

# Proyecto de una Cubierta Singular de 224 m de longitud en la Estación de Alta Velocidad de La Sagrera

## *Design of a Singular Roof 224 m long at La Sagrera High Speed Train Station*

Víctor Torralba Mendiola<sup>a</sup>, Ana Cuartero Rodríguez<sup>b</sup>, Rubén Riverol Brignardelli<sup>c</sup>,  
Gonzalo Ramos Schneider<sup>d</sup>, Angel Carlos Aparicio Bengoechea<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos, Director de Proyectos de Tunnel & Bridge Technologies

<sup>b</sup>Ingeniero de Caminos en Tunnel & Bridge Technologies

<sup>c</sup>Ingeniero de Caminos en Tunnel & Bridge Technologies

<sup>d</sup>Prof. ETSICCPB, UPC, Catedrático de Universidad

<sup>e</sup>Prof. ETSICCPB, UPC, Catedrático de Universidad

### RESUMEN

El proyecto contempla el proyecto estructural de una cubierta singular continua de 224 m de longitud según el diseño arquitectónico de Barcelona Sagrera Alta Velocidad así como la verificación de la compatibilidad estructural de los niveles inferiores de la estación con esta cubierta. Esta última verificación resulta necesaria pues los niveles inferiores de la estación respetan la modulación prevista en el proyecto original de la Estación, del año 2009, que contempla juntas de dilatación cada 48 m. Es decir, la nueva cubierta singular abarca 5 módulos de estación del proyecto original.

### ABSTRACT

The project includes the structural design of a continuous singular roof of 224 m length according to the architectural design of BSAV as well as the verification of the structural compatibility of the lower levels of the station with this roof. This last verification is necessary because the lower levels of the station respect the location of the expansion joints foreseen in the original project of the Station, in 2009, which includes expansion joints every 48 m. That is, the new singular roof covers 5 station modules of the original project.

**PALABRAS CLAVE:** Pirámide, voladizos, hormigón pretensado, juntas de dilatación, sismo.

**KEYWORDS:** Pyramid, cantilever, prestressed concrete, expansion joints, earthquake.

## 1. Introducción y Objeto

El Proyecto de la cubierta singular se engloba dentro del Proyecto de Construcción de la Estructura de la Estación de Sagrera. Línea de Alta Velocidad Madrid –Zaragoza – Barcelona – Frontera Francesa.

La Nueva Estación de La Sagrera está en estos momentos en construcción, y se prevé que

dará servicios a los trenes de Cercanías de la ciudad de Barcelona así como a los trenes de Alta Velocidad para trayectos de largo recorrido. La estación tiene una longitud total cercana a 600 m y un ancho máximo de 80 m. Está previsto que los distintos servicios se ofrezcan a lo largo de 4

plantas, lo que implica una altura total del edificio de 28 m.

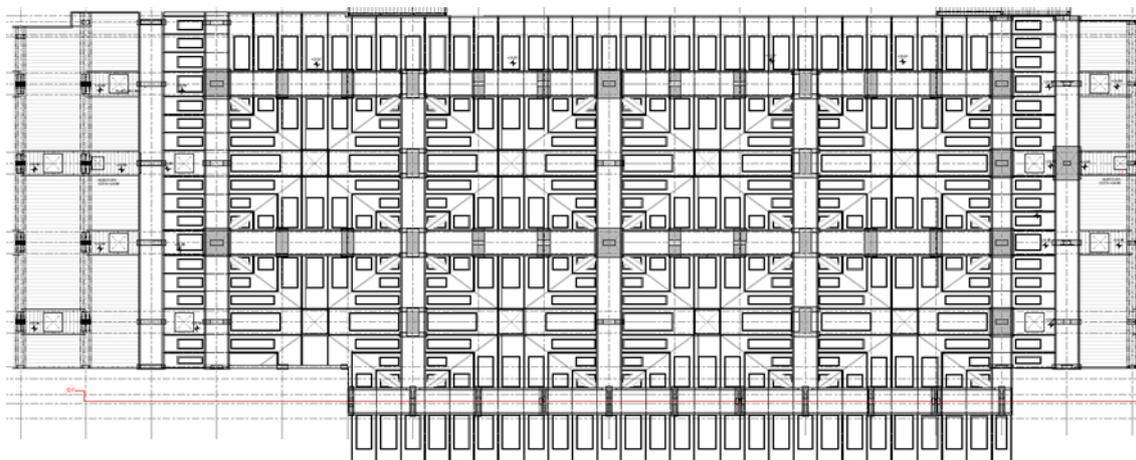


El proyecto original de la Estación, de Febrero de 2009, fue redactado en su momento por las empresas GPO-SENER. Este proyecto consideraba la división de la estación en módulos independientes de 48 m de longitud. En sentido longitudinal la estación esta dividida en un total de 35 ejes transversales, que es donde se ubican los pilares de la estación, la distancia entre ejes es de 16 m.

