

# Diseño de la torre y elementos auxiliares del sistema de atirantamiento del viaducto de Almonte

## *Tower design and auxiliary elements of the staying system of the Almonte Viaduct*

José Martínez Salcedo<sup>a</sup> y José Enrique Muñoz García<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Servicios Obras Especiales FCC Construcción, S.A. (Madrid, España).

Recibido el 19 de enero de 2018; aceptado el 28 de noviembre de 2019

### RESUMEN

El diseño de proyecto de la torre de atirantamiento para la ejecución del arco del viaducto de Almonte fue modificado con objeto de optimizar su fabricación y sobre todo para mejorar el ajuste del sistema de tirantes. La principal singularidad del nuevo diseño fue la conexión al tablero de hormigón en donde se cambió el empotramiento por una articulación separando así el funcionamiento de la torre y del tablero. La articulación abrió nuevas posibilidades de montaje de la torre que se fabricó en posición horizontal sobre el tablero y luego se izó de un modo también singular: el sistema biela-deslizadera.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Torre de atirantamiento, ajuste del sistema de tirantes, acero S690, base articulada, lubricante sólido, tratamiento post-soldadura, control de tensiones en bulones.

### ABSTRACT

The project design of staying system tower for the execution of the Almonte Bridge's arch was modified in order to optimize its manufacturing and, mainly, to improve the adjustment of the staying system. The singularity of the new design was the connection to the concrete deck where the fixed support was changed to a pinned support, so the operation of the tower and the deck become independent. The pinned support opened up new possibilities for the assembly of the tower that was built horizontally on the deck and, afterwards, was raised in a singular way as well: slider-crank mechanism.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Staying tower, staying system adjustment, S690 steel, pinned support, dry lubricant, post-welding treatment, stresses control in pins.

## 1. INTRODUCCIÓN

El arco del viaducto de Almonte requería de atirantamiento durante su construcción. Para ello fueron necesarias dos torres de atirantamiento de 54 m de altura y 5 000 KN de peso cada una, situadas en el tablero sobre las pilas que parten de los estribos del arco (Pilas 6 y 15).

El ancho transversal de las torres era variable, en su conexión con el tablero, la distancia entre ejes de apoyos era de 5.40 m, para que los apoyos entraran dentro del diafragma de apoyo del tablero, mientras que en la zona de anclaje de cables, el ancho entre ejes era de 8.4 m para permitir que los cables salvaran el ancho del cajón del tablero del puente.

En la tipología de proyecto, los cordones de la torre eran cajones de 1 000x2 960 mm rigidizados interiormente, unidos por traveseros que son vigas vierendeel con cordones en cajón de 500x360 mm y montantes HEB-360, todo en acero S355. Las diagonales en alzado son barras M-48 (S460). La torre está empotrada en el tablero de hormigón.

Con objeto de optimizar la fabricación y montaje se realizó una torre de atirantamiento como alternativa al diseño de proyecto. Analizaremos los cambios realizados de los que, el más significativo, fue el cambio de la conexión tablero-torre que pasó de ser empotrada a ser articulada, lo que supuso una optimización del ajuste del sistema de tirantes. Además se cambió la sección en cajón a sección

\* Persona de contacto / Corresponding author.  
Correo-e / email: [jmartinez@fcc.es](mailto:jmartinez@fcc.es) (José Martínez Salcedo)



Figura 1. Torre de atirantamiento.

abierta, se cambió la calidad del material de S355 a S460 en los cordones, etc.

Analizaremos diferentes aspectos como bulones, acero utilizado, lubricantes en las rótulas, tratamientos post-soldadura, controles de tensiones en la articulación, etc.

Se describirán también los bastidores y estructuras auxiliares para el tesado y anclaje de los cables provisionales que también contribuyeron a la optimización del ajuste del sistema.

Por último se describirá el procedimiento general de fabricación y montaje de la torre sobre el tablero, donde quedó situada en la posición inicial para el izado.

## 2. NUEVO DISEÑO DE LA TORRE DE ATIRANTAMIENTO

Debido a que se realizó un nuevo cálculo del puente, se realizaron cambios en el proyecto, lo que llevó a modificar el número de dovelas del arco, siendo necesario, por tanto, también modificar el número de tirantes. Todo ello supuso un incremento del orden del 15% en la carga de la torre, de los tirantes y de todas las estructuras auxiliares, lo que hizo necesario un recálculo de todos estos elementos.

Por este motivo se realizó un nuevo diseño de la torre (figuras 1 y 2) en el que se realizaron los siguientes cambios con respecto al proyecto con objeto de mejorar el funcionamiento de la torre así como facilitar su fabricación y montaje:

- Sustitución de las secciones en cajón de proyecto por secciones abiertas.
- Se modifican los arriostramientos sustituyendo las barras M-48 (S460) por tubos para dar a la torre una mayor rigidez transversal.

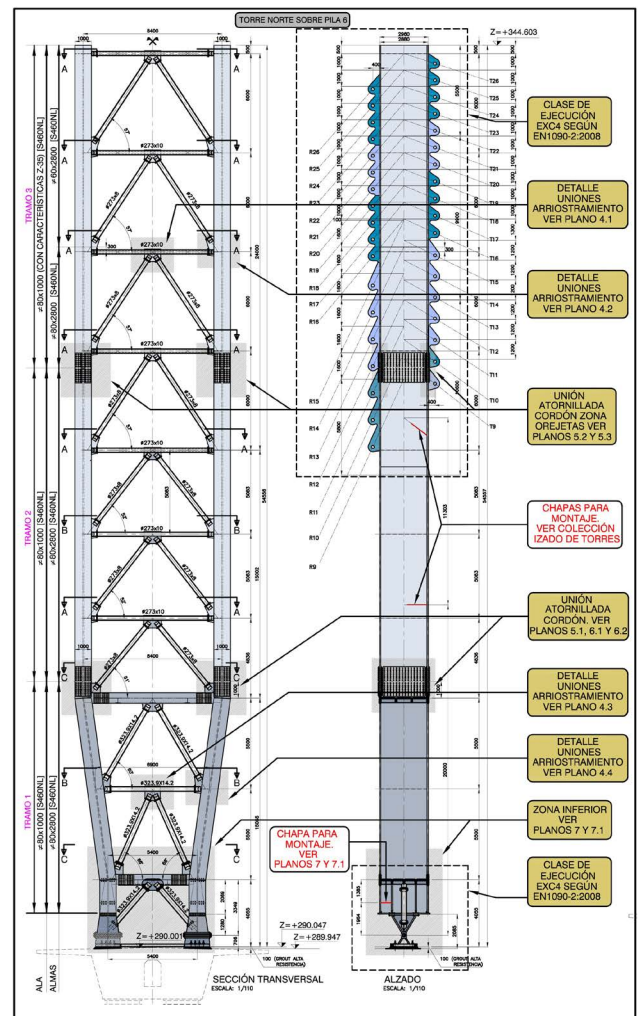


Figura 2. Torre de atirantamiento. Plano.

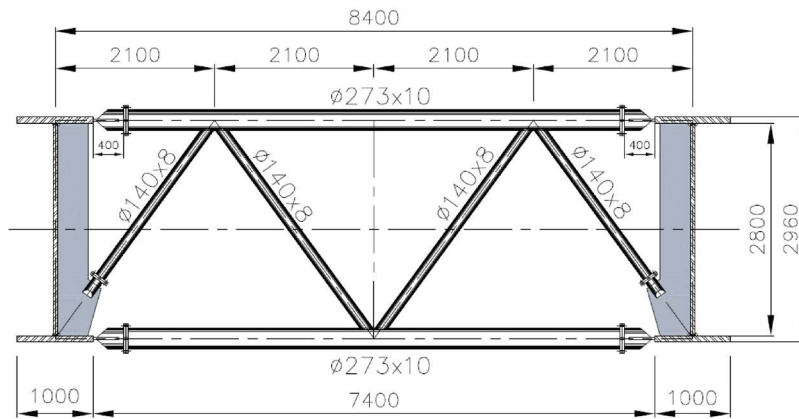


Figura 3. Sección abierta. Alternativa.

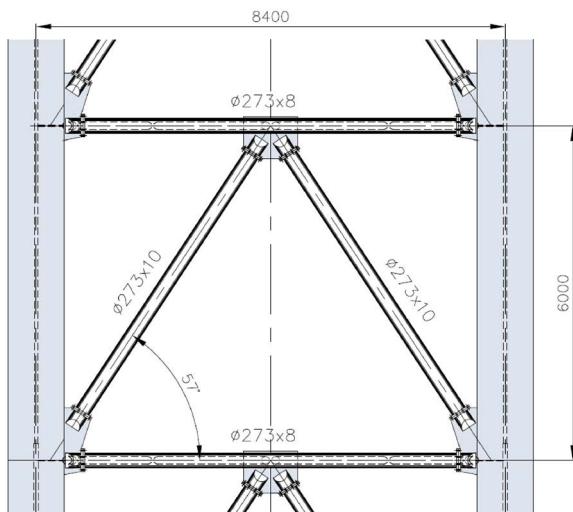


Figura 4. Arriostramientos en alzado. Alternativa.

- Modificación de la conexión de la torre al tablero sustituyendo el empotramiento por una articulación.

En el siguiente apartado se describen con más detalle todas estas modificaciones.

### 3. OPTIMIZACIÓN DE LA FABRICACIÓN DE LAS TORRES

Con objeto de facilitar la fabricación y montaje de las torres, reduciendo los kg de acero, si era posible, se realizó una propuesta de nueva torre en la que las modificaciones más importantes afectaron a: la conexión torre-tablero, tipología de la torre, calidad del material y tratamiento post-soldadura. A continuación se desarrollan todos estos aspectos.

#### 3.1 Conexión torre - tablero

La torre de atirantamiento de proyecto se define como empotrada en su base. Con el fin de optimizar esta conexión se realizaron las siguientes consideraciones:

- El empotramiento no mejora el comportamiento general del conjunto ya que su rigidez es muy inferior al conjunto de los tirantes.
- Al empotrar se fuerza un trabajo conjunto formando un sistema torre-tablero-pila de difícil evaluación y en el que aparecen momentos en el empotramiento de un valor significativo.
- En el planteamiento de torre empotrada, cualquier modificación en el diseño de los tirantes o en su fuerza de tesoado produce variaciones en el momento de empotramiento muy significativas, por lo que su diseño queda muy ceñido a un planteamiento de fuerzas en los tirantes y con poca capacidad de modificación. Creemos que separando el funcionamiento de la torre se tienen unos esquemas resistentes más claros y más intuitivos.
- Durante la ejecución pueden aparecer ciertas desviaciones en la fuerza de los tirantes que no tengan repercusión en el esquema de atirantado general pero en cambio produce variaciones significativas en los momentos de la torre.

