

Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Diseño y construcción de la estructura de la cubierta fija

Renovation of the Santiago Bernabéu Stadium. Design and Construction of the Fixed Steel Roof

José Martínez Salcedo^{a,*}, José Enrique Muñoz García^a y Santiago del Río Rodríguez^a

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

Recibido el 28 de octubre de 2024; revisado el 30 de diciembre de 2024, aceptado el 4 de mayo de 2025

RESUMEN

En este artículo se describen los aspectos más singulares del diseño de la estructura de la cubierta fija del Estadio Santiago Bernabéu, así como sus estructuras de apoyo: en el oeste, las dos nuevas torres de la Castellana, y en el este, los dos péndulos biarticulados. El esquema estático que se configura permite trasladar el conjunto de las nuevas cargas a la cimentación sin hacer intervenir a la estructura del estadio preexistente. El diseño lo ha condicionado el proceso de montaje concebido para evitar toda interferencia con el normal funcionamiento del estadio. Se describen la secuencia de operaciones: avances en voladizo, izados de cerchas, traslado de paneles completos, etc. así como los medios necesarios, desarrollados para lograr su construcción desde fuera del estadio.

PALABRAS CLAVE: Cubierta fija, acero de alta resistencia, heavy lifting, avance en voladizo, traslado de módulos.

©2025 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

ABSTRACT

This article describes the most unique aspects of the design of the fixed roof structure of the Santiago Bernabéu Stadium, as well as its supporting structures. In the West, the two new towers of Castellana, and in the East, the two biarticulated pendulums. The configured static layout allows the transfer of the new loads to the foundation without affecting the pre-existing stadium structure. The design has been conditioned by the assembly process conceived to avoid any interference with the normal operation of the stadium. The sequence of operations is described: cantilever erection, lifting of trusses, translation of complete panels, etc. as well as the necessary means developed to achieve its construction from outside the stadium.

KEYWORDS: Fixed roof, high strength steel, heavy lifting, cantilever erection, roof panel translation.

©2025 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

* Persona de contacto / Corresponding author:
Correo-e / e-mail: jmartinez@fcc.es (José Martínez Salcedo)

Cómo citar este artículo: Martínez, J., Muñoz, J.E., del Río, S. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Diseño y construcción de la estructura de la cubierta fija. *Hormigón y Acero*. 76(S1):65-94. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3979>

1. INTRODUCCIÓN

El estadio Santiago Bernabéu ha sido testigo de una total transformación con la instalación de la nueva cubierta fija junto con su cubierta retráctil. Este innovador techo, no solo protege a los espectadores de las inclemencias del tiempo, sino que también permite una mayor versatilidad en el uso del estadio. Con una estructura de acero que pesa más de 9000 toneladas y unas cerchas principales de 177 metros de longitud, la cubierta es un hito de la ingeniería moderna. Además de la mejora en la experiencia de los aficionados, esta

nueva cubierta también posiciona al Bernabéu como uno de los estadios más avanzados del mundo.

El hecho de llevar a cabo este proyecto permitiendo el uso del campo durante su ejecución fue uno de los mayores retos de la obra. Esto fue posible gracias a que el sistema de montaje formó parte del diseño de la estructura desde su inicio, influyendo y condicionando la concepción de la estructura en sí, es decir, la estructura fue diseñada para ser montada de este modo.

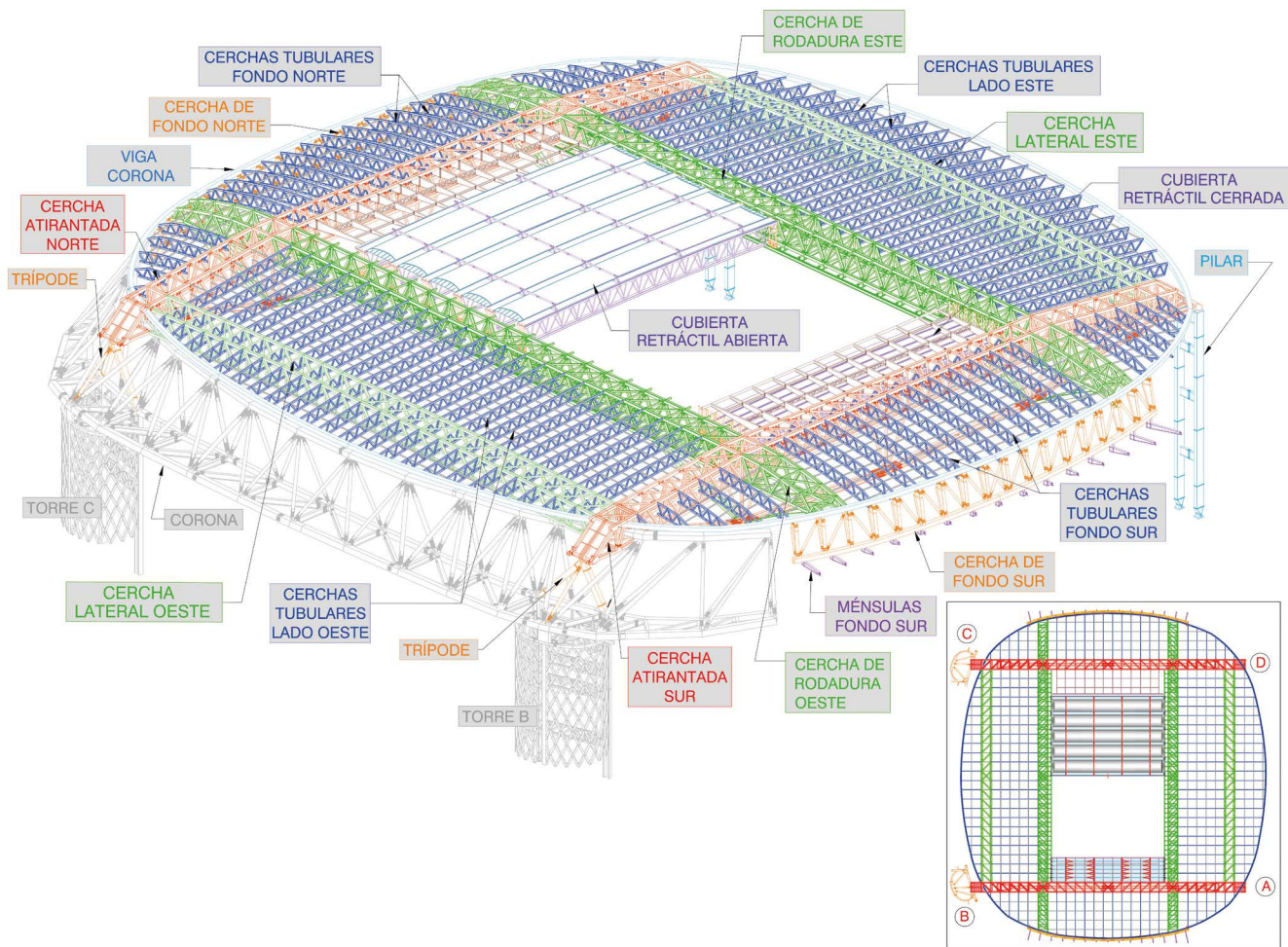


Figura 1. Vista general de la estructura metálica del estadio.

2. CRITERIOS BÁSICOS DEL DISEÑO

Dos son los criterios básicos que han dirigido este proyecto en relación con la propuesta original.

En primer lugar, este diseño permite que la totalidad de las cargas de la nueva cubierta se transmitan a elementos de nueva ejecución, evitando cualquier aumento de cargas en los elementos ya existentes del estadio. De este modo se evita la realización de refuerzos significativos de elementos estructurales incluyendo sus cimentaciones que ya han sido objeto de diversas modificaciones a lo largo de la vida del estadio.