Durante el año 2018 se ha redactado, por parte de las empresas GETINSA-EUROESTUDIOS, el Proyecto Básico de Arquitectura e instalaciones de la Nueva Estación de Alta Velocidad de la Sagrera que actualiza el diseño de la estación e introduce una serie de modificaciones funcionales y arquitectónicas. Desde un punto de vista estructural, este proyecto básico respeta los criterios y disposiciones estructurales del proyecto original de la Estación, por lo que

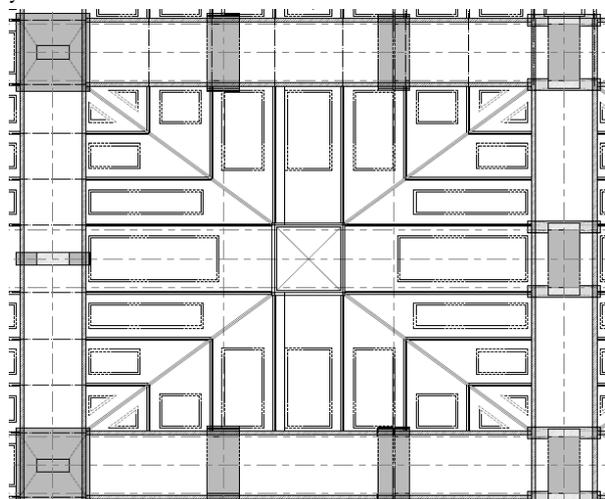
mantiene la división de la Estación en módulos independientes de 48 m de longitud.

Durante la ejecución de este Proyecto Básico, BSAV, en coordinación con ADIF, ha realizado la propuesta de introducir una cubierta singular sobre la estación constituida por una serie de elementos arquitectónicos que cuentan con el aspecto visual de una pirámide. Estas pirámides tienen unas dimensiones en planta, entre ejes, de 48x39.08 m y cuentan con unas costillas de canto variable, tanto longitudinales como transversales, que son los elementos que materializan la geometría de una pirámide. La zona central de la pirámide define un lucernario cuyas dimensiones mínimas están fijadas por criterios de ventilación. Además, el diseño urbanístico del Ayuntamiento de Barcelona prevé la implementación de jardineras entre las costillas para que el espacio superior quede conformado como un parque.



**Figura 2.- Planta general**

Cada uno de estos módulos se apoya en sus 4 lados sobre las jácenas principales de la cubierta, cuya sección es la de un cajón. A su vez, estos cajones se utilizan o bien para la evacuación de viajeros en situaciones de emergencia o bien para funciones de ventilación y otras instalaciones.



**Figura 3.- Planta de la pirámide tipo**

En total, se implementan 4 pirámides a lo largo de la alineación H de la Estación y otros 4 módulos a lo largo de la alineación F, si bien el primero de estos módulos presenta una geometría irregular con objeto de liberar espacio para uso terciario del lado mar de la Estación.

Fuera de las pirámides, la cubierta singular se complementa con voladizos del lado mar y del lado montaña y una serie de costillas de canto

constante que conectan con el resto de la cubierta de la Estación.

El objeto del Proyecto Básico desarrollado por TBT ha sido la definición estructural de todos los elementos resistentes de la cubierta así como estudiar la compatibilidad de la cubierta con los niveles inferiores de la estación.

## 2. Planteamiento del problema

El apoyo de la cubierta sobre pilares se materializa tan sólo a través de las jácenas de la cubierta. Es decir, las pirámides son siempre diáfanas.

Se ha propuesto definir la vinculación entre la cubierta continua y los niveles inferiores de la Estación mediante aparatos de neopreno. De esta forma, se permite que los esfuerzos en pilares por deformaciones impuestas en la cubierta no resulten excesivos y se independiza

el comportamiento de la cubierta ante la acción sísmica, además de que se permite el recentrado de la misma tras un eventual sismo.

