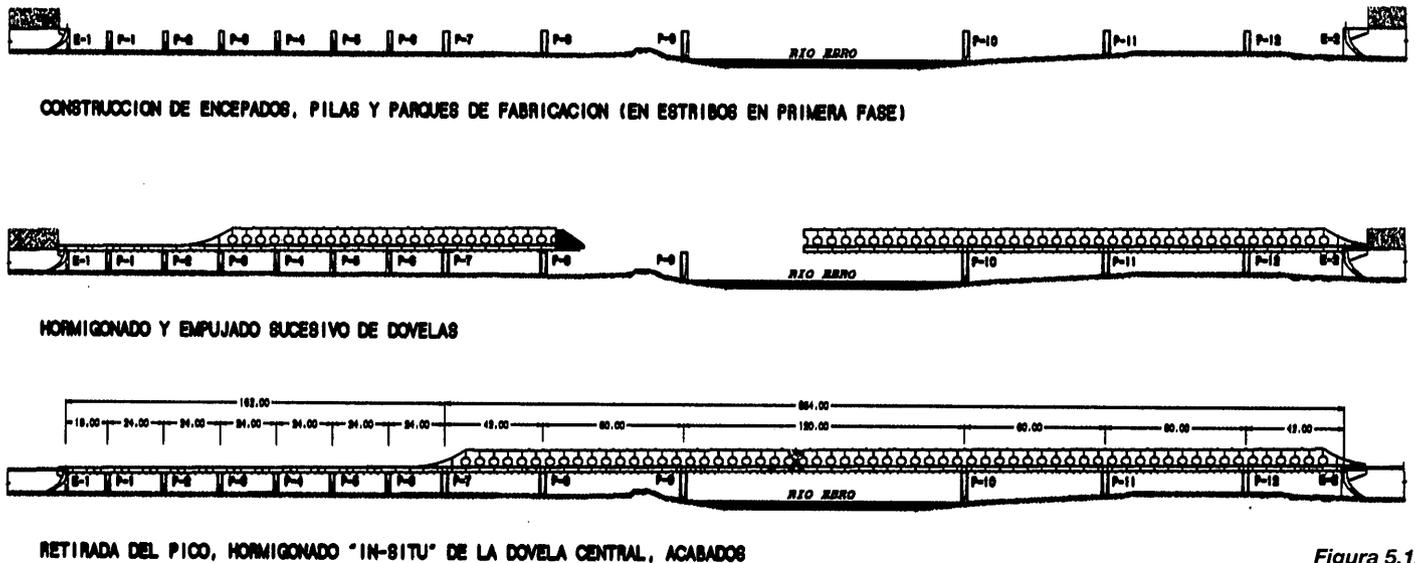


Figura 5.1.