

III CONGRESO DE ACHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

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



Realizaciones



NUEVA TORRE DE CONTROL DEL AEROPUERTO DE BARCELONA

Antonio **CARRASCO**¹, José R. **COUSO**², Cesar **SARDANS**³

¹ ITOP. Ferrovial-Agroman

² ICCP. Ferrovial-Agroman

³ ICCP. Ferrovial-Agroman

RESUMEN

La nueva torre de control del aeropuerto de Barcelona constituye un magnífico ejemplo de adecuación entre la arquitectura, la estructura y el proceso de ejecución, en el que la estructura configura la expresión arquitectónica de la torre al mismo tiempo que la interacción entre sus dos sistemas estructurales principales permite el proceso de ejecución sin utilización de estructuras auxiliares provisionales.

PALABRAS CLAVE

Prefabricación, pretensado, dovelas, hiperboloide, izado.

1. LA GÉNESIS DEL PROYECTO

El proyecto de la torre ha venido fuertemente influenciado por su ubicación. La situación de la torre en un solar cuadrado de 80x80 metros ubicado entre la pista actual y la nueva y junto al futuro edificio satélite del aeropuerto de Barcelona condicionan tanto su altura, definida por los ángulos de visibilidad de las cabeceras de pista, como la adopción de un volumen de revolución, condicionada por la necesidad de garantizar una visibilidad de 360 grados, al estar situada entre las dos pistas.

Para responder a estas necesidades se adoptó la planta octogonal para el fanal y la estructura del fuste de la torre y se estableció la altura del fanal a 60 metros sobre la rasante, lo que corresponde a la cota 65,00 sobre el nivel del mar. La forma octogonal se adecua a la necesidad de una visibilidad de 360 grados al tiempo que evita, en las plantas donde se ubican los equipos de control, los reflejos producidos en las formas circulares. Por este mismo motivo los vidrios del fanal se inclinan 15 grados respecto de la vertical.

Para el edificio base en el que se alojan las actividades que no se desarrollan en altura, la forma octogonal se transforma en circular, creándose un edificio formado por dos anillos concéntricos con eje en el de la torre. El anillo interior constituye el vestíbulo, en doble altura, de acceso a la torre y se comunica desde la entreplanta mediante pasarelas acristaladas con el anillo exterior. Este último se desarrolla en una planta inferior de aparcamiento y una superior que

contiene los espacios de apoyo a la torre: oficinas, área de descanso y sala de equipos.

Una vez elegido el hiperboloide como volumen de revolución y el octógono como forma de la planta del fanal, la estructura portante de la torre se desarrolló mediante dieciséis generatrices del hiperboloide que se cruzan espacialmente, a distintas alturas, en ocho nudos situados en planos horizontales, constituyendo los ocho nudos del plano superior los apoyos de la estructura del fanal y las plantas técnicas.



En un principio se planteo la ejecución de las generatrices mediante perfiles tubulares de acero, pero por motivos de mantenimiento y dada su proximidad al mar se excluyó la solución metálica, decidiéndose entonces la utilización de elementos de hormigón prefabricado que si bien hacían más compleja la ejecución de la estructura no requerían mantenimiento.

Se hizo necesario entonces un desarrollo cuidadoso tanto de la geometría de las piezas prefabricadas y de sus uniones como del proceso de ejecución. El resultado de este estudio de detalle ha permitido definir una estructura principal que constituye por si misma la expresión arquitectónica de la torre y, mediante la interacción de dicha estructura con la del núcleo de comunicaciones verticales, la posibilidad de realizar el proceso de montaje sin necesidad de estructuras auxiliares temporales.

2. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ESTRUCTURAL

Tal como se ha indicado anteriormente, el edificio base esta formado por dos anillos concéntricos, constituyendo el anillo interior el arranque del fuste exterior y de la estructura interior de comunicaciones verticales.

El fuste nace en una viga circular de gran canto situada a la cota de la cubierta del edificio, con lo que toda la estructura portante de la torre queda enteramente vista. Por debajo la viga transmite las cargas a cimentación mediante pilares in situ, mientras que en su extremo superior el fuste recibe la estructura del fanal y las plantas técnicas a través de un emparrillado de vigas que constituye una estrella de ocho puntas que apoya sobre los ocho nudos en que se unen las dieciséis generatrices del hiperboloide y sobre la que se erige la estructura del fanal, mientras que la de las plantas técnicas cuelga de dicho emparrillado.

