

Puente arco sobre el embalse de El Burguillo (Ávila). Diseño y control de la ejecución

*Arch bridge over the Burguillo reservoir (Ávila).
Design, construction supervision and monitoring*

Hugo Corres Peiretti

José Romo Martín

Alejandro Pérez Caldentey

Álvaro Ruiz Herranz

Julio Sánchez Delgado

FHECOR ■ Ingenieros Consultores

RESUMEN

En este artículo se repasan las principales ideas que guiaron el diseño del puente arco sobre el Embalse de El Burguillo en Ávila. Se lleva a cabo una comparación de esta estructura con otras estructuras en arco de construcción reciente discutiendo las ventajas e inconvenientes de las distintas soluciones, tanto desde el punto de vista del diseño y la funcionalidad como también desde el punto de vista de la construcción, siendo éste un aspecto de gran importancia para esta tipología estructural. Finalmente se incluye un breve resumen de las medidas tomadas durante la construcción del arco incluyendo medidas de fuerzas en los cables provisionales y medidas de deformaciones y temperatura en el arco.

1. INTRODUCCIÓN

El puente sobre el embalse de El Burguillo es un arco de hormigón armado de 165,00 m de luz (268 m de longitud) y de tablero superior, perteneciente a la Variante de El Tiemblo. La obra perte-

necce a la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, siendo el Director de la Obra Manuel Llanes. La empresa constructora ha sido una U.T.E. entre Construcciones Sobrino y TAPUSA, siendo el jefe de Obra, Antonio Valadés. El puente fue proyectado por FHECOR Ingenieros Consultores. También FHECOR Ingenieros Consultores realizó la asistencia técnica durante la construcción del mismo.

La variante del Tiemblo es un proyecto realizado en 1995 y adjudicado para

SUMMARY

In this paper the main ideas guiding the design of the arch bridge over the Burguillo reservoir are presented. A comparison with other arch structures recently built is undertaken with special emphasis in pointing out the advantages and disadvantages of the different solutions both from the design and functional points of view, as well as from the point of view of construction, this being a very important aspect for this structural typology. Finally, a small summary



Foto 1. Vista general del arco.
Picture 1. General view of the bridge.

of the measurements taken during the construction of the arch is presented including measurements of provisional stay forces and strains and temperatures in the arch.

1. INTRODUCTION

The bridge over the Burguillo Reservoir is a reinforced concrete arch bridge with a main span of 165,00 m (268 m in overall length) and a top deck, belonging to the El Tiemblo by-pass. The work belongs to the General Road Headquarters of the Spanish Ministry of Public Works. The director of the works on behalf of the Ministry was Manuel Llanes. The work was built by a temporary union of companies formed by Construcciones Sobrino and TAPUSA. The workmaster was Antonio Valadés. The bridge was designed by FHECOR Consulting Engineers. The technical assistance during the works was also carried out by FHECOR.

The El Tiemblo by-pass was designed in 1995 and the works were started in 1997. The by-pass starts about 1.5 km before the entrance to El Tiemblo on National Highway 403 and ends in the place known as "Garganta Honda" (deep throat) where the bridge is located, about 500 meters from the Burguillo dam. The total length of the by-pass is 8 km. The works include 11 structures of which, besides the Burguillo arch, the Alberche river viaduct is also worth special mention.

The final budget of the works was 848 million ptas (about 5.1 million €). Of this quantity about 400 million correspond to the arch bridge. An important part of this last sum is due to the construction process which requires the building and demolition of two provisional pylons with a head which can be compared to that of a cable-stayed bridge, the use of travelling formwork, and launching beams for the construction of the deck. In spite of these extra costs the cost of the bridge per square meter was about 125000 pta (750 €/m²), which is very low for a structure with such characteristics. Table 1 shows some of the main quantities of the Burguillo arch bridge.

The bridge over the Burguillo reservoir is an example of the remarkable



Figura 1. Situación de la obra.
Figure 1. Location of the Works.

comeback of arches as a structural typology, which is based on new construction technologies. As precedents in the last few years in Spain, the following may be mentioned: the Regenta arch [1], the Ricobayo arch [3], the arch

construcción en 1997. La variante se inicia 1,5 km antes de la entrada en El Tiemblo de la N-403 y acaba en la denominada "Garganta Honda" donde se sitúa el puente arco, a unos 500 m de la presa del Embalse del Burguillo. La

Tabla 1. Principales cantidades de la Obra
Tabla 1. Main material quantities

Unidad Unit	Medición	Cuantía Quantity
m ³ hormigón en tablero m ³ concrete in deck	1974,94	0,56 m ³ /m ²
m ³ hormigón en arco m ³ concrete in arch	1607,81	0,50 m ³ /m ²
m ³ de hormigón en pilas m ³ concrete in supports	480,77	0,15 m ³ /m ²
m ³ hormigón en cimentación m ³ concrete in foundations	1609,26	0,50 m ³ /m ²
m ³ hormigón en pila provisional m ³ concrete in provisional pylons	176,40	0,05 m ³ /m ²
kg de acero en arco kg reinforcing steel in arch	195074,278	121,33 kg/m ³
kg de acero en tablero kg reinforcing steel in deck	290833,719	162,03 kg/m ³
kg de acero de pretensar en tablero kg prestressing steel in deck	22384,599	6,96 kg/m ²
kg de acero en pilares kg reinforcing steel in supports	61917,425	128,79 kg/m ³
kg de acero en cimentaciones kg reinforcing steel in foundations	109429,952	68,00 kg/m ³
kg de acero en tirantes provisionales kg prestressing steel in provisional stays	56410,012	3,00 kg/m ²

longitud total de la variante es de 8 km y cuenta con 11 estructuras, entre las que destaca además del puente sobre el embalse de El Burguillo, el viaducto sobre el Río Alberche.

El presupuesto final de las estructuras fue de 848 millones de pesetas (5,1 millones de €), de los cuales, aproximadamente unos 400 millones corresponden al puente arco. De esta cantidad buena parte corresponde al procedimiento constructivo que exige la ejecución y demolición de una pila provisional con una cabeza comparable a la de un puente atirantado, el uso de tirantes provisionales, el uso de un carro de avance para la construcción del arco y el uso de una viga lanzadera para la ejecución del tablero, el coste por metro cuadrado del arco estuvo en torno a los 125.000 ptas./m² (750€/m²), lo cual supone un coste muy reducido para una estructura de estas características. En la tabla 1, se recogen algunas de las principales Unidades de obra del Arco sobre el embalse de el Burguillo.

El puente sobre el Embalse de El Burguillo se enmarca dentro de un notable auge de los arcos como tipología estructural, gracias a las nuevas tecnologías constructivas. Como precedentes en los últimos años, en España cabe citar entre otros, el arco de la Regenta [1], el Arco de Ricobayo [3], el arco sobre el Río Clariano [8] en Valencia, o, a menor escala, el arco de Alzira [9] o el arco sobre la N-VI a la altura de la M-40 en Madrid [10]. También puede citarse el arco actualmente en construcción sobre la desembocadura de El Duero en Oporto (Puente Infante Dom Enrique).

En ese trabajo se describen las características principales de la estructura y se comentan las ideas que guiaron su diseño. En particular, se destacan las similitudes y las diferencias con otros puentes arco contemporáneos. Por último se presenta, pormenorizadamente, la concepción, ejecución y control del procedimiento constructivo utilizado.

2. ASPECTOS RELATIVOS AL PROYECTO

2.1. Ideas previas y condicionantes del proyecto

El emplazamiento de la estructura constituye un ejemplo ideal para la

construcción de un arco. Se trata de un emplazamiento donde las laderas bajan con una pendiente muy fuerte hasta sumergirse dentro del embalse. Por tratarse de un embalse integrado en el sistema de regulación del río Alberche normalmente tiene una cota de embalse muy alta. Además, las condiciones geotécnicas son muy buenas. En las laderas se ve aflorar el estrato de granito muy sano, presentando unas condiciones óptimas para la cimentación de una estructura de esta tipología.

Aún cuando estas circunstancias cumplían rigurosamente las condiciones básicas para la construcción de un arco, desde el principio se tuvo en cuenta que ésta era una obra de presupuesto modesto, que muy probablemente sería adjudicada a empresas de tamaño medio y que existiría una fuerte presión para cambiar su concepción. La concepción de la estructura se planteó desde los primeros momentos con el objetivo principal de facilitar al máximo su construcción y minimizar sus costos.

FHECOR Ingenieros Consultores había participado en el concurso del proyecto y obra del Arco de Ricobayo, con unos condicionantes dimensionales y de diseño similares, y esta nueva experiencia fue una continuación de la iniciada en aquel concurso.

En primer lugar se planteó la idea de abaratar la construcción y mejorar el diseño sustituyendo la solución de sec-

over the Clariano river [8] in Valencia, or at a smaller scale, the Alzira arch bridge [9] or the new arch over the A6 highway near the crossing with the M-40 ring-road [10]. Also the Infante Dom Henrique arch, presently under construction over the Duero river in Oporto can be cited.

In this paper, the main characteristics of the arch bridge are presented together with a discussion of the main ideas which guided the design. Differences and likenesses to other contemporary arch bridges are pointed out. Finally, the conception, building and control of the construction process are described in detail.

2. ASPECTS RELATING TO THE DESIGN

2.1 First ideas and project conditions

The site of the structure is ideal for the construction of an arch. On both sides the ground descends with a very steep slope until entering the water. Due to the fact that the reservoir forms part of the regulation system of the Alberche river, the water level is normally very high. Also the geotechnical conditions are very good. On the hillsides a very good quality granite rock can be observed, presenting optimum conditions for the foundation of this type of structure.

Even though the site conditions were excellent for the building of an arch



Foto 2. Vista del emplazamiento en una de las primeras visitas durante la redacción del proyecto.

Picture 2. View of the site taken in one of the first visits during the project phase.

bridge, from the very beginning, the modesty of the budget available for the work and the fact that it was likely that a small construction company would be chosen were considered. For these reasons much emphasis was placed from the beginning on the need to make construction easy and to minimize costs.

FHECOR Consulting Engineers had taken part in the contest for the design and construction of the Ricobayo arch with dimension and design conditions very similar to those of the Burguillo bridge and this new experience is a prolongation of the one started on that occasion.

The first idea to cut down construction costs and improve the design was to replace the classical solution of a cellu-

lar hollow box section for the arch by a solid rectangular cross section.

In order to do this, a very slender cross section (both longitudinally and transversally) was proposed with the idea that the area of concrete should be more or less the same as in other bridges with similar dimensions. An analysis of the working conditions of arch bridges shows that for most of them the concrete area is such that in Ultimate Limit State, the a -dimensional axial force (maximum factored axial force divided by cross section axial capacity) is about 0.4.

This design allowed the use of a travelling formwork lorry whose cost was significantly less than that of the lorry

ción transversal celular, clásica para arcos de estas dimensiones, por la de arco macizo.

Para ello se planteó una sección transversal muy esbelta tanto longitudinalmente como transversalmente de tal forma que el área de hormigón fuese equivalente a la de los arcos de estas dimensiones. Un análisis de las condiciones de trabajo de la mayoría de los arcos construidos muestra que el área de la sección transversal es tal que para las condiciones de máximo axil en estado límite último el axil reducido (cociente entre el axil máximo de cálculo y el axil máximo resistido por la sección transversal) está en el entorno del valor 0.4.

Este diseño, permitió el uso de un carro de avance, cuyo coste resultó con-

Tabla 2. Comparación de las características de distintos arcos recientemente construidos con las de El Burguillo.
Table 2. Comparison of the characteristics of several arch bridges of recent construction to those of the Burguillo arch.

