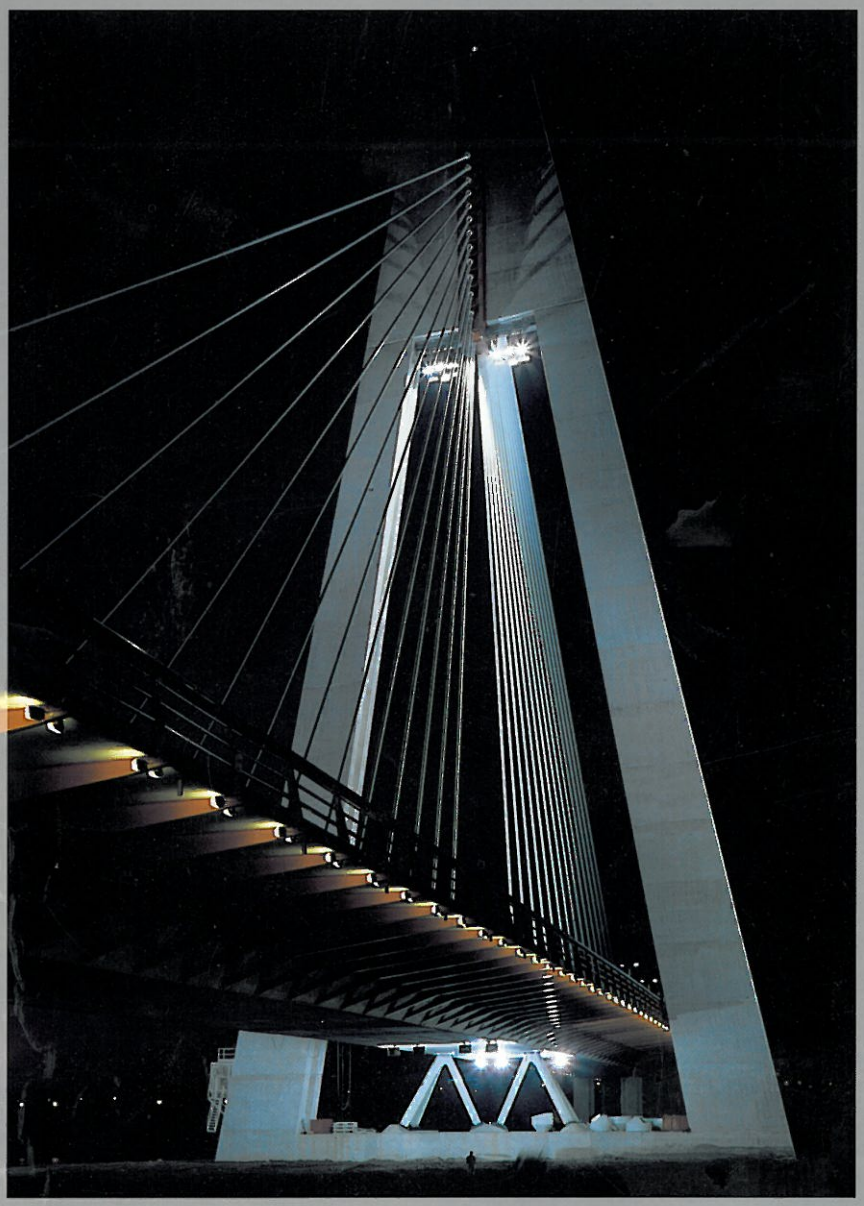
IV PUENTE SOBRE EL RIO GUADIANA

PUENTE REAL

BADAJOZ

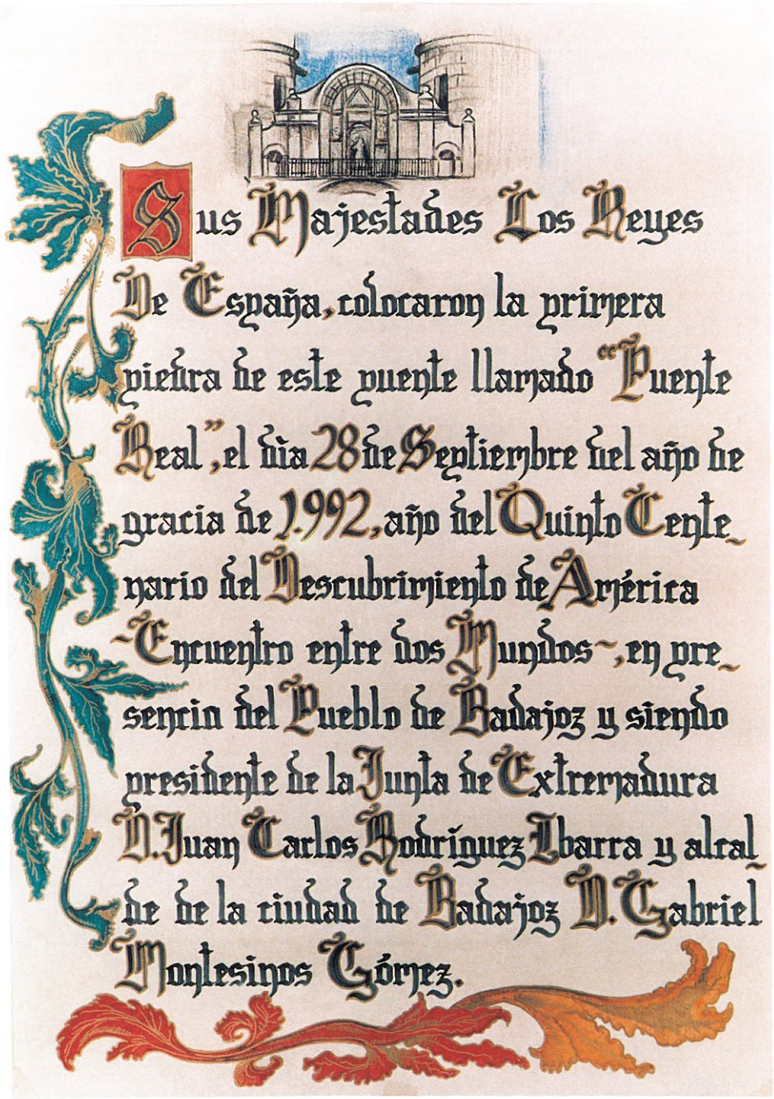


JUNTA DE EXTREMADURA

CONSEJERIA DE OBRAS PUBLICAS URBANISMO Y MEDIO AMBIENTE

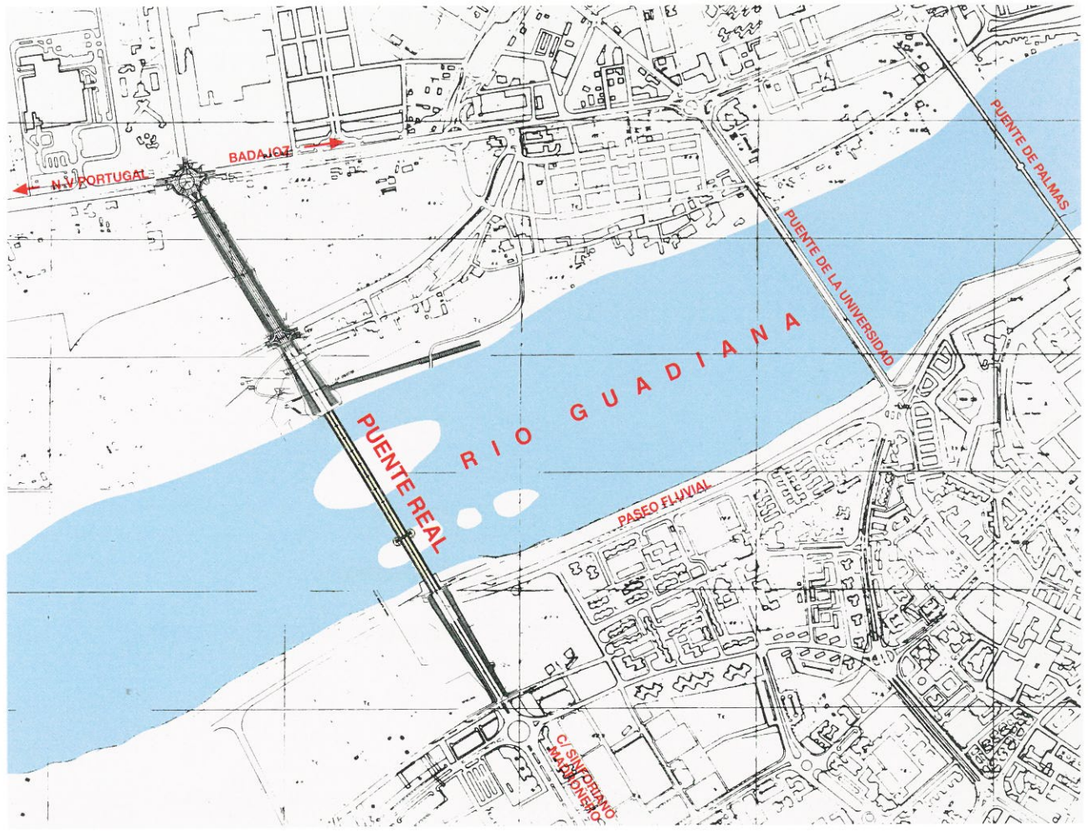
DIRECCION GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS

SERVICIO DE CARRETERAS



IV PUENTE SOBRE EL RIO GUADIANA EN BADAJOZ

INTRODUCCION



El puente se sitúa al oeste de la ciudad de Badajoz en una zona de nueva urbanización, aguas abajo de los tres puentes existentes; su objeto es dar continuidad a la calle Sinforiano Madroñero, eje del ensanche de la ciudad, que se prolonga hasta la carretera N-432 de Badajoz a Granada tal como está previsto en el Plan General de Ordenación Urbana, y proporcionar un nuevo acceso a la Universidad, al Hospital Infanta Cristina, a Portugal y a varias industrias de la zona; también tiene como finalidad reducir los niveles de saturación del Puente de la Universidad. El carácter del mismo es urbano, lo que queda claramente reflejado en la distribución de usos de la plataforma, en la que se ha dado gran importancia a los usos peatonales y recreativos.

