

Construcción de la Cubierta Singular en la Estación de La Sagrera (Barcelona)

Construction of the Singular Roof at La Sagrera Station (Barcelona)

Adrián Mondéjar Fernández ^a, Víctor Manzano Jiménez ^b Javier Carrascal Pérez ^c y
Luis Carrillo Alonso ^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA. Ingeniero Estructuras. admondejar@acciona.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA. Ingeniero Estructuras. vmanzano@acciona.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA. Ingeniero Senior Estructuras. franciscojavier.carrascal.perez@acciona.com

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACCIONA. Jefe Estructuras de O.C. y Puentes. luis.carrillo.alonso@acciona.com

RESUMEN

La Cubierta Singular de la Estación de La Sagrera se encuadra en unas dimensiones de 223 x 110 m y consta de 8 módulos con forma de pirámide invertida. Estos módulos apoyan sus cuatro lados sobre vigas con sección cajón. El montaje de los elementos prefabricados se realizó con un puente grúa para posteriormente, continuar con el hormigonado y postesado secuencial de la losa superior. Acciona Ingeniería ha desarrollado un modelo evolutivo que nos ha permitido tener un mayor conocimiento de los efectos del postesado y de la retracción diferencial por hormigones de diferentes edades, así como validar la retirada de apoyos provisionales durante las diferentes fases constructivas y realizar el seguimiento geométrico de la ejecución.

ABSTRACT

The Singular Roof of the Sagrera Station has dimensions of 223 x 110 m² and consist of 8 modules in the shape of an inverted pyramid. These modules are supported on four sides by box-section beams. The assembly of the precast elements was carried out with an overhead crane, followed by the concreting and sequential post-tensioning of the top slab. Acciona Ingenieria has developed an evolutionary model that has allowed us to have a better understanding of the effects of post-tensioning and differential shrinkage due to concretes of different ages, as well as to validate the removal of provisional supports during the different construction phases and to carry out the geometric follow-up of the execution.

PALABRAS CLAVE: cubierta, prefabricado, pretensado, construcción evolutiva

KEYWORDS: roof, precast, prestressed, staged construction

1. La estación de La Sagrera

La estación de La Sagrera, obra adjudicada a una UTE de la que forma parte Acciona, nace con la idea de descongestionar la estación de Sants, la cual se encuentra al límite de su capacidad actual. También permitirá distribuir de manera más uniforme los viajeros en distintas áreas de la

ciudad. Será un gran intercambiador multimodal por el que se prevé que pasen unos 100 millones de pasajeros al año. Acogerá líneas de alta velocidad, las líneas L4, L9 y L10 de metro, líneas R1 y R2 de cercanías, autobuses y taxis.



Figura 1. Cubierta Singular en abril de 2024

La cubierta de la Estación tiene una planta aproximadamente rectangular de dimensiones 550 m (dirección norte-sur) x 85 m (dirección mar-montaña). Esta cubierta se organiza en tres sectores longitudinales: Cubierta No Singular sur, Cubierta Singular y Cubierta No Singular norte. En el presente artículo nos centraremos en la estructura que materializa el sector central, la Cubierta Singular (224 x 110 m²)

2. Descripción de la estructura de la Cubierta Singular

La Cubierta Singular de la Estación de La Sagrera está situada entre los ejes transversales 13 a 27, ocupando prácticamente toda la anchura de la estación.

A diferencia de las Cubiertas No Singulares del lado sur y lado norte, la Cubierta Singular se ejecuta sin juntas, es decir, sus 224 metros de longitud se comportan como una única “pastilla” apoyada sobre neoprenos.

El esquema estructural consiste en un entramado de vigas principales de sección cajón, situadas en dos direcciones ortogonales entre sí, sobre los ejes 13, 14, 17, 20, 23, 26 y 27, en dirección transversal, y sobre los ejes I, G y C.1, en dirección longitudinal, formando una retícula de módulos de 48,00 x 40,00 m aproximadamente con el aspecto visual de una pirámide.

