

III CONGRESO DE ACHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

LAS ESTRUCTURAS DEL SIGLO XXI
Sostenibilidad, innovación y retos del futuro



Realizaciones



PUENTE DE LAS AMERICAS EN MONTEVIDEO (URUGUAY)

Julio **MARTINEZ CALZON**¹

¹ Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería

RESUMEN

La propuesta del MOPT uruguayo de realizar una obra de carácter emblemático y monumental en la entrada desde el Aeropuerto a la ciudad de Montevideo se ha logrado mediante un puente atirantado de planta curva y pila única mixta, de carácter escultórico, que permite dejar en flotación la totalidad del tablero de hormigón para el uso abierto de la distribución del tráfico bajo el mismo. El cuidadoso diseño de los estribos y sus remates coadyuvan a la creación de una obra de marcado carácter estético global que contribuirá a la rehabilitación del entorno semiurbano en que se sitúa la obra.

La ejecución fue realizada por la empresa SACEEM y la Dirección de Obra por la Ingeniera Susana García de la Dirección General de Vialidad con la Asistencia Técnica del proyectista, autor de esta ponencia.

PALABRAS CLAVE

Atirantado, pila mixta, planta curva, pieza copa, estribos.

1. PLANTEAMIENTO JUSTIFICATIVO

La singular tipología del puente nació como respuesta a los requerimientos funcionales y monumentales solicitados por el MOPT de Uruguay para lograr una obra de características originales y conseguir una imagen expresiva y atrayente para los visitantes que llegan a Montevideo desde el Aeropuerto y que, a la vez, sirviera como impulso para la mejora y rehabilitación de su entorno semiurbano. Aprovechando el trazado curvo en planta propuesto para resolver el viario de la zona, se eligió la disposición de una pila central única ubicada en una gran isleta que canaliza los diversos tráfico existentes. En dicha pila se anclan dos familias de cables, constituyéndose una solución atirantada curva simétrica de dos vanos de 70 m de luz cada uno.

La singularidad buscada radica en dos conceptos fundamentales:

la forma de la pila principal y su disposición relativa respecto al tablero; y el cuidadoso tratamiento formal del propio tablero y de los importantes estribos, para conseguir una intensa personalidad y dignidad de la totalidad del puente.

2. DESCRIPCION

La obra, de marcado carácter expresivo, presenta tres elementos fundamentales: pila y sus tirantes, tablero y estribos; interconectados formalmente para conseguir una visión global unitaria, que equilibre la singularidad específica buscada para la pila, permitiendo a la obra expresarse en totalidad y no como yuxtaposición de elementos diversos.

2.1. Pila y tirantes (fig 1 y 2)

La pila se constituye inicialmente por un fuste vertical único, de ancho constante de 2,00 m y canto suavemente variable entre los 2,90 m en el arranque de la cimentación, y un mínimo de 2,25 m a una altura de 4,50 m, por encima de la cota del tablero. A partir de dicha altura, el canto vuelve suavemente a incrementarse hasta un valor máximo de 2,80 m, a 16,89 m por encima del arranque, punto en el que el fuste se escinde en forma de V en dos elementos o brazos ligeramente curvados en alzado, de canto constante de 1,40 m y ancho de 2,00 m igual al del fuste. Estos brazos se rematan y cierran horizontalmente, en su parte alta, con un travesaño de canto ligeramente variable entre 1,00 y 1,56 m y ancho constante de los mismos 2,00 m del resto de la pila, formándose en conjunto una especie de pieza en delta invertida o nabra.

La posición de los dos brazos citados no es simétrica respecto del fuste, sino que el exterior del lado del tablero del puente, se curva e inclina respecto a la vertical mucho más apreciablemente que el interior, para lograr que las dos familias de cables, cada una surgiendo de uno de los dos brazos, se sitúen en cierta manera más directamente sobre cada uno de los dos bordes laterales del tablero, y mejorar así la disposición de los tirantes para lograr el gálibo libre de paso de los vehículos, manteniendo la pila con una altura adecuada.

La forma de la pila no resulta determinada por una gratuita o personal forma de interpretar una pieza resistente, sino que se desprende en gran manera del intento de reducir al mínimo –dentro de las posibilidades geométricas que el sistema tablero-fuste exterior único ofrece– las flexiones laterales permanentes de la pila, intentando que el centro de gravedad de las cargas permanentes del tablero se sitúe lo más cerca posible del eje del fuste de la pila. Este objetivo no

pudo lograrse totalmente, a pesar de forzar al máximo la interacción visual pila-tablero, haciendo que el fuste intersecte levemente el nervio de borde interior del tablero y aplicando esfuerzos adicionales adecuados en los tirantes de retenida extremos, puesto que la geometría en planta de la estructura no presenta la curvatura suficiente para ello. Para conseguir el efecto buscado de centrado de las cargas verticales fue necesario incorporar, al fuste único y a la parte inferior de los arranques de los brazos, un pretensado interno situado en los bordes exteriores de estas piezas. Este pretensado se lleva a cabo en forma isostática, durante el proceso constructivo, de manera que su rendimiento, tanto resistente como deformativo es óptimo, lográndose el efecto buscado de anular prácticamente las flexiones permanentes y, consiguientemente, los efectos de la fluencia, que tenderían a incrementar en los primeros años de uso del puente las flechas y giros transversales de la pila, produciendo la reducción del efecto del atirantado en los vanos del tablero.

Por otra parte, para lograr que la forma y los efectos del pretensado se aprovechen al máximo y favorecer el proceso constructivo, la pila se dimensiona como sección mixta, con el perímetro externo en acero estructural y el resto de la sección rellena de hormigón.

La disposición de los tirantes del puente se efectúa en dos planos, uno por cada borde lateral del tablero. Cada uno de estos planos –en realidad superficies de tipo cónico, debido a la curvatura en planta de dichos bordes– se ancla al brazo de pila que le corresponde en cuanto a posición vertical: así, el plano exterior se ancla al brazo exterior, y el interior al interior. En ambos casos la disposición es de arpa corregida, con anclajes en los brazos de la pila a distancias levemente variables a partir del punto más alto. La separación de anclajes en el tablero es constante, con un módulo ideal de 9,40 m en el eje, que se transforman en 9,53 m en el borde exterior y 9,28 m en el interior, aproximadamente. En el borde exterior el total de tirantes es de 16, situándose: los dos próximos a la pila, con sus anclajes en el tablero dispuestos a medio módulo de distancia respecto al eje de la pila; y manteniendo para los restantes el módulo tipo hasta el final. En el borde interior, la disposición del fuste de pila empotrado con el tablero no requiere los dos primeros tirantes antes citados y, consiguientemente, sólo se emplean 14 tirantes, situándose los dos anclajes centrales de este lado a una distancia del eje de pila de 14,10 m, manteniendo el resto de los tirantes el intereje del módulo tipo.

Los anclajes de los tirantes se efectúan prácticamente en los ejes de los nervios de borde y son activos; es decir, se lleva a cabo el tesado de los tirantes desde los extremos inferiores de éstos, dejándose ocultos en dichos nervios los adecuados cajetines. En la pila, los anclajes van contrapeados; es decir, los tirantes simétricos se anclan en caras opuestas, cruzándose dichos cables en el interior del brazo correspondiente, ligeramente desplazados uno del otro, respecto al punto ideal de cruce. Estos anclajes de pila quedan ocultos en los brazos, efectuándose su salida directamente por las caras laterales, sin otro elemento extraño que el pequeño amortiguador de borde, de forma que se mantenga la máxima limpieza visual de la pila sin la presencia de elementos salientes, capots exteriores, etc. Excepcionalmente, en las dos parejas centrales de la familia exterior, la salida de los cables se produce por la cara externa del brazo de la pila, debido a la gran angulación requerida.



