

La nueva cubierta del Estadio El Sadar, Club Atlético Osasuna. Diseño de la estructura metálica que sustenta el graderío y la cubierta de nueva construcción.

The new roof of the Club Atlético Osasuna's El Sadar Stadium. Design of the steel structure that supports the stands and the newly built roof.

Raúl González Guijarro^a, Alberto Brusa^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin Spain. Jefe de Proyectos Senior. raul.gonzalez@tylin.com

^b M.Sc. Civil Engineer. TYLin Spain. Director de la División de Edificación y Obra Civil. alberto.brusa@tylin.com

RESUMEN

El diseño de la estructura de la nueva cubierta del estadio El Sadar se engloba dentro de la actuación de renovación del Estadio realizada entre los años 2019-2021, según concurso de proyecto y obra ganado por el estudio de arquitectura OFS architects y la constructora VDR. Se exponen en este artículo las líneas principales del diseño de la estructura metálica de la nueva cubierta y del graderío superior, que han permitido ampliar la capacidad del estadio hasta aproximadamente 24.000 asientos. El estadio El Sadar fue elegido en 2022 Mejor estadio del mundo por la web 'Stadium Database', un portal dedicado a este tipo de infraestructuras a nivel internacional.

ABSTRACT

The design of the structure of the new roof of the El Sadar stadium is part of the refurbishment works of the Stadium carried out between 2019-2021, according to a design and construction competition won by the studio 'OFS architects' and the construction company 'VDR'. This paper presents the keys to the design of the metal structure of the new roof and T2 stand, which have allowed the stadium's capacity to be increased to approximately 24,000 seats. The El Sadar stadium was chosen in 2022 as the Best Stadium in the World by the website 'Stadium Database', a specialized portal on this type of infrastructure at an international level.

PALABRAS CLAVE: Cubierta de estadio, celosía metálica, cubierta volada, graderío, viento.

KEYWORDS: Stadium roof, steel truss, cantilever roof, stand, wind.

1. Historia del estadio El Sadar

El Club Atlético Osasuna fue fundado en 1920 fruto de la fusión del Sportiva Football Club y del New Club. Dos años después de su fundación, en 1922, el Osasuna inauguró el estadio San Juan, donde jugó hasta 1967.

En 1967 el club construyó un nuevo estadio, al que dio el nombre del río que atraviesa la ciudad de Pamplona y que pasa muy cerca del estadio: El Sadar.



Figura 1. Fotografía de El Sadar inaugurado en 1967

En 1989 se realizó una importante remodelación del estadio con la construcción de la tribuna preferente en la zona sur.



Figura 2. Fotografía de El Sadar tras la remodelación de 1989

En 2019, VDR con OFS y FS resultan adjudicatarios del proyecto y construcción del nuevo graderío y cubierta en zonas norte, este y oeste, manteniendo la cubierta sobre la tribuna preferente en la zona sur.



Figura 3. Representación gráfica del diseño de estadio del proyecto de VDR-OFS-FS de 2019

A final de 2019, VDR, OFS, Valladares Ingeniería (a cargo del diseño de la estructura de hormigón armado) y TYLin, en ese entonces IDEAM (a cargo del diseño de la cubierta y el graderío metálicos), proponen al Club una modificación del proyecto consistente en la eliminación de la antigua cubierta sobre la tribuna preferente y la ejecución de una nueva cubierta 360° (cubierta en anillo) sobre el perímetro completo del estadio. El Club Osasuna aprobó esta última propuesta de cubierta, que fue desarrollada por OFS y TYLin (IDEAM) durante el primer semestre de 2020. Tras esta remodelación, el estadio que en el diseño inicial de 1967 contaba con 7.000 asientos, pasa a tener 23.516.



Figura 4. Diseño de nueva cubierta propuesta por TYLin (IDEAM) y VDR-OFS-VI

2. Descripción general del Proyecto de nueva grada y cubierta en anillo.

La remodelación del estadio El Sadar proyectada en 2019, plantea la adición de un nuevo graderío ampliando el número de asientos del estadio y propone una nueva envolvente de cubierta y fachada abarcando unas dimensiones exteriores de unos 175 x 135 m sobre un “anillo” sensiblemente rectangular alineado con el campo de juego, de unos 110 x 70 m. La altura total de la cubierta se eleva hasta los 34 m y plantea unas ménsulas en planos verticales de aproximadamente 30 m, conectadas a columnas principales cada 5,50 m que respetan las alineaciones del estadio original y de su última reforma del año 1988.

