

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

Hugo Corres Peiretti
José Romo Martín
Alejandro Pérez Caldentey
Álvaro Ruiz Herranz
Julio Sánchez Delgado



1. Introducción

El puente sobre el embalse de El Burguillo es un arco de hormigón armado de 165,00 metros de luz (268 metros de longitud) y de tablero superior, perteneciente a la Variante de El Tiemblo. La obra pertenece 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 de El Tiemblo es un proyecto realizado en 1995 y adjudicado para 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 metros de la presa del embalse del Burguillo. La longitud total de la variante es de 8 km y cuenta con 11 estructuras, entre las que destacan 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, 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, debido a que éste sobresale significativamente de la planta del arco.

A pesar de ello, el coste por metro cuadrado del arco estuvo en torno a los 125.000 pta/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 del Burguillo.

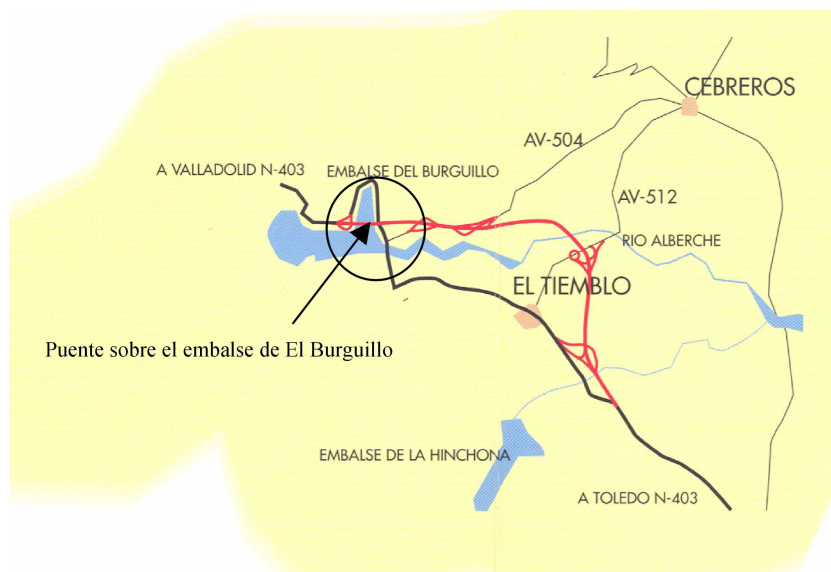
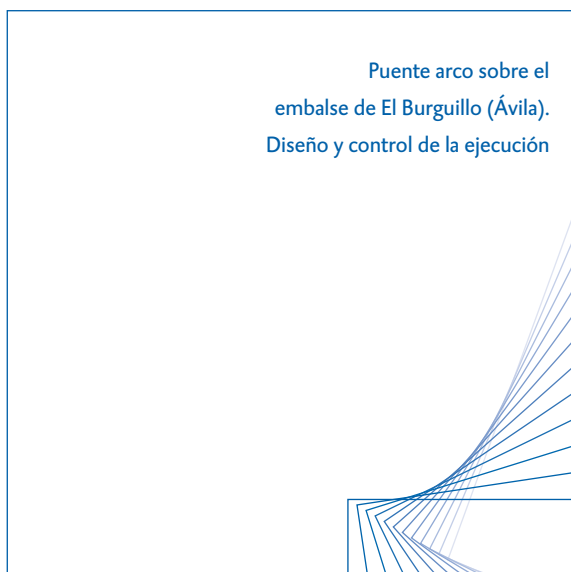


Figura 1. Situación de la obra.

El puente sobre el embalse del Burguillo se enmarca dentro de un notable auge de los arcos como tipología estructural, gracias a las nuevas tecnologías constructivas.

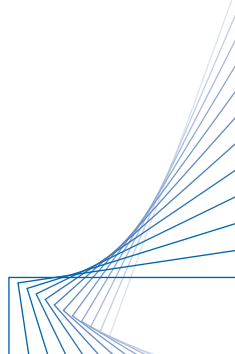
Como precedentes en los últimos años en España cabe citar, entre otros, el arco de la Regenta [1], el arco de Ricobayo [3], el arco de sobre el río Clariano [8] en Valencia o, a menor escala, el arco de Alzira [9] o el arco sobre la N-VI a la altura de la M-40 en Madrid [10]. También puede citarse el arco actualmente en construcción sobre la desembocadura de el Duero en Oporto (Puente Infante Dom Enrique).

