

# REHABILITACIÓN DE LOS TENDONES DE RETENIDA DEL PUENTE DEL CENTENARIO

*Tie-down cables retrofitting. Puente del Centenario cable-stayed bridge*

Javier Oñaderra Rabasa<sup>a</sup>, Fernando Martínez Pérez-Beato<sup>b</sup>, Sierra Ruíz Rabadán<sup>c</sup> y  
Damian Yerone Neustadt<sup>d</sup>.

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Proyecto. Dywidag

<sup>b</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director Técnico. Dywidag

<sup>c</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Proyecto. Dywidag

<sup>d</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Responsable departamento de Obras. Dywidag

## RESUMEN

El Puente del Centenario es uno de los puentes más singulares de la ciudad de Sevilla. Durante una inspección realizada en 2018, se observó que la corrosión bajo tensión había producido la rotura de uno de los cordones de dos de los tirantes de retenida, situados en las pilas laterales del tramo atirantado. Ante la imposibilidad de sustituir completamente los tirantes sin generar un gran impacto en el tráfico de la bulliciosa SE-30, se decidió cortar todos los cordones por encima de la losa de anclaje, tras ser destesados mediante un innovador dispositivo desarrollado por DYWIDAG, para seguidamente empalmar mediante un manguito el tramo original superior con un tramo nuevo inferior.

## ABSTRACT

Puente del Centenario is one of the most unique bridges in the city of Seville. During an inspection carried out in 2018, it was noticed that the corrosion had split one of the strands of two of the Tie-down cables, located at the intermediate piers. After discarding the complete replacement of the cables due to the great impact it would have had on the traffic of the bustling SE-30, it was decided to cut all the strands above the anchorage RC slab to subsequently connect the original upper section with a new lower section by means of coupler. Previously, the tension at the strands had to be removed using an innovative device developed by DYWIDAG.

**PALABRAS CLAVE:** Puente atirantado, Reparación, Refuerzo, Retenidas, Innovación, Sostenibilidad.

**KEYWORDS:** Cable-stayed bridge, Retrofit, Repair, Tie-down Cable, Innovation, Sustainability.

## 1. Introducción

El Puente del Centenario, inaugurado en noviembre de 1991, es uno de los puentes más célebres y singulares de la ciudad de Sevilla. Este puente atirantado supuso un hito en la ingeniería española por la elección de materiales,

conjugando el acero y el hormigón, y por la solución constructiva utilizando elementos prefabricados.

El puente, que permite a la Autovía de Circunvalación de Sevilla SE-30 salvar el río

Guadalquivir, cuenta con una longitudinal total de 2.017 metros por 22 de anchura de su tablero.

De los 2.017 metros, únicamente 565 metros entre juntas pertenecen al viaducto atirantado, por los 1.452 metros que pertenecen a los viaductos de aproximación; 12 vanos en el lado Cádiz y 28 en el lado Huelva. El tramo atirantado, simétrico en alzado, lo conforman 5 vanos (luces de 48 + 102 + 265 + 102 + 48 m) en los que la sustentación vertical del tablero la aportan, además de los tirantes anclados en los pilonos (P14 y P15), los aparatos de apoyo en las pilas laterales (P12 y P17) e intermedias (P13 y P16).

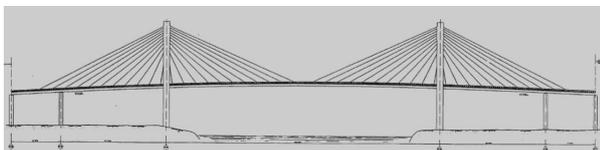


Figura 1. Alzado del tramo atirantado

El elemento longitudinal resistente principal del tablero son 2 vigas cajón laterales de 2,5 metros de canto, en las que se empotran riostras transversales cada 12 metros, coincidiendo con los puntos de anclaje de los 88 tirantes del puente (22 parejas de tirantes por pila). Asimismo, se disponen longitudinalmente 5 vigas doble T apoyadas sobre las riostras para la transmisión de las cargas aplicadas entre vigas cajón. Por último, conectando todos los elementos anteriores, que se instalaron tras ser prefabricados previamente, se hormigonó *in-situ* la losa de tablero de 0,2 metros de espesor.