La estructura interior que engloba la escalera, el ascensor y los patinillos de instalaciones nace en la planta baja del edificio sobre pantallas de hormigón y se eleva hasta la parte inferior de la planta técnica más baja.

El edificio del anillo exterior se resuelve mediante pórticos radiales en hormigón y losas hormigonadas sobre prelosa. Las vigas se unen rígidamente a los pilares interiores realizados in situ mientras que se apoyan sobre los pilares prefabricados de fachada y la transmisión de acciones horizontales de sismo y viento se garantiza mediante pantallas de hormigón in situ sobre las que las losas actúan como diafragmas rígidos en su plano.

Ambos edificios se cimentan mediante losas sobre pilotes cortos hincados. La razón de esta solución estriba en las especiales características del terreno de cimentación con un primer estrato de arenas de cierta capacidad portante mientras que por debajo, hasta los 55 metros en que aparecen las gravas, se encuentran estratos alternados de arcillas limosas y de arenas todos ellos con muy baja capacidad portante, por lo que el pilotaje se desarrolla, flotante, sin superar la profundidad del primer estrato.

Como ya se ha indicado, la estructura del fuste se resuelve con elementos prefabricados de hormigón blanco, pretensados, que siguen la dirección de las generatrices de un hiperboloide de revolución con un diámetro inferior de 12,66

metros y un diámetro superior de 23,4. La sección de las piezas es de 45x90 cm. con el lado mayor orientado en cada punto hacia el eje de revolución, con lo que cada pieza va girando sobre su eje longitudinal a lo largo de su altura.

Estas generatrices se cruzan espacialmente a distintas alturas en ocho nudos situados en un plano horizontal, en dichos nudos se produce una intersección a sección completa y se han aprovechado para despiezar cada generatriz en dovelas cuya longitud se limita al tramo entre dos nudos sucesivos. Estas dovelas se prefabrican con hormigón blanco de 40 MPa y se pretensan, según su eje longitudinal, mediante barras Dywidag.



Para la unión de las dovelas ha sido preciso diseñar un nudo de cierta complejidad en el que concurren cuatro dovelas acabadas de forma que su intersección define un plano vertical y otro horizontal. En el plano vertical se aloja una pieza de acero inoxidable compuesta por una chapa y unos tubos que sirven como guía para la introducción de las barras de cosido del plano horizontal, mientras que las barras de cosido del plano vertical se enhebran a través de los taladros previstos en las dovelas y en la chapa intermedia, dos taladros en las dovelas inferiores y dos en las superiores. La continuidad se garantiza mediante el pretensado de dichas barras de cosido para las que se han utilizado barras Dywidag enfundadas y engrasadas de 26 mm. de diámetro en las uniones intermedias y de 32 mm en los nudos superiores.

Para la estructura del núcleo de comunicación vertical, por el interior del fuste portante, se requería una solución que garantizase su conservación al lado del mar sin necesidad de mantenimiento, al tiempo que frente a la potencia de las dovelas del fuste se pretendía una sensación de ligereza estructural que denotase las distintas funciones de ambas estructuras. Para ello se ha recurrido al empleo de perfiles huecos de aluminio extrusionado, con conexiones atornilladas sistematizadas, para la estructura portante y de peldaños y plataformas igualmente en aluminio extrusionado con lo que se consigue una estructura ligera y sin mantenimiento. Además durante la fase de montaje la estructura del núcleo sirve como estructura auxiliar para el montaje del fuste.



En cuanto a la estructura del fanal y las plantas técnicas, desde un primer momento se tuvo claro que se ejecutaría, en la mayor medida posible, a pie de la torre izándola posteriormente a su posición definitiva. Para ello se proyectó una estructura de pilares y vigas de acero con forjados mixtos de chapa colaborante y hormigón en los forjados de las plantas técnicas. El elemento estructural que transmite la carga al fuste es un emparrillado de vigas de canto variable con forma de estrella de ocho puntas, cada una de las cuales apoya sobre uno de los nudos superiores de la estructura del fuste. A partir de este emparrillado nacen los pilares del fanal y se suspenden los de la estructura de las plantas técnicas.