#### 3.2 Tipología alternativa

- Se sustituyeron las secciones en cajón de los cordones por secciones en I de 1 000x2 960 mm con poca variación de espesores (60 y 80 mm). Al ser secciones abiertas (figura 3), se simplificó mucho su fabricación con máquina automática, todas las soldaduras son accesibles, no se requiere una secuencia de soldadura especial y el control de calidad puede realizarse al final de la fabricación de la torre.
- El arriostramiento horizontal está formado por: vigas horizontales en I de 850x2 960 mm en los quiebros de los cordones, celosías en la zona de anclaje de los cables, que unen las alas de las secciones en I y están formadas por cordones y diagonales de tubos de sección circular (figura 3) y en el resto solo se colocan puntales (sin diagonales) que unen las alas de los cordones principales. En el plano vertical se dispone de un arriostramiento en K con tubos circulares (figura 4), que admiten tracciones y compresiones y aumentan la rigidez transversal de la torre reduciendo la longitud de pandeo.

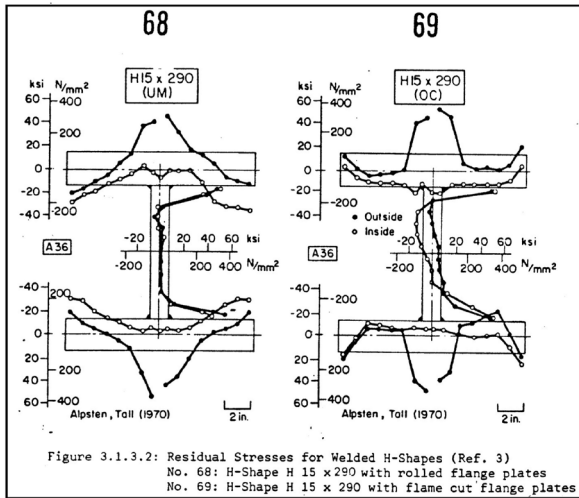


Figura 5. Tensiones residuales en chapas laminadas.

### 3.3 Calidad del material

Los cordones principales de la torre, con el fin de reducir secciones, se fabricaron en acero S460NL. El máximo espesor disponible de este acero era 80 mm, por tanto, era necesario un aprovechamiento del material al máximo, por lo que se tomaron las medidas que se describen a continuación.

En las chapas laminadas, además de disminuir el límite elástico al aumentar el espesor de las chapas, en los bordes, no solo se produce una pérdida de resistencia debido a las tensiones residuales de laminación, sino que, además, la curva de pandeo de la sección armada es la curva d, mientras que, si los bordes de laminación se cortan, la curva de pandeo pasa a ser la c, lo que supone un mejor aprovechamiento del material (figuras 5 y 6).

Por este motivo se dispuso que se eliminaran todos los bordes de laminación de las chapas que conformaban los cordones mediante oxicorte. El resto del material de la torre, arriostamientos y vigas transversales, era S355J2N.

Las chapas que conformaban la articulación de la torre se fabricaron en acero S690QL, como se explicará más adelante.

En la zona de conexión de las orejetas para anclaje de los cables, lo ideal es que las orejetas formen parte de la propia chapa del alma, evitando así una tracción a través de la chapa del ala, sin embargo, al no coincidir el plano de las orejetas con el plano del alma había que soldar las orejetas por fuera a las alas del cordón. Debido a ello, las chapas del ala en la zona de anclajes se pidieron con características Z35, además de imponer a estas soldaduras una estricta geometría y preparación de bordes, condiciones de ejecución (precalentamiento a 100 °C) y un control ultrasónico del 100 % de las chapas y de las soldaduras antes y después del armado. También se realizó el tratamiento post-soldadura HIFIT (que se desarrolla en el siguiente apartado), para reducir tensiones en las soldaduras mejorando la categoría del detalle para reducir los posibles problemas de fatiga (figura 7).

### 3.4 Tratamiento post soldadura

Con el fin de mejorar el comportamiento a fatiga se ha aplica-

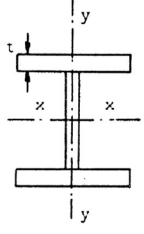
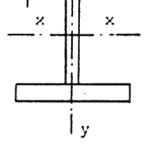
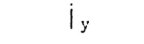
Type of Section	Column Curve
 Rolled H-Shapes - Buckling about x - x - Buckling about y - y	d d
 Welded H-Shapes built-up from rolled plates - Buckling about x - x - Buckling about y - y	c d
 Welded H-Shapes built-up from flame-cut plates - Buckling about x - x - Buckling about y - y	c c

Figura 6. Curvas de pandeo.

do un tratamiento post soldadura a las soldaduras de las orejetas de conexión de los tirantes a la torre de atirantamiento.

Los ensayos a fatiga de piezas soldadas ponen de manifiesto que las fisuras de rotura parten del pie de la soldadura, debido fundamentalmente a que se trata de una frontera entre el cordón de soldadura y el material base. En esta zona es donde se concentran los defectos más importantes de la soldadura ya que se produce una arista en la que se acumulan las tensiones residuales durante la solidificación y endurecimiento de los materiales que entran en el conjunto que forma la unión soldada. En esta zona es donde actúa el tratamiento post-soldadura.

La mejora del comportamiento a fatiga consta de dos partes: En primer lugar, una modificación de la geometría del pie de la soldadura, suavizando las transiciones entre el cordón y el material base, puede resolver gran parte de los problemas de fatiga que se producen en las zonas más conflictivas de la soldadura, porque estos cambios pueden evitar o reducir la acumulación de tensiones residuales.

En segundo lugar, el tratamiento post-soldadura, con el que se consigue mejorar la categoría del detalle reduciendo las concentraciones de tensiones producidas al realizar las soldaduras; el realizado fue el High Frequency Impact Treatment (HIFIT) que, como se puede ver en la figura 8, se realiza una vez ejecutada la soldadura mediante una pistola.

En la figura 9 se puede observar el resultado de la aplicación del tratamiento en una soldadura ya realizada.

Lo que se consigue es introducir unas tensiones de signo contrario a las que produce la soldadura reduciendo de este modo el valor total de las tensiones residuales, mejorando la categoría del detalle (figuras 10 y 11).

## 4.

### OPTIMIZACIÓN DEL AJUSTE DEL SISTEMA DE TIRANTES

El sistema de tirantes, como estaba diseñado en principio, quedaba muy limitado por el planteamiento inicial de fuerzas en los tirantes con muy poca capacidad de modificación. Al estar

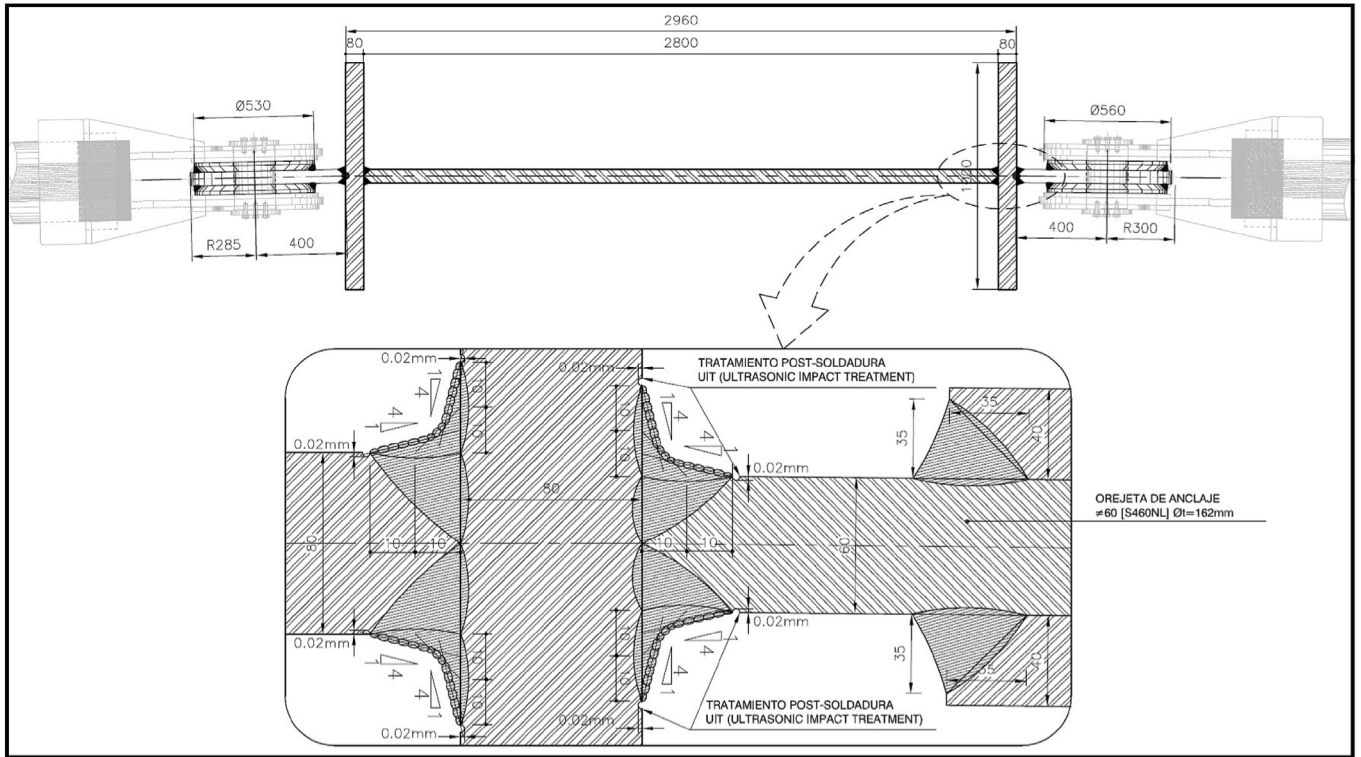


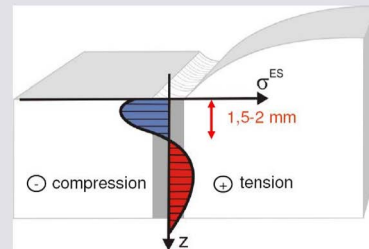
Figura 7. Soldaduras orejetas.