En la zona preferente (sur) la estructura metálica de la nueva cubierta diseñada por OFS+TYLin (IDEAM), se sustenta sobre la estructura de hormigón armado del graderío que se conserva.

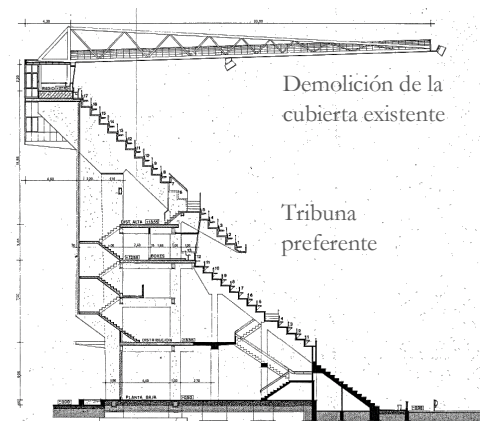


Figura 5. Actuación en zona preferente (sur), apoyo de la nueva cubierta sobre el graderío existente

En las zonas este, norte y oeste, la estructura metálica del graderío y la cubierta se sustenta, a una cota aproximada de 15 m desde cimentación, sobre la nueva estructura de hormigón armado que rodea perimetralmente al graderío inferior.

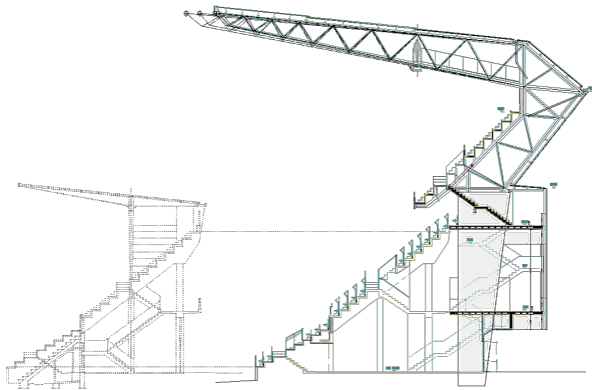


Figura 6. Nueva estructura de grada norte 2020 (derecha) junto a estructura anterior a 2020 (izquierda)

3. Definición de la geometría y de las acciones actuantes sobre la estructura metálica

3.1 Geometría de gradas y cubierta

La geometría de la cubierta se adapta por un lado a la cota de coronación del perímetro exterior de la cubierta preferente al sur y por otro a la cota de coronación exigida al perímetro exterior de la nueva cubierta en las zonas este, norte y oeste. Esto da como resultado la geometría asimétrica que presentan los alzados este y oeste.

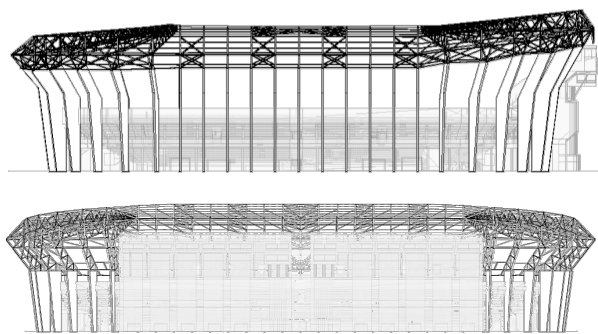


Figura 7. Alzado este/oeste (arriba) junto a alzado preferente (abajo)

La distribución en planta de celosías adoptada es la representada en la imagen siguiente:

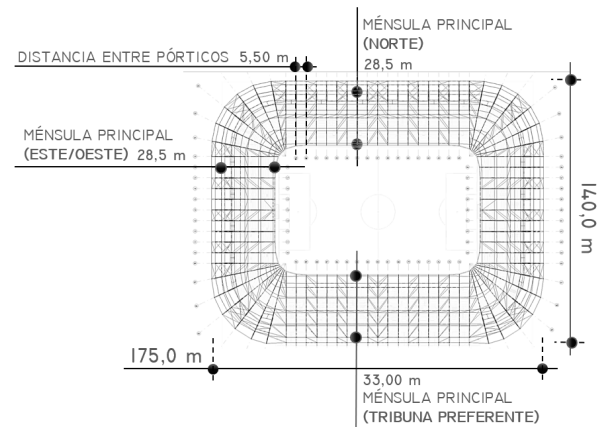


Figura 8. Esquema en planta de nuevo diseño de cubierta en anillo

La geometría de las celosías tipo definidas en los tramos rectos este/norte/oeste de 28,5 m de vuelo interior, se presentan en la siguiente imagen, superpuestas con la cercha tipo definida en el tramo sur de 33 m de vuelo. En las zonas curvas en las esquinas del estadio, aparece una transición con cerchas de mayor vuelo.

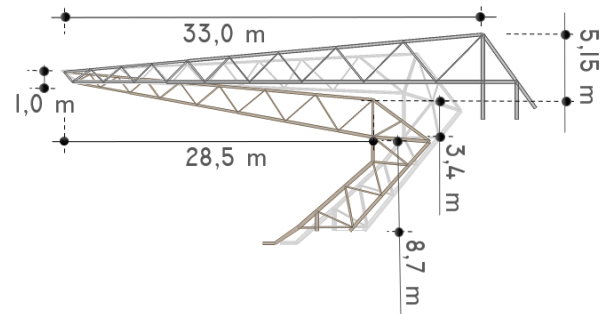


Figura 9. Superposición de cercha de cubierta de zonas este/norte/oeste con cercha de cubierta de zona sur

3.2 Acciones sobre gradas y cubierta

Las acciones a que se ve sometida la estructura metálica de grada y cubierta se componen de acciones gravitatorias, acción del viento, acción térmica y sismo.

3.2.1. Acciones gravitatorias

Las acciones gravitatorias en cubierta incluyen el peso propio de la estructura metálica, el peso de la cubierta de panel “sándwich” o policarbonato,

el peso de las pasarelas, *skycam*, videomarcador, la sobrecarga de mantenimiento y la sobrecarga de nieve.

Las acciones gravitatorias en las gradas incluyen el peso propio de la estructura metálica, el peso de las gradas prefabricadas, asientos, peldaños, pódioms, barandillas y la sobrecarga del público.

3.2.2. Acción del viento

La determinación de la acción del viento en la fase en que VDR-OFS y FS desarrollaron el diseño que resultó adjudicatario del Proyecto y obra de la remodelación, se llevó a cabo mediante un ensayo de túnel de viento realizado en la E.T.S. de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio.

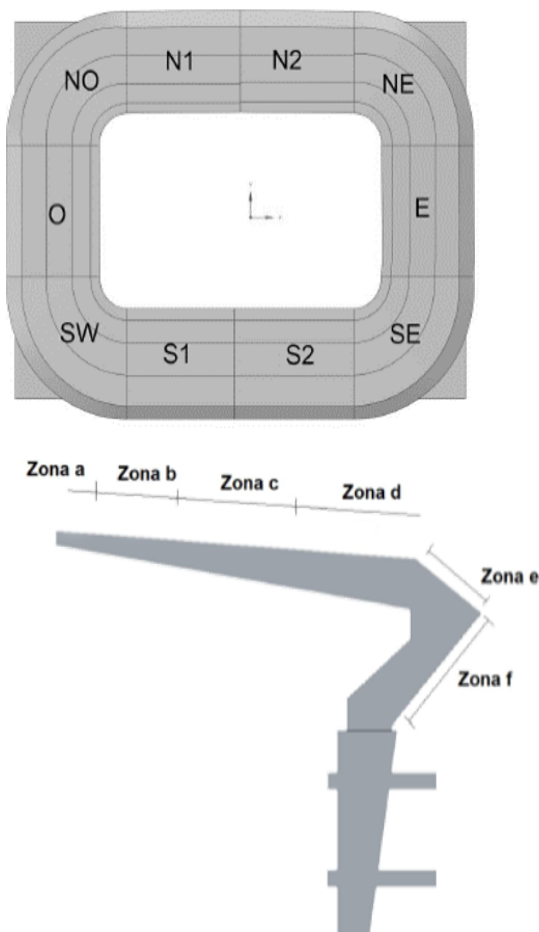


Figura 10. Identificación de discretización de zonas de cubierta en planta y sección

