

VIADUCTO DE ARCHIDONA (LAV CÓRDOBA-GRANADA): 3.150 M DE DINTEL MIXTO SIN JUNTAS DE DILATACIÓN

Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
IDEAM S.A.
Presidente
general@ideam.es

Jesús MARTÍN SUÁREZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
IDEAM S.A.
Jefe de Proyectos
jesus.martin@ideam.es

Enrique BORDÓ BUJALANCE

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
IDEAM S.A.
Jefe de Proyectos
enrique.bordo@ideam.es

Juan Luis MANSILLA DOMÍNGUEZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
IDEAM S.A.
Ingeniero de Proyectos
juanluis.mansilla@ideam.es

RESUMEN

El Viaducto de Archidona se incluye dentro de las obras de la LAV Córdoba-Granada, en la provincia de Málaga. Se trata de un viaducto de longitud total 3.150 m, con juntas únicamente en los estribos, dando lugar a una longitud libre entre aparatos de dilatación de vía record del mundo hasta el momento. El tablero se ha solucionado con un dintel mixto de canto constante, y vanos tipo de 50,0 m de luz, de tipología similar a la del Viaducto del Arroyo de las Piedras. El diseño de la subestructura ha venido condicionado por la estrategia antisísmica y las necesidades de tolerar las importantes deformaciones térmico-reológicas del puente. Se ha prestado especial atención, dada la magnitud de la obra, a los aspectos constructivos, de sistematización y prefabricación, y de control de ejecución de la estructura metálica.

PALABRAS CLAVE: Puentes mixtos, Alta Velocidad, longitud de dilatación, sismo, estructura metálica, Control de ejecución.

1. Introducción

El Viaducto de Archidona se ubica en el tramo Archidona-Peña de los Enamorados, dentro de la L.A.V. Córdoba-Granada. La estructura se concibe para dar solución a la necesidad de salvar una longitud total de valle de más de tres kilómetros, con unos condicionantes ciertamente singulares:

- situación en una zona de acciones sísmicas importantes (aceleración sísmica básica: 0,11 g; aceleración sísmica de cálculo: 0,18 g);
- altura media de pilas en el entorno de los 25 m;
- intención de evitar en lo posible la ubicación de aparatos de dilatación de vía en la estructura, respetando unos movimientos totales máximos en las juntas de vía de 1200 mm, de acuerdo con los criterios establecidos por el ADIF.

La posible solución de múltiples vanos isostáticos, que resulta en general adecuada para viaductos de gran longitud y baja cota de rasante, se descartó por la excesiva deformabilidad del conjunto [pilas+cimentación], no admisible por la vía, frente a las acciones de frenado y del sismo

de servicio, resultando además muy penalizada por la resistencia frente al sismo máximo de cálculo. Ello llevó a optar por la solución de dintel continuo. Dado que no se consideraba aconsejable, por razones de mantenimiento, disponer aparatos de dilatación de vía en el interior del tablero, el punto fijo hubo de quedar obligatoriamente ubicado aproximadamente en el centro de los 3150 m de longitud total del viaducto, obteniéndose unas longitudes máximas dilatables en ambos estribos en el entorno de los 1600 m. Debido a la deformación que resultaría por acciones térmico-reológicas de emplear una solución en hormigón (que habría dado lugar a movimientos superiores a los recorridos máximos admisibles por los aparatos de dilatación de vía), se eligió una en dintel mixto, del cual se contaba con experiencia reciente por el diseño del Viaducto sobre el Arroyo de las Piedras.