Figura 8. Tratamientos Post-soldadura High Frecuency Impact Treatment (HiFIT).

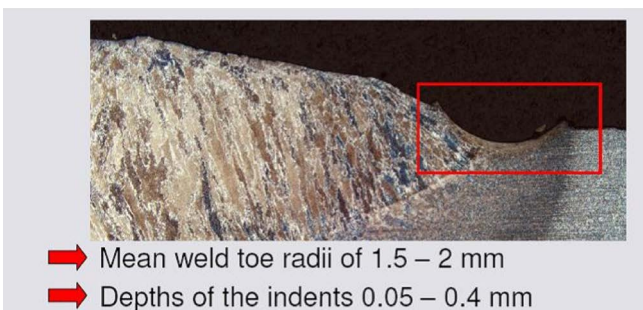
**Residual stresses after a treatment in depth direction**

Transverse residual stresses



- ➔ Effect up to a depth of 1.5 – 2.0 mm
- ➔ Compensating tensile residual stresses in deeper material layers
- ➔ Smaller maximum values of the tensile stresses, due to a wider area

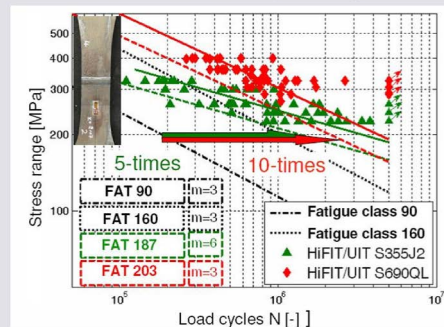
Figura 10. Reducción de tensiones residuales en la soldadura.



- ➔ Mean weld toe radii of 1.5 – 2 mm
- ➔ Depths of the indents 0.05 – 0.4 mm

Figura 9. Resultado de la aplicación del Tratamiento.

**Increase of the life time of mild and high strength steel**



- ➔ Increase of the fatigue strength compared to the FAT-class of Eurocode by 100%
- ➔ For mild steel reduced efficiency at high stress levels compared to lower stress levels (flatter SN-curves)

Figura 11. Incremento de la vida útil de la soldadura.

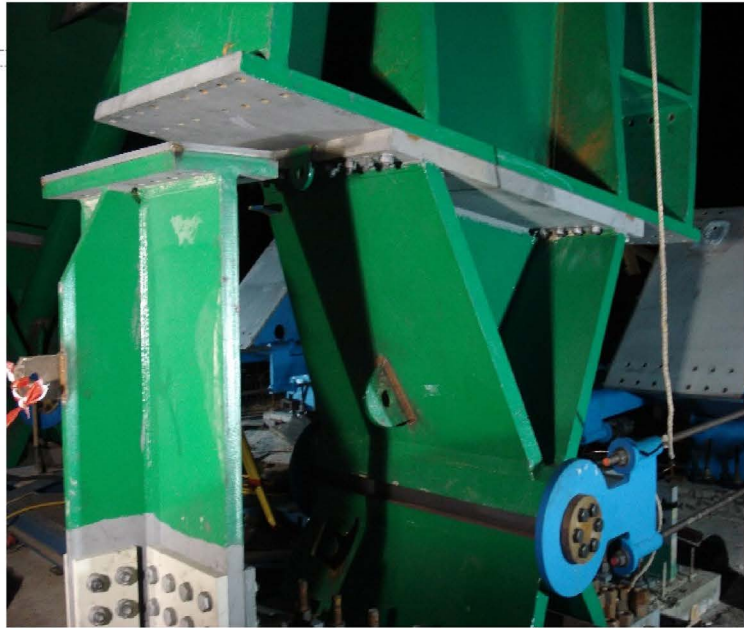
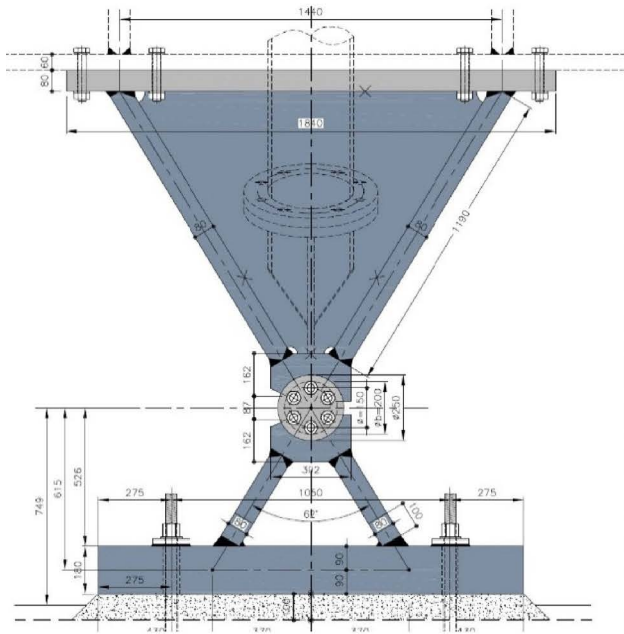


Figura 12. Articulación torre.

la torre empotrada, cualquier modificación en el diseño de los tirantes o en su fuerza produce variaciones importantes en el momento de empotramiento, lo que limita considerablemente la capacidad de ajuste.

A continuación se desarrollan los siguientes aspectos relativos a la conexión torre-tablero:

- Articulación.
- Acero S690QL.
- Bulones de la articulación de la torre.
- Comprobación de tensiones en los bulones de la articulación.
- Sistema de bloqueo provisional.

#### 4.1 Articulación

La carga de cada cordón de la torre pasa a través de una unión atornillada con chapa de testa a una sección en doble T de canto variable cuyas alas inclinadas de 80 mm de espesor confluyen en el eje de giro y se sueldan a la cazoleta superior de alojamiento del bulón. De la cazoleta inferior la carga pasa a otras dos chapas de 80 mm en diagonal que se sueldan directamente a la placa de anclaje de 180 mm de espesor.

El radio de las cazoletas de alojamiento coincide con el radio del bulón, con objeto de minimizar las tensiones de contacto ya que si los radios no coinciden dichas tensiones son superiores. (figura 12).

#### 4.2 Acero S690QL

Debido a las altas reacciones en la base de la torre, un axil del orden de 140 000 KN en cada cordón, que producen elevadas tensiones en las chapas y en las cazoletas de apoyo de los bulones, ha sido necesario utilizar un acero de alto límite elástico (690 N/mm<sup>2</sup>) con el fin de reducir los espesores y garantizar el límite elástico que disminuye al aumentar el espesor de las chapas. Aun así, las chapas necesarias son ≠80 mm para las que

se ha exigido (en planos y pliego de condiciones) un límite elástico mínimo garantizado de 670 N/mm<sup>2</sup>. Con el fin de no llegar al límite de resistencia de estas chapas y por la disminución del límite elástico se adoptó el criterio de limitar las tensiones en servicio a la mitad del límite elástico, en servicio, es decir, se adopta un coeficiente de seguridad  $\gamma=2.0$ .

Igualmente, se ha exigido al taller la homologación de los procedimientos de soldadura de este tipo de acero.

Tanto la elección de los materiales como la geometría de bulón y chapas que lo recogen han sido diseñadas para limitar la tensión en el contacto entre ambos. Se ha dispuesto un tratamiento en la superficie de contacto capaz de soportar estas tensiones. Todas las soldaduras, las preparaciones de borde y los tratamientos superficiales han sido cuidados para permitir un adecuado paso de las tensiones.

En las soldaduras más críticas de las chapas se dispusieron cupones adicionales de chapa para realizar ensayos destructivos como se indicaba en la especificación de compra de la estructura metálica.

Lo fundamental del mecanismo de apoyo del bulón es soportar la presión y permitir el deslizamiento con dicha presión. Para ello es necesario un control geométrico de la ejecución y una correcta aplicación del tratamiento.

La placa de anclaje y las cazoletas de alojamiento del bulón se realizaron con chapa de 180 mm de espesor, que no es un espesor habitual, por lo que hubo que hacer un pedido especial. Las cazoletas se mecanizaron a partir de esta chapa y en la placa de anclaje, con este espesor, se evitaba la necesidad de rigidización.

#### 4.3 Bulones de la articulación de la torre

El acero utilizado en los bulones de la base articulada de la torre es 36CrNiMo16-QT (en estado de temple y revenido), según EN 10083, con un límite elástico mínimo garantizado de 800 N/mm<sup>2</sup>.



Figura 13. Bulón articulación torre.

El control de calidad exigido a los bulones fue muy estricto, se pidieron certificados de composición química, tratamiento térmico y características mecánicas posteriores al tratamiento: límite elástico, límite de rotura, alargamiento en rotura, dureza superficial y resiliencia a 0 °C.

Además se exigió certificación de ensayos de: resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, control geométrico y visual, ensayos de dureza y control ultrasónico.

El tratamiento aplicado tanto en la superficie del bulón como en la del alojamiento fue el siguiente:

- Chorreado Ra25 a realizar no antes de 8 h del resto del tratamiento.
- Pulverización con EVERLUBE 620 C de 12 µm de espesor.
- Curado durante 1 h a 200 °C.
- Pulido Ra 0.4.

Las presiones extremas que se producían en los bulones hacían inviable la utilización de lubricantes semisólidos (grasas) o líquidos ya que, además de no tener capacidad de carga suficiente, serían expulsados por las altas presiones de contacto entre bulón y cazoleta.

Everlube 620C es un lubricante de película sólida con base de Disulfuro de molibdeno (MoS<sub>2</sub>), que tiene la más alta capacidad de soporte de carga con un bajo coeficiente de fricción, curado térmicamente con un sistema aglutinante orgánico. Proporciona una larga vida útil, libre de plomo, buena resistencia química y a la abrasión, ideal para aplicaciones con altas cargas.

El lubricante tiene un contenido mínimo de material sólido del 40% en peso, se aplica con pistola de spray o pincel en capas finas y uniformes dejando secar entre capas. Previamente a la aplicación fue necesario homologar el procedimiento en chapas y bulones de prueba confirmando que cumplía los requisitos solicitados. El tratamiento fue aplicado por personal



Figura 14. Bandas extensiométricas en la articulación.

entrenado y cualificado específicamente para ello, verificando su adherencia mediante el ensayo con tira adhesiva.