Unidad	Medición	Cuantía	
m ³ hormigón en tablero	1794.94	0.56	m ³ /m ²
m ³ hormigón en arco	1607.81	0.50	m ³ /m ²
m ³ de hormigón en pilas	480.77	0.15	m ³ /m ²
m ³ hormigón en cimentación	1609.26	0.50	m ³ /m ²
m ³ hormigón en provisional	176.40	0.05	m ³ /m ²
kg de acero en arco	195074.278	121.33	kg/m ³
kg de acero en tablero	290833.719	162.03	kg/m ³
kg de acero de pretensar en tablero	22384.599	6.96	kg/m ²
kg de acero en pilas	61917.425	128.79	kg/m ³
kg de acero en cimentaciones	109429.952	68.00	kg/m ³
kg de acero en tirantes provisionales	56140.012	3.00	kg/m ²

Tabla 1. Principales cantidades de la obra.

En este trabajo se describen las características principales de la estructura y se comentan las ideas que guiaron su diseño. En particular, se

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



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.

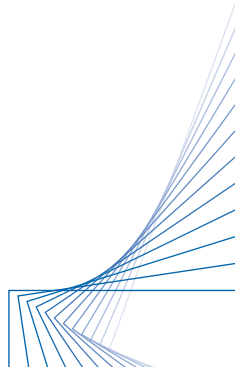
En las laderas se ve aflorar el estrato de granito muy sano, presentando unas condiciones óptimas para la cimentación de una estructura de esta tipología. Aun cuando estas circunstancias cumplían rigurosamente las condiciones básicas para la construcción de un arco, desde el principio se tuvo en cuenta 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.



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

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

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



Para ello, se planteó una sección transversal muy esbelta, tanto longitudinal 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.

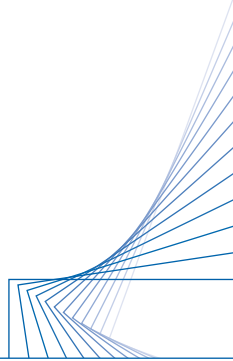
Este diseño, permitió el uso de un carro de avance, cuyo coste resultó considerablemente inferior al de un carro de avance para una sección celular. En contrapartida, sin embargo, esta solución da lugar a una dimensión transversal del arco reducida y obliga a un estudio pormenorizado de la estabilidad 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 presenta distintas singularidades. Es un arco muy esbelto, con una relación flecha-luz igual a 7.50 y con unas esbelteces en la sección de arranque y clave muy importantes.

En particular, 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.

Estructura	Tipología tablero	Tipología arco	Luz arco [m]	L/f	Luz tablero [m]	Esbeltez tablero	Ancho plataforma	Bplat/barco	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 tritelular	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 viga hormigón armado	170	3.43	19.50	10.83	16.50	1.83	56.70	68.00
Ponte Soi [5]	Hormigón losa nervada	Doble viga hormigón armado	128	4.41	18.34	12.26	9.50	3.96	55.83	85.60
Kyll Valley [6]	Losa hormigón macizo	Hormigón armado	222	3.78	34.00	22.70	14.75	2.11	63.64	147.50
Hundwilertobelbrü (1991) [7]	Hormigón armado	Doble viga hormigón armado	146	3.76	13.50	16.88	10.76	4.14	51.07	95.33
Burguillo (1999)	Losa de hormigón	Hormigón armado macizo	165	7.50	13.75	15.28	12.00	3.00	53.23	94.29

Tabla 2. Comparación de las características de distintos arcos recientemente construidos con las de El Burguillo.

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



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 utilizables 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. Esta 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.

