

PRETENSADO EXTERIOR EN LA PASARELA DEL MUSEO DE LA CIENCIA EN VALLADOLID

(EXTERNAL PRESTRESSING IN THE FOOTBRIDGE OF MUSEUM OF THE SCIENCE IN VALLADOLID)

Patrick Ladret y Alberto González, Freyssinet, S.A.

Fecha de recepción: 23-V-04

ESPAÑA

142-163

RESUMEN

Este artículo presenta la problemática, el desarrollo y la tecnología aplicada en el pretensado exterior de esta singular pasarela, que se encuentra en la ciudad de Valladolid sobre el río Pisuerga, integrada en el conjunto urbanístico del Museo de la Ciencia. El pretensado se divide en dos familias, los tendones hexagonales y los longitudinales.

Los tendones hexagonales tienen la característica de sufrir fuertes desvíos en su trazado, para los cuales se diseñaron sillas específicas con materiales que facilitan el deslizamiento, y se empleó el cordón Cohestrand® de Freyssinet. Todo este desarrollo se apoyó en ensayos a escala real. La puesta en tensión de los hexágonos se realizó con dos gatos simultáneamente debido a la sensibilidad de la sección a esfuerzos no simétricos.

En los tendones longitudinales, con suaves desvíos cada 7 m, se empleó la técnica del pretensado exterior inyectado antes de tesar, el cual permite sustituir los cordones del tendón uno a uno. El ajuste de la geometría de estos tendones requirió la disposición de cordones auxiliares de montaje como apoyo de un sistema de regulación.

SUMMARY

This article presents the practice, development and technology applied in the external prestressing cables of this singular footbridge placed in Valladolid over Pisuerga river, being part of Museum of Science urbanistic complex. There are two prestressing cable systems, the hexagonal tendons and the longitudinal ones.

Hexagonal tendons have the property of having strong deviations in their layout, specific saddles were designed with low friction materials, and Freyssinet Cohestrand® was used. Real scale tests were carried out to develop these deviation devices. Hexagons stressing operations were carried out with two jacks simultaneously due to the section sensibility to non symmetrical efforts.

In longitudinal tendons, with little deviations each 7 m, external prestressing grouted before stressing system was applied, which allows strand by strand substitution. Geometry adjustment of these tendons required auxiliar strand disposition as a support of a regulation system.

1. INTRODUCCIÓN

A menudo la imaginación de arquitectos y proyectistas traspasa la barrera de lo habitualmente practicado, lo que exige de los técnicos ejercicios de evolución y desarrollo para hacer realidad una idea.

El pretensado exterior de esta estructura partió de un concepto que llegó a realizarse tras un proceso de investigación en un terreno poco detallado por la normativa: el desvío de cables.

Las comprobaciones en modelos a escala real hicieron posible, para este uso particular, ir más allá de lo establecido por una normativa muy genérica. A partir de diferentes ensayos se llegó a un diseño de sillas de desvío con rozamiento y radio de desvío mínimos, adaptadas específicamente a las necesidades de la estructura.

Este desarrollo fue posible gracias a la colaboración directa de equipos muy heterogéneos, desde el generador del concepto y proyectista hasta los especialistas de los materiales pasando por la parte práctica y de puesta en obra.

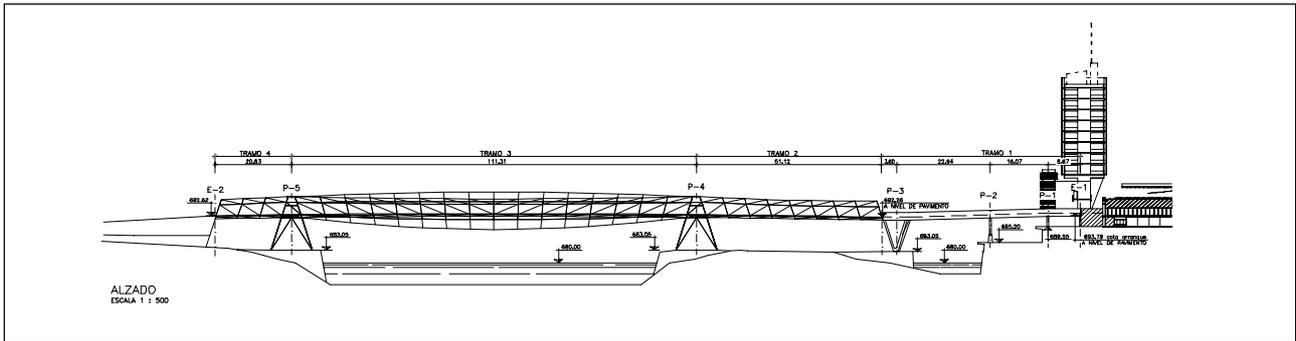


Figura 1.- Alzado de la pasarela.