Sobre las vigas principales y en cada uno de los recintos creados entre ellas, tanto en

dirección transversal como longitudinal, se apoyan costillas prefabricadas de canto variable que materializan la geometría de la pirámide.

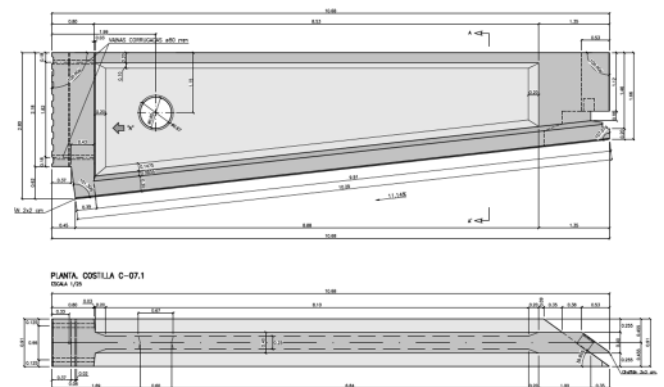


Figura 2. Costillas canto variable

La zona central de la pirámide queda sin cubrir, creando un lucernario con unas dimensiones libres interiores de 6,00 x 6,00 m.

En el lado mar y montaña de la estación (parte superior e inferior, respectivamente, de la Figura 5), también se disponen costillas de canto variable, dando lugar a un voladizo de unos 12 metros de longitud.

La sección transversal tipo de todos los cajones es rectangular. Los cajones transversales tienen una anchura de 6,40 m y un canto de 3,20 m, variando un poco entre los diferentes cajones. Al igual que las costillas, los cajones se prefabrican en planta y posteriormente se trasladan a la obra para su colocación.



Figura 3. Vista pirámide desde abajo y de las torretas provisionales

Funcionalmente, los cajones transversales se utilizan como rutas de evacuación en caso de emergencia y los longitudinales se emplean como conductos de ventilación. Esto implica la necesidad de introducir una serie de huecos en sus losas superior e inferior, para permitir el acceso de las personas y el caudal de aire.

El apoyo de los cajones longitudinales se materializa centrado, contando con un diafragma para reconducir las cargas desde las almas.

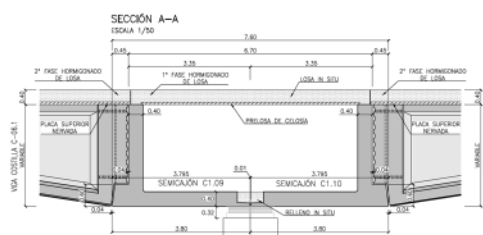


Figura 4. Sección transversal cajones longitudinales

Los cajones transversales, en cambio, no pueden disponer de diafragmas sobre apoyos, ya que impediría su correcto uso como vías de evacuación. Por lo tanto, (para garantizar el empotramiento a torsión de estas vigas).se tienen que disponer sendos neoprenos bajo las almas de los cajones. Debido a ello, es necesario a su vez, disponer de capiteles en cabeza de pilas.

Sobre los diferentes elementos mencionados en los párrafos anteriores se dispone una losa postesada de 40 cm de espesor para finalizar la estructura de la cubierta, ejecutada sobre prelosas.

Además de los pesos propios de los diferentes elementos, las cargas a las que tiene que hacer frente la cubierta son una carga muerta de 10 o 20 kN/m² (dependiendo de la zona) y una sobrecarga uniforme de 5 kN/m².

3. Proceso constructivo

La planificación y diseño del proceso constructivo para la Cubierta Singular de La Sagra fue elaborado por ALVIPRE [1], empresa encargada de la fabricación de los diferentes elementos prefabricados que forman la cubierta. En este apartado, se describe el proceso constructivo diseñado.

La construcción de la cubierta está prevista que se ejecute en dos fases. La primera de estas fases, objeto de este artículo, comprende la ejecución desde el voladizo de lado mar hasta el eje H (área azul en la Figura 5). En la segunda fase, se completará el resto de la cubierta.