Figura 1

Los tirantes son del tipo de cordones paralelos, con protecciones individuales de triple barrera para cada cordón y, además, el conjunto de cordones se enfunda en una vaina de polietileno de alta densidad de color beige suave, mientras que la pila se prevé con un color también beige claro, para que la totalidad del sistema sea bastante homogénea, aunque con ligeros matices de cambios de color que determinen una sutil variación.

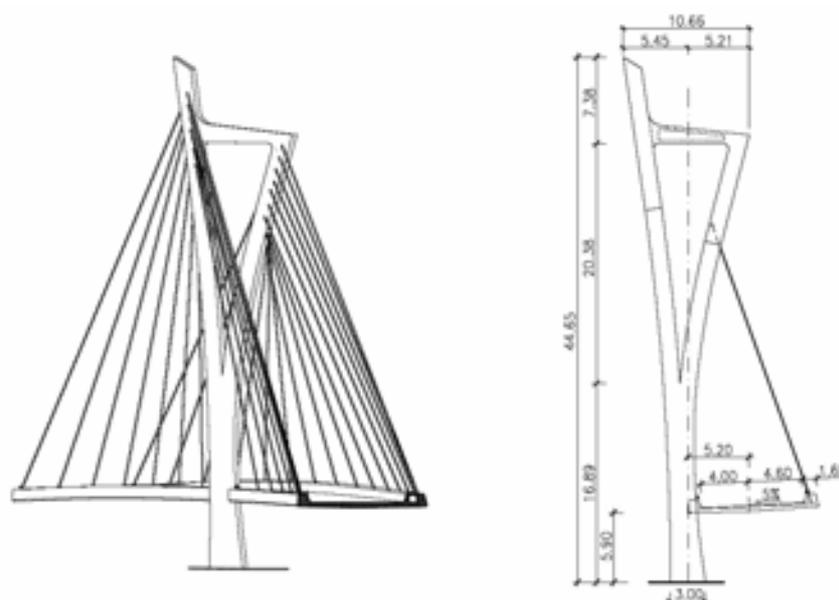


Figura 2

2.2. Tablero (fig 3 y 4)

La solución propuesta para el tablero consiste en una losa maciza de sección constante a lo largo del puente, pero con una ligera variación del espesor en sentido transversal; desde un máximo de 42 cm en el eje del tablero, hasta un valor mínimo de 30 cm en los bordes laterales. Dicha losa se remata en tales bordes con dos nervios longitudinales, en los cuales se integran los anclajes de los tirantes, permitiendo un perfecto reparto y transferencia de las acciones puntuales de los mismos sobre el sistema total del tablero.

Transversalmente, dicha losa trabaja isostáticamente, armándose apropiadamente. Los nervios longitudinales se diseñan casi rectangulares, estando sus caras exteriores ligeramente inclinadas respecto al plano de la calzada en ambos laterales, adaptarse a los planos de cables de uno y otro lado, generándose de esta forma un efecto de suavidad y adaptación entre ambos subsistemas.

La anchura total del tablero, resulta igual, 11,25 m, debido al ligero sobreancho que debe adoptarse para que las parejas de tirantes exteriores, mantengan libre el gálibo mínimo de 4,5 m en la línea de borde de calzada. El acabado es

de hormigón visto, en color claro, sin ningún tratamiento especial, a excepción de un despiece cuidadoso de los encofrados.



Figura 3

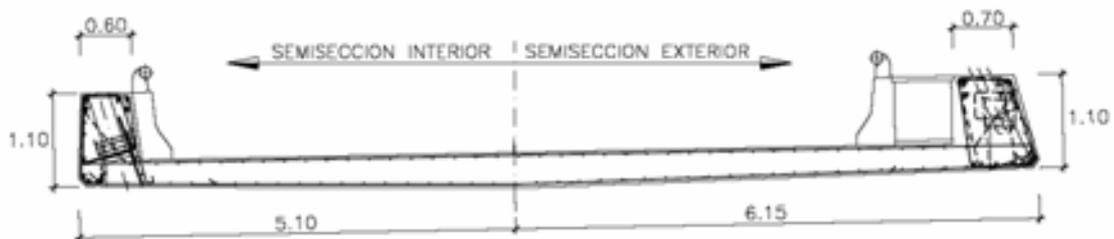


Figura 4

2.3. Estribos

En toda obra urbana, en la que la proximidad de calzadas en paralelo requiere largos muros de contención y acompañamiento, uno de los aspectos más delicados del diseño radica, precisamente, en conseguir para estos potentes elementos visuales un tratamiento que permita minimizar los efectos de pesadez y opresión. Consiguientemente, el esfuerzo de diseño de la solución en estas zonas de la obra, en su doble vertiente global de estructura y sistema monumental, ha sido parte tan fundamental o más, que el aplicado al diseño del puente propiamente dicho. Para ello, cada uno de los dos estribos se ha dividido en tres partes claramente diferenciadas, pero que –a la vez– están muy ligadas y articuladas, entre sí, y con el tablero del puente.

Estas tres partes son las siguientes:

1) Elementos “copa” en los paños frontales de los estribos.

En cada uno de los extremos del tablero se han definido los muros frontales de los estribos en una forma espacial, tratando de que cada una de las superficies inclinadas del diedro del fondo del tablero en la parte del vano, se dirija hacia su apoyo ideal en el terreno siguiendo una serie de cambios de dirección mediante planos cada vez más inclinados. Esta disposición resulta prácticamente natural en tres de los lados: laterales del puente y frontal del estribo; pero la verdadera originalidad de este elemento se logra al conseguir que el cuarto de dichos lados –el borde dorsal de dicho muro– ofrezca también un tratamiento semejante, consiguiéndose la formalización espacial de una especie de elemento en forma de copa o flor que se abre a partir de su tallo, representado en este caso por el muro de remate (fig 5 y 7).

Conceptualmente, esta forma no es tampoco gratuita, sino que la misma responde de manera precisa a las necesidades no sólo estéticas y formales, sino a los condicionantes estructurales. Efectivamente, la disposición adoptada permite:

- transferir al terreno las componentes de los tirantes extremos, denominados de retenida, que regulan de forma notable la estabilidad lateral de la pila, a través de un sistema suficientemente rígido para que dicha retenida sea lo más eficaz posible.
- transferir al tablero las componentes horizontales de tales tirantes sin verse afectados en ninguna forma las restantes zonas del estribo.
- conseguir que los efectos diferidos de fluencia y retracción sean prácticamente libres, por la reducida rigidez del elemento estribo en la dirección de estas sollicitaciones, sin producir efectos secundarios de ningún tipo sobre el resto del cuerpo del estribo.

Dado que en estas zonas se ubican los tirantes extremos, a partir de los mismos la anchura total del tablero se reduce hasta el valor de 9,10 m, al poder desaparecer los nervios de borde que recogen los anclajes.



