

# Izado de torres provisionales de atirantamiento del viaducto de Almonte

## *Lifting of the provisional staying towers of the Almonte Viaduct*

José Marínez Salcedo<sup>a</sup>, Santiago del Río Rodríguez<sup>a</sup>

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

Recibido el 19 de enero de 2018; aceptado el 30 de julio de 2018

### RESUMEN

Para el izado de las torres provisionales de atirantamiento del viaducto de Almonte se ha utilizado un mecanismo de 4 barras más conocido como biela-deslizadera mediante el cual únicamente con la disposición de dos gatos de *heavy lifting* que accionan el mecanismo se pudo pasar de la torre en posición horizontal sobre el tablero a la torre en posición vertical sobre la pila. El fundamento de este mecanismo es conocido desde la antigüedad y básicamente consiste en una deslizadera que mediante una acción exterior va desplazándose por un carril y a la que se une una biela biarticulada en sus dos extremos que es la que hace elevarse a la torre a la que está conectada.

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

PALABRAS CLAVE: Izado torre provisional, mecanismo de 4 barras, biela-deslizadera, biela biarticulada, deslizadera desplazándose sobre carril, rótulas, torre en posición horizontal sobre tablero, 2 gatos de *heavy lifting*.

### ABSTRACT

For the lifting of the provisional staying towers of the Almonte Viaduct, a 4-bar mechanism has been used, more commonly known as a slider-crank mechanism. It allows, with the arrangement of two heavy lifting jacks which activate the mechanism, to move the tower from an horizontal position on the deck to vertical position above the pier. The basis of this mechanism is known since antiquity and basically consists of a slipper that by means of an external action is moving on a rail and to which is attached a biarticulated rod at its two ends. This rod rotates and makes the tower rise to the vertical position.

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

KEYWORDS: Lifting provisional tower, 4 bar mechanism, slider-crank mechanism, biarticulated rod, slipper moving on a rail, bearings, tower in horizontal position on the deck, 2 heavy lifting strand jacks.

## 1. INTRODUCCIÓN

El izado de las torres de atirantamiento constituyó por sí mismo un proyecto muy interesante. Cada torre de 54.0 m de altura y con un peso de 5 000KN, ha de montarse sobre el tablero en correspondencia con cada pila extrema del arco a una altura del orden de 70.0 m sobre el suelo.

Como suele suceder en estas situaciones no se planteó una única solución desde el principio. Analizaremos en primer lu-

gar las opciones planteadas por diferentes empresas para el taller responsable de la fabricación y montaje.

A continuación se describirá el proceso que lleva al sistema propuesto por el Servicio de Obras Especiales de FCC, empezando por los antecedentes históricos y continuando con el análisis del mecanismo de cuatro barras subyacente.

Finalmente describiremos los elementos más significativos del sistema y terminaremos con una descripción del procedimiento de izado.

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

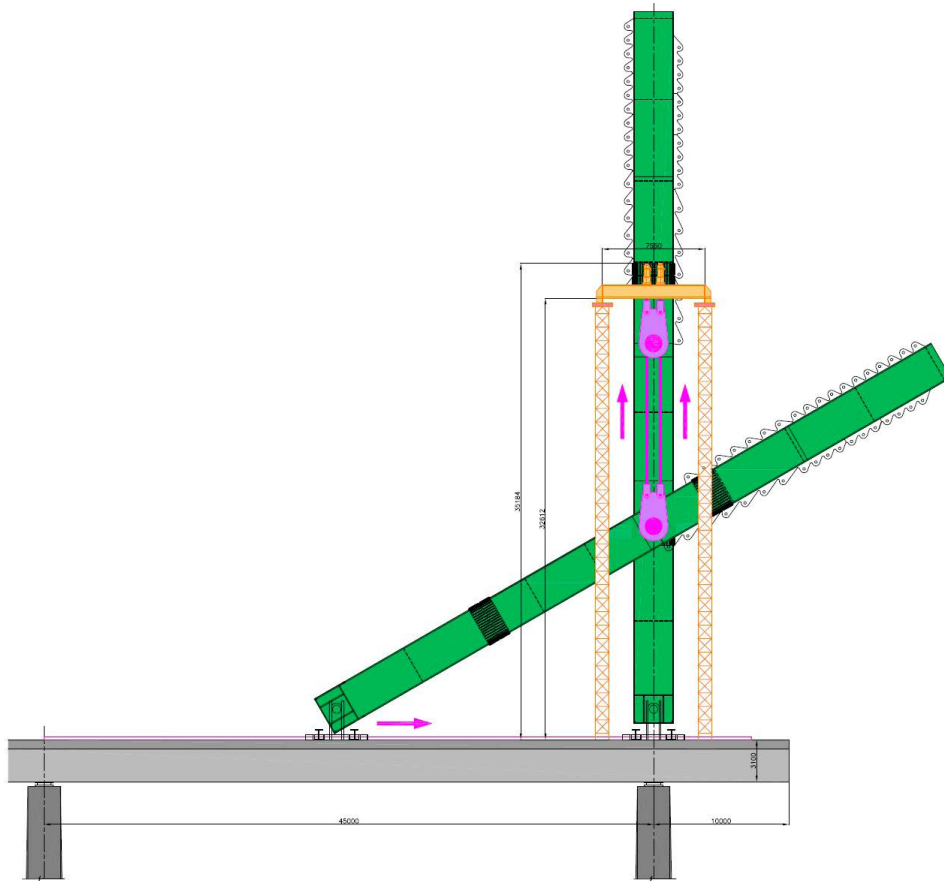


Figura 1. Proceso de montaje alternativa 2.

## 2. PROPUESTAS PREVIAS DEL TALLER

### 2.1 Montaje mediante grúas colocadas sobre el tablero

Para el montaje mediante grúas pronto se descartó el montaje de la torre completa, bien por el tamaño de los medios involucrados si se intenta desde el terreno o por la capacidad del propio tablero si se hace desde el mismo, tan solo se manejó la posibilidad de montaje por dovelas desde una grúa dispuesta sobre el tablero. Lógicamente para evitar el efectuar uniones soldadas de chapas de 80 mm en S460 en obra y en altura las uniones serían atornilladas.

Dada la importancia de los esfuerzos (cada lateral de la torre tiene una sección de 3840 cm<sup>2</sup>, con un axil de 140000kN se requieren 2 x 182 tornillos M36 (10.9) en cada empalme) debe existir un compromiso entre número de dovelas y medio de elevación.

El problema de una solución como esta que pretende montar la torre directamente en posición vertical es que implica un gran plazo para su ejecución y la necesidad de tener medios de elevación importantes disponibles en el tablero durante todo el proceso.

### 2.2 Montaje torre completa mediante heavy lifting desde torres auxiliares dispuestas sobre el tablero

Se trata de un procedimiento muy utilizado en el montaje de chimeneas en la industria petroquímica. Permite el montaje

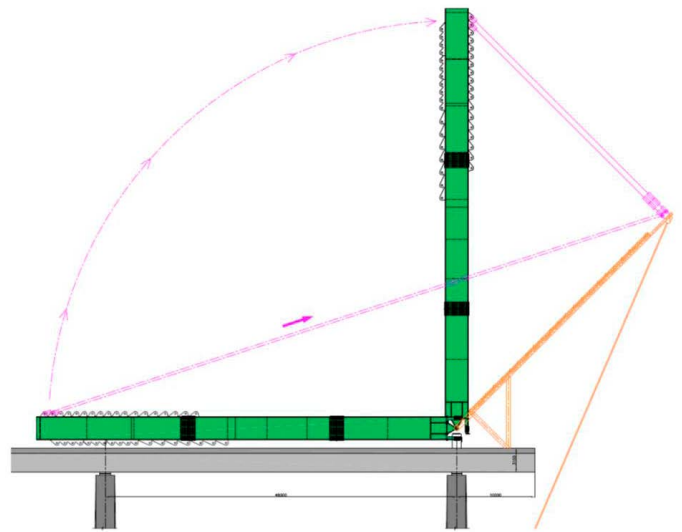


Figura 2. Proceso de montaje alternativa 3.

previo de la torre en posición horizontal utilizando medios de elevación mucho más pequeños para ello. Esto facilita mucho al taller el montaje de la torre al ser en posición horizontal. Una vez montada la torre horizontalmente es cuando se usan las torres provisionales para el izado definitivo. El principal problema radica en la ubicación de las torres en el borde del tablero, y la capacidad del mismo.