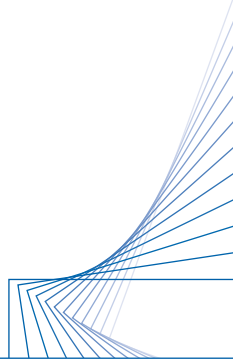
Además, en el caso particular de esta obra, debido a que el arranque del arco queda por debajo del nivel máximo de embalse (aunque por encima del nivel medio) y que dado el carácter rebajado del arco ($L/f=7.5$) no parece posible remediar esta situación, se añade un condicionante adicional que hace de la solución metálica un 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 de El 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.

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



A partir de los estudios anteriores, brevemente descritos, se adoptó como solución para el arco del embalse del 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 que se iba a utilizar en la construcción del tablero. En los últimos arcos construidos en España se ha utilizado un tablero mixto, aunque la 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 resistir 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 de 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. Éste 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 la 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, 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.

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

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 metros (L/53) en arranques y 1.75 metros (L/94) en clave y de 4.00 metros de ancho, cuya directriz corresponde aproximadamente al anti-funicular de las cargas permanentes.

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 cada uno. El canto del dintel es de 0.90 metros.

El arco y el tablero se unen mediante pilas apantalladas 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 21.50 metros de altura y 0.90 metros de canto, y la más pequeña tiene 2.1 metros de altura y 0.30 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.

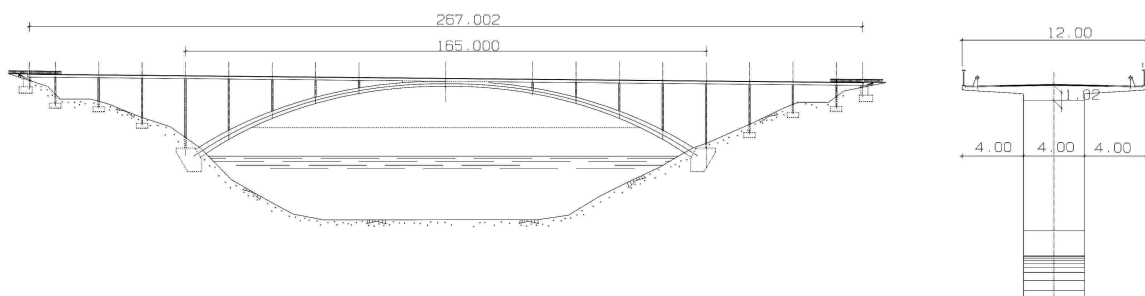


Figura 2. Alzado y sección transversal de la estructura.

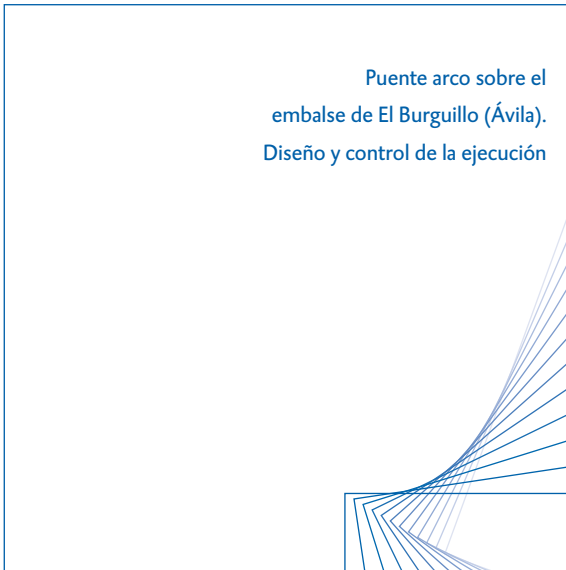
La separación entre pilas es de 13.75 metros sobre el arco. Esta luz permite que el tablero sea de hormigón armado. Sin embargo, con objeto de minimizar la fisuración, se dispone un pretensado mínimo de trazo recto que se tesa al final del proceso constructivo.

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 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.
 - 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.

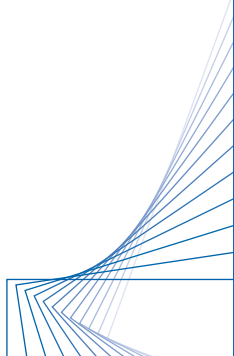
Sin embargo, este procedimiento tiene también numerosas ventajas:

- 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 puedan 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 posibles alternativas, y atendiendo a las razones anteriores, se optó por construir el arco con un atirantamiento provisional y construcción posterior del tablero.