Dada la funcionalidad de los cajones transversales como vías de evacuación, en un principio se descarta la posibilidad de introducir diafragmas ciegos en estos cajones. De este modo, los aparatos de neopreno siempre deben ir bajo las almas de los cajones, lo que ha implicado la necesidad de introducir capiteles en la coronación de los pilares. Estos capiteles son necesarios también para permitir el empotramiento a torsión de los cajones.

### 3. Criterios de proyecto y descripción de la solución

#### 3.1 Materiales

En un principio, se ha pretendido respetar los materiales definidos en el proyecto original de la Estación.

Sin embargo, para aumentar la seguridad estructural y dar mayor flexibilidad durante construcción, durante el desarrollo de los trabajos se ha tomado la decisión de aumentar la resistencia de los elementos estructurales de

cubierta (costillas y cajones) a un hormigón con  $f_{ck}=80$  MPa.

Con respecto al acero de pretensado, se ha previsto la utilización de un acero Y1860S7. La puesta en tensión se ha supuesto para todos los tendones que se realizará al 75% de  $f_{pu}$ . En esta fase de proyecto se ha supuesto unas pérdidas instantáneas de pretensado del 15% de la fuerza inicial de pretensado y unas pérdidas a tiempo infinito del 30% de la fuerza inicial de pretensado.

#### 3.2 Definición geométrica

Las jácenas con sección cajón se han definido por criterios funcionales con un ancho variable de entre 6.50 m y 5.20 m y con un canto total de 3.20 m. El espesor de las almas es de 0.50 m, mientras que los forjados superior e inferior son de 0.40 m de espesor.

Las secciones de las costillas resistentes se han definido con un canto variable entre 3.20 m y 1.00 m. La longitud de cada una de estas costillas varía según donde se ubique en la cubierta, ya sea en los voladizos de lado mar, de lado montaña o sea una costilla completa con lucernario, en sentido transversal o longitudinal de un módulo piramidal.

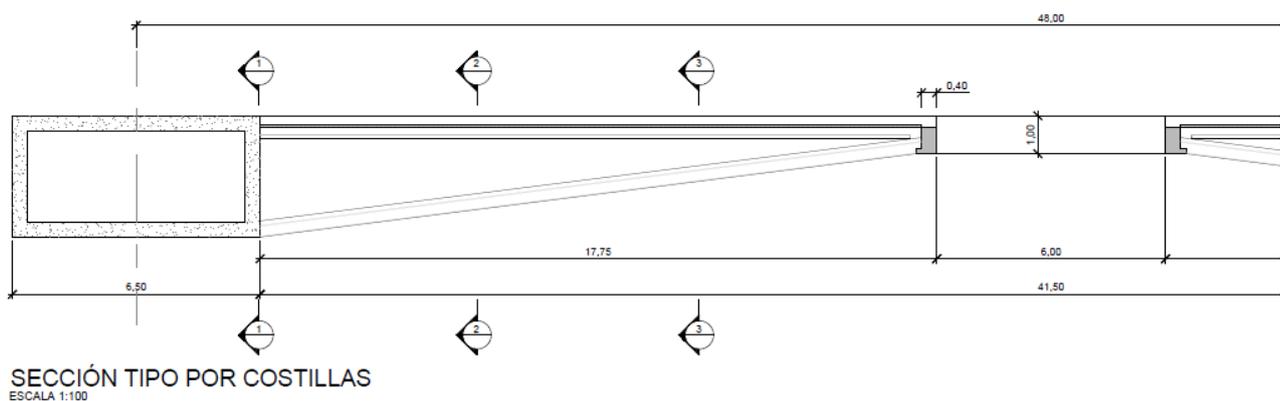
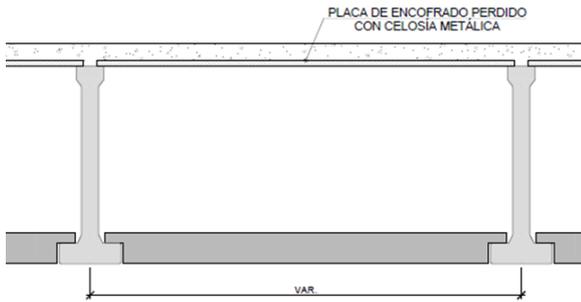


Figura 4.- Sección longitudinal por las costillas principales de una pirámide

Las costillas de los módulos piramidales contiguas a las costillas principales tienen una geometría idéntica a estas y truncada según su longitud.