Los principales intervinientes en la obra han sido:

- . Propiedad: Aguas del Duero
- . Arquitectos: José Rafael Moneo, Enrique de Teresa
- . Proyecto: MC2 Estudio de Ingeniería
- . Constructora: UTE Pisuegra = Puentes y Calzadas + JOCA Ingeniería
- . Pretensado: Freyssinet, S.A.

2. TENDONES HEXAGONALES

2.1. Problemática

Cada sección hexagonal (15 hexágonos en todo el tramo 3) consta de un tendón periférico en forma de hexágono, cuyos vértices son los extremos de los seis radios. Cada tendón está formado por dos cordones de 150 mm² de sección y 1.770 MPa de carga característica de rotura.

La problemática que se planteaba al establecer la tecnología de estos tendones giraba en torno a las siguientes cuestiones:

- El tendón debía ser tipo cordón visto desviado en los pasos por radios. El radio de desvío debía ser lo menor posible para minimizar la influencia del elemento de desvío en la estética de la estructura.
- El condicionante principal consistía en no tener diferencias de fuerza transversal en las cabezas de los radios para no solicitarlo a flexión, ni durante el proceso de tesado, ni en servicio, lo que, por un lado, exigía el diseño de unas sillas de desvío a disponer en los pasos por los radios con el menor rozamiento posible, y, por otro, un sistema de tesado que mantuviera simétricas las acciones en la sección durante el tesado.
- Garantizar la continuidad de las barreras de protección contra la corrosión en los puntos singulares: anclajes y sillas de desvío.

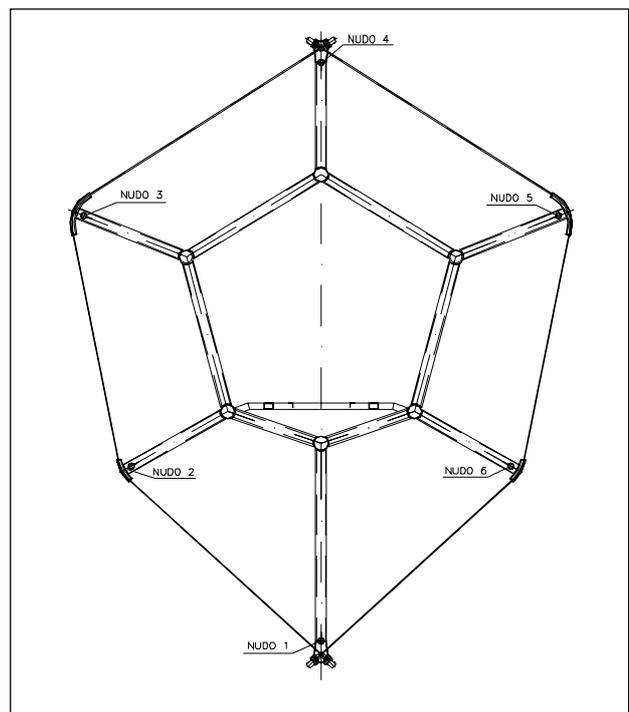


Figura 2.- Sección transversal de hexágono.

2.2. Desarrollo y ensayos

La solución de proyecto para estos cables hexagonales consistía en un tendón continuo con anclajes sólo en el radio inferior y con desvíos en sillas en los otros cinco radios. De este concepto original se pasó, en una primera instancia, al de tres tendones en un mismo hexágono, cada uno de los cuales, por tanto, sólo sufría un desvío entre sus anclajes. Esta disposición surgió de la necesidad de poder controlar en todo momento la fuerza en cualquier lado del hexágono, ya que no se tenía certeza de la capacidad de transmisión de las sillas de desvío, y además se evitaban los vértices de mayor desviación angular colocando los anclajes en éstos. Esta configuración con tres tendones obligaba a poner en obra un complicado despliegue de medios para mantener la simetría de fuerzas en la sección a la hora del tesado.