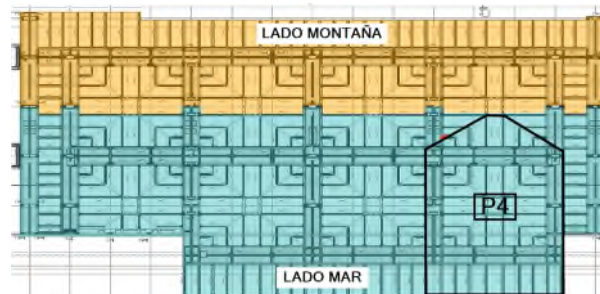


Figura 5. Fases de construcción

Durante la fase 1 se pueden distinguir tres etapas diferentes.

1. Montaje de los cajones sobre los pilares
2. Colocación de las costillas sobre los cajones
3. Colocación de prelosas inferiores y superiores y hormigonado de la losa sobre las pirámides.

El escenario ideal consistiría en realizar estas tres etapas de montaje de manera independiente, es decir, no colocar las costillas sin haber montado todos los cajones y lo mismo con las prelosas. Sin embargo, esta secuencia no es compatible con el ajustado plazo de ejecución exigido para la construcción de la cubierta. Debido a esto, se solaparán estas etapas en diferentes zonas de la cubierta. De manera general, los trabajos comienzan en el lado Norte y van avanzando hacia el lado Sur.

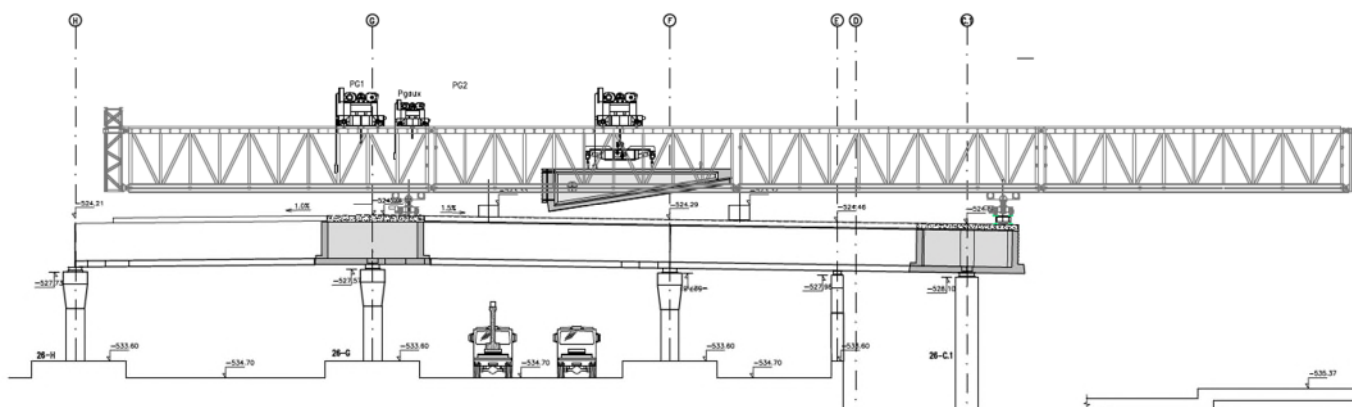
La configuración de la cubierta nos permite realizar este solape de tareas durante la construcción, pero a su vez, implica un control exhaustivo del equilibrio de las cargas, debido a

que el esquema resistente no es el mismo en todos los módulos dado que su grado de ejecución es distinto.

3.1 Colocación de los cajones

Para materializar la sección transversal de las vigas cajón, se emplean dos semicajones prefabricados con forma de L instalados con grúa. Los semicajones, trabajando de manera individual, únicamente tendrán que hacer frente a su peso propio durante la primera fase de construcción. En el momento en el que se hormigonan las juntas longitudinales y transversales, las parejas de semicajones quedan unidas pasando a trabajar las vigas con una sección en U. Posteriormente, se hormigona la losa superior de los cajones sobre prelosas colocadas también con grúa, cerrando la sección, para poder apoyar sobre estos las costillas y diagonales.