Estructura	Tipología Tablero	Tipología Arco	Luz arco (m)	L/f	Luz Tablero (m)	Esteltez tablero	Ancho plataforma (b)	$B_{\text{plat}}/b_{\text{arco}}$	Luz/canto arranques	Luz/Canto clave
Structure	Deck Typology	Arch Typology	Arch span (m)	L/f	Deck Span (m)	Deck slenderness	Deck width (b)	$B_{\text{deck}}/b_{\text{arch}}$	Span depth at sprint	Span depth at key
Arco Regenta (1994) [1]	Mixto	Cajón bicelular de hormigón armado	190	3.96	18.00	13.85	8.50	1.41	45.24	79.17
Regenta Arch	Composite	Box with two cells. Reinforced concrete								
Viaducto Peña (1994) [2]	Hormigón Losa nervada	Cajón tricelular	148	3.29	22.00	17.86	25.00	1.68	41.11	70.48
Peña Viaduct	Hormigón Losa nervada	Box with three cells.								
Ricobayo (1996) [3]	Mixto Hormigón acero	Mixto Hormigón-acero	170	6.69	14.16	15.69	12.00	3.00	52.31	97.14
Ricobayo	Composite concrete - steel	Composite concrete - steel								
Grobe Mühl (1992) [4]	Hormigón armado	Doble Hormigón armado	170	3.43	19.50	10.83	16.50	1.83	56.70	68.00
	Reinforced concrete	2 reinforced concrete beams								
Ponte Soi [5]	Hormigón losa nervada	Doble hormigón armado	128	4.41	18.34	12.26	9.50	3.96	55.83	85.60
	Concrete waffle slab	2 reinforced concrete beams								
Kyll Valley [6]	Losa de hormigón	Hormigón armado macizo	222	3.78	34.00	22.70	14.75	2.11	63.64	147.50
	Concrete slab	Reinforced concrete solid section.								
Hundwilertobelbrücke (1991) [7]	Hormigón armado	Doble viga hormigón armado	146	3.76	13.50	16.88	10.76	4.14	51.07	95.33
	Reinforced concrete	Doble Viga Hormigón armado								
Burguillo (1999)	Losa de hormigón	Hormigón armado maciza	165	7.50	13.75	15.28	12.00	3.00	53.23	94.29
	Concrete Slab	Reinforced concrete solid section.								

siderablemente inferior al de un carro de avance para una sección celular. En contrapartida, sin embargo, esta solución da lugar a una dimensión transversal del arco reducida y obliga a un estudio pormenorizado de la estabilidad lateral de la estructura durante la construcción.

En la tabla 2 se muestran las características de distintos arcos construidos recientemente y se comparan con las del arco de El Burguillo.

Como puede verse, la geometría del arco de El Burguillo resulta muy similar a la del arco de Ricobayo, aunque, por otra parte, se trata de estructuras radicalmente distintas desde el punto de vista de los materiales. Ello demuestra que es posible resolver un problema similar con tipologías distintas y demuestra la gran adaptabilidad de los arcos.

El arco de hormigón resultó de un estudio comparativo de distintas posibilidades, arco metálico, arco mixto y de hormigón.

La comparación de las distintas posibilidades de materiales a utilizar debe plantearse teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes que plantean en relación con el procedimiento constructivo.

En este sentido, es conocida la flexibilidad que presentan los arcos metálicos desde el punto de vista constructivo. Su ligereza permite abordar la construcción con medios de elevación modestos y con unos rendimientos muy interesantes. Ésta es la experiencia que FHECOR Ingenieros Consultores pudo adquirir en los estudios del procedimiento constructivo realizados en el arco metálico sobre el río Izbor, en Granada. Una solución de este tipo también se planteó, junto con otra de hormigón, para el concurso de proyecto y obra para el arco de Ricobayo.

En la comparación económica de estas alternativas, se observó que la solución de hormigón salía claramente favorecida frente a la opción metálica lo cual pone de manifiesto que a las ventajas constructivas hay que contraponer el costo de las estructuras metálicas.

Además, en el caso particular de esta obra, debido a que el arranque del arco

queda por debajo del nivel máximo de embalse (aunque por encima del nivel medio) y que dado el carácter rebajado del arco ($L/f=7.5$) no parece posible remediar esta situación, se añade un condicionante adicional que hace de la solución metálica una solución menos idónea.

Otra posibilidad que se estudió fue la de utilizar un arco mixto. Esta tipología fue muy difundida en la primera mitad de siglo. Como ejemplos deben recordarse la colección de arcos de Eugenio Rivera que utilizaban una estructura metálica como autocimbra y posteriormente ésta se aprovechaba asimismo desde el punto de vista resistente. Otro ejemplo notable es el arco ferroviario de Martín Gil proyectado por Eduardo Torroja y construido con este sistema.

FHECOR Ingenieros Consultores también estudió esta posibilidad para la solución de hormigón presentada en el concurso de proyecto y obra para el arco de Ricobayo. Sin embargo, tanto en ese proyecto como en los nuevos estudios para el arco del Burguillo, la gran esbeltez del arco planteado encarecía significativamente el sistema de autocimbra para poder controlar adecuadamente las deformaciones de la parte metálica durante la construcción.

Las soluciones de arco mixto tipo Ricobayo o Tamaraceite son más modernas y, aun cuando presentan ventajas constructivas significativas, parece que conducen a soluciones más caras que las de arco de hormigón. Por otra parte, como ya se ha comentado, la situación de mantener sumergido el arranque del arco, para la condición de máximo embalse, plantea problemas de durabilidad a este tipo de soluciones en este caso concreto, aunque esta dificultad se puede sortear planteando la zona de arranque en hormigón y el resto del arco mixto.

A partir de los estudios anteriores, brevemente descritos, se adoptó como solución para el arco del Embalse de El Burguillo un arco de hormigón que resultó ser la solución más barata y mejor adaptada a los condicionantes de durabilidad derivados del encaje de la estructura.

Otro aspecto que se estudió fue el material a utilizar en la construcción del tablero. En los últimos arcos construi-

needed for a cellular cross section. On the other hand, this solution provides a very reduced width which requires a detailed study of lateral stability during construction.

Table 2 shows the characteristics of several arch bridges of recent construction in comparison to those of the Burguillo arch.

As can be seen the geometry of the Burguillo arch presents several singularities. It is a bridge with a high span-to-rise ration (7.50) and with an important slenderness both at arch springs and at the key.

The geometry of the Burguillo arch is very similar to that of the Ricobayo arch, although, the structures are radically different from the point of view of materials. This shows that it is possible to solve the same problem with different structural typologies and is further proof of the great adaptability of arches.

The concrete arch resulted from a study comparing this solution to other possibilities such as a steel or composite arch.

The comparison between the different possible materials must be made taking into account the advantages and disadvantages which they imply with respect to the construction procedure.

In this sense, the flexibility which a steel solution provides from a construction point of view is well known. Its lightness allows to use simple elevation methods with high efficiency. FHECOR Consulting Engineers acquired this experience with the study of the construction process of the steel arch over the Izbor river in Granada. A solution of this type was also considered, together with a concrete solution for the design and construction contest of the Ricobayo arch.

In the comparison of these alternatives, from the point of view of economy, the concrete solution was clearly the winner. This fact only shows the construction ease of steel solutions must be balanced against their higher cost.

Also, in the specific case of this work, due to the fact that the arch springs are founded below the maximum reservoir level (but above the mean reservoir

level) and also that due to the already high span-to-rise ratio it does not seem possible to change this situation, a new condition is added which makes a steel solution less adequate.

Another possibility which was studied was a composite arch. This typology reached wide popularity in the first half of the XXth century. One example is the arch bridge catalogue of Eugenio Ribera which used the steel structure as scaffolding during construction and as a resistant element during service. Another excellent example is the Martín Gil Railroad arch bridge designed by Torroja and built with this system.

FHECOR Ingenieros Consultores also studied this possibility for the Ricobayo contest. However, both for the Ricobayo bridge as in the further studies for the Burguillo bridge, it was found that the great slenderness of the arch made this system expensive in order to be able to effectively control the deflections of the steel part during construction.

The Ricobayo and Tamaraceite bridges are more modern and, even though they present significant constructive advantages, it seems that they lead to more expensive solutions when compared to a concrete arch. On the other hand, as already mentioned, the fact that the arch springs are under water for the maximum reservoir level condition poses durability problems in this specific case, even though this problem could be solved using reinforced concrete at the springs and a composite solution once the arch is fully out of the water.

Considering the analyses, briefly described above, the solution finally adopted is a reinforced concrete arch. This solution is least expensive and better adapted to the durability conditions derived from the site conditions.

Another aspect which was studied was the material to use in the building of the deck. Most of the arches recently built in Spain have been conceived with a composite deck, although the reasons for this have been different in the different cases.

Even though they are generally more expensive, composite decks also present some interesting qualities. One of these

qualities is that their smaller weight reduces the bearing capacity needed in the arch. Another quality is its usefulness during the construction process when the structure is built using a cantilever composed by arch and deck. The steel part of the deck is used, in this scheme, to resist the tensile forces generated on the top of the cantilever during construction. When a steel arch is used, like in the Izbor river arch, the use of a composite deck is a design necessity which, as has been said, is taken advantage of during construction. Another case when a composite deck is the obvious solution is when the arch is a composite arch such as is the case of the Ricobayo arch.

The use of a composite deck with a concrete arch can also be good solution when construction is carried out by cantilevering with the building of arch and deck at the same time.

Sometimes the smaller weight of the composite deck can become a very determining condition and can be enough to justify such a solution. This was the case in the proposal that FHECOR Ingenieros Consultores made for the contest of the Regenta arch, which needed a widening of the deck without interfering with the design of the arch which was foreseen with a smaller width and conceived as a concrete structure. In this case, the use of a composite deck, allowed to maintain the initial design of the arch without increasing the overall loading and to use the steel deck as a tension chord during construction. A solution of this type was finally adopted for this structure.

Besides all that has been said above, the main reason to use a composite deck is its small weight during the construction process. However, as it will be described in the following text, in this case it was decided to build the arch first and later on to build the deck using the finished arch as a support. Under these circumstances, the use of a steel deck does not provide any advantages during construction and is also a much more expensive solution in terms of material cost when compared with a concrete deck.

One last idea of the design was to produce a structure with a high degree of integration and simplicity, elimina-

dos en España se ha utilizado un tablero mixto, aunque las razones de su uso han sido diferentes en los distintos casos.

Los tableros mixtos, aunque más caros en general, tienen algunos aspectos interesantes. Por un lado, su menor peso contribuye a disminuir las exigencias del arco. Por otro lado, cuando se construye la estructura avanzando en voladizo y utilizando el tablero como cordón traccionado la parte metálica del tablero mixto resulta muy útil para resisitir temporalmente las tracciones generadas durante la construcción. Cuando se utiliza un arco metálico, como en el arco sobre el río Izbor el tablero mixto es una solución obligada que se aprovecha, como se ha dicho, durante la construcción. Otro ejemplo obligado de utilización de tablero mixto es en el caso que el arco sea mixto, como en el caso del arco Ricobayo.

Algunas veces con arcos de hormigón la utilización del tablero mixto puede resultar también ventajosa, especialmente cuando la construcción se realiza por avance en voladizo con atirantamiento provisional y el tablero está traccionado.

A veces el menor peso de la solución de tablero mixto también puede resultar muy condicionante y justificar una solución de este tipo. Este es el caso de la propuesta que FHECOR Ingenieros Consultores realizó para el concurso del arco de la Regenta que requería una ampliación del tablero sin que se afectara al arco ya proyectado para una plataforma de menor anchura e inicialmente de hormigón. En este caso el tablero mixto permitía mantener el arco inicialmente proyectado, aumentar la plataforma sin aumentar las cargas globales y aprovechar la parte metálica del tablero mixto como cordón traccionado durante la construcción. Una solución de este tipo fue finalmente adoptada para esta estructura.