**Figura 5.- Sección transversal en la sección de arranques de las costillas principales de una pirámide**

El ancho de la cabeza inferior de las costillas es de 0.90 m salvo en las costillas centrales de mayor luz, tanto transversales como longitudinales, que ha sido necesario recrecerla a 1.60 m y 1.05 m respectivamente para satisfacer el ELU frente tensiones normales.

La sección de los lucernarios se ha definido como rectangular con un canto de 1.00 m y un ancho de 0.40 m.

### 3.3 Acciones

- Resto de peso propio de la estructura (alcorques, forjado inferior que materializa la geometría tipo pirámide y losa superior de hormigón allí donde no haya jardinera): 11.40 kN/m<sup>2</sup>.
- Carga permanente, (peso propio de las tierras contenidas en las jardineras y el del pavimento): 20.0 kN/m<sup>2</sup>.
- Sobrecarga de uso: 10.0 kN/m<sup>2</sup>.
- Viento, temperatura y retracción: según CTE y EHE
- Sismo, se define el espectro elástico de respuesta de acuerdo a los siguientes parámetros:
  - ab (aceleración sísmica básica) = 0.04\*g
  - ρ (construcción de importancia especial) = 1.30
  - C (terreno tipo III) = 1.76
  - S (coeficiente de amplificación del terreno), en este caso toma el valor C/1.25

- K (coeficiente de contribución) = 1.00

## 4. Descripción del modelo de cálculo

El modelo de cálculo se ha desarrollado con el software comercial de análisis de estructuras SAP2000. Se ha procedido a modelizar todas las vigas y jácenas así como las costillas de la cubierta mediante elementos tipo viga (frame) y los distintos forjados prefabricados mediante elementos tipo lámina (shell). Los cajones de la cubierta se han modelizado mediante un emparrillado constituido por dos vigas longitudinales, que engloban medio cajón, y las correspondientes vigas transversales, constituidas por dos tablas de 0.40 m de espesor separadas entre ellas el intereje entre almas correspondiente a cada cajón.

En esta fase de proyecto, se ha aceptado que en los cajones longitudinales sí es posible introducir diafragmas ciegos. En este caso, la sección de la viga transversal incluye un alma de 0.40 m de espesor.

Los aparatos de neopreno se han modelizado mediante elementos tipo FRAME. La altura de cada FRAME se corresponde con la altura real del aparato de neopreno según el predimensionamiento realizado.

Para la correcta modelización de los aparatos de neopreno se ha creado un material específico con un módulo de deformación transversal de 900.00 kN/m<sup>2</sup>. Sin embargo, este valor del módulo de cizalladura es válido para deformaciones que se produzcan en periodos prolongados de tiempo, mientras que ante acciones instantáneas, como el sismo, el valor del módulo de cizalladura puede alcanzar valores más altos. De cara a la evaluación de los efectos del sismo sobre la estación, se ha creado un segundo modelo de cálculo, geoméricamente y a nivel de cargas gemelo del modelo original, pero con un módulo de deformación transversal

para los aparatos de neopreno de 1,800.00 kN/m<sup>2</sup> que es el que considera el DNA francés para calcular los esfuerzos originados en puentes por la acción de frenado.