Figura 5



Figura 6

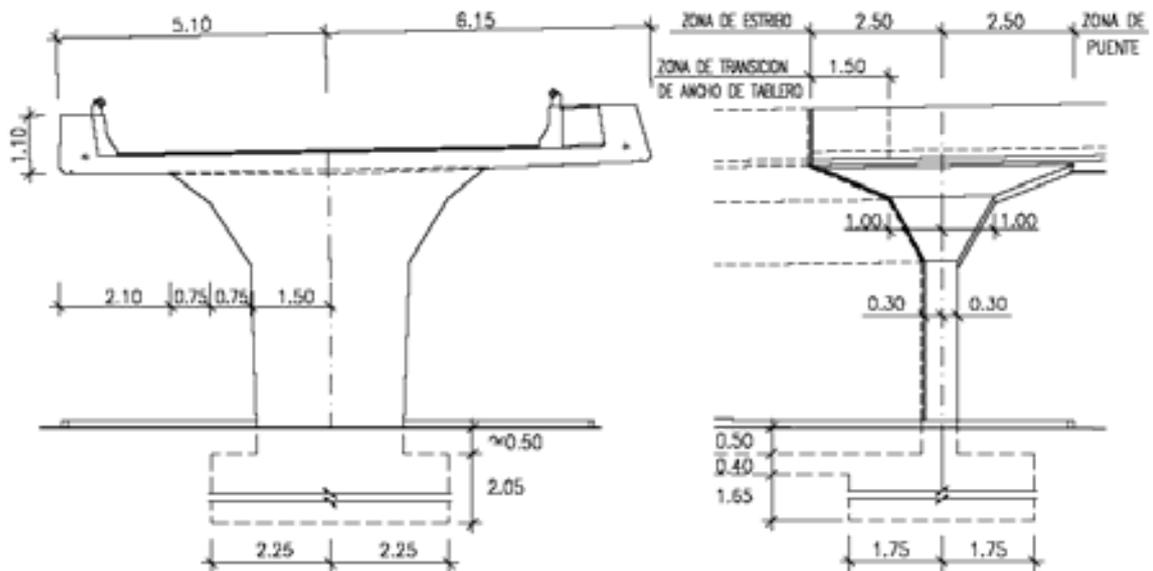


Figura 7

2) Tramos intermedios estructurales

La búsqueda intencionada de aligeramiento visual de los accesos al tablero, para evitar las sensaciones de pesadez y opresión antedichas, tanto al conductor que va junto a ellos, como al observador exterior de la obra, se formaliza con la inclusión de una zona estructural intermedia, intercalada entre el elemento frontal antes descrito y la zona de estribo convencional con muros

laterales. Dicha zona intermedia se forma manteniendo la losa del tablero del puente con voladizos de 2 m a cada lado, y muros intermedios retranqueados que soportan dicha losa. Estos muros, que sirven de soporte continuo a la losa y constituyen con la misma un pórtico transversal, siguen en su forma la misma disposición del elemento copa de estribo, y generan unos espacios laterales que reducen, en forma drástica –al distanciarse de las zonas de tráfico y generar un fuerte efecto de volumen variable– la pesadez visual de los accesos (fig 6 y 8).

Dichos retranqueos se mantienen hasta que la altura de la rasante sobre el terreno natural se reduce a 3,20 m; en dicho punto se remata cada zona con un muro transversal que separa las mismas de las zonas de terraplén confinado. Las longitudes de tales zonas de tramos estructurales resultan: 96,08 m y 82,44 m.

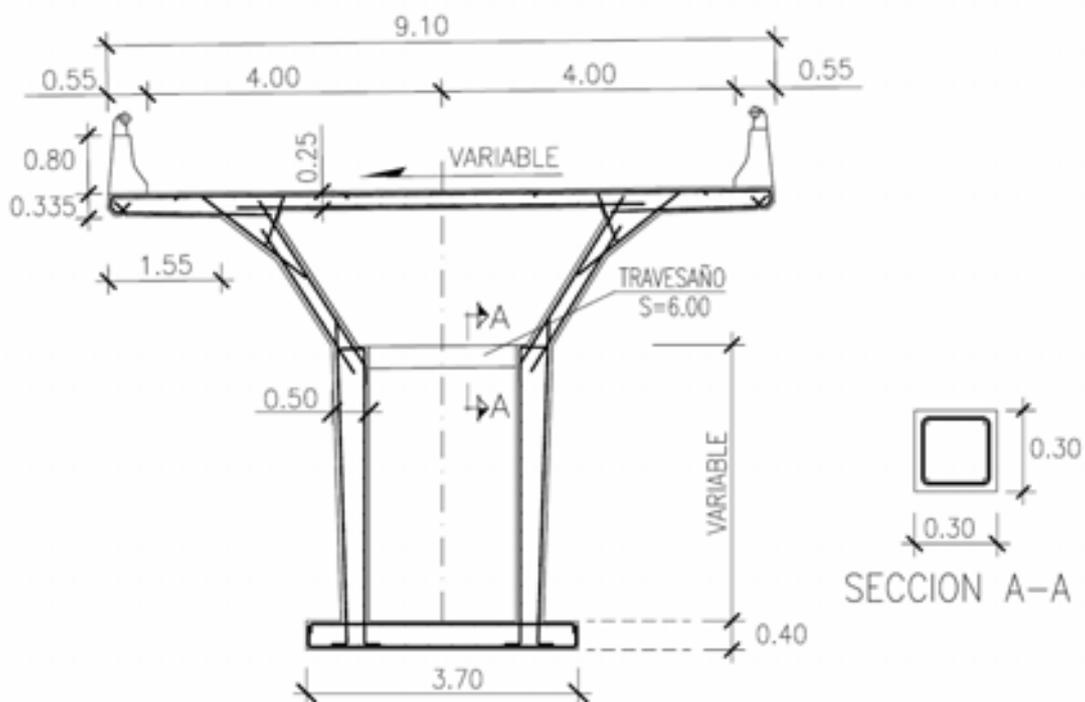


Figura 8

3) Tramo final en terraplén con muro laterales.

A partir del punto antedicho, el estribo se hace convencional y se constituye mediante muros y zapatas de contención lateral, con un relleno de tierras.

Estos muros se prolongan, prácticamente, hasta que la rasante de la obra alcanza el nivel de la vía principal. La única particularidad de estas zonas finales de los accesos consiste en mantener el remate del borde exterior de la zona de barandilla-defensa, bisel extremo y goterón, para, a partir del borde interior de este último, descender el muro vertical. Las longitudes de estas zonas de los accesos resultan: 82.203 m y 81.393 m. Todo ello determina una longitud total de obra, incluido el puente, de 486.116 m; y longitud entre puntos de tangencia de entrada al pasaje, de 565.39 m.

2.4. Cimentaciones

2.4.1. Cimentación de la pila

Se constituye mediante 52 pilotes $\phi 50$ cm flotantes de hormigón, de longitud aproximada de 6,50 m, aprovechando como estrato competente para la recepción de las cargas el lecho existente de arenas finas muy densas, dejando un espesor de unos 5 m de dichas arenas por debajo del fondo de los pilotes. La cimentación de la pila se dispone en forma asimétrica respecto a su eje para tener en consideración, en la forma más ventajosa posible, la notable diferencia de momentos transversales que pueden actuar en el fuste, producida por la disimetría de acciones.

Por debajo del encepado se situó una estrecha galería de acceso para acceder en su momento a los anclajes del pretensado del fuste; galería que finalmente se rellenó de hormigón pobre.

2.4.2 Cimentación de estribos y muros

Cimentación directa, mediante zapatas que transmiten sus acciones al manto de arena a una profundidad mínima de unos 2,50 m, cota situada por encima de la capa freática.

3. PROCESO CONSTRUCTIVO

En términos globales el procedimiento constructivo previsto para la obra es básicamente convencional:

- Ejecución simultaneada de la pila y del tablero. La pila, mediante elevación sucesiva de dovelas metálicas que se rellenan de hormigón; el tablero, mediante encofrados cimbrados de uso múltiple.
- Tesado de los tirantes desde los anclajes activos inferiores, para poner en carga el sistema y descimbrar la obra, finalizando prácticamente el proceso de ejecución.

No obstante, la gran flexibilidad de la pila, tanto longitudinal como transversalmente, requirió un cuidadoso control de la introducción de los esfuerzos de tesado de los tirantes, llevándose a cabo un análisis específico consistente básicamente en la aplicación de una metodología que reproducía el carácter fuertemente no lineal de dicho proceso de tesado. El origen de esta no linealidad geométrica residía, por una parte, en la influencia determinante provocada por la flexibilidad de la pila en la variación de los esfuerzos en los tirantes ya tesados durante el tesado de uno de ellos y la inclusión de este efecto en el análisis del proceso resultaba determinante. Considerando los condicionantes introducidos por este hecho, se definió un protocolo de tesado fraccionado en dos fases y finalizando el proceso con una fase de ajuste final del conjunto de los tirantes.

Por otra parte, la modelización de la presencia de los puntales de apeo del tablero introducía otro condicionante de tipo no lineal originado por el posible levantamiento y apoyo alternativo en dichos puntales.