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



De esta manera, el arco se construyó por dovelas (17 por cada lado) de 4.90 metros de longitud, utilizando un carro de avance y un atirantamiento provisional. En la foto 3 y en la figura 5 se muestran algunos aspectos del procedimiento constructivo.

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. Ésta 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 (18.000 kN frente a 60.000 kN con la carga permanente total).



Foto 3. Vistas del arco durante procedimiento constructivo.

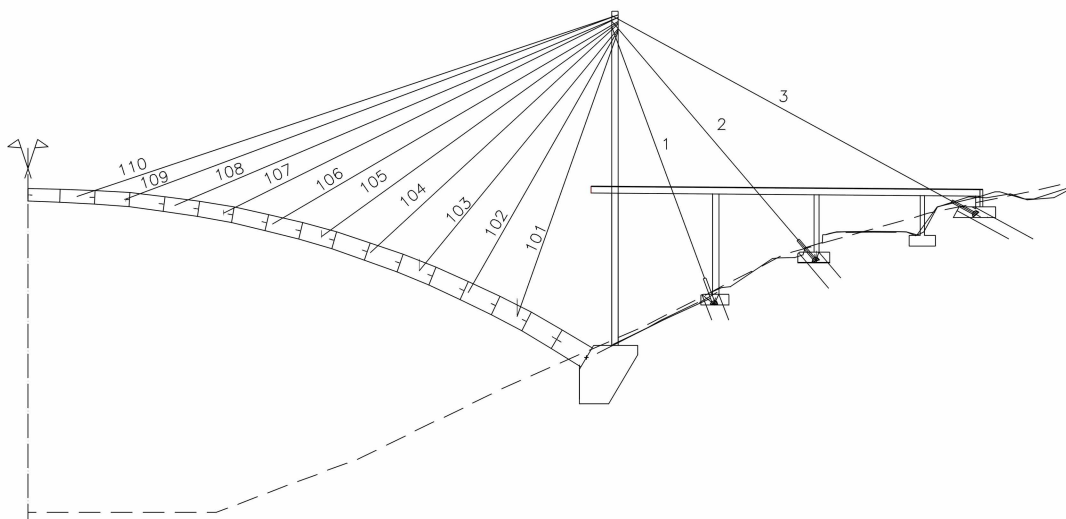


Figura 3. Esquema del proceso constructivo. Definición de la numeración de los cables.

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.

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

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.
- 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.



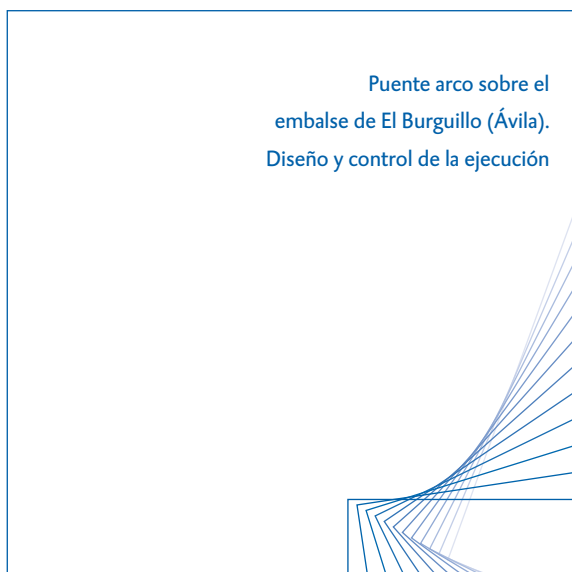
Foto 4. Vistas de los carros de avance.

Con esta secuencia, y en ausencia de problemas específicos, la construcción de una dovela se llevaba 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 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 $F_i..F_n$ teóricas. Para ello, se determina la fuerza que introduce en cada cable i el tesado unitario del cable j , f_{ij} . Los alargamientos, a_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.