Durante la fase de diseño de la cubierta en anillo propuesta por TYLin (IDEAM) y VDR-OFS-VI finalmente ejecutada por VDR, la determinación de las cargas de viento se realizó mediante una

modelación numérica realizada en Ansys Fluent. En este modelo se consideraron 8 direcciones de viento y se obtuvieron los coeficientes de presión y succión en los diferentes sectores en que se dividió la estructura metálica. Los sectores en que se dividió la estructura metálica son el resultado de la definición de 10 zonas en planta y 6 zonas en sección, según refleja la figura 10.

El efecto condicionante en el dimensionamiento de la estructura metálica fue el de la succión. De forma representativa se muestran en la figura 11 los valores del coeficiente de succión que, multiplicados por la presión básica de viento, dan como resultado la carga de viento aplicada en las zonas sur, este, norte y oeste, debido a la acción del viento de 0°, 90°, 180° y 270° respectivamente, en las zonas a, b, c y d definidas en la sección.

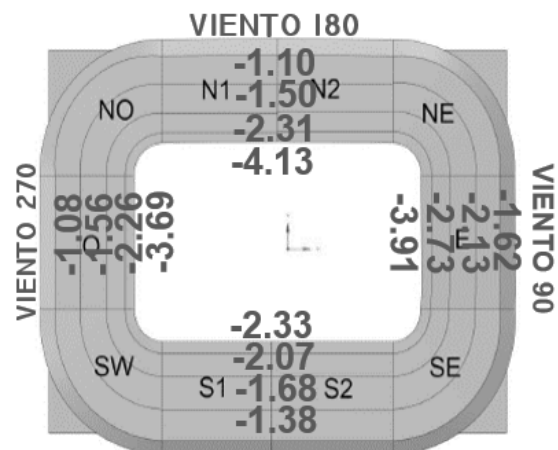


Figura 11. Coeficientes de succión de viento en cubierta

3.2.3. Acción térmica

Para el análisis del efecto del calentamiento y del enfriamiento en la estructura, se aplicó el apartado 6 de la norma UNE-EN 1991-5, correspondiente a puentes. Si bien el anejo nacional español no lo especifica, el anejo francés sí recoge que debe ser el anejo de puentes y no el de edificios el que aplique a este tipo de estructuras.

El hecho de existir juntas de dilatación en la estructura de hormigón bajo las gradas y no existir juntas en la estructura metálica, requirió la

modelación de ambas estructuras con sus juntas y con los diferentes incrementos de temperatura establecidos por la norma para estructuras de acero y de hormigón.

3.2.4. Acción sísmica

Se evaluó el efecto de la aceleración sísmica sobre la estructura, tomando como referencia los valores de aceleración de cálculo obtenidos a partir de la norma NCSE-2002, no siendo condicionante en el dimensionamiento de los elementos de la estructura metálica.



Figura 12. Ejecución de cerchas principales de graderío elevado, tramo central

4. Análisis estructural

Para el análisis de la estructura se realizó un modelo paramétrico en AutoCAD 3D que permitió definir la geometría de todas las cerchas y arriostramientos. Este modelo geométrico se importó desde el programa ROBOT, utilizado para el dimensionamiento de la estructura metálica. Al mismo tiempo, la exportación del modelo en formato ifc, permitió la importación desde el programa Revit, para generación de un modelo BIM de la estructura. El flujo de trabajo utilizado permitió la verificación automatizada de la documentación del diseño final para el 100% de la estructura metálica (algo más de 6.000 barras), así como la creación desde ingeniería del modelo de fabricación a utilizar por el taller encargado de la fabricación.