Con objeto de realizar un seguimiento analítico preciso en obra de dicho proceso de puesta en carga de los tirantes se desarrolló un programa de cálculo que permitió realizar el ajuste en tiempo real de los parámetros de cálculo de los modelos analíticos (flexibilidad real de la pila; rigidez y ancho eficaz del tablero, etc.) medidos realmente en obra en las fases previas de puesta en carga de los tirantes, para garantizar los esfuerzos de tesado finales y la posición definitiva del tablero considerados.

III CONGRESO DE ACHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

LAS ESTRUCTURAS DEL SIGLO XXI
Sostenibilidad, innovación y retos del futuro



Realizaciones



PUENTE DE LAS AMERICAS - URUGUAY

Pablo **CASTRO PEYRONEL**¹, Joaquín **LANZA SCLAVO**²,

Andrés **RICO MENGE**³.

¹ Ing. Civil. Castro & Dieste.

² Ing. Civil. SACEEM.

³ Ing. Civil. SACEEM.

RESUMEN

El Pasaje Superior Puente de Las Américas – Uruguay resuelve el nudo vial de entrada a la Ciudad de Montevideo.

Consiste en la construcción de un pasaje superior de 146 m de longitud con una pila central única, externa al tablero, configurando una solución atirantada, curva, simétrica de dos vanos de 73 m de luz cada uno, incluyendo también los accesos estructurales este y oeste de 164 m y 178 m respectivamente.

A continuación se detallan los aspectos más significativos de su construcción, todos los cuales fueron adecuada y previamente aprobados por la Dirección de Obra en la persona de la Ingeniera Susana García del Ministerio de Transportes y Obras Públicas de Uruguay y contrastados con la Asistencia Técnica a la Dirección de Obra llevada a cabo por MC2 Estudio de Ingeniería de Madrid, a propuesta de la Empresa Constructora SACEEM y su equipo de Ingenieros colaboradores firmantes de esta ponencia.

1. TABLERO

1.1. Geometría

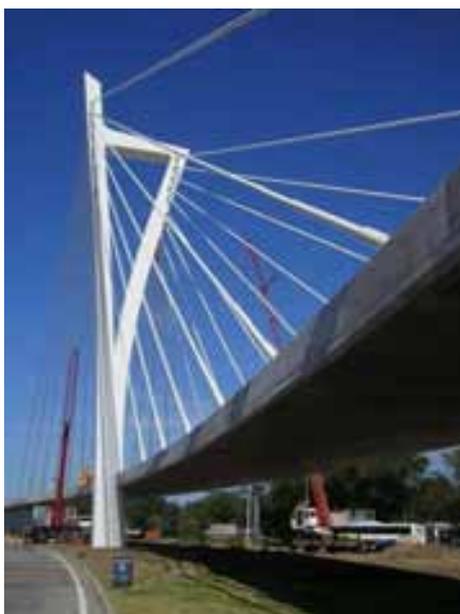


Foto N° 1

En planta el eje del puente es un arco de circunferencia con unos pequeños tramos de recta en los extremos. En alzado el puente se encuentra en un acordamiento parabólico.

La sección transversal del tablero es constante a lo largo del mismo y está constituida por una losa de canto levemente variable con dos nervios de borde donde se alojan los anclajes de los tirantes. El peralte de esta sección transversal es variable a lo largo del puente, así como obviamente la pendiente longitudinal.

Toda la geometría del tablero y de los puntos de posicionamiento de anclajes inferiores están definidos en el proyecto, en un sistema de coordenadas locales relativas a la sección transversal (sistema que acompaña la curva gaussa "NPT al eje" definida en el trazado vial).

La primera tarea entonces fue la obtención de las coordenadas globales de los puntos representativos de las diferentes secciones a partir de los parámetros locales definidos. Esto se realizó mediante dos procedimientos diferentes y por distintas personas a fin de contrastar resultados y evitar posibles errores. Por un lado, se resolvió aplicando geometría analítica, generando planillas de coordenadas globales de puntos notables en las diferentes secciones de replanteo. Por otro lado, mediante un modelo de CAD en 3D. La concordancia absoluta de resultados entre ambos métodos permitió trabajar con la tranquilidad de la corrección de los resultados.

1.2. Procedimiento constructivo del Tablero.

El tablero del puente se construyó utilizando un sistema de encofrado convencional soportado por torres modulares apoyadas en el terreno. El módulo unitario de llenado tenía una separación entre secciones extremas de 9,60m y un volumen de hormigón de 40m³. De esta forma se realizaron un total de 15 llenados.

El orden de construcción fue desde las piezas copa o frentes de los estribos, situadas en los extremos, hacia el centro. El hormigonado del tramo central

(conexión de ambos frentes y conexión lateral a la pila) se realizó en última instancia.

Se definieron “secciones de replanteo geométrico” cada 4,80m. Estas son las secciones transversales del tablero en las que se imponen las coordenadas teóricas de la misma al encofrado, incluida la contraflecha. Entre dos de estas secciones consecutivas, la geometría varía en forma lineal. Entre dos secciones de replanteo consecutivas cualesquiera, el encofrado constituye una unidad modular totalmente independiente de los tramos adyacentes, la cual se repite en todo el largo del puente, a excepción de los tramos sobre piezas copa y la zona de conexión de tablero con pila.

En cada etapa, habiéndose cumplido las condiciones establecidas para el desapeo, se retiró la totalidad del encofrado y de las torres de apuntalamiento, quedando el tablero apoyado en parejas de pilares metálicos provisionarios colocados previo al hormigonado. La separación de las secciones en las que se ubicaron estas parejas de puntales provisionarios era de 4,80m. Transversalmente se ubicaron cada uno en el centro de las vigas de borde del tablero. Estos pilares metálicos estaban conformados por dos perfiles normales tipo UPN 160 de 6 m de altura apareados y soldados. En la base se apoyaban en zapatas provisionarias de hormigón de 1.50m x 1.50m (para las que se fijó una tensión admisible sobre el terreno superficial de 1,5 kg/cm²).



Foto N° 2

En la cabeza de los mismos se dispuso una placa de distribución a los efectos de controlar el aplastamiento del tablero fenólico del encofrado.

Estos soportes provisionarios se mantuvieron hasta la última etapa del tensado de los tirantes. Es precisamente debido a esto, y a la necesidad de dejar libre la apertura de los cajetines de los anclajes inferiores, así como el espacio para las operaciones de tesado, que la ubicación de los mismos no podía ser arbitraria. Para la ubicación de los pilares se pretendía mantener un ritmo constante, marcado por el módulo de encofrado y las secciones de replanteo. Por otro lado, si bien la cadencia de los puntos teóricos de anclaje inferior de tirantes concuerda con el módulo establecido (9.60m) los puntos de referencia para el posicionamiento de anclajes sufrían desplazamientos longitudinales variables respecto a los anteriores. A su vez, al variar la inclinación de los tirantes, la apertura del cajetín inferior también variaba, siendo en el caso de los tirantes extremos bastante importante. Como consecuencia se debió estudiar la ubicación del primer módulo de encofrado de forma que en ningún caso los apeos provisionarios interfirieran con la apertura inferior de cajetines.

A los efectos de limitar la deformabilidad horizontal del sistema de apoyo provisionario del puente se dispusieron tensores de arriostamiento transversal entre puntales.

1.3. Posicionamiento de los carretes inferiores de tirantes.

1.3.1. Replanteo de cada carrete en posición.

1.3.2. Fijación y sujeción del mismo en esa posición durante el hormigonado de losa.

1.3.3. Control topográfico de posición después del hormigonado a fin de detectar pequeños movimientos y realizar la corrección correspondiente previo al hormigonado de las vigas de borde.

1.3.1. Replanteo

La primera tarea presentaba una serie de dificultades prácticas que obligaron a un estudio profundo del tema y al diseño de una metodología de trabajo específica para el caso.