Las especificaciones de aplicación y control de tratamiento aplicado están basadas en el documento: "Process Specification for Dry-film Lubricant Application". NASA 2010.

En la [figura 13](#) se incluye una fotografía del bulón de la articulación.

#### **4.4 Comprobación de tensiones en los bulones de la articulación**

Con el fin de analizar el estado tensional en la articulación de la torre y comprobar que no se acumulan momentos en la articulación durante la construcción, se instalaron bandas



Figura 15. Tensiones en bandas extensiométricas de la articulación.

extensiométricas en las chapas de 80 mm que forman el triángulo inferior de la rótula de cada torre (figuras 14 y 15). No obstante, por diversos motivos, esta decisión se tomó tarde con la torre ya con cierta carga de tirantes, por lo que surgió la necesidad de estudiar el estadio tensional inicial y poder hacer una puesta a cero del sistema.

Todo ello llevó a plantear la necesidad de realizar unos ensayos previos que permitieran determinar realmente el valor

de las tensiones existentes en esta zona permitiendo establecer un valor de referencia de las tensiones a partir del cual, con los datos proporcionados por las bandas extensiométricas poder conocer el valor real de las tensiones en cualquier momento.

Por todo ello se recurre a la obtención experimental de tensiones mediante ensayos *hole-drilling*. En particular, se ha realizado una combinación de DHD (*Deep Hole Drilling*) y ICHD (*Increase Centre Hole Drilling*) en los bulones de las torres de atirantamiento; mediante el DHD se obtuvo la distribución real de tensiones en todo el espesor/diámetro en una articulación, con los ICHD de 2 mm de profundidad se comparó el estado tensional en las otras rótulas no directamente ensayadas. En las figuras 16, 17 y 18 se señala la localización de los taladros.

El principio de este método es que la eliminación del material del taladro produce un reajuste de las tensiones. Las deformaciones del taladro medidas permiten el cálculo de las tensiones previamente existentes. El proceso de cálculo se desarrolla a partir de una combinación de análisis experimentales y de elementos finitos.

Al realizar los ensayos en el bulón, podemos conocer el estado tensional del mismo. Este estado refleja más claramente la situación de la articulación ya que las tensiones obtenidas no están afectadas por tensiones residuales generadas por soldaduras.

Realizando un modelo de elementos finitos de la rótula y obteniendo las tensiones por el eje del bulón se puede conocer

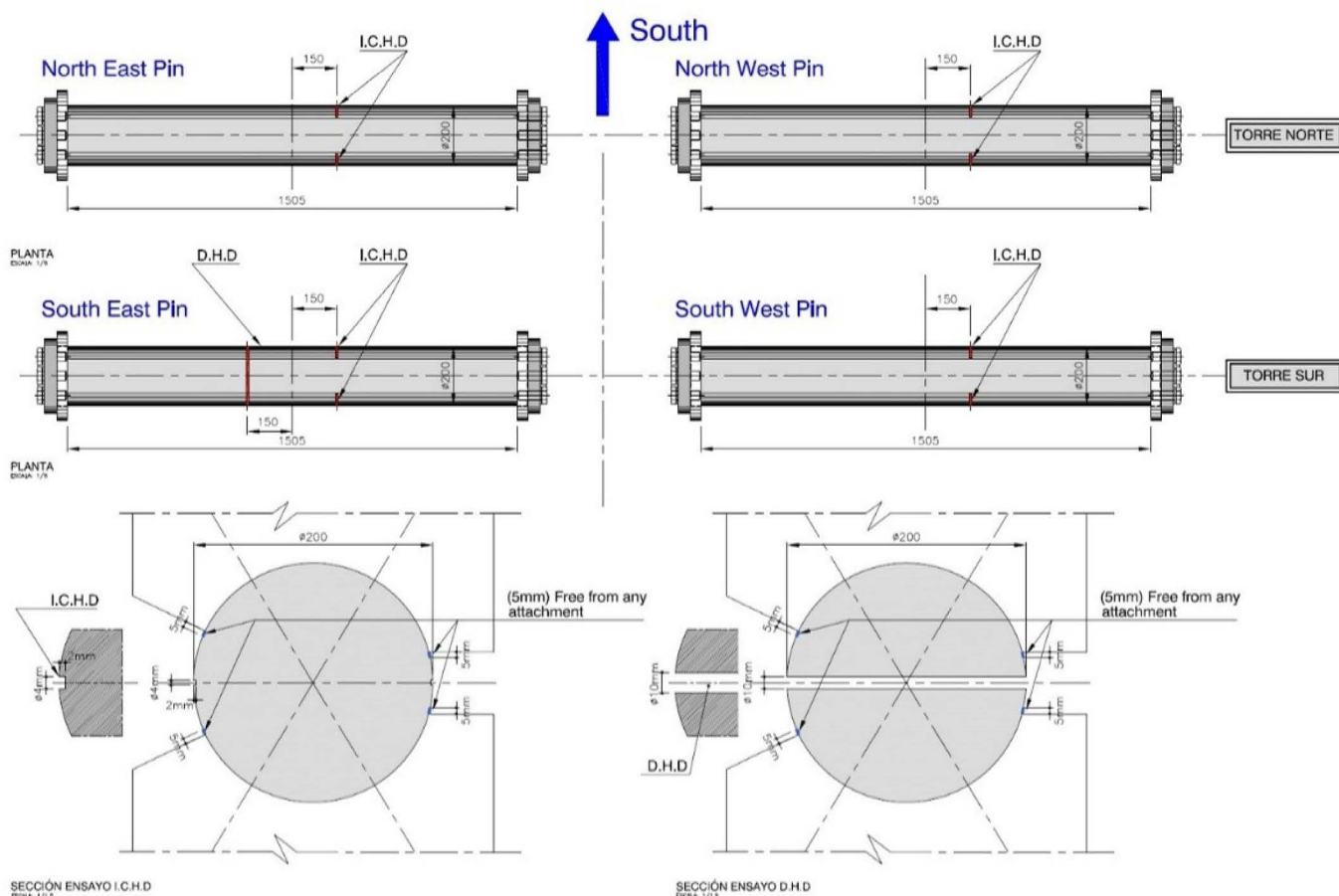


Figura 16. Localizaciones de taladros en el bulón.





Figura 17. Localización DHD (Deep Hole Drilling).

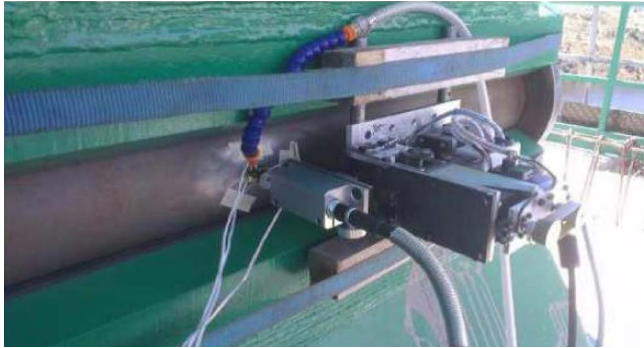


Figura 18. Localización ICHD (Increase Centre Hole Drilling).

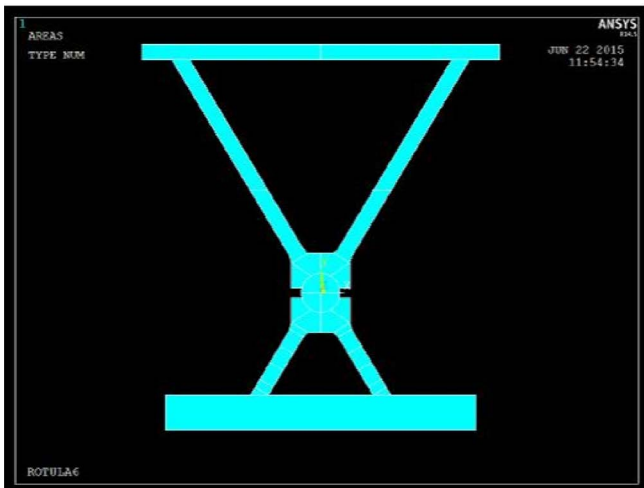


Figura 19. Modelo de cálculo de tensiones (Ansys).

un estado tensional de referencia con el que comparar los resultados leídos en la realidad (figura 19).

En particular, si no existe un momento en la rótula y la carga es únicamente vertical, las tensiones normales en el eje del bulón serán simétricas (izquierda), sin embargo, si existe un momento, el gráfico de las tensiones normales en el bulón será asimétrico (derecha), como puede verse en los los gráficos de la figura 20.

Las tensiones obtenidas en el bulón se indican en las figuras 21 y 22 (tensiones normales en azul).

De los resultados obtenidos de los ensayos realizados, se dedujo que no existían momentos significativos en las rótulas de las torres de atirantamiento y se pudo establecer el estado inicial de tensiones para el sistema de lectura con extensómetros. Desde esa lectura junto con los extensómetros se pudo

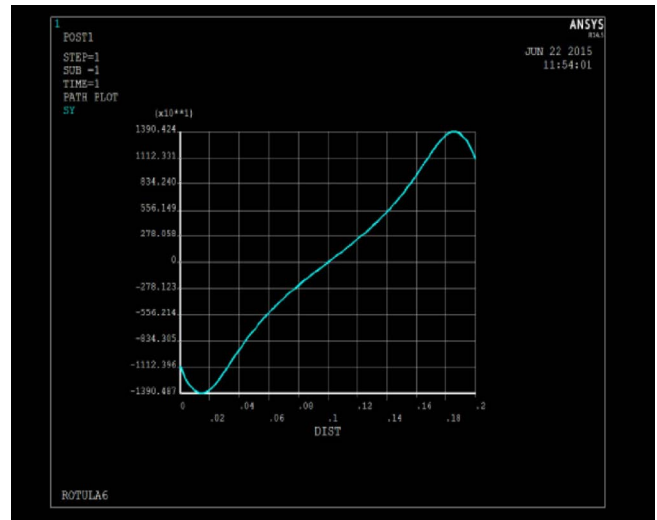
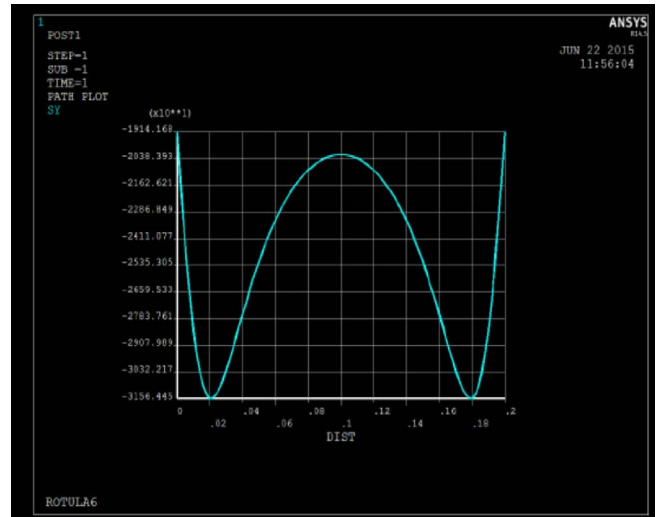


Figura 20. Tensiones en el eje del bulón (Ansys).