Por otra parte, la principal justificación para un tablero mixto es el reducido peso durante el procedimiento constructivo. Sin embargo, como se describe más adelante, en este caso se optó por construir primero el arco y posteriormente el tablero, utilizando éste como apoyo. En estas circunstancias, la solución metálica no aporta ventajas constructivas importantes y resulta considerablemente más cara que la solución de hormigón.

Una última idea para el diseño, fue la de producir una estructura con un alto grado de integración y simplicidad, eli-

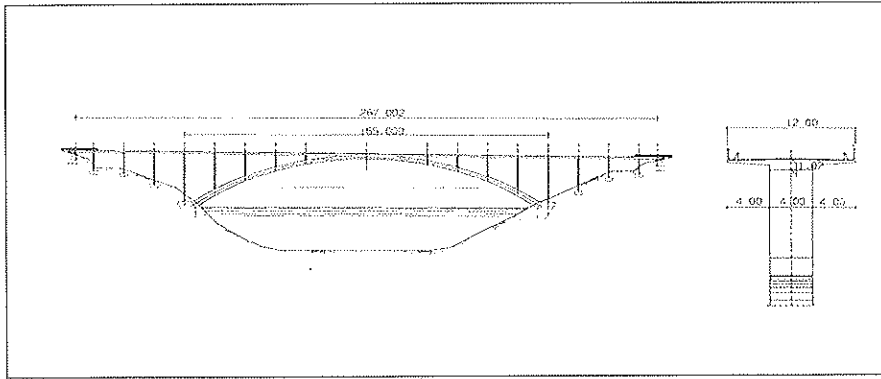


Figura 2. Alzado y sección transversal de la estructura.
Figure 2. Elevation and structure cross section.

minando en la medida de lo posible los aparatos de apoyo, e imponiendo una dimensión común para el ancho del arco y para el ancho inferior del tablero, quedando las pilas, con el mismo ancho, como elemento de conexión.

2.2. Descripción de la solución adoptada

Como resultado de los criterios anteriores, se diseñó una estructura formada por un arco de 165,00 metros de luz, canto variable entre 3,10 m (L/53) en arranques y 1,75 m (L/94) en clave y de 4,00 m de ancho, cuya directriz corresponde aproximadamente al antifunicular de las cargas permanentes.

La flecha en clave es de 22,00 m, por lo que la relación luz/flecha es de 7.5. Se trata, por lo tanto, de un arco muy rebajado.

El tablero tiene 12,00 m de ancho. Esta dimensión se divide en un núcleo de 4,00 m de ancho y dos voladizos también de 4,00 m cada uno. El canto del dintel es de 0,90 m.

El arco y el tablero se unen mediante pilas apantalladas de sección rectangular de 4,00 m de ancho y canto variable en función de la altura. El canto de las pilas se determina con el criterio de mantener, aproximadamente y dentro de unos mínimos constructivos, la esbeltez. De esta manera, la pila más alta tiene 21,50 m de altura y 0,90 m de canto, y la más pequeña tiene 2,1 m de altura y 0,30 m de canto. La variación de la sección transversal en las pilas es posible gracias a que el diseño es muy sencillo y la variación de canto no introduce complicaciones constructivas significativas. Igualmente, la variación del canto produce un efecto visual adecuado.

La separación entre pilas es de 13,75 m sobre el arco. Esta luz, permite que el tablero sea de hormigón armado. Sin embargo, con objeto de minimizar la fisuración, se dispone un pretensado mínimo de trazado recto que se tesa al final del proceso constructivo.

El conjunto se completa con 4 vanos a cada lado que sirven de acceso al vano central.

3. ASPECTOS RELATIVOS A LA CONSTRUCCIÓN

3.1. Introducción

Para la construcción de arcos se pueden adoptar varios procedimientos constructivos. Entre ellos, cabe destacar:

- Construcción sobre cimbra. Este procedimiento sólo es válido en el caso de que el terreno sea accesible (Arco sobre el río Clariano, en Valencia).
- Construcción con autocimbra. Este procedimiento no es competitivo en la actualidad y, de hecho, la falta de alternativas a este procedimiento generó la decadencia de los arcos durante una buena parte de este siglo.
- Construcción de arco y tablero simultáneamente, introduciendo un atirantamiento provisional y avanzado en ménsula. Este procedimiento tiene como desventajas:
 - La necesidad de anclar la tracción horizontal del cordón superior de la ménsula que se genera como consecuencia del peso propio tanto del arco como del tablero.

ting as often as possible the use of bearings and using a common dimension for the deck bottom and the arch width, using the columns, also with the same width, as connection elements.

2.2 Description of the adopted solution

As a result of the above criteria, an arch structure with a span of 165 meters was designed, with variable depth between 3.10 m (L/53) at the springs, and 1.75 m (L/94) at the key and a width of 4.00 meters. The arch shape is approximately the antifunicular shape of permanent loads.

The arch rise is 22.00 m providing a span-to-rise ratio of 7.5. It is therefore a fairly flat arch.

The deck is 12.00 m wide. This dimension is divided into a 4.00 m nucleus and two 4.00 m cantilevers. The depth of the deck is 0.90 m.

The arch and the deck are united by means of rectangular columns with a width of 4.00 m and a depth which is a function of the column height. This dimension was determined with the condition of having more or less, and within minimum construction values, the same slenderness in all columns. In this way the highest column has a height of 21.50 meters and a depth of 0.90 m and the smallest column has 2.1 m of height and 0.30 m of depth. The change in the column cross sections is possible because of the simplicity of the design, which does not introduce significant construction difficulties. Also the variation in depth of the columns introduces a nice visual effect.

The distance between the columns over the arch is 13.75 m. This span, allows a reinforced concrete deck. However, in order to minimize cracking, a minimum amount of longitudinal prestressing was used. The layout of this prestressing is straight and the tensioning was done at the end of the construction process.

The structure is completed by 4 access spans at either side of the arch.

3. CONSTRUCTION ASPECTS

3.1 Introduction

For the construction of arches, different construction procedures may be

adopted. Among these, the following may be mentioned:

- Construction on scaffolding. This procedure is only possible when the site is accessible (e.g. Clariano river arch bridge in Valencia).
- Construction using self scaffolding. This procedure is not competitive in the present conditions and, in fact, the lack of alternatives to this procedure originated the decadence of arch bridges during a good part of the XXth century.
- Simultaneous construction of arch and deck, using provisional diagonal stays and cantilevering. This procedure has the following disadvantages:

- The need to anchor the horizontal tensile force of the top chord of the cantilever which is generated due to the self weight of both arch and deck,
- and the fact that the stiffness of the whole makes it difficult to introduce adjustments in order to correct deviations in the structure geometry which are more or less inevitable.

On the other hand, this is an adequate solution when a composite deck is used and it allows a shorter construction period since it does not require auxiliary structures and allows the simultaneous construction of arch and deck.

- Construction of the arch using a provisional pylon and provisional stays, and construction of the deck at a later stage.

This procedure has the disadvantage that it requires a provisional pylon which must be demolished. Also, this procedure requires that the arch be finished before the building of the deck can start.

However, this procedure has also many advantages:

- It allows to control and correct the geometry at any time of the construction process due to the great flexibility of the arch cantilever.

- Only the force component corresponding to the self weight of the arch (as opposed to arch+deck) needs to be anchored to the ground. Also the weight of the deck can be anchored with a more vertical component than in the previous case.
- The provisional stays allow to introduce a prestressing in the arch in order to compensate for the elastic shortening of the arch due to permanent loads, thereby eliminating the need to introduce jacks at the arch key.

3.2 Description of the construction procedure

After the study of the different alternatives, and taking into account the above discussion, it was decided to build the arch with a provisional stay system and to build the deck in a second stage.

In this way, the arch was built by segmental construction (17 segments of 4.90 m on either side) using a travelling formwork and a provisional stay system. In pictures 3 and 4, and figure 3, some aspects of the construction procedure are shown.

The stay system allows, on the one hand, to insure the stability of the structure during construction and on the other hand to introduce a positive bending moment at the arch springs before closing the arch, thereby compensating the effect of the arch shortening due to permanent loads (short term and long term). This is a considerable advantage since it eliminates the need install jacks at the arch key¹, the dismantling of which poses important construction problems. Also, this procedure allows to save on auxiliary structures and suppresses the risk of lateral buckling since the closing of the arch is done with a relatively small axial force (18000 kN

¹ The original project included the use of jacks placed at the key in order to compensate for the axial shortening due to permanent loads. However, further study led to discard this procedure by substituting it by an over tensioning of the provisional stays prior to the closing of the arch, thereby introducing a positive bending moment at the arch springs which would compensate the negative moment due to shortening.

- y que la rigidez del conjunto dificulta la introducción de ajustes para corregir las desviaciones que se produzcan en la geometría.

En contrapartida se trata de una solución adecuada para una estructura con tablero mixto que permite un plazo de ejecución menor, al no necesitar estructuras auxiliares y poder simultanear la ejecución del arco y del tablero.

- Construcción con atirantamiento provisional del arco, y ejecución posterior del tablero.

Este procedimiento tiene la desventaja de requerir la construcción de un pilar provisional, que, posteriormente, debe ser demolido. Igualmente, el procedimiento requiere finalizar la construcción del arco antes de poder iniciar la construcción del tablero.

Sin embargo, este procedimiento tiene también numerosas ventajas:

- Permite controlar y corregir la geometría en cualquier momento del procedimiento constructivo dada la gran flexibilidad del arco en ménsula.
- Solamente es necesario anclar al terreno la componente correspondiente al peso del arco, pero no la parte correspondiente al peso del tablero. Igualmente, el peso del arco se puede anclar con una componente más vertical que en el caso anterior.
- El atirantamiento provisional permite presolicitar el arco de tal forma que se pueden compensar el acortamiento elástico del arco debido a las cargas permanentes, eliminando la necesidad de disponer gatos en clave.

3.2. Descripción del procedimiento constructivo

Tras el estudio de las posible alternativas, y atendiendo a las razones anteriores, se optó por construir el arco con un atirantamiento provisional y construcción posterior del tablero.

De esta manera, el arco se construyó por dovelas (17 por cada lado) de 4,90 m de longitud, utilizando un carro de avance y un atirantamiento provisional. En las fotos 3 y 4 y en la figura 3 se muestran algunos aspectos del procedimiento constructivo.



Foto 3. Vistas del arco durante procedimiento constructivo.
Picture 3 Views of the arch during the construction procedure.

Este atirantamiento permite, por una parte, garantizar la estabilidad de la estructura durante la construcción, y por otra parte, introducir, antes del cierre, una presolicitación que permite compensar el efecto del acortamiento elástico debido a las cargas permanentes. Esta es una ventaja considerable, ya que permite evitar la disposición de gatos en clave¹, cuya retirada plantea problemas constructivos importantes. Igualmente, el procedimiento permite ahorrar estructuras auxiliares y evita el riesgo de pandeo lateral, puesto que el cierre se produce con un axil en el arco relativamente pequeño (18000 kN a 60000 kN con la carga permanente total).

La construcción del arco sigue, para cada dovela, la secuencia siguiente:

- Posicionado del carro de avance. En general, el replanteo de la dovela se hace en coordenadas relativas respecto de la posición de la dovela anterior. Ello permite eliminar los errores debidos a diferencias puntuales entre geometría teórica y geometría real.

¹ El proyecto original planteaba la introducción de gatos en clave para compensar el acortamiento elástico del peso propio. Sin embargo, esta alternativa se rechazó tras un estudio pormenorizado, optando por compensar este efecto mediante la introducción de una presolicitación utilizando los propios cables de atirantamiento.

compared to 60000 kN of the total permanent load).