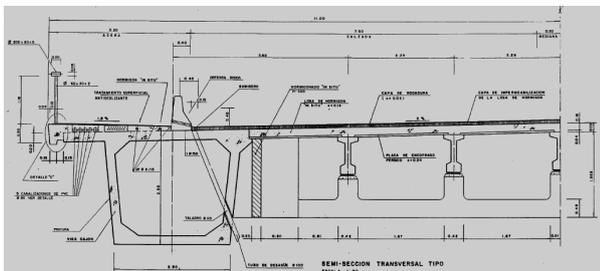


Figura 2. Sección transversal del tramo atirantado

Los tirantes están compuestos por un número variable de cordones de pretensado de diámetro 0,6", de 32 a 78 cordones en función

de su inclinación y sollicitación, y se encuentran inyectados en lechada. Los tirantes se anclan en las pilas principales mixtas (pilonos) de 104 metros de altura tan características y reconocibles del Puente del Centenario, diseñadas mediante la armonización de dos materiales: hormigón y acero corten.

## 2. Retenidas

### 2.1 Descripción

Durante la fase de diseño original del puente se establece que ciertas combinaciones teóricas de cargas vehiculares en el vano central producirían un levantamiento del tablero en sus extremos. Para contrarrestar este efecto y obligar a que los aparatos de apoyo trabajasen siempre a compresión, se proyectaron dos tirantes de retenida en cada uno de los dos fustes de las pilas intermedias del tramo atirantado, sumando un total de 8.



Figura 3. Vista desde la coronación de la pila del tendón de retenida y del apoyo de la viga cajón

Cada tirante de retenida está compuesto por 12 cordones de  $\varnothing 0,6''$  y aproximadamente 30 metros de longitud. Su cabeza superior se encuentra embebida en la losa del tablero, atraviesa el ala inferior de la viga y la coronación de la pila a través de agujeros con holgura suficiente para permitir el desplazamiento longitudinal del tablero, y tras discurrir por el fuste de la pila, se ancla en una losa horizontal de hormigón armado de 1,25 metros de espesor.



Figura 4. Vista desde el interior de la losa de anclaje hacia el tablero de la pila 13

## 2.2 Problemática

En una inspección realizada en septiembre de 2018 se detecta la rotura de dos cordones en dos tirantes diferentes, uno de la Pila 13 y otro de la Pila 16. Durante una primera inspección visual se observa que la rotura se produjo en las inmediaciones de la losa de anclaje inferior y con suficiente anterioridad a la inspección como para que hubiese aparecido corrosión en las caras seccionadas.



Figura 5. Sección transversal por las pilas laterales (P13 & P16)

En el estudio posterior se determinó que la rotura se había producido por la corrosión bajo tensión de uno de los alambres exteriores y

en la zona desprotegida de vaina de polietileno. Este análisis también estableció la presencia de agua en el interior de las caperuzas de los anclajes inferiores, añadiendo un grado adicional de incertidumbre sobre los tirantes afectados.

## 2.3 Alternativas para la sustitución

En el momento de la toma de decisiones, el proyecto de la ampliación del Puente del Centenario se encontraba en un impasse, desconociéndose si finalmente se iba a llevar a cabo y de qué forma. Tomando en consideración este contexto, se plantearon las siguientes alternativas:

- Sustitución completa de los 8 tirantes de retenida, eliminando así la posibilidad de que el resto de los tirantes se encontrasen amenazados.
- Sustitución completa de los 2 tirantes dañados.
- Reparación parcial de los tirantes dañados asumiendo que la zona crítica era únicamente la de los anclajes inferiores y el paso a través de la losa de anclaje.

Asimismo, se tuvo en cuenta la situación temporal de levantamiento a la que se habría visto expuesto el tablero durante la retirada de los elementos de anclaje si se produjese la combinación de cargas pésima. Por ello se plantearon diversas propuestas que permitiesen reducir al mínimo dicha posibilidad; bien buscando una solución equivalente a la existente pretensada mediante tendones, o bien lastrando los vanos laterales para aumentar la carga muerta de estos, compensando así el efecto de las cargas vivas en el vano central.