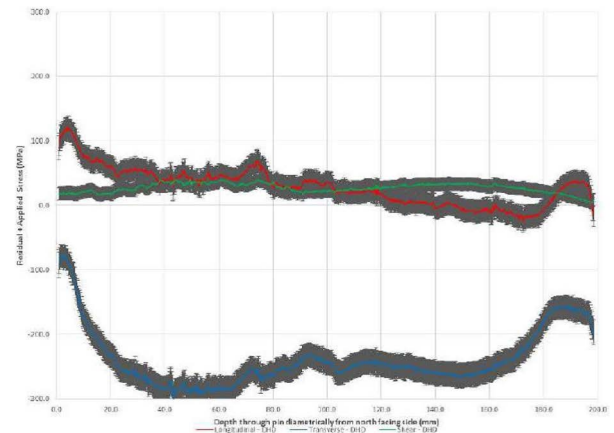


Figura 21. Tensiones en el eje del bulón.

ir estudiando la evolución de tensiones en la articulación a lo largo de la construcción.

En algunas fases se llegó a apreciar que tras el tesado y hormigonado de cada dovela, hay un aumento de la amplitud de tensiones entre las chapas delanteras y traseras del bulón. Sin embargo, esto disminuía con el paso de los días. Podría hablarse de un cierto bloqueo temporal (figura 21), o que el bulón

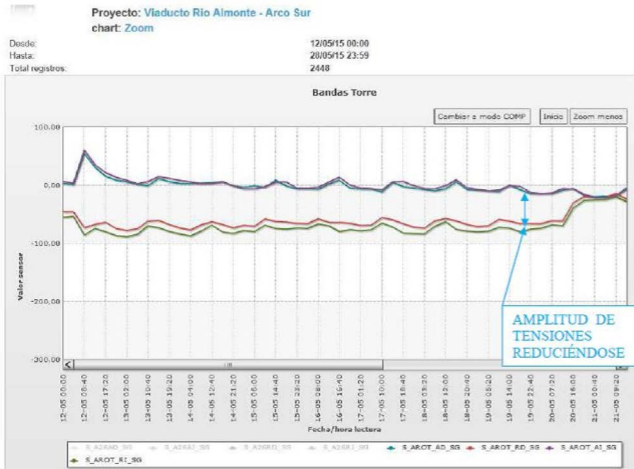


Figura 22. Lectura de los extensómetros en una etapa constructiva.

no desliza inmediatamente tras la aplicación de la carga, sino que lo va haciendo poco a poco. En cualquier caso, con los datos que se obtuvieron, los bloqueos eran poco importantes y sobre todo no eran acumulativos ya que se iban eliminando con el paso de los días. De esta forma se pudo verificar el buen funcionamiento de la articulación durante la construcción del arco.

#### 4.5 Sistema de bloqueo provisional

En las fases iniciales de montaje de tirantes la torre deberá estar empotrada en su base de forma provisional. Este empotramiento provisional solo deberá resistir los momentos de empotramiento procedentes de los desvíos en las fuerzas de los tirantes en estas fases iniciales. (figura 23).

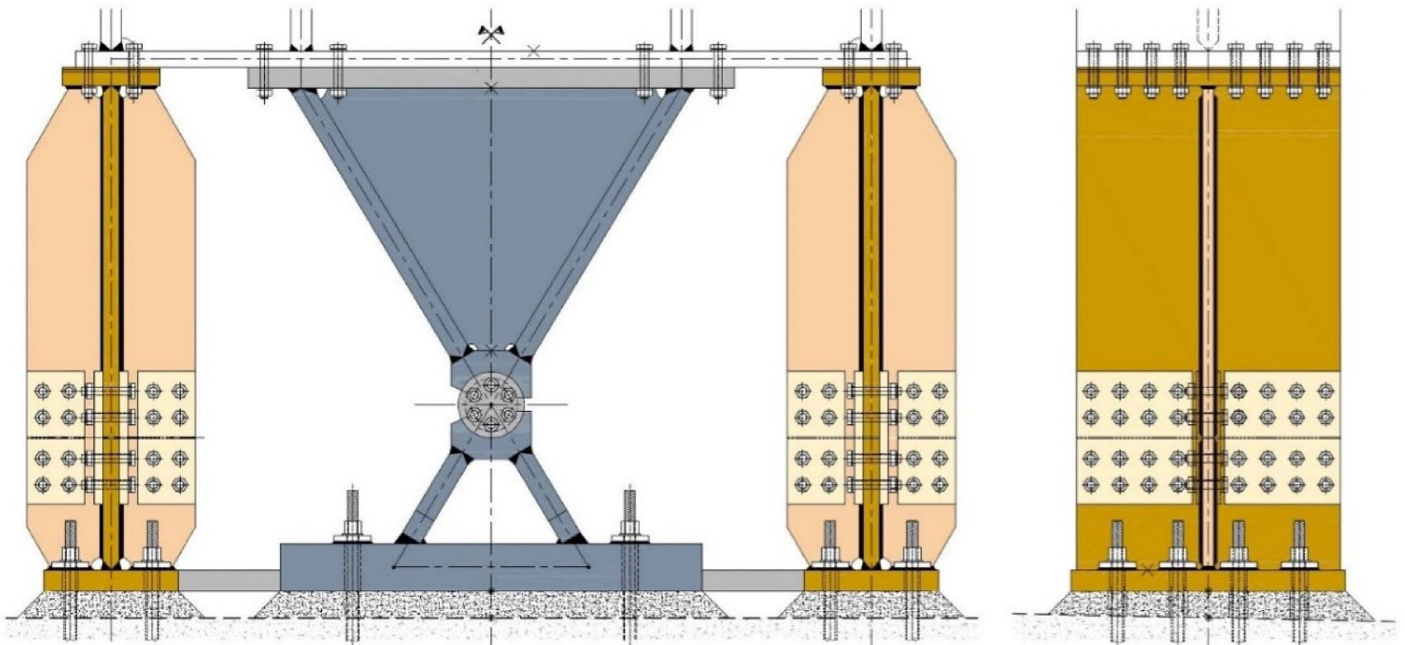


Figura 23. Sistema de bloqueo provisional.

## 5.

### PROCEDIMIENTO GENERAL DE FABRICACIÓN Y MONTAJE

Tanto en el diseño original de proyecto como en la alternativa finalmente ejecutada, la torre se montaba por tramos que se unían posteriormente con uniones atornilladas. Los perfiles de cada tramo (cordones principales, montantes y diagonales llegaban a obra por separado donde se ensamblaban). La diferencia consistía en el montaje final de la torre.

En el diseño de proyecto cada tramo se montaba en su posición definitiva mediante grúa uniéndolo al tramo anterior. Con el nuevo diseño de la torre surgen nuevas posibilidades de montaje de las torres en su posición.

Todos los elementos de la torre se ensamblaron en obra conformando la torre en posición horizontal apoyada sobre castilletes (figuras 24 y 25); en este caso la capacidad de la grúa necesaria para el montaje es muy inferior a la del diseño original que debía montar tramos enteros en altura.

Partiendo de esta posición se realizó el izado de la torre que será objeto de otro artículo denominado "Izado de torres provisionales de atirantamiento del viaducto de Almonte".

## 6.

### ELEMENTOS AUXILIARES DEL SISTEMA DE ATIRANTAMIENTO

Las estructuras auxiliares para el tesado y anclaje de los cables provisionales están diseñadas de forma que sea posible realizar los ajustes necesarios durante todo el proceso constructivo, tanto en posición como en valor de la carga, de una forma clara y sencilla. Están formadas por los siguientes elementos:



Figura 24. Montaje de torre sobre tablero.

En los anclajes superiores:

- Terminales de anclaje de cables a torres.
- Orejetas en la torre.

En los anclajes inferiores:

- Bastidor de anclaje de tirantes.
- Barras de tesado.
- Bastidores de anclaje de barras al terreno (cables de retención) y al arco (cables de tiro).

La carga en las estructuras auxiliares ha sufrido un aumento del 15% debido a los cambios realizados en el proyecto del puente, lo que implicaba un incremento de los espesores de las piezas definidas en proyecto. Para no incurrir en espesores excesivos, se recurrió a modificar la calidad de algunas chapas de S355 a S460. De esta forma, al no introducir espesores más grandes, se consigue no tener que reducir el límite elástico de las piezas que viene implícito al aumentar su espesor. A su vez, un menor espesor de las chapas permite realizar soldaduras con menor volumen y por lo tanto menores requisitos de ejecución.

Debido a la gran responsabilidad de las piezas en cuestión, ha sido necesario cuidar especialmente los detalles de soldadura, mejorando la categoría de fatiga de los detalles más sensibles mediante una modificación de la geometría de la soldadura y la aplicación de tratamientos post-soldadura (punto 3.3).

El anclaje al hormigón se realiza a través de 8 barras  $\Phi 50$  Macalloy 1030 ( $\Phi 40$  para los cables menos solicitados). La dis-



Figura 25. Torre apoyada sobre castilletes.

posición relativa de las barras varía en función de si el anclaje es al hormigón de las zapatas (terreno) o del arco (figura 26).

Los bastidores de anclaje y los balancines tenían una carga máxima en estado límite último (ELU) de 10650 KN. No obstante, para tener margen para posibles modificaciones o ajustes futuros, se calcularon para una carga de 11500 KN.

Se consideró también en todos los elementos una fuerza transversal correspondiente a un giro total de  $\pm 0.6^\circ$ ,  $\pm 0.3^\circ$  correspondiente al viento y  $\pm 0.3^\circ$  por tolerancias de fabricación y/o montaje.



