

TABLEROS DE CELOSÍAS MIXTAS COMPOSITE TRUSS BRIDGE DECKS

HUGO CORRES PEIRETTI. Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ALEJANDRO PÉREZ CALDENTEY. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FHECOR. Ingenieros Consultores

RESUMEN: En este artículo se analizan problemas de concepción, proyecto y construcción de estructuras de tableros de celosías mixtas. En lo referente a la concepción se hace especial hincapié en el diseño de los nudos de este tipo de estructuras, presentando distintas soluciones utilizadas para abordar este problema en puentes recientemente construidos en España. En lo referente al proyecto se destaca la importancia en este tipo de estructura de la interacción axil-momento-cortante, especialmente en el cordón superior que está sometido a fuertes flexiones locales debidas al tráfico. Igualmente, en lo relativo al diseño, tomando el ejemplo del puente de Cavalls en Valencia, se hacen algunas reflexiones sobre la combinación de estructuras de celosía con pretensado exterior y los criterios que deben seguirse para proyectar la fuerza de tesado en este tipo de estructuras, que son de alguna forma casos intermedios entre un pretensado exterior de una sección cajón de hormigón y el pretensado de un puente atirantado. Por último se analizan los distintos procedimientos constructivos que se han utilizado en estructuras de celosía, destacando las grandes posibilidades constructivas que permiten hoy en día las técnicas modernas.

PALABRAS CLAVE: ESTRUCTURAS MIXTAS, CELOSÍAS, PRETENSADO EXTERIOR

ABSTRACT: This article analyzes the problems of detailing, design, and construction of composite truss decks. With regards to detailing special emphasis is placed on the form of joints employed in this type of structure and a description is given of several different solutions which have been used to tackle this problem in recently built Spanish bridges. Moving on to the design aspects, the article underlines the importance of the axial-moment-shear interaction in composite trusses, particularly in the upper chord which is subject to heavy local bending due to traffic loads. The article also considers, in design terms, the example of the Cavalls Bridge in Valencia and several considerations are made regarding the combination of truss structures with external prestressing and the criteria which should be followed to design the prestress force in this type of structure, which to a certain extent falls midway between the external prestressing of a concrete box sections and the prestressing of a cable stayed bridge. The article concludes with an analysis of the different construction procedures that have been employed in truss structures and emphasises the many building possibilities that have been opened up today by modern technique.

KEYWORDS: COMPOSITE STRUCTURES, TRUSSES, EXTERNAL PRESTRESSING

1. INTRODUCCIÓN

La tipología de los tableros con celosías mixtas no es nueva. Se trata, como en tantos otros casos, de una tipología que ha sido rescatada aprovechando las posibilidades tecnológicas actuales.

La celosía, como tipología estructural, constituye una invención muy ingeniosa. Es la manera en que se ordenan y enlazan entre sí elementos lineales para salvar luces mucho mayores que las que podría salvar cada uno de sus elementos individualmente.

1. INTRODUCTION

Composite truss bridge decks are not something entirely new but, and as in so many other cases, are based on established structural forms which take advantage of modern technological possibilities.

In terms of structural form, the truss is a very ingenious invention. It serves as a way of organizing and connecting lineal elements in order to cover spans which are much larger than the length of each of the individual elements involved.

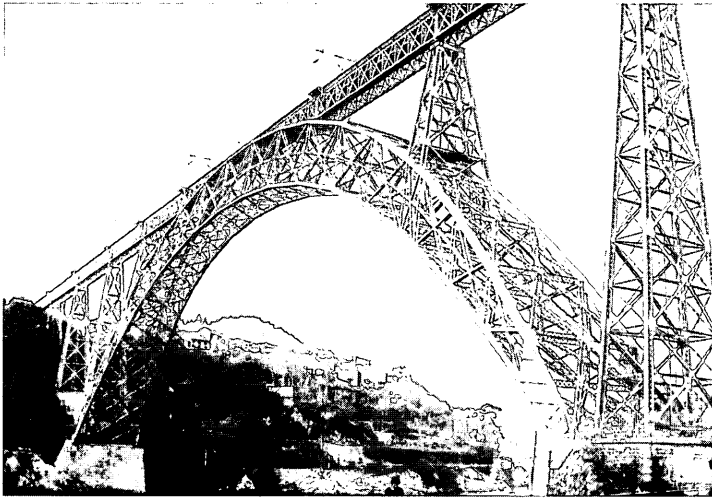


Figura 1. Puente de Garabit (1884)/Figure 1. Garabit Bridge (1884).

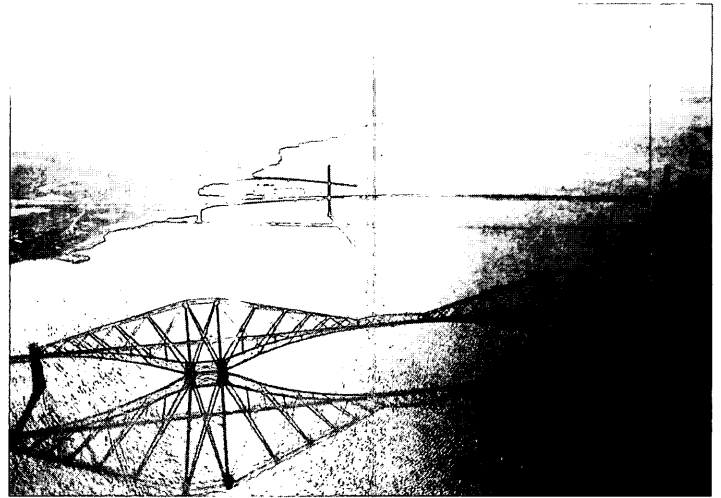


Figura 2. Puente de Firth of Forth (1890)/Figure 2. Firth of Forth Bridge (1890).

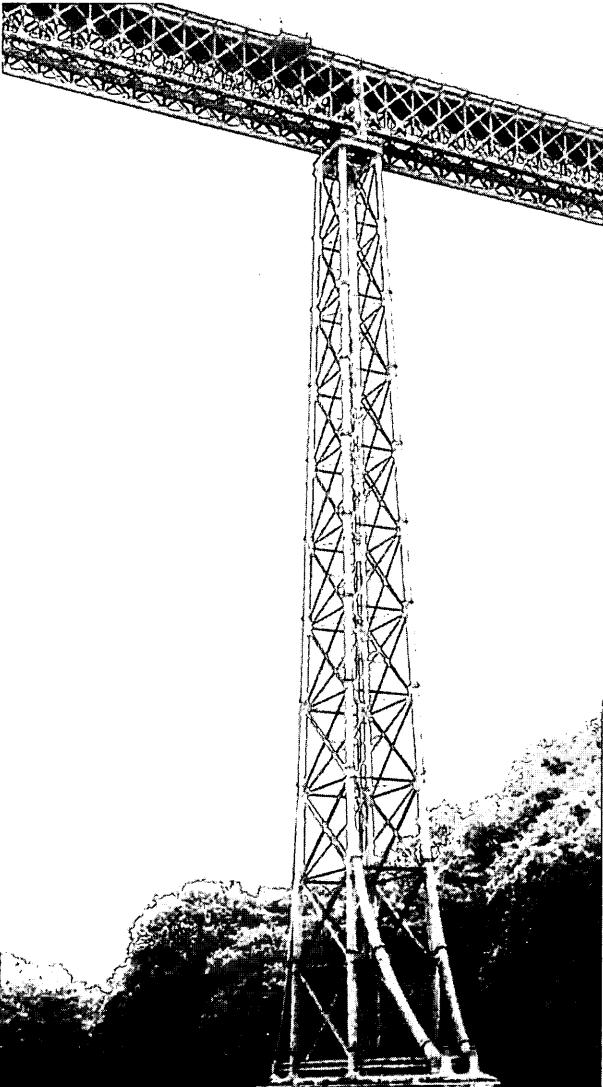


Figura 3. Pilas de celosía metálica del viaducto de Moreaux (1869)
Figure 3. Steel truss piers to the Moreaux viaduct (1869).



Figura 4. Puente de Tordera. Celosía mixta de canto variable. Torroja (1939)
Figure 4. Tordera Bridge. Composite truss of variable depth. Torroja (1939).

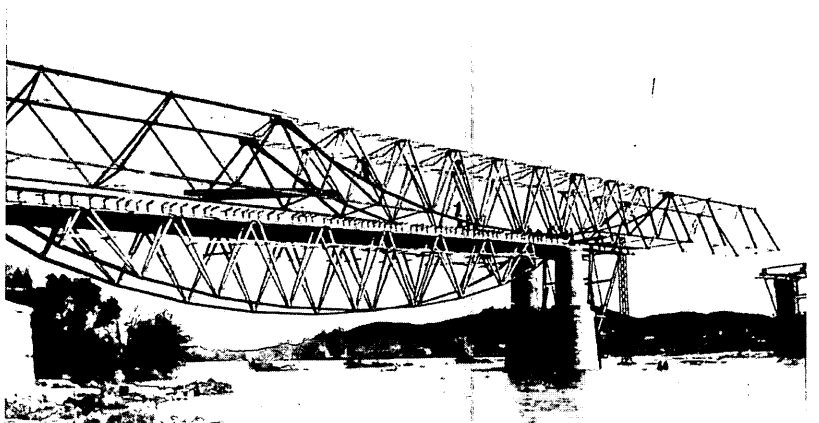


Figura 5. Puente de Tordera. Empuje de la celosía metálica.
Figure 5. Tordera Bridge. Launching of steel truss.

Durante la construcción de la línea de ferrocarril americana de costa a costa se utilizaron celosías de madera de una forma intuitiva. El uso racional de las celosías vino después de que Culmann en el siglo XIX escribiera su mecánica gráfica.

Después de este período se construyeron los principales puentes de celosía de finales del siglo XIX, también vinculados al ferrocarril. El puente de Garabit (1884), de Koechlin, o el Firth of Forth (1890), de Baker y Fowler, son dos de los ejemplos más extraordinarios.

Las celosías se han utilizado también, tal como lo muestran los viaductos construidos para el ferrocarril en el macizo central francés, para la construcción de pilas.

Las celosías mixtas tampoco son nuevas en España. Torroja proyectó y construyó, en 1939, el puente de Tordera, primero, y el puente de la Muga, después. Ambos puentes son celosías mixtas, con geometría diferente, que se construyeron empujando la celosía metálica, primero, y hormigonando, luego, la losa de hormigón.

En el puente de Tordera, Torroja utilizó vanos isostáticos con una celosía de canto variable, elípticamente. De esta forma, se primaba la optimización estructural frente al procedimiento constructivo y Torroja tuvo que diseñar una estructura auxiliar para su empuje.

En el puente de la Muga Torroja utilizó vanos, también isostáticos, de canto constante. Durante el empuje, la celosía metálica era continua. Una vez empujada, se eliminaba la continuidad.

Años después de estas dos obras, en 1958, Torroja escribió un libro autobiográfico [2], recientemente traducido al castellano con motivo del aniversario del centenario de su nacimiento [3], en el que reflexionaba sobre los tableros de celosías mixtas, planteando el concepto de la doble acción mixta, muy utilizada en España desde hace años, y pronosticaba el enorme futuro de tendían este tipo de puentes.

La experiencia ha demostrado que este tipo de obras se



Figura 6. Puente de la Muga. Celosía mixta de vanos isostáticos de canto constante. Torroja (1939)
Figure 6. Muga Bridge. Single span composite truss of constant depth. Torroja (1939).

the concreting of the deck slab.

In the Tordera bridge, Torroja employed single spans with trusses of variable depth, placing more emphasis on structural optimization than on erection procedure, which made it necessary for Torroja to design an auxiliary structure to launch the trusswork.

In the Muga bridge, Torroja used single spans of constant depth. The steel truss was continuous during launching but this continuity was eliminated once the structure had been set in place.

In 1958 and several years after the construction of these two bridges, Torroja published *The Structures of Eduardo Torroja: An Autobiography of Engineering Accomplishment* [2], which has recently been translated into Spanish on the centenary of his birth [3]. In this book he reflects on composite truss decks, and considers the concept of composite double action, which has been widely employed in Spain for many years now, and forecasts the enormous future possibilities of this type of bridge.

Experience has shown that this type of structure may be

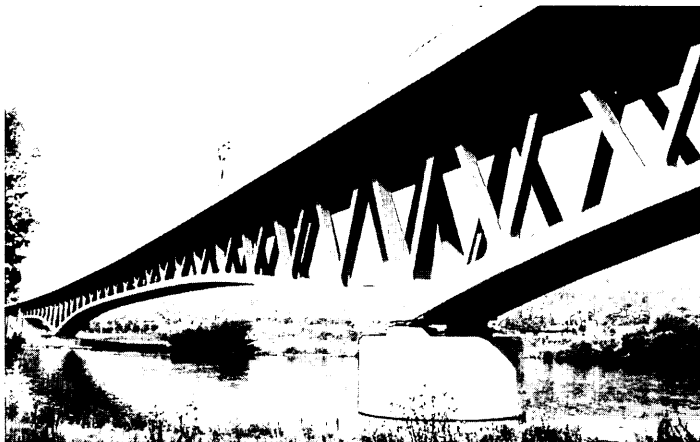


Figura 7. Puente de ferrocarril sobre el río Main en Nantenbach. Torroja (1939)
Figure 7. Railway bridge over the Main in Nantenbach. Torroja (1939).

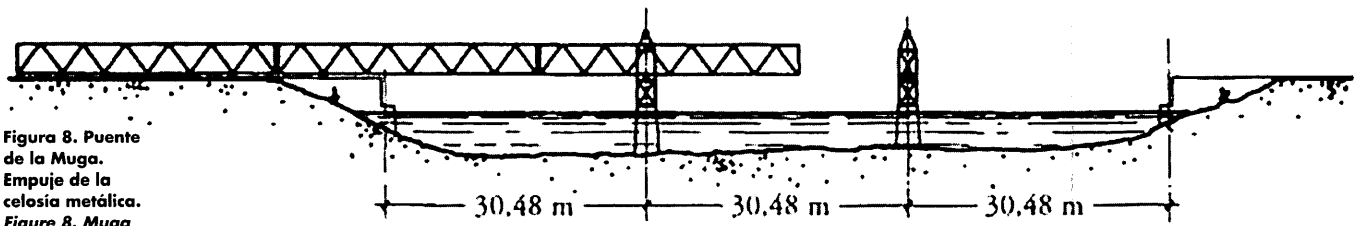


Figura 8. Puente de la Muga. Empuje de la celosía metálica. Figure 8. Muga Bridge. Launching of steel truss.