En la concepción del puente se ha desarrollado la idea de que éste tenga un carácter simbólico para la ciudad, pasando a formar parte de la imagen de la misma, considerando el carácter emblemático que supone la introducción de un elemento facilmente identificable como es el pilono.

DESCRIPCION DEL PUENTE

Se trata de un puente atirantado de luces 136+88+32 m que se prolonga, sin solución de continuidad, con un viaducto de acceso formado por 6 vanos de 32 m, totalizando una longitud de 452 m incluyendo los vuelos del tablero en los estribos.

El ancho del tablero es de 23 m con 2 calzadas de dos carriles de 3,25 m cada uno, incluyendo las bandas de señalización, arcenes a cada lado de 0,20 m, mediana central de 1 m, dos carriles para bicicletas de 1,35 m, dos barreras de protección de 0,25 m en los bordes del carril bicicleta y dos pasos peatonales de 2,00 m; todo ello, junto a la barandilla exterior de 0,25 m a cada lado del puente y dos bordillos de hormigón elaborado con cemento blanco de 0,25 m que limitan exteriormente las aceras, dan el ancho total del tablero.

El tablero está constituido por un cajón central de hormigón elaborado con cemento blanco, que se completa mediante dos voladizos laterales. El canto del cajón es de 2,114 m en el eje. En la zona atirantada el cajón es monocelular y en los vanos de acceso es bicelular manteniendo la geometría exterior.

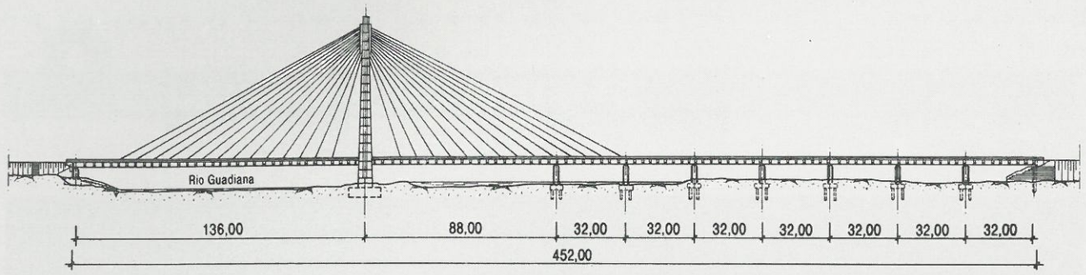
El atirantamiento está formado por 28 tirantes, con disposición en abanico corregido, situados en un único plano central anclados en el eje del tablero cada 8 m y distribuidos de forma simétrica respecto al pilono.

La pila principal tiene forma de Δ, con una altura de 81,2 m; es de hormigón elaborado con cemento blanco y en su parte superior abraza una célula metálica de 14,88 m de altura que recoge los anclajes superiores de los tirantes.

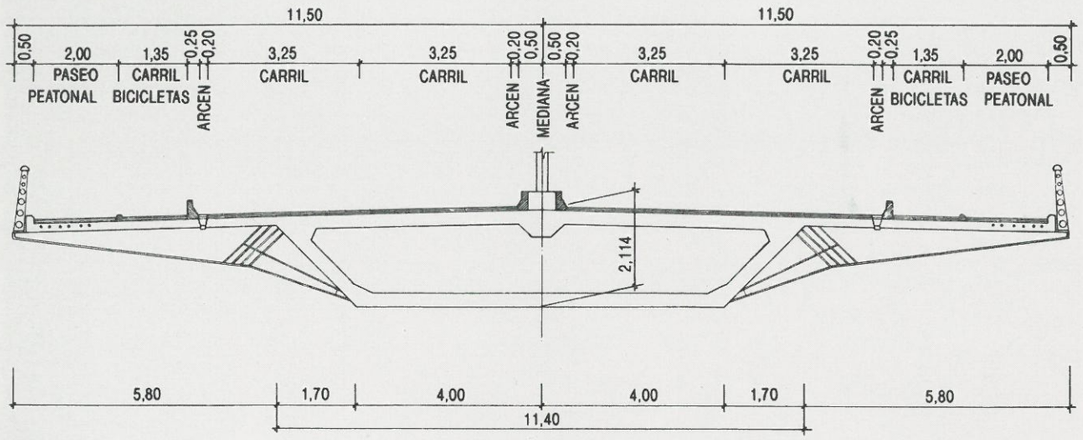
La asimetría del cauce principal del río dentro de la canalización de avenidas condujo a una distribución de luces en la que el vano principal se encuentra en un extremo del puente, situándose el pilono en la isla ubicada en medio del cauce.

Se ha realizado un tratamiento de formas y materiales con el fin de cuidar la estética del puente, utilizándose en toda la estructura hormigón con cemento blanco y situándose el atirantamiento en un plano único para evitar las interferencias ópticas que aparecen en el caso de disponer los tirantes en dos planos.

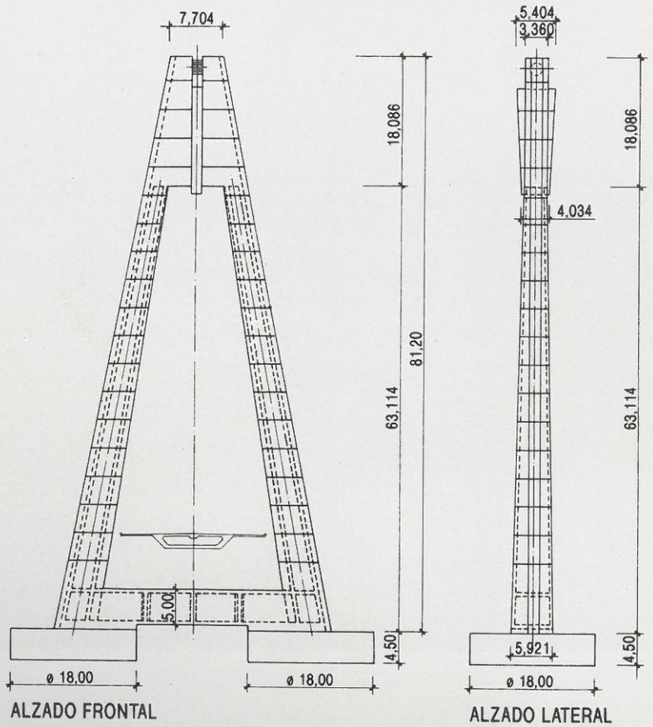
IV PUENTE SOBRE EL RIO GUADIANA EN BADAJOZ



ALZADO



SECCION TRANSVERSAL



ALZADO FRONTAL

ALZADO LATERAL

JUSTIFICACION DE LA SOLUCION ADOPTADA

El sistema constructivo adoptado, debido a que el río Guadiana en la zona donde se sitúa el puente está perfectamente regulado, consiste en construir el puente sobre apoyos provisionales, procediendo al atirantamiento a puente acabado, evitando las soluciones por voladizos en la zona atirantada y con vigas prefabricadas en los accesos, presentando grandes ventajas:

- Reduce los controles de geometría y tensiones.
- Concentra la ejecución de los tirantes en un plazo mínimo.
- Unifica la ejecución de la zona atirantada y accesos.
- Permite simultanear la ejecución del pilono con la del tablero.

Una vez decidida la construcción del tablero sobre apoyos provisionales se optó por la solución mediante cimbra de avance, que se adecúa perfectamente a las luces adoptadas (32 m), permitiendo independizarse del río y sistematizar el trabajo. La ejecución se planteó desde el estribo más lejano al pilono (Caya) que permitía rodar el proceso en los vanos de acceso llegando a la zona atirantada de mayor complejidad con unos procedimientos puestos a punto; además permitía reducir el tamaño de la junta mayor con reducción de su recorrido al llevar mayor tiempo construida su zona de influencia. El ahorro de tiempo que suponía empezar por el otro estribo y comenzar a colocar tirantes antes de acabar el tablero era pequeño (menos de dos meses) y se podía ver disminuido por los problemas que planteaban la presencia de los colectores de la margen del estribo de la calle Sinforiano Madroñero.