Figura 26. Bastidores. Anclaje al terreno y al arco.

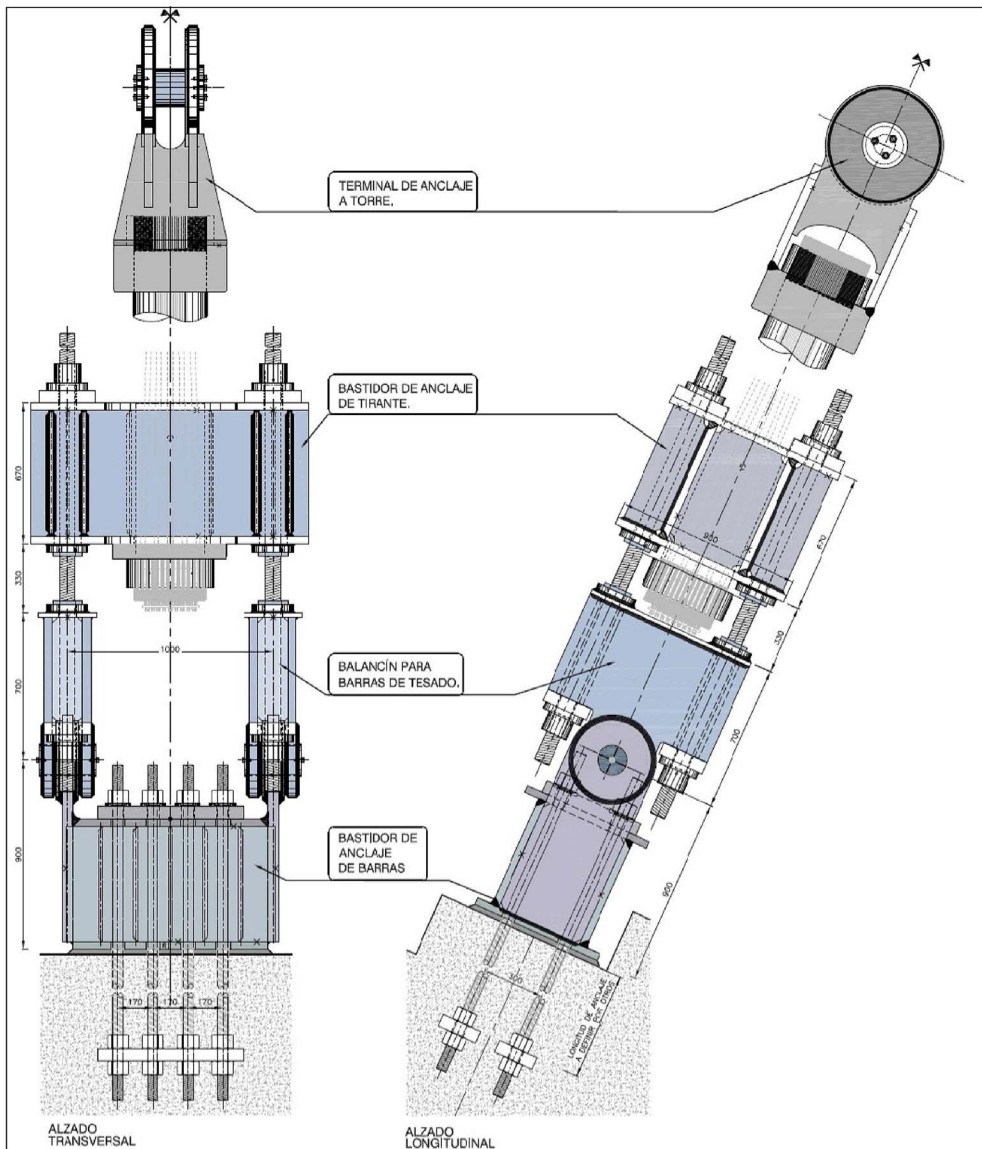


Figura 27. Estructuras auxiliares de tesado de cables.

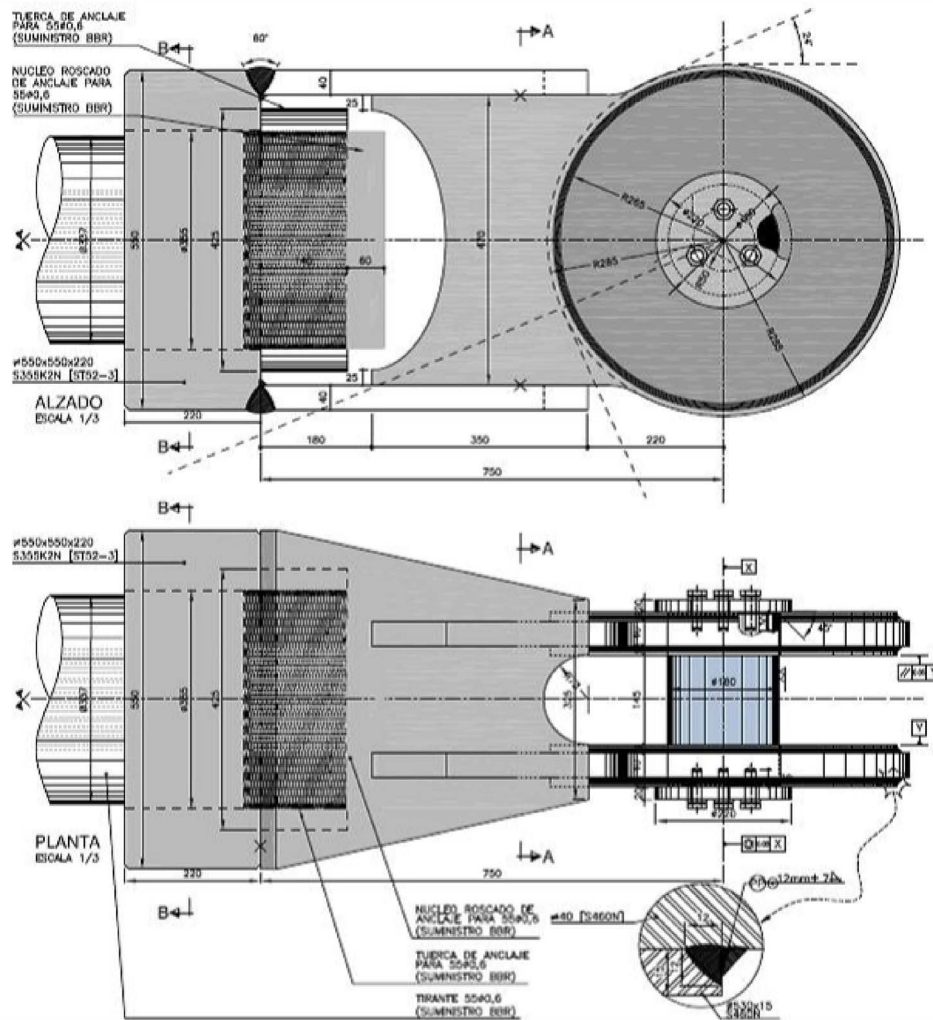


Figura 28. Terminal de anclaje de cables a torre.

En todos estos elementos se ha prestado especial atención en el cuidado de los detalles de soldadura, definiendo las preparaciones de borde a ejecutar, cordones de toma de raíz, etc.; también se ha definido para estas piezas la clase de ejecución EXC4 según EN-1090-2:2008 más tolerancias funcionales clase 2.

En la [figura 27](#) se indican las estructuras auxiliares para el montaje de los cables.

### 6.1 Terminales de anclajes de cables a torre

Se han modificado los diseños de los terminales de anclaje a la torre de los cables para adaptarlos a la tipología y tamaño de los cables utilizados.

En algunas zonas se ha dividido el número de cables a la mitad debido a que en proyecto algunos tirantes de retenida eran dobles y tras el recálculo se ajustaron a tirantes simples en cada pata de la torre. Esto ha obligado a disponer terminales más grandes que los previstos en el diseño de proyecto.

Como se puede observar en los detalles de la [figura 28](#), los nuevos terminales que se han diseñado están formados por chapas soldadas entre sí evitando piezas especiales de acero moldeado. Las nuevas piezas generadas son más grandes que las de proyecto ya que el cambio en la tipología de la torre ha

permitido reducir el número de familias de cables reemplazándolos por menos elementos pero más potentes.

Se ha decidido aumentar la calidad del acero de las orejetas para no tener espesores de chapa excesivos que reduzcan en exceso el límite elástico de la chapa. Además, con espesores más normales se consigue unas soldaduras más limpias y con mayor calidad en la ejecución.

Por otra parte, se ha recogido toda la tipología de cables en dos únicos modelos de terminal reduciendo así también el número de elementos distintos.

#### 6.1.1 Cálculos de la orejeta del terminal.

Con objeto de obtener un cálculo más afinado del terminal se realizó un modelo de elementos finitos en ANSYS de dicha pieza. Este modelo está constituido por elementos sólidos tridimensionales. El material es no lineal con capacidad de plastificación.

Como se puede observar en la [figura 29](#), el modelo representa media pieza. Este modelo tiene una longitud de unión de 300 mm entre el alma de S460 y las alas de S355. Con estas dimensiones el modelo de ordenador de media pieza es capaz de resistir 4 800 KN alcanzándose las tensiones que se ven en la [figura 29](#). En total, la pieza completa tiene una capacidad de resistencia de hasta 9 600 KN.

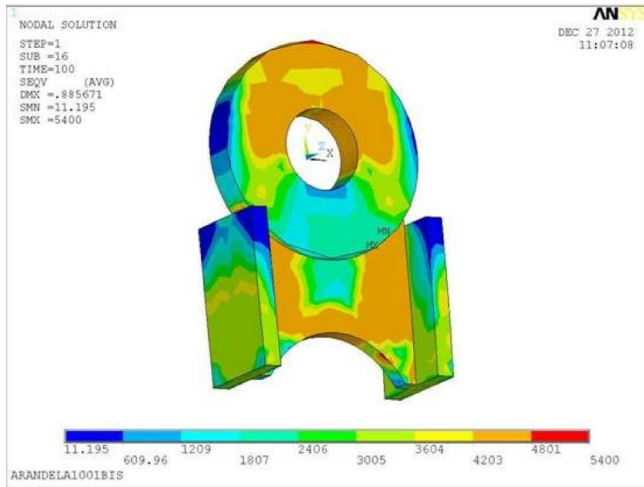


Figura 29. Orejeta del terminal.350mm.Modelo ANSYS.