3. EL PROCESO DE MONTAJE

Una vez ejecutada la cimentación y la estructura del edificio base, por métodos tradicionales si bien suprimiendo la necesidad de encofrados y apeos mediante la utilización de vigas prefabricadas y prelosas, se comenzó el montaje del fuste para el que, ya desde la fase de proyecto, se había diseñado un proceso que eliminaba la necesidad de aparatosos andamiajes.

Para ello se utilizó la estructura del núcleo de escaleras como estructura auxiliar que permitía replantear en el espacio y fijar rígidamente los nudos de acero inoxidable en los que se unirían las dovelas prefabricadas. Para ello la estructura de la escalera se desarrolló siempre en avance sobre la del fuste, de modo que una vez que la escalera superó la altura del primer nudo de las dovelas se fijaron a ella mediante elementos rígidos las piezas metálicas de conexión, a continuación las dovelas se izaban, por parejas formando una A, hasta hacerlas coincidir con los nudos y los apoyos sobre la viga anular de arranque. Una vez colocado la corona completa formada por los 8 pares de dovelas se procedía a la inyección y tesado definitivo de las barras de cosido horizontal.

A su vez la estructura de la escalera se premontaba por tramos a pie de la torre, lo que permitía un rápido avance de la misma de modo que una vez colocada la primera corona de dovelas se montaba el tramo sucesivo de escalera hasta superar la cota del siguiente nudo de dovelas y se repetía el proceso inyectando y tesando entonces las barras de cosido vertical del nudo inferior. Durante la ejecución los elementos de arriostramiento entre ambas estructuras garantizaban que la interacción entre ambas dotase a las estructuras, parcialmente ejecutadas, de estabilidad frente a acciones horizontales.

El proceso seguía así hasta llegar al último nudo de las dovelas que se sitúa por encima de la coronación de la estructura de la escalera. Para estos nudos se construyó sobre la estructura de la escalera una plataforma de trabajo y los nudos superiores de las dovelas se arriostraron a la coronación de la escalera mediante cables inclinados que permitían corregir la posición de los mismos hasta conseguir el replanteo correcto de los mismos, a continuación se ejecutó un anillo provisional de perfiles metálicos que unían los ocho nudos de unión de las dovelas, lo que permitía el destesado de los cables transfiriendo los

esfuerzos al anillo que se mantenía hasta la colocación de la estructura de las plantas técnicas, momento en que se unían mediante soldadura los nudos a los extremos del emparrillado de vigas en estrella.



Para la estructura de las plantas técnicas y el fanal, el montaje se realizó a pie de la torre, sobre plataformas auxiliares, montando la totalidad de la estructura metálica y las chapas colaborantes junto con los arriostramientos necesarios. Una vez terminado el montaje en superficie se izó en primer lugar la estructura de las plantas técnicas encajando los extremos de las vigas en estrella sobre los apoyos creados en los nudos de unión de las dovelas finales, una vez retirada la plataforma auxiliar. Posteriormente se izó la estructura del fanal que se apoya directamente sobre la estructura anterior, de forma que solo se realizaron en altura las tareas de hormigonado de los forjados mixtos y las de

distribución y acabados, evitando los riesgos inherentes a la realización del montaje en altura de una estructura como la descrita.

4. FICHA TÉCNICA

Promotor:

AENA. Plan Barcelona

Proyecto:

GOP Oficina de Proyectos S.A.

José Meseguer Ruiz, Ingeniero Aeronáutico

Bruce S. Fairbanks, Arquitecto

Cristina Monllor González, Arquitecta

Estructura:

Mauro Giuliani, Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

Estudio aerodinámico:

IDR/UPM ETSI Aeronáuticos

Empresa constructora:

Ferrovial-Agroman

Prefabricación:

Alvisa-Prainsa

III CONGRESO DE ACHE DE PUENTES Y ESTRUCTURAS

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



Realizaciones



NUEVA TORRE DE CONTROL DEL AEROPUERTO DE BARCELONA.