En segundo lugar, la alternativa estructural finalmente desarrollada buscó asegurar/incrementar la operatividad de las instalaciones del estadio con respecto al diseño preexistente, en particular las relacionadas con el campo de juego y las gradas de espectadores, durante la ejecución de las obras, incrementando la continuidad de los trabajos y evitando puntos críticos, todo ello manteniendo la esencia arquitectónica del proyecto: la envolvente.

Para conseguir este objetivo, el montaje de la estructura de cubierta se realizó sin intervención en el campo ni en las gradas, llevándose a cabo completamente desde el exterior del estadio.

Es indudable que cuantos mayores son los condicionantes, más debe estar presente el proceso constructivo en la selección de la tipología estructural.

Todo lo indicado llevó a un esquema resistente que no solo fuese eficaz a estructura terminada, sino que también lo fuese en las etapas intermedias de construcción.

Es completamente imposible dissociar el diseño de la estructura del proceso constructivo.

3. UTILIZACIÓN DE ACEROS DE ALTA RESISTENCIA

En una cubierta de gran luz, como esta, la acción principal es el peso propio de la estructura, por lo que desde el principio se ha planteado la utilización de materiales y criterios de diseño que permitiesen optimizar dicho peso, lo que también redundó en una optimización de los medios de montaje requeridos que, aún de este modo, fueron muy importantes.

Se enumeran a continuación algunos de los aspectos de la fabricación que permitieron ajustar en el diseño y obtener una reducción del peso.

Tanto en el cordón superior de la cercha atirantada como en su tirante, los espesores alcanzan los 65mm. Tal y como se indicó en los planos y especificaciones, el material tendría un límite elástico y carga de rotura garantizados hasta este espesor, evitando de este modo la reducción con el espesor indicada en el EN 1993. Esto supone aproximadamente un 10% en estos espesores y aplica tanto a tracción como a compresión.

Todas las uniones en obra se realizaron mediante tornillos pretensados. En todos los elementos principales se utilizaron uniones mediante doble cubrejuntas. La comprobación de la sección resistente puede mejorarse en un 10% si la ejecución de los taladros garantiza una superficie libre de entallas. Esto se recoge en las nuevas versiones del EN 1993, aunque en aquel momento no estaba formalmente aprobado. Esta mejora aplica lógicamente a las uniones en tracción.

En compresión, se puede seleccionar una curva de pandeo más favorable asegurando que los bordes de las chapas empleadas en las alas de los cordones, secciones en H, estén oxicortados, no admitiéndose bordes que coincidan con los propios de la laminación.

Este oxicorte da lugar a que en los bordes de las alas existan tensiones residuales de tracción.

Es bien conocido que las curvas de pandeo son la forma en que EN 1993 introduce la distribución de tensiones residuales en el cálculo. Aunque las tablas siempre consideran lo más desfavorable bordes con tensiones residuales de compresión, en los ensayos y documentos de respaldo que sirvieron a su elaboración también se analizaron ambos casos.

Table 3.1.3.1

Column curve selection table for thick-walled Sections with $t > 40$ mm

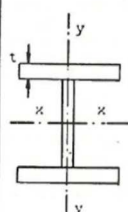
Type of Section	Column Curve
 Rolled H-Shapes - Buckling about x - x - Buckling about y - y	d
Welded H-Shapes built-up from rolled plates - Buckling about x - x - Buckling about y - y	c
Welded H-Shapes built-up from flame-cut plates - Buckling about x - x - Buckling about y - y	c

Figura 2. Curvas de pandeo.

En diferentes componentes de la estructura se utilizan aceros de diferente límite elástico: S355, S460 y S690.

- En chapas de cerchas principales, tirante y pilares:

S355J2 [EN10025-2] $\sigma_u=490\text{N/mm}^2$ $\sigma_y=355\text{N/mm}^2$ $t \leq 40\text{mm}$

S460M [EN10025-4] $\sigma_u=540\text{N/mm}^2$ $\sigma_y=460\text{N/mm}^2$ $t \leq 65\text{mm}$

S690QL1 [EN10025-6] $\sigma_u=770\text{N/mm}^2$ $\sigma_y=690\text{N/mm}^2$ $t \leq 65\text{mm}$

- En cerchas tubulares secundarias:

S355JOH [EN10219] $\sigma_u=490\text{N/mm}^2$ $\sigma_y=355\text{N/mm}^2$

- En tubos de arriostramiento y diagonales cercha retráctil:

S460NH [EN10210] $\sigma_u=540\text{N/mm}^2$ $\sigma_y=460\text{N/mm}^2$

Para hacer frente al riesgo de rotura frágil se consideró como temperatura mínima de servicio -10°C , por lo que el acero es-

tructural S355J2 se considera adecuado hasta espesores de 65 mm, y los aceros S460M y S690QL1 hasta el mismo espesor.

El adecuado aprovechamiento de estos aceros de alto límite elástico (se entiende por HSS $\sigma_y \geq 420\text{N/mm}^2$), en secciones armadas de espesor fuerte (se entiende por espesor fuerte $t > 40$ mm) requiere de esbelteces adimensionales reducidas (< 0.60), en las que tiene una marcada influencia la adecuada selección de la curva de pandeo.

Por otra parte, se tiene la influencia del propio límite elástico del material; es conocido que el límite elástico no incide en la distribución y magnitud de las tensiones residuales, y como, por otra parte, la influencia de las tensiones residuales depende de la relación entre las mismas y el límite elástico, es fácil concluir que las curvas de pandeo han de mejorar con el incremento del límite elástico.

Compression tests on Q690 steel slender H-sections

Concentrically loaded columns: Back analysis to EN 1993-1

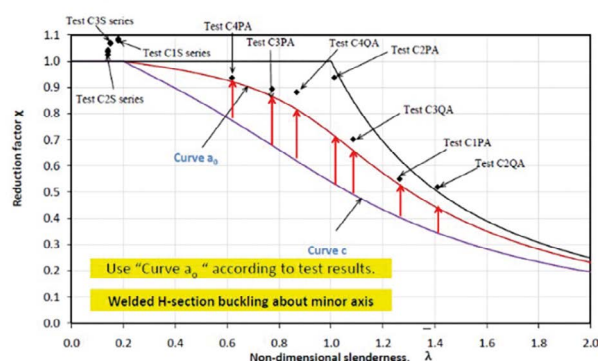


Figura 3. Test de compresión S690.

Del lado de la seguridad, no se ha considerado este efecto en este tipo de secciones, aunque existen estudios pasados y recientes al respecto que indican una gran mejora.

Es evidente que la combinación de estos criterios de diseño, asociado a procesos de fabricación más rigurosos y costosos y de materiales de alta resistencia ha permitido reducir muy significativamente el peso propio, la principal acción vertical en un estadio de gran luz.

Es conveniente indicar que, aunque se desarrolle más en el artículo sobre la cubierta retráctil, en este mismo sentido puede enmarcarse la utilización de composite híbrido, de CFRP (HS Carbon) y GFRP (E-Glass) (fibra de carbono/fibra de vidrio) en los cordones de las cerchas de la cubierta retráctil. [1]



Figura 4. Fibra de carbono.