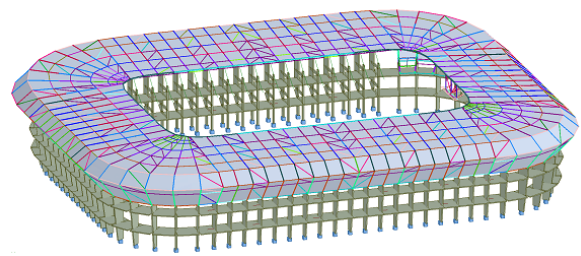


Figura 13. Modelo de cálculo de cubierta y estructura inferior de hormigón armado

El esquema estructural general definido en la estructura metálica se resume en:

- Cerchas principales flectando en su plano frente a cargas gravitatorias y de viento.
- Arriostramientos en plano superior e inferior que dotan al conjunto de estabilidad en dirección perpendicular a las cerchas principales y que limitan el pandeo de sus cordones.
- Anillo interior que garantiza la compatibilidad entre extremos de ménsulas (solicitado principalmente frente a la acción de la temperatura).

4.1 Análisis de estabilidad global

En relación con la estabilidad en dirección perpendicular a las cerchas, se establece una distribución de diagonales transversales tal que, con el mínimo número de elementos posibles, se garantice la estabilidad global de la estructura y de los cordones en fase definitiva. Adicionalmente, este esquema de diagonales colabora en la estabilidad local durante el montaje de la estructura, el cual se plantea en grupos de tres cerchas.



Figura 14. Ejecución de cerchas principales de cubierta, en grupos de tres

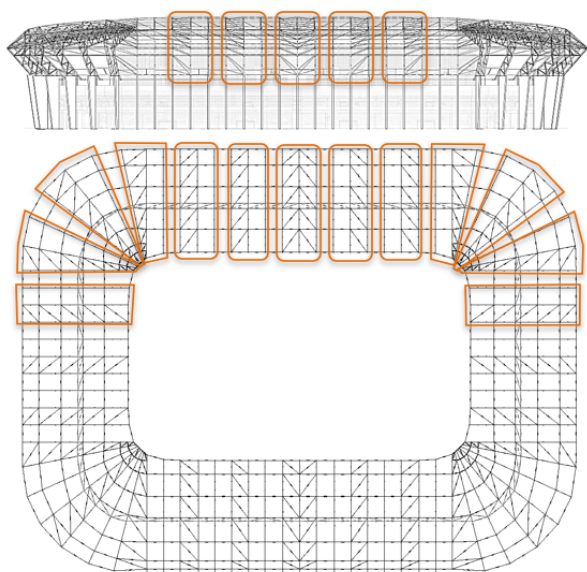


Figura 15. Esquema de grupos de tres cerchas durante montaje (zona norte)

La estabilidad global de la estructura se verifica siguiendo los criterios del apartado 5.2.1(3) de la norma UNE-EN-1993-1-1, comprobando que los valores de $\alpha_{cr} = F_{cr}/F_{Ed}$ son mayores o iguales a 10 para los distintos modos de pandeo global de la estructura.

4.2 Análisis de cerchas principales

Las cerchas principales están formadas por cordones y diagonales HEB con su alma en el plano vertical. Los arriostramientos transversales se materializan mediante tubos cuadrados.

Tras la verificación de los α_{cr} de la estructura, superiores en todos los casos a 10, se procede a un análisis de primer orden de la estructura (linealidad geométrica) y se realiza la verificación de la resistencia de los perfiles en ELU considerando los efectos del pandeo local de cada barra (según UNE-EN 1993-1-1).

El análisis en ELS se extiende a las siguientes comprobaciones:

- Verificación de deformaciones (verticales y horizontales), adoptando como referencia los límites establecidos en el Código Técnico de la Edificación (CTE) y en Eurocódigo (UNE-EN-1992-1-1). Tomando como valor de L el

vuelo de la ménsula de las cerchas, cuando se considere la apariencia de la obra, la verificación se dirige a limitar la flecha máxima en combinación cuasi permanente (pp+cm) al valor $2L/300$, teniendo en cuenta, según UNE-EN-1992-1-1, que podrá compensarse este efecto mediante la aplicación de contraflecha, limitando la contraflecha a un valor $L/250$.