### 2.3 Montaje torre completa mediante giro tirando desde mástil auxiliar

Se realiza el montaje de la torre mediante giro, tirando desde un mástil auxiliar.

Al igual que en el caso anterior, la torre se monta horizontalmente primero sobre el tablero mediante medios auxiliares pequeños.

Esta solución tiene la pega de que la estructura provisional queda muy por delante de la torre por lo que tanto su montaje inicial como su desmontaje una vez acabada la operación resultan muy complicados.

Por otra parte, los gatos hidráulicos de *heavy lifting* que permiten el izado se sitúan en altura por lo que complica más la operación. También la longitud de cable necesaria para esta solución es muy superior a la de la solución finalmente adoptada.

## 3. PREDISEÑO DE LA SOLUCIÓN

A continuación vamos a describir sucintamente el proceso seguido para el prediseño de la torre propuesta. Como se va a ver a continuación, la solución prevista permitirá montar la torre en posición horizontal facilitando el trabajo al taller y resolverá las principales pegas que tenían las propuestas anteriores en lo que al sistema de izado se refiere.

### 3.1 Antecedentes lejanos

Cualquier referencia al volteo de piezas pesadas debe empezar por tratar el problema no resuelto de los obeliscos.

Son varias las teorías sobre cómo se extraían y levantaban estos elementos monolíticos con pesos que llegaron a alcanzar las 8 000 KN (el obelisco frustrado de Aswan del entorno del 1500 BC pesa 11 700 KN) sin que exista una conclusión definitiva pues no entendieron necesario documentarlo.

Sin entrar en estas especulaciones, sí podemos recordar cómo se montaron ya en épocas más recientes los del Vaticano o el de París de 3 600 KN y 2 800 KN respectivamente.

El de París que estaba en Luxor, en su ubicación original, se levantó en la Plaza de la Concordia en 1836 utilizando la disposición adjunta que se basa en un mástil auxiliar y poleas.

El obelisco del Vaticano mucho más pesado estaba en el circo de Nerón y fue trasladado a la Plaza de S. Pedro y levantado en 1536 por Domenico La Fontana, en una operación que combina izado desde torre con apuntalamiento deslizante desde abajo una vez se ha alcanzado una cierta altura. Vemos pues ya el mecanismo biela deslizadera. Para su izado se utilizaron 800 hombres y de 70 a 140 caballos.

### 3.2 Mecanismo de cuatro barras biela-deslizadera

El mecanismo básico con un grado de libertad, es el mecanismo de cuatro barras con cuatro nudos articulados, una variante elemental y muy frecuente del mismo es el mecanismo biela-deslizadera. Este sistema no transmite cargas horizontales a sus apoyos, que por lo tanto están sometidos únicamente a reacciones verticales.

OBELISK.	BASE (feet).	PYRAMIDION BASE (feet).	PYRAMIDION HEIGHT (feet).	TOTAL HEIGHT (feet).	TAPER (see foot-note 2).	WEIGHT IN TONS.
Aswan .. ..	13·8	8·2	14·8	137	24·3	1,168
Aswan (later project) .. ..	10·3	6·6	17·4	105	23·7	507
Lateran <sup>1</sup> .. ..	9·8	6·2*	14·8*	105·6	29·3	455
Hatshepsōwet .. ..	7·9	5·8	9·7	97	42·8	323
Vatican .. ..	8·8	5·9	4·4	83	26·9	331
Luxor .. ..	8·2	5·1*	6·4*	82*	28·2	254
Paris .. ..	8·0	5·1	6·4	74	26·5	227
New York <sup>1</sup> .. ..	7·7	5·3*	5·4*	69·6	29·0	193
London <sup>1</sup> .. ..	7·8	5·3*	5·4*	68·5	27·4	187
Mataria <sup>1</sup> .. ..	6·2	4·0*	6·6*	67	27·5	121
Tuthmōsis I .. ..	7·0	4·6	7·8	64	24·2	143

Figura 3. Tabla mayores obeliscos [1].



Figura 4. Montaje obelisco de París (1836) [1].

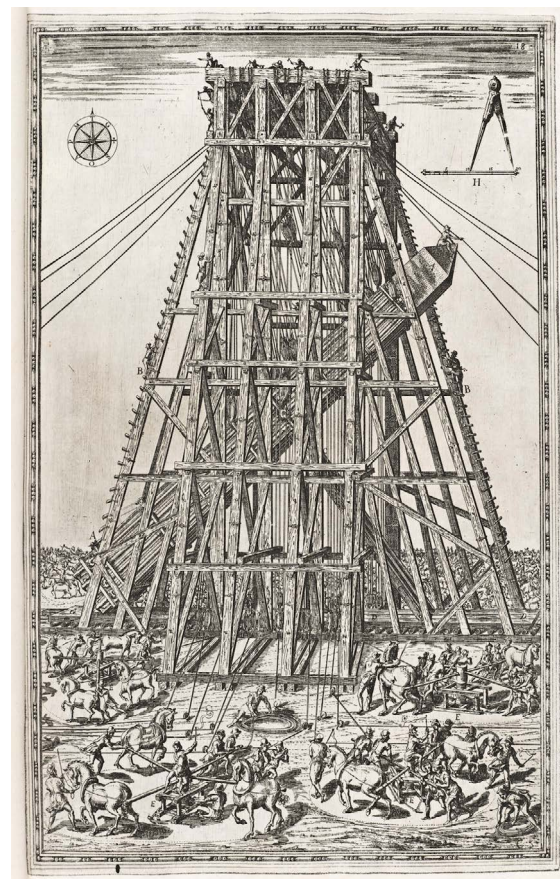


Figura 5. Montaje obelisco del Vaticano (1536) [1].

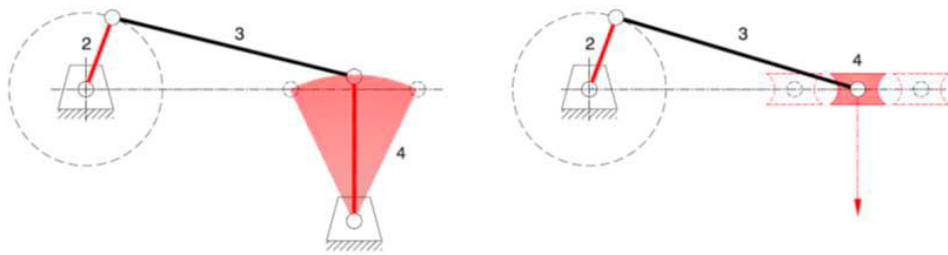


Figura 6. Mecanismo de cuatro barras.

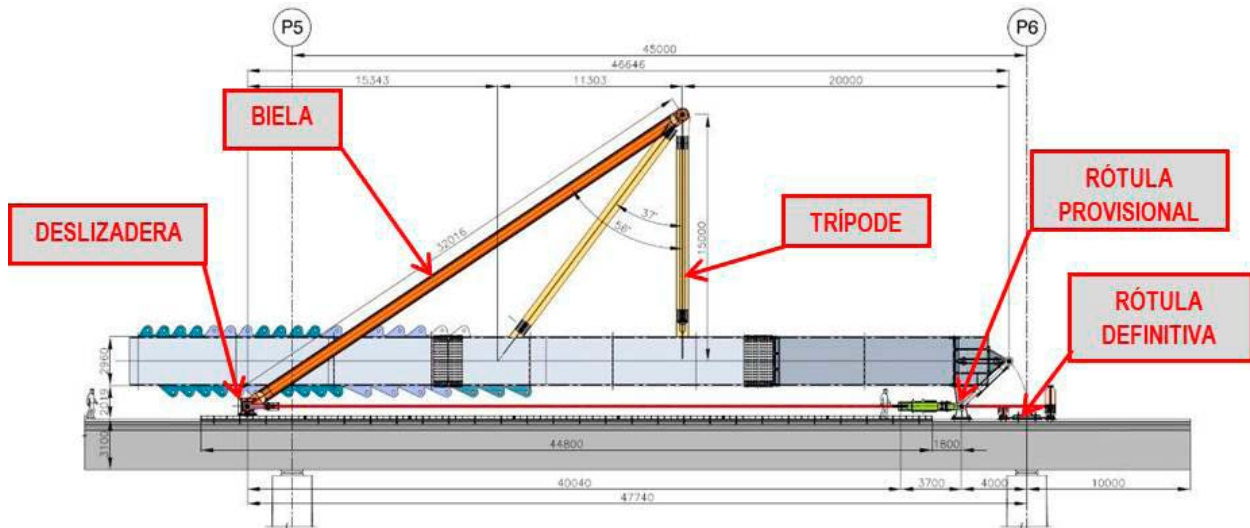


Figura 7. Mecanismo de cuatro barras.