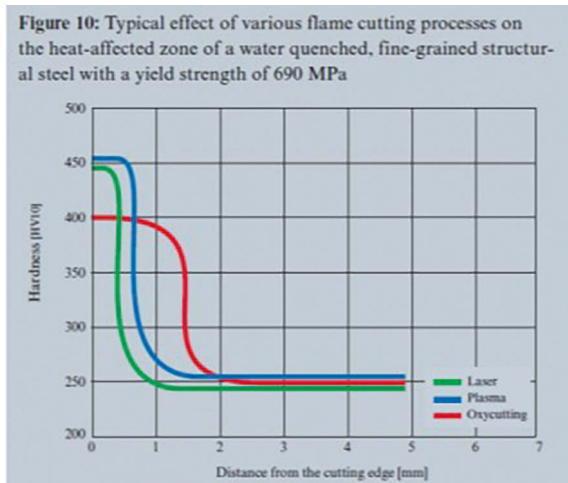


Figura 5. Tablas soldadura S690.

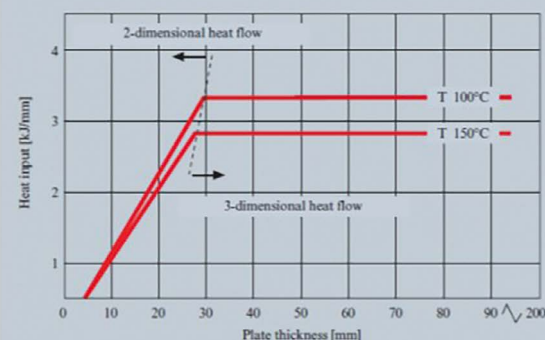
La utilización de este material muy resistente y ligero, pero costoso y con indudables complicaciones de fabricación y cálculo ha permitido una notable reducción de peso en la retráctil, del orden del 50% con respecto al diseño preexistente, pero sólo se justifica por cómo afecta a toda la estructura de la cubierta fija, sobre la que se apoya.

En cuanto a la utilización del acero S690 QL1, muy significativa, 3000t en espesores de 40, 50 y 65mm, es completamente novedosa.

Este acero que se obtiene por temple y revenido es soldable, pero requiere precauciones adicionales a las requeridas en aceros obtenidos por laminación controlada o termomecánica.

Figure 12: DILLIMAX 690: Heat input during welding in relation to plate thickness

(a) Maximum permissible heat input for $t_{8/5} < 20$ s



(b) Recommended work range

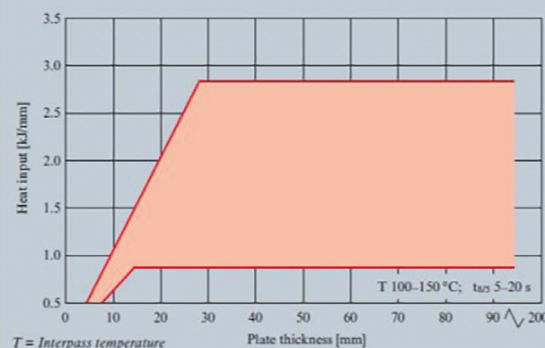


Figura 6. Tablas soldadura S690.

Pasada/ Pass	Proceso soldo/ Welding process	Tamaño metal de aporte/ Filler metal size (mm)	Corriente /Current			Velocidad avance/ Travel Speed (cm/min)	Aporte térmico/ Heat input (Kj/mm)
			Amperios/ Amps (A.)	Voltios Volts (V.)	Polaridad/ Polarity		
Raíz / Root (1 pass)	135	1,2	230	22,5	DC (E+)	13,3	1,86
2 – 26 pass	121	4	500 - 550	28 - 32	DC (E+)	50,0 – 55,8	1,13 – 2,64

Ensayos de tracción/Tensile Test:

Nº probeta / Sample Nº	Re (N/mm²)	Rm (N/mm²)	A%	Z%	Situación rotura/ Break location	Observaciones/ Comments
Requisitos/Requirements	690	770 a 940	---	---	---	---
Nº1	694	822	---	---	Soldadura – Dúctil/ Welding - Ductile	Informe / Report Nº 57431.20
Nº2	695	827	---	---	Soldadura – Dúctil/ Welding - Ductile	Informe / Report Nº 57431.20

Ensayos de impacto/Notch impact test:

Nº probeta/ Sample Nº	Localización entalla/ Temperature	Temperatura /Temperature	Valores/Values (KJ)			Promedio/Average (KJ)	Observaciones/Comments
			1	2	3		
Nº7	Weld	-60°C	65	57	63	62	Informe / Report Nº 57431.20
Nº8	HAZ	-60°C	48	47	41	45	Informe / Report Nº 57431.20

Ensayos de dureza: HV10/Hardness Test HV10

Nº línea/Line Nº	Localización/Location	Valores/Values			Promedio/Average	Observaciones/Comments
		1	2	3		
I	MB1	251	251	253	251,7	Informe / Report Nº 57431.20
	ZAT1	277	290	302	289,7	Informe / Report Nº 57431.20
	SOL	306	292	301	299,7	Informe / Report Nº 57431.20
	ZAT2	309	293	279	293,7	Informe / Report Nº 57431.20
	MB2	252	248	251	250,3	Informe / Report Nº 57431.20
II	MB1	248	246	247	247,0	Informe / Report Nº 57431.20
	ZAT1	262	278	289	276,3	Informe / Report Nº 57431.20
	SOL	300	288	294	294,0	Informe / Report Nº 57431.20
	ZAT2	297	284	271	284,0	Informe / Report Nº 57431.20
	MB2	247	244	253	248,0	Informe / Report Nº 57431.20
III	MB1	244	250	249	247,7	Informe / Report Nº 57431.20
	ZAT1	270	281	296	282,3	Informe / Report Nº 57431.20
	SOL	293	299	289	293,7	Informe / Report Nº 57431.20
	ZAT2	301	286	272	286,3	Informe / Report Nº 57431.20
	MB2	249	252	251	250,7	Informe / Report Nº 57431.20

Figura 7. Procedimientos soldadura.

Table 1. Slip factor test results

Test to determine slip factor EN 1090-2:2008 Annex G				File 115-22734
Client	Hempel	Test bolt preload F_p (kN)		171.9
Test no.	Test slip load		Test slip factor	
	F_{s1} (kN)	F_{s2} (kN)	μ_1	μ_2
1	364.2	342.8	0.530	0.499
2	340.5	381.1	0.495	0.554
3	354.1	343.7	0.515	0.500
4	339.7	365.9	0.494	0.532
5	333.6	355.5	0.485	0.517
Mean slip factor value				0.512
Standard deviation				0.022
Coefficient of variation				4.2%
Required number of tests				1
Number of tests				5
5% fractile constant				2.05
Characteristic 5% fractile value				0.468



Figura 8. Ensayos coeficiente de rozamiento unión atornillada.

Sample 20087CON-4					
Torque (N-m)	LVDT	LVDT Displacement (mm)	F_s Slip load at 0.15mm LVDT displacement (kN)	F_{sm} Slip load on each plane (kN)	μ Test slip factor
454	1	Top	472.0	461.7	0.610
	2		463.5		
	3		449.5		
	4		461.9		
	5	Bottom	437.0	450.8	0.596
	6		454.7		
	7		454.7		
	8		456.9		

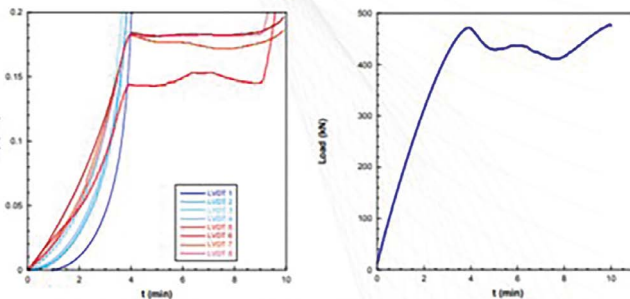


Figure 8. LVDT's Displacement-time and Load-time representation on sample 20087CON-4

Figura 9. Ensayos coeficiente de rozamiento uniones atornilladas.