Adicionalmente, para la verificación de las deformaciones verticales debidas a la sobrecarga de viento o nieve, al no estar recogida en CTE o Eurocódigo una limitación expresa, se utiliza como referencia la existente en ACI-318:

Flat roofs not supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections – Immediate deflection due to live load - $l/180$, que para el caso de las ménsulas de cubierta es $2L/180$.

En el caso de las flechas horizontales, se añade la verificación de flecha cuasi permanente al valor $H/500$.

- Verificación de vibraciones en cubierta, comprobando que su valor es superior a 3 Hz; valor límite recomendado por IDR para asegurar se evitan problemas aerodinámicos de acoplamiento.
- Verificación de vibraciones en graderíos, limitando la frecuencia de vibración de la estructura principal del graderío a 12,5 Hz y la frecuencia de la ménsula en el extremo inferior del graderío (la “nariz”) a 4,5 Hz, Valor recomendado para estructuras de estadios deportivos “Dynamic performance requirements for permanent grandstands subject to crowd action”, The Institution of Structural Engineers, 2001.

4.3 Análisis de uniones

Se planteó la ejecución de uniones soldadas en todos aquellos elementos que podían ser ensamblados en taller y transportados a obra. Todas las uniones que se ejecutaron en obra se diseñaron como uniones atornilladas. Siguiendo

este criterio, se estableció con el taller, el despiece por transporte y montaje que se muestra en la figura 15.

**ARRIOSTRAMIENTO
ENTRE CELOSÍAS
UNIONES ATORNILLADAS
EJECUTADAS EN OBRA**

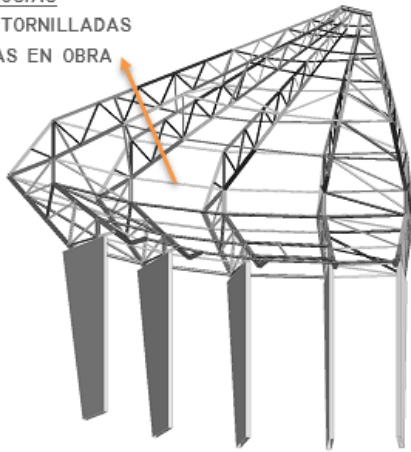


Figura 16. Esquema de celosías principales y arriostramientos en esquina de estadio

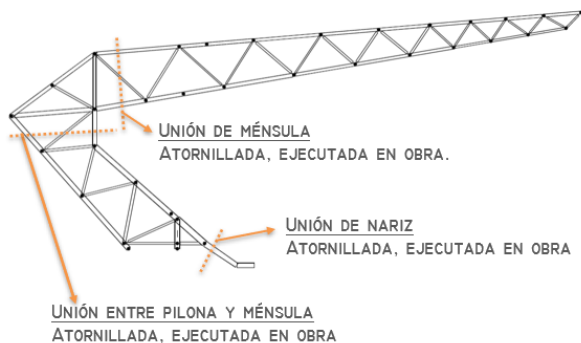


Figura 17. Esquema de despiece de celosía principal para transporte y montaje

El diseño de las uniones se realizó mediante el programa IDEA Statica, obteniendo del modelo de cálculo 3D, para cada tipo de unión y para cada perfil que llega al nudo en estudio, los esfuerzos pésimos de cada sollicitación (axiles, momentos flectores y cortantes) y sus concomitantes.

Las tipologías principales de uniones dimensionadas se muestran en la figura 18.