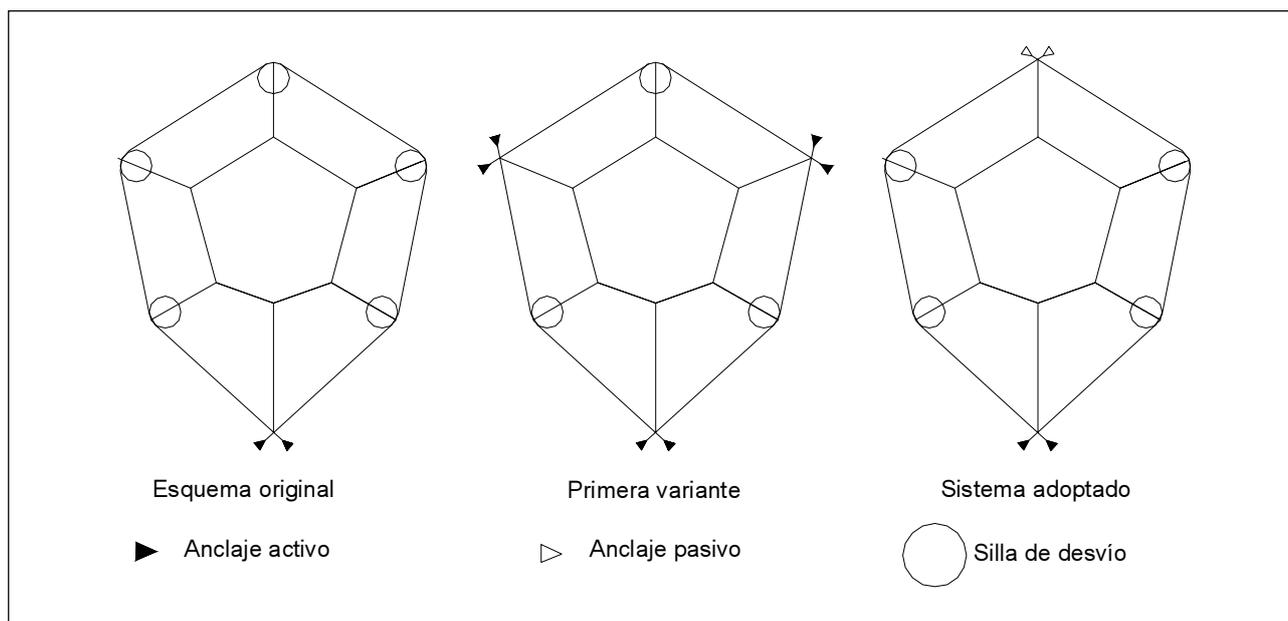


Figura 3.- Evolución del esquema de los tendones hexagonales.

La campaña de ensayos realizados por Freyssinet arrojó varias conclusiones aclaratorias sobre el radio mínimo de desvío de los cordones y la capacidad de transmisión de fuerza de la silla. Se estableció el radio mínimo de desvío y se probaron varios materiales hasta encontrar los de menor rozamiento en las sillas. Partiendo de estos resultados se propuso la solución finalmente adoptada de dos tendones con dos desvíos cada uno, tesados simultáneamente desde el anclaje inferior. La transmisión de fuerza determinada permitía no solicitar significativamente los radios a flexión y garantizar una fuerza similar en todos los lados del hexágono, y el sistema de aplicación de fuerza, con dos gatos simultáneamente, mantenía la fuerza igual en las dos mitades del hexágono.

A continuación se describen más detalladamente los ensayos realizados y las conclusiones extraídas de cada uno de ellos.

2.3. Radios de desvío

Los radios de desvío mínimos recomendados por la normativa de referencia son:

- PTI: radio mínimo en sillas de desvío de tirantes 3 m.
- EC2: ENV 1992-1-5: para monocordones de 15 mm de diámetro los radios mínimos de curvatura son 2,5 m.
- EC3: prEN 1993-1-11: radio de curvatura mínimo = $\max(30 \varnothing \text{ cordón}; 400 \varnothing \text{ hilo}) = 2 \text{ m}$.