The construction of the arch proceeds for each segment as follows:

- Placing of the travelling formwork. In general the formwork is placed relative to the previous segment. This allows to compensate local errors between the theoretical and the real geometries.
- Placing of reinforcement.
- Concreting.
- Adjustment of prestressing in cables in order to re-establish the final theoretical geometry which has been distorted by the concreting of the segment.
- Measurement of the cable forces, the arch geometry and of the displacements of the provisional pylon.
- Measurement of strain gauges placed in specific segments.

With this sequence, and in absence of specific problems, the construction of a segment can be done in one week.

The cable forces are adjusted after the concreting of each segment. The cable forces are determined with the condition

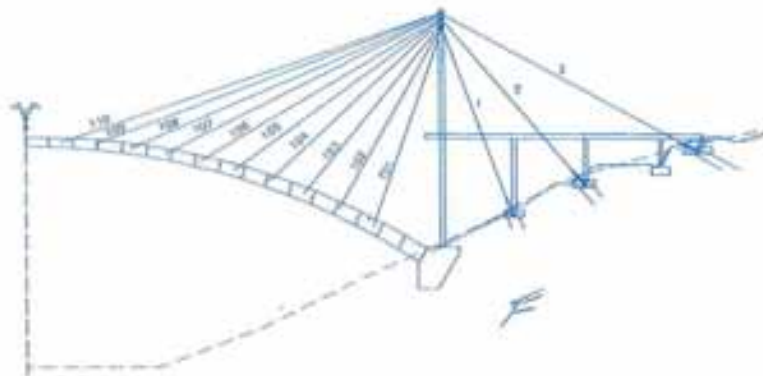


Figura 3. Esquema del proceso constructivo. Definición de la numeración de los cables.
Figure 3. Construction scheme. Stay numbering.

that after adjustment, the arch should have a geometry coinciding with the theoretical one.

In order to determine these forces, a calculation is made in which the areas of all elements are considered infinite. This calculation allows to determine the forces F_{i-}, F_{i+} which the cables must have in order to keep the arch in its theoretical position. With these values, the lengthening or shortening needed in each stay in order to obtain the theoretical forces F_{i-}, F_{i+} at the end of the process, considering the real structure stiffness, is determined. For this, the force which is introduced in each cable i , when a unit strain is applied to cable j , f_{ij} is determined for each stay. The total strain, α_i , which must be applied to each cable is obtained by solving a system of lineal equations:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i f_{ij} = F_i$$

The resulting forces are adjusted when significant deviations in the arch geometry are measured (more than 10 cm). By this procedure it was possible to close the arch with a 5 cm difference between the two sides. The maximum deviations in the achieved geometry as compared to the theoretical geometry were below $L/1000$.

3.3 Instrumentation

In order to control the construction process, a specific instrumentation was conceived. For this, 5 segments were monitored, including the springs, the half point between springs and key and the key.

The instrumentation included 9 concrete strain gauges in each of the 5 segments, as well as 9 corresponding thermocouples.

Also, in order to be able to estimate the force redistributions due to time dependent effects, creep and shrinkage tests were carried out using concrete from the spring segment.

Additionally, the compressive strength of concrete was measured for different ages of concrete (3, 7, 14, 21, 28 y 90 days) in all arch segments (at



Foto 4. Vistas de los carros de avance.
Picture 4. Views of travelling formwork.

least 3 ages for each segment), as well as the modulus of elasticity of concrete for ages of 7, 14, 21 and 28 days in two segments of each side of the arch, and at least one test was carried out in each one of the segments.

In this paragraph, a series of graphics are shown which sum up some of these results. The complete analysis of these results will be the subject of another publication due to its large extension.

3.3.1 Instantaneous tests

– Evolution of the compressive strength

203 compression tests were carried out overall, at different concrete ages and using the concrete of the different segments. In figure 4, a comparison of the test results and the theoretical curve proposed by the Spanish concrete standard (EHE) is shown. As can be seen, the theoretical model provides a reasonably good prediction for the evolution of compressive strength with time.

– Relationship between the compressive strength and the longitudinal modulus of elasticity

A great number of tests to determine the modulus of elasticity of concrete were also carried out. Using these results it was also possible to test the EHE formula for the relationship between

- Ferrallado.
- Hormigonado.
- Retesado de los cables con objeto de recuperar la geometría distorsionada tras el hormigonado de la dovela.
- Comprobación de fuerzas en cables, geometría del arco y desplazamientos en cabeza de la pila provisional.
- Lectura de la instrumentación.

Con esta secuencia, y en ausencia de problemas específicos, la construcción de una dovela se llevaba a cabo en una semana.

Los cables se retesados tras el hormigonado de cada dovela. El criterio para determinar las fuerzas en los cables es que el arco debe tener, tras cada operación de tesado, una geometría que coincida con la geometría teórica.

Para determinar estas fuerzas, se lleva a cabo un cálculo en el cual las áreas de todos los elementos comprimidos se considera infinita. Este cálculo permite determinar las fuerzas F_{i-}, F_{i+} que deben tener los tirantes para conseguir que el arco se sitúe en su geometría teórica. A partir de estos datos, se calculan los alargamientos o acortamientos que hay que introducir en cada cable, considerando la estructura con sus rigideces reales, para obtener, al final del proceso, las fuerzas F_{i-}, F_{i+} teóricas. Para ello, se determina la fuerza que introduce en cada cable i el tesado unitario del cable j, f_{ij} . Los alargamientos, α_i , que hay que-

dar a cada cable se deducen del sistema de ecuaciones lineal:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i f_{0i} = F_i$$

Las fuerzas resultantes se van ajustando cuando se producen desviaciones significativas (mayores de 10 cm) en la geometría obtenida. Mediante este seguimiento fue posible cerrar el arco con una diferencia entre un lado y el otro de 5 cm. Por otra parte, las máximas desviaciones entre el arco construido y la directriz teórica resultaron inferiores a $L/1000$.

3.3. Instrumentación

Con objeto de controlar el procedimiento constructivo, se planteó una instrumentación específica. Para ello se instrumentaron un total de 5 dovelas, incluyendo las dovelas próximas al arranque del arco, los riñones y la clave.

La instrumentación incluye: 9 galgas extensométricas embebidas en el hormigón, por dovela instrumentada, con sus correspondiente termopares.

Igualmente, con objeto de estimar las redistribuciones de esfuerzos por efecto de la fluencia y la retracción, se llevaron a cabo ensayos de fluencia y retracción sobre probetas, utilizando el hormigón de las dovelas de arranque.

Adicionalmente se llevaron a cabo ensayos de compresión simple para distintas edades (3, 7, 14, 21, 28 y 90 días) en todas las dovelas del arco (al menos 3 edades por dovela) y ensayos de módulo de deformación longitudinal para edades de 7, 14, 21 y 28 días en dos dovelas de cada uno de los lados, demás de ensayos para al menos una edad en cada una de las dovelas.

En este apartado se muestran una serie de gráficos en los que se resumen algunos de estos resultados. El análisis completo de los resultados será objeto de una publicación independiente dada la extensión del mismo.

3.3.1. Ensayos instantáneos a nivel de probeta

– Evolución de la resistencia a compresión

Se llevaron a cabo 203 series de ensayos a compresión en las distintas dovelas

y para distintas edades. En la figura 4 se muestra una comparación de estos resultados experimentales con las curvas teóricas propuestas por la Instrucción de hormigón estructural EHE. Se puede ver que el modelo de la instrucción proporciona un ajuste bastante razonable para la evolución de la resistencia con el tiempo.

– Relación entre resistencia a compresión y módulo de deformación longitudinal

Igualmente, se llevaron a cabo un gran número de ensayos de módulo de deformación longitudinal. Aprovechando estos ensayos, se pudo contrastar la formulación de la Instrucción EHE relativa a la relación entre módulo y resis-

en modulus of elasticity and compressive strength. This is shown in the figure 5. As can be seen, fairly good agreement is obtained.

It was also possible to test the formula given in EHE to model the evolution with time of the modulus of elasticity of concrete. Once again good agreement was found between the EHE formulation and the experimental data (See figure 6).

– Specific weight of concrete

The construction procedure is sensitive to the specific weight of concrete. This is due to the fact that the cable stays are equilibrating the self weight present at

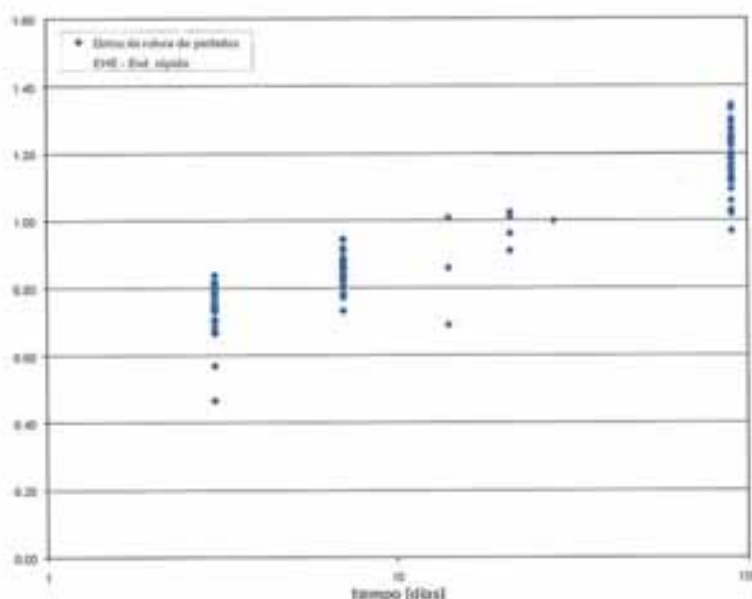


Figura 4. Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo.
Figure 4. Evolution of compressive strength with time.

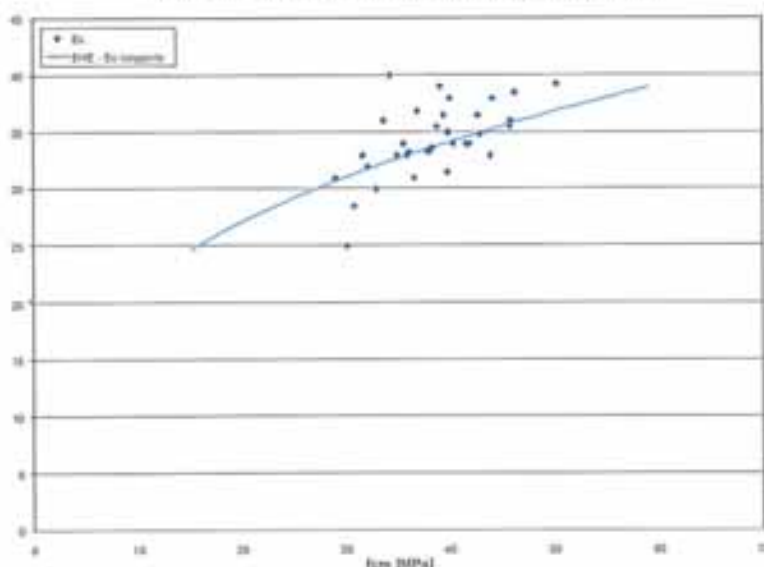


Figura 5. Relación entre módulo tangente y resistencia del hormigón.
Figure 5. Relationship between tangent modulus of elasticity and mean compressive strength of concrete.