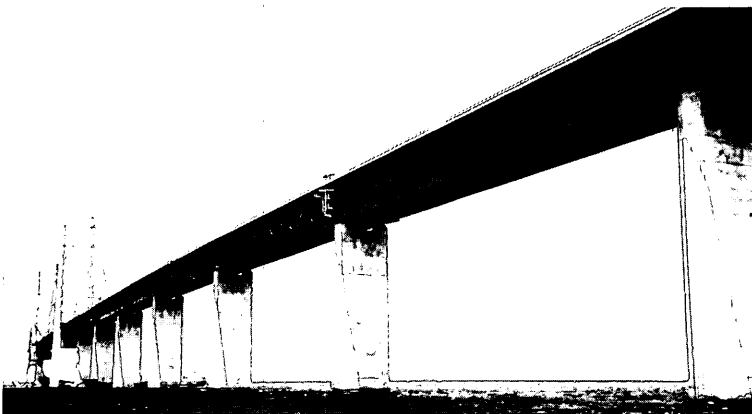
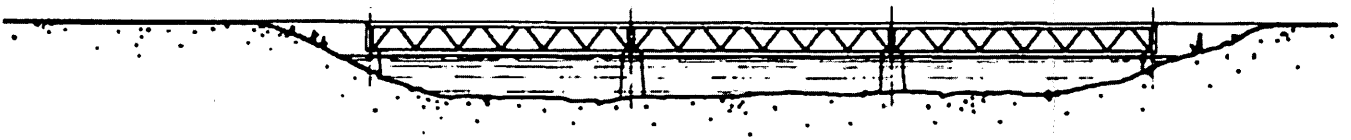
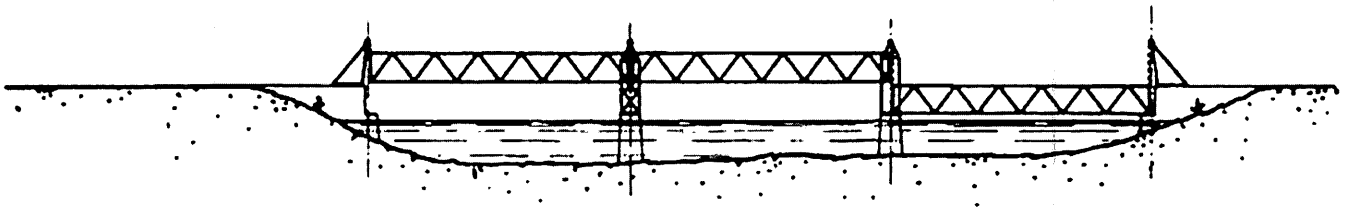
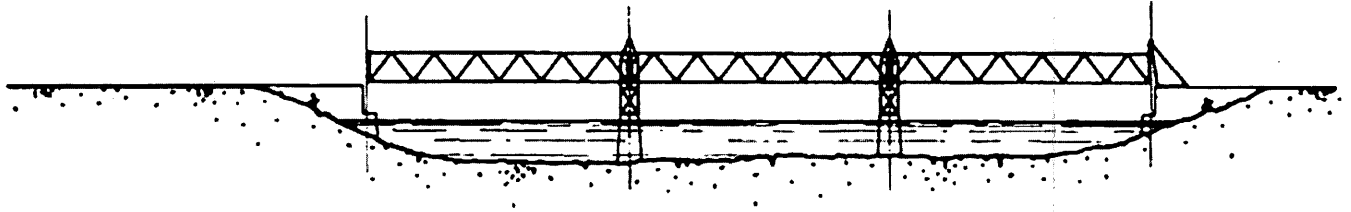


Figura 9. Puente de Öresund/ Figure 9. Öresund Bridge.



Figura 10. Puente sobre el río Sil/ Figure 10. Bridge over the River Sil.

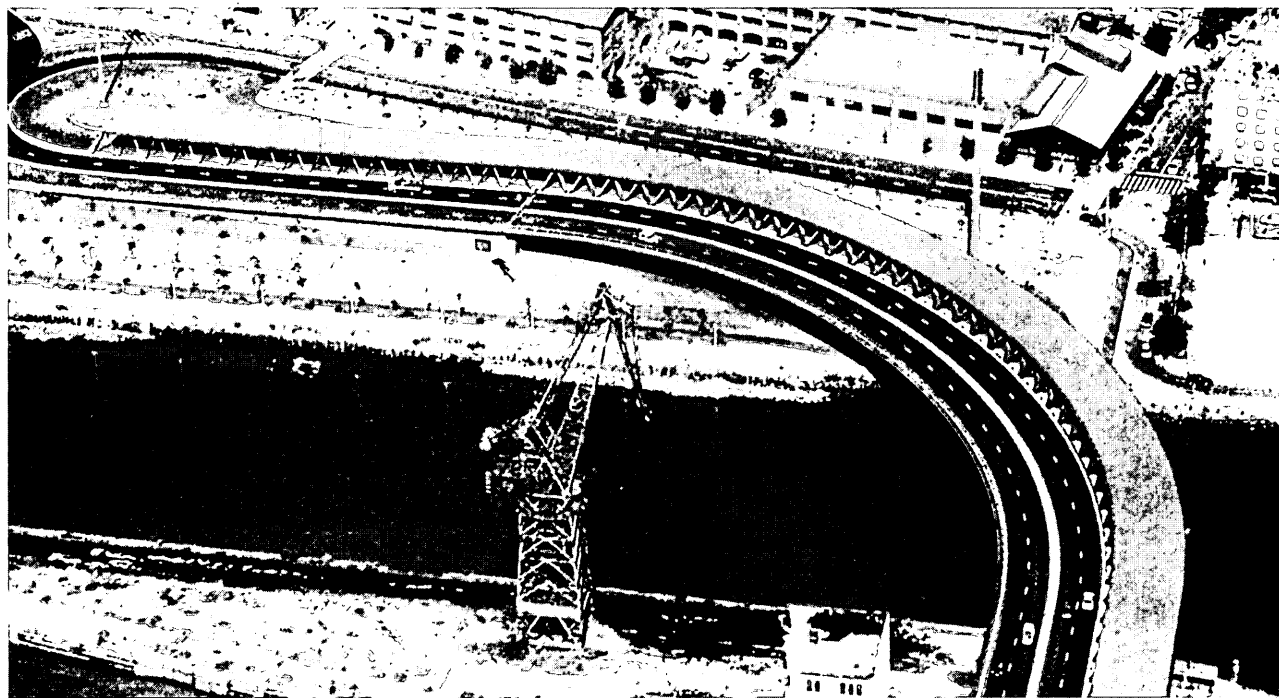


Figura 11.
Puente de Euskalduna.
Figure 11.
Euskalduna Bridge.

puede construir con una viga continua sobre varias pilas y, de hecho, si tuviera que diseñar otro puente similar, adoptaría este método. Simplemente reforzaría con hormigón la cabeza inferior metálica en correspondencia con las pilas, donde está comprimida. El peso de este hormigón adicional supondría muy pequeños momentos flectores.

El ahorro en coste que se obtiene de este tipo de estructura mixta llega a ser muy considerable. Por supuesto, cada caso es único, pero en el Puente Tordera (a pesar de ser mi primer proyecto de este tipo) se estimó que el diseño supuso un ahorro del 25 por ciento sobre la práctica habitual. En aquel entonces, no me atreví a especificar una viga continua de estructura mixta de acero y hormigón. Sin embargo, el comportamiento satisfactorio de tales estructuras desde 1947 justifica ahora su construcción incluso con mayores luces. Las estructuras de Eduardo Torroja (1999).

En estos últimos años las celosías han renacido con fuerza, utilizando las nuevas posibilidades tecnológicas disponibles a nivel de materiales, procesos, etc.

Algunos ejemplos internacionales conocidos, construidos recientemente, son el puente de ferrocarril sobre el río Main en Nantenbach (uno de los primeros de esta nueva generación de puentes con tablero de celosía) y el puente de Öresund, de carretera y ferrocarril.

En España también se han construido puentes con esta tipología. Entre los puentes de canto constante pueden citarse el puente de la Navillar de Ibor [4], en Cáceres, los viaductos

built with a continuous beam set on several piers and, in fact, if I had to design another similar bridge I would adopt this method. I would simply reinforce the lower steel face with concrete to correspond with the compressed area at the piers. The weight of this additional concrete would only lead to very small bending moments.

The financial savings obtained by this type of composite structure would be very large. Obviously, every case is different, but in the Tordera Bridge –and in spite of being my first project of this type– it was estimated that the design led to 25% savings with regards to normal practice. At that time I did not dare specify a continuous beam of composite steel and concrete structure. However, the satisfactory performance of these structures since 1947 now justifies their construction even with larger spans. *The structures of Eduardo Torroja (1999)*

In recent years the truss has seen a resurgence as a result of new technical possibilities provided by material, processes, etc.

Some well known international examples of recent construction include the railway bridge over the river Main in Nantenbach – one of the first of this new generation of truss deck bridges – and the Öresund rail and road bridge.

Bridges of this type have also been constructed in Spain. In terms of bridges of constant depth it is possible to mention the Navillar de Ibor bridge [4] in Cáceres, the Costa Martina and Ric viaducts [5] in Gerona, or the Neira

de Costa Martina y del Ric [5], en Gerona, o los viaductos del Neira [6] en la Autovía del Noroeste. Ejemplos de puentes más modestos en luces y contruidos con perfiles tubulares son el Puente sobre el Barranco de Torrent [7], en Valencia, o el Puente sobre el Cruce Portal de Castilla – Av de Gastéiz [1], en Vitoria. Entre los puentes de luces importantes y canto variable están los viaductos del Sil [8], en Ponferrada, o el del embalse de Contreras [9] en la Autovía de Valencia. Por último, debe citarse un puente muy singular, también con una celosía mixta atípica, el Puente de Euskalduna, en Bilbao [1].

En este trabajo se analizan distintos aspectos relativos a la concepción, proyecto y construcción de este tipo de puentes.

2. ASPECTOS RELATIVOS A LA CONCEPCIÓN

Los tableros mixtos, en general, han permitido resolver una serie de problemas cuya solución estaba reservada hasta ahora a otro tipo de materiales, como el hormigón pretensado. En efecto, los tableros mixtos presentan ventajas constructivas que hacen competitivas las soluciones de este tipo. Dentro de este auge en la utilización de tableros mixtos, las celosías se han incorporado con fuerza en distintos rangos de luces.

Desde el punto de vista de la concepción, para luces importantes, las celosías presentan la ventaja fundamental de su transparencia frente a otras soluciones. Para los cantos requeridos en el caso de tableros con más de 100,00 m de luz, las soluciones en celosía constituyen una alternativa evidente a soluciones cajón o de vigas. En contrapartida, cuan-

viaducts[6] on the north-west motorway. Examples of more modest bridges in terms of span and constructed with tubular trusses may be seen in the Bridge of the Barranco de Torrent [7], in Valencia, or the Castilla – Av de Gastéiz Bridge [1] in Vitoria. Among the large span bridges of variable depth one may refer to the Sil viaduct [8] in Ponferrada, or the bridge over the Contreras reservoir [9] on the Valencia motorway. Mention should also be made of the unique composite truss Euskalduna bridge in Bilbao [1].

In this paper the authors will analyze different aspects regarding the concept, design and construction of this type of bridge.

2. CONCEPT

Composite decks have generally managed to solve a whole host of problems which were previously considered to be the sole reserve of other types of materials such as prestressed concrete. Composite decks have clear construction advantages which make them competitive in these types of solutions. This upsurge in the employment of composite decking has also been accompanied by the incorporation of trusses for a whole range of spans.

In terms of initial concept, the composite truss bridge deck has the main advantage of transparency over other composite solutions. In decks of over 100 metre span, a truss assembly is a clearly viable alternative to the box solution. However, with smaller spans and

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS PRINCIPALES Y TIPO DE CELOSÍA DE DISTINTOS PUENTES RECIENTEMENTE CONSTRUIDOS EN ESPAÑA
TABLE 1. MAIN GEOMETRICAL CHARACTERISTICS AND TRUSS TYPE OF RECENTLY CONSTRUCTED BRIDGES IN SPAIN

Puente/Bridge	Luces/Spans (m)	H (m)	Achura/Width (m)	L/h	Tipo de celosía/Truss type
Navalvillar	50+100+50	5.85	10.00	17.10	Doble/Double Warren
Costa Martina	60.6+121.2+60.6	7.15	13.60	17.00	Doble/Double Warren
Ric	48.7+97.5+48.7	5.75	13.60	17.00	Doble/Double Warren
Neira I	57.25+114.5+57.25	6.60	13.10	17.30	Doble/Double Warren
Neira II	95.0+95.0	6.60 10.00	13.10 13.20	14.40 17.00	Doble/Double Warren
Sil	93.5+170.0+93.5	4.60 1100	13.20	42.50 17.00	Warren
Contreras	93.5+1.70.0+93.5+66.0	4.00		42.50	Warren
Agueda	115.0	7.20 4.00	11.50	16.00 28.80	Warren

do las luces son modestas y, consecuentemente, los cantos también, una celosía difícilmente puede resultar adecuada y, en este caso, las secciones de alma llena resultan más interesantes.

Un aspecto importante en el encaje de este tipo de soluciones es la elección del tipo de celosía y de sus proporciones. La tipología de celosía más frecuentemente utilizada es la Warren o doble Warren.

Para anchos normales de tablero, próximos a los 12.00 o 13.00 m, se utilizan generalmente dos celosías por tablero con relaciones canto/luz próximas a 1/17 para canto constante y 1/17 en apoyos y 1/30 o 1/40 en centro de vano.

Otro aspecto importante es la longitud de las barras. En general, esta variable está condicionada por distintos aspectos, dependiendo si se trata de barras del cordón superior o inferior. Las barras del cordón superior, generalmente están mucho más condicionadas porque a los esfuerzos generales de la celosía hay que añadir los esfuerzos locales de la carga del tablero. En cuanto a las barras del cordón inferior, hay que tener en cuenta los esfuerzos globales de la celosía y los esfuerzos que se pueden producir, en caso de celosías empujadas, durante el empuje.

En la tabla 1 se muestran las características principales de algunos de los puentes recientemente construidos en España.

En la figura 12 se puede ver la celosía del viaducto Costa Martina, de canto constante y resuelta con una doble Warren, y en la figura 13 la celosía de Puente sobre el río Sil, de canto variable y resuelta con una celosía Warren. En ambos casos las celosías fueron empujadas. En ambos casos la longitud de las barras del cordón superior e inferior son similares, entre 7.00 y 8.00 m.