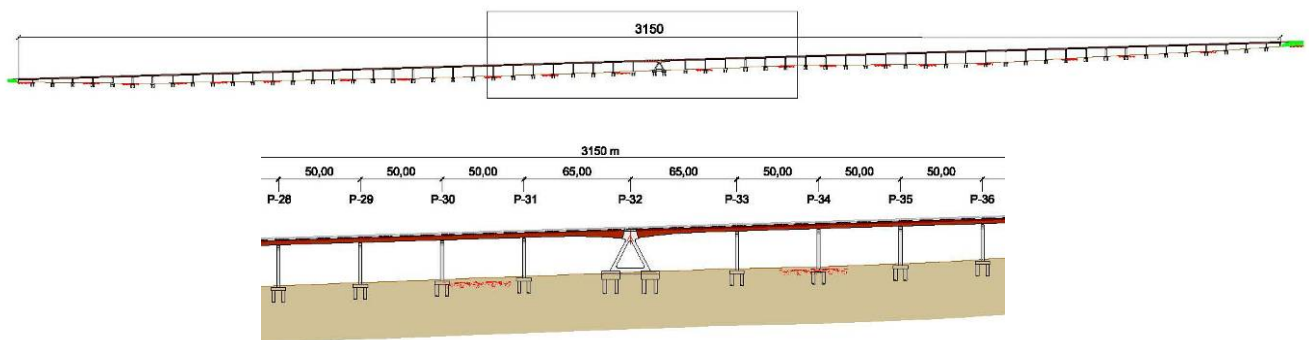


Figura 1. Alzado del Viaducto de Archidona.

Como luego veremos, la mayor flexibilidad longitudinal y la menor masa de los tableros mixtos con respecto a los de hormigón permitieron asimismo limitar a valores asumibles las reacciones debidas a los efectos sísmicos de la totalidad de los 3150 m de tablero, soportados en longitudinal con un único punto fijo central. Las potencialidades de los sistemas mixtos permitieron en este caso resolver con un diseño sencillo, y hasta cierto punto convencional, unos singulares condicionantes hasta ahora inéditos en el ámbito de los puentes de alta velocidad.

2. Descripción de la estructura

La solución elegida para el tablero consiste en un dintel mixto de canto constante en sección bijácena metálica (Figuras 2 y 3), de 2,95 m de canto, más una losa superior de 0,40 m de espesor uniendo ambas almas. La separación entre vigas es de 6 metros a nivel superior, disponiéndose con las almas ligeramente inclinadas, por lo que su anchura aumenta a lo largo del canto hasta llegar a 6,60 m en la cara inferior. La losa inferior de hormigón que cierra la sección sirve para materializar la doble acción mixta en las secciones de flexión negativa y para cerrar el circuito de torsión en las secciones de centro de vano. El diseño de la sección semejante al empleado en el Viaducto del Arroyo las Piedras. La sección es visitable e inspeccionable en su totalidad, transitando por el interior sobre la losa inferior de hormigón armado, permitiendo el acceso a las cabezas de las pilas y a los aparatos de apoyo mediante mamparos diseñados con esta finalidad.

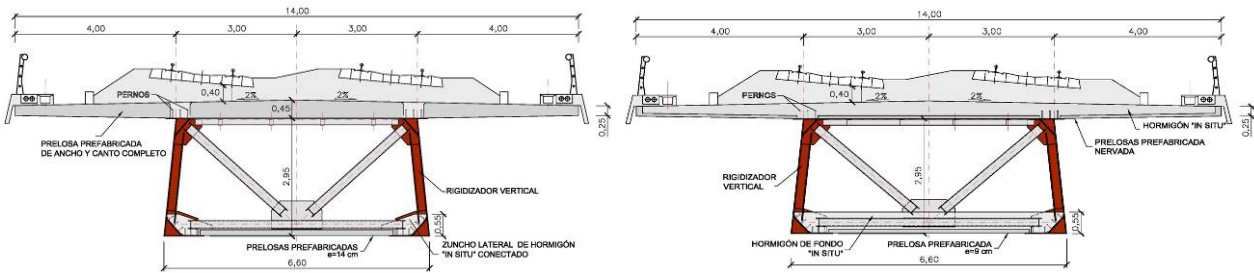


Figura 2. Sección por zona de centro de vano. Figura 3. Sección por zona de momentos negativos.