PREFABRICACIÓN DE SU ESTRUCTURA

José Luis LLEYDA DIONIS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

RESUMEN

La Nueva Torre de Control del Aeropuerto de Barcelona se ha construido con estructura vista en hormigón prefabricado blanco. Consta de una base de dos plantas de 73 m de diámetro exterior y un fuste que recibe el fanal superior hasta llegar a la cota 62 m.

La estructura del fuste consiste en una malla formada por el cruce de las dos familias de generatrices rectas de un hiperboloide de revolución. Estas generatrices se materializan mediante la unión de dovelas prefabricadas de hormigón que se unen en los nudos mediante un sistema de barras postesadas y chapas de acero inoxidable. Las dovelas, aunque de generatriz recta y sección rectangular 90 x 45 cm, tienen todas sus superficies curvas formando una especie de “paralelepípedo torsionado”. Sus extremos revisten cierta complejidad formal para adaptarse al encuentro y unión en los nudos de cruce.

La nueva Torre de Control del Aeropuerto de Barcelona es ejemplo de las posibilidades que la prefabricación en hormigón ofrece para construir estructuras de alta calidad tanto en el aspecto resistente como en el aspecto estético propio de fachadas arquitectónicas de gran nivel.



Figura 1

Proyectada inicialmente con estructura metálica, sufrió una revisión total a petición de la Propiedad (AENA), buscando mayor garantía de durabilidad en ambiente marino, planteándose y desarrollando una solución en hormigón que proporcionaba la garantía solicitada a un costo razonable.

Dada la extraordinaria complejidad formal y la calidad exigida a la estructura del fuste era impensable su realización por los procedimientos normales de

construcción “in situ”, siendo necesario el empleo de elementos prefabricados, utilizando técnicas especiales de pretensado, junto con la inclusión de chapas de acero inoxidable, para soportar los esfuerzos actuantes en los nudos de unión de los prefabricados, con tolerancias de fabricación muy estrictas y montaje de alta precisión.

1. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Dividimos el conjunto del edificio en tres partes diferenciadas:

a) Zona inferior: Dos pisos con planta circular.



Figura 2

b) Fuste de la torre: Escalera interior de acceso y estructura que soporta las plantas superiores.



Figura 3

c) Fanal: Plantas superiores, zona de actividad de los controladores aéreos.

a) Zona inferior

Estructura anular circular de dos plantas con un núcleo central “in situ” de diámetro: 48 m y un anillo prefabricado de 73 m de diámetro exterior. La altura total entre ambas plantas es 9 m.

La estructura prefabricada se compone de:

- 32 pilares perimetrales con alzado de sección variable y altura total de 9 m.



Figura 4

- 64 vigas perimetrales de fachada exterior, con directriz circular y sección hueca de dimensiones 1,35 m x 1,48 m, formando dos familias de 32 piezas prácticamente iguales entre sí, con peso de 25 Tn cada viga.



Figura 5

- 60 vigas radiales de sección rectangular 0'40 x 0'52 m y 0'45 x 0,70 m con longitudes de 11 m, con extremos implementados con perfiles metálicos para su apoyo sobre los pilares.



Figura 6

- 32 pilaretes de sección rectangular 0'30 x 0'80 m situados en el punto medio entre cada dos vigas perimetrales, como “parteluz” para la colocación de las lamas.



Figura 7

- 320 lamas que completan la fachada cilíndrica exterior entre las familias superior e inferior de vigas perimetrales.



Figura 8

- 3.280 m² de prelosa con celosías vistas y armadura incorporada para ejecutar los forjados de ambas plantas.



Figura 9

Los pilares, pilaretes, vigas perimetrales y lamas son de hormigón armado blanco HA-40 y HA-45.

Las vigas radiales son de hormigón pretensado HP-40, gris.

Las prelosas son de hormigón armado gris HA-40.

La superficie de todas las piezas es de textura lisa, de molde metálico.