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, además 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 siguiente se muestra una comparación de estos resultados experimentales con las curvas teóricas

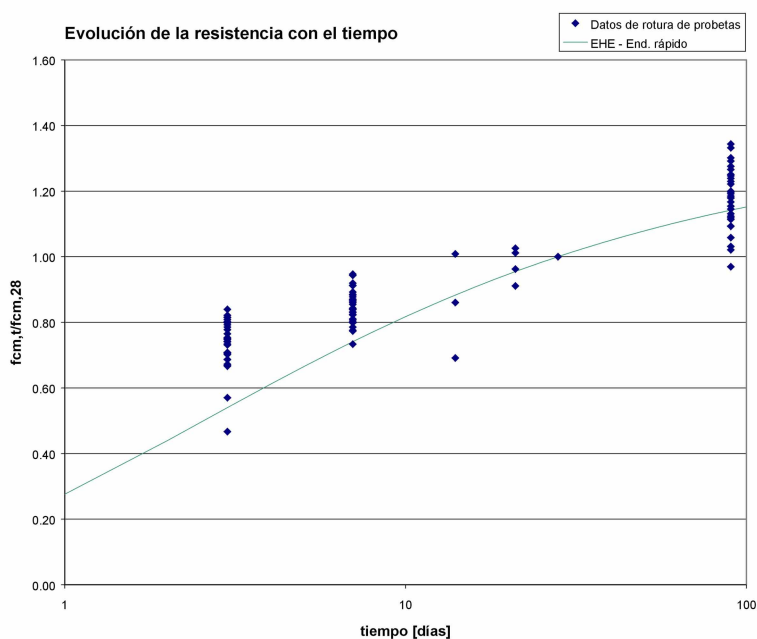
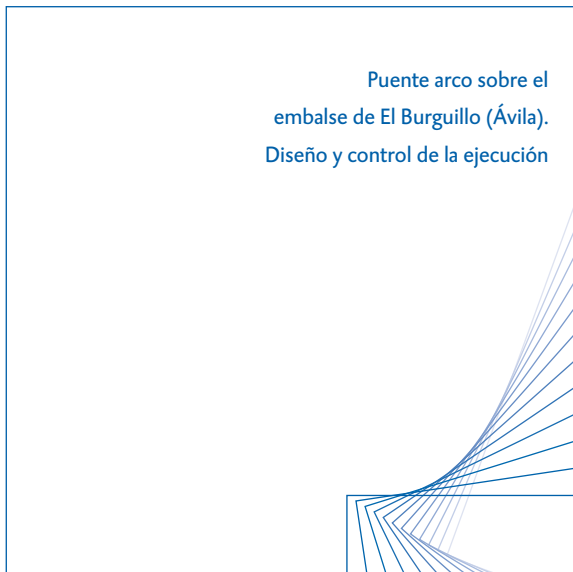


Figura 4. Evolución de la resistencia a compresión con el tiempo.



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 resistencia. Esta relación se representa en la figura siguiente, observándose una buena correlación.

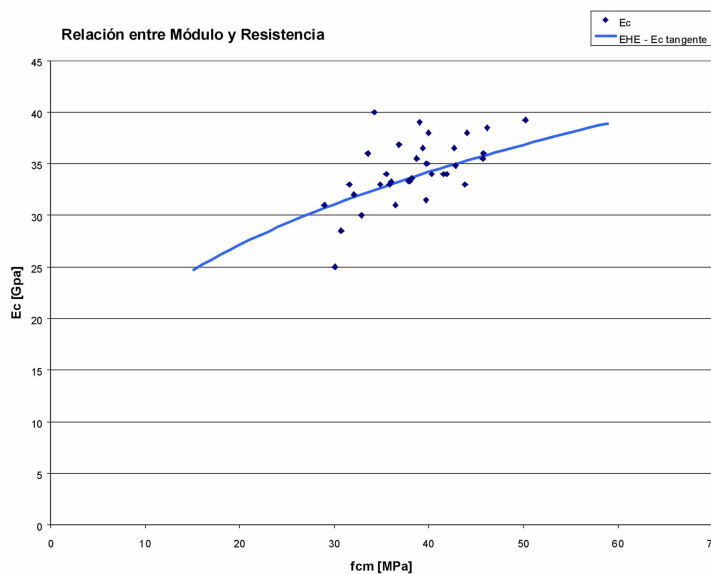


Figura 5. Relación entre módulo tangente y resistencia del hormigón.