La distribución de luces de la estructura es 35,00 + 30 x 50,00 + 2 x 65,00 + 29 x 50,00 + 35,00 m (total 3.150 m). Dentro de esta secuencia, los vanos laterales de 35,0 m permiten una adecuada compensación del vano tipo y los de 65,0 m corresponden a los adyacentes al punto fijo o pila central, en el que se empotran. La luz del vano tipo, de 50 m, se decidió en función de la altura de las pilas y las dimensiones y pesos que resultan aceptables para un montaje con grúa, pensando en una solución constructiva competitiva. La secuencia de vanos tipo, de 50 m, además, resulta muy adecuada desde el punto de vista de la sistematización y repetitividad de la construcción. Este aspecto es importante a la hora de obtener una estructura más sencilla de construir, y por lo tanto más económica. Durante la fase de proyecto se cuidaron al máximo las diferentes facetas del diseño, tanto desde el punto de vista meramente estructural, estético, o funcional (por ejemplo, disponiendo los postes de catenaria (cada 50 m) coincidiendo con los ejes de apoyo sobre las pilas tipo, donde los movimientos (rotaciones) del tablero son mínimos bajo el paso de las sobrecargas).

En cuanto a la subestructura, se distinguen en el Proyecto dos tipos de pila: la pila tipo (libre en sentido longitudinal por medio de aparatos esféricos deslizantes, y fija en transversal), y la pila central o punto fijo del viaducto.

La pila tipo se proyecta aporticada, con dos fustes de sección constante rectangular, en hormigón armado, y con la misma inclinación que presenta la sección transversal del tablero (Figuras 4 y 5). La forma trapezoidal confiere a la pila la necesaria rigidez transversal frente al sismo. El tablero se vincula transversalmente al dintel de la pila mediante topes sísmicos de metal que se introducen en la cabeza de pila, mientras que en dirección longitudinal se encuentra libre, habiéndose dispuesto aparatos de apoyo esféricos deslizantes. Las cimentaciones, pilotadas en la totalidad del viaducto, constan de 4 pilotes de 2,0 m de diámetro por pila tipo, con una longitud media de unos 30 m.

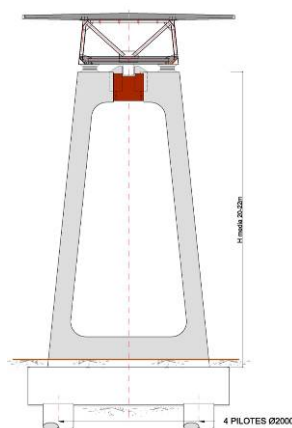


Figura 4. Vista de pila tipo.



Figura 5. Vista aérea general del Viaducto en construcción.

La pila central (Figura 6), único punto fijo de la estructura en sentido longitudinal, se proyecta en forma de célula triangular, conformándose por medio de la inclinación y unión de dos pilas tipo, contando por tanto con 4 fustes. La base del triángulo conecta los arranques de los fustes de las pilas inclinadas y une los dos encepados de 14 pilotes cada uno (de 2,0 m de diámetro y 32,0 m de longitud). El dintel, que en esta zona presenta una ligera variación de canto, y una luz de 65,0 m, se empotra en la cabeza de la pila.

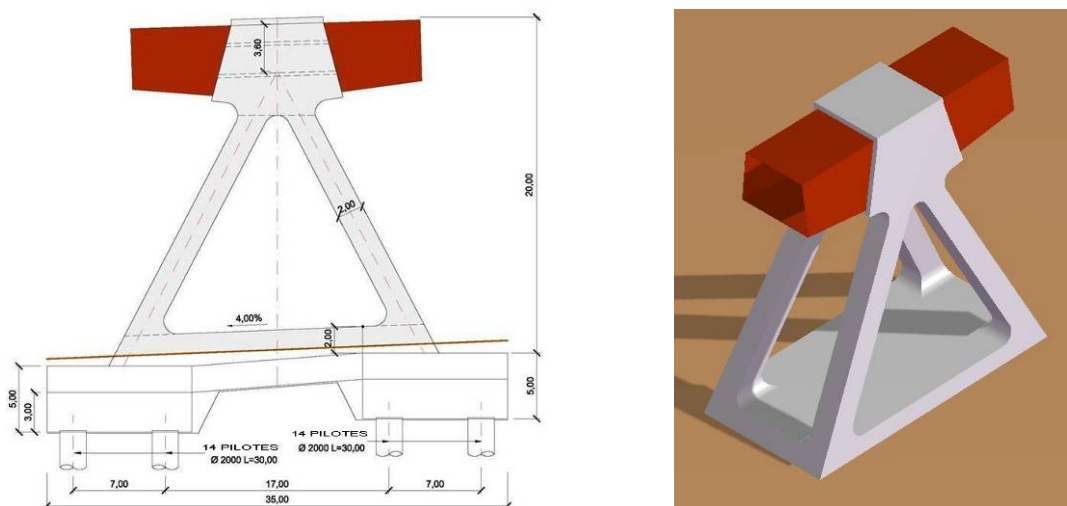


Figura 6. Pila central.