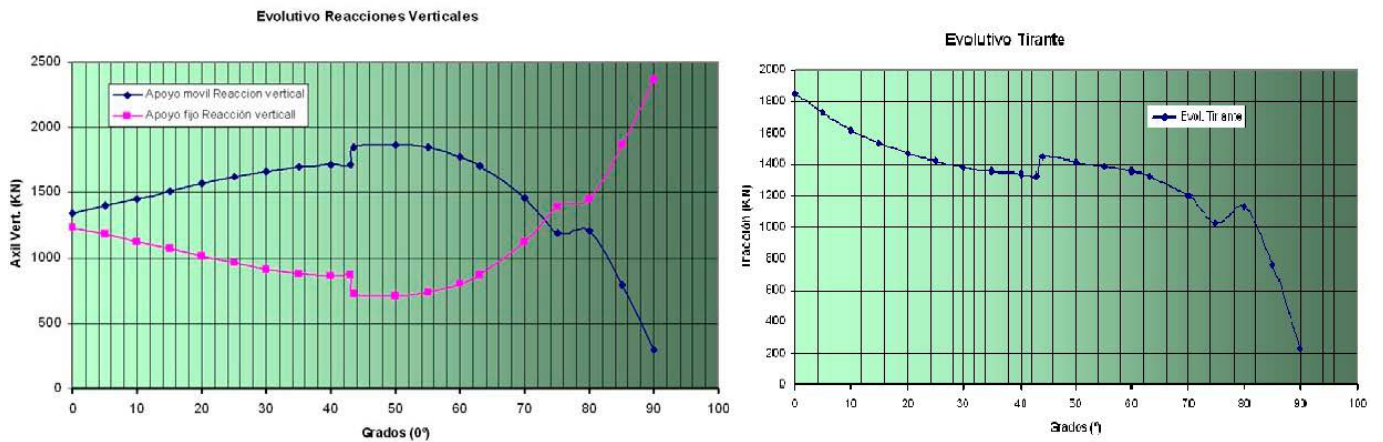


Figura 8. Gráficos esfuerzos distintos elementos.

El mecanismo biela-deslizadera no puede emplearse desde el principio si el punto de acción de la biela no se dispone por encima de la torre, pues de otro modo el ángulo inicial es demasiado reducido y se incrementan los esfuerzos en exceso, por ello se dispone un elemento que se denominará trípode rigidamente unido a la torre que cumple la función de elevar el punto de acción.

El análisis de los esfuerzos en los elementos básicos a lo largo de todo el recorrido, (90° en nuestro caso) es sin duda el punto de partida para el estudio de los distintos componentes. En los siguientes gráficos se pueden ver tanto las variaciones de reacciones verticales en los apoyos como el axil en los tirantes a lo largo del proceso.

En una fase posterior, en las posiciones más características y utilizando un programa convencional de cálculo de estructuras se estudia la “estructura” fija bajo la acción de todas las cargas que se considere conveniente.

### 3.3 Bases de partida

En cuanto a las bases de partida para el cálculo de la operación, está claro que el dato principal es el peso total de la estructura y la posición de su centro de gravedad.

Gracias a los programas de modelación del taller y a diversas comprobaciones efectuadas en las piezas se consiguió

obtener un peso muy aproximado de la estructura completa. En este peso se incluía tanto las chapas metálicas, como las soldaduras y los tornillos. También se obtuvo muy fielmente la posición del centro de gravedad de cada uno de los elementos (necesario para el premontaje de la estructura sobre el tablero) y del conjunto de la estructura que es la que va a tener influencia en el cálculo.

Con estos datos se pudo comprobar y refinar los modelos de cálculo que se habían realizado. Además, como comprobación final, el día antes de la operación, se produjo una puesta en carga de todos los mecanismos despegando ligeramente la torre de sus apoyos. Los datos de las reacciones obtenidos en esta prueba confirmaron los valores de cálculo con lo que se autorizó la operación.

Como coeficientes de seguridad para el peso se empleó un valor de 1.35 acorde con la normativa europea. Para los cables de tiro se utilizó un coeficiente de seguridad de 2 frente a la carga de rotura.

La otra carga que más influencia tenía en la operación es el viento. Sin embargo, sobre esta carga sí que se podía actuar al poder elegir el momento de la operación. Se estableció una correspondencia entre las mediciones de viento de las estaciones más cercanas a la obra y los equipos de medición que se habían instalado sobre el tablero de tal modo que se pudiese conocer como evolucionaba la intensidad del viento y se pudiesen utilizar las previsiones de viento de las distintas estaciones para planificar la fecha de la operación.

La carga de viento se definió para una máxima velocidad de viento de 10 m/s a la altura del tablero. Esta carga se mayoró por 1.35 para poder tener cierta holgura en caso de aumento del viento durante la operación que en ningún caso podía tener una duración superior a 24 horas.

### 3.4 Implementación práctica del mecanismo

Para un correcto funcionamiento del mecanismo, es esencial la correcta materialización de las articulaciones y la deslizadera: se han utilizado rótulas radiales libres de mantenimiento y carriles metálicos de deslizamiento con almohadillas de neopreno-teflón lubricadas con silicona.

El accionamiento del mecanismo se realiza mediante dos equipos de *heavy lifting* que conectan la deslizadera con la articulación, de modo que las únicas reacciones externas son cargas verticales en la propia articulación y en el carril de deslizamiento. Las pequeñas reacciones horizontales debidas al rozamiento de los elementos de la deslizadera se han tratado de minimizar con el uso de lubricantes y son directamente transmitidas al tablero mediante anclajes de los carriles.

Por otra parte, y como se ha indicado en el artículo sobre la torre, el taller efectúa el montaje atornillado de los tramos de la misma sobre el tablero en posición horizontal, por lo que inicialmente no podemos utilizar la rótula definitiva como punto de giro.

En las fases iniciales hasta que se alcanzan los 43° el giro ha de producirse en torno a una articulación auxiliar, posteriormente se realiza una transferencia de esta rótula auxiliar a la rótula definitiva y se completa el giro en torno a ella.

Como evidentemente no todos los elementos pueden estar en el mismo plano, surge la necesidad de elementos transversales con rigidez que trasladen las cargas entre los planos en

los que se disponen los distintos elementos: vigas transversal superior e inferior.

En las fases finales del giro, se hace necesaria la disposición de un sistema de retenida, y en la posición final es preciso la disposición de un sistema de bloqueo de la articulación que permita el montaje de los primeros tirantes de retenida aún sin tirantes en el vano principal.

Surgen pues de modo natural las funciones de los distintos componentes a desarrollar, todo a partir de un sistema sencillo de mecanismo de cuatro barras.

## 4. DEFINICIÓN ELEMENTOS DEL IZADO

A continuación se detallan los principales elementos que formaron parte del mecanismo de elevación de la torre. Todos estos elementos se diseñaron con uniones atornilladas en sus extremos que facilitaban el montaje y desmontaje en obra así como su reutilización en las dos torres.