Para homogeneizar los coeficientes de seguridad, de modo que todas las partes de la pieza tengan un nivel de tensiones análogo, se ha decidido aumentar la longitud de unión entre el alma de S460 y las alas de S355 a 350 mm, zona que en principio tenía tensiones claramente superiores a las del resto de la pieza. Con este cambio se ha adaptado el modelo a esta geometría obteniéndose las siguientes tensiones para una carga de 6 000 KN para media pieza:

En total, la pieza completa resistiría 12000 KN. Es decir, un aumento de un 17% en la longitud de unión entre el alma de S460 y las alas de S355 (de 300mm a 350mm) implica un aumento de la resistencia de la pieza del 25% (de 9 600 KN a 12 000 KN). Esto confirma que la sección de rotura es la unión entre el alma de S460 y las alas de S355 (debido a las tensiones tangenciales que se localizan en esta zona), ya que, manteniendo todos los demás elementos constantes (diámetro y espesores de arandelas y resto de chapas), solo con aumentar esta longitud mejora la capacidad resistente de la pieza.

### 6.2 Orejetas de anclajes de cables en torre

Al no coincidir los planos verticales donde se sitúan los cables con el plano del alma de los cordones de la torre, las orejetas no pueden formar parte de la chapa del alma y, por tanto, deben soldarse por fuera a las alas del cordón, motivo por el cual se han impuesto en esta zona características estrictas tanto al material como a las soldaduras como se ha indicado en el apartado 3.2.

Por otra parte, al no estar todos los cables en el mismo plano, el ángulo que se da a las orejetas debe variar para cada cable, lo que supone que cada orejeta tenga un ángulo diferente. Sin embargo, para facilitar la fabricación, se hicieron grupos de orejetas con ángulos parecidos dándole al conjunto un ángulo medio, de modo que la diferencia con el ángulo real de cada cable no superara el valor de  $\pm 0.3^\circ$ , incluyendo los posibles errores de fabricación y/o montaje; de este modo en la soldadura entre dos grupos de orejetas se produce una pequeña desalineación que se absorbe en el espesor de la chapa ( $\neq 60$ , S460). (figura 30).

Se consideró también un giro adicional de  $\pm 0.3^\circ$  correspondiente al viento, diseñando las orejetas con una fuerza trasver-

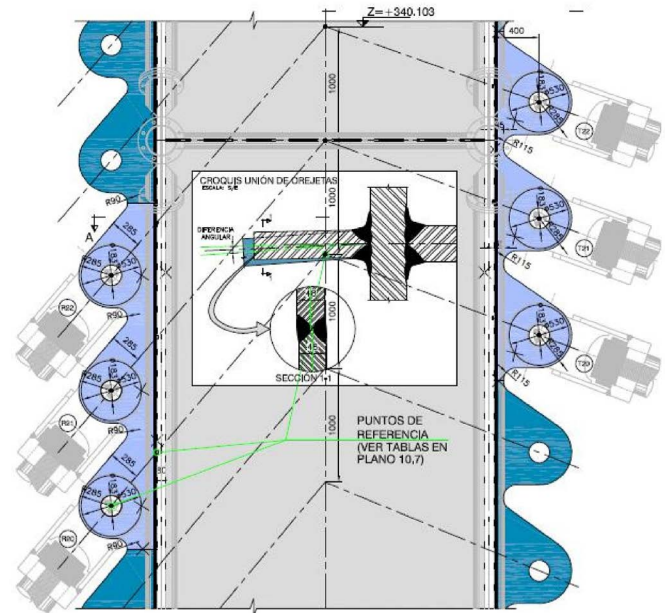


Figura 30. Orejetas de anclaje de cables en Torre.

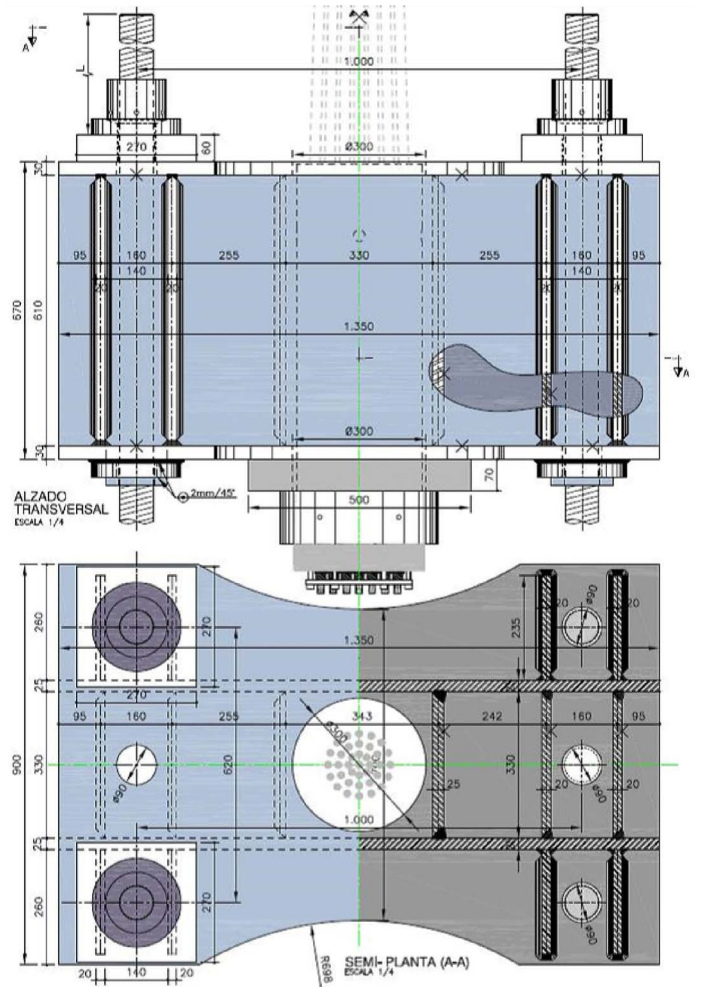


Figura 31. Bastidor de anclaje de tirantes Tipo A.

sal correspondiente a un giro total de  $\pm 0.6^\circ$  igual que para el resto de los elementos auxiliares.

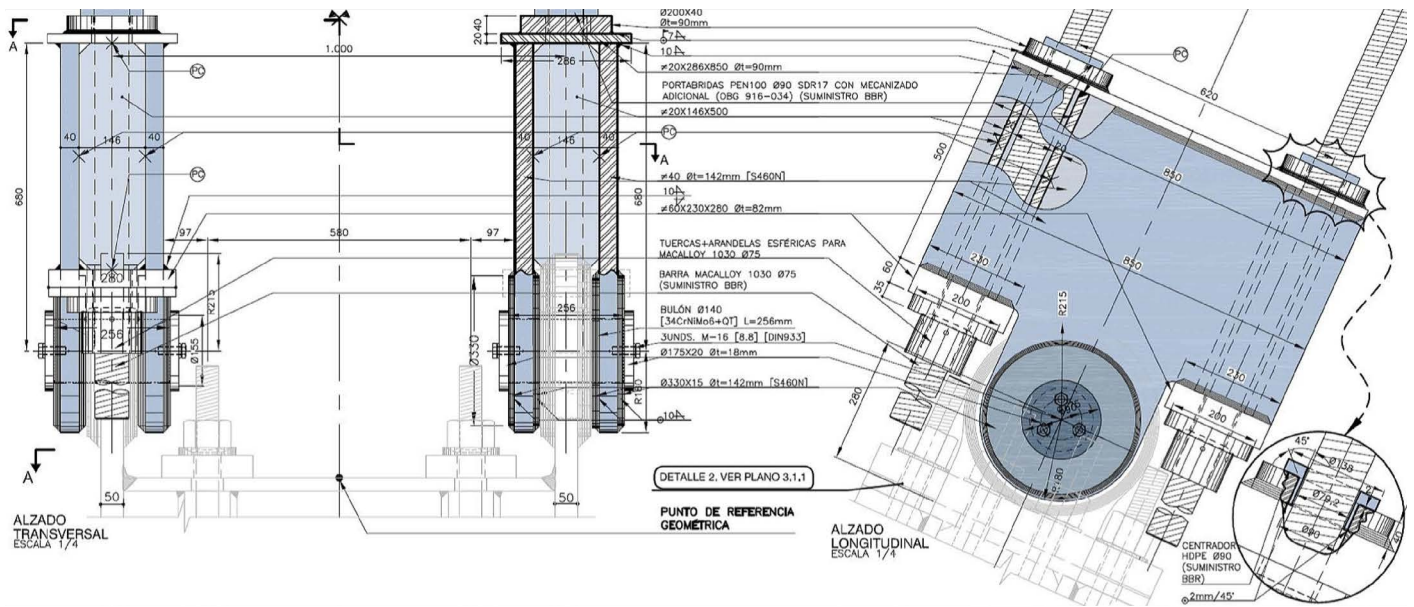


Figura 32. Balancín para cuatro barras de tesado.