Otro aspecto importante es el tipo de barra adoptado y la forma de resolver los nudos. En la figura 14 se muestran las soluciones utilizadas por Torroja para sus puentes mixtos. Las dos tipologías más frecuentemente utilizadas son: perfiles laminados o armados o tubos

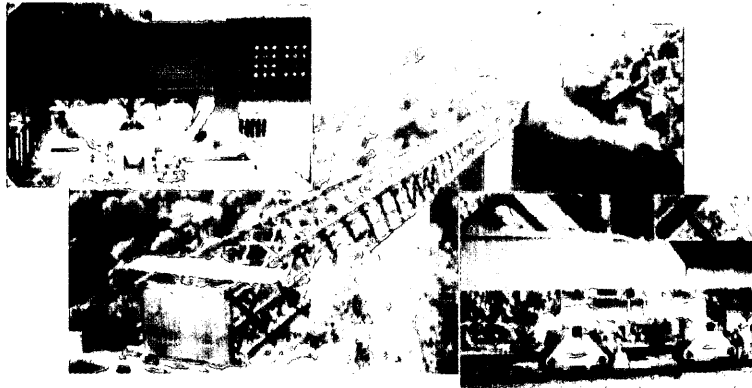


Figura 12. Celosía del Viaducto Costa Martina.
Figure 12. Truss to the Costa Martina viaduct.

subsequently smaller deck depths, a truss solution is barely adequate and here it is more logical to employ web girders.

One important aspect in the acceptance of these solutions is the selection of truss type and the proportions of the same. The most frequently employed truss type today being the Warren or double Warren truss.

For normal deck widths of around 12 or 13 metres, two trusses are generally employed per deck with depth/span ratios of around 1/17 for constant depth and 1/17 at supports and 1/30 or 1/40 in the span.

Another important aspect is the length of the members. This variable is generally conditioned by different aspects, depending on whether they be upper or lower chords. The members of the upper chord are generally much more conditioned as in addition to the overall stress of the truss it is necessary to add the local stresses imposed by the deck loading. With regards to the bottom chord element, it is necessary to consider the global stresses of the truss and the stresses that may be incurred during launching in the case of launched trusses.

Table 1 shows the main characteristics of several Spanish bridges of recent construction.

Figure 12 shows the constant depth, double Warren truss employed in the Costa Martina viaduct and in figure 13, the variable depth Warren truss employed in the Bridge over the River Sil. In both cases the trusses were launched and the length of the upper and bottom chord members were similar and set between 7 and 8 metres.

Another crucial aspect is the type of member and the manner in which the joints are made between the same. Fig. 14 shows three solutions employed by Torroja in his composite bridges. The two most commonly employed types of members are: rolled or reinforced sections or rolled or reinforced tubes. In both



Figura 13. Celosía del Puente sobre el río Sil.
Figure 13. Truss on the Bridge over the River Sil.

TABLA 2. TIPOS DE BARRAS UTILIZADAS EN DISTINTOS PUENTES RECIENTEMENTE CONSTRUÍDOS EN ESPAÑA
TABLE 2. SECTION TYPES EMPLOYED IN RECENTLY CONSTRUCTED BRIDGES IN SPAIN

Puente/Bridge	Luces/Span (m)	Tipología barras/Section type	Tipo de acero/Steel
Navalvillar	50+100+50	Doble/Double T	TIPO CORTEN
Costa Martina	60.6+121.2+60.6	Doble/Double T	
Ric	487+97.5+48.7	Doble/Double T	
Neira I	57,25+114.5+57.25	Doble/Double T	
Neira II	95.0+95.0	Doble/Double T	
Sil	93.5+170.0+93.5	Cajón/Box	
Contreras	93,5+1.70.0+93.5+66.0	Cajón/Box	
Agueda	115.0	Cajón/Box	

laminados o armados. En ambos casos los nudos presentan ventajas e inconvenientes.

En la tabla 2 se indican los tipos de barras utilizadas en algunos de los puentes recientemente construidos en España.

En las figuras 15 y 16 se muestran las barras y nudos del Viaducto Costa Martina. En este caso se han utilizado perfiles. Los nudos elaborados en taller son soldados, mientras que las uniones realizadas en obra son atornilladas.

Cuando se utilizan perfiles, normalmente, éstos son armados. Algunas veces es posible utilizar perfiles laminados si se consiguen en el mercado perfiles de igual canto y diferentes características mecánicas. En general las soluciones de los nudos, en este caso, son más sencillas.

En la figura 17 se muestra el despiece de las barras y nudos utilizados en el Puente sobre el río Sil. En este caso las barras son de sección transversal cajón, con nudos con cartelas y todas las uniones son soldadas. Desde el principio se pensó en el proyecto de unas barras que se construyeran en taller y que, fácilmente, pudieran ser transportadas a obra donde se previó el ensamblaje de la estructura. Para ello, los nudos se plantearon con unas cartelas de mayor espesor, y por lo tanto mayor capacidad resistente, para que a través de ellas se pudieran pasar todos los esfuerzos de las diagonales, sin necesidad de complicar extraordinariamente el nudo.

En la figura 18 se muestran las barras y nudos del Puente sobre el río Sil durante el ensamblaje en obra.

cases the joints have their respective advantages and disadvantages.

Table 2 shows the type of steel section employed in recently constructed bridges in Spain

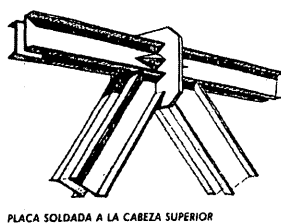
Figures 15 and 16 show the section members and joints employed in the Costa Martina viaduct. The workshop connections are all welded while the joints carried out in-situ are all bolted.

When using steel profiles, these are usually built by using welded plates, though it is sometimes possible to employ rolled steel sections when it is possible to obtain sections of identical depth and different mechanical characteristics on the market.

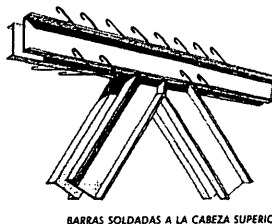
Figure 17 shows the arrangement of the members and joints employed in the bridge over the River Sil. In this case the members are of box section with angle brackets and welded joints. The members were considered to be workshop manufactured from the very outset, this enabling ease of transport to site prior to in-situ assembly. As such, the connections were designed as thick angle brackets with greater strength capacity which would then absorb all the stresses of the diagonals without over complicating the joint.

Figure 18 shows the members and joints employed in the bridge over the River Sil during assembly on site.

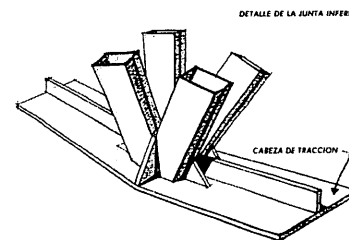
Figura 14.
Tipos de barras y nudos utilizados por Torroja en sus puentes de celosías mixtas.
Figure 14.
Types of members and joints employed by Torroja in his composite truss bridges.



PLACA SOLDADA A LA CABEZA SUPERIOR



BARRAS SOLDADAS A LA CABEZA SUPERIOR



DETALLE DE LA JUNTA INFERIOR

CABEZA DE TRACCION

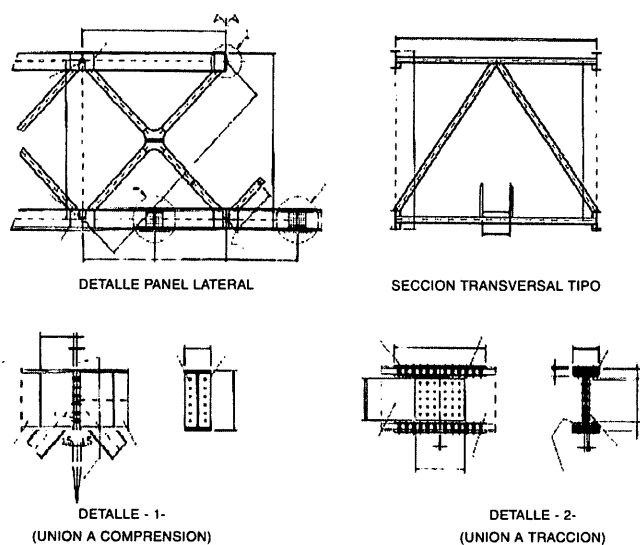


Figura 15. Nudos y barras del Viaducto Costa Martina.
Figure 15. Members and joints employed in the Costa Martina viaduct.

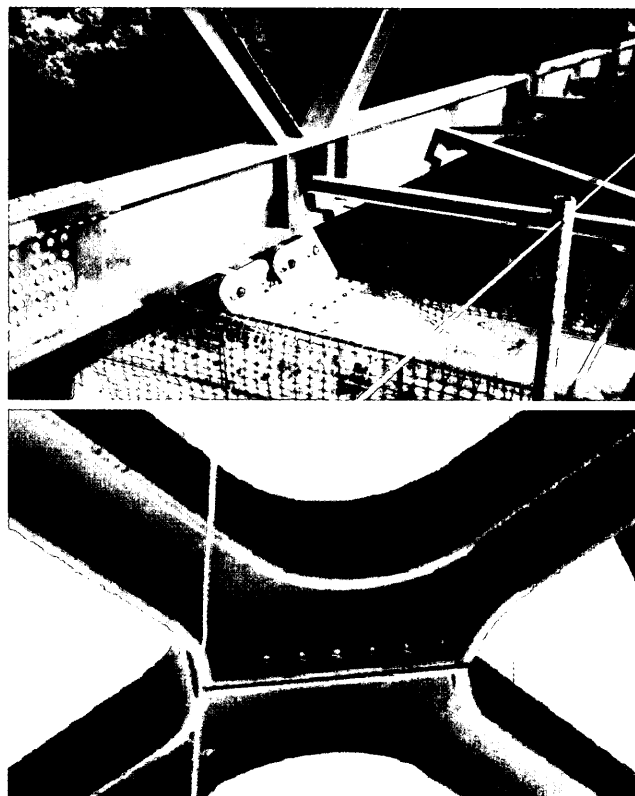


Figura 16. Nudos soldados y atornillados. Viaducto Costa Martina.
Figure 16. Welded and bolted joints. Costa Martina viaduct.

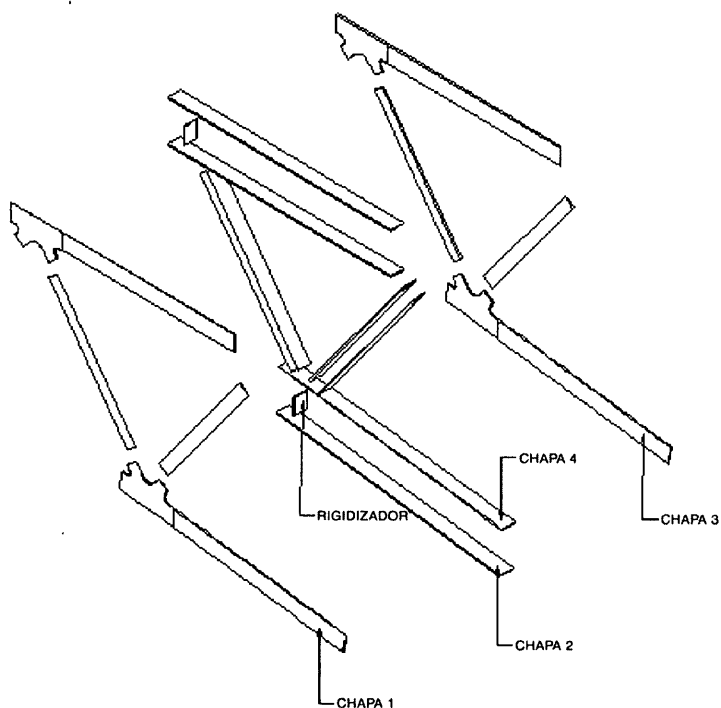


Figura 17. Despiece de las chapas de las barras y de los nudos utilizados en el Puente sobre el río Sil/ Figure 17. Arrangement of section plates and joints employed in the Bridge over the River Sil.



Figura 18. Barras y nudos de Puente sobre el río Sil, durante el ensamblaje en obra/ Figure 18. Members and joints to the bridge over the River Sil during assembly on site.

En algunas ocasiones las barras pueden estar constituidas por tubos y los nudos pueden resolverse de distintas maneras.

En las figuras 19, 20 y 21 se muestra el Puente sobre el Barranco de Cavalls, de un vano, que esta resuelto con cuatro vigas de celosía espacial y en el que se ha utilizado pretensado exterior. Las barras están constituidas por tubos y los nu-

On some occasions the members are formed by tubes and the joints may be resolved in a variety of manners.

Figures 19, 20 and 21 shows the single span bridge over the Barranco de Cavalls, which has been resolved by four space frame beams with external prestressing. The frame sections are formed by tubes

Figura 19.
Viaducto sobre el Barranco de Cavalls. Vistas generales.
Figure 19.
Viaduct over the Barranco de Cavalls. General view.