Estos radios de desvío hacían inviable la disposición de una silla de desvío en la estructura ya que sus dimensiones estarían desproporcionadas con la misma, por eso se organizó una campaña de ensayos dirigidos a validar un radio de desvío más reducido. Se ensayó con radios de

30 \varnothing cordón, 20 \varnothing cordón, equivalentes a 585 y 390 mm respectivamente. Estos ensayos iban encaminados a:

- Comprobar la capacidad a fatiga del cordón desviado con estos radios pequeños.
- Comprobar la capacidad a rotura del cordón desviado.
- Comprobar la resistencia de las barreras protectoras contra la corrosión.
- Definir el diseño y los materiales de la silla para minimizar el rozamiento en los desvíos.

2.4. Tecnología de los cordones

Los cordones a disponer en estos tendones hexagonales estaban solicitados a condicionantes adicionales a los cordones habituales de pretensado y tirantes derivados de la presencia del fuerte desvío en su trazado. Este desvío afecta a dos características esenciales de los cordones sin inyección: la protección contra la corrosión y la resistencia a fatiga.

El cordón utilizado en los tirantes Freyssinet está formado por cordón de acero tipo Y 1770 S7 16.0 según EN 10.138, galvanizado y con los requerimientos de fatiga mejorados conforme a la NF 35.035. Está envainado individualmente con PEAD de espesor mínimo 1,5 mm y la tercera barrera contra la corrosión especificada en los códigos internacionales la constituye una película de cera que recubre huecos entre los hilos entre sí y con la vaina.

La capacidad a fatiga del cordón desviado se analizó mediante unos ensayos de fatiga que se comentan más adelante. En cuanto a la protección contra la corrosión, el cordón de tirantes presenta la posibilidad de que el acero deslice dentro de su propia vaina, con la consecuente ero-

sión de la protección de PEAD con los movimientos del cordón a lo largo del tiempo.

Freyssinet ha desarrollado un cordón específico para pasos con desvío, el *Cohestrاند*®. El acero del cordón es el mismo que el utilizado en tirantes, y su característica principal es que la vaina individual de PEAD está adherida al acero en toda su longitud por medio de resina, que sustituye a la cera. El proceso de fabricación de este cordón consiste en abrir los hilos del cordón y pasarlo por un baño de resina para que queden todos impregnados. Seguidamente se vuelve a coronar el conjunto y se reviste de PEAD por extrusión del mismo en fase pastosa.

2.5. Ensayos de fatiga

Los ensayos de fatiga se llevaron a cabo en las instalaciones PPC del grupo Freyssinet en Chalon sur Saône, Francia. Consistieron en aplicar la carga normativa de fatiga para cables de pretensado exterior a unos cordones desviados en un tubo con los radios de curvatura considerados. Se sometió a los cordones a:

- Una fuerza máxima de 65% de la rotura.
- Una amplitud de variación de carga de 80 MPa.
- Dos millones de ciclos.

Posteriormente se llevaron a rotura estos cordones en una bancada rectilínea. Los resultados y conclusiones de estos ensayos fueron:

- Los cordones desviados no ven reducida su capacidad a fatiga ni su rendimiento estático tras el ensayo de fatiga por la presencia de la desviación de $R = 585$ mm y $R = 390$ mm. La sollicitación de fatiga aplicada ha sido la indicada en las recomendaciones de la FIB para pretensado exterior, y los cordones han cumplido el ensayo normalmente.
- Los desgastes y daños en las piezas de PEAD (vainas individual del cordón y lámina de recubrimiento interior del tubo) en la silla de $R = 585$ mm son una reducción de

aproximadamente la mitad del espesor de la hoja de PEAD. Sin embargo, los daños con la silla de 390 mm son rotura de la hoja de PEAD de base y roturas en la vaina individual del cordón, en la zona de salida de la silla.

De los resultados de este ensayo se concluyó que los cordones se podían usar con un radio de desvío de 585 mm, ya que no varía su capacidad resistente ni funcional, pero no con el radio de 390 mm, pues aunque la capacidad resistente no se ve afectada, sí lo es la protección contra la corrosión.

2.6. Ensayos de transmisión

Los ensayos de transmisión se realizaron en las instalaciones de Freyssinet, S.A. en Zamudio (Vizcaya). Consistieron en aplicar a un cordón que pasaba por la silla de desvío en el banco preparado al efecto, una fuerza axial en diferentes escalones, y medir los siguientes parámetros:

- Fuerza transmitida al extremo pasivo.
- Deslizamiento de la silla sobre la estructura.
- Deslizamiento del cordón sobre la silla.
- Deslizamiento (en caso de cordón “de tirantes”) del cordón en su propia vaina.