Delayed slip test

Sample 20087CON-5						
Torque (N-m)	LVDT	90% F_{sm} (CON-1 to 4) (kN)	LVDT Displacement after 5 min.	LVDT Displacement after 180 min.	Mean displacement on each plane	Difference (<0.002mm)
454	1	409.4*	0.00	0.0023	0.0018	OK
	2		0.00	0.0008		
	3		0.00	0.0028		
	4		0.00	0.0013		
	5	413.0**	0.00	0.0009	0.0010	OK
	6		0.00	0.0002		
	7		0.00	0.0012		
	8		0.00	0.0015		

*Calculated

**Estimated during the tests and used in the creep test

Figura 10. Ensayos coeficientes de rozamiento diferidos.

nicos tipo S355 K2 o S460M durante su fabricación: oxicorte y soldadura.

En concreto durante la soldadura, la temperatura de precalentamiento y el input térmico, deben asegurar que la velocidad de enfriamiento, medida por $t_8/5$, se mantiene en un margen acotado tanto superior como inferior en conformidad con las instrucciones del proveedor.

La velocidad de enfriamiento $t_8/5$ ha de estar entre 10 y 25 seg, por debajo se corre el riesgo de fisuración en frío en la ZAT (Zona Afectada Térmicamente), como en cualquier material más convencional, pero por encima el riesgo que se corre es que se produzca en la ZAT un cierto reblandecimiento, que impida alcanzar la carga de rotura especificada. Ha de controlarse el ciclo térmico que se impone en la ZAT.

En conformidad con la AWS D1.1, el A514 es un material base aprobado, pero no existen procedimientos precualificados, por lo que cualquier procedimiento ha de ser cualificado mediante ensayos.

No todos los fabricantes producen aceros con iguales propiedades, por lo que, una vez homologados los procedimientos con dichos fabricantes, el pliego no admite cambio de proveedor. Todo el acero S690QL1 fue suministrado por Dillinger.

Desde un primer momento, ya antes de la adjudicación, se realizaron con el taller y empresas suministradoras de electrodos en chapas de 50mm, ensayos con distintos procedimientos con objeto de homologar procedimientos plenamente satisfactorios.

Durante la fabricación en taller, no se ejecutó ninguna soldadura en obra, se ejecutaron en todas las uniones run-off plates. De estas chapas se ensayaron un 25% con resultados plenamente satisfactorios.

Además, en todos los empalmes transversales a tope de chapas S690 se inspeccionaron al 100% el perfil de durezas en ZAT en uno de los dos laterales, en cada ala y en el alma antes de componer el perfil. El procedimiento con equipos portátiles precisó de una homologación previa con equipos convencionales.

Todas las uniones son atornilladas, con tornillos pretensados calidad 10.9 HB, con uniones de categoría B en conformidad con EN1993-1-8, es decir en ELS no se admite deslizamiento, y en ELU se calculan por cortante y aplastamiento.

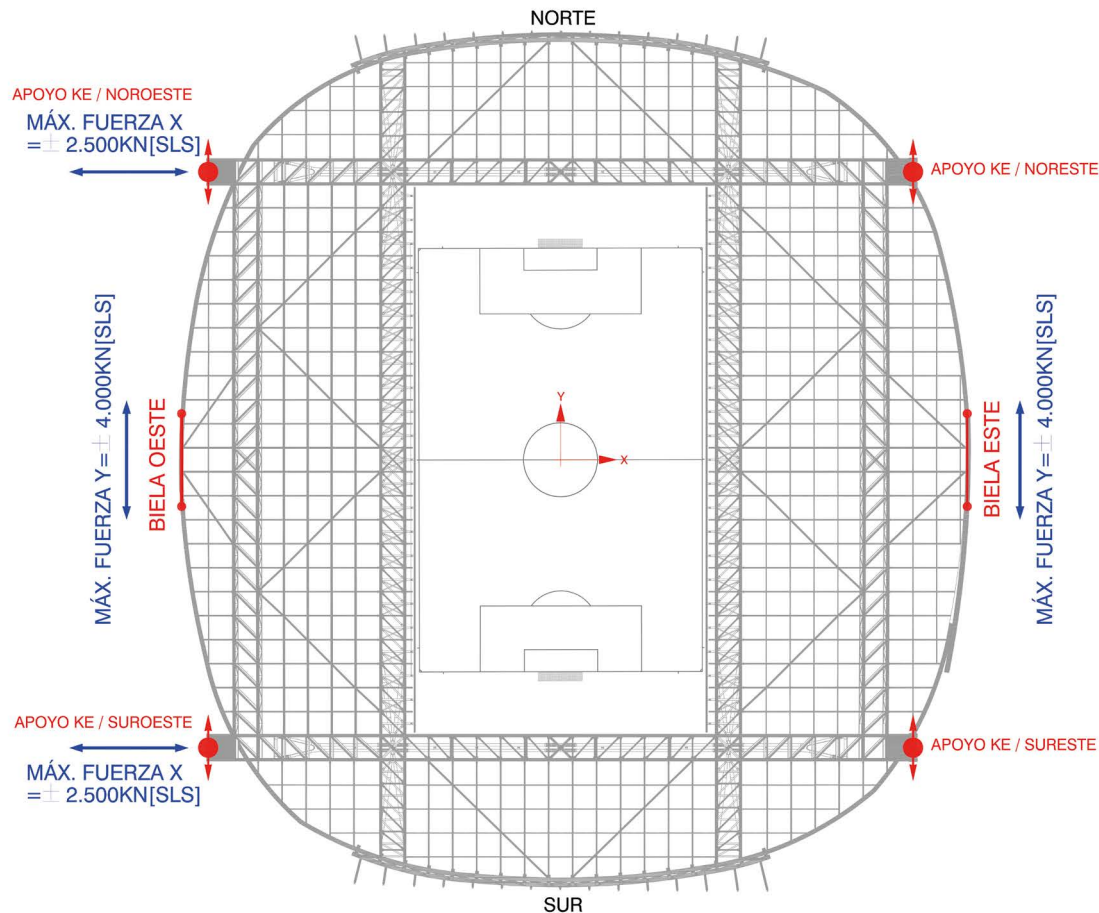


Figura 11. Esquema estático.

Como coeficiente de rozamiento se adoptó según necesidades:

$\mu=0.45$ con silicato inorgánico de zinc,
 $\mu=0.55$ con superficies granalladas Sa2-1/2

Los coeficientes fueron verificados con [3], particularmente el ensayo de deslizamiento diferido es complicado.

Una vez más, se adoptaron coeficientes más ajustados de lo habitual para reducir el número de tornillos, pero para ello se homologaron tanto el procedimiento de par de apriete como el propio coeficiente de deslizamiento.

4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA CUBIERTA.

4.1. Esquema estático.

La solución estructural ejecutada utiliza como elementos básicos dos cerchas atirantadas dispuestas en dirección este/oeste y cuatro cerchas transversales dispuestas en dirección norte / sur. Las cerchas atirantadas transfieren las cargas verticales a cuatro elementos de nueva construcción. En el lado oeste las cargas se transfieren a las dos nuevas torres de evacuación y en el lado este a dos pilares biarticulados, péndulos, situados en los torreones existentes.