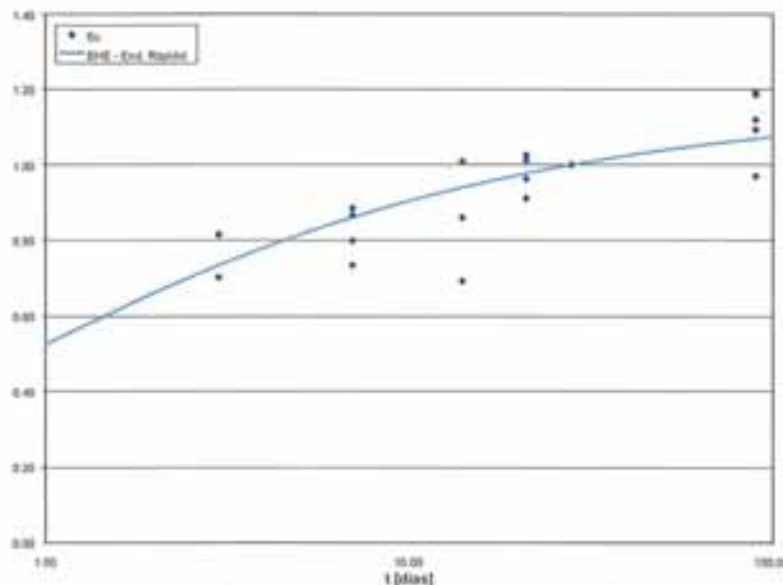


Figura 6. Evolución con el tiempo del módulo de deformación longitudinal.
Figure 6. Evolution with time of the modulus of elasticity of concrete.

each phase of the construction process. This gives way therefore to a subtraction of large quantities whose theoretical result should be zero. Due to this fact, an error in one of the terms, which is small relative to that term, can result in large deviations from the equilibrium sought, giving way to large deviations in terms of deflections, in either direction. For this reason, tests were carried out in order to better estimate the specific weight of the concrete used in the arch. These results are summed in the following table. These values were used in order to refine the calculation of the necessary forces in the stays in each phase.

– Creep and shrinkage tests

Creep and shrinkage tests were carried out. The construction procedure per se is

not very sensitive to the time-dependent behaviour of concrete. This is due to the fact that the cable stays which support the structure during construction and which control the geometry of the structure are not affected by these long-term deformations. After the closing of the arch, however, important force redistributions do take place by action of creep due to the change of support conditions and also due to the effect of shrinkage. These considerations show the need to characterize the time-dependent behaviour of the concrete used in the structure. Following, some results of the shrinkage tests are shown (See figure 7).

It can be seen that a strain of 400×10^{-6} is attained after 200 days and also that, at that time, stabilization of the deformation has not yet taken place.

Tabla 3. Densidad del hormigón del arco.
Table 3. Specific weight of concrete in arch.

	N.º DOVELA SEGMENT #	DENSIDAD [kN/m ³] SPECIFIC WEIGHT [kN/m ³]
EL TIEMBLO	3	23.57
	6	23.21
	8	23.26
	9	23.41
ÁVILA	8	23.17
	8	23.55
	6	23.40

tencia. Esta relación se representa en la figura 5, observándose una buena correlación.

Igualmente se pudo evaluar la fórmula de la EHE que permite modelizar a evolución en el tiempo del módulo de deformación longitudinal, obteniendo nuevamente una correlación adecuada entre teoría y ensayos (Ver figura 6).

– Densidad del hormigón

El procedimiento constructivo resulta sensible a la densidad del hormigón. Esto es debido a que con los cables se está equilibrando el peso propio en cada fase. Se trata por lo tanto de una resta de grandes magnitudes que debe ser igual a cero. Debido a ello, un error, pequeño términos relativos, en una de estas magnitudes produce desviaciones apreciable en términos del equilibrio perseguido y da lugar a flechas importantes ya sean positivas o negativas. Por ello, se llevaron a cabo ensayos con objeto de determinar la densidad real del hormigón utilizado en el arco. Estos resultados se resumen en la tabla siguiente. Estos valores se utilizaron para afinar el cálculo de las fuerzas necesarias en los tirantes en las distintas fases.

– Ensayos diferidos a nivel de probeta

Se llevaron a cabo ensayos de fluencia y de retracción. El procedimiento constructivo en sí es poco sensible a las deformaciones reológicas del hormigón. Ello es debido a que los cables que son los que soportan la estructura durante la construcción del arco y que controlan, en definitiva, la geometría de la estructura no se ven afectados por estos fenómenos. Tras el cierre del arco, sin embargo, sí se producen redistribuciones de esfuerzos importantes por efecto de la fluencia debido al cambio en las condiciones de apoyo y también por la propia retracción. Ello justifica el interés que presenta la caracterización del comportamiento reológico del hormigón utilizado en la estructura. A continuación se muestran los resultados de los ensayos de retracción (Figura 7).

Se observa que se alcanza una deformación de 400×10^{-6} a los 200 días y que además en dicho momento no se ha producido aún la estabilización de la deformación.

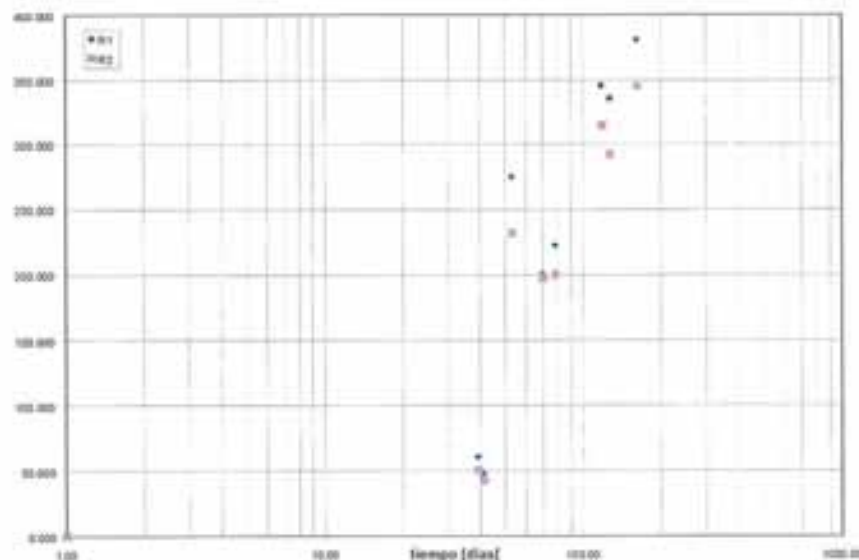


Figura 7. Ensayos de retracción.
Figure 7. Shrinkage test.

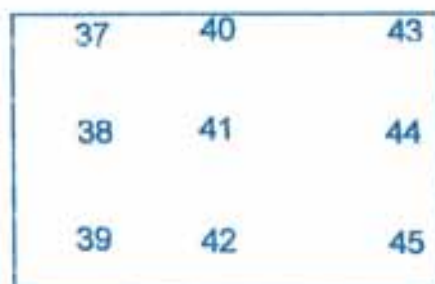


Figura 8. Posición de galgas y termopares en las dovelas.
Figure 8. Position of strain gages and thermocouples in segments.

3.3.2 Measurements on segments

In figure 8, the position of concrete strain gauges and thermocouples, corresponding to the centre arch segment is shown. The same instrumentation was placed in segments 3 and 9 on either side of the arch.

– Measurement of arch temperature

The temperature within the arch was measured by means of thermocouples. At the same time, outside temperature was also measured. In figure 9, the evolution of the temperature inside segment #9 is represented. In the same figure, outside temperature is also shown. It can be seen that concrete hydration temperature reaches 70°C. After this point interior and exterior temperatures follow a similar course showing a certain lag in the concrete temperatures due to its great thermal inertia.

– Measurement of strains

In figure 10 the mean value of the strain in the upper fibres, intermediate fibres and lower fibres of the closing arch segment are shown from the moment when the loosening of the cable stays is begun. It can be seen that the axial deformation within the segment increases steadily as cable stays are released and that both positive and negative bending moments occur at different phases. These values are compatible with the theoretical predictions and confirm the validity of the method used for the measurements (concrete strain gauges and Tokko-Soki measuring equipment).

3.3.2. Medidas en las dovelas

En la figura 8 se muestra la disposición de galgas embebidas y termopares en la dovela de cierre. Esta misma instrumentación se dispuso en las dovelas 3 y 9 tanto del lado de Ávila como del lado de El Tiemblo.

– Medida de la temperatura en el arco

La temperatura se midió en distintos puntos del arco mediante termopares. Igualmente, se controló la temperatura ambiente. En la figura 9 se representa la evolución de la temperatura media del interior de la dovela 9 y en el ambiente. Se observa que se mide un calor de hidratación que alcanza los 70°C tras el hormigonado. A partir de este punto las temperaturas interior y exterior siguen una evolución similar con un cierto desfase debido a la gran inercia térmica del hormigón.

– Medida de deformaciones

En la figura 10 siguiente se muestra la evolución de la deformación media en

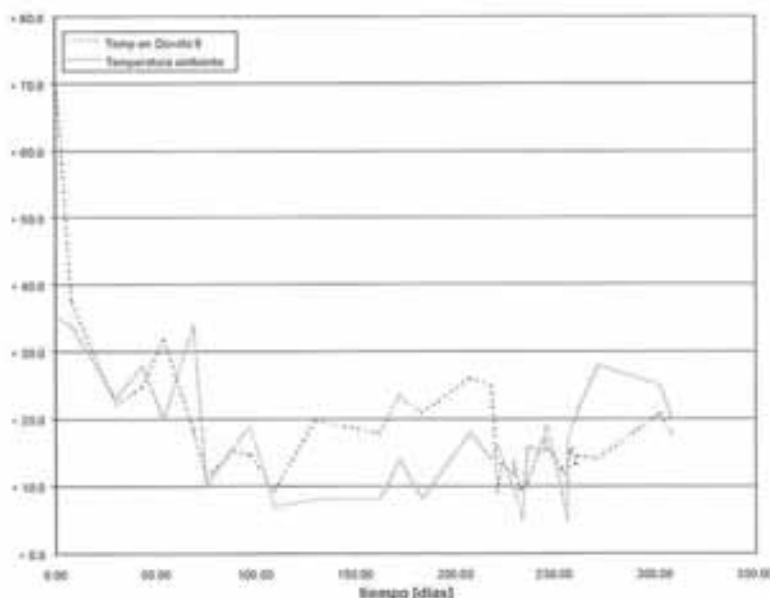


Figura 9. Evolución de la temperatura ambiente y de la temperatura interior de la dovela 9.
Figure 9. Evolution of outside temperature and temperature inside segment 9.

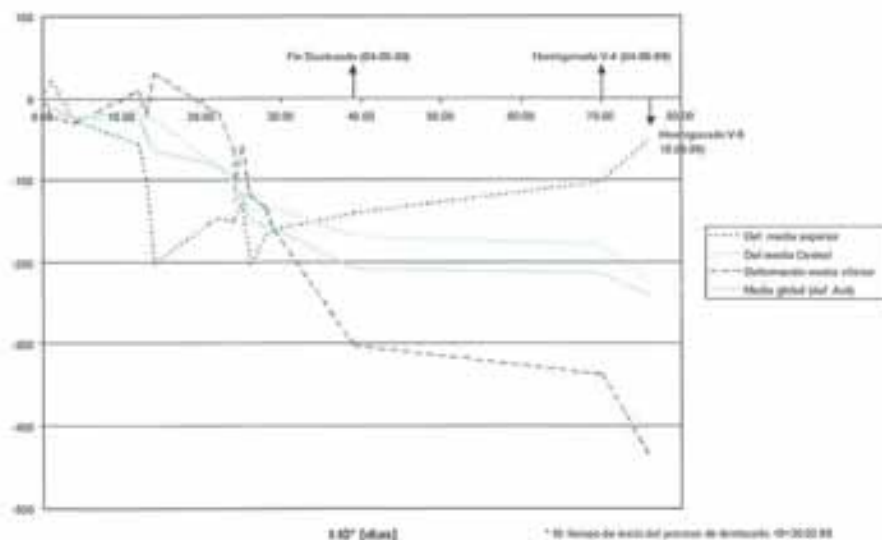


Figura 10. Deformaciones en dovela de cierre debidas al desestado de los cables y el hormigonado de los vanos 4 y 5.