### 4.1 Biela + Deslizadera

Son los elementos más representativos de este tipo de mecanismo de cuatro barras y de que se consiga materializar correctamente su funcionamiento dependerá el éxito de la operación. Las dos funciones básicas que tienen que cumplir estos elementos son rotar y deslizarse.

Para garantizar el giro y asegurar que no se produce ningún esfuerzo secundario durante la operación, se han dispuesto en los extremos de estos elementos rótulas radiales libres de mantenimiento tipo GE200 UK-2RS. Estas rótulas proporcionan una articulación perfecta en las conexiones de las bielas con el resto de elementos.

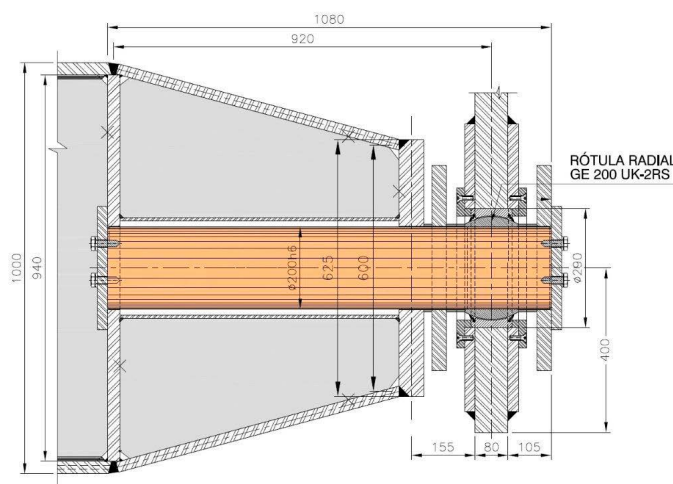
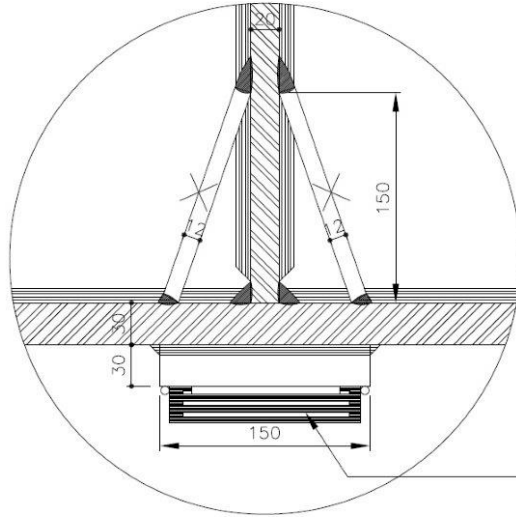


Figura 9. Detalle rótula GE200 UK-2RS.

En cuanto al movimiento de la deslizadera se ha dispuesto una almohadilla de neopreno-teflón de 25 mm de espesor bajo cada alma y se utilizará grasa de silicona para facilitar el deslizamiento por el carril. El objeto es minimizar las fuerzas



**ALMOHADILLA NEOPRENO  
TEFLÓN e=25mm**

1x3mm. NEOPRENO  
3x3mm. ACERO  
2x5mm. NEOPRENO  
1x3mm. NEOPRENO

Figura 10. Detalle almohadilla neopreno-teflón.



Figura 11. Detalle carril amolado y rueda de guiado de deslizadera.

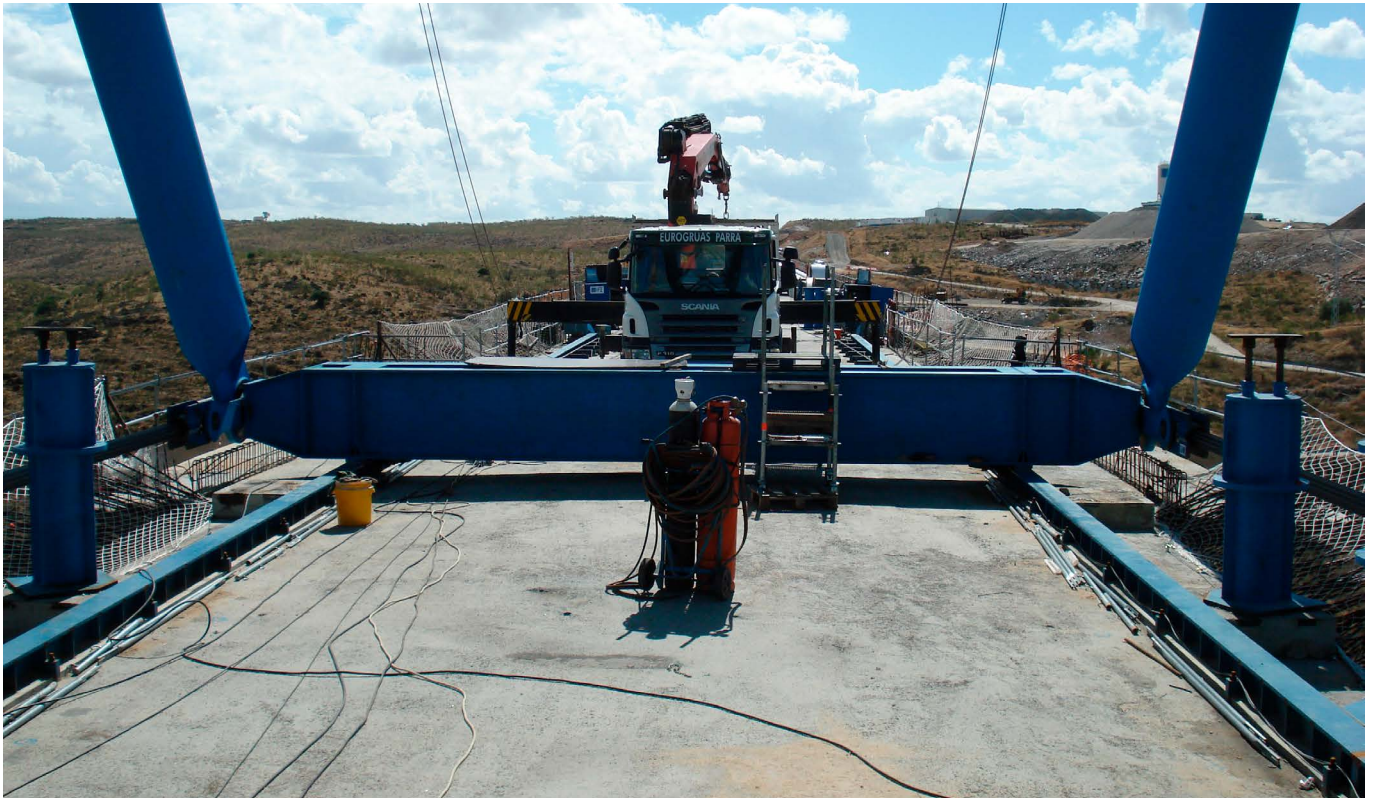


Figura 12. Detalle de deslizadera.



Figura 13. Detalle de biela.

de rozamiento horizontales y que en este punto únicamente se produzcan reacciones verticales.

A su vez tanto la cara superior del alma del carril como las caras laterales están amoladas para evitar cualquier enganche con la almohadilla o con la rueda de guiado horizontal.

En cuanto a los elementos propiamente dichos, la deslizadera está compuesta por una pareja de vigas en I separadas 800 mm unidas entre sí por presillas cada 2 500 mm y que confluyen en sus extremos en las rótulas que conectan con las bielas y los cables de tiro. Las vigas carril están formadas por perfiles HEM200 anclados al tablero cada 1 600 mm. Para asegurar el correcto guiado de la deslizadera sobre el carril se han dispuesto rodillos guías fijados a la deslizadera y que ruedan contra el canto de las alas de las vigas carril.

Por su parte, la biela es un elemento tubular que une el punto de acción de la fuerza con la deslizadera. Desde el punto de vista estructural es el elemento más sencillo ya que únicamente se trata de un tubo de  $\text{Ø}800 \times 15$  y 32 m de longitud articulado en sus dos extremos mediante las rótulas que hemos mencionado anteriormente y que conecta la deslizadera con el trípode anclado a la torre. En la biela se dispuso una unión atornillada intermedia con chapas de testa para facilitar su transporte y montaje.