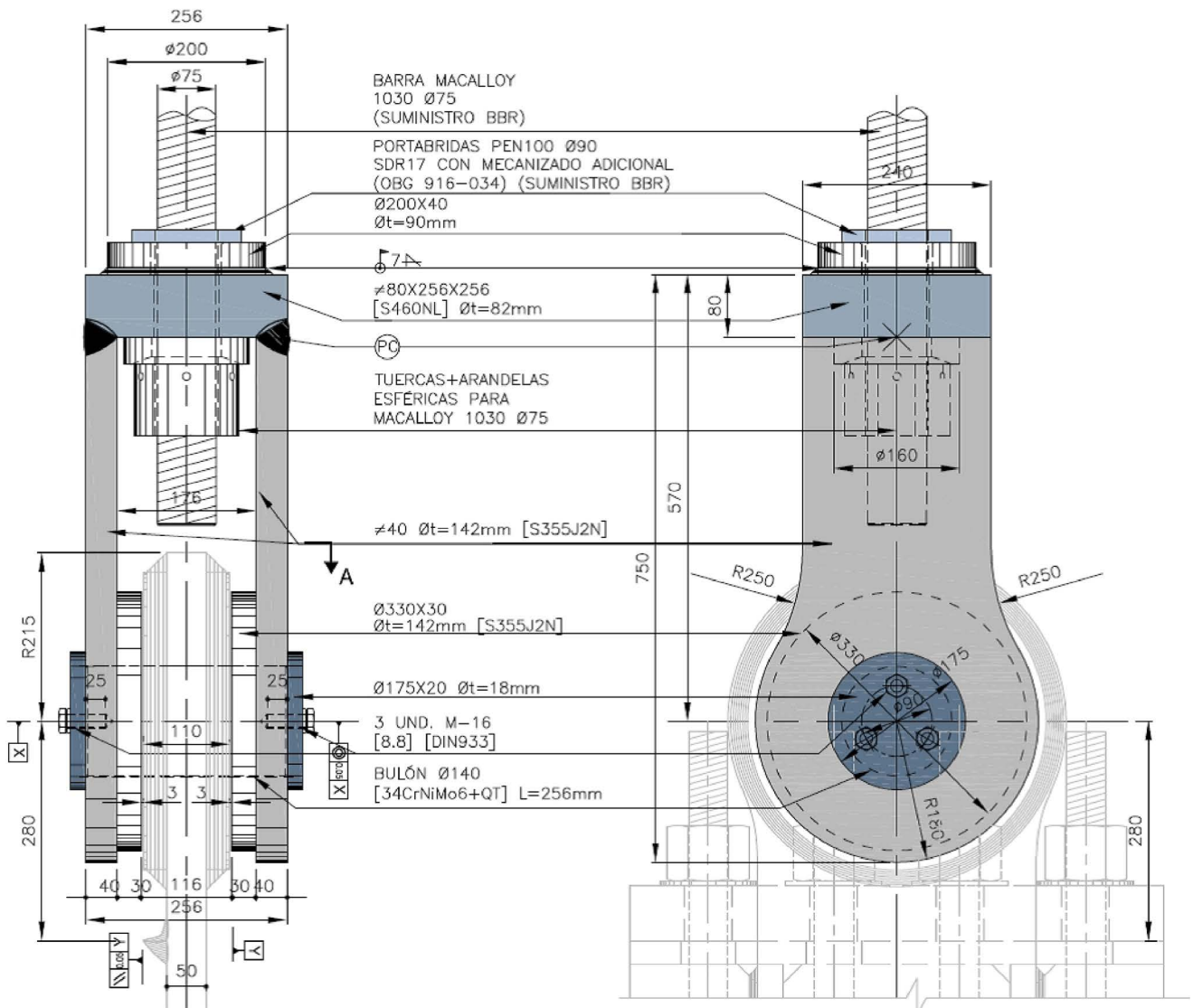


Figura 33. Balancín para dos barras de tesado.

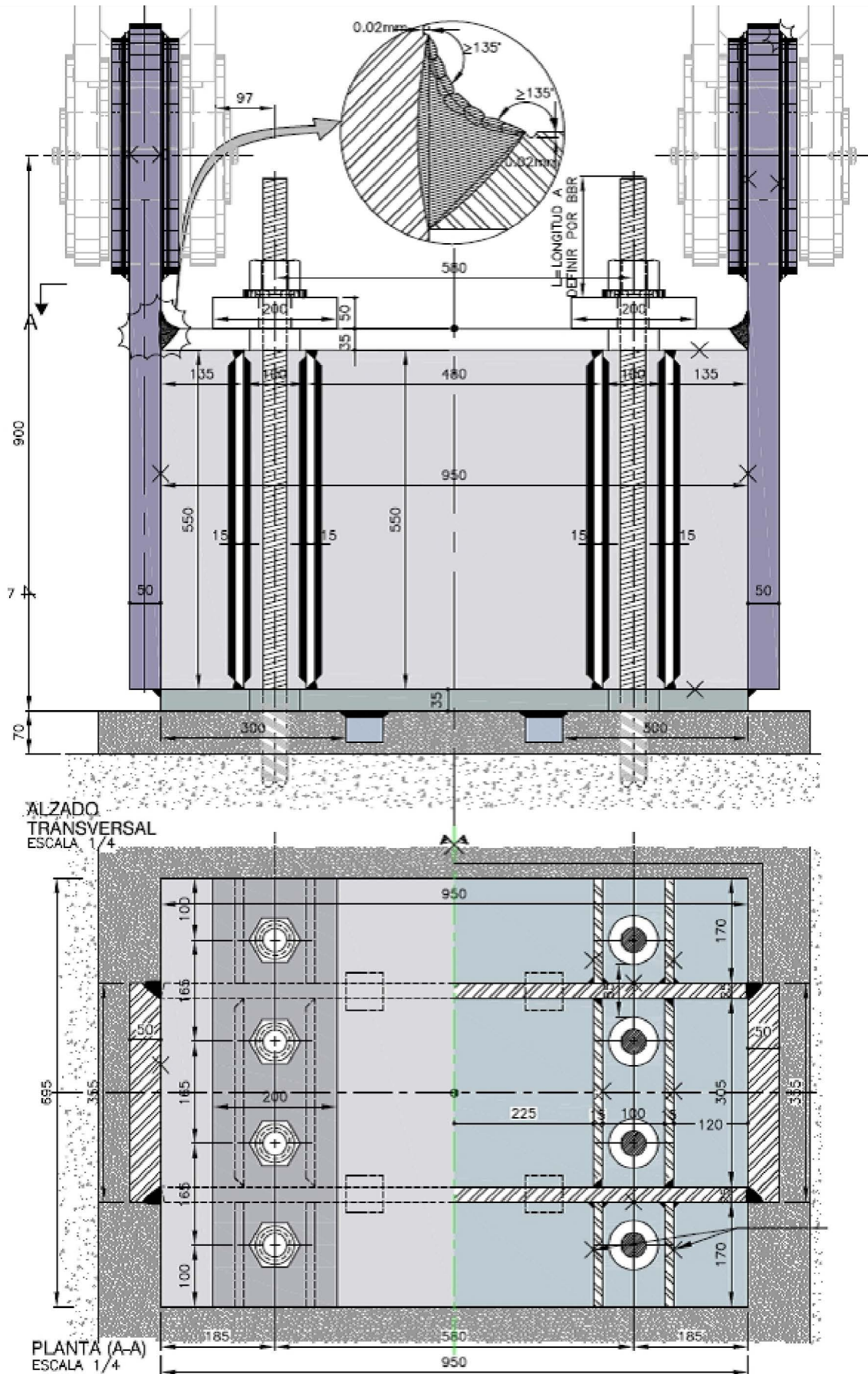


Figura 34. Bastidor tipo A. Cables de Tiro (Arco).



### 6.3 Bastidor de anclaje de tirantes

En cuanto a los anclajes inferiores de tirantes, ocurre lo mismo que en las piezas superiores de anclaje a torre. En primer lugar, los esfuerzos han aumentado del orden de un 15% debido al recálculo del arco y en segundo lugar, se ha reducido su número ya que los cables de retenida ya no son dobles.

Se ha rediseñado esta pieza con los nuevos esfuerzos existentes, definiendo todas las soldaduras y con un esquema que permita la correcta transmisión de esfuerzos. También se han definido las clases de ejecución de dichas piezas.

Dado que se ha reducido el número de familias de tirantes concentrándolos en tirantes más grandes, se ha debido aumentar el número de barras de tesado. Para poder optimizar el uso de estas piezas, han sido diseñadas para poder trabajar en casos de 4 barras de tesado y en casos de 2 barras de tesado.

Se diseñaron tres tipos de bastidores con cuatro configuraciones diferentes, el sistema se basa en reutilizar los bastidores según se van retirando tirantes:

- Bastidor Tipo A, para cables de Tiro  $37\Phi 0.6$ ": En configuración de dos o cuatro barras. (figura 31)
- Bastidor Tipo B, para cables de Retenida  $37\Phi 0.6$ ": En configuración de cuatro barras.
- Bastidor Tipo B, para cables de Retenida  $55\Phi 0.6$ ": En configuración de cuatro barras.

### 6.4 Barras de tesado y balancines

Para el tesado de los tirantes se utilizan unas barras auxiliares  $\Phi 75$  Macalloy 1030, que conectan el bastidor de anclaje al hormigón con el bastidor de anclaje de los cables. Las barras de tesado se articulan en el plano vertical mediante la disposición de balancines simples (para 2 barras) o dobles (para 4 barras) que llevan las cargas a un único bulón. Transversalmente, el diseño se realiza suponiendo una oscilación de  $\pm 0.60^\circ$ , que proviene de las tolerancias de posicionamiento ( $\pm 0.30^\circ$ ) y del viento transversal ( $\pm 0.30^\circ$ ).

Para limitar el espesor de las chapas ha sido necesario emplear acero S460 en las chapas que sirven de orejetas.

### 6.5 Bastidor de anclaje al hormigón

Se han definido dos tipos de anclaje en función de si el anclaje es a la zapata (retenida) o se trata de un anclaje al arco (tiro). En cada caso se ha adaptado la topología de la pieza a la geometría del hormigón de cada zona.

Para limitar el espesor de las chapas ha sido necesario emplear acero S460 en las chapas que sirven de orejetas. También se han definido las clases de ejecución de dichas piezas. En estas piezas es de especial importancia señalar el tratamiento post-soldadura que se ha realizado a las soldaduras más sensibles a posibles problemas de fatiga (soldaduras con categorías de detalle muy bajo).

En el diseño de estos elementos también se ha tenido en cuenta la fuerza transversal correspondiente a un giro de  $\pm 0.60^\circ$  debido al viento ( $\pm 0.30^\circ$ ) y los errores de posicionamiento ( $\pm 0.60^\circ$ ). El esfuerzo cortante que se produce debido a esta fuerza se transmite por fricción a nivel del hormigón ya que las barras de anclaje están tesadas; no obstante, para mayor seguridad, se incorporaron pequeñas llaves de cortante como se observa en la figura 34.

Se diseñaron tres tipos de bastidores también reutilizables con cuatro configuraciones diferentes:

- Bastidor Tipo A, para cables de tiro: 8 barras Macalloy-1030  $\Phi 40$ .
- Bastidor Tipo AA, para cables de tiro: 8 barras Macalloy-1030  $\Phi 40$ .
- Bastidor Tipo B, para cables de retenida: 8 barras Macalloy-1030  $\Phi 40$  y  $\Phi 50$ .

### Referencias

- [1] "Design manual of Stability of Steel structures". Comité 8. ECCS. 1976.
- [2] "Fatigue life Enhancement by high frequency peening. Dillinger Colloquium constructional steelwork. 2009.