En algunos casos, debido a los huecos en la losa inferior y el cruce de los cajones longitudinales con los transversales, es necesario añadir apoyos provisionales (gatos de arena) para garantizar el equilibrio de los semicajones. Estos apoyos se colocan sobre los capiteles de las pilas o sobre torretas provisionales.



De la misma forma que con las costillas, se hormigona y postesa de tal forma que no se produzca el desequilibrio en las vigas cajón. La secuencia de hormigonado planteada en el diseño de ALVIPRE es la siguiente:

1. Colocación de prelosas en los pasillos centrales y las 2 primeras prelosas en el resto de las zonas.
2. Hormigonado hasta el primer frente de tesado (zona morada).
3. Tesado del primer frente y colocación del resto de prelosas.
4. Hormigonado hasta el segundo frente (zona roja).
5. Tesado del segundo frente y hormigonado hasta el último frente de tendones.
6. Retirada de torretas provisionales ubicadas sobre las costillas largas y hormigonado de la última zona hasta llegar al óculo (zona azul).

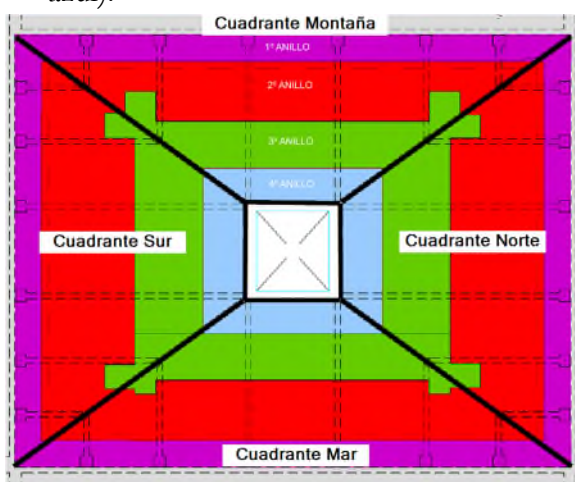


Figura 8. Frentes de postesado

4. Análisis del proceso constructivo mediante un modelo de cálculo evolutivo

Durante la construcción de la Cubierta Singular la estructura presenta diferentes configuraciones, las cuales es necesario estudiarlas en detalle para garantizar la viabilidad del proceso constructivo

Se trata de un proceso constructivo largo y complejo, dividido en numerosas fases en las que la diferencia de edad de los elementos

prefabricados y los hormigonados in situ, los efectos hiperestáticos producidos por el postesado y los desequilibrios de cargas, obligan a tener un alto control del comportamiento de la estructura en todas las fases. Además, a todo esto, hay que añadir que la construcción avanza de manera secuencial para reducir la duración del proceso. Es decir, antes de completar la ejecución de las vigas cajón de una pirámide, se comienza a colocar costillas en su pirámide contigua.

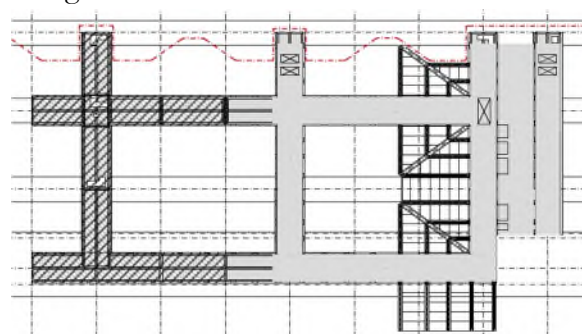


Figura 9. Montaje 1ª fase de costillas (cortesía de ALVIPRE).

En consecuencia, el disponer de un modelo de cálculo evolutivo resulta fundamental para poder analizar el comportamiento de la cubierta en los diferentes escenarios planteados en el diseño y ante las posibles modificaciones o ajustes que surgieran durante la construcción.