### 3. Solución diseñada y ejecutada

#### 3.1 Resumen de la solución

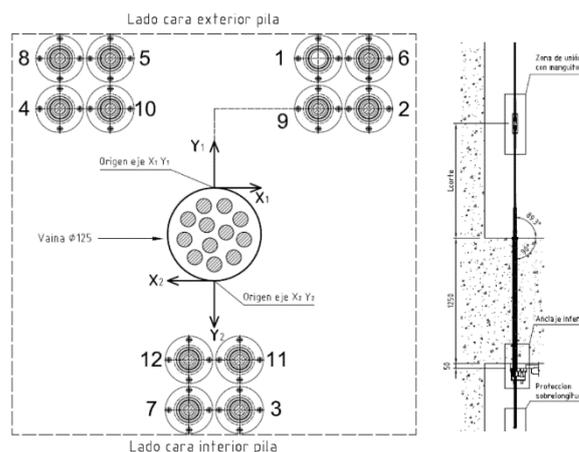
La decisión propuesta por Fhecor y ejecutada por Dywidag se apoyó en el tercero de los conceptos enumerados en el punto anterior: se subsanó el problema existente de manera local, reemplazando los tramos inferiores de todos los cordones (dañados y sanos) de los dos tendones afectados. Esta alternativa era la menos disruptiva tanto para la estructura como para el tráfico de la SE-30. Además de ser una solución sostenible, también fue una solución económicamente eficiente para la situación de incertidumbre en la que se encontraba el proyecto de ampliación.

La propuesta de reparación local consistía en ir destesando uno a uno los 11 cordones que aún se encontraban traccionados para que, una vez eliminada la tensión, se cortasen y se reemplazasen por nuevos tramos de cordón 0,62” engrasados y enfundados que se empalmaban al tramo superior mediante manguitos. Conjuntamente, se buscaba mejorar la protección de los cordones a su paso por el hormigón de la losa de anclaje, así como proporcionarles nuevos puntos de anclaje suficientemente lejos de la zona conflictiva actual de anclaje.

#### 3.2 Descripción de la solución

##### 3.2.1. Anclaje inferior

Cada anclaje inferior está formado por tres grupos de 4 cordones cada uno. Se agruparon de esa manera para mejorar el acceso a los cordones a destesar manteniendo las nuevas placas de reparto dentro de la meseta existente de apoyo.



**Figura 6. Disposición esquemática en planta y alzado de los nuevos anclajes monocordón**

Cada placa de reparto, de dimensiones 150x180mm y espesor 40mm, alberga cuatro anclajes unitarios tipo “barrilete” de Ø60mm y altura 55mm en los que se anclan los nuevos cordones. Cada barrilete lleva soldado un tubo de acero que solapa con un tubo de PE que atraviesa completamente la losa de hormigón. A la placa de reparto se le atornilló una caperuza de acero que se había rellenado previamente con un gel anticorrosivo.



**Figura 7. Vista desde debajo de la losa de anclaje de los nuevos cordones, barriletes y placas de reparto**

Todas las transiciones de la solución ejecutada se sellaron con termo-retráctil: tubo metálico del barrilete – tubo PE, salida de la caperuza – tubo PE...