3. Concepción de la tipología del tablero

El tablero fue concebido dando solución a los diferentes problemas planteados por los condicionantes anteriormente citados. Cabe destacar el hecho de que, dada la magnitud de la longitud máxima dilatada, en el entorno de los 1600 m, los dinteles mixtos permiten resolver técnicamente dicha problemática, que queda fuera del alcance de la tecnología del hormigón pretensado, ya que permiten una reducción de entre el 30 al 40% de los movimientos de las juntas, debido a que:

- los movimientos térmicos apenas superan en un 10% aproximadamente los de los dinteles de hormigón;
- los efectos de la retracción se reducen en aproximadamente el 50% como consecuencia de la coacción que proporciona la subsección metálica;
- no existen deformaciones longitudinales de fluencia al tratarse de dinteles mixtos no pretensados.

Se obtienen así unos movimientos máximos en cada estribo de + 594 mm (dilatación total) y - 386 mm (contracción total), sensiblemente inferiores a los esperables para un tablero de hormigón.

Con el fin de poder minimizar en la medida de lo posible dicha deformación, se han previsto las siguientes disposiciones adicionales en el diseño:

- *Empleo de losas prefabricadas a sección completa en las secciones de centro de vano* (aproximadamente la mitad de la longitud del puente). De esta forma, ejecutando las losas con anterioridad, se reducen las deformaciones por retracción, además de aprovechar las ventajas de la prefabricación en una obra de esta longitud. Se hormigonan in situ únicamente las juntas entre placas y los alveolos para los conectores. La losa en zona de negativos recurre a la solución tradicional de prelosa más hormigonado in situ del resto de sección, no proyectándose completamente prefabricadas como las de centro de vano al no poder ejecutarse correctamente el solape de armaduras de gran diámetro en las juntas entre placas.
- *Reducción de las deformaciones reológicas mediante una dovela de ajuste, en función de la secuencia de montaje.* Se pensó inicialmente el montaje del dintel en cuatro partes, dos tramos comenzando desde estribos hacia pila central, y dos en sentido inverso. La unión entre tramos (y la simultánea liberación del anclaje temporal del tablero al estribo) se ubicó a unos 750 m de pila central y estribos. En este momento, y mediante la ejecución de un tramo especial de ajuste, con una longitud mayor a la del tramo tipo, e igual al acortamiento que se haya producido por retracción durante la construcción, puede neutralizarse dicho movimiento a efectos de la apertura de junta en el estribo (Figura 7). La retracción total, de unos 270 mm, se reduce a unos 66 mm a efectos de la junta de vía.

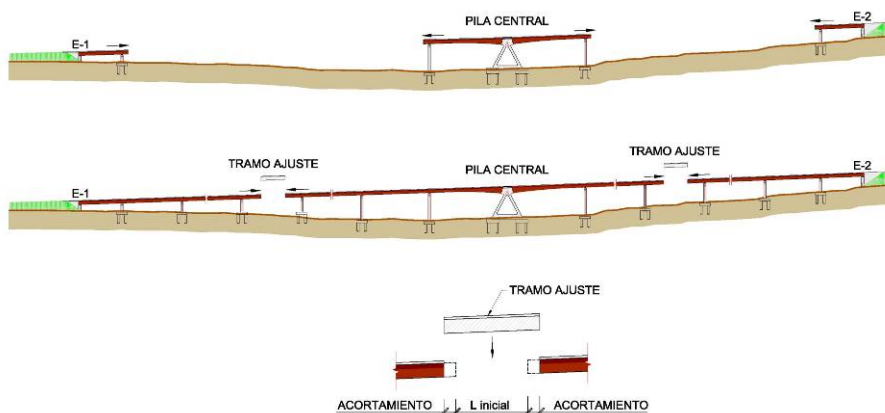


Figura 7. Descripción del proceso de montaje del tablero.