Las uniones entre piezas no revisten novedad especial, con detalles tradicionales: pilares empotrados en zapata con cáliz, vigas apoyadas sobre pilares (directamente o mediante apéndices metálicos) y prelosas apoyadas inicialmente sobre las vigas e integrando finalmente el forjado continuo empotrado en las vigas radiales. Sin embargo, las lamas de fachada presentan un sistema original diseñado por la oficina técnica de Prainsa para la unión con los pilares y pilaretes a base de tornillos de acero inoxidable regulables que permitan la orientación de su plano durante el montaje para conseguir la uniformidad y perfecto paralelismo entre sí en todo el desarrollo de la fachada.

El conjunto de pilares, vigas perimetrales, pilaretes y lamas forma la fachada cilíndrica exterior de 73 m de diámetro mientras que las vigas radiales y prelosas tienen misión exclusivamente estructural de formación de forjados.



Figura 10



Figura 11

La cimentación de toda la estructura, tanto el núcleo central “in situ” como la parte prefabricada, es directa sobre zapatas aisladas y losas, lo que ha exigido un seguimiento intensivo de descensos a medida que se iba ejecutando la obra y aumentando, por lo tanto, su carga, para comprobar que los asientos diferenciales quedaban dentro de los márgenes previstos admisibles.

A la altura de la cubierta de esta zona inferior se ubica una gran viga de hormigón armado con directriz circular de 12'60 m de diámetro, ejecutada “in situ”, que sirve de punto de arranque de la estructura prefabricada del fuste transmitiendo su carga al terreno a través de los oportunos pilares.



Figura 12

b) Fuste de la torre

Compuesto por la estructura que soporta el fanal y por una escalera interior de aluminio que, además de servir como acceso de emergencia a las plantas superiores (el acceso normal es mediante ascensores) se ha utilizado como arriostramiento provisional de las dovelas prefabricadas exteriores durante su montaje. Una vez terminada la obra, la estructura prefabricada soporta por sí misma todas las cargas de las plantas superiores e, incluso, las transmitidas por la escalera interior.



Figura 13

La estructura exterior prefabricada está formada por dovelas de hormigón blanco armado-pretensado de sección 0'90 x 0'45 m y longitud variable entre 5'60 m y 19'00 m, que se unen formando una malla de generatrices rectas que se cruzan constituyendo una superficie reglada (hiperboloide de revolución).



Figura 14

Cada dovela está postesada con una barra \varnothing 32 de alta resistencia.

La altura neta del tronco de hiperboloide es de 43'20 m, llegando a la cota 56'56 m desde la cota 0'00 en el pavimento exterior a la torre. Los diámetros de las secciones horizontales circulares del tronco son de 12'66 m en su cota inferior, 8'96 m en su sección de mínimo radio y 23'40 m en la sección correspondiente a su cota superior.

En cada nudo se unen cuatro dovelas (cruce de las generatrices) mediante un sistema de barras pretensadas de alta resistencia que cosen el nudo en dos direcciones, horizontal y cuasivertical, incorporando en su interior una chapa de acero inoxidable de 10 mm de espesor, con superficie de 1'13 m x 0'99 m, que tiene dos misiones fundamentales: punto de enganche para arriostamiento provisional de las dovelas a la escalera de aluminio, y elemento capaz de absorber los esfuerzos cortantes que aparecen en el nudo debidos a la diferencia de axiles entre las dos generatrices concurrentes. Estas chapas quedan embutidas en el nudo y cosidas por las barras de pretensado mencionadas.



Figura 15

El hiperboloide-malla termina en su cota superior en ocho nudos en los que se ha dispuesto un receptáculo apropiado para el apoyo de las ocho patas con las que el fanal transmite su carga al fuste.



Figura 16

c) Fanal

Está construido con una estructura metálica ejecutada simultáneamente al montaje de la estructura de la torre en un terreno anejo y colocada sobre el fuste una vez alcanzada su cota superior, con la misma grúa utilizada para el izado de las dovelas de hormigón,

La parte inferior del cuerpo del fanal se introduce en el interior del fuste y la parte superior emerge sobre la cota de apoyo hasta alcanzar 62 m sobre el pavimento exterior.

Toda la superficie perimetral es acristalada para permitir la vista del aeropuerto y su entorno.