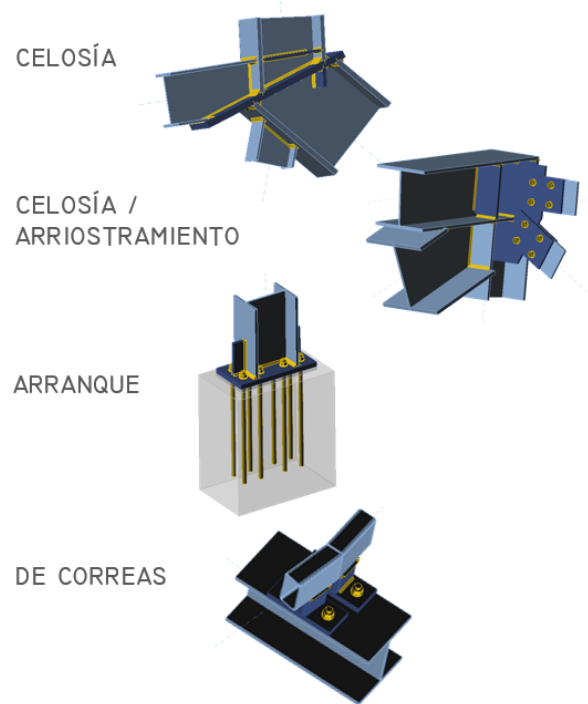


Figura 18. Tipologías de uniones diseñadas

Para los nudos de las celosías aparecen 21 tipologías de nudos diferentes, con hasta 5 subtipos en cada caso, en función de las barras de arriostramiento que llegan a la unión, sumando un total de 95 nudos de celosía principal analizados. Los 21 tipos indicados surgen de desarrollar para todas las celosías, los casos mostrados en la figura 19.

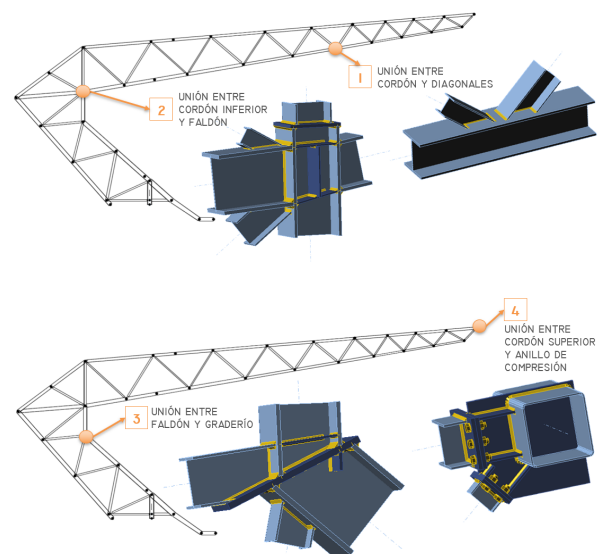


Figura 19. Tipologías de uniones de celosía principal

En el modelo de cada unión se verifica el equilibrio del nudo, al tiempo que se comprueba, para cada una de las barras, cartelas y rigidizadores que forman el nudo y para cada uno de los medios de unión (soldaduras o tornillos) el estado tensional y de deformaciones para todas las combinaciones de cargas consideradas en el nudo.

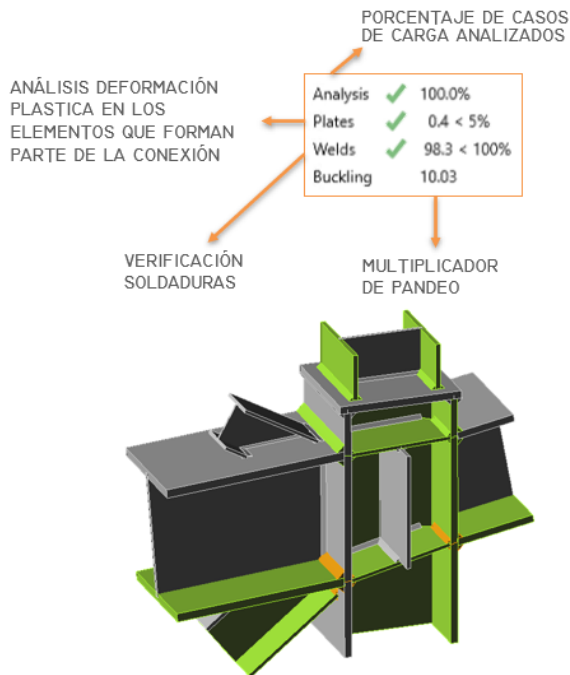


Figura 20. Detalle de modelo de cálculo de unión

Adoptando la recomendación de la norma UNE-EN-1993-1-5, apartado C8, se verifica que, en aquellos puntos en que se alcance el límite elástico del material, el equilibrio del nudo se consigue con deformaciones plásticas inferiores al 5%.