- *Medidas relacionadas con ajustes de temperatura.* Se previó durante el Proyecto la necesidad de realizar un control de las temperaturas de montaje y conexión de los

diferentes tramos, para poder contrastar si las holguras previstas en las bandejas de los apoyos deslizantes coinciden con las realmente ejecutadas, y en su caso, poder corregirlas. Como herramienta auxiliar de verificación de las hipótesis de Proyecto, se realizó un contraste entre las temperaturas y movimientos de cálculo recogidas en normativas, y las temperaturas y movimientos reales medidas en el Viaducto del Arroyo de las Piedras (que, recordemos, es de la misma tipología y se encuentra en un entorno muy cercano al de Archidona).

En general, puede decirse que todas estas medidas han hecho posible el empleo de los aparatos de dilatación de vía de 1200 mm, para la luz dilatable de 1600 m. La necesidad de enfrentarse a dichos desplazamientos afecta a otros aspectos del diseño, como son las bandejas de los aparatos de apoyo, o el concepto de los mamparos de pila.

4. Descripción de la estrategia antisísmica

Como se ha dicho, la necesidad de hacer frente a la acción sísmica fue uno de los principales condicionantes en el diseño del viaducto, afectando a la tipología de dintel, pilas y cimentación. Veremos qué estrategia sísmica se adoptó, refiriéndonos al comportamiento longitudinal, al transversal, y a las cimentaciones.

4.1. Comportamiento en sentido longitudinal.

Dada la magnitud de la masa colaborante del tablero, junto con la aceleración esperable, se optó por un diseño de punto fijo único ante esfuerzos longitudinales, hecho que venía fuertemente condicionado a su vez por la necesidad de mantener un punto neutro claro frente movimientos térmicos reológicos.

Con el fin de reducir la fuerza sísmica a resistir se consideró la elongabilidad frente movimientos axiales del tablero, hecho que produce un aumento del principal periodo de la estructura hasta valores de 2,8 s de tal forma que, a todos los efectos, el tablero se comporta de forma similar (en cuanto a fuerzas) a como lo haría si estuviera aislado sísmicamente (Figura 8). Este aspecto ha permitido reducir la fuerza sísmica a un valor de 100.000 kN, elevada, pero asumible.

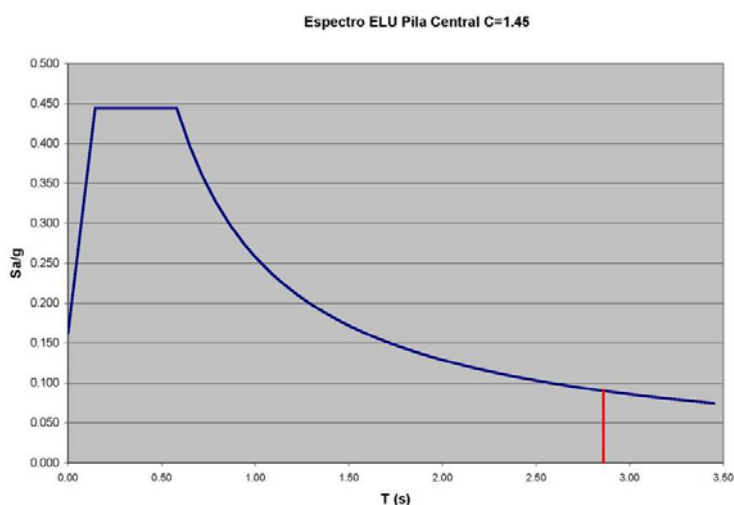


Figura 8. Espectro de respuesta de la estructura.

4.2. Comportamiento en sentido transversal.

En sentido transversal, dada la longitud de la estructura, así como la similitud de altura de pilas y parámetros del terreno a lo largo de la traza, el comportamiento se asimilaba bastante bien a un sistema de pila aislada con su parte tributaria de tablero (a excepción de los extremos en zona de estribos). Se jugó en el diseño con la flexibilidad de los fustes para conseguir aumentar los periodos, llegando a valores de 0,75 s, y de esta forma hacer que la acción de sismo no fuera condicionante frente al resto de situaciones en ELU.