#### 4.2 Trípode

Está formado por una estructura en forma de triángulo. Es una estructura rigidamente unida a la torre y su objeto es elevar el punto de acción de la biela para reducir los esfuerzos que se



Figura 14. Detalle de trípode.

producen. En este caso, con esta estructura se consigue elevar dicho punto 15 m con respecto al eje de la torre. Está formado por barras con sección en cruz y con uniones atornilladas en cada uno de sus extremos para facilitar el transporte y el montaje.

Todos estos elementos junto con sus conexiones fueron diseñados para poder ser desmontados y reutilizados en las dos torres de atirantamiento.

#### 4.3 Articulaciones y elementos de bloqueo

Sobre estos puntos se fija y gira el resto del mecanismo. Dado que por facilidad de montaje, la torre se monta en posición horizontal sobre el tablero no es posible realizar todo el giro directamente sobre una única rótula. Por este motivo debe disponerse una rótula provisional intermedia para realizar esa primera parte del movimiento para posteriormente traspasar la carga a la rótula definitiva para terminar la operación.

**Rótula provisional:** Es la primera rótula a la que está conectado el mecanismo. Se encuentra situada a 4 m de la definitiva y realiza el movimiento desde los  $0^\circ$  iniciales hasta los  $43^\circ$ . Esta rótula está formada por un bulón de 200 mm de diámetro y 1.5 m de longitud de material 36CrNiMo16+QT en el que se disponen casquillos de deslizamiento de 5 mm de espesor y 75 mm de ancho cada uno para facilitar el movimiento. Está fijada al tablero mediante 6 barras  $\text{Ø}32$  de alta resistencia.

**Rótula definitiva:** Este elemento forma parte del esquema estructural de la torre en su fase definitiva por lo que ya ha sido descrita en el artículo anterior. Sin embargo, también tiene un papel fundamental durante la fase de izado ya que gracias a ella se puede realizar la segunda parte del giro hasta la posición vertical. Al contrario que con la rótula provisional, la definitiva no se fija al tablero hasta que no se comprueba al llegar a la fase de transferencia a los  $43^\circ$  que su posición es correcta, si no lo es, todavía hay una cierta holgura para realizar pequeños ajustes. Una vez asegurada su correcta posición se hormigona

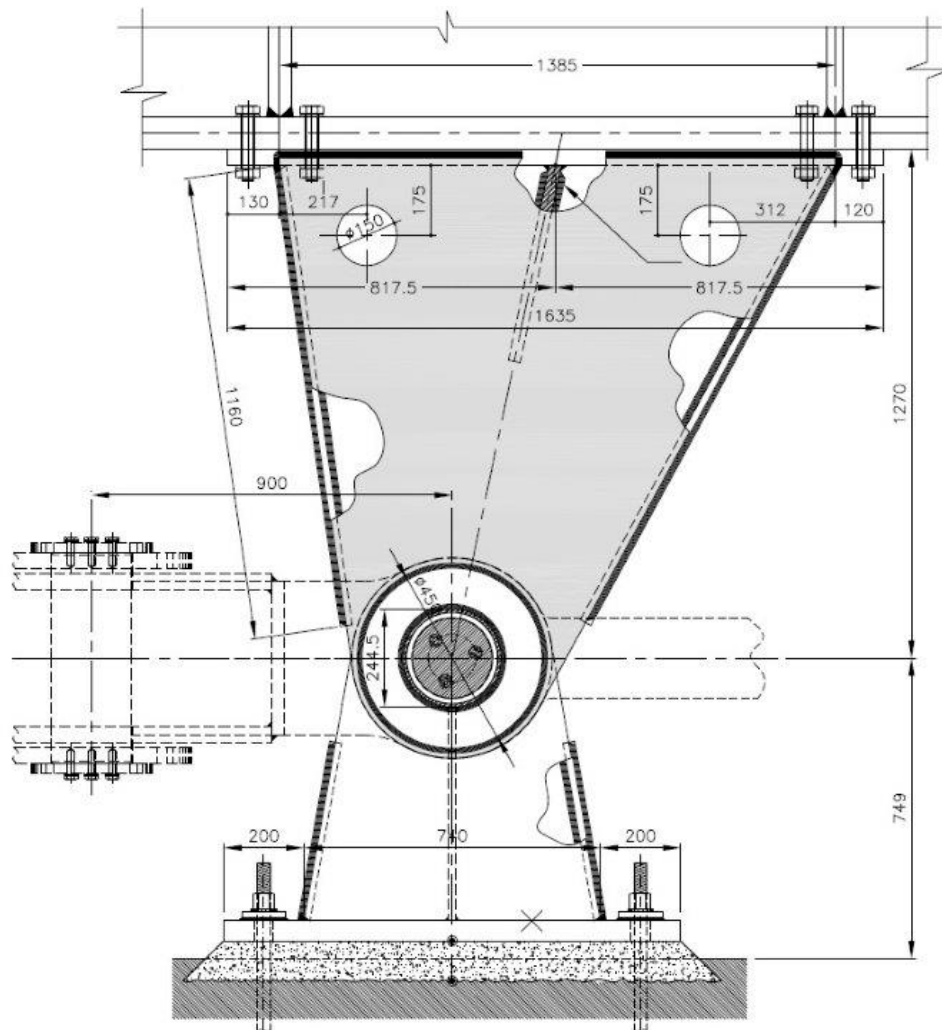


Figura 15. Detalle rótula provisional.

al tablero y queda fija a él mediante 8 barras  $\text{Ø}40$  de alta resistencia.

Las piezas que alojan al bulón son de acero S690 y su geometría se ha adaptado para permitir la conexión inicial con la torre en la posición inclinada  $43^\circ$ .

Al contrario que la rótula provisional, dado que la rótula definitiva es necesaria para la maniobra, pero también forma parte del esquema definitivo de la torre, en el que se va a someter a grandes tensiones teniendo que mantener su capacidad de giro, se ha aplicado a todas las superficies de contacto con el bulón, así como al propio bulón un lubricante sólido capaz de cumplir con estos requisitos durante todas las fases del funcionamiento.

**Los elementos de bloqueo:** Son necesarios al alcanzar la posición definitiva mientras se colocan los primeros cables de atirantamiento. Se trata de unos puntales en forma de cruz con uniones atornilladas en sus extremos que se colocan a ambos lados de la rótula bloqueando su giro temporalmente. Una vez dispuestos los primeros cables de atirantamiento, se retiran los tornillos y las chapas de calce, liberando la articulación. También serán necesarios para el desmontaje de la torre al tenerla que volver a bloquearla cuando se suelten los últimos cables.

Con su colocación se da por finalizada la maniobra de izado.



Figura 16. Detalle rótula provisional.



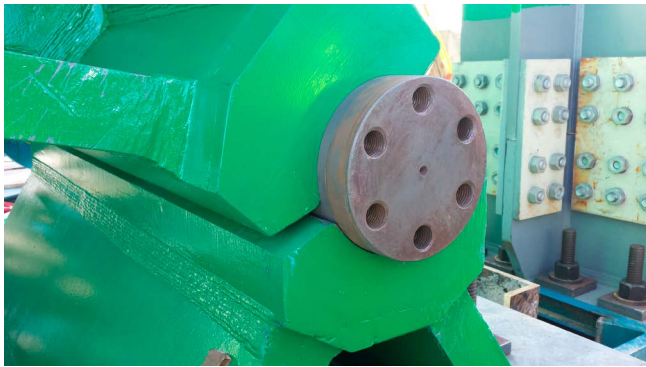


Figura 17. Detalle rótula definitiva.



Figura 18. Gatos de tiro HL 19Ø06.