La longitud de puente adoptada corresponde al cauce dejado por la Confederación Hidrográfica del Guadiana tras la remodelación de las márgenes (pasando de 392 m a 452 m) y la zona atirantada se ajustó de forma que se ha utilizado una isla en el río para situar el pilono principal.

La sección transversal del tablero se ha adecuado a los usos previstos, dejando unos carriles bicicleta aumentándose el canto y disponiendo una única sección tipo, exteriormente, para la zona de acceso y la atirantada suprimiendo las vigas prefabricadas del Proyecto Base, adecuándola a la construcción con cimbra de avance.

El atirantamiento en plano único, se plantea principalmente por motivos estéticos, tanto visuales de los propios tirantes, ya que resulta una solución más limpia que los dos planos, como del tablero, pues al concentrar en el eje del puente los elementos resistentes, permite unos voladizos más ligeros.

La disposición de los tirantes en abanico corregido viene determinada tanto por su estética como por la eficacia de la misma; ya que alivia los problemas de concentración de anclajes en el pequeño espacio que genera la disposición en un abanico puro.

Los anclajes superiores de los tirantes se concentran en un elemento metálico que refuerza la estética del pilono al sobresalir de su plano a la vez que simplifica su ejecución, ya que transfiere a un elemento realizado en taller las placas de anclaje, elementos que por la precisión que requiere su colocación dificultan la construcción de los pilonos de hormigón.

La célula metálica canaliza las cargas de los tirantes a través de las chapas laterales, trasmitiendo la carga al hormigón mediante conectores tipo STUD, simplificando el diseño de la misma y su conexión con el hormigón.

El atirantamiento central en el tablero obliga a que la sección sea un cajón cerrado, para recoger los esfuerzos de torsión generados por la sobrecarga excéntrica.

La trasmisión de esfuerzos de los tirantes a las almas del cajón se ha realizado mediante riostras pretensadas de hormigón, ya que debido a la pequeña relación entre el canto del cajón y el ancho inferior las soluciones en base a atirantamientos exentos ya sean de hormigón o metálicos resultan poco eficaces.

CALCULO

El análisis longitudinal se realizó mediante un modelo espacial de barras que de forma evolutiva seguía el proceso constructivo del puente.

En este modelo se introdujeron las catorce fases constructivas del tablero y pilono, al final de las cuales se introdujo el tesado de los tirantes, y ya sobre el modelo correspondiente a la estructura terminada se analizaron las hipótesis de carga muerta, acciones reológicas, viento, sobrecargas y efectos térmicos.

En cada una de las fases constructivas del tablero se añadieron al modelo de cálculo las barras correspondientes a la estructura que se construía en dicha fase estudiándose como hipótesis de carga la retirada del cuelgue de cimbra, aparición de peso propio, pretensado, cuelgue de cimbra de la fase siguiente y hormigonado de las alas con un retraso de dos fases.

Para tener en cuenta la redistribución de esfuerzos por fluencia se utilizó el método propuesto por Mativat, según el cual los esfuerzos a los que se encuentra sometida la estructura a tiempo final, son una combinación de los esfuerzos que aparecen teniendo en cuenta el proceso constructivo y los que aparecerían en la misma suponiendo que la aplicación de cargas de peso propio y pretensado tiene lugar sobre la estructura completa.

Los coeficientes de combinación, que son función de la fluencia que queda por producirse en el momento del cierre de la estructura, son en nuestro caso 0,33 de los esfuerzos obtenidos teniendo en cuenta el proceso evolutivo de construcción y 0,67 de los esfuerzos obtenidos sobre la estructura completa.

El análisis de la posible inestabilidad del pilono se ha realizado mediante un cálculo no lineal geométrico, en el que se ha tenido en cuenta el proceso evolutivo originado por la construcción. Debido a que al disponer un puntal a media altura de los fustes durante construcción, estos no se fisuran en ningún estado de carga, no ha sido necesario tener en cuenta la no linealidad mecánica del material.

Para el cálculo tensional se ha tenido en cuenta que los esfuerzos que aparecen durante la construcción del tablero actúan sobre la zona del cajón, y que los esfuerzos originados por cargas posteriores al hormigonado de las alas actúan sobre la sección completa.

También se ha tenido en cuenta que debido a la elevada relación ancho/luz del puente durante la fase de construcción, y de los vanos de acceso en toda la vida de la obra, que es de 0,72, en las zonas próximas a pilas la colaboración de la sección transversal es sólo parcial, por lo que las tensiones se han obtenido en base a un ancho de alas "reducido" en la zona próxima a las pilas.

En el cálculo en rotura se ha considerado la colaboración total de la sección.

El análisis de la célula metálica de anclaje de tirantes en el pilono presentaba una complejidad especial, por lo que ha sido necesario estudiar mediante elementos finitos tanto el funcionamiento de las vigas de anclaje de tirantes como la conexión chapa-hormigón realizada mediante conectores STUD.

Otro punto que ha recibido un estudio específico ha sido el proceso de tesado de la estructura.

En primer lugar se ha realizado el análisis usual de desmontaje del puente para obtener las fuerzas de tesado de cada tirante y el momento en el que tiene lugar el levantamiento del tablero de las pilas provisionales a la temperatura de cálculo.

En los 34 esquemas estáticos diferentes que se suceden durante el tesado de los tirantes se han obtenido los esfuerzos en tirantes y reacciones que aparecen por efecto de una variación térmica unitaria en tablero, tirantes y pilono, así como para un gradiente térmico unitario en tablero y en pilono.

Estos esfuerzos se utilizan como datos de los programas, que realizados especificamente para este puente, permiten conocer durante el proceso de tesado de tirantes la tensión a la que se debe de tesar el tirante correspondiente, función de la temperatura y gradiente de los distintos elementos del puente en el momento de tesado, y conocer también las reacciones en los distintos apoyos, reacciones que se controlan mediante apoyos instrumentados.

Debido a que el proceso de montaje de los tirantes se realiza tesando uno a uno los cordones que los componen, ha sido necesario calcular la tensión de tesado de cada uno de los mismos. Aunque en el cálculo, general del puente los tirantes se han tratado como elementos rectos, ya que la perdida de rigidez de éstos una vez tesados es practicamente nula, durante la fase de tesado ha sido necesario calcularlos con la geometría real de catenaria.

El cálculo del proceso de tesado de cada tirante se realiza mediante un programa de cables en catenaria en los que los anclajes son elásticos, a los que se les da la rigidez del pilono y del tablero en el esquema estructural correspondiente a la fase analizada. Mediante dicho programa se sigue el proceso de tesado de cada tirante, añadiendo en el momento adecuado los pesos correspondientes a la vaina, cordones portadores e inferiores y calculando para cada cordón la tensión de tesado, de forma que ésta sea igual a la que toman los cordones ya tesados en dicho momento con el fin de que una vez completado el tesado del tirante todos estén a la misma tensión.

DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES Y PROCESO CONSTRUCTIVO

La construcción del tablero no necesita independizarse del cauce del río, no siendo por lo tanto precisa la construcción del mismo por avance en voladizo desde el pilono, habiéndose construido sobre apoyos provisionales, procediéndose al atirantamiento del mismo una vez terminada su construcción.

Este sistema constructivo facilita mucho la construcción, pues el hormigonado del tablero en lugar de hacerse por dovelas de unos cuatro metros, se ha realizado por vanos de 32 m. Así se simplifican los controles de geometría del tablero en construcción y de fuerzas en tirantes, ya que al efectuarse las operaciones de tesado de tirantes sobre la estructura completa, su ejecución y control es más sencillo, resultando además más económico al concentrarse éstas en un menor periodo de tiempo. Permite además una mayor rapidez de ejecución, ya que para comenzar el tablero no es necesario haber terminado la construcción del pilono.

CIMENTACION

La cimentación de la pila principal, situada en una isla en el centro del río, se realiza mediante una gran zapata circular de 18 m de diámetro por fuste con 4,5 m de canto; esta zapata se ejecuta en un recinto circular formado por pantallas de hormigón armado H-200, que ha permitido trabajar en seco bajo el nivel freático sin necesidad de apuntalar el recinto.

La cimentación de las pilas definitivas del puente se resuelve mediante pilotes de 1,5 m, elaborados con hormigón armado H-200, en número de cuatro por cada una de las siete pilas y con una longitud entre 15 y 17 m.

Los esfuerzos verticales de las pilas se trasmiten a los pilotes mediante un encepado que en el caso de las pilas 1 y 2 es de 10,00 x 9,00 x 3,00 m que sirve también de contrapeso para los cables de retenida de la estructura a través de un pretensado vertical anclado en el tablero del puente y en el encepado. En el caso de las pilas 3, 4, 5, 6, y 7, el encepado es de 10,00 x 7,50 x 2,25 m.