Figura 17

2. PREFABRICACIÓN EN HORMIGÓN ARMADO, PRETENSADO Y POSTESADO

De todas las piezas prefabricadas proyectadas para la construcción de la torre, destacan las dovelas constituyentes de la malla del fuste y las vigas perimetrales de la fachada de las plantas bajas, todas ellas de hormigón blanco

H-40. Tanto para unas como para las otras juega un papel fundamental el molde metálico, con superficies curvas y tolerancias muy estrictas.

Las vigas perimetrales de las plantas bajas, con directriz circular y sección hueca, precisaban un molde con la forma adecuada y tolerancias milimétricas, en cualquier punto, para crear una superficie continua cerrada con \varnothing ext. = 73 m, una vez colocadas sobre los pilares de sección variable, también prefabricados. Fueron hormigonadas en una posición girada 90° en relación a la posición de servicio, para conseguir que todas las superficies vistas correspondiesen a superficie moldeada. La cara de hormigonado era, pues, la superficie interior cilíndrica, que presentaba la dificultad del enrase final en una superficie no plana.



Figura 18

Sin embargo, las piezas que requirieron una atención especial fueron las dovelas componentes del fuste. Estos elementos, de directriz recta y sección rectangular, presentan todas sus superficies curvas ya que son elementos lineales torsionados para mantener siempre la cara interior perpendicular a un radio horizontal de la torre a cualquier altura del fuste.



Figura 19

El necesario encaje de los cuatro elementos que se cruzan en cada nudo de la malla del fuste proporciona desde el primer momento una preocupación especial y constante por conseguir unos moldes de difícil concepción con una sección recta que, a la largo de la directriz, va girando con “velocidad” variable. Era absolutamente fundamental que el giro de la sección de un extremo con respecto al opuesto fuese exactamente el teórico (tolerancia inferior a $0,5^\circ$) para no tener problemas con los espesores de las juntas. Además, cada extremo de la pieza se encuentra cortado por dos planos con superficie no lisa (resaltos troncocónicos) para mejorar la adherencia en las juntas, cosidas mediante barras postesadas. En definitiva, se trata de unos moldes extraordinariamente complejos que requerían una definición y ejecución muy laboriosa y un control exhaustivo en todos sus puntos.



Figura 20

Hasta llegar al montaje de las últimas dovelas no desapareció la intranquilidad subconsciente de que algo hubiese fallado en la definición de dichos moldes. Afortunadamente los controles establecidos dieron su fruto y el encaje de todas las piezas de la malla se produjo con las tolerancias previstas.

Al igual que en el caso de las vigas perimetrales, la superficie de hormigonado no era plana con la consiguiente dificultad de enrase.

La ferralla de estas piezas fue, al principio, otra fuente de preocupación para su adaptación a la forma torsionada de la pieza. No obstante unas pruebas previas, al comienzo de la producción, demostraron la relativa facilidad para el acoplamiento de la armadura en el molde.

Una vez desmoldadas todas las piezas de hormigón blanco (vigas perimetrales, dovelas del fuste, pilares y lamas) eran envueltas totalmente con una lámina de polietileno, no sólo por evitar manchas en su superficie sino, fundamentalmente, para mantener su humedad interna realizando un proceso

de curado correcto y eliminando el riesgo de fisuración superficial por desecación.



Figura 21

3. TRANSPORTE

Todas las piezas son de dimensiones moderadas por lo que el transporte a una distancia poco importante (~70 km) no requería atención especial ni dio problema alguno. Únicamente las dovelas del fuste correspondientes a la “corona” de mayor altura, con 19 m de longitud, precisaron un estudio sobre la situación de los puntos de apoyo en acopios y en el transporte, para evitar deformaciones por flexión o torsión que pudiesen modificar la geometría inicial.

4. MONTAJE

Con un replanteo topográfico correcto el montaje de las piezas de las plantas bajas no presentaba previsiones de dificultad inusual

Por el contrario, el montaje de las dovelas del fuste exigió un estudio detallado analizando distintas posibilidades en cuanto a su proceso. Aunque en proyecto estaba previsto la colocación de las dovelas de una en una, se pensó en la posibilidad de la colocación por parejas (formando una V invertida: \wedge) o incluso en grupos de 4, premontando el conjunto en forma de X en el suelo, antes de su elevación al emplazamiento definitivo.