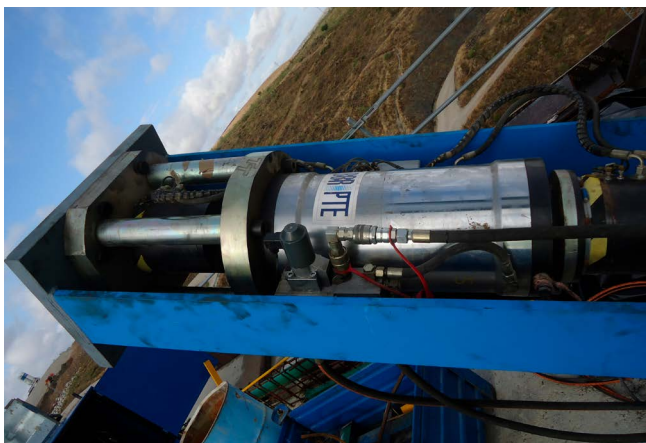


Figura 19. Gatos de retenida HL 7Ø06.

#### 4.4 Equipos hidráulicos de tiro y retenida

**Gatos de tiro:** El accionamiento de todo el sistema se realiza mediante dos gatos hidráulicos de *heavy lifting* H.L.1906 con una carga máxima de 2 300 kN y una carrera de 300 mm. El cable de tiro está formado por 19 torones de  $\text{Ø}0.6''$ . Los dos gatos están montados uno en cada alineación de la estructura y conectados hidráulicamente mediante una central que controla el movimiento simultaneo entre ellos. Este sistema de montaje permite que los gatos estén estáticos y dispuestos a la altura del tablero lo que facilita en gran medida su manipulación y control y por lo tanto la operativa de la maniobra.

**Gatos de retenida:** Durante las fases finales del movimiento es necesario asegurar el control sobre la estructura por lo que se disponen unos elementos capaces de retenerla. Este sistema se activa cuando el ángulo de la torre con la horizontal supera los  $80^\circ$ . Está formado por dos gatos hidráulicos de *heavy lifting* H.L. 706 con una carga máxima de 850 kN y una carrera de 400 mm, anclados a tablero y torre que proporcionan un tiro constante de 150 kN cada uno durante esta última fase del proceso. Esto garantiza una carga mínima constante en todos los elementos durante esta última fase. Una vez colocados los elementos de bloqueo de la articulación definitiva, se desconectan estos elementos de retenida

#### 4.5 Vigas transversales superior e inferior

Debido a que no es posible que todos los elementos estén dispuestos en el mismo plano es necesario contar con elementos transversales que unan los dos planos en los que se ha separado el mecanismo y que aseguren un reparto equitativo entre ambos planos.

**Viga transversal superior:** es la que une los dos planos que forman los trípodes y las bielas a la altura del punto de acción de la biela. Se trata de un tubo de  $\text{Ø}800 \times 25$  y de 10 m de longitud que alberga las rótulas y contra el que se unen los distintos elementos del mecanismo. Está situado 15 m por encima del eje de la torre.

**Cercha transversal inferior:** es la encargada de unir los dos planos de la deslizadera hasta llegar a las rótulas. Está compuesta por perfiles abiertos de 500 mm de canto. Es la encargada de acomodar los distintos anchos entre los planos de

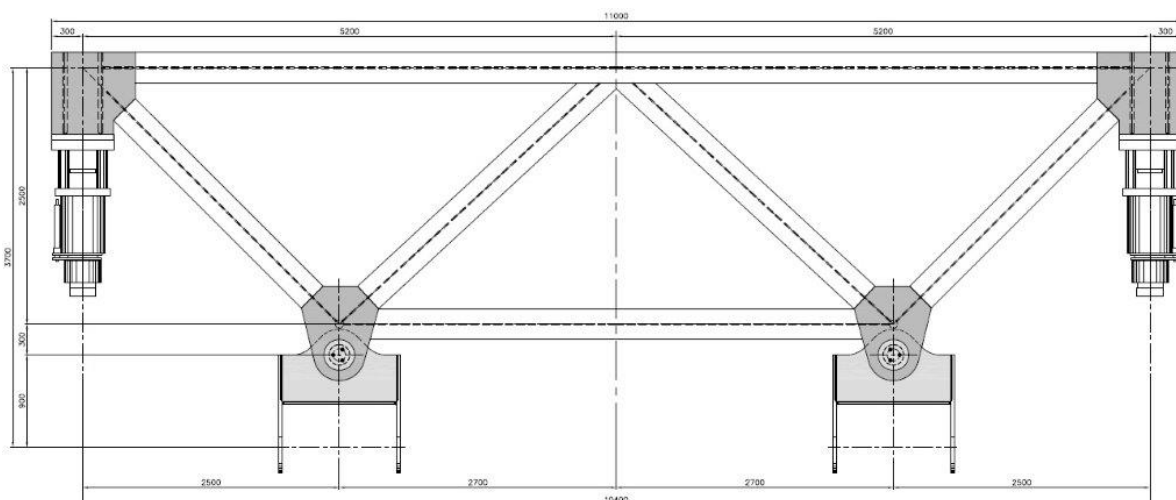


Figura 20. Detalle cercha transversal inferior.

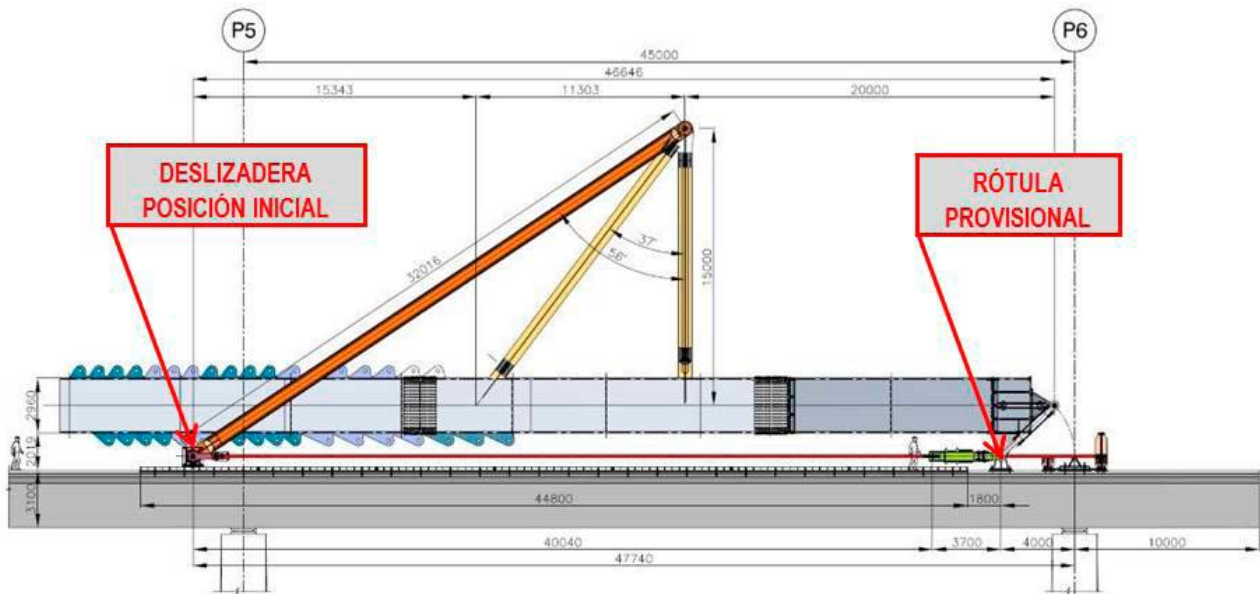


Figura 21. Detalle torre en posición horizontal preparada para el inicio de la operación.

las deslizaderas (10.4 m) y los anchos que están separadas las rótulas provisionales (5.4 m). Sirven también como soporte de los gatos de tiro.

## 5. DESCRIPCIÓN PROCEDIMIENTO

### 5.1 Montaje de torre en posición horizontal

Durante esta primera fase, el taller monta la torre en posición horizontal sobre el tablero uniendo los diferentes módulos mediante uniones atornilladas. Esto permite al taller realizar un montaje mucho más sencillo de la torre, simplemente los camiones de transporte llegan hasta la zona de la torre donde las piezas son directamente conectadas unas con otras. La torre queda a su cota provisional de despegue apoyada en unas torres de apeo provisionales. Debido al canto de la torre y a que se monta en posición horizontal, no es posible comenzar la operación utilizando la rótula definitiva, por este motivo se diseñó una rótula provisional a 4 m de la definitiva para poder realizar la primera parte de la operación.