4.1. Descripción del modelo realizado

Para poder tener el control y analizar el detalle de todas las fases se ha realizado un modelo evolutivo en SAP200 con un tipo de *Load Case* específico denominado *Stage Construction*. Esta herramienta nos permite calcular cada una de las fases planteadas, pero teniendo en cuenta la deformación y rigidez de los elementos resultantes de la fase anterior. Cada una de las fases se calcula considerando su parte de estructura correspondiente, para posteriormente añadir los elementos de la siguiente fase sobre la estructura ya deformada.

Debido al hecho de que la Cubierta Singular de La Sagrera este formada por elementos prefabricados y una losa ejecutada in-

situ, junto con que el proceso constructivo es largo y se va a ejecutar en varias fases, ha sido importante tener en cuenta los diferentes niveles de retracción de los elementos en cada fase. En el caso que nos atiende, la losa es la principal responsable de la retracción, ya que los elementos prefabricados experimentan gran parte de ésta antes de ser colocados. Un modelo evolutivo, además de tener en cuenta estas edades de los hormigones, nos permite cambiar de manera sencilla la duración de cada fase de cálculo, para adaptarnos a la evolución real de la obra obteniendo resultados más precisos.

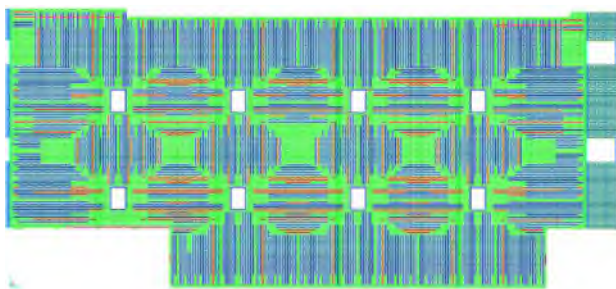


Figura 10. Vista en planta del modelo

Con el objetivo de optimizar el modelo, se ha optado por crear una malla lo más homogénea posible, sacrificando en cierta medida la precisión en la geometría de la cubierta. Esta homogeneidad se traduce en una mayor consistencia de los resultados simplificando los posibles errores y, además, permite más agilidad a la hora de hacer modificaciones

5. Aspectos clarificados con la ayuda del modelo evolutivo

5.1 Distribución de tensiones en la losa

Con la finalidad de evaluar la influencia del proceso constructivo en el diseño, se ha realizado una comparación entre los resultados arrojados por el modelo evolutivo y un modelo general “cimbrado”. En dicho modelo general se aplican todas las cargas directamente, sin tener en cuenta las fases. Para estudiar esta influencia,

se comparan los resultados cuando se acaba de ejecutar la losa, es decir, en la fase en la que los pesos propios de todos los elementos estructurales están presentes.

La Figura 11 presenta las compresiones (en verde y amarillo) y las tracciones (en azul) obtenidas en ambos modelos; a la izquierda, el modelo evolutivo, y a la derecha, el modelo general.

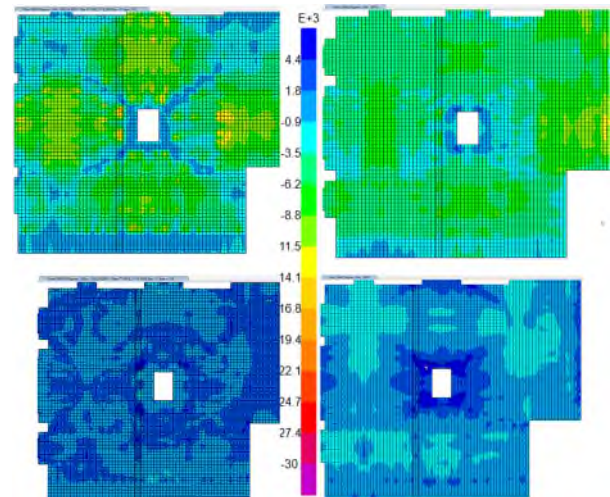


Figura 11. Compresiones y tracciones al acabar la última fase del hormigonado la losa de P4.