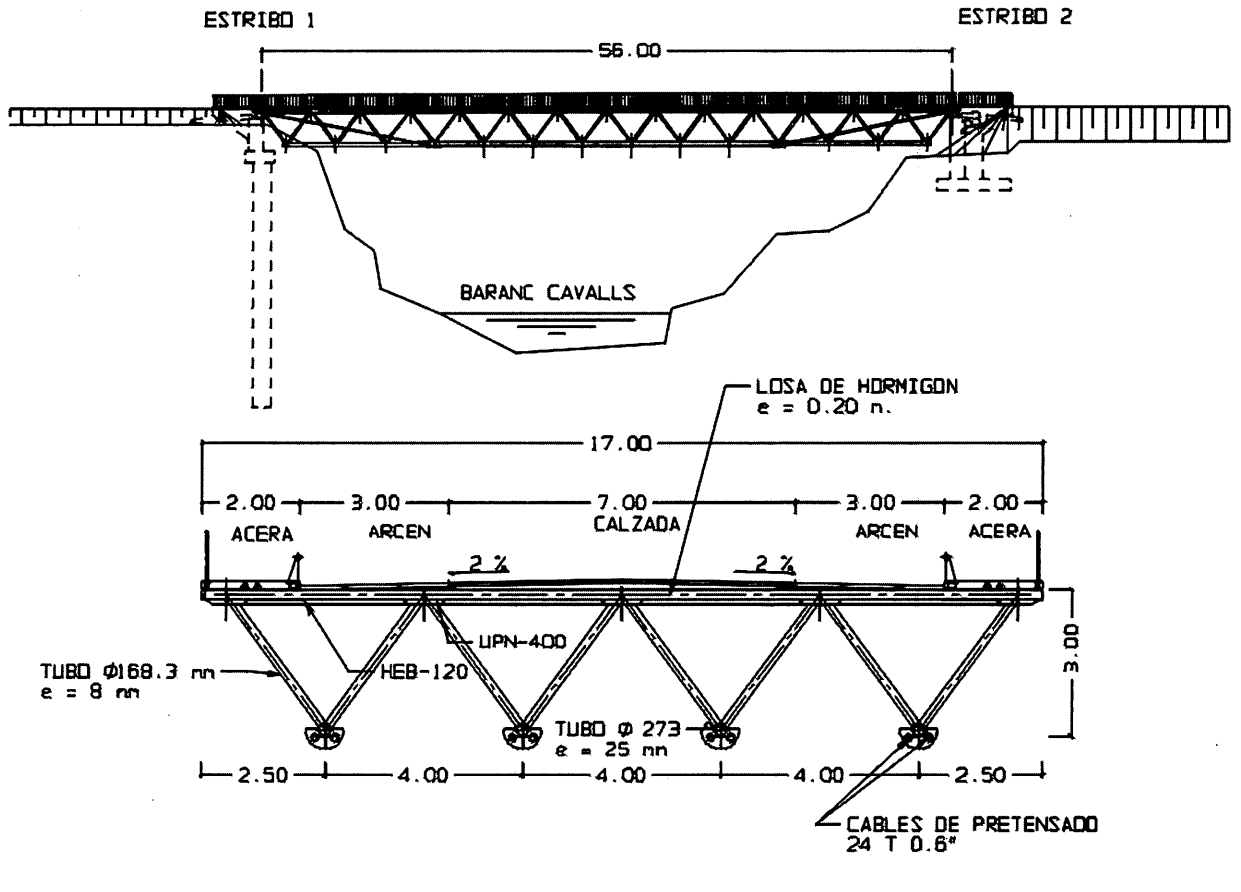
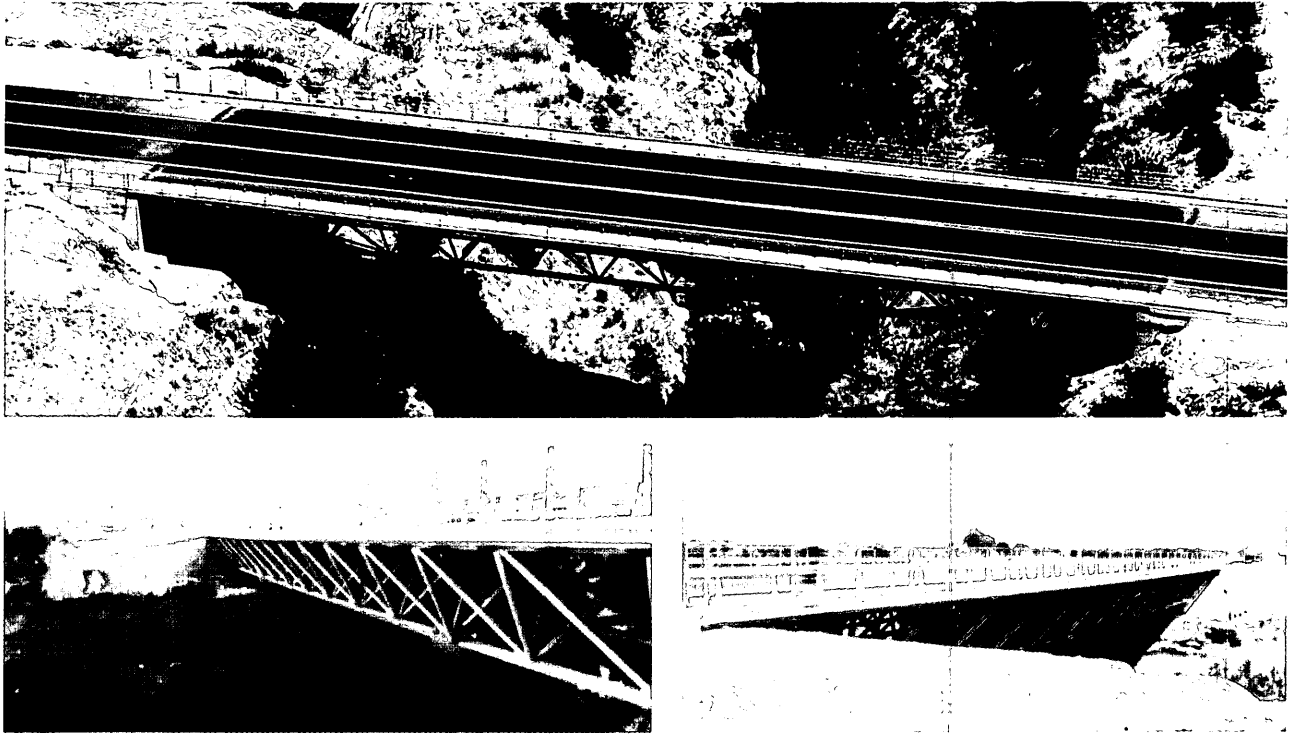


Figura 20.
Viaducto sobre el Barranco de Cavalls. Solución estructural.
Figure 20.
Viaduct over the Barranco de Cavalls. Structural solution.

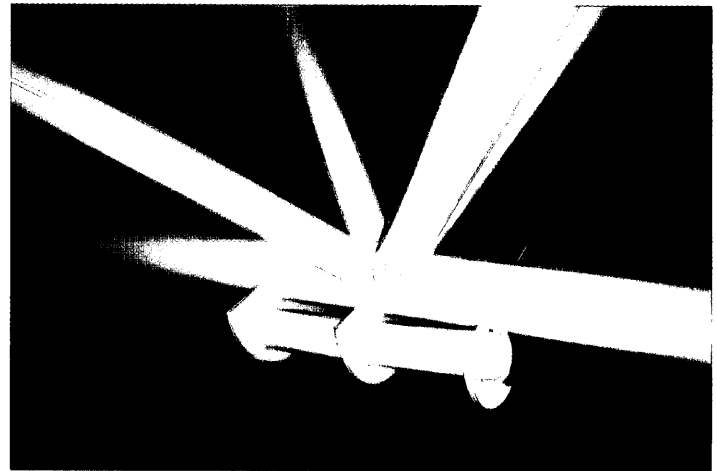
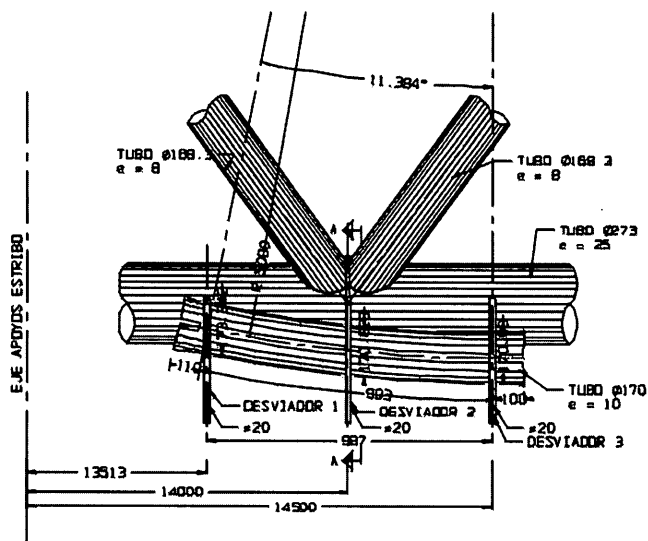


Figura 21. Viaducto sobre el Barranco de Cavalls. Nudo y desviador del pretensado exterior.
Figure 21. Viaduct over the Barranco de Cavalls. Joint and deviation of external prestressing

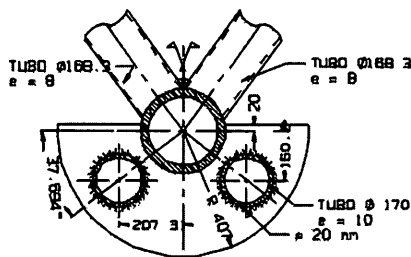
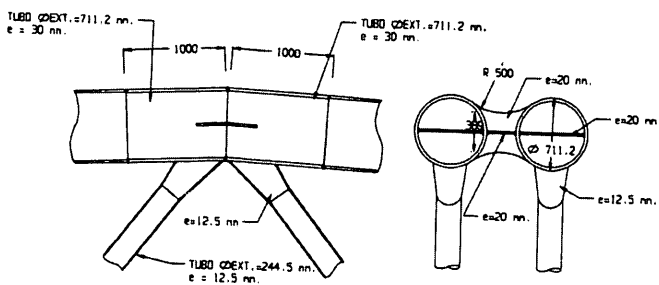


Figura 22. Puente sobre el cruce Portal de Castilla-Av. de Gasteiz. Detalle de los nudos.
Figure 22. Bridge over Portal de Castilla-Av. de Gasteiz. Joint details



dos se han resuelto soldando directamente los tubos del cordón inferior con las diagonales.

En la figura 22 se muestra un detalle del nudo del puente de ferrocarril en Vitoria, resuelto con una celosía de canto variable situada por encima del tablero con barras constituidas por tubos. En este caso, para resolver la concentración de tensiones en la zona del nudo se utiliza un elemento de transición de diámetro variable.

Este tipo de puentes pueden ser resueltos muy ventajosamente utilizando doble acción mixta. De esta forma las barras del cordón comprimido inferior, próximo a la pila, pueden contar con la ayuda de una losa de hormigón, especialmente apta para resistir compresiones.

and the lower chord tubes are directly welded to the diagonals.

Figure 22 shows a joint detail on the Vitoria railway bridge which is solved by a variable depth truss set over a tube decking. In this case and in order to eliminate the concentration of stresses in the area of the joint a variable diameter transition element was employed.

This type of bridge can be resolved with very good results by using double composite action. In this way the members of the lower compressed chord, close to the pier, may count on the assistance of the concrete slab which is particularly capable of resisting compression.

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DE LOS DISTINTOS PUENTES RECIENTEMENTE CONSTRUIDOS EN ESPAÑA, EN RELACIÓN CON LA DOBLE ACCIÓN MIXTA

TABLE 3. CHARACTERISTICS OF RECENTLY CONSTRUCTED SPANISH BRIDGES IN RELATION TO DOUBLE COMPOSITE ACTION

Puente/Bridge	Luces/Spans (m)	Tipo de celosía Truss type	b_s (m)	S_c (m)	Procedimiento constructivo Losa Construction procedure Slab	Doble acción mixta Double composite action
Navalvillar	50+100+50	Doble/Double Warren	5.00	5.00	Prefabricadas/Precast	No
Costa Martina	60.6+121.2+60.6	Doble/Double Warren	6.06	7.40	Prefabricadas/Precast	No
Ric	48.7+97.5+48.7	Doble/Double Warren	4.87	7.40	Prefabricadas/Precast	No
Neira I	57.25+114.5+57.25	Doble/Double Warren	5.72	7.40	Prefabricadas/Precast	No
Neira II	95.0+95.0	Doble/Double Warren	2.28	7.40	Prefabricadas/Precast	No
Sil	93.5+170.0+93.5	Warren	8.50	6.05	In situ	Si/Yes
Contreras	93.5+170.0+93.5+66.0	Warren	8.50	6.05	In situ	Si/Yes
Agueda	115.0	Warren	7.20	6.05	Prelosas/Precast reinforced	No

En la tabla 3 se indican las características de los puentes recientemente construidos en España, en relación con la doble acción mixta.

Table 3 shows the characteristics of several Spanish bridges of recent construction with regards to double composite action.

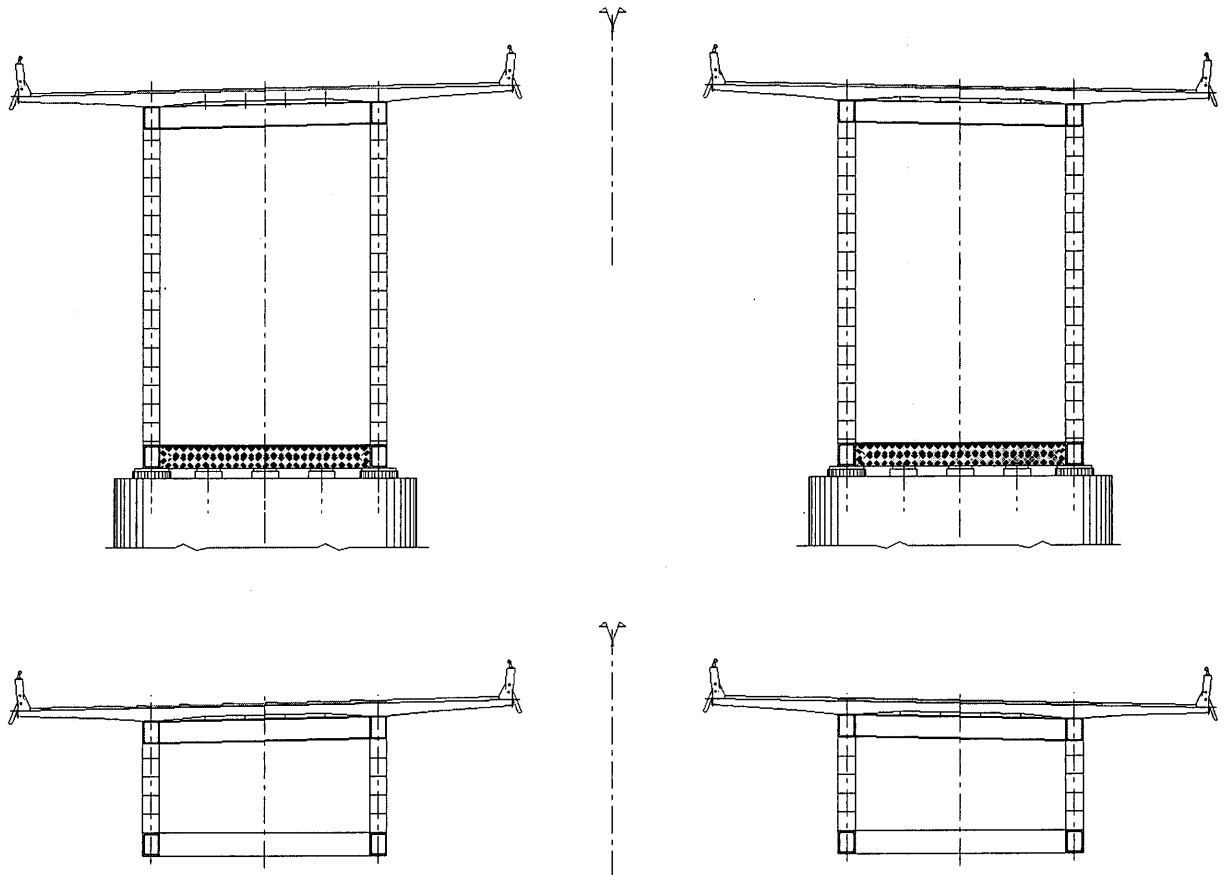


Figura 23.
Secciones transversales en vano y sobre pila del Puente sobre el río Sil.
Figure 23.
Cross-sections of span and pier to the bridge over the River Sil.