En primer lugar, debido a condicionamientos en el cronograma de construcción de la pila metálica, en la etapa de hormigonado de tablero la misma no estaba

terminada en sus tramos superiores por lo que no se la podía utilizar como elemento externo de referencia y alineación de carretes.

Los ejes de los tirantes se definieron teóricamente mediante rectas entre puntos expresados en coordenadas globales.

Como punto inferior el definido como “referencia para posicionamiento de tirante” (Punto A, figura A). Es la intersección del eje del tirante con la cara superior de la placa de base de carrete. Como punto superior el definido como “posicionamiento de tirante en pila” (Punto B, figura C). Estos eran, en ambos casos, inaccesibles. El primero por encontrarse en el interior del carrete y el segundo por no estar construida aún la pila metálica.

Debido a esto fue necesario definir nuevos puntos del eje que permitieran su alineación y materializar dicho eje físicamente. Es de remarcar asimismo la dificultad de replanteo por estar ubicados los carretes dentro de la armadura de las vigas de borde.

El problema se resolvió mediante el diseño de un aparato que materializaba físicamente el eje mediante una barra roscada. Esta barra se centraba al carrete mediante placas concéntricas y permitía variar las longitudes que sobresalían del carrete a ambos lados (figura A y foto 3). En su extremo inferior la barra finalizaba en una rótula. El complemento de esta articulación esférica se fijaba a la superficie del encofrado y permitía el movimiento del conjunto barra-carrete, pivotando respecto a un punto de la recta deseada. El otro extremo de la barra estaba conformado de forma de poder comprobar las coordenadas de su eje mediante el apoyo directo del prisma de la estación total y nivel óptico.

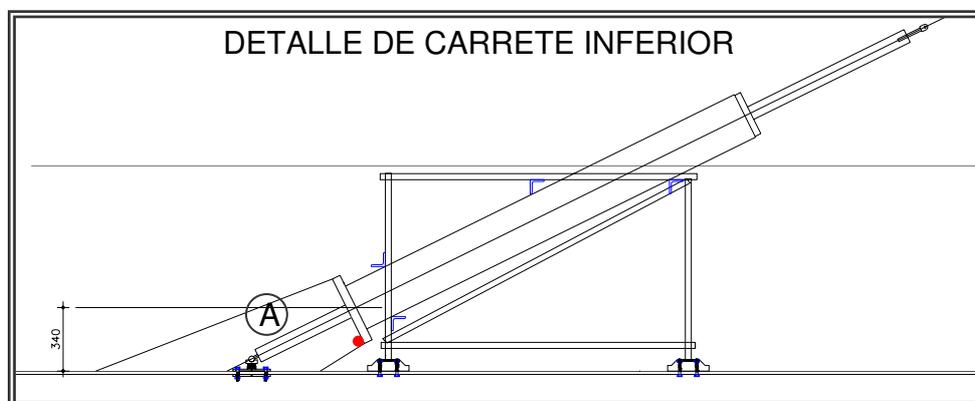


Figura A



Foto N° 3

1.3.2. Fijación

La fijación de los carretes se debió realizar al encofrado del tablero. No se sujetaron los carretes a la armadura ya que en el momento del replanteo la misma no podía estar colocada totalmente (interferencias de ambos sistemas).

El problema se resolvió mediante caballetes metálicos. A los efectos de garantizar el adecuado recubrimiento de las patas del caballete se colocaron unos separadores de mortero. Estos separadores tenían agujeros que permitían atornillarlos al fenólico, mientras que en su cara superior tenían una placa metálica a la que se soldaban las patas del caballete.

1.3.3. Control topográfico

Durante el hormigonado de la losa se producen pequeños movimientos del encofrado debidos a deformaciones y ajustes del material de apuntalamiento. Debido a esto era necesario tener la opción de realizar ligeras correcciones en la alineación de los carretes. A estos efectos, en la etapa de hormigonado de la losa se dejaban sin llenar las zonas de la misma en las cuales quedaban incluidos los carretes.

Para el control de la situación después del hormigonado se utilizó la misma barra roscada mencionada para el replanteo inicial con una ligera modificación. En la misma se colocaron dos tuercas, que con barras perpendiculares, permitían situar las coordenadas del eje mediante el control de puntos simétricos y en caso de ser necesario, realizar movimientos correctivos del carrete, soltándole del caballete en su extremo superior y moviéndole con gatos. Una vez ajustada la nueva posición se realizaba el soldeo definitivo del carrete a las patas del soporte y el hormigonado restante del alveolo en el que se ubicaba.

2. PILA

2.1. Procedimiento Constructivo.

La pila de estructura mixta pretensada (cajón metálico y hormigón interior con armaduras postesas) se construyó por dovelas. En total fueron siete dovelas. Hasta la dovela número 3, en la cual la pila se divide en dos brazos, ésta incluía en su interior seis cables de pretensado longitudinales excéntricos.

Después del tesado de estos cables, tras el tercer hormigonado y con anterioridad al montaje de los tramos siguientes, la sección superior del fuste de la pila sufre un desplazamiento y un giro. Hasta dicho nivel, las tres piezas inferiores de la pila se montaron en su posición teórica (ver Foto N° 2, figura B).

De acuerdo al proyecto, los movimientos experimentados por la parte del fuste ya construido de la pila en esta fase así como los movimientos virtuales que la misma impone a la parte aun no montada, se oponen muy aproximadamente a los movimientos provocados posteriormente por el tesado de los tirantes.

Debido a esto, para las restantes dovelas de la pila se adoptó la metodología siguiente. Dichas dovelas fueron fabricadas en taller respetando la geometría teórica final del puente. Para su montaje se definió una nueva posición, respetando la rototraslación sufrida por las secciones superiores de los brazos de la dovela 3. Esta posición se definió aplicando a cada dovela a montar, los desplazamientos y giros teóricos de los bordes de unión correspondientes. Finalmente se compararon estas posiciones con los bordes reales comprobados in situ en la dovela anterior.

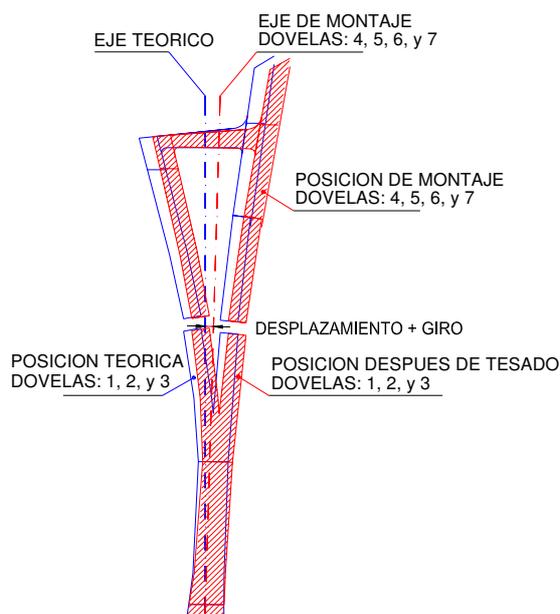


Figura B

2.2. Posicionamiento de los Carretes Superiores.

Los carretes superiores de los tirantes fueron replanteados y colocados en taller. Su ubicación y dirección fue la correspondiente a la geometría teórica de pila, sin desplazamientos. Se previó un mecanismo de regulación por intermedio de tornillos, que permitiera un pequeño ajuste en la dirección del carrete, manteniendo fijo el punto de anclaje teórico (centro de la placa). Para esto fue necesario dejar holguras del orden de 2cm en los agujeros elípticos de salida de los carretes en las caras de la pila (ver Foto N° 4, figura C).

Una vez montada la pila en su totalidad, se procedió a realizar la corrección de alineación de los tirantes.