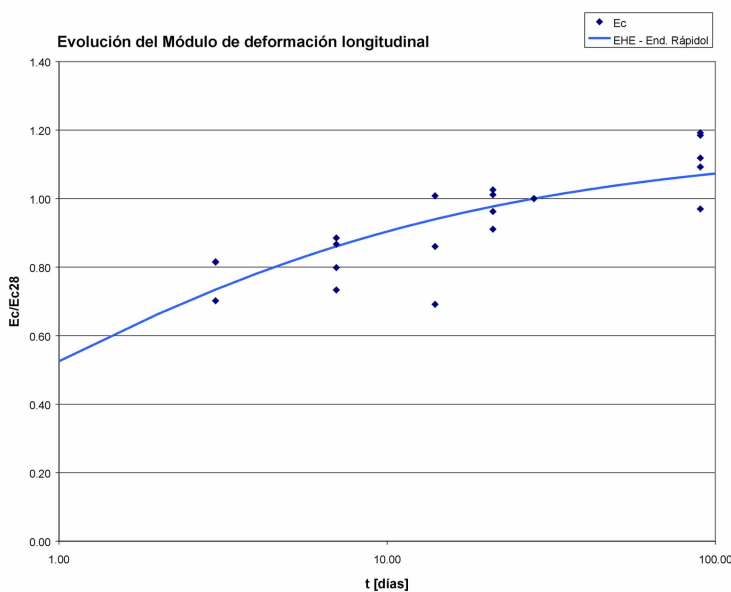
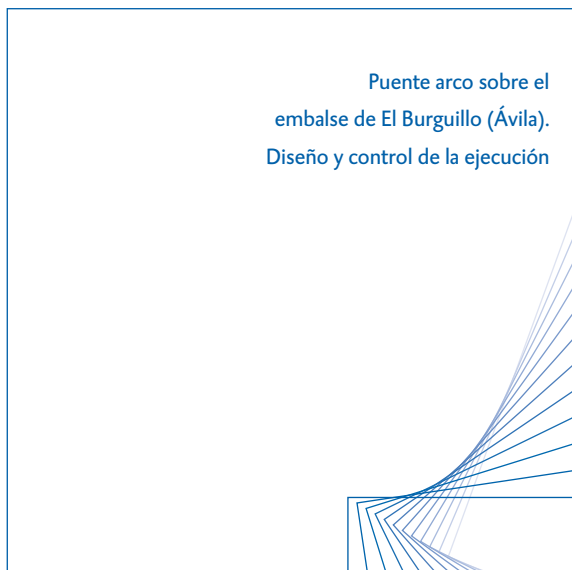


Figura 6. Evolución con el tiempo del módulo de deformación longitudinal.



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

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 que debe ser igual a cero. Debido a ello, un error, pequeño en términos relativos, en una de estas magnitudes produce desviaciones apreciables 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.

	Nº D=VELA	DENSIDAD [kN/m³]
LADO EL TIEMBLO	3	23.57
	6	23.21
	8	23.26
	9	23.41
LADO ÁVILA	8	23.17
	8	23.55
	6	23.40

Tabla 3. Densidad del hormigón del arco.

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.