Las pilas provisionales formadas por dos fustes cilíndricos de 1,20 m de diámetro se cimentan colocando un pilote de 1,5 m de diámetro bajo cada fuste unidos mediante un encepado en forma de "H".

Estructuralmente los estribos están cimentados en el caso del estribo 1 del lado de Sinforiano Madroñero sobre cuatro pilotes de 1,50 m de diámetro colocados de forma que se eviten los 2 colectores generales que transcurren por la zona y se unen mediante un encepado de 2,50 m de canto. El estribo 2 se cimenta sobre dos pilotes de 1,50 m de diámetro. Todos los pilotes se han perforado en una zona de rocas en diversas fases de meteorización mediante camisa recuperable, y se empotran en el sustrato de roca.

PILONO

La pila principal, realizada en hormigón armado H-300 elaborado con cemento blanco, está constituida por un pórtico en Δ de 39,568 m de ancho en la base y 81,20 m de altura. Los fustes son de sección cajón, de ancho variable entre 5 y 3 m, con un rehundido en las caras laterales.

La parte superior de la pila está coronada por dos grandes bloques de hormigón que abrazan una célula metálica de 14,88 m de altura y 1,5 m de ancho en la que se alojan los anclajes superiores de los tirantes. La conexión de la célula al hormigón se realiza mediante 4.268 conectores flexibles tipo STUD Ø19.

En su parte inferior lo dos fustes de la pila se unen mediante un gran travesaño de hormigón armado de sección trapezoidal hueca con 5,00 m de canto y 5,80 m de ancho medio.

La construcción de los fustes se realizó mediante encofrados trepantes con una altura de trepa de 4,07 m.

El encofrado estaba formado por cuatro módulos exteriores y dos interiores. En los primeros la superficie encofrante era de contrachapado fenólico, que apoyaba sobre unas vigas en celosía de madera y que a su vez trasmiten las cargas a unas correas metálicas. Las dos caras laterales en forma de paralelogramo irregular, permitían la reducción de 164 mm en cada puesta sin necesidad de descender los encofrados. Asímismo, la cara frontal con rehundido variable era regulada en cada puesta sin necesidad tampoco de bajar los encofrados.

La estructura del encofrado exterior se soportaba sobre un par de consolas por cada uno de los módulos, que se anclan al hormigón mediante un conjunto formado por un tornillo M-30, un cono y una barra con placa. El conjunto del encofrado estaba dotado de tres niveles de plataformas de trabajo que cierran completamente el perímetro del pilono con anchura al nivel de trabajo de 2,5 m. El acceso a las plataformas de trabajo se lograba mediante una escalera modular, dividida en tramos verticales siguiendo la inclinación del pilono. En uno de los fustes se instaló un ascensor que desembarcaba directamente en un nivel "cero" colgado del propio encofrado.

Todas las plataformas de trabajo estaban constituidas por un bastidor metálico, barandilla con doble pasamanos y rodapié. El paso entre niveles se realizaba mediante escalera de pates con guardacuerpo y trampilla de seguridad corrediza; en cada piso la seguridad se completaba con un cerramiento de redes que cubría completamente todos los niveles de plataformas.

Durante el proceso de trepa la transitabilidad entre los diversos niveles de plataformas estaba asegurada. La trepa interior metálica se ha diseñado con dos plataformas telescópicas sobre las que apoya el encofrado. Cada una de ellas va dotada de cuatro apoyos abatibles que trasmiten el peso a unos cajetines embebidos actuando de forma que al tirar con la grúa hacia arriba estos apoyos se abaten y al encontrar el siguiente cajetín caen automáticamente y queda el conjunto apoyado y asegurado. La disminución progresiva de las dimensiones del hueco se logra por el desmontaje de paneles atornillados previstos desde el principio para ese fin.

Los mismos encofrados con los que se ejecutaron los fustes independientes se utilizaron para el encofrado de los bloques de hormigón de coronación que abrazan la célula metálica de anclaje de los tirantes, sin ser necesaria ninguna modificación, a la vez que servían de plataforma de trabajo y de seguridad en las labores de montaje y soldadura de dicha célula metálica.

Con el fin de acortar el ciclo constructivo, la ferralla se prefabricaba en bancada, montándose la correspondiente a cada trepa de una vez con grúa torre. El hormigonado se realizaba mediante cubilote. El ciclo medio de cada trepa era de una semana a pesar de la complejidad de la armadura y de la variación de las dimensiones del encofrado.

A media altura se colocó un puntal activo entre ambos fustes, con el fin de reducir los esfuerzos en la base originados por la inclinación de los mismos hasta su unión en la zona superior.

El montaje de la célula metálica se realizó dividiendo ésta en ocho elementos, con un peso aproximado entre 6,6 a 14,5 T., capacidad máxima de la grúa torre, en condiciones especiales, por lo que para su montaje no fue necesario utilizar ningún medio auxiliar específico.

El montaje comienza colocando el elemento inferior en su posición mediante una estructura metálica auxiliar, que en parte queda embebida en el hormigón; el posicionamiento del mismo debe de realizarse con gran precisión ya que de él depende la colocación del resto de los elementos y por lo tanto la correcta orientación de los anclajes de los tirantes, ya que al ser éstos solidarios a la estructura no admiten correcciones finales. A continuación se colocan uno a uno los dos elementos siguientes, soldándolos al inmediato inferior, así como una estructura auxiliar de hormigonado, y se procede a hormigonar la primera trepa de la cabeza del pilono. La construcción prosigue colocando nuevos elementos de célula y hormigonando las siguientes trepas. El control de calidad ha incluido radiografiado al 100% de las uniones, exámenes por ultrasonidos y control por líquidos penetrantes.

La parte superior del pilono se completa mediante una pieza de unión cilíndrica de 2 m de diámetro y 1,50 m de longitud que une los dos fustes; se forma mediante dos conjuntos de perfiles de acero HEB embebidos en hormigón y forrados de acero *corten*, pintado del mismo color de la célula metálica. Esta pieza permite acceder a los anclajes de los tirantes a través de la trampilla superior de la célula, para realizar el mantenimiento y revisión de los mismos.

En la parte inferior de la célula se dispone otro arriostramiento horizontal mediante un pretensado transversal formado por cuatro cables de 24 torones de 0,6 pulgadas en el interior de un tubo de acero de 400 mm de diámetro y 25 mm de espesor que puede actuar con tirante pasivo, anclado con barras DYWIDAG al hormigón.

Se completa la parte superior con una plataforma metálica cerrada con barandillas de acero galvanizado, con escaleras de acceso a la parte superior de la célula, y se accede a esta parte de la obra a través de un elevador de mantenimiento de cremallera que discurre por la hendidura que hay en el pilono en su cara de aguas abajo de la obra. Este ascensor se detiene a 5 m de altura del suelo, para salvar el riesgo de daños por el agua durante las crecidas del río y como precaución ante posibles actos vandálicos.

El gran travesaño inferior del pilono tiene trampillas en su parte superior y escaleras de acceso a la parte interior de cada uno de los fustes del pilono; también está dotada de válvulas automáticas de drenaje, para eliminar el agua que se pudiera acumular en su interior durante las crecidas del río.

PILAS

Además de la pila principal el puente tiene siete pilas más de hormigón armado H-250 elaborado con cemento blanco, formada cada una por dos fustes de sección cuadrada con rehundidos circulares en las cuatro esquinas, separados 5,00 m entre ejes, de altura variable entre 8 y 11 m. Las pilas P-1 y P-2 se utilizarán para anclar los tirantes de retenida, disponiéndose tendones de pretensado vertical. Todos los apoyos de las pilas son de neopreno confinado deslizantes sobre placas de teflón y acero inoxidable, los grados de libertad que tienen estos apoyos son unidireccionales en uno de los fustes de cada pila y de deslizamiento libre en cualquier dirección el apoyo del otro fuste.

Debido al proceso constructivo del puente es necesaria la construcción de seis pilas provisionales, formado cada par por dos fustes de 1,20 m de diámetro, separados 6,00 m entre ejes.

TABLERO

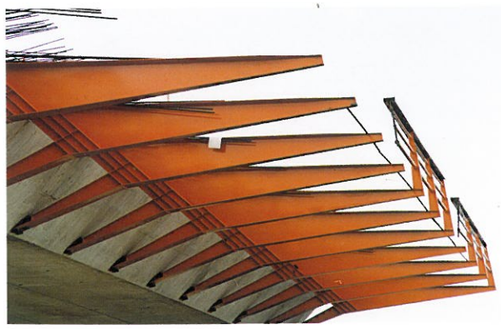
Paralelamente a la construcción del pilono se ha realizado la del tablero.