Figura 22

Se adoptó la solución del montaje por parejas que presentaba ventajas sobre las otras posibilidades: manejo más sencillo que en el caso de piezas en X, y facilidad para su emplazamiento exacto apoyando y “calzando” en 2 puntos, lo que permite corregir la posición del vértice (3^{er} punto) con precisión milimétrica. La separación entre los 2 puntos de apoyo inferiores (patas de la Λ) se regulaba con un puntal-tensor metálico que se colocaba previamente a su izado y se retiraba tras el emplazamiento de las piezas en su lugar definitivo.



Figura 23

De esta forma se terminó el montaje situando los vértices superiores (a la cota 56,56 m) con desviaciones inferiores a 10 mm, en cualquiera de los 3 ejes, con respecto a su ubicación teórica. A medida que se iban montando las dovelas se inyectaban las juntas en los nudos y se cosían con barras postesadas, creando la rigidez necesaria para dar estabilidad al conjunto.



Figura 24

Para el arriostamiento provisional de las dovelas que formaban la corona superior se utilizó un sistema de tirantes regulables, diseñado por la oficina técnica de Prainsa, que se cruzaban sobre el eje de la torre creando una figura de curioso aspecto geométrico.



Figura 25



Figura 26

Estas parejas de dovelas se izaban llevando ya incorporada una plataforma metálica de trabajo en el vértice superior. Estas plataformas se utilizaban para:

- Colocación de un tirante horizontal perimetral del que formaban parte las propias plataformas y que permitía la retirada de los tirantes inclinados utilizados para el montaje individual de las parejas de dovela. Era necesaria la retirada de los tirantes inclinados puesto que interferían con la estructura del fanal al introducirse éste en el interior de la parte superior del fuste.
- Trabajos de acoplamiento de los apoyos del fanal sobre la coronación del fuste en los ocho vértices de coronación.
- Retirada del tirante horizontal perimetral una vez fijada la estructura del fanal que pasaba a realizar las funciones de arriostamiento y zunchado de la corona superior de dovelas.

El plazo total de montaje de los elementos del fuste fue de 7 semanas y media, entre el 19 de julio y el 9 de septiembre que coincidió exactamente con las previsiones iniciales.

El montaje de las parejas de dovelas, con peso máximo de 40 Tn, radio de 60 m y altura de 57 m, se realizó con una grúa LG-1550, configuración SDWB, con la que también se colocó la estructura metálica del fanal de la torre, construido en el suelo mientras se ejecutaba la estructura prefabricada.

5. CONTROL Y PRUEBA DE CARGA

Durante la fabricación de todos los elementos de la estructura se desarrolló el habitual control intenso sobre recepción de materias primas, resistencia del hormigón, dimensiones de moldes y piezas, ferralla, tensión de pretensado, etc. Además en esta obra, a petición de la propiedad, se llevó a cabo el ensayo de un nudo de la celosía para lo que la oficina técnica de Prainsa diseñó un banco de pruebas que permitía introducir esfuerzos axiales independientes en los dos brazos de la cruz del nudo con valor máximo de 400 Tn cada uno para crear las condiciones pésimas teóricas a las que el nudo puede estar sometido a lo largo de su vida.



Figura 27

La prueba de cargas fue llevada a cabo por técnicos especialistas del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña, introduciéndose hipótesis de cargas mucho más desfavorables que las previstas en servicio, con un comportamiento de las piezas y del sistema de unión excelente.

6. DATOS GENERALES

PROPIEDAD: AENA

PROYECTO: G.O.P. (BRUCE FAIRBANKS, EDUARDO MONTERO)

CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO: REDESCO SRL (MAURO GIULIANI)

DIRECTOR DE OBRA: D. MANUEL PASCUAL

EMPRESA CONSTRUCTORA: FERROVIAL AGROMAN S.A.

EJECUCIÓN MOLDES: MOLDIMETAL S.L. (GRUPO PRAINSA)

PREFABRICACIÓN: NORDEN S.A. Y PREFABRICADOS HUESCA S.L.
(GRUPO PRAINSA)

MONTAJE: TECNOTRUCK S.L. (GRUPO PRAINSA)