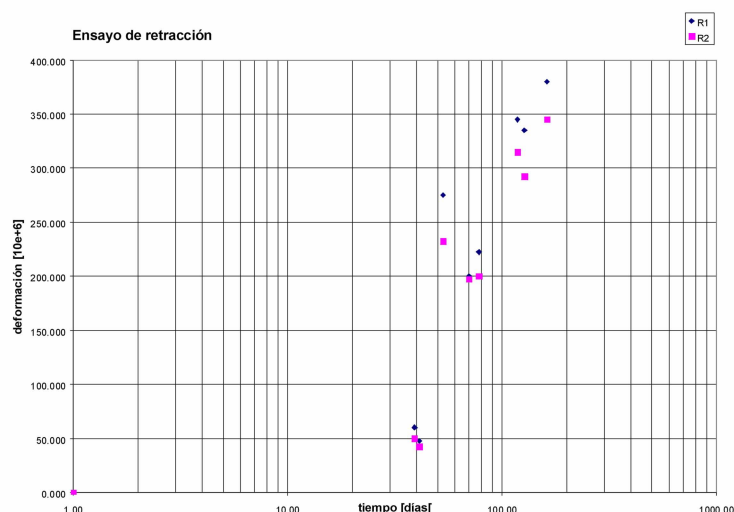
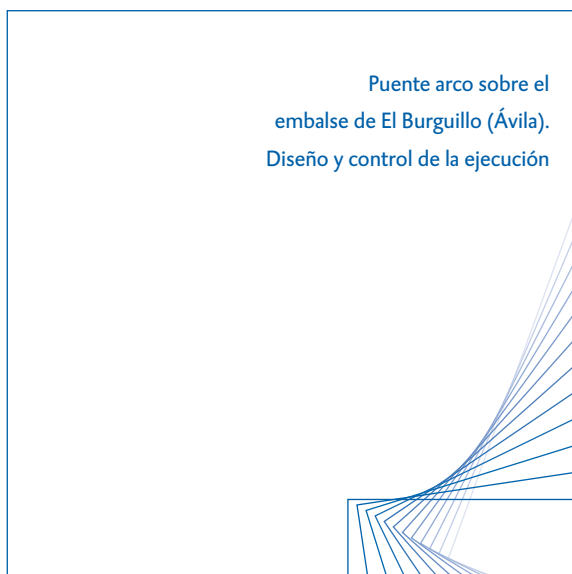


Figura 7. Ensayos de retracción.



37	40	43
38	41	44
39	42	45

Figura 8. Posición de galgas y termopares en las dovelas.

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, si 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. Se observa que se alcanza una deformación de 400 me a los 200 días y que además en dicho momento no se ha producido aún la estabilización de la deformación.

3.3.2 Medidas en las dovelas

En la figura siguiente 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 el gráfico siguiente 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.

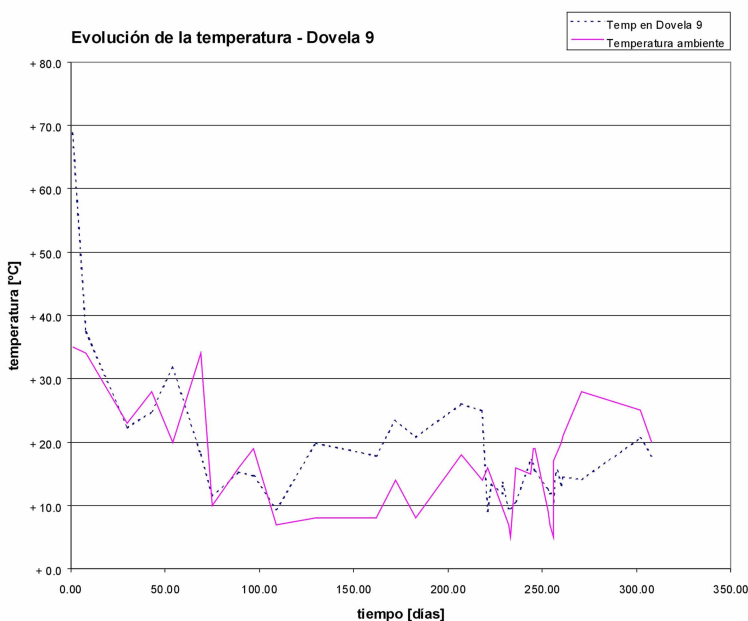


Figura 9. Evolución de la temperatura ambiente y de la temperatura interior de la dovela 9.