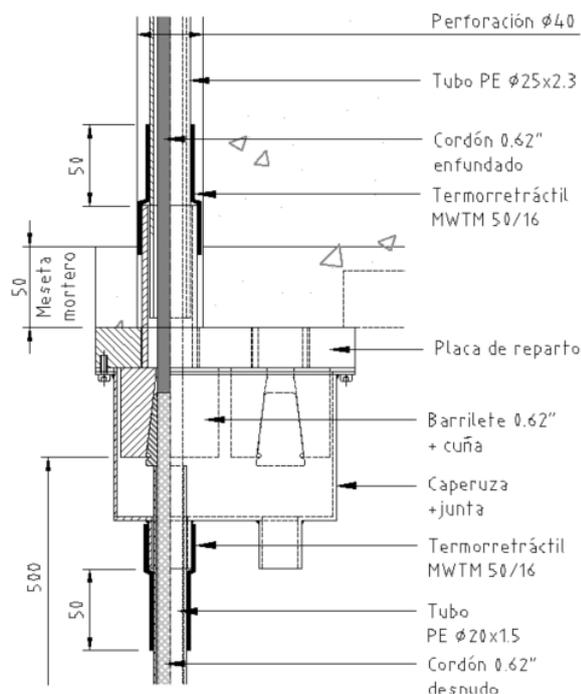


Figura 8. Esquema de la zona inferior del nuevo anclaje de los cordones



### 3.2.2. Nuevos taladros para cada uno de los cordones

Los taladros se realizaron de arriba hacia abajo con una perforadora refrigerada mediante agua y estabilizada mediante un mástil. La corona diamantada utilizada fue de 42mm de diámetro y se perforaron los 1250mm de espesor de losa y los aproximadamente 100mm de meseta de apoyo.



Figura 10. Comprobación de la verticalidad de los nuevos taladros

Las condiciones esperadas para estos taladros venían regidas por los siguientes condicionantes:

- Para evitar dañar el sistema de sellado que tienen los tendones a la entrada del macizado de la pila, se instaló una abrazadera por tendón. Estas abrazaderas se han convertido en el punto de convergencia del haz de cordones que se divide entre los tres grupos de cuatro cordones (por tendón).
- El ángulo de desvío máximo admisible a la entrada de un cordón en el sistema de anclaje Dywidag puede ser de hasta 2,5°, siempre y cuando se interponga un separador de PE entre el cordón y el acero.
- El ángulo de desvío a la salida del cordón de la losa inferior tenía que ser menor de 0,7° (ver Figura 6). Para evitar el contacto del cordón con el hormigón de la losa, se contó con el propio enfundado del cordón además del tubo de PE de diámetro Ø25 y espesor 2,3mm. Ambos tubos y su espesor total de casi 4 mm cumplen con la función de centrador/separador, consiguiendo la misma funcionalidad del separador de PE habitual en los anclajes de postesado.

- El gran espesor y, sobre todo, las numerosas capas de armado de las que está compuesta la losa, hicieron que fuese imposible no perder ligeramente la verticalidad durante su ejecución. Se tuvo que asegurar que el ángulo de desvío de los taladros, añadido al definido por la inclinación de los cordones en su subida hacia la coronación de la pila, no superaban el límite de tolerancia.

### 3.2.3. Recrecido de la meseta de apoyo

La meseta de apoyo bajo la losa también fue objeto de mejora. Se decidió ampliar la forma en planta rectangular existente por un segmento circular buscando robustecer la meseta. No solo se aumentó el área, sino que la salida inferior de los taladros ejecutados se alejó del perímetro exterior, eliminando las posibilidades de un fallo de borde del hormigón (se desconocía la configuración de armado de la meseta).

### 3.2.4. Salida superior de la losa

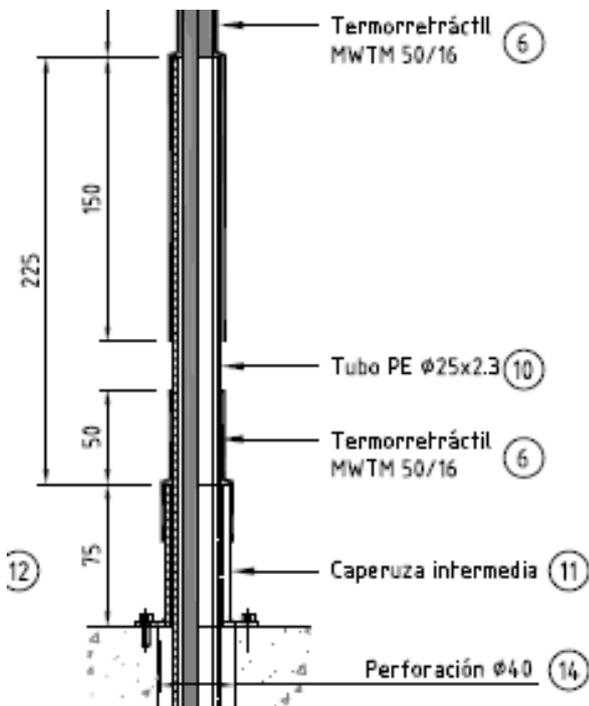


Figura 11. Detalle de la protección del cordón a su entrada por la cara superior de la losa de anclaje