Aplicando en forma estricta el criterio establecido en el proyecto, los carretes superiores, situados en la posición de la pila deformada por el pretensado interior, debían quedar alineados con los puntos del tablero correspondientes a cada carrete inferior. Pero estas alineaciones fijadas en proyecto se refieren a la estructura no deformada y, por tanto, al tensar los tirantes y recuperar la pila su posición teórica, dichas alineaciones se alterarían quedando dichos tirantes en posición inadecuada.

No obstante, se comprobó que estas variaciones angulares experimentadas por los ejes de los tirantes eran muy reducidas y perfectamente comprendidas en el intervalo de tolerancias de ejecución señalado por el suministrador de los tirantes, por lo que, en la práctica, se optó por mantener la disposición de alineación antedicha. Esto permitía una alineación muy sencilla, tendiendo un alambre de acero tensado entre el centro de los carretes inferior y superior de cada tirante; lo cual evitaba la inclusión de errores de montaje que la teórica disposición ideal hubiera provocado.

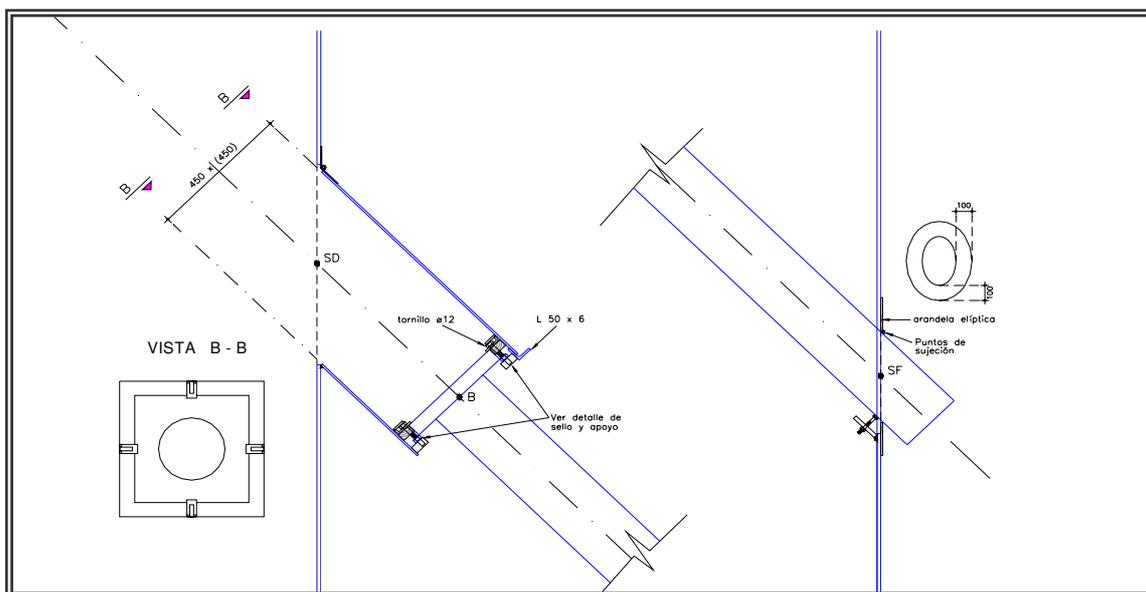


Figura C



Foto N° 4

2.3. Construcción de Plataformas.

Otro aspecto de interés que presentó el trabajo en la pila, fue el diseño y construcción de las plataformas y andamios de trabajo necesarios para la instalación y tesado de tirantes (Foto 5).



Foto N° 5

Las prestaciones solicitadas por el subcontratista de tirantes (MK4) para los andamios en pila fueron: acceso a cajetín y salida de cada tirante con plataformas de ancho 2 m, una plataforma principal para ubicación de la central hidráulica (peso aprox. 1000 kg.) y una plataforma en la parte superior de pila para instalación del tren de rodillos para el enfilado.

El diseño de las plataformas de trabajo está determinado por dos aspectos fundamentales de la obra. Primero la variación de direcciones de la salida de tirantes en pila, dada por la planta curva del puente; segundo, la geometría y condición excéntrica de la pila. Esto condiciona muy fuertemente la ubicación de las plataformas, ya que se debían evitar interferencias de los tirantes con la estructura de sustentación de las mismas (ver figura D).

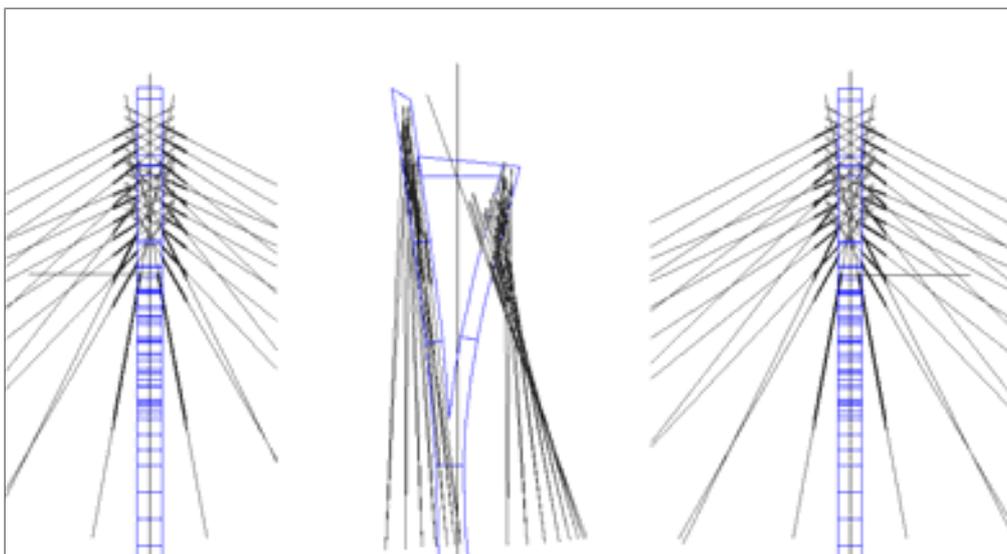


Figura D

Se comenzó planteando soluciones del tipo convencional, con un número importante de plataformas (una cada dos anclajes de tirantes en altura). Rápidamente se notó su inconveniencia debido a las interferencias con los tirantes. Se decidió entonces, plantear un esquema con tres únicos niveles de plataformas principales, y acceder a los diferentes tirantes en altura mediante torres de andamio apoyados sobre estas plataformas. Esta solución permitió organizar los niveles de trabajo según las tareas en ejecución.

Las plataformas se soportaron a la pila mediante ménsulas provisionales metálicas (trianguladas).

3. CONCLUSIONES FINALES

De los múltiples aspectos que tiene una obra de estas características, se han seleccionado aquellos que, por su singularidad han parecido destacables.

También de gran interés habrían sido otros temas, tales como los relacionados con las cimentaciones y la colocación en las mismas de los anclajes de pretensado de la pila; la propia secuencia de tesado de los tirantes en un sistema de pila relativamente muy deformable; los procedimientos de hormigonado de los diversos sistemas; etc, pero su extensión se saldría de la aquí requerida.

III CONGRESO DE ACHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

LAS ESTRUCTURAS DEL SIGLO XXI
Sostenibilidad, innovación y retos del futuro



Realizaciones



TESADO DE TIRANTES POR ALARGAMIENTO EN EL PUENTE DE LAS AMERICAS - URUGUAY

Miguel Ángel **CALVO RUBIO**¹, Raimón **RUCABADO**²

¹ Project Manager, Mekano4,

² Director Proyectos Especiales, Mekano4.

RESUMEN

Con el presente documento se pretende realizar una explicación breve del proceso llevado a cabo para el tesado de anclajes tipo DMK para tirantes, éste se realizó en un total de cuatro fases (0, 1, 2 y 3), las tres primeras con gato unitario y la última con gato multi-torón.

El aspecto más destacable del sistema de tesado, es que el objetivo para las fases de tesado 1, 2 y 3 es la consecución de un alargamiento preestablecido, siendo la carga del tirante un elemento de control. Por supuesto, para las fases 2 y 3 se tuvieron en cuenta las cargas obtenidas al final de la fase anterior, y de esta forma se realizaron pequeños reajustes en los alargamientos a obtener en la fase siguiente.