Medida de deformaciones

En la figura siguiente se muestra la evolución de la deformación media en las fibras superior, intermedia e inferior en la dovela de cierre a partir

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

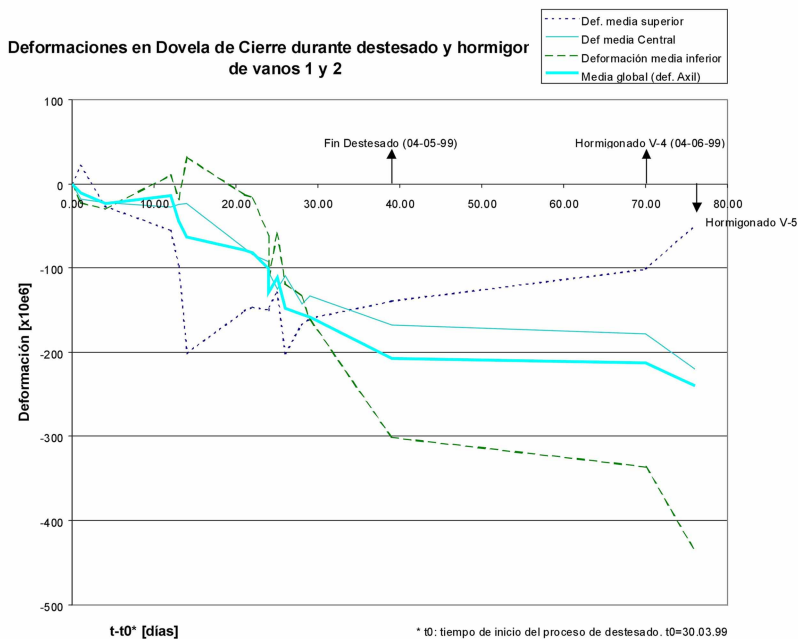


Figura 10. Deformaciones en dovela de cierre debidas al destesado de los cables y el hormigonado de los vanos 4 y 5.

del momento en que se inicia el destesado 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 siguiente se muestra la evolución de las fuerzas en los tirantes del lado Ávila a lo largo del procedimiento constructivo hasta el hor-

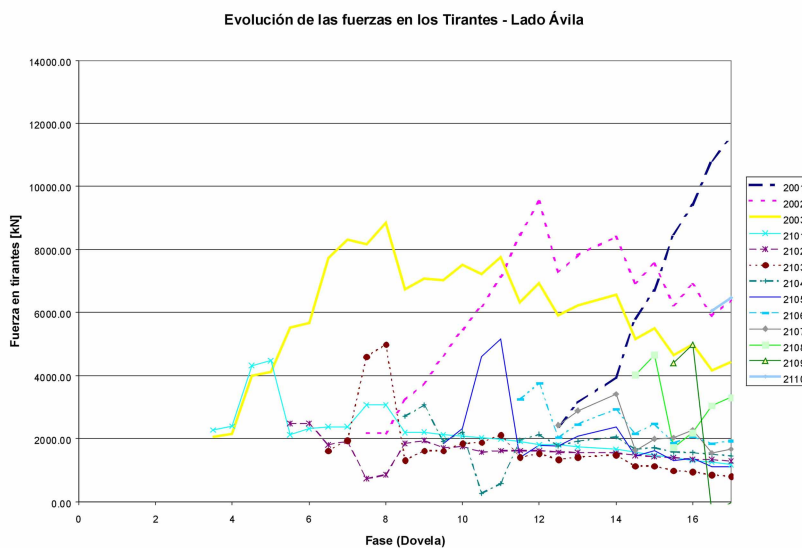
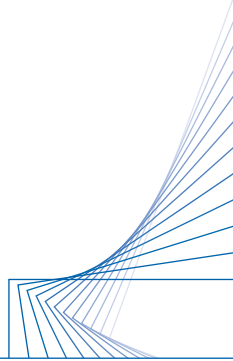


Figura 11. Evolución de la fuerza en los tirantes del lado Ávila.

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



migonado 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 de El 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 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.

5. BIBLIOGRAFÍA

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

- [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. Editado por ACHE. 1998.
- [4] Kargel E. *Der Talübergang Grobe Mühl*. Beton und Stahlbetonbau 87. 1992.
- [5] Pini L. Ponte Soi in Valle di Blienio. 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. 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.
- [10] Arenas, J.J. *Paso superior del Barrial sobre la autopista A-VI, Madrid – La Coruña, a la altura de Aravaca (Madrid)*. Ier Congreso de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Comunicaciones Volumen 3. Noviembre de 1999.