La salida de los cordones de la losa inferior se ha protegido con caperuzas intermedias galvanizadas y pintadas que se han fijado a la losa de hormigón. Tanto el tubo de PE de 25mm de diámetro, como el enfundado de los cordones, sobresalen por el extremo de la caperuza intermedia con termo-retráctil sellando la transición.

### 3.2.5. Empalme de los cordones

Los tramos superiores de los cordones existentes de 0,6" se empalmaron a los nuevos tramos inferiores de 0,62" mediante manguitos unitarios de cordón. El manguito, de 200 mm de longitud, alberga en su interior el espacio para las cuñas de pretensado de los dos diámetros. Para garantizar la correcta protección de la unión cordón-manguito-cordón se utilizó termo-retráctil.

Los manguitos unitarios se instalaron al tresbolillo en tres planos distintos para evitar el contacto entre ellos.

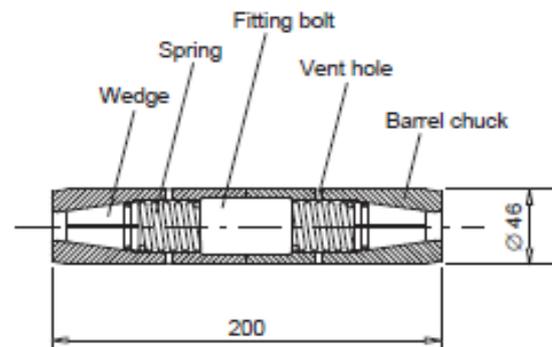


Figura 12 y 13. Manguitos de empalme de tramos de cordón 0,6' (original) y 0,62" (nuevo)

## 4. Procedimiento de ejecución

### 4.1 Destesado de los cordones

Al desconfiar del estado de cordones en activo en la zona del anclaje inferior y su recorrido a través de la losa de hormigón, se descartó el destesar los cordones actuando desde las sobrelongitudes; se resolvió que era demasiado arriesgado aumentar la tensión hasta el despegue de la cuña en el tramo presuntamente dañado. Como resultado, se acordó destesar los cordones haciendo uso de un innovador dispositivo de destesado patentado por Dywidag que se fija en el elemento contra el que se reacciona, en este caso la cara superior de la losa de hormigón, para crear un *by-pass* que permite absorber las tensiones de la zona inferior del cordón y reconducirlas a través de la estructura del dispositivo.

El destesado se realizó cordón a cordón. Para ello, se intercaló una cuña auxiliar en la longitud libre del cordón a destesar (previo pelado del enfundado) conteniéndola en una mordaza de acero aleado formada por dos mitades en las que se mecanizó el espacio oportuno para albergar la cuña. Como se comprobó en ensayos realizados con anterioridad a su uso en el Puente del Centenario, para que la mordedura de la cuña fuese completamente efectiva y no partiese el cordón, las dos piezas de la mordaza debían unirse entre sí convenientemente mediante tornillos pretensados que evitasen la más mínima separación entre ellas.

La cuña auxiliar pasaba a dividir la longitud libre del cordón a destesar en dos tramos, uno corto y otro largo. Mediante dos gatos hidráulicos, que reaccionaban contra la estructura del dispositivo de destesado, se incrementó la fuerza del cordón en el tramo largo, produciendo una disminución de la fuerza en el tramo corto.



Figura 14. Ensayo de idoneidad de solución

Para que la fuerza en el tramo corto fuese igual a cero, permitiendo cortar de forma segura el cordón por cualquier sección de dicho tramo, el alargamiento obtenido en el tramo largo de cordón tenía que ser igual al alargamiento total del cordón a destesar. Aunque la tensión en el cordón original que correspondía aproximadamente al alargamiento esperado se estimó previamente, confirmar con certeza en obra que se había eliminado en el lado corto dicha tensión no fue tarea sencilla. Para buscar dicho límite, se prefirió tesar desde la cuña auxiliar incluso por encima de lo calculado hasta que se apreció un pequeño pandeo en el lado corto (dada la esbeltez del cordón se consiguió pasar de la tracción a la compresión sin aportar demasiada tensión adicional), para después recuperar hasta el punto aproximado en que se eliminaba el pandeo.