Figure 10. Strains in closing segment due to the loosening of the cable stays and the concreting of the arch deck.

– Evolution of the stay forces

In the figure 11, the evolution of the cable stay forces of the arch half corresponding to the Avila side are shown during the construction sequence up to the concreting of segment number 17. The stays which are anchored to the arch (stays 2101 to 2110) reach their maximum force just before the placing and stressing of the next stay. In the same way, the forces in the back stays (stays 2001 to 2003) increase until another back stay is placed and stressed. At this point the back stay forces remain fairly stable.

4. FINAL COMMENTS

From the above discussion the following points may be emphasized:

- The Burguillo arch is an example of a relatively recent trend marking the comeback of arch structures which is held up by the use of new construction technologies, presently available.

- The design of this bridge is similar in some aspects (slenderness, non-dimensional axial force) to other structures recently built. However, it is also radically different from some of these structures in the choice of materials. This is an indication of the fact that this structural typology is applicable to the full range of material combinations possible using steel and concrete.

- The construction sequence selected (construction of the arch using provisional stays) is also different to that of other arches recently built in Spain. It

has been shown that the selected construction procedure, together with the structural design adopted from the structure (solid arch instead of multicellular arch) has contributed to lower costs and to simplify construction. The main reasons on which this argument is based are the following:

- The travelling formwork of the arch is less expensive

- The ground anchorages are less expensive due to the fact that only the weight due to the arch needs to be anchored (as opposed to the weight of arch+deck).

- It is possible to eliminate the need of introducing jacks at the arch key in order to compensate the axial short-

las fibras superior, intermedia e inferior en la dovela de cierre a partir del momento en que se inicia el desestado del arco. Se observa que va aumentando paulatinamente el esfuerzo axial en la dovela de cierre y que se producen tanto momentos positivos como negativos en las distintas fases. Estos datos son compatibles con las predicciones teóricas y confirman la validez del método utilizado para la medida (galgas embebidas en el hormigón y aparato Tokkio-Soki).

– Evolución de las fuerzas en los tirantes

En la figura 11 se muestra la evolución de las fuerzas en los tirantes del lado Ávila a lo largo del procedimiento constructivo hasta el hormigonado de la dovela 17. Los tirantes que sujetan el arco (Tirantes 2101 a 2110) alcanzan su máxima fuerza justo antes de la introducción y tesado del tirante siguiente. Igualmente, las fuerzas en los cables de retenida (2001 a 2003) crecen hasta la introducción de un nuevo tirante trasero a partir de cuyo momento éstas se estabilizan.

4. CONSIDERACIONES FINALES

De las consideraciones anteriores cabe destacar:

- El arco del Burguillo se enmarca dentro de una tendencia, relativamente reciente, a reivindicar las estructuras en arco, que se apoya en las nuevas tecnologías constructivas, disponibles en la actualidad.

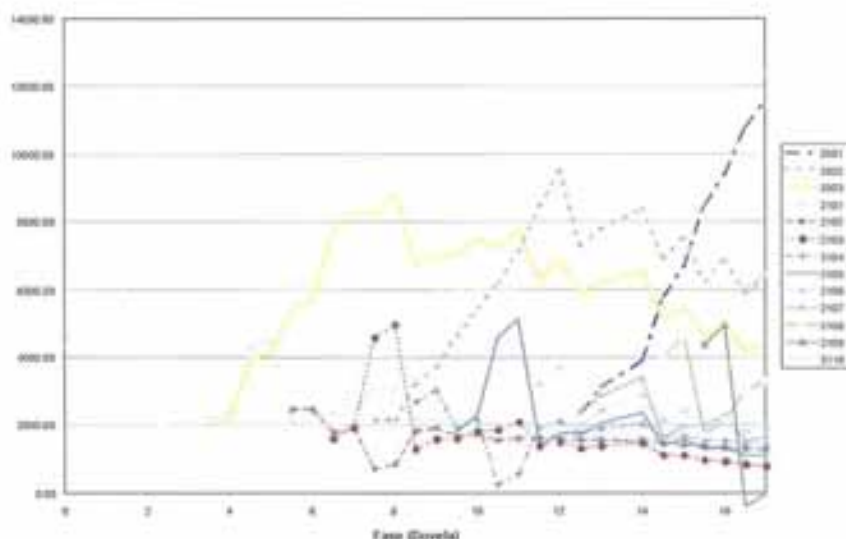


Figura 11. Evolución de la fuerza en los tirantes del lado Ávila.
Figure 11. Evolution of the forces in the stays (Avila half arch).

• El diseño de este arco se asemeja en algunos aspectos (esbelteces, axil reducido) a otras estructuras construidas recientemente. Sin embargo, también se diferencia radicalmente, de algunas de ellas, en los materiales escogidos. Ello indica que esta tipología estructural es aplicable para toda la gama de posibles combinaciones acero-hormigón.

• El procedimiento constructivo elegido (construcción por dovelas con atirantamiento provisional) es, también, distinto al de otros arcos construidos en España. Se ha visto que dicho procedimiento, junto con el diseño adoptado para la estructura (arco macizo en lugar de arco multicelular), ha contribuido a abaratar los costes y simplificar la construcción. Las principales razones que justifican esta afirmación son las siguientes:

– El carro de avance resulta más económico.

– Los anclajes al terreno son menos costosos, puesto que sólo hay que anclar el peso correspondiente al arco y no el correspondiente al tablero.

– Es posible eliminar la necesidad de introducir gatos en la clave para compensar el acortamiento elástico del arco,

puesto que esta presolicitación puede darse con los cables. Ello elimina la necesidad de introducir una estructura auxiliar para asegurar el apoyo de los gatos y elimina riesgos de pandeo lateral del arco.

– El procedimiento permite un control fino de la geometría, puesto que las desviaciones respecto de la geometría teórica pueden eliminarse en cada fase, corrigiendo ligeramente las fuerzas teóricas de los cables, gracias a la gran flexibilidad del sistema.

– El control de las fuerzas en los cables y la geometría en cada fase permitió cerrar el arco con diferencias entre un lado y el otro de 5 cm.

• La información recogida mediante la instrumentación dispuesta fue de gran ayuda para el control del procedimiento constructivo. Aunque en este trabajo sólo se recogen algunos resultados representativos, la información detallada, de gran calidad e interés, está siendo ordenada y sistematizada con vistas a su publicación posterior. Se considera que este tipo de información debe difundirse puesto que puede aportar datos de gran interés para profundizar en el conocimiento del comportamiento de las estructuras reales.

ning of the arch since it is possible to introduce a positive bending moment at the arch springs before closing the arch using the cable stays. This suppresses the need for an auxiliary structure needed to insure the fixing of the jacks. This solution also eliminates the risk of lateral instability during construction.

– The construction procedure allows good control of arch geometry since deviations from the theoretical shape can be corrected at each phase by small corrections to the theoretical cable forces due to the great flexibility of the structure during construction.

– The control of the stay forces and of the geometry at each phase allowed to close the arch with a level difference of one side with respect to the other of 5 cm.

– The information gathered from the monitoring procedure was of great help during construction. Although in this paper only a few results are given, full detailed information is being systematized with view to its publication. It is felt that such information must be made available since it can help to increase knowledge regarding the behaviour of real structures.

5. BIBLIOGRAFÍA BIBLIOGRAPHY

1. Arenas J.J. Pantaleón M.J. et al. Puente de la Regenta sobre el Río Cabo en Asturias. Estructuras Pretensadas en España 1994-1997. XIII Congreso de la FIP y Exposición. Edited by ACHE. 1998.
2. Guinea J.M. Viaducto de "La Peña" sobre el Río Nervión. Cemento-Hormigón nº748. Edited by IECA. 1995.
3. Pérez-Fadón S., Herrero J.E. El Pretensado en el arco de Ricobayo. Estructuras Pretensadas en España 1994-1997. XIII Congreso de la FIP. Edited by ACHE. 1998.
4. Kargel E. Der Taliübergang Grobe Mühl. Beton und Stahlbetonbau 87. 1992.
5. Pini L. Ponte Soi in Valle di Blenio. Stahlton. 1986.
6. Zichner, T. Kyll Valley Bridge. Structural Concrete 1994-1998. FIP Deutscher Beton Verein. E.V.
7. Köppel A., Walser R. Hundwiler-tobelbrücke. Ein bemerkenswerter Neubau. Schweizer Ingenieur und Architekt nr. 11. 1991.
8. Torroja J.A., Villar J.M. Del Valle J.A., García M, et al. Puente sobre el Río Clariano (Onteniente – Valencia). Estructuras Pretensadas en España 1994-1997. XIII Congreso de la FIP. Edited by ACHE. 1998.
9. Romo J., Corres H. A New Composite Arch Bridge in Alzira (Spain). Nordic Steel Construction Conference '95. Malmö, Suecia. 1995.
10. Arenas, J.J. Paso superior del Barrial sobre la autopista A-VI, Madrid – La Coruña, a la altura de Aravaca (Madrid). I^{er} Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ache). Comunicaciones Volumen 3. November 1999.

PUENTE ARCO SOBRE EL EMBALSE DEL BURGUILLO (AVILA)

Hugo Corres Peiretti
Alejandro Pérez Caldentey
Álvaro Ruíz Herranz
José Torrico Narváez

FHECOR ■ Ingenieros Consultores

1. INTRODUCCIÓN

El puente sobre el Embalse del Burguillo, actualmente en construcción, es un arco de hormigón armado de 165,00 metros de luz y de tablero superior, perteneciente a la Variante del Tiemblo. La obra pertenece a la Dirección general de Carreteras, siendo el Director de la Obra D. Manuel Llanes. La empresa constructora es una U.T.E. entre Construcciones Sobrino y Tapusa, siendo el jefe de Obra, D. Antonio Valadés. La puente ha sido proyectada por FHECOR Ingenieros Consultores.