El tablero está constituido por un cajón de hormigón H-400 elaborado con cemento blanco, de 8,00 m en la cara inferior y 11,40 m de cara superior con almas a 45°. La plataforma se completa mediante dos voladizos de 5,80 m cada uno hasta el extremo de la barandilla. El canto del cajón es de 2,114 m en el eje. En la zona atirantada el cajón es monocelular con un nervio central longitudinal en la losa superior. En los vanos de acceso el cajón es bicelular con una alma central de 0,40 m de espesor manteniendo la geometría exterior.

Los anclajes de los tirantes situados cada 8 m se recogen en el eje del tablero mediante unos mogotes de anclaje que transmiten la compresión a la losa superior del cajón y reparten la reacción vertical del tirante mediante una riostra de hormigón de 80 cm pretensada transversalmente con un cable de 31 Ø 0,6".

En el interior del cajón también existen riostras transversales postensadas; en las alineaciones de las pilas y en los estribos estas riostras tienen dos metros de espesor, con huecos para permitir el paso de hombre y de los servicios, y las pilas 3 a la 7 están pretensadas con dos tendones de 24 cables de 0,6 pulgadas.

Los grandes voladizos laterales se resuelven mediante costillas mixtas de acero A-52, cada cuatro metros conectadas al cajón. Sobre estas costillas se construye una losa de hormigón armado, constituida por prelosas semiresistentes de 6 cm de espesor sobre las que se hormigona *in situ* una losa de 14 cm.



La conexión de la costilla al cajón se realiza mediante soldadura a una placa embebida y anclada al cajón en el apoyo inferior. En la parte superior se realiza un anclaje parcial durante la construcción mediante 2 barras *Gewi* que se atornillan en la cara superior de la costilla metálica; la conexión se completa mediante armadura pasiva anclada en la losa del voladizo.

En los vanos de acceso el tablero está pretensado longitudinalmente mediante 10 cables de 19

Ø 0,6" que discurren por las almas; en la zona atirantada el pretensado se sitúa en las losas superior e inferior, siendo el número de tendones variables según la zona, estando formado por unidades de 12 Ø 0,6" y 19 Ø 0,6".

En el proceso constructivo se aprovecha la baja altura del tablero sobre el nivel del agua, tan solo de unos 10 m y que el río Guadiana en el tramo en que se encuentra el puente está muy regulado, con lo que la probabilidad de avenidas es muy pequeña, existiendo por lo tanto la posibilidad de ocupar una parte importante del cauce y trabajar en seco, habiendo sido suficiente mantener un cauce permanente de unos treinta metros.

El tablero se ha construido sobre apoyos provisionales, procediéndose al colgado mediante tirantes una vez terminada su construcción.

La construcción del tablero se ha realizado vano a vano mediante cimbra autolanzable por fases de 32 m de longitud, apoyando el mismo sobre las pilas definitivas en la zona correspondiente al viaducto de acceso y sobre pilas provisionales con la misma separación en los vanos atirantados. El número de fases constructivas ha sido 14. En cada fase de ejecución se completa un vano y un voladizo de 7,5 m del vano siguiente.

La cimbra está formada por diez vigas de celosía de 76,5 m de longitud, agrupadas en tres paquetes, sobre las que mediante unas vigas transversales se apoya el encofrado exterior. La cimbra se apoya sobre torres de celosía cimentadas en los encepados de las pilas, colgándose previamente al hormigonado de una fase del extremo del voladizo de la anterior, con el fin de evitar las discontinuidades en el tablero que se originarían al flectar la cimbra con el peso del hormigón fresco. El cuelgue se realiza mediante seis pares de barras *Diwidag* que se pretensan al tablero mediante seis gatos a través de una viga de reparto transversal.

Para el avance de la cimbra, los cuchillos laterales se desplazan lateralmente para evitar la interferencia del encofrado con las pilas, y posteriormente se desplazan longitudinalmente paquete a paquete y se vuelven a desplazar lateralmente en la nueva posición.

En una primera fase se construye únicamente el cajón central, realizándose el hormigonado en dos etapas; en una primera sobre el encofrado exterior se coloca la ferralla de solera, hastiales y riostras; la ferralla se monta directamente sobre el encofrado, ya que debido a las dimensiones del tablero los medios auxiliares necesarios para el movimiento de los paneles de ferralla no hacían rentable la prefabricación de la misma; en la zona atirantada la armadura de las riostras de tirantes, que eran las zonas más complejas de ferrallar se prefabricaban en las proximidades del tablero, colocándose en posición mediante grúa automóvil. A continuación se colocan los encofrados interiores que apoyan en la estructura exterior a través de apoyos y taladros pasantes, hormigonándose la losa inferior, almas y riostras; en una segunda etapa, después de retirarse los encofrados interiores, se colocan los encofrados de la losa superior, formados por tablero de aglomerado hidrófugo sobre puntales, ferrallándose y hormigonándose la losa superior.

En la zona atirantada al hormigonar el tablero se dejan los tubos y anclajes inferiores de los tirantes.

Tras el tesado de la fase construida se procede al movimiento de la cimbra autolanzable para la construcción de la siguiente fase.

En las fases que no presentaban elementos singulares importantes, el ciclo de construcción fue de tres semanas para la zona de vanos de acceso y de cuatro en la zona atirantada.

Una vez terminada una fase del cajón se colocan las costillas de los voladizos, sobre las que se montan las prelosas de hormigón armado y se hormigona el resto de la losa.

Para colocación de las costillas se dispone en la placa de anclaje inferior un apoyo provisional para el puntal, a continuación se nivela la costilla mientras está colgada de la grúa, fijándose mediante las tuercas de regulación de las barras *Gewi* del anclaje superior. Una vez nivelada se suelda el apoyo inferior a la placa de anclaje.

Las prelosas están formadas por una sola pieza para cada elemento de 4 x 5,5 m que se prefabricaba en obra, y se colocaba en posición con ayuda de un camión con pluma.

Debido a que el funcionamiento de un puente atirantado se basa en el equilibrio entre peso de tablero y fuerzas de tirantes ha sido necesario realizar un control cuidadoso de los espesores del tablero

en construcción y corregir el plan de tesado de tirantes en función del peso estimado del tablero construido, que ha sido un 10% mayor del teórico, debido a los sobreespesores y al incremento de la densidad del hormigón sobre la de cálculo inicial.

Dada la disposición del atirantamiento en plano único, para recoger la torsión del tablero, a la altura de la pila principal se realiza un apoyo en la misma mediante dos estructuras metálicas piramidales, que se conectan al tablero y al travesaño inferior de la pila principal mediante placas ancladas mediante barras *Dywidag* pretensadas. Este punto de apoyo sirve también como punto fijo del puente, que compensa el desequilibrio de esfuerzos horizontales, entre los dos vanos atirantados, aparte de otras funciones.

El tablero del puente tendrá en el futuro otras utilidades como paso de servicios por su interior, habiéndose previsto la posible instalación de dos canalizaciones de agua de 250 mm de diámetro, 6 conductos de 140 mm para la red de teléfonos y otros 6 para otros servicios en el futuro.

El fondo del tablero se encuentra taladrado de forma regular para evacuar el agua que se condense en su interior, y también para eliminar derrames o roturas que se produzcan en las conducciones.

El acceso al interior del cajón del tablero se realiza mediante dos arquetas en los estribos que permiten introducir y extraer tuberías y piezas a través de los pasos de hombre. El fondo del cajón también dispone de trampillas de acceso en la zona de los tirantes que están obturadas con placas de hormigón y que en un futuro permitirán el mantenimiento de los anclajes inferiores de los tirantes.

Se debe hacer una mención especial de la rasante definitiva del puente, que es muy difícil de garantizar en un puente de este tipo; se han puesto medidas extraordinarias de control y cálculos previos de evolución de asientos y flechas en los distintos vanos y puntos de la estructura desde el comienzo de la obra para obtener la geometría proyectada.

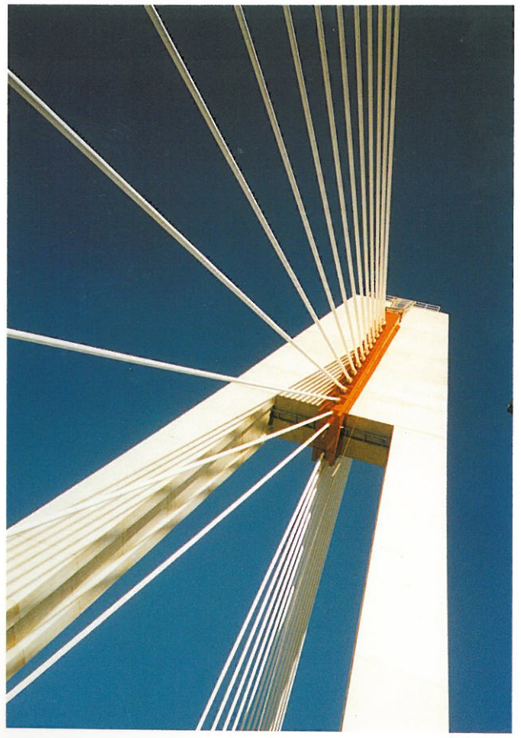
TIRANTES

Para los tirantes se ha adoptado la disposición en abanico corregido, con una separación entre anclajes en tablero de 8 m y una separación vertical entre anclajes en célula del orden de 0,80 m, disponiéndose los 28 tirantes en un solo plano central.