Las cargas horizontales se transmiten a las torres de evacuación de la Castellana y al nuevo edificio del este de modo isostático permitiendo el movimiento inducido por las acciones de origen térmico. [2]

Las acciones horizontales en dirección norte / sur se transmiten mediante sendas bielas al centro del edificio del este y del oeste.

Las acciones horizontales en dirección este / oeste se transmiten íntegramente a las torres de evacuación del oeste.

Con este esquema se logra transmitir la totalidad de las cargas de la cubierta a elementos de nueva construcción eliminando de raíz los graves inconvenientes que planteaban las soluciones anteriormente propuestas.

El esquema mencionado se materializa en la disposición de cuatro apoyos esféricos, uno en cada una de las dos torres de evacuación de la Castellana, y uno en cada uno de los dos péndulos biarticulados del este.

Este esquema estático es el correspondiente a la estructura final. Durante el proceso constructivo es necesario modificarlo para tener esquemas estáticos parciales determinados.

4.2. Cerchas atirantadas.

La cercha atirantada, desempeña un papel esencial tanto en el esquema final de la estructura como durante el proceso constructivo. Se trata de una cercha espacial de 177m de luz

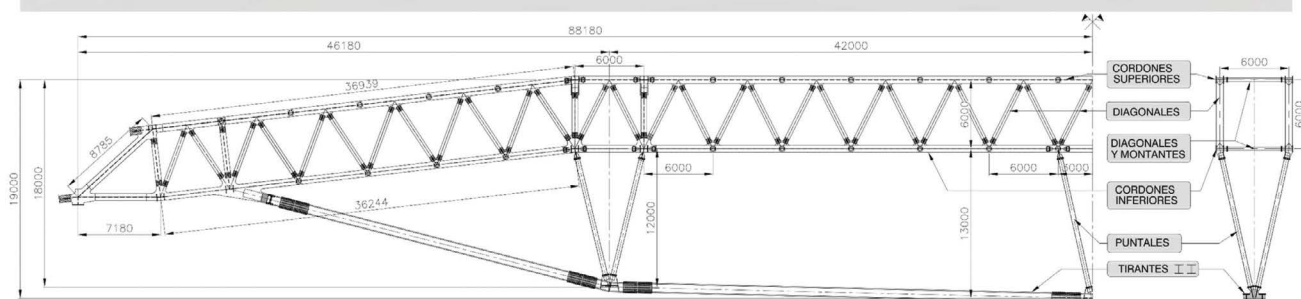
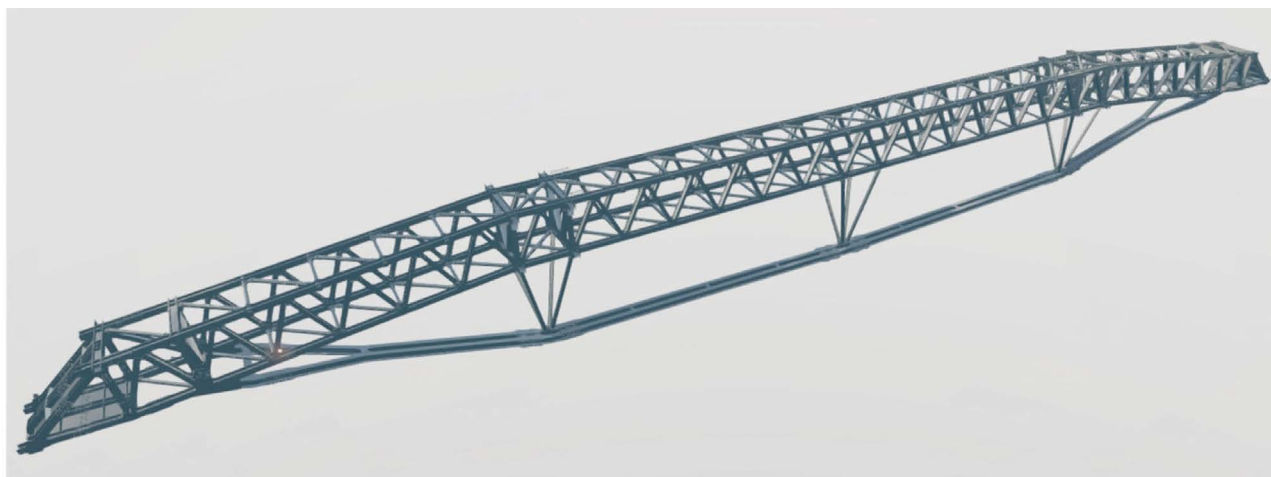


Figura 12. Vista cercha atirantada.

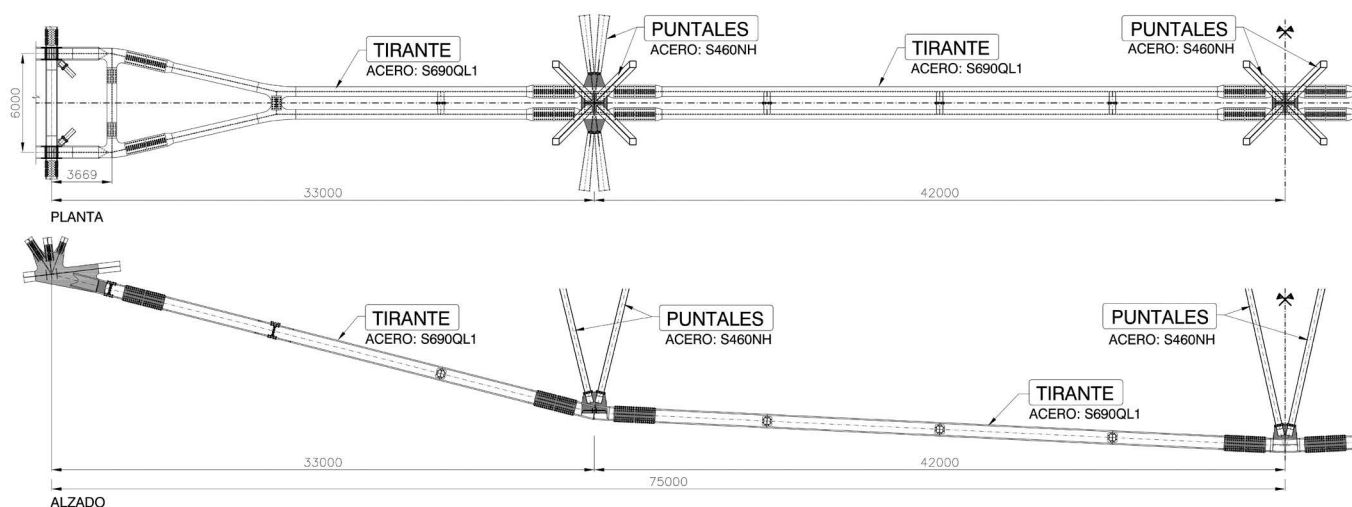


Figura 13. Tirantes cercha atirantada.

con cuatro cordones configurados por perfiles en H armados de 6 x 6 m y un tirante también configurado por dos perfiles armados en H.

El tirante de tracción descuelga 13m desde el cordón inferior de la cercha y dota a la cercha de un canto total de 19m. Este tirante está dividido en 4 partes que se unen entre sí mediante uniones atornilladas con cubrejuntas. Los dos cordones que lo forman están separados 1380mm, salvo en la parte inicial donde se quiebran en planta para conectar con los planos de las cerchas verticales que están separados 6m.

Los quiebras del tirante en alzado están resueltos mediante cuatro pilares metálicos o puntales que lo unen a la cercha transmitiendo su carga de desvío.