1. TIRANTE

1.1. Tipología del tirante

El Pasaje Superior Puente de Las Américas, está constituido por un total de treinta tirantes, con potencias que van desde 12 torones hasta un máximo de 18, y longitudes de tirantes comprendidas entre 24,9 y 79,2 metros.

Con objeto de unificar las diferentes potencias de tirantes, estos se agruparon en dos familias, con el resultado de 26 tirantes con cabeza de anclaje para 15 torones y 4 tirantes (los más largos) con cabeza de anclaje para 19 torones.

A continuación realizamos una descripción genérica, de los elementos que consideramos son importantes para una mejor comprensión del tema que nos ocupa.

1.1.1. Cable de acero (conforme a la BS5896/3-80):

El cable de acero utilizado fue:

Sección nominal: 150mm² (15,7mm)

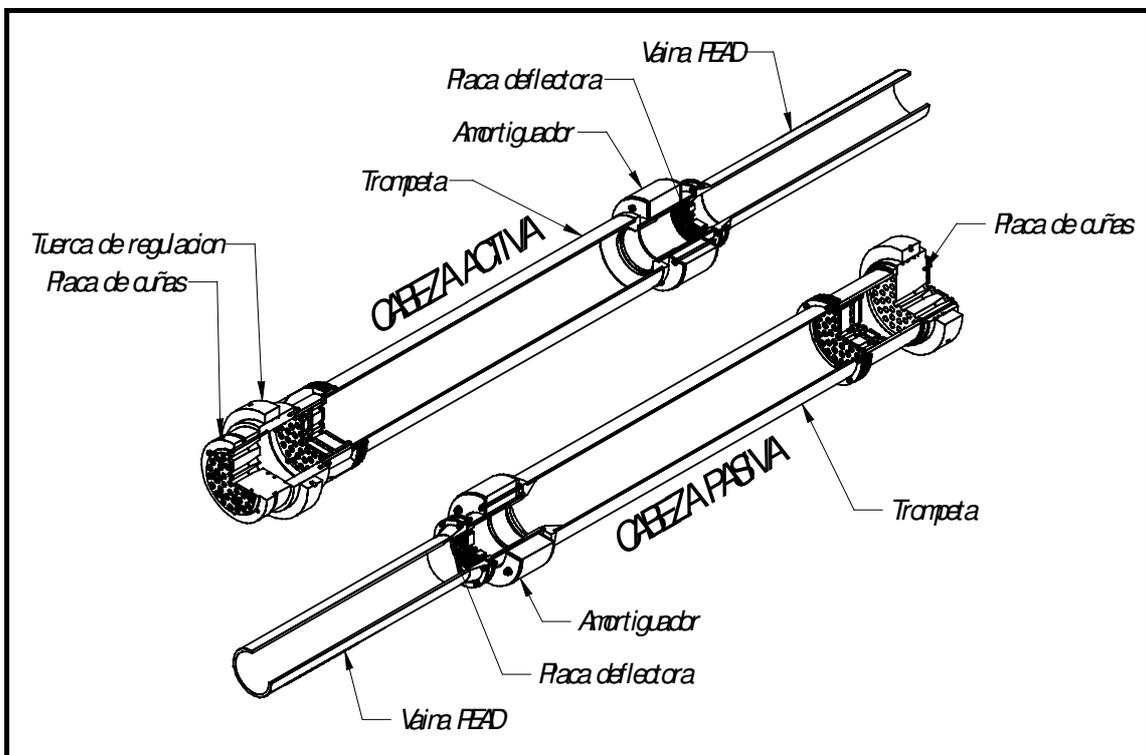
Carga de rotura: 279KN

Protección: Funda externa de polietileno de alta densidad + relleno de cera + galvanizado

1.1.2. Cabezas de anclaje:

Como señalamos antes se utilizaron dos potencias de cabezas de anclaje, de 15 y 19 tonrones.

Para cada tirante en particular se colocó una cabeza activa en la parte inferior del tirante (tablero), y pasiva en la parte superior del tirante (pila). La denominación de cabeza pasiva se adopta únicamente a efectos de tesado con gato multi-torón, ya que este no se puede realizar desde esta cabeza al no tener tuerca de regulación, pero si podría realizarse el tesado con el gato unitario. En nuestro caso todos los tesados fueron realizados desde la cabeza activa por facilidad de ejecución (zona tablero).



ESQUEMA 1. Cabezas de anclaje activa y pasiva DM

1.1.3. Varios.

Nuestro tirante DMK está compuesto por otra serie de elementos que lo conforman en su totalidad, como: amortiguadores, telescópicos, vaina HDPE, etc. A modo aclaratorio adjuntamos un esquema de este, sin ahondar más en estos.

2.1. Tesado con gato unitario.

2.1.1. Equipo de tesado

El tesado con gato unitario se realizó con dos equipos individuales, cada uno de ellos estaba compuesto por: central hidráulica de pequeñas dimensiones para su fácil traslado con manómetro digital, gato de tesado unitario con percutor especial de clavado de cuñas y puente de tesado.



FOTO 1. Equipo de tesado con gato unitario

2.1.2. Fase de tesado 0.

La fase de tesado 0, consistía en dar una carga de tesado muy baja a todos los tirantes. La carga suministrada a los torones fue de 2 o 3 toneladas dependiendo del tirante. Esta fue la única fase en la que se trabajó con un objetivo de carga y no alargamiento. Esta fase debe tomarse como un punto de partida cero, asegurando de esta forma que el tirante reaccionará a sollicitaciones de la estructura causadas por efecto del tesado de otros tirantes.

En esta fase es importante hacer notar:

- a) Para conseguir equilibrar todos los torones de un tirante es muy posible que se deba realizar más de una pasada al total de ellos, ya que en cada tesado unitario, el efecto de disminución de catenaria y posibles movimientos de la estructura descargan los torones ya tesados.

Por lo cual al finalizar una pasada en el anclaje es necesario verificar la carga en el primer torón tesado y decidir si dar o no otra pasada.

- b) De lo anterior se desprende el interés de establecer un valor para el cual las diferencias en los torones de un tirante son aceptables. Para ello se tendrá en cuenta que es en los tirantes cortos donde es más difícil obtener diferencias entre torones menores.

A modo de ejemplo, los resultados obtenidos en nuestros tirantes para unas cargas de tesado de 3 toneladas en los cuatro tirantes más cortos, y 2 toneladas en el resto fueron:

- Para tirantes cortos (menor de 30m):

Diferencias < 300 Kg/torón

Equivalente a diferencias de longitud tesado de 2,3 mm

Aproximadamente un 3% sobre fuerza final de tesado en fase 3.

- Para tirantes largos (mayores de 60m):

Diferencias < 100 Kg/torón

Equivalente a diferencias de longitud tesado de 2,1 mm

Aproximadamente un 1% sobre fuerza final de tesado en fase 3.

- c) Al tener cargas muy bajas en esta fase, es posible que el tesado de los subsiguientes tirantes destesen algunos de los tirantes ya tesados. Esto mismo ocurrió en una de nuestras parejas de tirantes, pero no supuso gran problema ya que:

- Tras el tesado de los torones de un tirante en fase cero estos eran marcados con pintura en la zona de las cuñas, con lo cual en ningún momento se perdía la referencia de esta fase.
- Para el tesado de la siguiente fase por alargamiento tenemos un tirante a una carga muy baja y, desde nuestro punto de vista, hay dos posibilidades de actuación:
 1. Tras colocar el gato, aún teniendo una carga muy baja, ésta es suficiente para tener una referencia clara de valor de presión en el

momento de despegue de cuñas. En este caso se procederá a realizar el tesado por alargamiento (este fue el caso con el que nos encontramos).