### 5.2 Primera fase de izado: de 0° a 43°

Esta primera parte del izado se realiza girando sobre la rótula provisional. Los gatos actúan sobre los cables que van desplazando la deslizadera hacia la rótula provisional acortando la longitud de los cables de tiro. De esta manera se consigue que la torre gire desde los 0° hasta los 43° punto en el que la rótula definitiva ya estaría en posición de empezar a funcionar. Durante esta primera fase los cables de retenida están conectados a la torre pero no están tesados.

#### *Transferencia de rótula provisional a rótula definitiva*

Al alcanzar la torre el ángulo de 43° respecto a la horizontal, la parte de la rótula definitiva que va unida a la torre llega a



Figura 22. Fotografía torre en posición horizontal preparada para el inicio de la operación.

tocar con la parte de la rótula definitiva unida al tablero. En ese momento es cuando hay que transferir la carga de la rótula provisional a la rótula definitiva. Para este proceso se utiliza un prolongador activo formado por unas barras de alta resistencia conectadas tanto a la rótula provisional como a la definitiva. Es sin duda la etapa más complicada de todo el proceso.

Se divide en las siguientes etapas:

Etapa 1: el principal objetivo de esta etapa es ajustar la posición de la rótula definitiva para garantizar un contacto perfecto entre la parte de la rótula que está esperando sobre el tablero y la parte de la rótula que viene con la torre.

- Al alcanzar la posición de transferencia se detiene el izado.
- La articulación definitiva se ajusta mediante cuñas al bulón de la torre.
- Se ajusta la unión de las barras horizontales (prolongador activo) que sirven de unión entre la rótula definitiva y la deslizadera y se realiza un primer tesado en ellas.
- Tras verificar la geometría, se rellena de *grout* de alta resistencia la base de la rótula definitiva y la de las piezas de bloqueo.

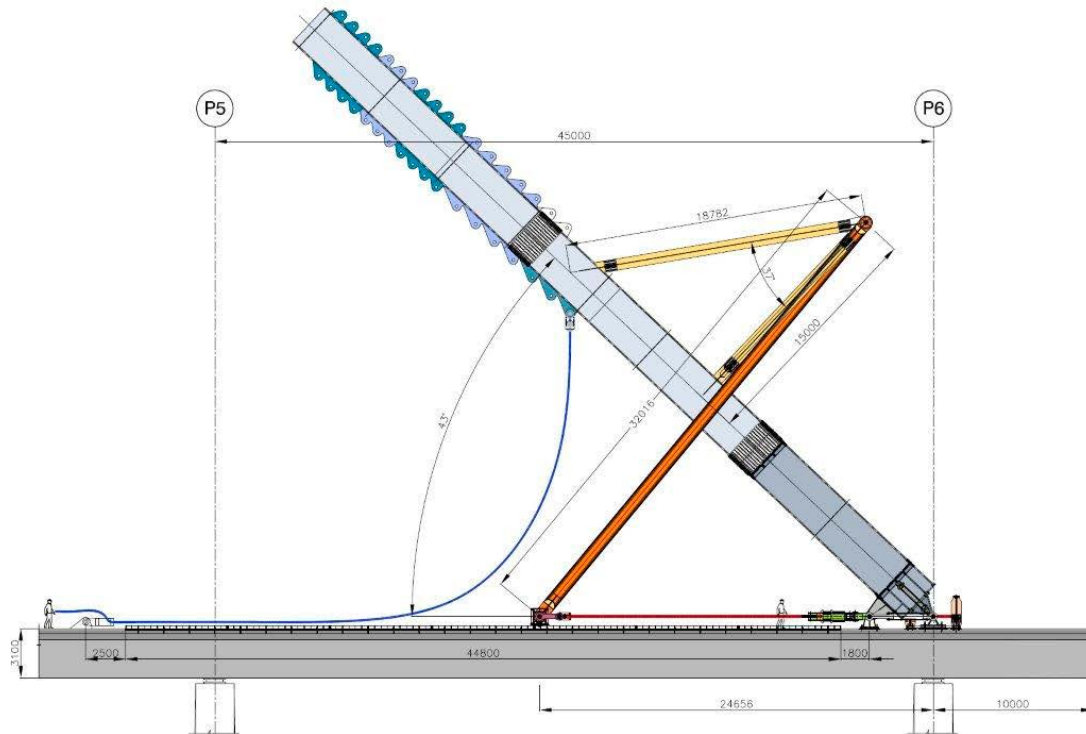


Figura 23. Detalle torre en transición 0-43°.



Figura 24. Fotografía torre en transición 0-43°.

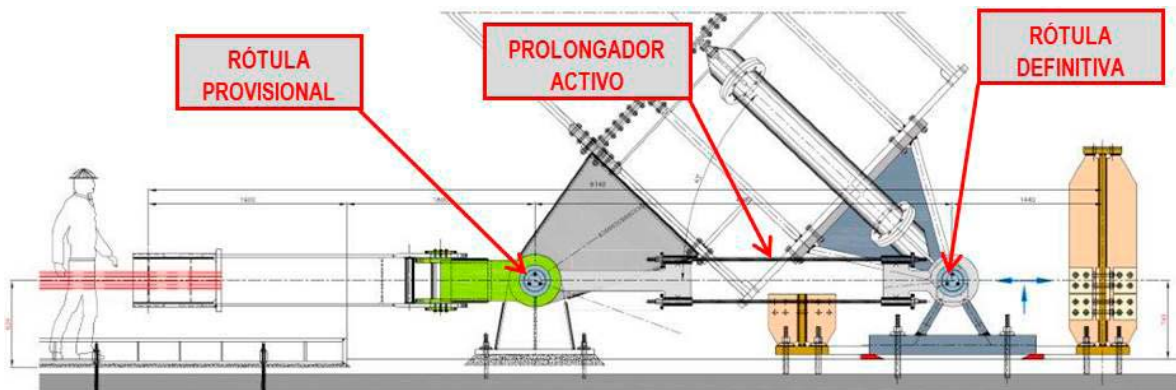


Figura 25. Esquema etapa 1.

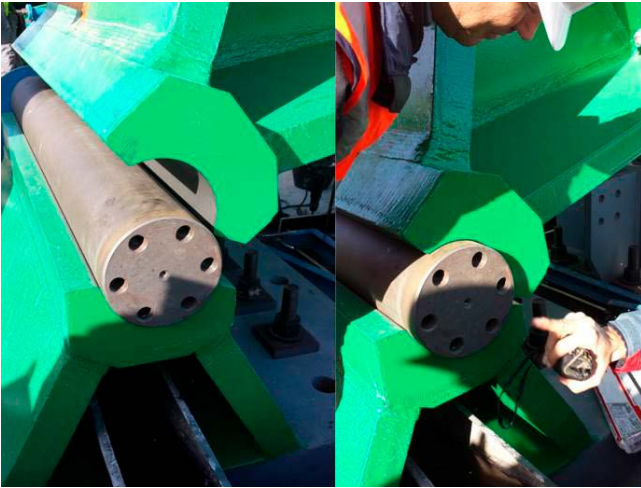


Figura 26. Detalle llegada de rótula definitiva.

Etapa 2: en esta fase el objetivo es transferir la carga de la rótula provisional a la rótula definitiva. Esto se consigue mediante lo que se ha denominado “prolongador activo” que mediante el tesado de unas barras de alta resistencia que conectan la rótula provisional con la definitiva, prolongan el tiro de los gatos desde la rótula provisional donde estaban anclados ahora hasta la rótula definitiva. Al ir tesando dichas barras, la carga va a ir pasando desde una rótula a la otra. Al alcanzar la carga que tienen los cables de tiro, se prosigue ligeramente con el tiro de los cables hasta que se consigue descargar completamente la rótula provisional.