En cuanto a los apoyos de la cercha atirantada, sólo cuenta con un apoyo en cada extremo. Esto hace necesario disponer unos diafragmas en los extremos que transmitan la carga del apoyo central a los planos laterales de las cerchas. Se han dispuesto diafragmas tanto en el plano inclinado final como en el plano horizontal inferior.

La complicada geometría del envoltorio de la cubierta no se puede conseguir directamente con el trazado de las cerchas atirantadas. Aun así, para adaptarse lo más posible a esa envoltura, la geometría de la cercha presenta un primer tramo ascendente correspondiente a la zona de la grada. Posteriormente, encima del terreno de juego, pasa a ser horizontal. La geometría final del envoltorio se consigue con una estructura

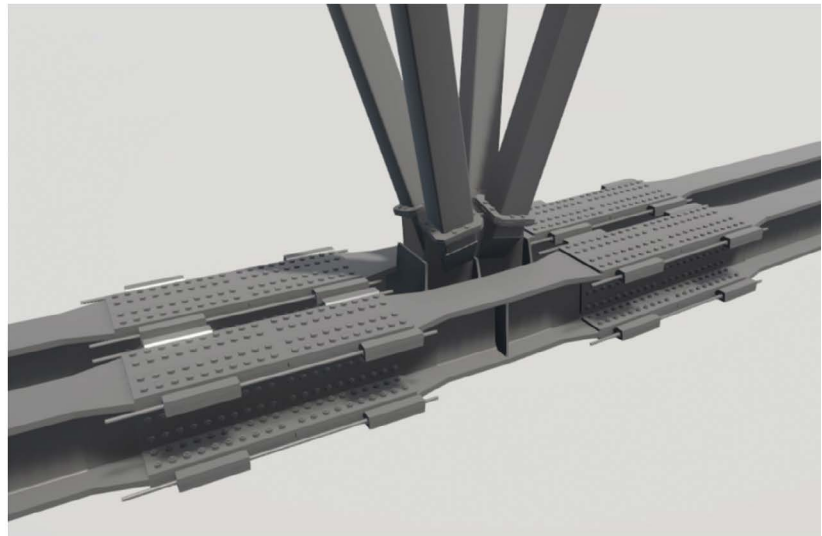


Figura 14. "Floreros" cercha atirantada.

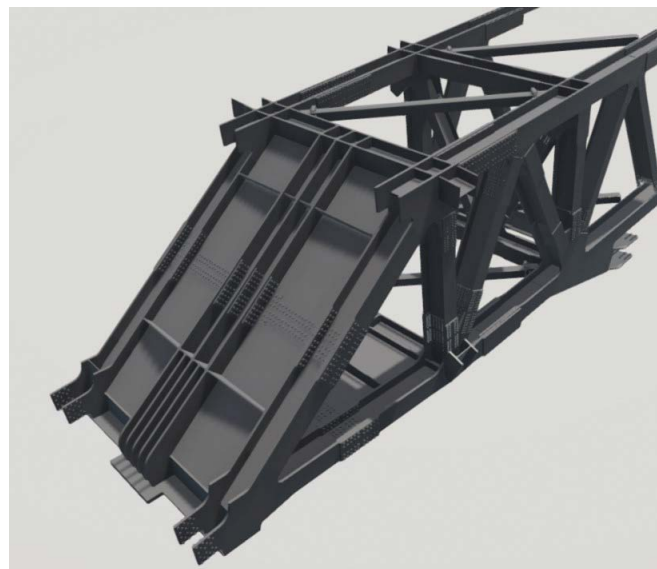


Figura 15. Diafragmas de apoyo cerchas atirantadas.

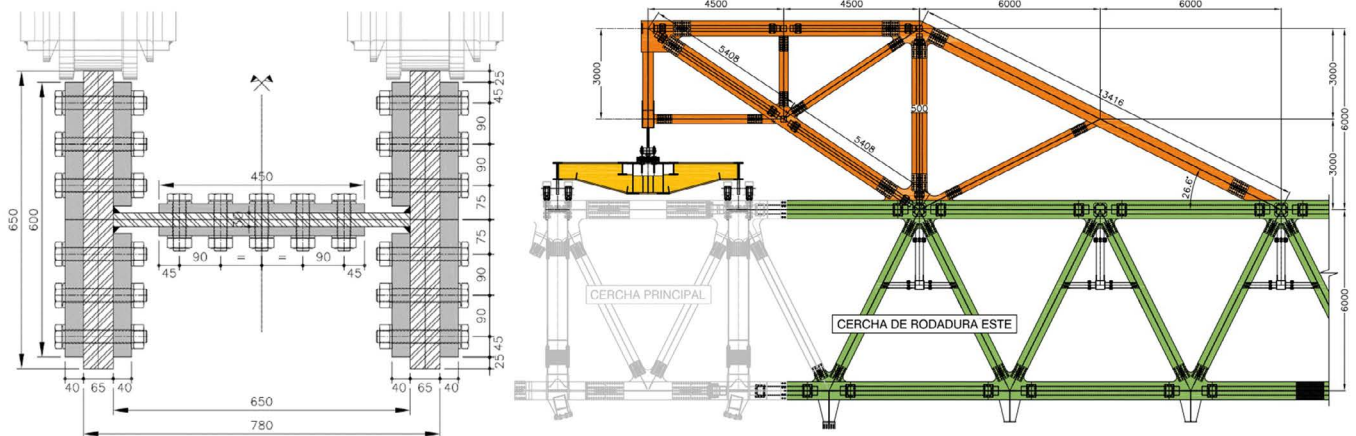


Figura 16. Uniones atornilladas cerchas atirantadas.