El esquema de vinculación pila-tablero se materializó mediante tope fijo (Figura 9), diseñado para hacer frente al sismo en ELU (en torno a 9.500 kN). No obstante, dada la longitud del tablero, y los posibles problemas de falta de paralelismo en la ejecución, se pensó en dejar una pequeña holgura, y admitir que las solicitaciones transversales no sísmicas, junto con el sismo de servicio (2.500 kN), fueran resistidos por un aparato de apoyo esférico guiado, diseñado como fusible y pensado en ser sustituible.



Figura 9. Vista del sistema de tope fijo en cabeza de pila y en mamparo de dovela metálica.

4.3. Cimentaciones y acción sísmica.

Se han tomado una serie de importantes medidas y estudios desde el punto de vista geotécnico en las etapas de Proyecto y seguimiento de la obra:

- Se han estudiado detenidamente los diferentes tipos de terreno atravesados por la obra, caracterizando su comportamiento frente acciones estáticas y dinámicas, añadiendo a los estudios convencionales una campaña de geofísica y refracción sísmica en el emplazamiento de la pila central.
- Se ha controlado la ejecución para asegurar la correcta situación de los pilotes en las capas competentes.
- Se han realizado cálculos numéricos pseudoestáticos y dinámicos con acelerogramas compatibles con el espectro de la zona para estudiar posibles incrementos de los esfuerzos de flexión en los pilotes debidos a la difusión de ondas transversales entre los diferentes tipos de terreno, posibles efectos de interacción cinemática, o del comportamiento cimentación-estructura, que suponen una cierta diferencia de la ley de flectores respecto a la esperable de un modelo típico de muelles.

5. Aspectos relativos a la ejecución

La magnitud de la obra a ejecutar (gran volumen de estructura metálica; gran número de aparatos de apoyo), y los estrictos requisitos a cumplir (exigencias de fabricación y proyecto para realizar un correcto diseño contra la fatiga, muchas veces condicionante en un puente metálico de FFCC (Figura 10); control geométrico del montaje de los tramos de metal; necesidad de asegurar el paralelismo y la geometría en el montaje de apoyos; etc.), obligaron a un estrecho seguimiento de la ejecución de la estructura, adoptando ciertas medidas de carácter singular, relacionadas con el control de la ejecución y montaje de la estructura metálica del tablero mixto y con el control del montaje de los aparatos de apoyo deslizantes. Por todo ello, se planteó un esquema de control específico que evitara errores que suceden con relativa frecuencia en el campo del Control:

- Exceso de documentación y burocratización al controlar aspectos no relevantes, produciendo además una falsa sensación de control de la ejecución, por el volumen de papel generado.
- No adecuar el Control de Ejecución a las particularidades de la obra en cuestión, consumiendo recursos en el control de aspecto que pueden ser de menor importancia relativa que otros, y por lo tanto, reduciendo la calidad de dicho control.



Figura 10. Vista general del viaducto durante su ejecución.

5.1. Control de ejecución de la estructura metálica.

Para un adecuado control de la ejecución del metal, de acuerdo a los requisitos de próxima inclusión en el PG-3, se consideró oportuno establecer un esquema director de Calidad, basado en dos aspectos:

- La elaboración de un Plan de Calidad por el Contratista, ajustando su propio Programa de Control de Calidad con el autocontrol del taller metálico, de tal forma que asegure el cumplimiento de las exigencias del Pliego del Proyecto.
- Elaboración y desarrollo de un programa de contraste por parte de la ACO (Asistencia Técnica).

Centrándonos en los aspectos más relevantes, cabe destacar la realización de un seguimiento de la elaboración y aprobación por parte de la Constructora de los Planos de Taller para cada una de las dovelas que conforman la parte metálica del tablero, asegurando las exigencias estructurales del proyecto; se han particularizado todos los detalles de soldadura, destacando aquellos que condicionan la categoría a fatiga de la estructura; en los mamparos de pilas y estribos se han exigido planos específicos definiendo las fases de montaje para, de esta forma, lograr una detallada definición geométrica de todas las piezas que forman las dovelas, de los detalles de

preparación de bordes y soldadura, de las fases de montaje, etc., evitando indefiniciones que afectarían no sólo a la producción, sino a las actividades de control; se ha exigido un exhaustivo seguimiento de la trazabilidad de los diferentes aspectos relacionados con la estructura metálica, desde la materia prima, los planos de taller, homologaciones, soldadores, ensayos no destructivos, control topográfico, etc.