Figura 21. Detalle de cubierta y estructura de video marcador

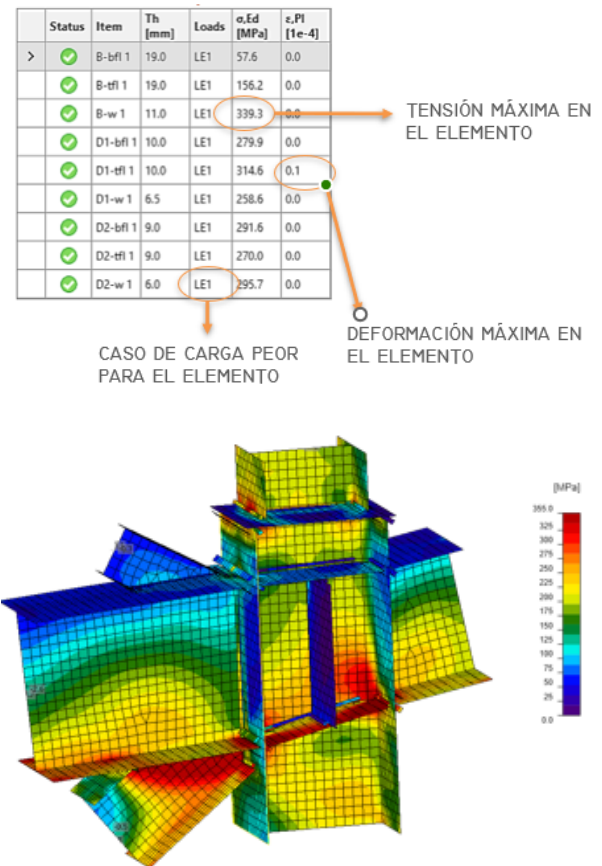


Figura 22. Verificaciones de tensiones y deformaciones en unión

5. Conclusiones

El estadio El Sadar, construido en 1967 y remodelado en 1989 con la ampliación de la grada sur (zona preferente), es objeto de una nueva remodelación en 2020.

El nuevo estadio, con unas dimensiones en planta de 175 x 135 m y una altura total de 34 m, pasa a tener tras esta ampliación una capacidad aproximada de 24.000 asientos.

El diseño del estadio desarrollado en 2020 incluye un nuevo nivel gradas en las zonas este, norte y oeste y una nueva envolvente de cubierta y de fachada en todo el perímetro del estadio.

El graderío y la cubierta se resuelven mediante estructura metálica, con pórticos situados cada 5,5 m en planta, formados por una celosía que arranca sobre la estructura de hormigón armado y asciende hacia la fachada, formando un ángulo

aproximado de 45° con la horizontal, sustentando al nuevo graderío.

Mediante una transición en la parte superior, este tramo recto de celosía pasa a formar la cercha volada que sirve de apoyo a la cubierta. La cubierta presenta distintas longitudes de vuelo interior, desde los 28,5 m en los tramos este, norte y sur hasta los 33,0 en el tramo sur, aumentando estas longitudes en las zonas de transición en las esquinas del estadio.



Figura 23. Vista panorámica de cubierta sobre graderíos

Se han descrito en este artículo la geometría y las acciones que han servido de base al análisis estructural, desarrollando de forma general los criterios de estabilidad global y de dimensionamiento en Estado Límite de Servicio y en Estado Límite Último seguidos en el diseño. Se han descrito igualmente los principales criterios constructivos y los detalles de uniones considerados, así como los criterios seguidos en el diseño y verificación de dichas uniones.



Figura 24. El Sadar durante un partido de fútbol tras la remodelación del estadio

Un total de aproximadamente 1.125 t de metal dieron forma a esta estructura en un proyecto de 5 meses, desarrollado por un gran equipo, casi en su totalidad durante el período del confinamiento.



Figura 25. Foto aérea de El Sadar tras la finalización de las obras