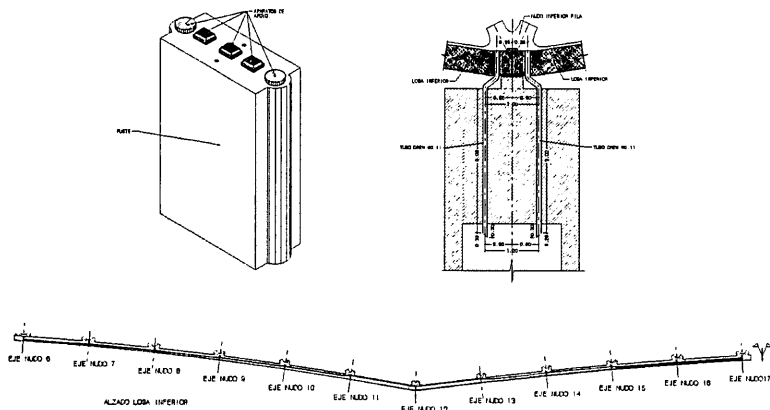


Figura 24. Detalles de la losa de compresión de la doble acción mixta en el cordón inferior de la celosía del tablero del Puente sobre el río Sil.
 Figure 24. Details of the double composite action compression slab at the bottom chord of the deck truss to the Bridge over the River Sil.

En las figuras 23 y 24 se muestran los detalles de la losa del cordón inferior del Puente sobre el río Sil, que tiene una losa de espesor variable que une las barras comprimidas de las dos celosías. En este caso, debido a que se trata de un puente de canto variable se ha previsto un sistema de pendientes y de drenaje para evacuar el agua que pudiera almacenarse en la losa inferior.

3. ASPECTOS RELATIVOS AL PROYECTO

Desde el punto de vista del comportamiento, en este tipo de estructuras se presentan problemas específicos y diferentes a los de los tableros mixtos de alma llena.

Los esfuerzos que se producen en las barras de una celosía mixta son fundamentalmente axiles, combinados con momentos flectores y los cortantes concomitantes. Mientras que para secciones cajón, por ejemplo, existe una interacción entre los momentos flectores, torsores y cortantes, en las barras de una celosía mixta desaparece, prácticamente la torsión y se sustituye por el axil.

Esta situación es particularmente comprometida para las barras del cordón superior, mixtas, en las que los momentos debidos a los efectos locales son muy importantes. Para las diagonales y las barras del cordón inferior, incluso las mixtas si se dispone de doble acción mixta, la acción principal es el axil con pequeños momentos y cortantes.

Tanto para las barras metálicas como para las mixtas los criterios de interacción necesarios para el proyecto de estos elementos están formulados en las RPX [10] y RPM [11], respectivamente. En la figura 25 se muestra el criterio para estimar el efecto de la interacción entre axil, flexión y cortante, para elementos mixtos, propuesto por la RPX. En la figura 26 se muestra el criterio elastoplástico definido en la

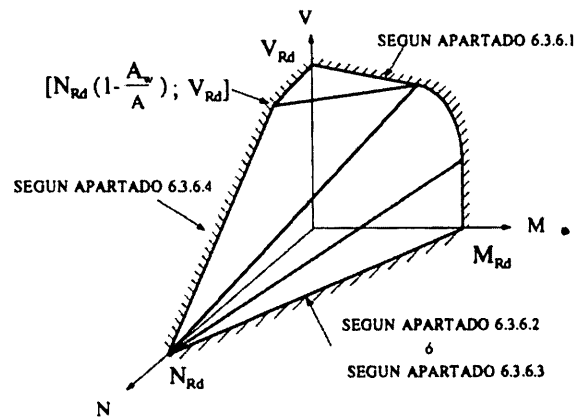


Figura 25. Criterio para comprobar la interacción axil-flexión-cortante en elementos mixtos según la RPX.
 Figure 25. Criteria for verifying the axial-flexural-shear interaction in composite elements, according to the Spanish RPX Code

Figures 23 and 24 show the details of the lower chord slab of the bridge over the River Sil, which has a slab of variable thickness which joins the compressed bars of the two trusses. In this case, and due to the fact that it is a variable depth bridge, a cambering and drainage system has been established to remove all water that may accumulate on the lower slab.

3. DESIGN

In terms of behaviour, this type of structure presents certain specific and different problems to that of web girder composite decks.

The forces acting on the members of a composite truss are essentially axial forces, combined with bending moments and associated shear. While in box sections, for example, there is an interaction between shear, torsional and bending moments, in the members of composite trusses the torsion practically disappears and is replaced, instead, by axial forces.

This situation is particularly relevant for the members of composite upper chords, where the moments due to local effects are very important. In the diagonals and the bottom chord members, and including composite members if double composite action is provided, the main action is the axial with small moments and shear.

The interaction design criteria for steel and composite members are laid down in the Spanish Codes RPX [10] and RPM [11] respectively. Figure 25 indicates the RPX criteria for estimating the interaction effect between axial, bending and shear forces for composite elements, while Figure 26 shows the

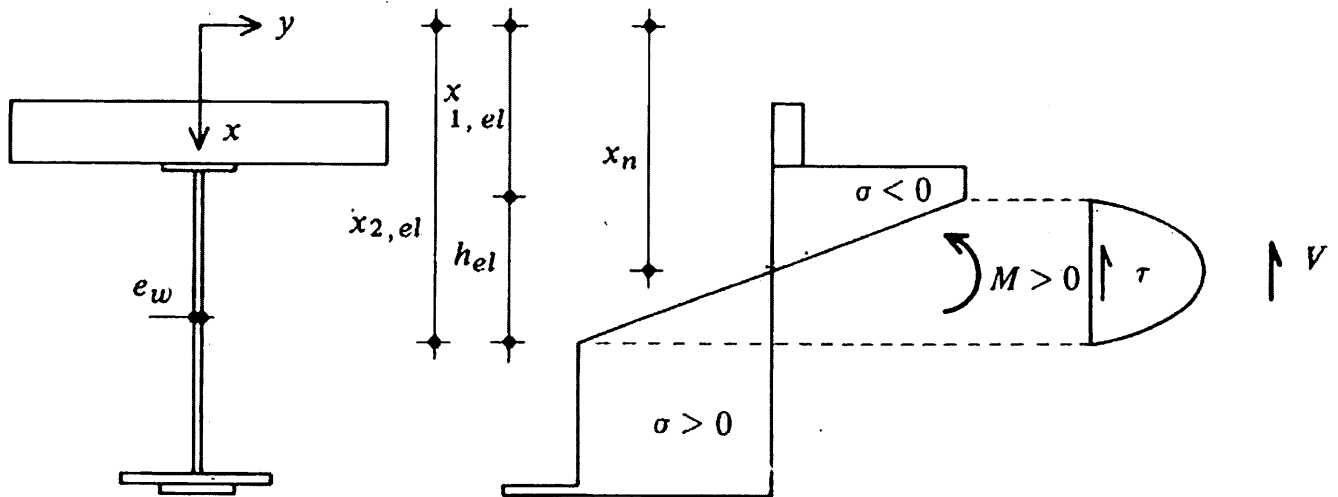


Figura 26.
Criterio elasto-plástico para estimar la interacción axil-flexión-cortante en elementos mixtos.
Figure 26.
Elastoplastic criteria for estimating the axial-flexural-shear interaction in composite elements

referencia [12] que presenta una alternativa para el tratamiento del problema.

En general, las diagonales son metálicas y están sometidas a esfuerzos axiales concomitantes con momentos modestos, longitudinales y transversales. Para el cordón inferior la situación es similar, tanto para las barras traccionadas como para las barras comprimidas con doble acción mixta.

El cordón superior presenta ciertas peculiaridades, en comparación con las secciones de alma llena utilizadas normalmente en tableros mixtos. En este caso, la sección del cordón superior mixta está sometida a esfuerzos de flexión y cortante, debidos a los efectos locales de transmisión de las cargas de la losa a la celosía, y a fuertes axiales, debidos a los efectos globales de la celosía. En este tipo de secciones se presenta una interacción de esfuerzos normales, axiales y momentos, concomitantes con esfuerzos cortantes. Esta situación que es menos frecuente (y está menos tratada en la normativa) que la situación de flexión-cortante-torsor, clásica en secciones de alma llena.

Otro aspecto, de este tipo de soluciones, que requiere una atención especial es el del tratamiento de los nudos que, dependiendo de la solución adoptada, plantea distintos problemas a resolver. Las soluciones deben combinar tanto las cuestiones de comportamiento estructural como constructivas, que faciliten la ejecución.

En general para nudos de soluciones en las que las barras son perfiles o cajones no existe una referencia específica en la normativa vigente.

En la figura 27 se muestran distintos aspectos del modelo utilizado para el análisis de los nudos adoptados en el Puente sobre el río Sil y en la figura 28 se presentan algunos de los resultados obtenidos [13]. Los medios de cálculo disponibles permiten explorar posibilidades interesantes desde el punto de vista constructivo, que también resultan muy adecuadas desde el punto de vista estructural.

elastoplastic criteria defined in reference [12] as an alternative approach to the problem.

The diagonals are generally steel and are subject to axial forces associated with modest longitudinal and transverse moments. The situation in the bottom chord is similar for both tension members as well as for compressed member with double composite action.

The upper chord presents certain peculiarities when compared with the web girder section normally employed in composite decks. In this case the section of the composite upper chord is subject to bending and shear due to local effects of load transfer from slab to truss, and to strong axial forces due to the global effect of the truss. In this type of section there is an interaction of the moments and normal and axial forces concomitant with shear forces. This situation is less frequent, and covered to a lesser degree in the Code, than the typical flexural-shear-torsion situation in web sections.

Another aspect of this type of solution which requires particular attention is that of the joints, and different problems arise according to the adopted solution. The joint solutions have to be seen to combine both structural behaviour and erection requirements in order to aid construction.

There are generally no specific references to joint solutions for plate section or box members in the current codes.

Figure 27 shows different aspects of the analytical model employed for the joints to the bridge over the River Sil and figure 28 shows some of the results obtained from the same [13]. The calculation methods available today make it possible to seek and obtain interesting possibilities from a construction point of view and which also appear to be very satisfactory from a structural point of view.

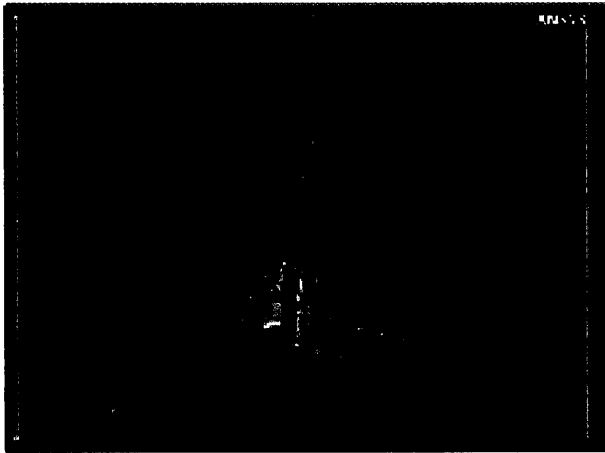
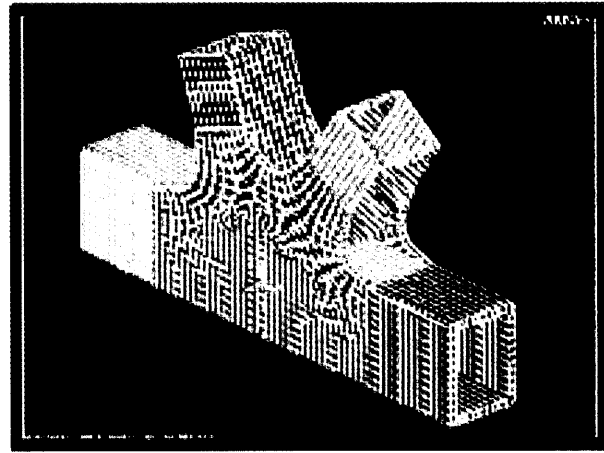
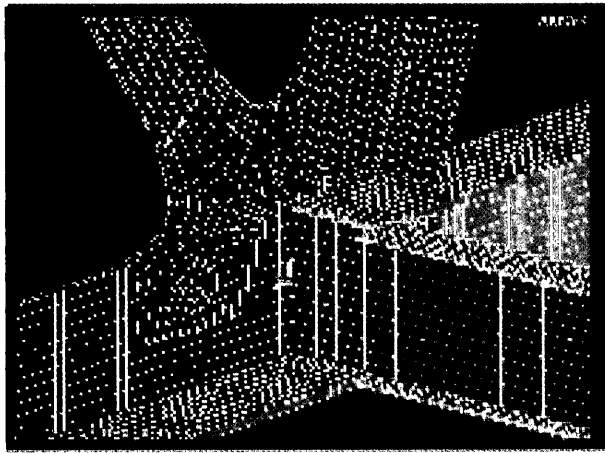


Figura 27. Modelo de elementos finitos utilizado para el análisis de los nudos del Puente sobre el río Sil. Figure 27. Finite element model employed for the analysis of joints to the bridge over the River Sil.



Los nudos de barras tubulares están mucho más estudiados experimental y analíticamente y existen distintos criterios empíricos de proyecto que recogen distintas normas [14][15].

Las celosías pueden combinarse de forma muy ventajosa con la utilización de pretensado exterior. Un ejemplo de la utilización de celosías con pretensado exterior es el Puente sobre el Barranco de Cavalls, en Valencia. En el último período se han hecho otras propuestas de este tipo para distintos viaductos.

El uso de pretensado exterior da lugar a una reducción de los costes, 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.

The joints of tubular members have received far more experimental and analytical study and there are different empirical design criteria for the same in the codes [14][15].

Trusses may be very favourably combined with external prestressing. One example of the use of trusses with external prestressing may be seen in the bridge over the Barranco de Cavalls in Valencia and several other proposals of this type have recently been made for other viaducts.

The use of external prestressing leads to reduction in costs providing that it is possible to rely on the total, or majority, of the prestress strength.

In the design of a structure of this type it is then necessary to establish the maximum stress that may be admitted in the prestressing, in terms of service, in order to provide the suitable behaviour of the same. However, in practice, very different criteria are employed depending on the type of structure in question:

- *In box sections with external prestressing within the depth of the transverse section, the initial prestressing stress ranges from 70 to 80% of the failure load, in the same manner as in a conventional tendon bonded prestressed structure.*

- En puentes atirantados, la máxima tensión se limita, en servicio, al 45% de la carga de rotura del acero de pretensar.

El problema planteado es, por lo tanto, cual es el criterio que debe aplicarse a los casos de pretensado exterior, que normalmente representan situaciones intermedias, entre las dos indicadas anteriormente, desde el punto de vista del estado tensional del cable de pretensado y sus condiciones frente a la fatiga.

M. Virlogeux (1993) [16], ha hecho un planteamiento interesante, para el análisis de este tema, 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, 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, que se describen a continuación:

- 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 ;
- y una losa con cables extradosado situado por debajo del tablero, el Puente de Truc de la Fare.

Esta comparación se ha completado, incluyendo el Puente sobre el Barranco de Cavalls y se presenta en las Tablas 4 y 5. En la Tabla 4, 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 5 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 [17].