Este ensayo se aplicó a diferentes sistemas de deslizamiento, con el fin de evaluar el más adecuado de entre todos ellos. Los diseños probados siempre consistieron en una superficie de deslizamiento con un elemento de distribución de tensiones entre la misma y el cordón, que denominamos “canaleta”. También se ensayaron el cordón tradicional de tirantes y el cordón *cohestrاند*® de Freyssinet, los materiales combinados se resumen en el cuadro 1.

La fuerza se aplicó en el extremo activo con un gato hidráulico unifilar, y la medición de fuerza en los dos extremos se realizaba de manera continua por medio de dos células de carga unifilares.

En cada escalón de carga se dejaba estabilizar la medida de fuerzas y desplazamientos un tiempo entre 20 segun-

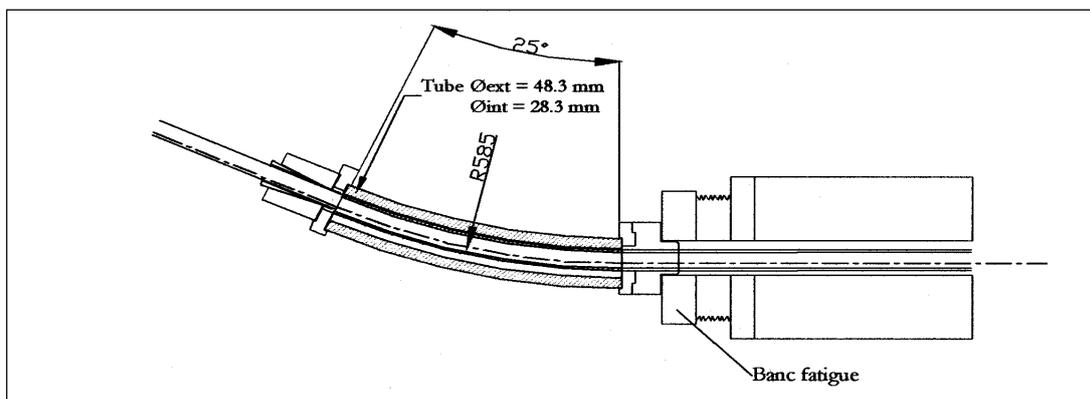


Figura 4.- Esquemqa del ensayo de fatiga.



Foto 1.- Silla de desvío del ensayo de transmisión.



Foto 2.- Silla de desvío en servicio.

Cuadro 1

Variables combinadas entre sí en los ensayos			
Canaleta de desvío	PEAD de alto peso molecular <i>Cestilene</i> sobre base de inox	PEAD <i>Cestilene</i> sobre base de teflón	Tubo de teflón sobre base de inox.
Tipo de cordón	Cordón encerado y envainado tipo "tirantes"	Cordón coherente	
Radio de desvío	R = 585 mm	R = 390 mm	

dos y 10 minutos, según se considerara el sistema con un grado suficiente de estabilización.

Una vez completadas las mediciones propias de la transmisión se procedió a los ensayos de rotura estática de los cordones utilizados sobre el mismo banco de desvío para verificar si el desvío modificaba de forma significativa la capacidad de éstos.

Los resultados de los ensayos de transmisión de los diferentes materiales utilizados en los dispositivos de desvío fueron que los materiales que desarrollan menor rozamiento son:

- Polietileno "Cestilene" sobre teflón.
- Cordón de acero dentro de su vaina con grasa.
- Teflón sobre inox.
- Polietileno del cordón sobre polietileno "Cestilene".
- Polietileno "Cestilene" sobre inox.

La solución adoptada fue, por lo tanto, una canaleta de polietileno sobre una banda de teflón, por ser la de menor rozamiento y no presentar problemas de corrosión ni de mantenimiento.

Sobre la configuración de silla de polietileno se realizó un ensayo a 1.000 horas para verificar la no fluencia del material bajo carga.

Las conclusiones obtenidas de los ensayos a rotura del cordón sobre la silla de desvío son:

- Que la capacidad a rotura del cordón no se ve reducida en la zona de desvío, ya que se produjeron fuera de la zona de desvío y dentro del rango admisible.