El riesgo principal de la operación radicaba en que se debía sobretesar el tramo largo del cordón, con todo lo que ello implicaba: la cuña y el cordón original que fijan el tramo largo a la placa de cuñas superior debía ser capaz de resistir el incremento de fuerza. Durante la maniobra, los técnicos de postesado manejaron la central hidráulica desde fuera de la pila, alejados del peligro y con una cámara grabando en vivo el comportamiento del cordón y del útil de destesado. Los gatos se fueron accionando en escalones, dejando tiempos de reposo para que se asentase la carga. Se llegaron a alcanzar los 420bar, equivalente a 200kN de fuerza en el cordón. Sin embargo, el corte del cordón en el

tramo corto se debía hacer manualmente con radial; se utilizaron unas guías metálicas fijadas al esqueleto del dispositivo de destesado, además del propio tendón, para bloquear lo más posible ambos tramos. Se redujo al mínimo el riesgo de que el cordón golpeará al técnico al liberar energía en el caso de un posible fallo del tramo largo (en el anclaje superior o en la longitud libre), o bien por no haberse eliminado al completo las tensiones del tramo corto.



**Figura 15. Dispositivo de destesado. Técnico comprobando que se había eliminado la tensión**

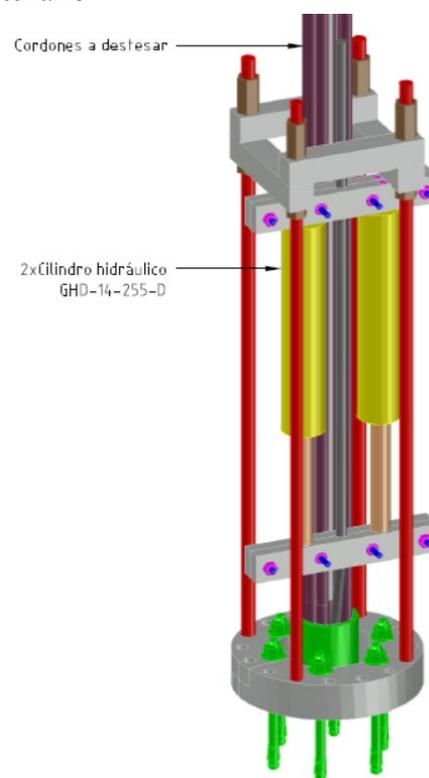
La operación de destesado terminaba liberando la fuerza del cordón mediante los dos gatos hidráulicos, recogiendo su carrera hasta que el alargamiento del cordón del tramo largo fuese cero. Para este proyecto, el alargamiento a eliminar en los cordones era menor que la carrera máxima de los gatos, por lo que no fue necesario realizar más de una embolada; en caso de haber sido necesario, se le habría instalado al sistema un punto de fijación adicional intermedio (mordaza y cuña) que habría permitido recoger la carrera de los gatos.

De inicio, estaba previsto continuar con el procedimiento de instalación del nuevo tramo de cordón una vez se hubiese destesado cada

cordón correspondiente. Este escenario era evidentemente el más conservador al apenas reducir momentáneamente la capacidad total del tendón de retenida. Sin embargo, se observó que los cordones se encontraban enrollados en su longitud libre, por lo que hubo que instalar y tesar primero todos a una fuerza provisional de 30kN. Una vez destesado el último cordón, se coordinó para que, en el menor tiempo posible, se liberasen todos los cordones para posteriormente proceder a tesarlos a su fuerza final, 100 kN. No haberlo hecho de esta manera habría reducido la altura a la que hubiesen convergido los nuevos tramos.