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 utilizando los criterios establecidos para el pretensado convencional,

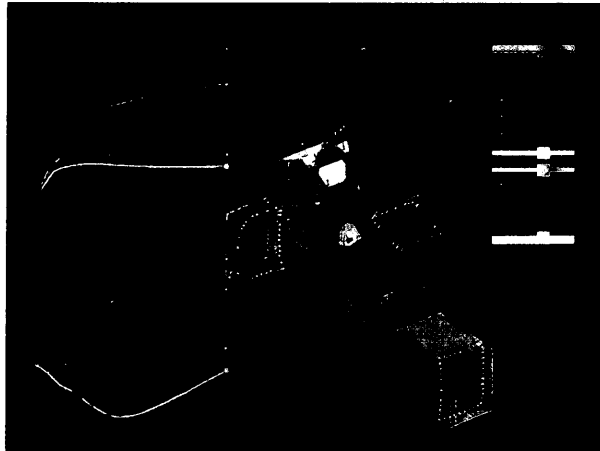


Figura 28. Resultados del análisis elastoplástico de uno de los nudos del tablero del Puente sobre el río Sil.
Figure 28. Results of the elastoplastic analysis carried out on one of the deck joints to the bridge over the River Sil.

- In cable-stayed bridges the maximum stress, in service, is limited to 45% of the failure load of the prestress steel.

The problem then lies in selecting which of these two criteria should be employed in the case of external prestressing with regards to the stress of the prestressing tendon and its fatigue conditions, as this normally represents an intermediate situation between the two types of structures indicated above.

M. Virlogeux (1993) [16], has provided an interesting approach to the analysis of external prestressing, and has established two possible criteria:

- The first criteria lies in establishing the importance of the cables with regards to the stiffening of the structure. As such, he proposes that a comparison of the deflection of the structure due to live load be made between a structure with cables and one without. If the difference is very large, the structure should then be designed as a cable-stayed bridge, though if the difference is small the prestressing should then be considered as conventional prestressing.
- The second criteria is that of fatigue. In this case it is necessary to establish the stress variation due to the live load.

M. Virlogeux has employed this criteria to compare three different structures:

- a prestressed box section concrete structure, with external prestressing set within the transversal section, in the Souvain viaduct.
- the Evipros cable-stayed bridge
- and a slab with outer tendons set below the deck on the Truc de la Fare bridge.

This comparison has been completed by including the bridge over the Barranco de Cavalls, as presented in tables 4 and 5. column 2 of table 4 shows the deflection of each structure due to live load, when considering the cable stiffness, and column 3, the deflection without considering the cable stiffness. Table 5 indicates the stress variation in the prestressing due to the total live load, together with the stress variation due to fatigue as defined in the IAP-96 [17] for the particular case of the bridge over the Barranco de Cavalls.

This analysis is inconclusive for the Bridge over the Barranco de Cavalls, as while the stiffness criteria seems to indicate that a design using established criteria for conventional prestressing would be appropriate, the analysis of

de análisis de la variación de tensiones debidas a la sobrecarga total resulta, en este puente, que es mayor que la del puente con pretensado exterior de la tabla.

La fatiga, ¿es, por lo tanto, realmente un problema? Y, por otro lado, ¿como resolverlo a nivel del pretensado?

En primer lugar, debe recordarse que los problemas de fatiga son debidos fundamentalmente a la acción de cargas específicas, las cargas de fatiga, por lo que no parece razonable calcular la variación de tensión para la sobrecarga total. En la IAP-96 [17], se define una carga de fatiga. Con esta carga, la variación de tensión en el pretensado en el Puente sobre el Barranco de Cavalls es de sólo 30 MPa (ver columna 3 de la Tabla 5).

Deben tenerse en cuenta, además, 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 29).
2. Los ensayos de fatiga llevados a cabo por Fouré y Hoang (1993) [19] indican que, incluso para altas tensiones iniciales (del orden del 70% de la carga de rotura) y variaciones de tensiones importantes (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, pa-

TABLA 4. ESTUDIO DE LA RIGIDEZ DE DISTINTOS PUENTES CON CABLES [16]
TABLE 4. STUDY OF STIFFNESS IN DIFFERENT BRIDGES WITH CABLES

Tipo de estructura/Type of structure	f_{cc} (m)	f_{sc} (m)	f_{sc}/f_{cc}
Sección Cajón/Box Section (Viaducto de Souvain)	0,0457	0,0461	1,001
Puente Atirantado/Cable-stayed bridge (Evipros)	0,283	39,410	139,260
Puente suspendido inferiormente Lower suspension bridge (Truc de la Fare)	0,082	0,216	2,634
Puente tubular con pretensado exterior Tubular bridge with external prestressing (Barranco Cavalls)	0,097	0,123	1,270

Criterio de rigidez/Stiffness criteria

TABLA 5. ESTUDIO DE LAS LA VARIACIÓN DE TENSIONES DEBIDAS A LA SOBRECARGA Y LA CARGA DE FATIGA, PARA DISTINTOS PUENTES CON CABLES
TABLE 5. STUDY OF STRESS VARIATIONS DUE TO LIVE LOAD AND FATIGUE IN DIFFERENT CABLE BRIDGES

Tipo de Estructura Type of structure	$\Delta\sigma_{sct}$ (MPa)	$A\sigma_{fat}$ (MPa)
Sección Cajón/Box Section (Viaducto de Souvain)	14.5	
Puente Atirantado/Cable-stayed bridge (Evipros)	130	
Puente suspendido inferiormente Lower suspension bridge (Truc de la Fare)	136	
Puente tubular con pretensado exterior Tubular bridge with external prestressing (Barranco Cavalls)	105	30

Criterio de fatiga/Fatigue Criteria

the stress variations due to live load show that design as a cable stayer bridge would be more appropriate.

As such, it may be asked whether fatigue is really a problem and how it is possible to solve the level of prestressing.

It should be noted that problems of fatigue are basically due to the action of specific loads, the fatigue loads as defined in the IAP-96 [17], and, as such, it does not appear appropriate to calculate the stress variation for the total load. Under the fatigue load defined in the said code, the stress variation in the prestressing of the Bridge over the Barranco de Cavalls is only 30 MPa (see column 3 of Table 5).

It is also necessary to bear the following factors in mind:

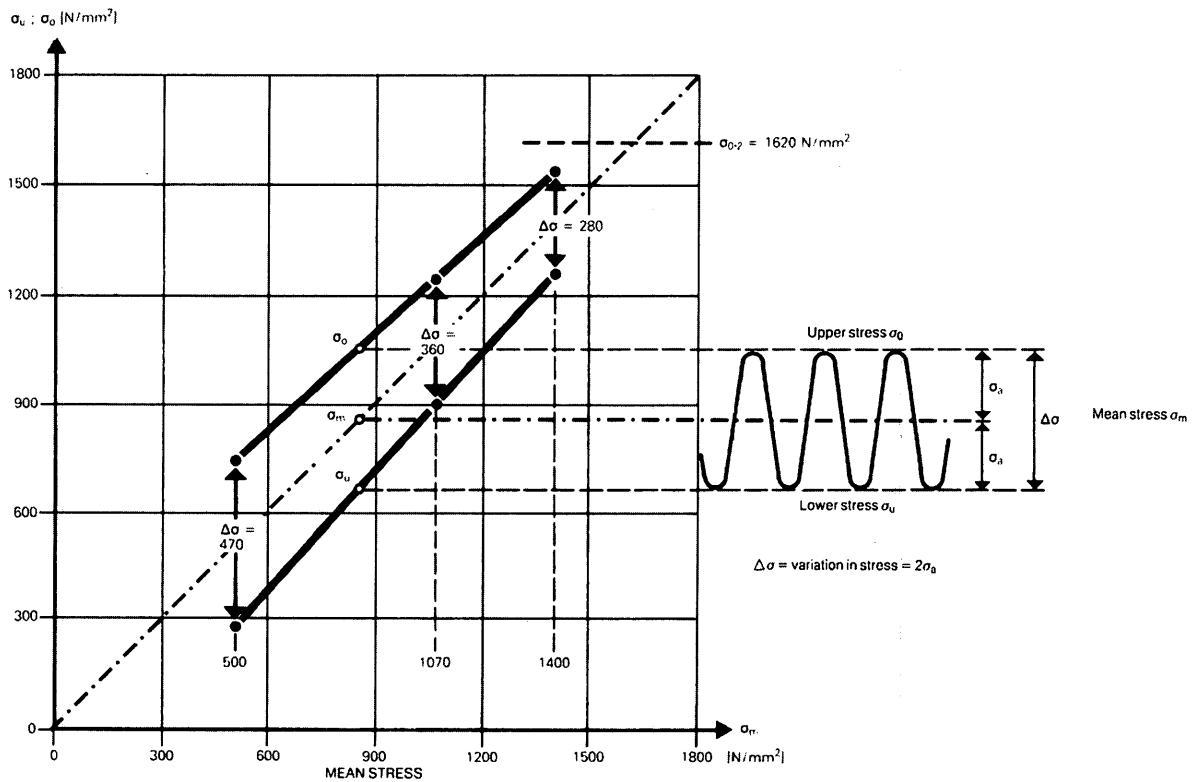
1. The range of stress variations obtained, even with total live load, is lower than the fatigue limit of the prestress steel (see Fig. 29).
2. The fatigue tests carried out by Fouré

and Hoang (1993) [19] show that even under high initial stresses (of around 70% the failure load) and important stress variations (of around 100 MPa), no problems of fatigue were detected for either conventional prestressing anchors or for replaceable tendon anchors.

As the criteria proposed by M. Virlogeux is fairly inconclusive, it would seem logical to apply other criteria to intermediate cases.

In this regard it would appear that the limit of 45% of the failure load employed in the design of cable-stayed bridges is established in order to minimize the risk of failure of a cable which would notably affect the safety of this type of structure. As such, another possible criteria would be to establish whether the

Figura 29
Límite de fatiga según la referencia [18].
Figure 29.
Fatigue limits according to reference [18].

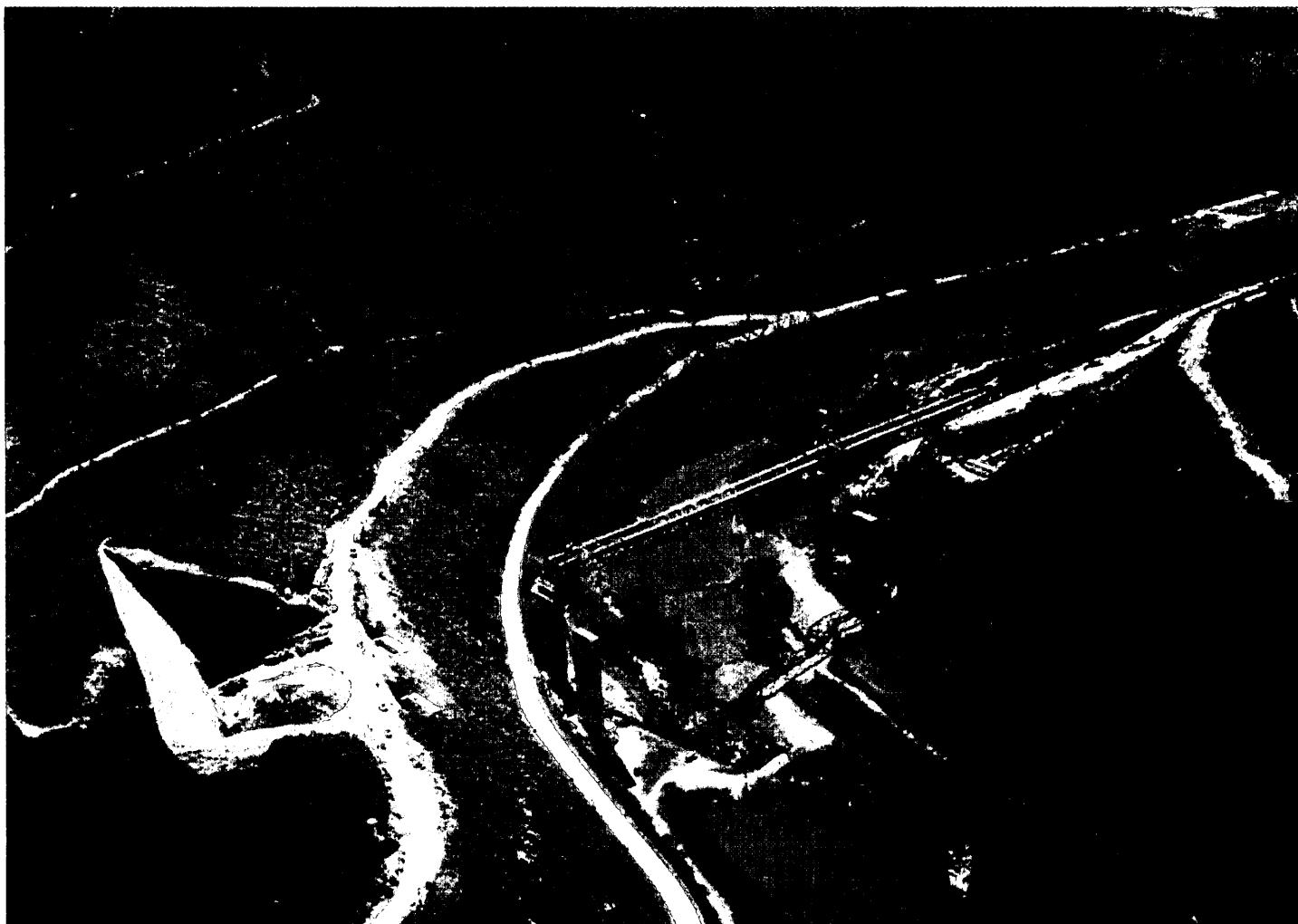


rece que, otro posible criterio para decidir sobre este problema podría ser si la estructura puede, o no, resistir la carga permanente, y una determinada sobrecarga, en caso de fallo de los cables, o al menos de alguno de ellos, ya que la probabilidad de que todos los cables fallen a la vez en muy pe-

structure could resist the permanent load and a certain live load in the case of cable failure or that of at least one of the same, as the probability that all the cables would fail at the same time is extremely slight. Does the failure of a cable imply the failure of the structure, or

TABLA 6. SISTEMA CONSTRUCTIVO PARA INSTALACIÓN DE LA CELOSÍA METÁLICA EN DISTINTOS PUENTES ESPAÑOLES
TABLE 6. ERECTION PROCEDURE FOR THE INSTALLATION OF STEEL TRUSSES IN DIFFERENT SPANISH BRIDGES

Puente/Bridge	Luces/Spans (m)	Tipo de celosía Truss type	Proceso constructivo Celosía Truss construction procedure
Navalvillar	50+100+50	Doble/Double Warren	Empuje/Launch
Costa Marfina	60.6+121.2+60.6	Doble/Double Warren	Empuje/Launch
Ric	48.7+97.5+48.7	Doble/Double Warren	Empuje/Launch
Neira I	57.25+1114.5+57.25	Doble/Double Warren	Empuje/Launch
Neira II	95.0+95.0	Doble/Double Warren	Empuje/Launch
Sil	93.5+170.0+93.5	Warren	Empuje/Launch
Contreras	93.5+1.70.0+93.5+66.0	Warren	Empuje/Launch
Agueda	115.0	Warren	Izado/Hoist



queña. ¿El fallo de los cables, implica el fallo de la estructura?, o por el contrario, ¿puede la estructura soportar su carga permanente 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.

4. ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Desde el punto de vista constructivo, este tipo de puentes puede resolverse con distintas técnicas, aunque la más frecuentemente utilizada es la del empuje, incluso para casos en que el canto es variable. Sin embargo, el avance en voladizo o la combinación con izado son también alternativas muy interesantes.

En la Tabla 6 se indica el procedimiento de instalación de la celosía en distintos puentes españoles.

En la figura 30 se muestra el empuje de la celosía del Viaducto de Neira, desde uno de los estribos.

alternatively, can a structure bear a permanent load and allow the repair of the cable without excessive cost? In this latter case, the design economy may justify the employment of less conservative criteria as the risks are much slighter.

4. CONSTRUCTION

From a construction point of view, this type of bridge may be resolved using different techniques, though it is more usual to employ launching even with variable depths. However, cantilever construction or hoisting in place are also very interesting alternatives.

Table 6 shows the truss installation procedure used in various Spanish bridges

Figure 30 shows the launching of the truss of the Neira Viaduct, as seen from one of the abutments

Figure 31 shows the launching of the half-truss of variable depth of the Bridge over the river Sil. In this

Figura 30. Empuje de la celosía del Neira, desde uno de los estribos.
Figure 30. Launching of the truss to the Neira Viaduct, as seen from one of the abutments.

Figura 31.
Empuje de la
semicelosis de
canto variable
del Puente
sobre
el río Sil.
Figure 31.
Launching of
the half-truss
of variable
depth to the
Bridge over
the river Sil.

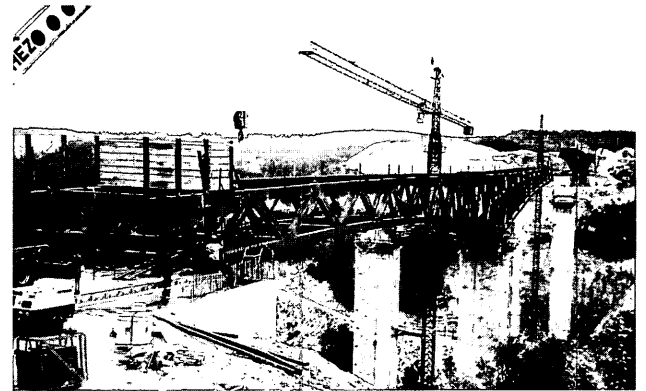
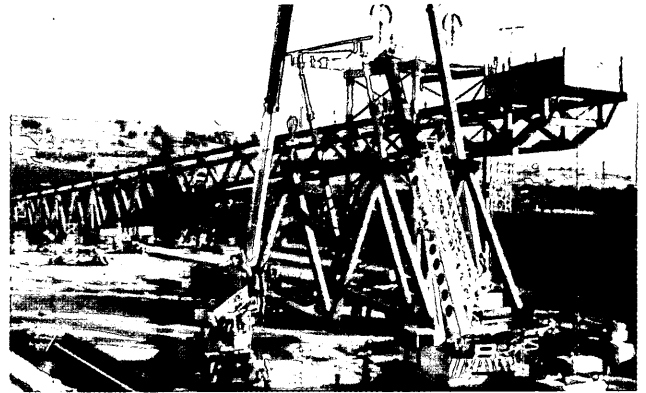
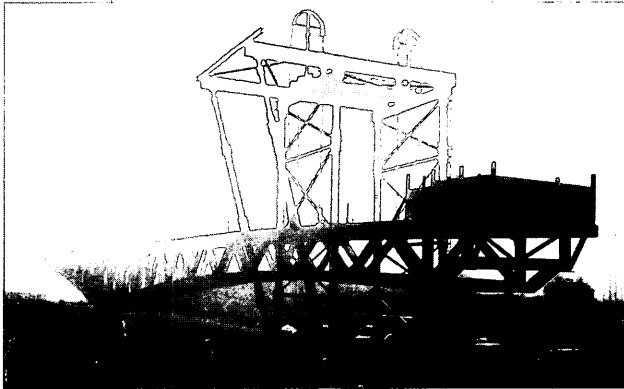
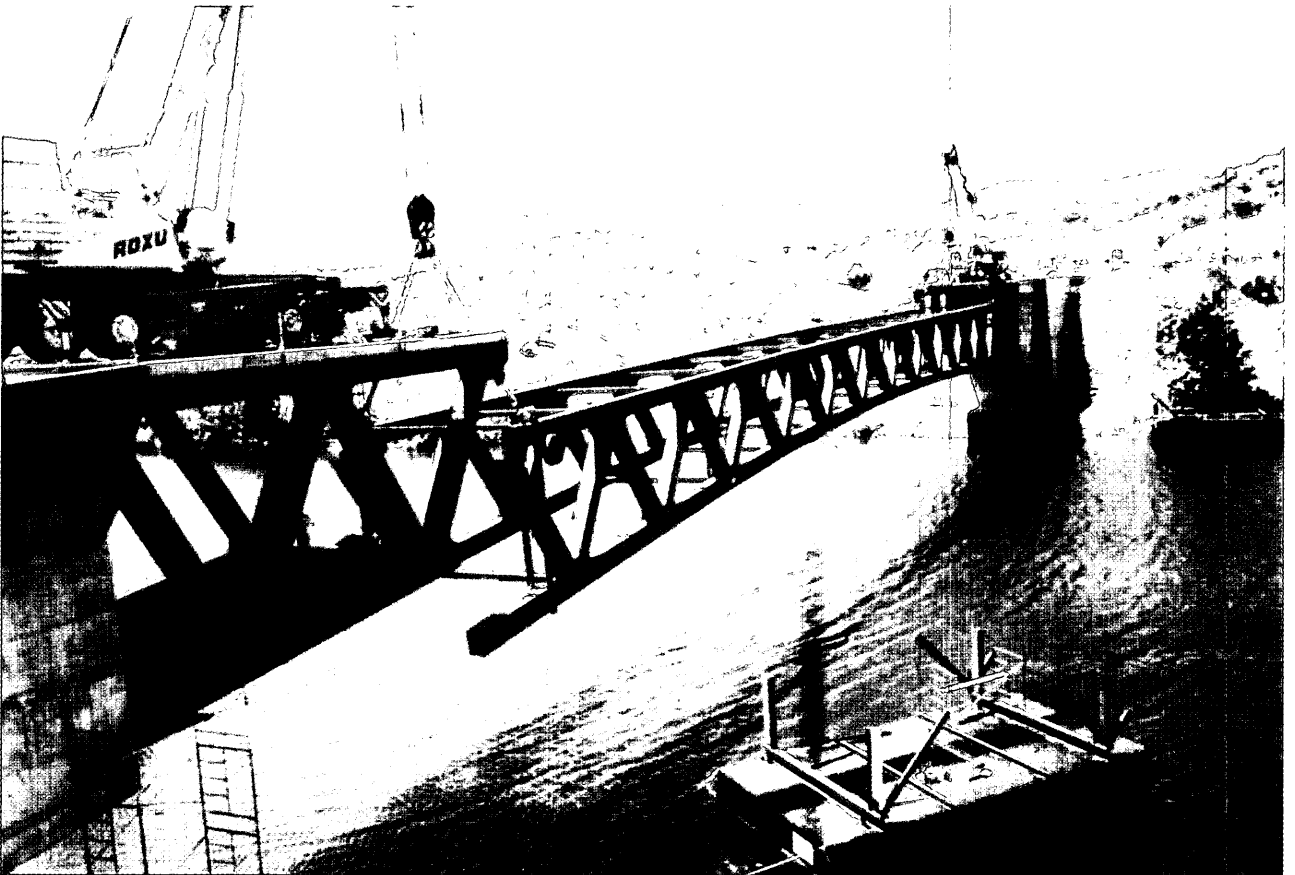


Figura 32.
Izado de la
celosía del
Puente sobre el
río Águeda.
Figure 32.
Hoisting of the
truss to the
bridge over the
river Águeda.



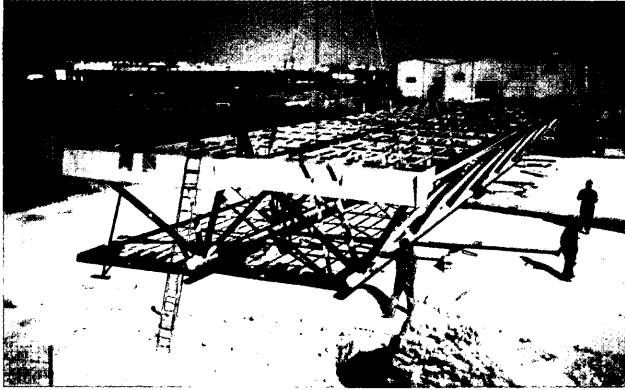
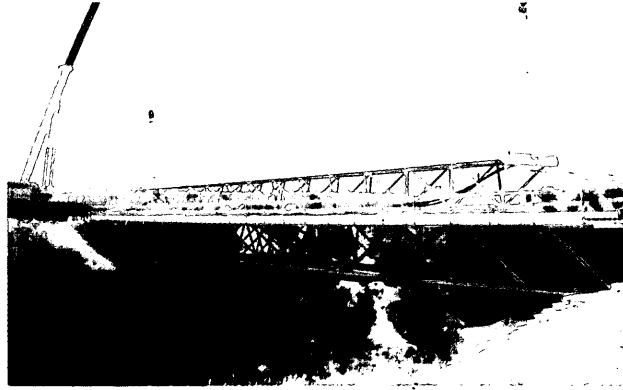
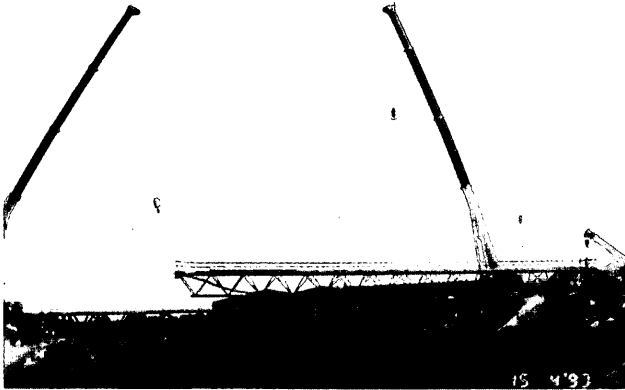


Figura 33. Secuencia de montaje de las celosías del Puente sobre el Barranco de Cavalls, con grúas.
Figure 33. Sequence of assembly of the trusses to the Bridge over the Barranco de Cavalls, with assistance of two cranes.



En la figura 31 se muestra el empuje de la semicelosía de canto variable del Puente sobre el río Sil. En este caso, el sistema utilizado es muy singular y solo posible debido a las técnicas actualmente disponibles.

En la figura 32 se muestra el izado, desde el agua, de la celosía del puente sobre el río Águeda.

En el caso del Puente sobre el Barranco de Cavalls, cada una de las cuatro vigas metálicas se instalaron con dos grúas. En la figura 33 se muestra una secuencia de fotos donde se ven las distintas etapas del montaje de las celosías espaciales.

En cuanto a la construcción de la losa superior del tablero, también existen muchas y diferentes posibilidades, las mismas que para otros tipos de puentes mixtos. Tal como se resume en la Tabla 7, referida a distintos puentes españoles, se pueden utilizar encofrados móviles apoyados sobre la celosía metálica, prelosas o losas prefabricadas, armadas o pretensadas.

En la figura 34 se muestra la construcción de la losa en el Puente sobre el río Sil. En este caso se utilizaron dos carros que avanzaban simétricamente desde los estribos.

En la figura 35 se muestra la construcción de la losa del Puente sobre el Barranco de Cavalls. En este caso se planteo una estructura metálica muy ligera para que se pudiera manejar con grúas. Por esta razón, la losa requería unas etapas de hormigonado muy especiales. En una primera etapa se hormigonó una calle en coincidencia

case a unique system was employed which is only possible as a result of modern techniques

Figure 32 shows the hoisting of the truss to the bridge over the river Águeda.

In the case of the bridge over the Barranco de Cavalls, each of the four steel beams was installed by two cranes. Figure 33 shows a sequence of photographs indicating the different assembly stages of the space frames.

With regards to the construction of the upper deck slab there are many of possibilities, much in the same way as with other composite bridge types. Table 7 shows the construction procedure employed in different Spanish bridges, ranging from moving formwork supported on the steel truss to precast, reinforced or prestressed slabs.

Figure 34 shows the construction of the slab of the bridge over the River Sil. In this case two concrete carriers were employed which simultaneously advanced from the abutments.

Figure 35 illustrates the construction of the slab on the bridge over the Barranco de Cavalls. Here a lightweight steel structure was built which could be moved by crane and the slab, subsequently, required very specific concreting stages. During the first stage a strip was concreted which coincided with the outline of the compressed chords in order to improve

**TABLA 7. SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN DE LA CELOSÍA METÁLICA
PARA DISTINTOS PUENTES ESPAÑOLES**
TABLE 7. STEEL TRUSS CONSTRUCTIONS SYSTEMS IN DIFFERENT SPANISH BRIDGES

Puente/Bridge	Luces/Spans (m)	Tipo de celosía Truss type	Procedimiento constructivo Losas Slab construction procedure	Doble acción mixta Double composite action
Navalvillar	50+100+50	Doble/Double Warren	Prefabricadas/Precast	No
Costa Martina	60.6+121.2+60.6	Doble/Double Warren	Prefabricadas/Precast	No
Ric	48.7+97.5+48.7	Doble/Double Warren	Prefabricadas/Precast	No
Neira I	57.25+114.5+57.25	Doble/Double Warren	Prefabricadas/Precast	No
Neira II	95.0+95.0	Doble/Double Warren	Prefabricadas/Precast	No
Sil	93.5+170+93.5	Warren	In Situ	Si/Yes
Contreras	93.5+1.70.0+93.5+66.0	Warren	In Situ	Si/Yes
Aqueda	115.0	Warren	Preslosas/Precast reinforced	No



Figura 34.
Construcción
de la losa del
Puente sobre
el río Sil.
Figure 34.
Construction of
the slab to the
Bridge over
the River Sil.