Los cables están formados por cordones paralelos de torones desnudos de acero dentro de una vaina de polietileno de alta densidad, negra en su parte interior, coextrusionada con otra exterior blanca; la protección de los cables se complementa con inyección de lechada de cemento en el tramo medio y resina *epoxi* en la zona superior e inferior de los anclajes. El tesado se realiza desde la célula metálica situada en coronación de la pila.

El número de torones que componen cada cable oscila entre 35 y 76 Ø 0,6".

Una vez completada la construcción del tablero y pilono se realiza el montaje y tesado de tirantes.



Los tirantes se tesan desde el anclaje superior situado en la célula del pilono, realizándose el tesado torón a torón mediante gato unifilar. En el primer lugar se procede al levantamiento de la vaina con el primer cordón del tirante, a continuación se montan los cordones portadores que son aproximadamente un tercio del total; estos cordones se tesan directamente a continuación de enfilar cada uno y en último lugar se enfila el resto de los cordones, tesándose después de enfilar todos.

Una vez terminado el tesado del tirante se comprueba la tensión de un 20% de los cordones mediante el levantamiento de las cuñas.

En los primeros tirantes tesados se comprobó la tensión total del tirante mediante un gato de 1.200 toneladas; esta comprobación dejó de realizarse al obtenerse una buena correlación entre la fuerza del gato de 1.200 T. y la estimada en el levantamiento de cordones con el gato unifilar.

La tensión a la que se debe de tesar cada tirante es función del estado de los distintos elementos de la estructura por efectos térmicos; por esta razón es necesario conocer la temperatura de tirantes, tablero y pilono y los gradientes térmicos en tablero y pilono en el momento del tesado; con este fin se ha realizado una instrumentación del puente como se explica posteriormente.

Una vez conocidos los parámetros térmicos de la estructura se determina la corrección que hay que hacer a la fuerza de tesado del tirante y a continuación la fuerza de tesado de cada uno de los cordones del tirante, ya que ésta es distinta en cada uno, con el fin de que quede a la misma tensión de cálculo al final del proceso de tesado de los torones.

La realización de estos cálculos se lleva a cabo mediante programas realizados específicamente para este puente y que al contener todos los datos de la estructura en los 34 esquemas estáticos por los que va pasando, permite la obtención de las tensiones de tesado casi instantáneamente, sin necesidad de suministrar más datos que los parámetros térmicos existentes en el momento del tesado.

IV PUENTE SOBRE EL RIO GUADIANA EN BADAJOZ

El tesado de tirantes se ha llevado a cabo durante los meses de Agosto y Septiembre de 1994. A causa de la poca inercia térmica de los tirantes, la temperatura de los mismos evoluciona prácticamente con la temperatura ambiente mientras que las variaciones térmicas en tablero y pilono están más amortiguadas. Con el fin de evitar que la temperatura de tirantes varíe mucho durante el proceso de tesado éste se ha llevado a cabo entre las once de la noche y once de la mañana aprovechando el valle térmico nocturno y evitando las rápidas variaciones térmicas por efecto del soleamiento

Una vez terminado el tesado de tirantes se ha procedido al control de tensión de los mismos para contrastar los resultados con los de la instrumentación y con los teóricos de cálculo a fin de decidir sobre la necesidad de un retesado. En base de lo anterior y al estar el puente dentro de los márgenes previstos, se decidió no retesar.

Con el tesado de tirantes tiene lugar el levantamiento progresivo del tablero de las pilas provisionales. Para controlar mejor el tesado de los tirantes se procede al desapeo de la misma, mediante el vaciado de unas cajas de arena situadas en coronación de los fustes de las pilas provisionales.

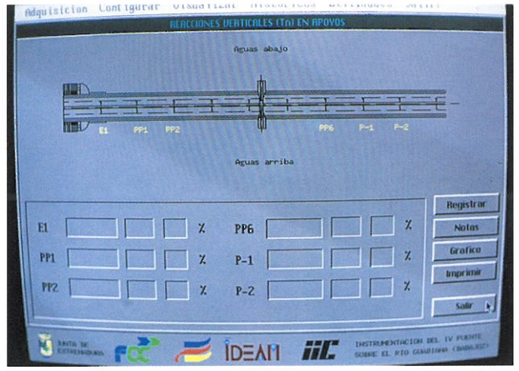
Al finalizar el tesado de tirantes se procede a completar el pretensado del tablero realizando los pretensados de 2ª fase longitudinales, la inyección de esas vainas de 2ª fase, ejecución de acabados del tablero, demolición de las pilas provisionales, terminación de los márgenes del río, estribos, acondicionamiento de las islas, instalación del alumbrado viario y ornamental de la obra, así como los trabajos de jardinería en las medianas, estribos, islas del río y rotondas junto a la instalación de riego necesario para las mismas.

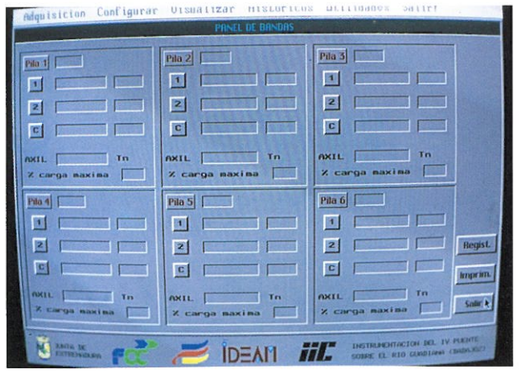
ESTRIBOS

En la zona de los estribos se han construido muros de piezas prefabricadas de hormigón blanco ancladas al terraplén posterior mediante mallas de geotextil y pernos de fibra de vidrio; estos muros delimitan las jardineras de esa zona y tienen un acabado rugoso, que los protege frente a las pintadas aunque también se les dará un tratamiento posterior de protección.

Las zonas de los estribos están dotadas de escaleras amplias con rampas para ciclistas y personas discapacitadas, teniendo los márgenes del río un manto de escollera de piedra de protección, zonas ajardinadas y sistema de riego.

INSTRUMENTACION





Con el fin de conocer la evolución y el estado de la estructura, preparar el plan de tesado y controlar las operaciones de tesado de tirantes, se ha instrumentado el puente para determinar las siguientes variables:

- Temperatura ambiente.
- Temperatura de pilono, tablero y tirantes.
- Tensiones en tirantes.
- Reacciones en pilas.
- Tensiones en el apoyo del tablero en el pilono.
- Tensiones en la célula de anclaje superior.
- Deslizamiento en la conexión célula-hormigón.
- Difusión de tensiones de anclaje de tirantes en el hormigón.
- Movimientos del pilono y del tablero.

La recogida de información suministrada por los distintos sensores y aparatos de medida se efectúa en un ordenador que realiza registro de los mismos y permite su tratamiento en tiempo real.

La medida de temperaturas se realiza mediante termómetros eléctricos. Se han instrumentado tres secciones del tablero, tres secciones de cada fuste del pilono y cuatro tirantes, con un total de 56 termómetros.

A partir de los datos de temperaturas el ordenador suministra la temperatura media de pilono, tablero y tirantes y los gradientes térmicos en pilono y tablero, lo que se utiliza para obtener en el momento del tesado de cada tirante las correcciones a efectuar en la fuerza de tesado con el fin de que la tensión de cada tirante corresponda con la teórica a la temperatura de referencia.

Las tensiones en tirantes se controlan mediante bandas extensométricas, colocándose nueve por tirante.

Se han medido reacciones en las dos pilas de retenida, el estribo correspondiente al vano atiran-

tado y tres pilas provisionales. La medición se realiza mediante apoyos de neopreno confinado instrumentados con un captador de presión.

La determinación de reacciones en apoyos sirve para controlar el peso del tablero y ajustar las fuerzas de tesado de tirantes.

El control de reacciones se complementa con la determinación de tensiones en el apoyo metálico del tablero en el pilono, que se realiza mediante bandas extensométricas.

Además de la instrumentación utilizada para el proceso de tesado se ha realizado un control suplementario del comportamiento tensional del puente en algunos detalles.

Se han instrumentado dos secciones del puente para comprobar las hipótesis de la difusión de la fuerza de un tirante en la losa superior para lo que se han instalado ocho bandas extensométricas por sección.

Se han colocado veinte *strain-gages* en la célula metálica de anclaje de tirantes con el fin de analizar el comportamiento tensional de las caras laterales de la misma y la difusión de las fuerzas de anclaje hacia el hormigón del pilono.

Se han colocado cuatro comparadores entre la célula metálica y el hormigón del pilono para comprobar el nivel del deslizamiento entre ambos y para evaluar la rigidez de los conectores STUD.