Aplicar, en el modelo, el postesado de manera secuencial implica que, en el momento de tesar los cordones, no hay losa ejecutada por detrás del anclaje activo y, en consecuencia, no aparecen tracciones detrás de dicho anclaje, por no haber hormigón. Únicamente recibirá las tracciones del postesado a largo plazo debido a la redistribución de esfuerzos. Sin embargo, debido a la geometría de la losa y la orientación de los cordones, cuando se tesan los cordones de los cuadrantes Norte y Sur, para equilibrar las compresiones introducidas, se generan unas tracciones en los cuadrantes Mar y Montaña en la misma dirección que las compresiones introducidas por los cordones. Este efecto se intensifica en el modelo evolutivo, siendo las tracciones de compatibilidad obtenidas mayores.

En definitiva, estos resultados ponen de manifiesto que, al aplicar el pretensado de una vez sobre la configuración final de la estructura, se produce un mayor reparto de la acción del

postesado, tanto en tracciones como en compresiones.

5.2 Edad óptima de retirada de los apeos intermedios

Adelantar el momento en el que se retiran las torretas para apeo de las costillas suponía un importante ahorro para la obra, por el coste de alquiler implícito en las mismas. Adicionalmente, con la retirada de las torretas, el nivel de Alta Velocidad situado bajo la cubierta resultaba más diáfano, permitiendo trabajar en él y acometer las tareas de montaje de vía con más facilidad, mientras se continuaba con la ejecución de la cubierta trabajando únicamente por su parte superior.

Por estos motivos, se planteó estudiar la posibilidad de retirar las torretas en fases más tempranas a las definidas en el diseño original. Las tres situaciones estudiadas fueron las siguientes:

- Situación 0 [S0]: Situación contemplada en diseño. Retirada de torretas después de hormigonar el tercer frente de tesado.
- Situación 1 [S1]: Retirada de torretas después de hormigonar el segundo frente.
- Situación 2 [S2]: Retirada de torretas después de haber tesado el primer frente de hormigonado.

Se representaron estas secuencias en el modelo evolutivo para estudiar la viabilidad de retirar las torretas antes de lo previsto. Se analizaron las afecciones sobre la losa y las costillas que forman las pirámides.

El momento en el que se retiran las torretas apenas influye en el armado de la losa postesada. Las tensiones y esfuerzos máximos que experimenta la losa varían poco entre las tres situaciones, siendo viable esta operación desde el punto de vista del armado de la losa.

Sin embargo, las costillas sí que se ven considerablemente afectadas por el momento en el que se retira el apeo de las costillas más largas. Las costillas fueron diseñadas para estar apeadas

en todas las fases de hormigonado, por lo que el armado se concentra en la cara inferior de éstas. Retirando las torretas en fases tempranas, se genera una flexión negativa, no contemplada en el diseño original, para la que no se cuenta todavía con la losa y su postesado y únicamente hay disponibles 5 Φ 25 en cabeza. Después de realizar las verificaciones pertinentes se llegó a la conclusión de que no era recomendable retirar las torretas antes de lo definido en S0.

Además de permitir descartar la retirada temprana de las torretas, el modelo evolutivo fue muy útil para estimar la posición final de las costillas, especialmente las de los vuelos de los extremos mar y montaña, y calibrar las contraflechas indicadas por el diseñador. Como se comenta en el apartado 4.1, el modelo evolutivo proporciona resultados teniendo en cuenta la variación de la rigidez de la estructura a medida que avanza la construcción.

En el momento de colocar las costillas sobre los cajones, se corrige en obra la posición de éstas para dejarlas en su posición correcta. Con el modelo evolutivo podemos calcular la flecha en cada una de las fases y determinar su valor final, teniendo en cuenta la corrección realizada en obra en el momento de conectarlas a los cajones.