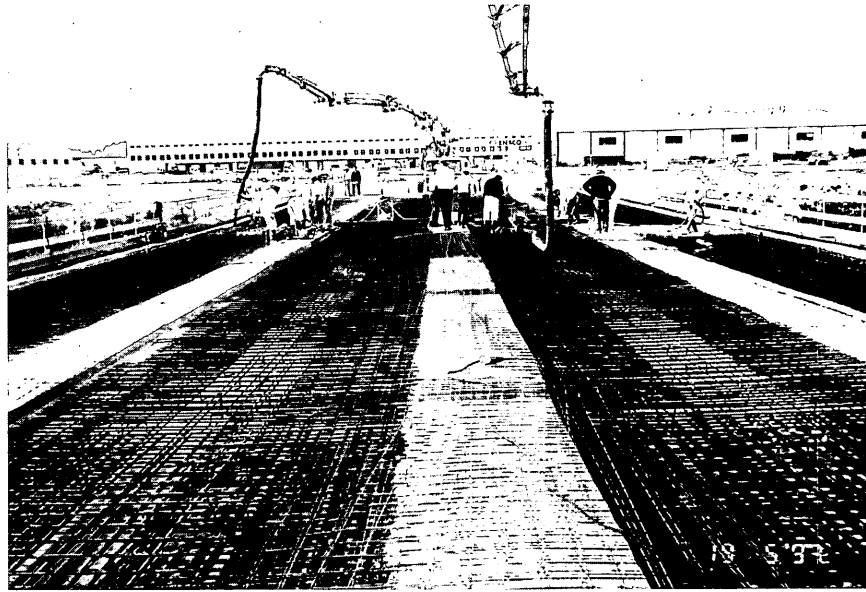
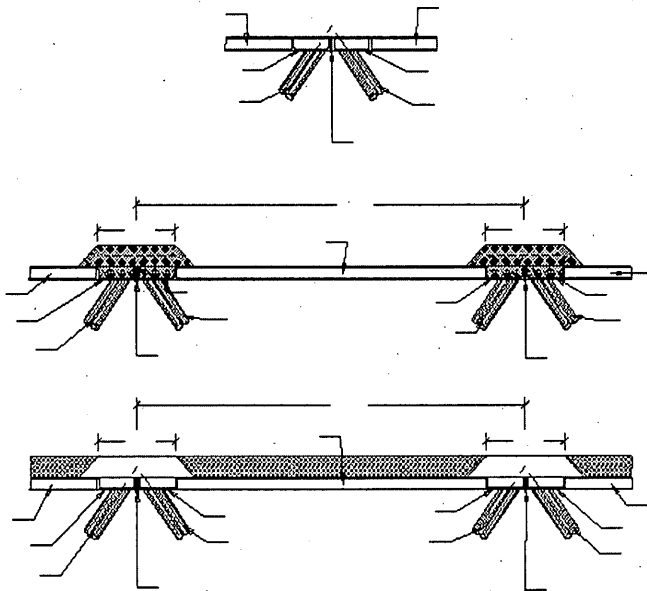


Figura 35. Hormigonado de la losa de compresión del cordón inferior en el Puente sobre el río Sil / Figure 36. Concreting of the bottom chord compression slab to the Bridge over the River Sil.

con los perfiles que constituían los cordones comprimidos, para aumentar la capacidad resistente a compresión del cordón. Cuando el hormigón de esta primera etapa alcanzó la capacidad resistente requerida se procedió al hormigonado del resto de la losa.

En cuanto a la construcción de la losa del cordón inferior, correspondiente a la doble acción mixta, lo normal es que la celosía lleve un sistema de encofrado perdido que permita tal hormigonado. Este es el sistema utilizado en el caso del Puente sobre el río Sil que se muestra en la figura 36.

5. CONSIDERACIONES FINALES

Los puentes de celosía mixta constituyen una tipología que permite resolver de forma muy adecuada y competi-

the compressive strength of the chord. Once this concrete had reached the desired strength capacity the rest of the slab was concreted.

With regards to the construction of the bottom chord slab, corresponding to double composite action, the standard procedure is for the truss to include a system of lost formwork to enable concreting, this being the system employed on the Bridge over the River Sil as indicated in Figure 36.

Figura 36. Secuencia de hormigonado de la losa del tablero del Puente sobre el Barranco de Cavalls / Figure 35. Concreting sequence of the deck slab to the Bridge over the Barranco de Cavalls.

5. CONCLUSIONS

Composite truss bridges are suitable and competitive solutions for bridges which previously had to rely on other structural types.

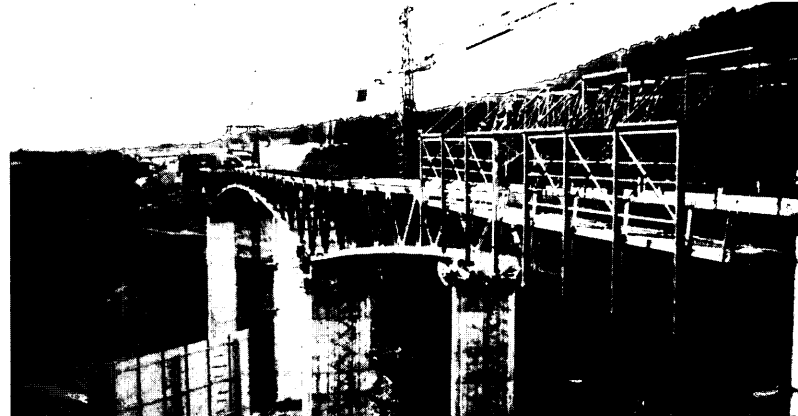
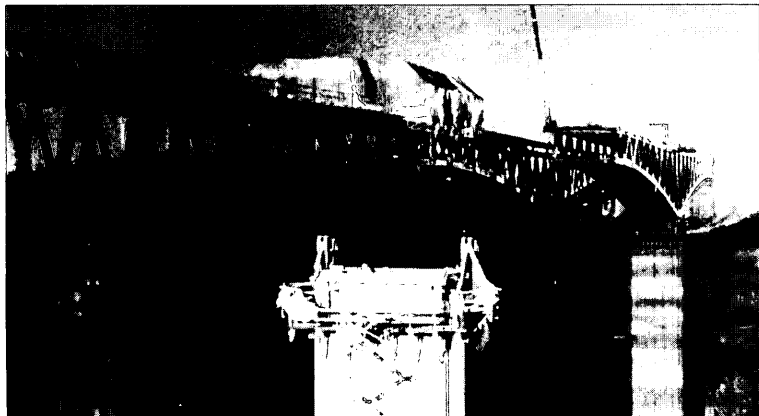


TABLA 8

Puente Bridge	Luces Span (m)	h (m)	Acero estructural Structural steel S355J262W (kg/m ²)	Hormigón Concrete (m ³ /m ²)	Armadura Reinforcement		Pretensado exterior External Prestressing (kg/m ²)
					Pasiva Passive B500	Activa Active (kg/m ²)	
Sil	93.5+170.0+93.5	10.00 4.0	182.00	0.25 0.05	275.00	—	—
España	70.0+100.0x6.0+70.0	5.00	200.03	0.27	250.0	4.22	—
Ocreza	50.0+90.0x3.0+60.0	4.50	225.29	0.27	265.0	2.26	—
Cavalls	56.0	3.0	102.0	0.20	122.40	—	12.40

va puentes que hasta ahora estaban reservados a otras topologías.

Desde el punto de vista constructivo presentan importantes ventajas ya que puede fácilmente empujarse la estructura metálica, pudiéndose reducir los tiempos de construcción muy notablemente.

Desde el punto de vista de proyecto, la RPX cubre los principales aspectos que surgen en el proyecto de un puente de este tipo. Quizá conviene que en el futuro se revise el criterio de interacción axil-flexión-cortante, muy importante en este tipo de estructuras, y que se den algunas indicaciones para el proyecto de nudos, especialmente para uniones directas de barras tubulares para las que existen criterios empíricos, contrastados experimentalmente y numéricamente, en la normativa de otros países.

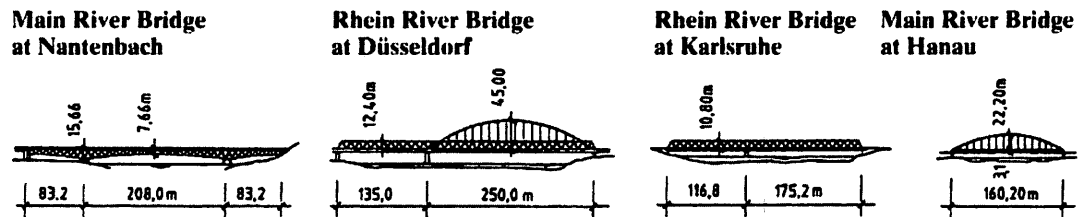
Como se ha dicho, en este tipo de estructuras puede resultar muy conveniente la utilización de pretensado exterior

From a construction point of view this type of bridge offers serious advantages as the steel structure may be easily launched which considerably reduces construction time.

From a design point of view, the Spanish RPX Code covers the main aspects considered in the design of a bridge of this type. However, it would be helpful if some revision were made in the future of the axial-flexural-shear interaction criteria which is very important in this type of structure. Furthermore, certain recommendations should be given for joint design, particularly for the direct connection of tubular members and in this regard standards are already available in other countries which provide empirical criteria which has been guaranteed by testing and analysis.

The use of external prestressing may be very favourable to this type of structure and, as such, it is

Figura 37. Comparación de cuantías de distintos puentes de ferrocarril alemanes de grandes luces. Figure 37. Comparison of amounts of different German large span railway bridges.



	1990-1993		1983-1988		1989-1991		1991-1993	
Year of construction	1990-1993		1983-1988		1989-1991		1991-1993	
No. of tracks	2		4		1		1	
Slenderness L/H	13	27	13	11	20/5.6	11	16	52/7.2
Steel (t/m · track)	4.47		5.9		8.2		9.1	
Σ = Equivalent steel-weight (t/m · track)	~ 5.3		5.9		8.2		9.1	

y, para ello, sería muy conveniente que existieran criterios claros que permitieran una estimación objetiva de los efectos de fatiga y evitaran soluciones muy sobredimensionadas, que pueden condenar esta interesante tecnología.

Desde el punto de vista económico, también resultan muy interesantes, tal como apuntaba Torroja a finales de los 50. En la Tabla 8 se muestran las cuantías de algunos puentes españoles.

Si bien el uso de esta tipología está bastante difundido, en nuestro país, en puentes de carretera resulta sorprendente que aún no se haya utilizado en puentes de ferrocarril. En la figura 37 se reproduce la comparación, extraída de la referencia [20], realizada con los datos de distintos puentes de ferrocarril de grandes luces. Como puede verse el Puente sobre el río Main en Nantenbach en la línea de alta velocidad, una celosía mixta con doble acción mixta y losa de hormigón armado, una novedad en Alemania y práctica usual en España, resulta económicamente mucho más conveniente que otras tipologías utilizadas en otros puentes similares. ■

necessary to establish clear criteria which would enable the objective evaluation of fatigue effects and, thereby, avoid very oversized solutions which only work to the detriment of this type of structure

In terms of economics, these bridges offer very interesting solutions, as was indicated by Torroja as far back as the late fifties. Table 8 shows the quantities employed in several Spanish bridges.

While the use of this type of construction is fairly widespread in Spanish highway bridges it is surprising that it is not employed in railway bridges. Figure 37 gives a comparison taken from source [20], made on the basis of various large span railway bridges. From this comparison it may be seen that the Bridge over the River Main in Nantenbach on the high speed line, which is a composite truss with double composite action and reinforced concrete deck slab and an innovation in Germany and common practice in Spain, proves to be a very economic and convenient solution compared to other methods employed in similar bridges. ■

BIBLIOGRAFÍA/BIBLIOGRAPHY

- [1] J. Manterola Armisén, L.Fernández Troyano, M. Astiz Suárez, M. Gil Ginés, A. Martínez Cutillas. *Puentes en Celosía*. Revista de Obras Públicas. nº 3.373. Febrero 1998.
- [2] E. Torroja. *The Structures of Eduardo Torroja. An Autobiography of Engineering Accomplishments*. F.W. Dodge Corporation. New York 1958
- [3] E. Torroja. *Las estructuras de Eduardo Torroja*. CEDEX CEHOPU. 1999
- [4] R. Borlado. *Puente para Los Iboses*. Revista de Obras Públicas nº 3.317. Enero 1993.
- [5] Redacción de la Revista de Obras Públicas. *Nota carretera de Eix Transversal Lleida a Girona. Tramo Viladrau-Sant Hilari de Sacalm*. Revista de Obras Públicas nº 3.363. Marzo 1997.
- [6] A Landeira, J. Asencio. *Autovías de Galicia: Viaductos sobre el río Neira*. Cauce 2000. nº 92. Mayo-Junio 1999.
- [7] Corres Peiretti, H., Pérez Caldentey, A. *Un ejemplo de estructura mixta con pre-*

- tensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia*. Hormigón y Acero nº 211.
- [8] H. Corres, A. Pérez, J. Romo, J. Calvo. *Puente sobre el río Sil*. 1º Congreso de la asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Comunicaciones. Vol. 3. 1999.
- [9] Prieta Martín, T. *El Mediterráneo más cerca. Cierre de la Autovía de Valencia A-3. Tramo Minglanilla-Caudete de las Fuentes*. Cauce 2000 nº 90
- [10] Ministerio de Fomento. *RPX-95 Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras*. 1996
- [11] Ministerio de Fomento. *RPM-95 Recomendaciones para el proyecto de puentes metálicos para carreteras*. 1996
- [12] Martínez Calzon, J., Ortiz Herrera, J. *Construcción Mixta Hormigón-Acero*. Editorial Rueda 1978.
- [13] Lancha Fernández, J. C. *Estudio no lineal del estado tensional de un nudo de la celosía del Puente sobre el Río Sil*. 2000

- [14] American Welding Society. *Structural Welding Code*. 15th Edition. 1996.
- [15] British Standards Institution. *BS-5400: Steel, Concrete and Composite Bridges. Part 3: Code of Practice for the design of Steel Bridges*. 1982.
- [16] M. Virlogeux. *Some Elements for a Codification of External Prestressing... and of Precast Segments*. En *External Prestressing in Structures*. Saint Rémylès Chevreuses. Francia. Junio 1993.
- [17] Ministerio de Fomento. *IAP96 Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. Madrid, 1996.
- [18] R. Walther, B. Houriet, W. Isler, P. Moia. *Cable Stayed Bridges*. Thomas Telford. Londres, 1988.
- [19] B. Fouré, L. H. Hoang. *Fatigue Tests of Anchorages for External Prestressing*. En *External Prestressing in Structures*. SaintRémylès-Chevreuses. Francia. Junio 1993.
- [20] O. Schwarz, R. Saul. *Mainbrücke Nantenbach - Entwurf, Ausschreibung und Vergabe*. Bauingenieur 69, 1994.