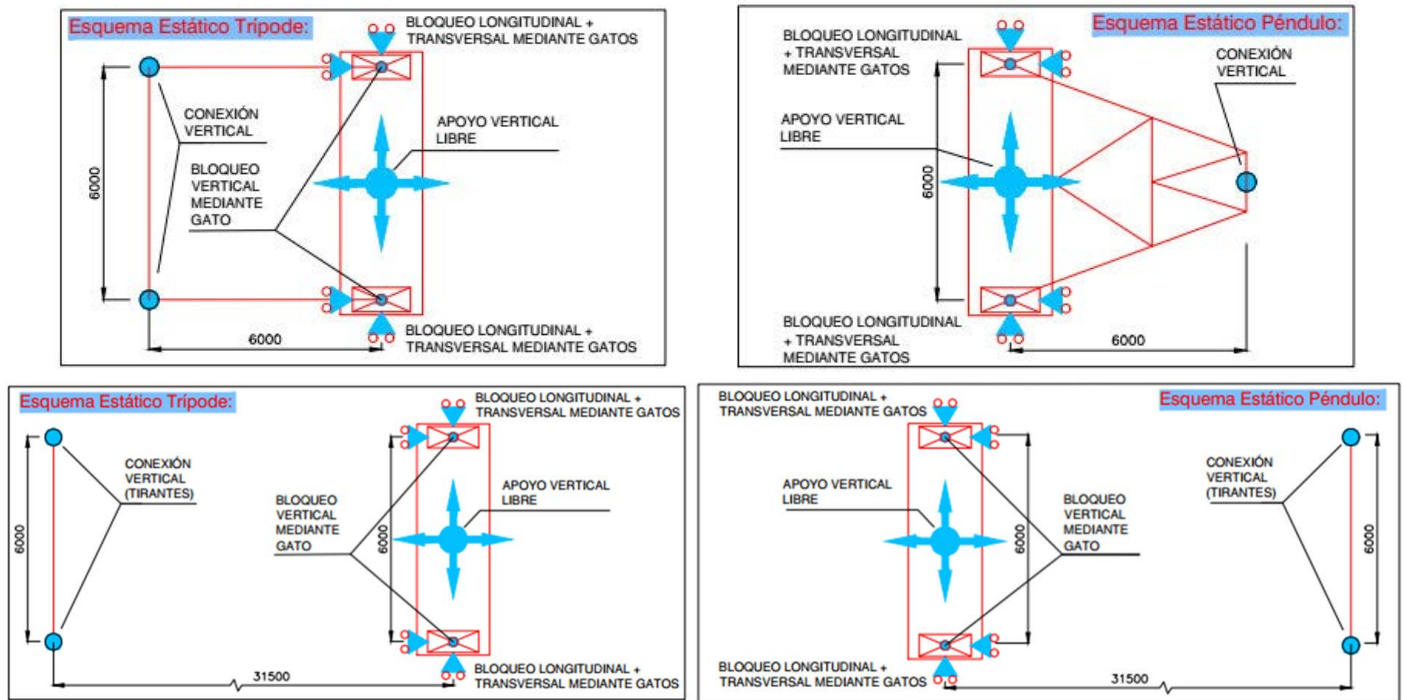


Figura 17. Esquema estático apoyos durante las primeras fases del montaje.

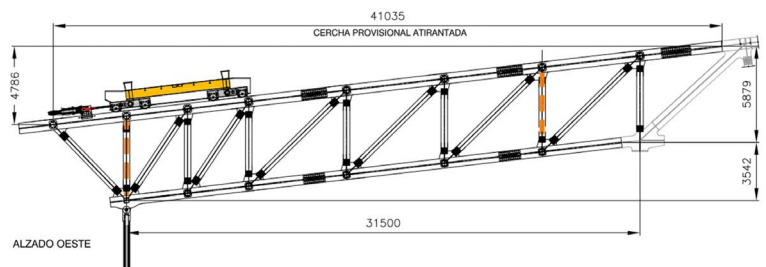
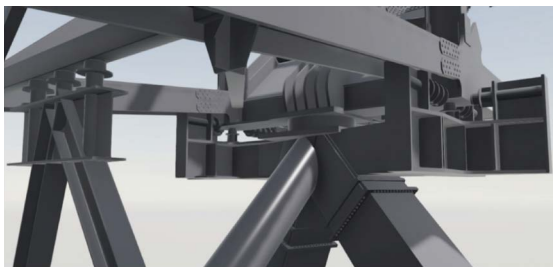


Figura 18. Vistas apoyos y bloqueos provisionales primeras dovelas y prolongación cercha atirantada.

de relleno que se va apoyando en el cordón superior de todas las cerchas con altura variable para conseguir el contorno solicitado.

El diseño de estas cerchas atirantadas está totalmente condicionado por su sistema de montaje. Como se verá más adelante, se instalaron montando dovelas en voladizos sucesivos desde los apoyos. Esto obligó a disponer uniones atornilladas en los cordones cada 2 módulos o 12m ya que con esas dimensiones las dovelas alcanzaban el peso máximo que podían soportar las grúas que las iban a montar para las posiciones más alejadas.

Las uniones en obra, atornilladas, se realizan en todos los elementos principales mediante cubrejuntas dobles; las del cordón superior por el que se han de desplazar los carros de montaje de los paneles de la cubierta, están diseñadas para permitir el paso de las pestañas de las ruedas de los bogies.

El esquema estático de las cerchas atirantadas es diferente en la situación definitiva que en la situación de montaje. En la situación definitiva el apoyo en ambos extremos se realiza mediante un único apoyo central con una rótula metálica, la necesaria estabilidad torsional se consigue mediante la continuidad con las cerchas transversales, de rodadura y lateral.

En cambio, en situación provisional, para permitir el avance en voladizo, fue necesario dotarla de una prolongación de 30m hacia el exterior del estadio en cada extremo hasta alcanzar la vertical de unos contrapesos dispuestos en el suelo con los que se unían mediante unos tirantes verticales. Además, para el montaje, mediante desplazamiento de los paneles de los laterales por su cordón, la cercha atirantada disponía en cada extremo de dos apoyos y bloqueos, en correspondencia con cada uno de los cuchillos laterales.

4.3. Cerchas transversales de rodadura.

Las cerchas de rodadura transmiten a la cercha principal, además de las cargas propias de la cubierta, las cargas aplicadas a la fachada de los fondos norte y sur que se recogen por medio de las cerchas de fondo, y las cargas de la cubierta retráctil.

Son también cerchas espaciales de 144m de luz, de cuatro cordones y sección 6x6m, lo que les confiere gran estabilidad durante las maniobras de montaje previstas para las mismas.

En la intersección con la cercha atirantada se disponen unos puntales que permiten recoger con mayor eficacia las acciones inducidas por las cargas de las fachadas de los fondos.