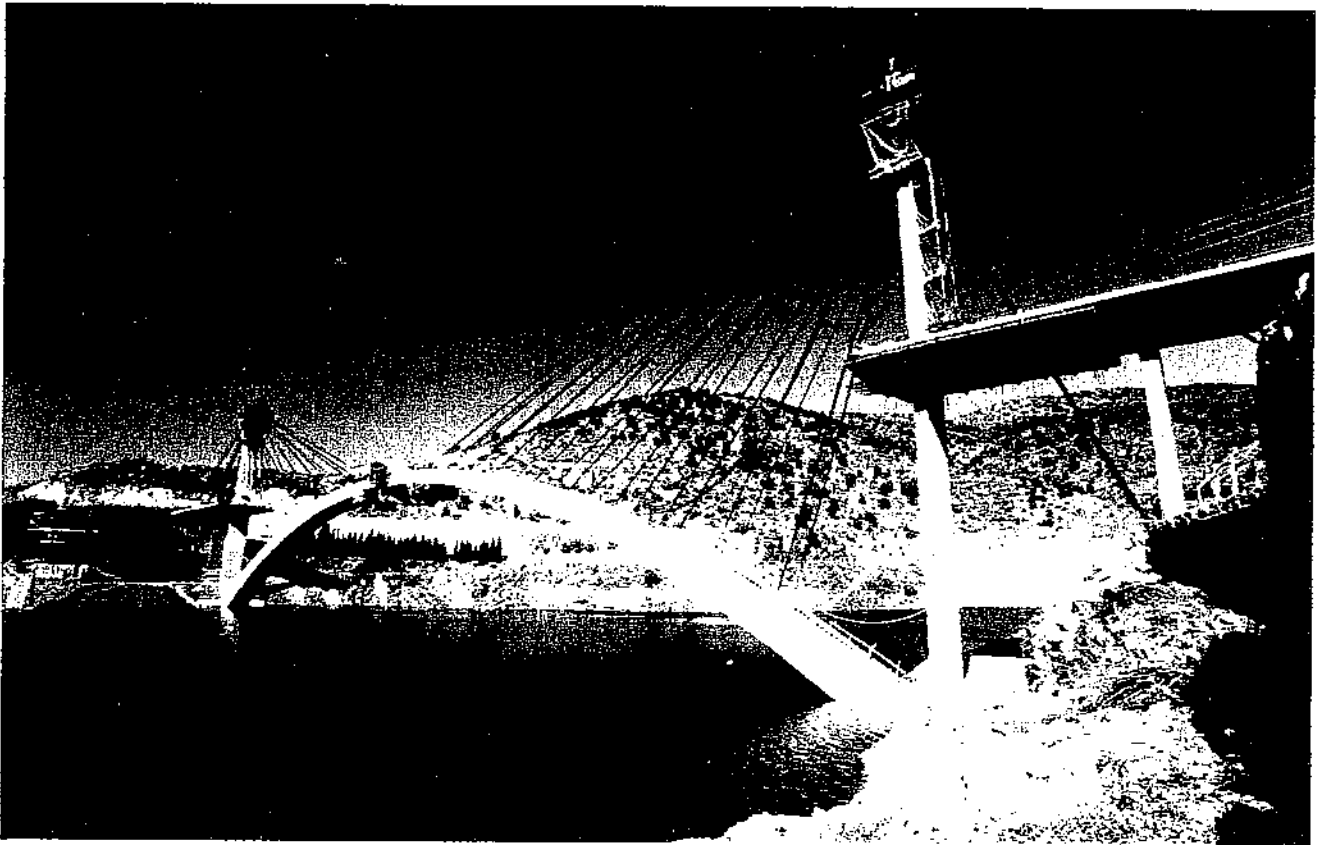


Foto 1 - Vista del arco antes del cierre en clave.

Esta estructura se enmarca dentro de un notable auge de los arcos como tipología estructural, gracias a las nuevas tecnologías constructivas. Como precedentes en los últimos años, en España, cabe citar, entre otros, el arco de la Regenta[1], el Arco de Ricobayo[3], el arco de sobre el Río Clariano[8] en Valencia, o, a menor escala,

el arco de Alzira[9] o el arco, actualmente en construcción, sobre la N-VI a la altura de la M-40 en Madrid.

A continuación se describen algunas de las características principales de la estructura. Igualmente, se comentan algunas de las ideas que guiaron su diseño. En particular, se destacan las similitudes y las diferencias con otras estructuras en arco contemporáneas.

Por último se discute la concepción, ejecución, y control del procedimiento constructivo.

2. DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA

2.1. Ideas previas

Al abordar el diseño del arco, se llevó a cabo, en primer lugar, un estudio sobre estructuras similares, determinando las características principales de arcos existentes. Mediante este primer estudio se determinaron los siguientes criterios para el diseño:

- Esbeltez en arranques en torno a $L/50$
- Esbeltez en clave en torno a $L/100$
- Axil reducido en torno a 0,40.

En segundo lugar, se planteó la idea de abaratar la construcción y mejorar el diseño sustituyendo la solución clásica de sección celular para el arco por la de arco macizo, manteniendo el área total de hormigón, de tal forma que se mantenga el axil reducido máximo en el entorno de 0.4. Este diseño, permitió el uso de un carro de avance, cuyo coste resultó considerablemente inferior al de un carro de avance para una sección celular. En contrapartida, sin embargo, esta solución da lugar a una dimensión transversal del arco reducida y obliga a un estudio profundo del posible pandeo lateral durante la construcción.

Una tercera idea, fue utilizar el hormigón como material, frente a posibles soluciones de arco de hormigón, y tablero metálico (como, por ejemplo, en el arco de la Regenta) o secciones mixtas, tanto de arco como de tablero (como en el arco de Ricobayo). En el caso del Embalse del Burguillo, el uso de hormigón en el arco parece una solución, puesto que para la máxima capacidad del embalse, el arranque del arco queda sumergido.

Por otra parte, la principal justificación para un tablero mixto es el reducido peso durante el procedimiento constructivo. Sin embargo, como se describe más adelante, en este caso se optó por construir primero el arco y posteriormente el tablero, utilizando éste como apoyo. En estas circunstancias, la solución metálica no aporta ventajas constructivas importantes y resulta considerablemente más cara que la solución de hormigón.

Una última idea para el diseño, fue la de producir una estructura con un alto grado de integración y simplicidad, eliminando en la medida de lo posible los aparatos de apoyo, e imponiendo una dimensión común para el ancho del arco y para el ancho inferior del tablero, quedando las pilas, con el mismo ancho, como elemento de conexión.

2.2. Descripción

Como resultado de los criterios anteriores, se diseñó una estructura formada por un arco de 165.00 metros de luz, canto variable entre 3.10 metros (L/53) en arranques y 1.75 metros (L/94) en clave y de 4.00 metros de ancho, cuya directriz corresponde al antifunicular de las cargas.

La flecha en clave es de 22.00 metros, por lo que la relación luz/flecha es de 7.5. Se trata, por lo tanto, de un arco muy rebajado.

El tablero, tiene 12.00 metros de ancho. Esta dimensión se divide en un núcleo de 4.00 metros de ancho y dos voladizos, también, de 4.00 metros. El canto del dintel es de 0.90 metros.

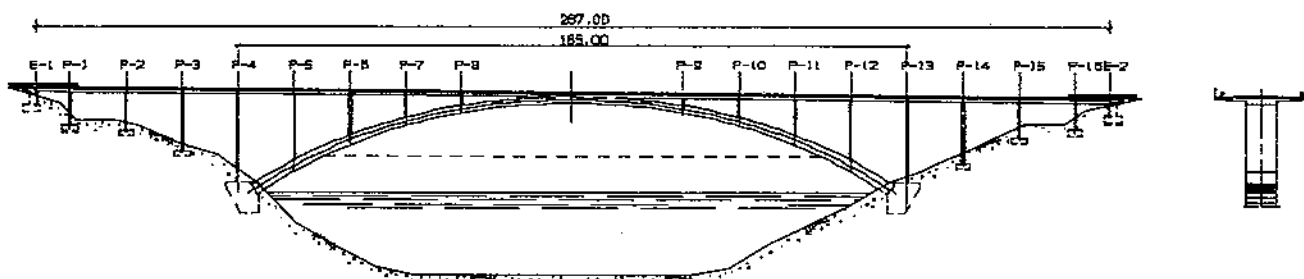


Figura 1 – Alzado y sección transversal de la estructura

El arco y el tablero se unen mediante pilas de sección rectangular de 4.00 metros de ancho y canto variable en función de la altura. El canto de las pilas se determina con el criterio de mantener, aproximadamente y dentro de unos mínimos constructivos, la esbeltez. De esta manera, la pila más alta tiene 25.00 metros de altura y 0.90 metros de canto, y la más pequeña tiene 2.5 metros de altura y 0.35 metros de canto. La variación de la sección transversal en las pilas es posible gracias a que el diseño es muy sencillo y la variación de canto no introduce complicaciones constructivas significativas. Igualmente, la variación del canto produce un efecto visual adecuado.

La separación entre pilas es de 13.75 metros sobre el arco. Esta luz, permite que el tablero sea de hormigón armado. Sin embargo, con objeto de minimizar la fisuración, se dispone un pretensado mínimo de trazado recto que se tesa al final del proceso constructivo.

El conjunto se completa con 4 vanos a cada lado que sirven de acceso al vano central.

2.3. Comparación con otras estructuras

En la tabla 1 se comparan algunas magnitudes de este arco y de otros arcos construidos recientemente.

Como puede verse, la geometría del arco del Burguillo, se asemeja a la de arcos de características similares, aunque se encuentra próxima al rango de las estructuras más esbeltas y más rebajadas.

En particular, la geometría del arco del Burguillo resulta muy similar a las del arco de Ricobayo, aunque, por otra parte, se trata de estructuras radicalmente distintas desde el punto de vista de los materiales. Ello demuestra que es posible resolver el mismo problema con tipologías distintas y demuestra la gran adaptabilidad de los arcos.

Estructura	Tipología Tablero	Tipología Arco	Luz arco [m]	L/f	Luz Tablero [m]	Esbeltez tablero	Ancho plataforma (b)	B_{plata}/b_{arco}	Luz/canto arranques	Luz/canto clave
Arco de la Regenta (1994) [1]	Mixto	Cajón bicelular de Hormigón Armado	190	3.96	18.00	13.85	8.50	1.41	45.24	79.17
Viaducto de la Peña (1994) [2]	Hormigón. Losa nervada	Cajón tri-celular	148	3.29	22.00	17.86	25.00	1.68	41.11	70.48
Ricobayo (1996) [3]	Mixto hormigón - acero	Mixto hormigón-acero	170	6.69	14.16	15.69	12.00	3.00	52.31	97.14
Große Mülh (1992) [4]	Hormigón armado	Doble Hormigón armado	170	3.43	19.50	10.83	16.50	1.83	56.70	68.00
Ponte Soi [5]	Hormigón. Losa nervada	Doble Hormigón Armado	128	4.41	18.34	12.26	9.50	3.96	55.83	85.60
Kyll Valley [6]	Losa de hormigón	Hormigón armado. Macizo.	222	3.78	34.00	22.70	14.75	2.11	63.64	147.50
Hundwilertobelbrücke (1991) [7]	Hormigón armado	Doble Hormigón armado	146	3.76	13.50	16.88	10.76	4.14	51.07	95.33
Burguillo (1999)	Losa de hormigón	Hormigón armado. Maciza.	165	7.50	13.75	15.28	12.00	3.00	53.23	94.29

Tabla 1 – Principales Características de algunos arcos de tablero superior de reciente construcción.

3. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

3.1. Introducción

Para la construcción de arcos se pueden adoptar varios procedimientos constructivos. Entre ellos, cabe destacar:

- Construcción sobre cimbra. Este procedimiento sólo es válido en el caso de que el terreno sea accesible (Arco sobre el Río Clariano, en Valencia)
- Construcción con autocimbra. Este procedimiento no es competitivo en la actualidad y, de hecho, la falta de alternativas a éste procedimiento generó la decadencia de los arcos durante una buena parte de este siglo.
- Construcción de arco y tablero simultáneamente, introduciendo un atirantamiento provisional y avanzando en ménsula. Este procedimiento tiene como desventajas:
 - la necesidad de anclar la tracción horizontal del cordón superior de la ménsula que se genera como consecuencia del peso propio tanto del arco como del tablero,
 - y que la rigidez del conjunto dificulta la introducción de ajustes para corregir las desviaciones que se produzcan en la geometría.

En contrapartida, se trata de una solución adecuada para una estructura con tablero mixto que permite un plazo de ejecución menor, al no necesitar estructuras auxiliares y poder simultanear la ejecución del arco y del tablero.

- Construcción con atirantamiento provisional del arco, y ejecución posterior del tablero. Este procedimiento tiene las siguientes ventajas:
 - permite controlar y corregir la geometría en cualquier momento del procedimiento constructivo dada la gran flexibilidad del arco en ménsula.
 - Sólomente es necesario anclar al terreno la componente correspondiente al peso del arco, pero no la parte correspondiente al peso del tablero. Igualmente, el peso del arco se puede anclar con una componente más vertical que en el caso anterior.
 - El atirantamiento provisional permite presolicitar el arco de tal forma que se puedan compensar el acortamiento elástico del arco debido a las cargas permanentes, eliminando la necesidad de disponer gatos en clave.