2. La fuerza existente en el torón no es suficiente para tomar una referencia de partida. En este caso se puede proceder a tesar en dos subfases, una inicial por carga (semejante a la fase 0), y una fase por alargamiento, en la cual se descontaría del total el alargamiento obtenido en la subfase inicial por carga.

2.1.3. Fases de tesado 1 y 2.

Tras el tesado de la fase 0, nos encontramos con unos tirantes tesados a cargas bajas y con unas diferencias entre torones de un mismo tirante bajas y acotadas.

La secuencia seguida para el tesado de la fase 1 y 2 fue la siguiente:

1. Tesado de fase 1 por alargamiento.
2. Comprobación de cargas con gato unitario.
3. Recálculo del alargamiento teórico para la fase 2.
4. Tesado de la fase 2 por alargamiento.
5. Comprobación de cargas con gato unitario.

Con lo anterior el proceso seguido para tesado de fase 1 y 2 fue el mismo, en los dos casos se tenía un objetivo de alargamiento y una carga de control (carga teórica que debería alcanzar el último de los torones de un tirante tesado), se procedió a tesar como sigue:

1. Tesado de un torón y comprobación del alargamiento real obtenido.
2. Reajuste del sistema en caso de ser necesario (cuando la diferencia de alargamiento entre el teórico y el real obtenido es mayor de 0,5mm).
3. Tesado de un nuevo torón y comprobación real del alargamiento obtenido. Con uno o dos torones fue más que suficiente para asegurar obtener el alargamiento con la precisión deseada.
4. Tesado del resto de torones.
5. A la finalización del tesado en cada torón se fue anotando la presión alcanzada en el parte de tesado.
6. Comprobación visual de que todos los torones han sido tesados, ejercicio sencillo al tener sólo que asegurar que la marca de pintura está desplazada con respecto a la cuña.

7. Evaluación de las presiones de control obtenidas y anotadas en los partes de tesado.
8. Control del alargamiento obtenido en alguno de los torones mediante galgas de medición, estas fueron realizadas expresas para cada tirante y fase de tesado. En el caso de obtener alguna presión de control en algún torón que nos lleve a sospechar de un posible error, este sería unos de los torones a verificar que el alargamiento obtenido ha sido el correcto.



FOTO 3. Tesado 2 primeros torones y comprobación de alargamiento con galga.



FOTO 4. Tesado resto de torones del tirante.



FOTO 5. Control del total de torones tesados

FOTO 6. Detalle durante el tesado

Notas:

- Aún pareciendo complicado el sistema de tesado por alargamiento, al haber tesado unos pocos tirantes resulta sencillo, rápido y es realizado de una forma mecánica por los técnicos de obra.
- Todo el proceso es severamente controlado durante y a la finalización del tesado de un tirante. El mero hecho de mantener fielmente los pasos señalados por el procedimiento de tesado garantiza un correcto tesado, y todo el proceso está desarrollado de tal forma que de alguna manera obliga a los técnicos de tesado a seguirlo fielmente.
- De todas formas cualquier error, queda detectado y es posible erradicar el problema durante el tesado del tirante e incluso en una fase posterior.
- Siguiendo las directrices anteriormente descritas, los resultados obtenidos durante el tesado fueron sobresalientes, con precisiones sobradamente aceptables, y algo muy importante se tenía el histórico de tesado de todos los torones de los tirantes, por lo que de aparecer cualquier problema de tesado se podía asegurar que este había aparecido en la fase en curso y no en alguna anterior.

Con respecto a las comprobaciones de cargas con gato unitario, estas fueron estadísticas, en cada tirante se comprobaron 6 torones del total, excepto en los dos tirantes más cortos donde se comprobó el total de torones, como anteriormente comentamos es aquí donde se tenía la mayor dispersión entre torones.

En la fase 1 se comprobaron las cargas en 20 de los 30 tirantes y en fase 2 el total de tirantes.

Una particularidad de la fase 2 fue que el alargamiento objetivo debía ser mayor que la longitud de la cuña, garantizando de esta forma que el cable en su última fase no es mordido por la cuña dos veces en la misma zona. Remarcar que es conveniente que así sea siempre si es posible, aunque en los ensayos cíclicos de fatiga realizados a nuestros anclajes DMK, se obtienen resultados satisfactorios habiendo mordido la cuña sobre mordido.

Tras la finalización del tesado en segunda fase y la posterior comprobación de cargas con gato unitario, se procedió al corte de rabos sobrante en las cabezas de anclaje.

2.2. Tesado con gato multi-torón

Tras el tesado y comprobación de cargas con gato unitario, una de las incógnitas que se planteaba eran las diferencias que se podrían obtener en la comprobación de cargas entre el gato unitario y gato multi-torón. En un principio es razonable pensar que el gato múltiple es más exacto al realizar la comprobación sobre el total de los cables.

En nuestro caso se comprobaron los dos tirantes más cortos antes de proceder al tesado de tirantes, con diferencias de un 3% y un 1% entre los dos sistemas. Incluso durante la fase 3 de tesado, se pudo constatar que los tirantes se comportaban exactamente como se preveía, teniendo en cuenta las cargas de comprobación obtenidas con gato unitario al final de la fase 2.

De esta forma, quedó constatado que todos los datos obtenidos en las fases anteriores de tesado con gato unitario, eran perfectamente válidos para su utilización en los diferentes pasos y decisiones adoptadas durante el proceso de tesado.

2.2.1. Equipo de tesado

El tesado con gato multi-torón se realizó con un equipo individual, compuesto por: central hidráulica de pequeñas dimensiones para su fácil traslado con manómetro digital, gatos de tesado hueco (200 y 350 Tn dependiendo del tirante), silla de tesado, conjunto de tesado de barra.



FOTO 7. Detalle de equipo de tesado multi-torón

2.2.2. Fase de tesado 3.

La fase de tesado 3 se realizó al igual que la 1 y 2 con un objetivo de alargamiento y un control de carga. En este momento y con los datos obtenidos en fases anteriores, el comportamiento de los tirantes estaba totalmente controlado, por lo que la presión de control obtenida en obra tras el tesado por alargamiento, difería muy poco con respecto a la teórica esperada por el proyectista.

En esta fase, el alargamiento se consigue mediante el despegue de la cabeza de anclaje activa una distancia algo superior al alargamiento objetivo, después la tuerca de regulación es girada hasta avanzar el alargamiento deseado, y por último se vuelve a descargar el tirante.

El procedimiento seguido para el tesado de los diferentes tirantes fue el siguiente:

1. Comprobación de la carga del tirante con gato multi-torón.
2. Tesado del tirante por alargamiento.
3. Comprobación de la carga del tirante tras el tesado.

4. Tras la finalización del tesado de todos los tirantes, se procedió a comprobar la carga final en 6 tirantes, con los resultados obtenidos se decidió que era suficiente con esta cantidad, dándose por finalizado el tesado del puente.



FOTO 8. Detalle del anclaje DMK con la tuerca de regulación despegada

3. CONCLUSIONES FINALES.

A la vista de los resultados obtenidos, podemos asegurar que el método de tesado por alargamiento es idóneo para este tipo de puentes. Otras tendencias de tesado apuntan hacia otros métodos, quedando olvidando por lo general el método por alargamiento. Podemos confirmar que los resultados que se pueden obtener mediante este método son equiparables o incluso más satisfactorios que los obtenidos con otros métodos de tesado utilizados.

Otro aspecto que ha quedado patente, es la importancia de una buena ejecución en obra, para ello existen dos aspectos que consideramos de suma importancia: por un lado tener un procedimiento claro, sencillo y bien definido, que incluya todos los elementos de control necesarios, y por otro, garantizar el seguimiento de este por todas las personas involucradas, además si se consigue que éstas entiendan la importancia de la calidad que se les exige, el resultado será sin duda un éxito incluso mayor que el que esperábamos. Estamos seguros, que estos aspectos que tuvimos siempre muy en cuenta, tuvieron mucho que ver en el resultado final obtenido.