- Que el sistema de canaletas de PEAD sobre teflón transmite de forma apreciable la fuerza, ya que la mayoría de roturas se produjeron en el anclaje del extremo pasivo.

2.7. Tecnología aplicada

Como resultado de todos los ensayos reseñados, la configuración final de cada tendón hexagonal fue un anclaje en el radio superior y otro en el radio inferior y sillas de desvío en los radios intermedios, de manera que un cordón sufría dos desviaciones entre sus puntos de anclaje.

El cordón utilizado es el *Cohestrand*® de Freyssinet, ya que en algunas de las pruebas se detectó el deslizamiento del acero dentro de su vaina en el caso de cordón de tirantes.

Los anclajes constan de un bloque de pretensado gama C para dos cordones, apoyados en un conjunto tubo+placa que contiene el sistema prensa-estopa de Freyssinet. Estos tendones no tienen vaina de conjunto. El sistema prensa-estopa garantiza la continuidad de la protección mediante una cámara estanca que se rellena de cera, de manera que los cordones quedan protegidos en la zona en que es necesario quitar la protección de resina + PEAD.

La silla de desvío en los pasos por los radios intermedios superior e inferior está constituida por una chapa doblada con radio 585 mm que forma parte de la estructura metálica. Sobre esta platabanda doblada se pegó una lámina de

teflón, fijada también con un tope en cada extremo para asegurar la posición del teflón a lo largo del tiempo.

El elemento móvil de la silla está constituido por un perfil de polietileno especial de muy alto peso molecular, con gran capacidad al deslizamiento, y resistencia a la abrasión y a la degradación por UV. Esta canaleta tiene una base recta que desliza sobre el teflón y otra parte mecanizada donde se encaja el cordón, que no debe deslizar sobre la canaleta.

A la hora de tesar, el movimiento se produce entre la canaleta de polietileno y la banda de teflón pegada a la platabanda doblada.

2.8. Puesta en obra

El tesado de los hexágonos se realizó con dos gatos unifilares simultáneamente en un cordón de cada lado del hexágono, de modo que las fuerzas sobre la sección siempre estuvieran compensadas.

En los primeros hexágonos se determinó la pérdida de fuerza que sufría el extremo pasivo con ayuda de células de carga, tomando lecturas simultáneas de las fuerzas en los extremos activo y pasivo durante el tesado, para validar los resultados de transmisión de fuerza obtenidos en taller, y confirmar el tesado de los hexágonos sólo desde el anclaje inferior.

Debido a la extrema flexibilidad del radio inferior, fue preciso controlar topográficamente la posición del extremo inferior durante el proceso tesado y corregir el equilibrio del mismo actuando “en directo” sobre la fuerza de los dos gatos, ya que pequeños desequilibrios entre los mismos provocaban deformaciones en el límite de lo admisible por los radios.

3. TENDONES LONGITUDINALES

3.1. Problemática

Se trata de 6 tendones de pretensado exterior de 4 ó 7 cordones. Cada uno describe un trazado parabólico de unos



Foto 3.- Tesado simultáneo de dos cordones del hexágono.

110 m de longitud entre las pilas 4 y 5, pasando por los extremos de los radios de las secciones transversales. El tendón sufre un pequeño desvío en cada paso por los radios de manera que el trazado es en realidad una poligonal. Es en estos puntos singulares en los que se transmite la fuerza de pretensado a la estructura.

La problemática específica de estos tendones giró en torno a:

- Disponer un sistema que minimizara las pérdidas de fuerza a lo largo del trazado.
- Permitir la sustitución cordón a cordón de un tendón con trazado no recto.
- Garantizar una protección contra la corrosión propia de cables exteriores expuestos a la intemperie.
- Proceso de tesado que no introdujera grandes desequilibrios transversales de la sección.

3.2. Tecnología aplicada

El condicionante que impuso fundamentalmente la tecnología a adoptar fue el hecho de permitir la sustitución de cordones de un tendón cuyo trazado no es rectilíneo.

Tradicionalmente los tendones con esta necesidad requieren en todas las zonas de desvío elementos separadores de cordones como peines metálicos o sillas multitubo, y en las partes rectas del trazado un sistema de enfilado que garantice que los diferentes cordones no sufren cruces entre ellos, todo ello manteniendo la continuidad de las barreras de protección contra la corrosión.