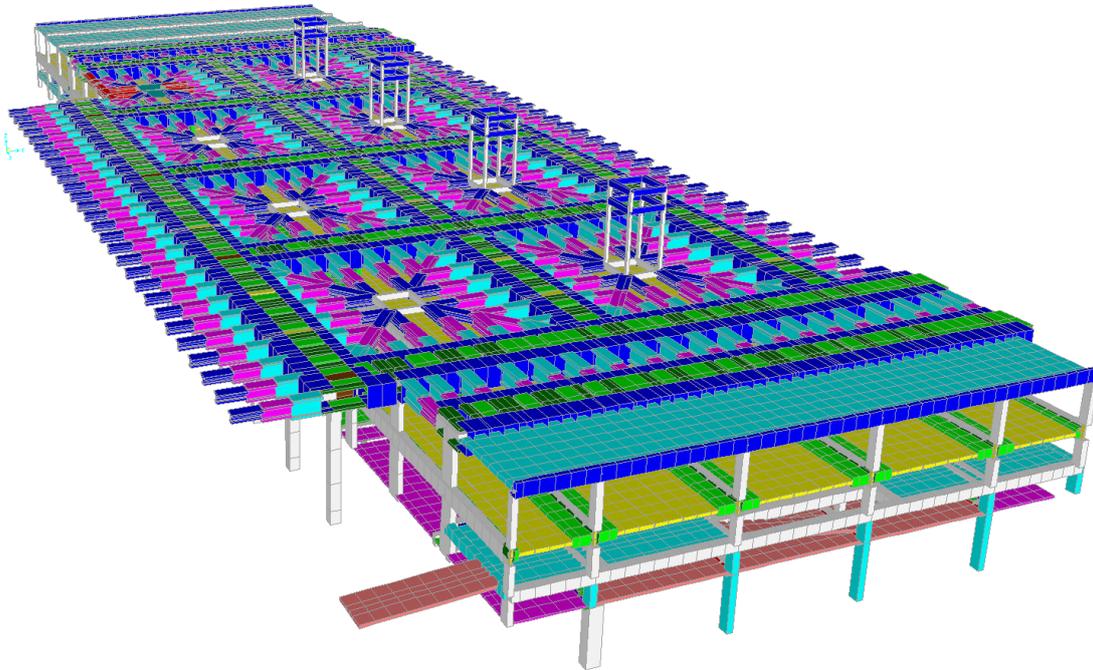


Figura 6.- Vista general del modelo de cálculo

## 5. Análisis estructural general

### 5.1 Diseño de las pirámides tipo

Para las pirámides regulares, se ha realizado un análisis estructural completo de todas las costillas así como las de los voladizos contiguos.

El criterio para el predimensionamiento del pretensado ha sido el de la descompresión de la sección en la situación frecuente. En un principio, se ha pretendido definir el pretensado de tal forma que este se pueda transferir completamente en una única fase.

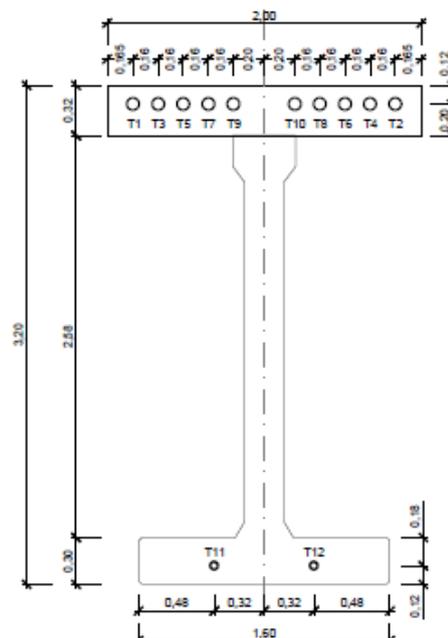


Figura 7.- Costilla transversal de luz máxima: sección en arranques

De acuerdo a todas las anteriores consideraciones, se ha obtenido que el

pretensado necesario en las costillas transversales de mayor luz es:

- Sección de arranques:
  - o Pretensado superior: 10 tendones de 12 cordones de 140 mm<sup>2</sup> de sección.
  - o Pretensado inferior: 2 tendones de 5 cordones de 140 mm<sup>2</sup> de sección.
- Sección en L/3:
  - o Pretensado superior: 8 tendones de 12 cordones de 140 mm<sup>2</sup> de sección.
  - o Pretensado inferior: 2 tendones de 5 cordones de 140 mm<sup>2</sup> de sección.
- Sección en 2L/3:
  - o Pretensado superior: 4 tendones de 12 cordones de 140 mm<sup>2</sup> de sección.
  - o Pretensado inferior: 2 tendones de 5 cordones de 140 mm<sup>2</sup> de sección.
- Sección en lucernario: pretensado inferior de 4 tendones de 12 cordones de 140 mm<sup>2</sup> de sección.

## 5.2 Diseño de las pirámide irregular

En lo que respecta a la pirámide irregular, se han analizado dos diseños alternativos:

- Diseño A: implementación de una jácena con sección cajón a lo largo del eje E.
- Diseño B: Implementación de una jácena con sección rectangular (o en T) a lo largo del eje E.

La ventaja que tenía el diseño A es que permite el empotramiento de las costillas transversales de la pirámide en la jácena con sección cajón, y se obtiene que la geometría de estas costillas es la misma que la del resto de pirámides.