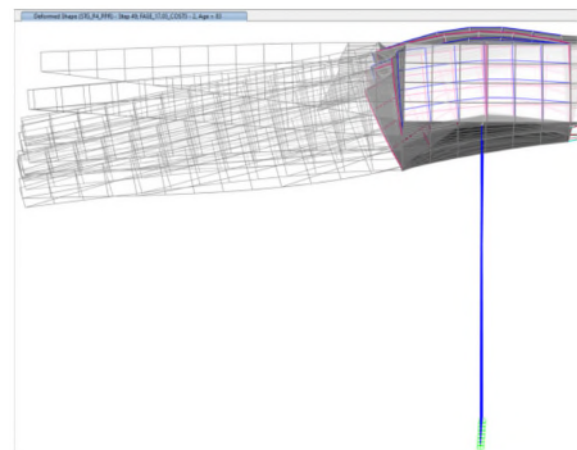


Figura 12. Deformación costillas debido al giro del cajón.

En la Figura 12 se aprecia el giro de las costillas en el momento que se colocan sobre el cajón. Esta deformación es la que se corrige en obra para dejar las costillas en la posición adecuada.

Con ayuda del modelo evolutivo se ha podido calcular con mayor precisión esta deformada, facilitando la ejecución de las fases posteriores.

6. Conclusiones

Como es bien sabido, en el diseño de cualquier estructura ejecutada mediante procesos constructivos evolutivos, además de verificar el comportamiento de ésta en su situación final en servicio es fundamental analizar el comportamiento de la estructura durante la construcción. El uso combinado de elementos prefabricados y hormigonados in situ, junto con la complejidad del proceso constructivo, refuerza la necesidad de un estudio detallado de la construcción de la Cubierta Singular de La Sagrera.

Empleando un modelo evolutivo hemos podido realizar un cálculo que tiene en cuenta las deformaciones previas y las características geométricas y mecánicas de la estructura, en cada una de las fases.

Gracias al modelo desarrollado, se ha analizado adecuadamente la evolución y distribución de tensiones producidas por el postesado secuencial de la losa, lo que ha permitido estudiar la viabilidad de diferentes alternativas del proceso constructivo

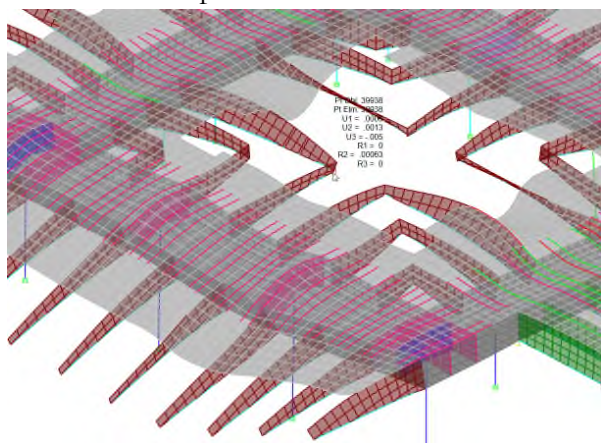


Figura 13. Deformación pirámide 4 después de hormigonar el 2º frente, [S1].

Otra ventaja de emplear un modelo evolutivo y que ayuda considerablemente en el seguimiento de la construcción, es la posibilidad

de evaluar en cada instante la deformación de la estructura. Así, se ha podido comprobar que las contraflechas aplicadas en obra son las adecuadas para conseguir que, en situación final, la posición de las costillas sea la esperada. La naturaleza del proceso constructivo, con hormigonado y postesado de anillos concéntricos y presencia de apeos temporales, tiene un impacto significativo en los movimientos de las costillas durante la construcción. Sin ayuda de un modelo evolutivo, el cálculo de estas flechas sería más complejo y tendría mayor incertidumbre.

Agradecimientos

El análisis del proceso constructivo y la posterior ejecución de la obra objeto de este artículo son el resultado del esfuerzo colectivo de un gran número de profesionales de Acciona Ingeniería.

Es importante destacar la colaboración y dedicación de Juan De Dios Arevalo, en oficina técnica, y del resto de miembros de la U.T.E. Asimismo, reconocer la valiosa colaboración de los miembros de ALVIPRE encargados del diseño de la cubierta.

Referencias

- [1] Proceso constructivo Cubierta Singular de la Estación de La Sagrera, ALVIPRE, 2023