Como contrapartida, este procedimiento tiene la desventaja de requerir la construcción de un pilar provisional, que, posteriormente, debe ser demolido. Igualmente, el procedimiento requiere finalizar la construcción del arco antes de poder iniciar la construcción del tablero.

3.2. Descripción del procedimiento constructivo

Tras el estudio de las posibles alternativas, y atendiendo a las razones anteriores, se optó por construir el arco con un atirantamiento provisional.

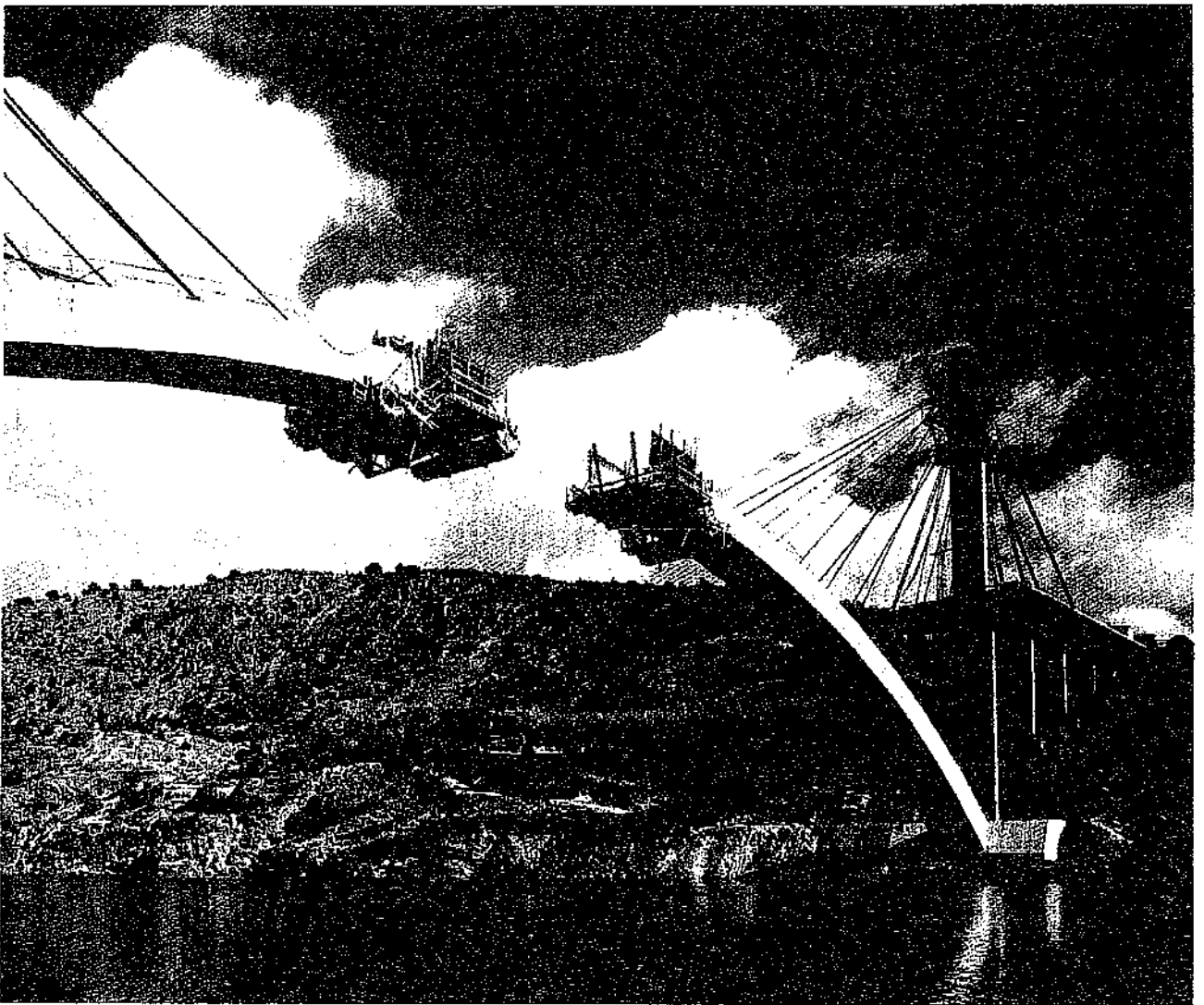


Foto 2 Vista del arco en una fase del procedimiento constructivo.

De esta manera, el arco se construye por dovelas (17 por cada lado) de 4.90 metros de longitud, utilizando un carro de avance y un atirantamiento provisional.

Este atirantamiento permite, por una parte, garantizar la estabilidad de la estructura durante la construcción, y por otra parte, introducir, antes del cierre, una presolicitación que permite compensar el efecto del acortamiento elástico debido a las cargas permanentes. Esta es una ventaja considerable, ya que permite evitar la disposición de gatos en clave¹, cuya retirada plantea serios problemas constructivos. Igualmente, el procedimiento permite ahorrar estructuras auxiliares y evita el riesgo de pandeo lateral, puesto que el cierre se produce con un axil en el arco relativamente pequeño (18000 kN frente a 60000 kN con la carga permanente total).

La construcción del arco sigue, para cada dovela, la secuencia siguiente:

¹ El proyecto original planteaba la introducción de gatos en clave para compensar el acortamiento elástico del peso propio. Sin embargo, esta alternativa se rechazó tras un estudio pormenorizado, optando por compensar este efecto mediante la introducción de una presolicitación utilizando los propio cables de atirantamiento.

- Posicionado del carro de avance. En general, el replanteo de la dovela se hace en coordenadas relativas respecto de la posición de la dovela anterior. Ello permite eliminar los errores debidos a diferencias puntuales entre geometría teórica y geometría real,
- Ferrallado
- Hormigonado
- Retesado de los cables
- Comprobación de fuerzas en cables, geometría del arco y desplazamientos en cabeza de la pila provisional.
- Lectura de la instrumentación.

Con esta secuencia, y en ausencia de problemas específicos, la construcción de una dovela se lleva a cabo en una semana.

Los cables se retesan tras el hormigonado de cada dovela. El criterio para determinar las fuerzas en los cables es que el arco debe tener, tras cada operación de tesado, una geometría que coincida con la geometría teórica.

Para determinar estas fuerzas, se lleva a cabo un cálculo en el cual las áreas de todos los elementos comprimidos se considera infinita. Este cálculo permite determinar las fuerzas $F_i..F_n$ que deben tener los tirantes para conseguir que el arco se sitúe en su geometría teórica. A partir de éstos datos, se calculan los alargamiento o acortamientos que hay que introducir en cada cable, considerando la estructura con sus rigideces reales, para obtener, al final del proceso, las fuerzas $F_i..F_n$ teóricas. Para ello, se determina la fuerza que introduce en cada cable i el tesado unitario del cable j , f_{ij} . Los alargamientos, α_j , que hay que dar a cada cable se deducen del sistema de ecuaciones lineal:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_j f_{ij} = F_i$$

Las fuerzas resultantes se van ajustando cuando se producen desviaciones significativas (mayores de 10 cm) en la geometría obtenida. Mediante este seguimiento fue posible cerrar el arco con una diferencia entre un lado y el otro de 5 cm. Por otra parte, las máximas desviaciones entre el arco construido y la directriz teórica resultaron inferiores a $L/1000$.

3.3. Instrumentación

Con objeto de controlar el procedimiento constructivo, se planteó una instrumentación específica. Para ello se instrumentaron un total de 5 dovelas, incluyendo las dovelas próximas al arranque del arco, los riñones y la clave.

La instrumentación incluye, 9 galgas extensométricas embebidas en el hormigón, por dovela instrumentada, con sus correspondientes termopares.

Igualmente, con objeto de estimar las redistribuciones de esfuerzos por efecto de la fluencia y la retracción, se llevaron a cabo ensayos de fluencia y retracción sobre probetas, utilizando el hormigón de las dovelas de arranque. Igualmente, se llevaron a cabo ensayos para determinar el módulo de deformación longitudinal del hormigón de cada una de las dovelas.

4. CONSIDERACIONES FINALES

De las consideraciones anteriores cabe destacar:

- El arco del Burguillo se enmarca dentro de una tendencia, relativamente reciente, a reivindicar las estructuras en arco, que se apoya en las nuevas tecnologías constructivas, disponibles en la actualidad.
- El diseño de este arco se asemeja en algunos aspectos (esbelteces, axil reducido), a otras estructuras construidas recientemente. Sin embargo, también se diferencia radicalmente, de algunas de ellas, en los materiales escogidos. Ello indica que esta tipología estructural es aplicable para toda la gama de posibles combinaciones acero - hormigón.
- El procedimiento constructivo elegido (construcción por dovelas con atirantamiento provisional) es, también, distinto al de otros arcos construidos en España. Se ha visto que dicho procedimiento, junto con el diseño adoptado para la estructura (arco macizo en lugar de arco multicelular), ha contribuido a abaratar los costes y simplificar el procedimiento. Las principales razones que justifican esta afirmación son las siguientes:
 - El carro de avance resulta más económico
 - Los anclajes al terreno son menos costosos, puesto que sólo hay que anclar el peso correspondiente al arco y no el correspondiente al tablero.
 - Es posible eliminar la necesidad de introducir gatos en la clave para compensar el acortamiento elástico del arco, puesto que esta presolicitación puede darse con los cables. Ello elimina la necesidad de introducir una estructura auxiliar para asegurar el apoyo de los gatos y elimina riesgos de pandeo lateral del arco.
 - El procedimiento permite un control fino de la geometría, puesto que las desviaciones respecto de la geometría teórica pueden eliminarse en cada fase, corrigiendo ligeramente las fuerzas teóricas de los cables, gracias a la gran flexibilidad del sistema.
 - El control de las fuerzas en los cables y la geometría en cada fase, permitió cerrar el arco con diferencias entre un lado y el otro de 5 cm.

5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Arenas J.J. Pantaleón M.J. et al *Puente de la Regenta sobre el Río Cabo en Asturias*. Estructuras Pretensadas en España 1994-1997. XIII Congreso de la FIP y Exposición. Editado por ACHE. 1998.

[2] Guinea J.M. *Viaducto de "La Peña" sobre el Río Nervión*. Cemento-Hormigón nº748. Editado por IECA. 1995.

[3] Pérez-Fadón S., Herrero J.E. *El Pretensado en el arco de Ricobayo*. Estructuras Pretensadas en España 1994-1997. XIII Congreso de la FIP y Exposición. Editado por ACHE. 1998.

[4] Kargel E. *Der Talübergang Große Mühl*. Beton und Stahlbetonbau 87. 1992.

[5] Pini L. *Ponte Soi in Valle di Blenio*. Stahlton. 1986.

[6] Zichner, T. *Kyll Valley Bridge*. Structural Concrete 1994-1998. FIP Deutscher Beton Verein. E.V.

[7] Köppel A., Walser R. *Hundwilertobelbrücke. Ein bemerkenswerter Neubau*. Schweizer Ingenieur und Architekt nr. 11. 1991.

[8] Torroja J.A., Villar J.M. Del Valle J.A., García M, et al. *Puente sobre el Río Clariano (Onteniente – Valencia)*. Estructuras Pretensadas en España 1994-1997. XIII Congreso de la FIP y Exposición. Editado por ACHE. 1998.

[9] Romo J., Corres H. *A New Composite Arch Bridge in Alzira (Spain)*. Nordic Steel Construction Conference '95. Malmö, Suecia. 1995.