Sin embargo, por motivos de aprovechamiento del espacio para otros usos, se ha preferido implementar en el proyecto el diseño B, por lo que ha sido necesario aumentar el canto mínimo de las costillas transversales a 2.00 m, el resto de costillas de la pirámide mantiene la misma geometría que en el resto de pirámides.

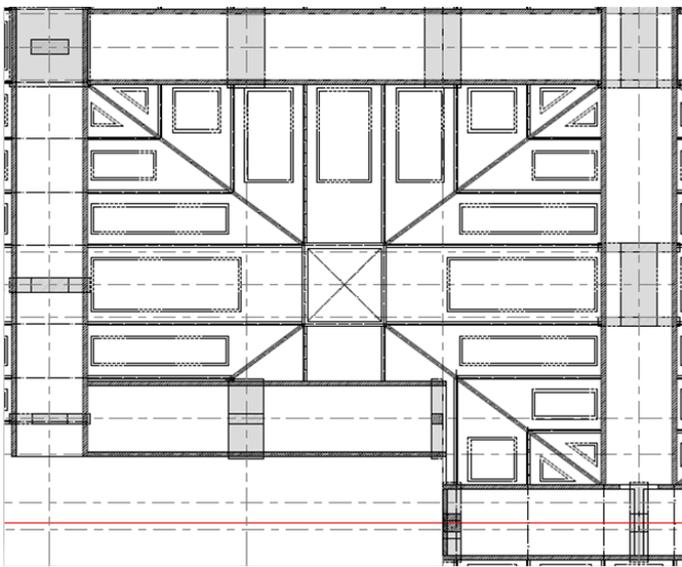


Figura 8.- Imagen comparativa del Diseño A y del Diseño B de la pirámide irregular

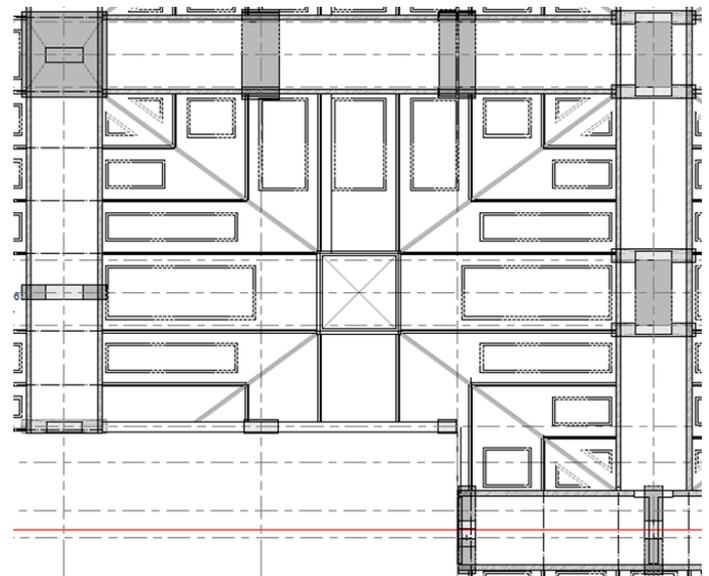
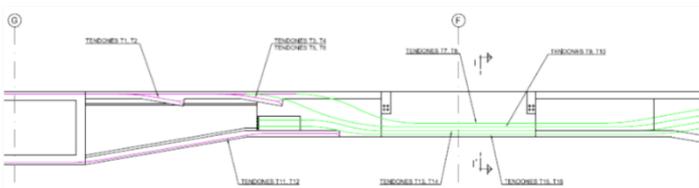


Figura 9.- Diseño B: longitudinal costilla transversal



### ***5.3 Diseño de las jácenas-cajón***

En lo que respecta a los cajones, se han realizado dos diseños alternativos:

- Como estructuras de hormigón armado.
- Como estructuras de hormigón pretensado.

Durante la redacción del proyecto se concluyó que era preferible diseñar los cajones como estructuras de hormigón pretensado, sobre todo por que es una solución que aporta una mayor flexibilidad de cara a la implementación de los huecos necesarios para satisfacer satisfactoriamente las funcionalidades de salida de emergencia y ventilación.

Se ha determinado que el pretensado necesario en las distintas secciones sería:

- Ante momentos negativos (secciones cerca de los apoyos sobre pilares): 12 Tendones de 17 cordones de 140 mm<sup>2</sup> de sección.
- Ante momentos positivos (secciones en centro de luz): 8 Tendones de 17 cordones de 140 mm<sup>2</sup> de sección.