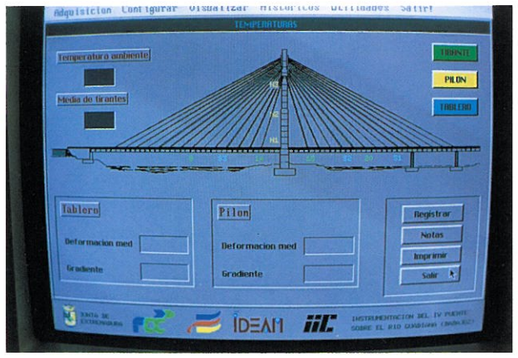
La precisión de los esfuerzos obtenidos por la instrumentación se sitúa en el entorno de ± 5% para reacciones de pilas y ± 10% para esfuerzos en tirantes, por lo que los resultados obtenidos son más cualitativos que cuantitativos y han servido principalmente para comprobar la evolución del comportamiento del puente, aunque para conocer las tensiones finales en tirantes es necesario el control de los mismos mediante levantamiento con gato una vez terminado el tesado.

Se han realizado estudios de los efectos dinámicos de la estructura y se ha comprobado que cumple las normas internacionales de confortabilidad, tanto de amplitud como de frecuencia de las vibraciones.

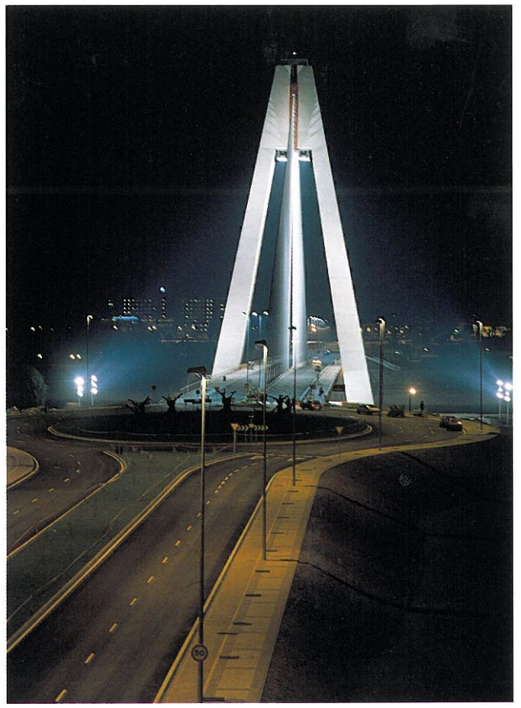
Los sensores de la instrumentación que intervienen en un proceso de seguimiento y control de la estructura después de la fase de construcción, se centralizan en una serie de cajas de conexión que permitirán en el futuro comprobar los siguientes parámetros:

- Tensiones en los tirantes instrumentados.
- Reacciones en las pilas 1, 2 y Estribo 1.
- Tensiones en el punto fijo del tablero o pila "0".
- Tensiones en la célula de anclaje de tirantes.
- Temperaturas en el tablero y pilono.

Mediante un seguimiento adecuado de la estructura de acuerdo con el plan de revisiones y mantenimiento de la misma y la toma de datos de los sensores dejados para este fin se puede conocer la evolución de la misma y tomar las medidas correctoras que fueran precisas si se produce alguna incidencia.



ILUMINACION



Conceptualmente la podemos dividir en dos partes: alumbrado viario y ornamental; a su vez el tratamiento distintivo que se ha hecho por zonas permite separar el alumbrado viario en los accesos del que se ha instalado en el puente. Las características más notables de cada uno de ellos son las siguientes.

Alumbrado viario de los accesos.

Se realiza mediante luminarias equipadas con lámparas de vapor de sodio de alta presión de 250 w sobre postes de 12 m de altura colocados en el borde exterior del carril de bicicletas de forma que se consigue una notable uniformidad y unos niveles de iluminación en la calzada y aceras suficientes; las iluminancias horizontales varían desde 39 a 33 lux, y la equidistancia de las luminarias es de 40 m en el acceso desde la calle Sinforiano Madroñero, 35 m en la rotonda elíptica, 45 m desde el puente hasta la carretera N-V y 30 m en la rotonda de entronque con la N-V.

Alumbrado viario en el puente.

En el tramo de viaducto de acceso, fuera de la zona atirantada, se utilizan lámparas de halogenuros metálicos de 400 w colocadas en dobles luminarias sobre un poste de 12 m situado en la mediana del puente, el color blanco de la luz emitida permite diferenciar la zona del puente de los accesos y se conjuga con la iluminación ornamental resaltando el color blanco de los tirantes y el hormigón de la estructura elaborado con cemento de ese mismo color.

La iluminancia horizontal media es de 45 lux y la equidistancia es de 32 m, coincidiendo con las pilas del viaducto de acceso.

La zona atirantada, que tiene una longitud de 256 m, se resuelve mediante iluminación zenital, proveniente de dos baterías de proyectores colocados en la parte inferior de la célula metálica de anclaje de los tirantes del pilono; estos conjuntos de proyectores se componen de 2 unidades de 2.000 watios y cuatro de 1.000 watios por calzada.

El montaje de los proyectores se efectúa sobre una estructura metálica que mediante un cabrestante eléctrico telecomandado desde el tablero

puede descender al nivel de la calzada del puente para realizar las labores de mantenimiento y reposición de lámparas.

La iluminancia horizontal media a nivel de calzada es de 30 lux sin incluir la influencia de la difusión por reflexión del alumbrado ornamental del pilono y los tirantes que incrementan este valor hasta los 40 lux, que es una cifra similar al viaducto de acceso al puente.

Alumbrado ornamental.

Se divide en cuatro zonas que analizaremos una a una: Pilono, Tirantes, Dintel inferior, Balizamiento del tablero.

Pilono.

Desde cuatro mástiles, situados en una de las islas que rodea al pilono se instalan 8 unidades de proyectores de 1.800 watios, en cuatro grupos de dos unidades enfocando según sea el haz intensivo la parte superior o extensivo la parte inferior de dicha estructura; se consigue con ello una iluminancia media de 121 lux, que resalta esta parte del resto de la estructura. El color de la luz es blanca, mediante lámparas de halogenuros metálicos similares al resto del puente.

Tirantes.

El abanico de los tirantes se alumbra desde las mismas torres que se mencionaron antes mediante cuatro grupos de 2 proyectores de 2.000 watios y cinco proyectores de 1.000 watios, todos ellos equipados con lámparas de halogenuros metálicos. El nivel de la iluminancia media es de 45 lux en la zona de los tirantes.

La situación de los proyectores en una cota inferior al tablero del puente permite evitar el deslumbramiento de los conductores que circulen por el mismo, resaltando a la vez el juego de volúmenes y sombras matizadas de las diferentes partes de la estructura.

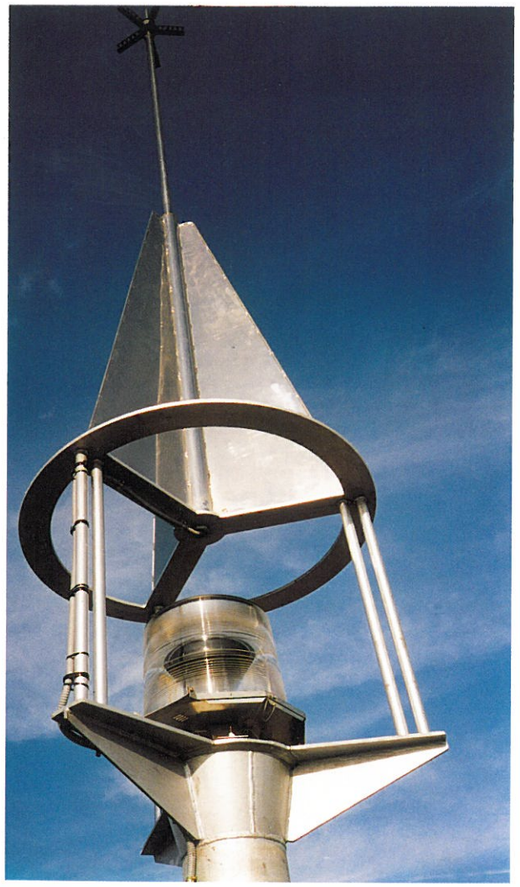
Dintel inferior del pilono.

La parte inferior del pilono, junto a las estructuras piramidales de soporte y fijación del tablero, se iluminan desde la parte inferior del tablero, mediante dos grupos de cuatro proyectores de 400 watios, con el mismo color de luz que el resto de la estructura. La iluminancia media es de 32 lux.

Balizamiento longitudinal del tablero y en altura del pilono.

La sucesión de costillas metálicas que existe a lo largo del tablero se resalta mediante dos puntos de luz en cada vano de 4 m situados en ambos lados de la costilla metálica y que están equipados con lámparas electrónicas de bajo consumo tipo PL de 23 watios. Las 452 luminarias instaladas, 226 en cada lado del tablero, delimitan claramente la línea del tablero del puente.