- Se realiza un segundo tesado de las barras (prolongador activo) que unen la rótula definitiva con la deslizadera.
- Se liberan las tuercas de la placa de anclaje al tablero de la rótula provisional para asegurar que la carga horizontal no se transmita al tablero.
- Se incrementa el tesado de los cables de izado hasta descargar la rótula provisional.

Etapa 3: Al traspasar la carga a la rótula definitiva en la fase anterior, ahora ya se pueden retirar fácilmente los tornillos que unen la rótula provisional a la torre (esto confirma que se ha traspasado la carga completamente) y se está en disposición de proseguir con el izado.

- Se liberan los tornillos de la rótula provisional con la torre.
- Se prosigue el izado.

### 5.3 Segunda fase de izado: de 43° a 80° y activación sistema de retenida

Una vez en funcionamiento la rótula definitiva, se prosigue con el izado desde los 43° hasta los 80°. Esta fase no tiene ninguna variación con respecto a la primera de 0° a 43° actuando del mismo modo sobre los gatos de *heavy lifting* que van reduciendo la distancia entre la deslizadera y la rótula definitiva disminuyendo la longitud de los cables de tesado. Al alcanzar esos 80° es cuando tienen que empezar a trabajar los elementos de la retenida. Se trata de dos cables que mediante dos gatos se mantendrán a una carga constante de 150 kN cada uno. De este modo se puede controlar la fase final de izado.

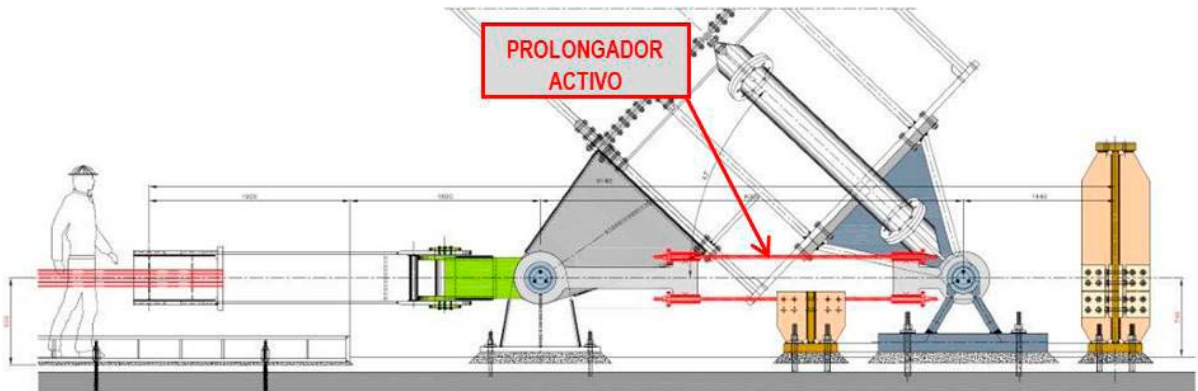


Figura 27. Esquema etapa 2.



Figura 28. Sistema transferencia de carga.



Figura 29. Separación rótula provisional.



Figura 30. Vista torre en transferencia de carga.



Figura 31. Detalle torre en transición 43-80°.

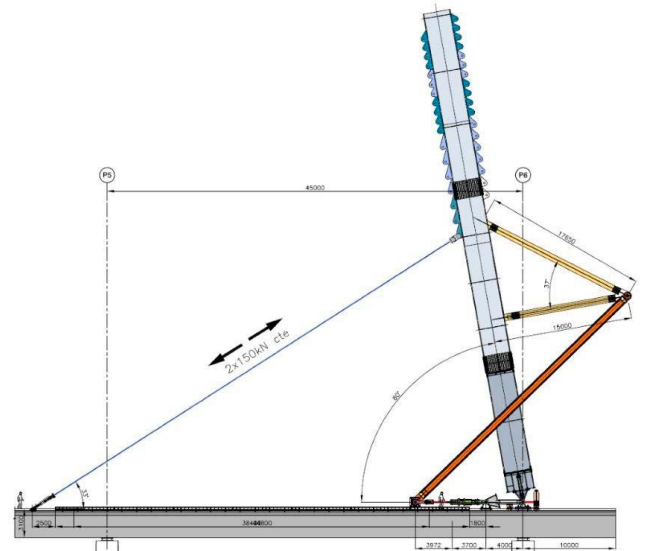


Figura 32. Esquema torre en transición 43-80°.

#### 5.4 Última fase de izado: de 80° a 90° y colocación de bloqueo provisional

Se prosigue con el tiro de los gatos que va acercando la deslizadera a las rótulas hasta llegar a los 90°. Ya se ha dispuesto en este momento el bloqueo de la rótula que está del lado del centro de vano. Al llegar a este punto el ala de la torre se apoya en dicho bloqueo sobre la chapa de testa que servirá para unir el bloqueo a la torre y de este modo se fijan ambas partes mediante una unión atornillada. Posteriormente se coloca el bloqueo de la otra ala que hasta este momento no se podía introducir, fijándolo también con una unión atornillada. Con esta operación se da por terminado el izado de la torre.

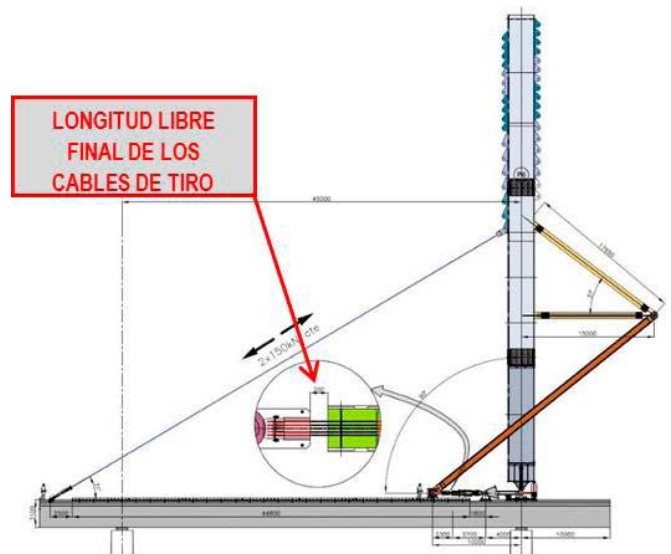


Figura 33. Detalle torre en posición vertical.

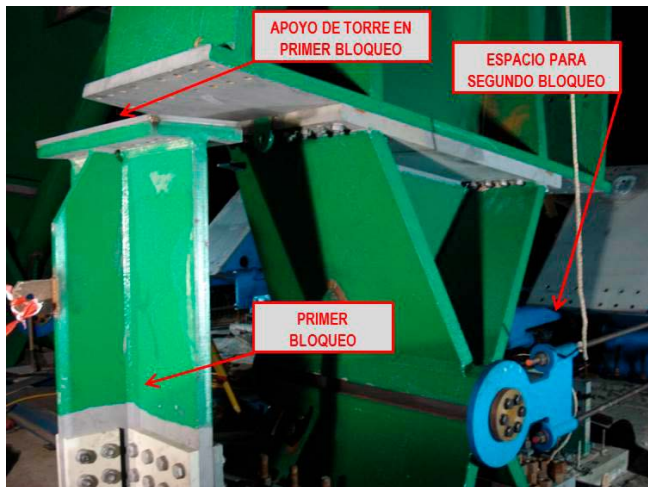


Figura 34. Detalle llegada torre a posición de bloqueo.



Figura 35. Torre en posición vertical.

Al finalizar la operación, la longitud libre de los cables de tiro habrá quedado en 200 mm desde los 39 m iniciales.

Una vez colocados los primeros tirantes y tesados se podrán retirar los bloqueos provisionales gracias a las uniones atornilladas y a la disposición de chapas de calce que se retiran para facilitar el desmontaje de estos bloqueos.

Todas las estructuras auxiliares se desmontan para volver a ser utilizadas en el izado de la segunda torre.

### Referencias

- [1] R.ENGELBACH. "The problem of the obelisk". T.Fisher Unwin Limited. 1923.