#### **4.2 Descripción del dispositivo para el destesado DYWIDAG**

El dispositivo patentado por Dywidag resultó satisfactoriamente pionero en España. Además, hay que subrayar que las condiciones geométricas fueron notablemente restrictivas, obligando a que se ajustasen sus dimensiones específicamente para las retenidas del Puente del Centenario.



**Figura 16. Esquema 3D del Dispositivo de destesado**

Las partes principales de las que consta el útil son las que siguen:

#### 4.2.1 *Anclaje a la losa de hormigón*

Para el anclaje al hormigón, se diseñó un pedestal metálico formado dos piezas con forma de media luna, componiendo un anillo que rodea al tendón que solapa en los extremos. El diámetro exterior del anillo es de 343mm, el interior 187mm y el espesor 70mm. Las medialunas se fabricaron embebiendo suficientes tuercas para poder posteriormente roscar las 4 barras Dywidag verticales en diferentes posiciones, adaptándose a la posición relativa del cordón con respecto al tendón. Al comprobarse que la unión entre las dos piezas del pedestal podía representar un punto débil en función de cómo de cerca de la unión se situase la barra más traccionada, se decidió disponer dos piezas curvas adicionales para el refuerzo de las uniones.

Para la fijación del pedestal a la losa de hormigón, otro de los puntos críticos de la ejecución al desconocerse la condición del hormigón, se instalaron anclajes químicos de gran capacidad.



**Figura 17. Imagen del pedestal anclado a losa mediante anclajes químicos**

#### 4.2.2. *Estructura vertical resistente*

La estructura vertical está compuesta por 4 barras Dywidag de diámetro 20mm y longitud variable. Cada barra de alto límite elástico

podría resistir por sí sola una tracción mayor a la existente en uno de los cordones a destesar.

En la zona superior de las barras, se sitúa un marco formado por 4 piezas prismáticas cuadrangulares con sección 50x50mm. Es en dos de las piezas del marco donde se apoya la mordaza sobre la que reaccionan los gatos hidráulicos. Para hacer trabajar las barras Dywidag, se utilizan como tope tuercas hexagonales de 70mm de altura.

#### 4.2.3. *Mordazas y gatos*

Los dos gatos son cilindros hidráulicos de doble efecto, con carreras de 255mm y capacidad de 253kN. Los gatos se colocan boca abajo con su base atornillada en la mordaza que reacciona contra el marco horizontal de la estructura del dispositivo; los pistones, por otro lado, empujan la mordaza en la que se sitúa la cuña auxiliar a la que se transfiere la carga. Cada mordaza está formada por una pareja de piezas simétricas que se unen mediante 4 tornillos de resistencia 10.9 y métrica M20. Todas las parejas fabricadas poseen las cavidades de tronco de cono para colocar una cuña, incluso aquellas en las que no se situará la cuña auxiliar; esto es así para que puedan colgarse los gatos del cordón durante su instalación.

### 4.3 *Tareas posteriores al destesado*

Tras el destesado de todos los cordones, las operaciones realizadas para cada cordón fueron:

- Destrenzado del haz de cordones existentes en su longitud libre. Fueron necesarios trabajos en altura para liberar los cordones.
- Enfilado de los cordones uno a uno por los taladros. Se premontaron los anclajes inferiores y sus protecciones para facilitar el montaje.

- Conexión de ambos tramos mediante los manguitos.
- Tesado del cordón con gato unifilar a la fuerza definitiva: 100kN.
- Instalación de los termo-retráctiles
- Corte de las sobrelongitudes hasta 500mm.
- Instalación de las caperuzas tras haber sido rellenadas con gel anticorrosivo.

### *Agradecimientos*

Nos gustaría expresar nuestro más sentido agradecimiento a Fhecor, por su extraordinaria implicación y dinamismo en todas las fases del proyecto. También queremos mostrar nuestra gratitud al Ministerio de Fomento por su confianza impertérrita en Dywidag desde el comienzo de los trabajos. Por último, agradecer a todas las empresas que han colaborado con Dywidag en el proyecto: Azul Construcción (mesetas y destrenzado de cordones), FD Camacho (taladros), Abantos Vertical (instalación de abrazaderas) y Hilti (soporte con los anclajes químicos).