Dada la gran cantidad de desvíos presentes en la pasarela ($15 \times 6 = 90$), la implantación de sillas multitubo habría penalizado enormemente el plazo y el presupuesto de la obra, aparte de constituir un elemento perturbador en la estética de la estructura.

En lugar de este dispositivo se implantó el sistema de pretensado exterior con lechada de cemento como separador de cordones patentado de Freyssinet. Este sistema consiste en que cada tendón está formado por una vaina estanca, dentro de la cual se enfilan los cordones de pretensado autoprotegidos. Estos tendones se inyectan antes de tesar, con lo que la lechada rellena el espacio entre cordones y cada uno queda aislado en toda su longitud dentro de su propio conducto de polietileno relleno de grasa.

En el momento de tesar (cordón a cordón) el acero desliza por su propio conducto, que resulta un medio de bajo rozamiento, en torno a un 4%, ya que el cordón está rodeado por un cilindro plástico engrasado, con lo que se cumple otro de los condicionantes exigidos a estos tendones.

La protección contra la corrosión está constituida por la triple barrera que forman:



Foto 4.- Tendón longitudinal superior en servicio.

- la vaina individual de polietileno que recubre cada cordón, con espesor mínimo de 1,5 mm.
- la grasa que rellena los espacios entre los hilos de acero y la vaina individual.
- la lechada y la vaina de conjunto que constituyen el medio estanco dentro del cual se encuentran los cordones.

En cuanto al mantenimiento del equilibrio transversal de fuerza, el sistema cuenta con todas las posibilidades del tesado cordón a cordón. En obra se dispusieron dos equipos de tesado, uno en cada lado de la sección, pilotados desde un mando único de manera que la diferencia máxima de fuerza entre un lado y otro fue la correspondiente a un cordón.

En los pasos de los tendones por los radios se dispuso un tubo doblado y abocardado en sus salidas para que el contacto entre vaina de polietileno y desviador metálico se produjera con el radio adecuado de desvío. En el diseño del radio se tuvieron más en cuenta las recomendaciones sobre desvío del cordón individual que las de pretensado exterior, ya que en estas últimas el radio mínimo está penalizado por la presión en el hormigón, y se verificó que con el radio elegido no se producía la plastificación de la vaina de conjunto. En estos desvíos no fue necesario disponer elementos móviles ya que la vaina exterior de



Foto 5.- Cordón soporte provisional en tendones longitudinales antes de su tesado.

polietileno no sufre ningún movimiento durante el tesado, porque, como se ha dicho, los cordones deslizan en su propio conducto.

Los anclajes están constituidos por el bloque estándar 7C15 apoyando sobre una placa de apoyo metálica de la estructura. El capot está inyectado de cera petrolífera y la sobrelongitud detrás de las cuñas es la necesaria para llevar a cabo operaciones de sustitución cordón a cordón.

3.3. Puesta en obra

Todas las tareas de instalación y tesado de estos tendones longitudinales se realizaron con la estructura metálica terminada y apeada en la plataforma de la orilla, a una altura sobre la misma entre 10 y 20 m.

La instalación tenía la dificultad, intrínseca a la tecnología, de que al ser tendones inyectados antes de tesar era necesario fijar la geometría de los tendones sin fuerza en los cordones, apoyando las vainas en elementos externos, ya que la geometría del cable no se podría ajustar después del fraguado de la lechada.

La longitud de las vainas y la altura a la que se encontraban hacían inviable un sistema de apeo apoyado en el suelo. El ajuste de la geometría de la vaina se previó desde la fase de proyecto tendiendo un cordón auxiliar por encima del trazado de los tendones longitudinales, y fijando con un sistema regulable la vaina a este cordón portante, a modo de catenaria de ferrocarril. A medida que se iban introduciendo elementos en la vaina (enfilado de cordones e inyección de lechada) y se iba incrementando el peso de la vaina, el sistema permitía regular la geometría de la misma. Una vez tesados los cordones se eliminó este elemento auxiliar.

El tesado se realizó con gato unifilar, simultáneamente entre los dos lados de la sección transversal (derecha e izquierda). Se comprobó que la pérdida por rozamiento fue mínima al retesar por el extremo pasivo.