El pilono se remata en su parte superior con una estructura metálica de 8 m de altura que soporta un pararrayos ionizante para la protección de la estructura y una baliza luminosa de intensidad variable día/noche de 20.000 lux de día a 2.000 lux de noche, en base a una lámpara estroboscópica regulable de descarga de xenón; asimismo se han instalado tres proyectores de halogenuros metálicos de 250 w que por reflexión sobre la estructura de acero inoxidable destacan durante la noche la situación del remate del pilono.



JARDINERIA

El objetivo que ha marcado el tratamiento de las diversas zonas de la obra ha sido crear un espacio urbano acogedor con unas plantaciones en la mayoría de los casos autóctonas, con bajo mantenimiento y que no interfieran con la visión de la estructura ni con la seguridad vial de los conductores que usen estos accesos; también se han recuperado árboles de otras zonas de Badajoz y se han trasplantado en las rotondas, salvándolos de una muerte segura. El tratamiento por zonas es como sigue.

Alcorques.

Los árboles de alineación son aligustres del Japón en la zona de Sinforiano Madroñero y olmos de bola desde el puente hasta la N-V. Están en alcorques de las aceras, separados cada 8 m.

Zona desde Sinforiano Madroñero al Puente.

La mediana de 5 m se compone de árboles del amor (Cercis Siliguastrum) y laurocerasus (Prunus Laurocerassus), junto a boneteros del Japón (Evonimus Japonicus). La rotonda elíptica tiene un grupo de olivos de más de 300 años de edad recuperados de otras zonas de Badajoz.

Zona desde el Puente hasta la N-V.

La mediana central de un metro se resuelve mediante adelfas (Nerium Oleander) a todo lo largo y llegando a la rotonda de entronque con la N-V se han respetado los árboles existentes (sobre todo cipreses), completándose con olivos y encinas trasplantados de otras zonas.

Las plantas arbustivas de las rotondas comprenden romero, cantueso, enebros de china en diversas variedades, cotoneaster, etc.

Zona de estribos y parte inferior del puente.

Las jardineras se componen de durillo, abelia, berberis, coronilla, cotoneaster, hiedra, madreselva, glicinia y otras.

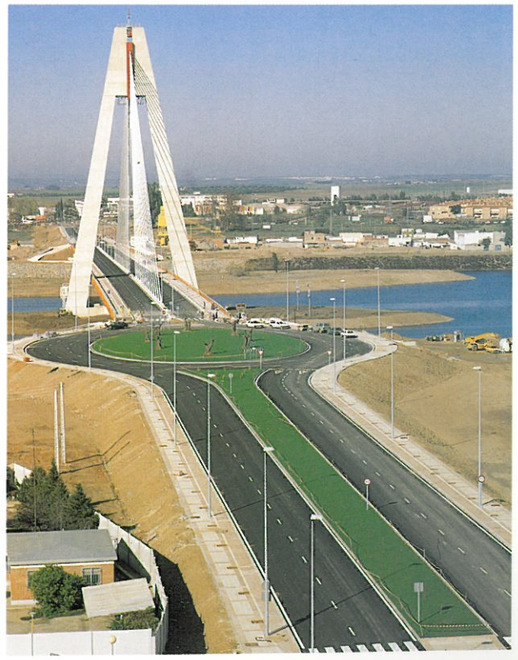
Islas en el cauce del río Guadiana.

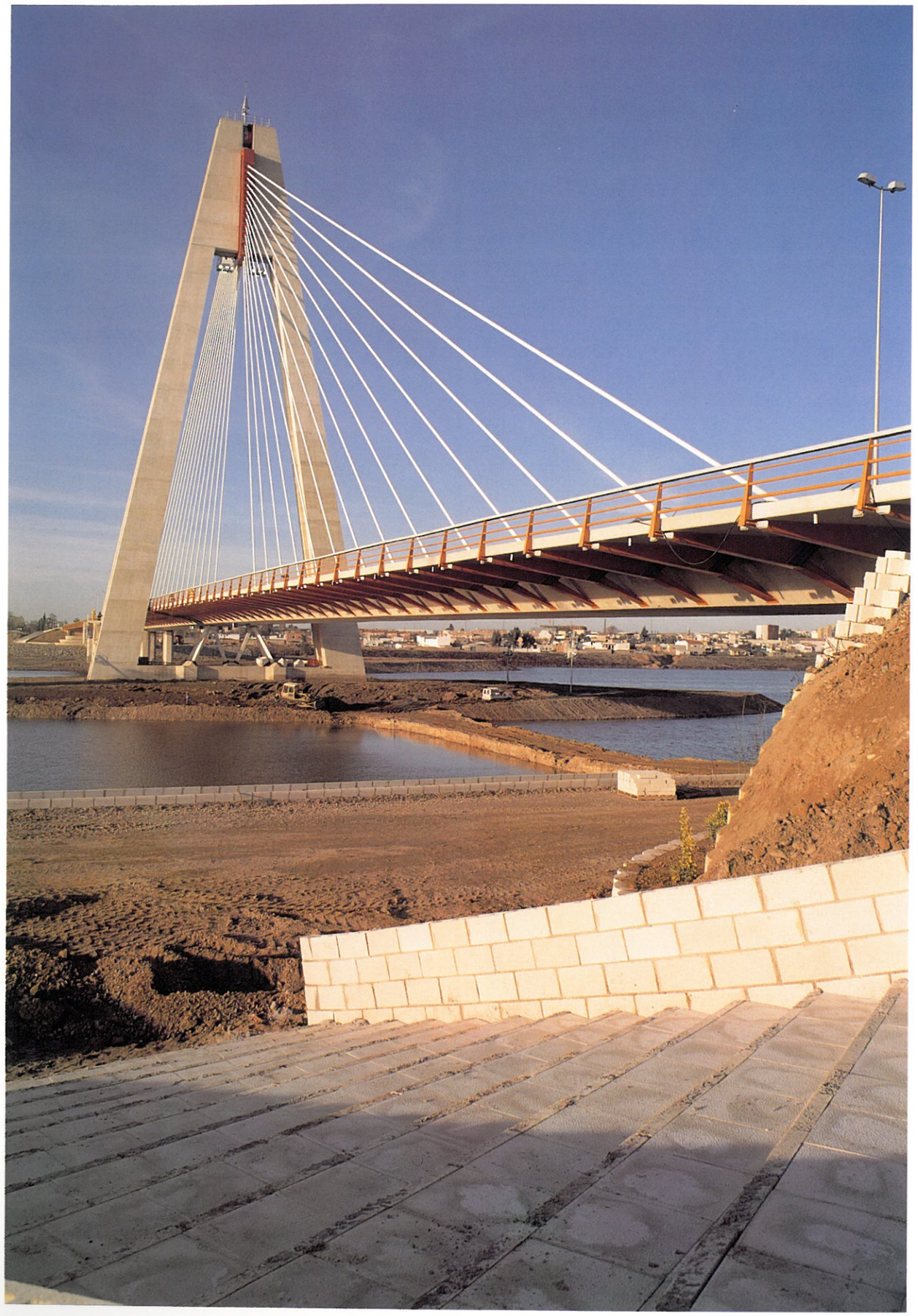
En las islas que se forman en el río alrededor del puente se plantan chopos, fresnos, alisos, sauces llorones, tamarindos y adelfas.

Sistema de riego.

Las medianas llevan un sistema de difusores automáticos perimetrales y las rotondas se riegan mediante aspersores, complementándose el sistema con bocas de riego tradicionales en las aceras, estribos y rotondas para montar mangueras manuales.

El consumo de agua se ha tratado de minimizar al máximo, para lo que se han plantado las especies más resistentes de acuerdo con la climatología y ubicación de las plantas.





CARACTERISTICAS TECNICAS

Longitud de la actuación	1.382 m
Longitud del puente	452 m
Vanos en el tramo de acceso	6 uds.
Luz en los vanos del tramo de acceso	32 m
Vanos en el tramo atirantado	3 uds.
Luces del tramo atirantado	136 m, 88 m y 32 m
Altura del pilono	81,20 m
Número de tirantes	28 ud.
Movimiento de tierras, excavación y relleno	272.500 m^3
Movimiento de tierras en la formación de islas	242.950 m^3
Hormigón estructural	
Tablero	5.750 m^3
Pilono	2.850 m^3
Cimentaciones y pilas	6.450 m^3
Acero estructural	443.500 kg
Acero en armaduras pasivas	2.100.000 kg
Acero de pretensado	195.000 kg
Acero en formación de tirantes	160.000 kg
Pilotes de 1.500 mm diámetro	610 ml
Pantallas	963 m^2
Nº de plantas sembradas en la obra	15.783
Nº de puntos de luz instalados	613
Potencia eléctrica instalada	250.000 w
Aglomerado asfáltico en el puente y accesos	10.000 Tn
Pavimento de aceras	12.500 m^2
Carril bicicleta	3.100 m
Superficie ajardinada	38.400 m^2