Dado el importante volumen de producción, y la gran cantidad de documentación generada, se ha establecido un mecanismo de transferencia de información apoyado en un soporte informático, disponible vía internet, que permitiera agilizar la actividad de control, evitando retrasos innecesarios (gestor documental). De esta manera existe la posibilidad de conocer, en tiempo real, la documentación disponible.

Desde el punto de vista de construcción y montaje (Figura 11), las dimensiones singulares de la estructura han obligado a un estudio pormenorizado tanto del montaje vano a vano como de la secuencia que se seguirá dentro de la situación de los vanos en el conjunto del viaducto. Es por esta razón por la que se ha realizado, conjuntamente con la Constructora, un Protocolo de izado y montaje del tablero, detallando cada una de las fases de ejecución e incluyendo el correspondiente PPI de control. Este protocolo va estrechamente ligado a un Protocolo de Control Topográfico, conjunto para el Taller Metálico, la Constructora y la Asistencia Técnica de la Obra, que define el control dimensional a realizar tanto en las fases previas al montaje (fabricación en Taller Metálico y evolución de la deformada en las diferentes fases de la obra) como en el propio montaje.



Foto 11. Fabricación de dovelas en taller.

El objetivo de este seguimiento es conocer, en todo momento, la geometría de las dovelas (longitudes, giros, etc.), comprobando que su comportamiento es sensiblemente igual al teórico, detectando posibles errores de fabricación que pudieran condicionar tanto la geometría final del viaducto como el montaje en altura (soldadura fuera de tolerancia) que obligara a operaciones no deseables, como retocar el vano con la grúas en tensión, o tener que descender el vano una vez ya presentado.

5.2. Descripción de secuencia de montaje de dovelas.

El proceso de montaje y unión de dovelas se ha realizado mediante izado de las piezas apoyando en isostático previamente a la ejecución de la soldadura. Antes de soldar se verificaba que la separación entre chapas era inferior a la admitida por los procedimientos de soldadura. En el caso de que la distancia fuera superior, el protocolo de montaje incluía una corrección por elevación y giro de la pieza, que tras la soldadura se descendía a su cota definitiva sobre pila. La elevación máxima se limitó para evitar la introducción de esfuerzos superiores a los tenidos en cuenta en el diseño. En general, cabe decir que los resultados y la velocidad de las operaciones fueron satisfactorios (Figura 12), gracias, entre otros factores, al detallado estudio de geometría de las piezas durante las diferentes etapas de montaje (en taller, a pie de obra, izadas antes y después de la unión).



Figura 12. Montaje de las dovelas metálicas del viaducto.

5.3. Control del montaje de aparatos de apoyo.

La configuración del trazado (ligeramente curvo), los importantes movimientos longitudinales que experimenta el tablero y la necesidad de disponer topes sísmicos en las pilas además de los apoyos, obligaron a un proceso constructivo que asegurara la correcta alineación y paralelismo entre el tope sísmico y los aparatos de apoyo (Figura 13).



Figura 13. Vista inferior del tope sísmico y aparatos de apoyo en estribo

Con este objetivo, dentro del Protocolo de montaje, se desarrolló un Programa de Puntos de Inspección particular que garantizara un control detallado durante la ejecución de las cabezas de las pilas, el montaje del tablero y la colocación de los apoyos, evitando desalineaciones y falta de paralelismo entre las guideras laterales de los aparatos de apoyo y el tope antisísmico (chapa de acero inoxidable y neopreno), que podría condicionar un posible encastramiento del tablero en las

pilas, como consecuencia de los importantes movimientos de contracción y dilatación que experimenta.

Por otro lado, se estableció también un protocolo de control de los movimientos de las bandejas en cada una de las pilas y en estribos durante la fase de montaje del tablero empleando un sistema de instrumentación, contrastándolos con los previstos en el dimensionamiento.