### ***5.4 Deformabilidad de la cubierta***

De acuerdo con el CTE, se considera un límite de L/300 para las flechas activas (debida exclusivamente a la sobrecarga). Se han obtenido los siguientes valores:

- 25.8 mm en el caso de las pirámides, lo que supone L/1337
- 26.6 mm en el caso de los voladizos, lo que supone L/1060

### ***5.5 Diseño de aparatos de apoyo y capiteles de pilares***

Con respecto al dimensionamiento de los aparatos de apoyo, indicar que todos los tipos de aparatos de apoyo que se han dimensionado se corresponden con productos comerciales.

Se ha realizado un análisis somero de las necesidades estructurales de los capiteles y se ha concluido la necesidad de pretensarlos.

Se ha estimado que el capitel longitudinal de dos apoyos (paralelo al eje de la estación) requiere 8 tendones de 12 cordones de 140 mm<sup>2</sup> dispuestos en doble fila.

El capitel transversal, tendría una geometría análoga al capitel longitudinal y se ha obtenido un pretensado similar, constituido en esta ocasión por 8 tendones de 11 cordones de 140 mm<sup>2</sup>.

Se ha previsto que todos los pretensados de los capiteles se dispongan en doble capa.

### ***5.6 Verificación de pilares***

Se han verificado todos los pilares de la estación suponiendo una armadura vertical tipo de  $\varnothing 32$  a 0.10 m en todas las caras y se ha verificado la rigidez lateral de la estructura frente a deformaciones horizontales. Se ha concluido que la inmensa mayoría de secciones previstas en el proyecto original son válidas, sólo ha sido necesario modificar los pilares en 4 ejes de la estación, sin que esto tuviera implicaciones de tipo arquitectónico ni funcionales.

### ***5.7 Análisis de las juntas de dilatación y de las holguras necesarias entre elementos***

Como último apunte, se han estimado las holguras que deben dejar las juntas entre forjados de la cubierta en los ejes 13 y 28, donde se produce el encuentro de la cubierta singular con la cubierta de forjados prefabricados definida en el resto de la Estación, estimándose en 140 mm.

También se ha analizado las holguras a dejar entre las parejas de pilares en las juntas de dilatación de los niveles inferiores de la estación y las holguras entre los elementos arquitectónicos (tales como escaleras de

emergencia) que naciendo en el nivel de Alta Velocidad llegan hasta los cajones de la cubierta.

## 6. Procedimiento constructivo

Se han definido las siguientes fases:

- 1) Construcción in situ de los cajones transversales
- 2) Construcción in situ de los cajones longitudinales
- 3) Disposición de las costillas prefabricadas de hormigón
- 4) Disposición de las diagonales y el lucernario
- 5) Hormigonado de la losa superior
- 6) Ejecución del pretensado en todas las costillas
- 7) Disposición del forjado nervado inferior y de los alcorques
- 8) Disposición de la carga permanente: jardineras, pavimentos, etc.

## 7. Conclusión

Se ha realizado el predimensionamiento completo de una cubierta singular continua de 224 m de longitud en la nueva Estación de La Sagrera en Barcelona.

Se ha verificado la compatibilidad estructural de esta cubierta con los niveles inferiores de la Estación, que están en construcción y que respetan la modulación del proyecto original del año 2009 con juntas de dilatación cada 48 m. Para ello, se ha definido la vinculación entre la cubierta continua y los niveles inferiores de la Estación mediante aparatos de neopreno. De esta forma, se permite que los esfuerzos en pilares por deformaciones impuestas en la cubierta no resulten excesivos y se independiza el comportamiento de la cubierta ante la acción sísmica.

Otra peculiaridad del proyecto es el hormigón escogido para las costillas y cajones de

la cubierta, pues su resistencia característica es  $f_{ck}=80$  MPa. Se ha preferido aumentar la resistencia hasta estos niveles para aumentar la seguridad estructural y dar mayor flexibilidad durante construcción.

Como consecuencia de todos los trabajos realizados, se ha concluido la factibilidad y constructibilidad de la cubierta bajo los condicionantes descritos en este artículo.

### *Agradecimientos*

A Álvaro de Blas, Director de Obra de ADIF.

A Javier Gonzalez, jefe de Unidad Asistencia Técnica, UTE DO SAGRERS.

A Elsa Pasto, Jefa de Obra de la UTE Constructora.

A Lluís Domenech de BSAV.