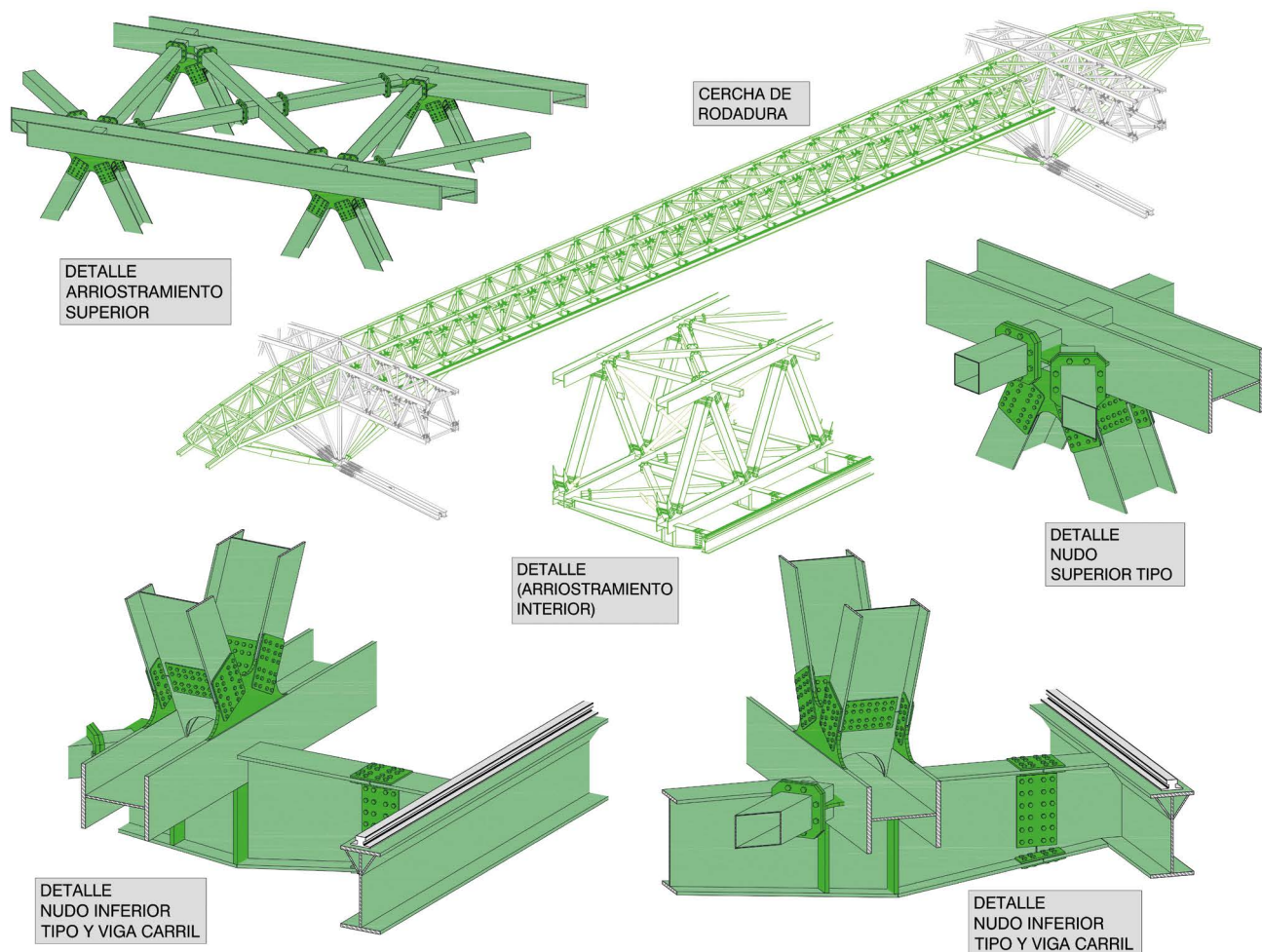


Figura 19. Detalles tipo cercha transversal de rodadura.

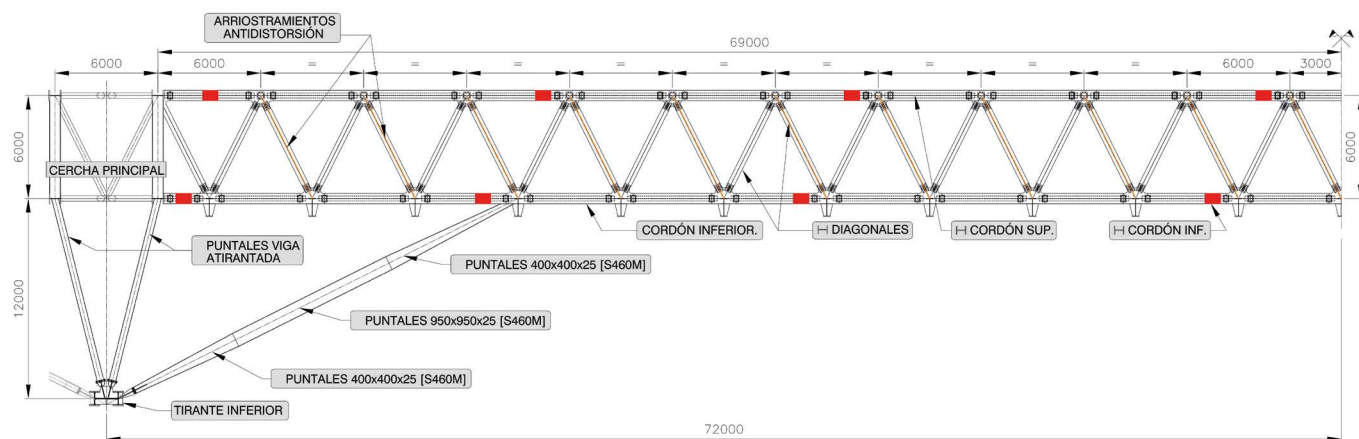


Figura 20. Geometría cercha transversal de rodadura.

Las cerchas de rodadura se prolongan más allá de las cerchas atirantadas hacia el exterior del estadio. Esta prolongación sirve para recoger las cerchas de fondo y el correspondiente peso de las fachadas norte y sur.

Otro aspecto esencial de estas cerchas es la rigidez que aportan al conjunto de la cubierta retráctil, no es posible exagerar la importancia de esta rigidez para un correcto funcionamiento de la cubierta móvil.

La traslación de la cubierta móvil se realiza sobre un único carril, dispuesto junto al cordón inferior de cada una de las cerchas de rodadura. Esta disposición permite un buen acceso para mantenimiento a la totalidad de los mecanismos de la cubierta móvil. [1].

Como se verá más adelante, estas cerchas se ensamblaron, con uniones atornilladas, sobre una plataforma elevada en el lado de la Castellana, se izaron mediante heavy lifting a los

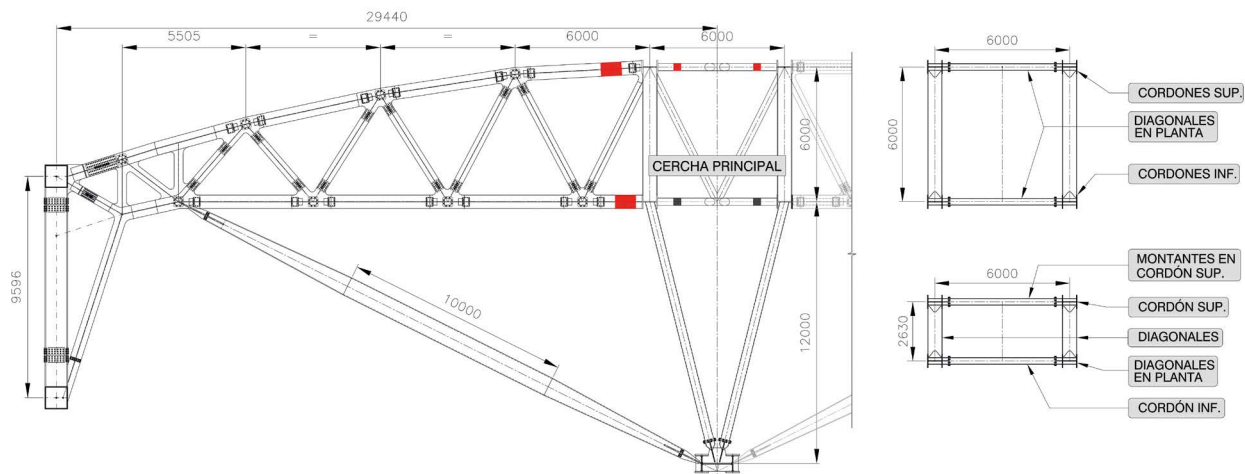


Figura 21. Prolongación cercha transversal de rodadura.

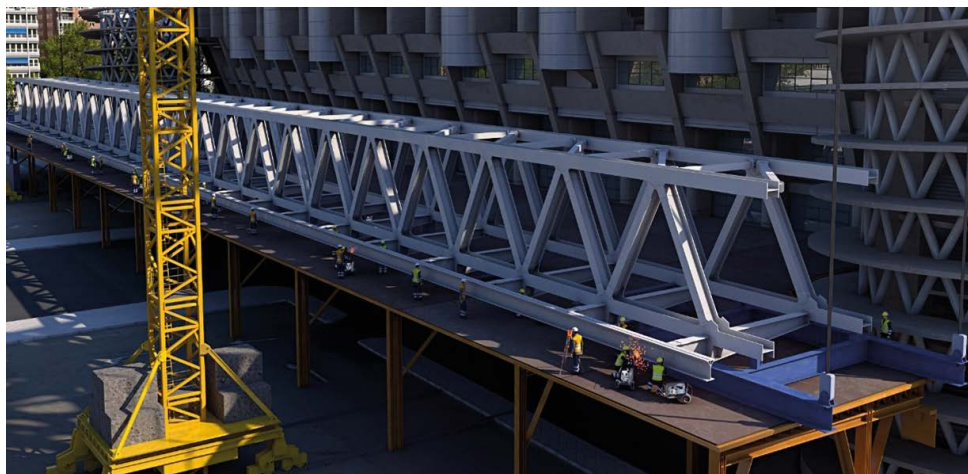


Figura 22. Montaje cercha transversal de rodadura.

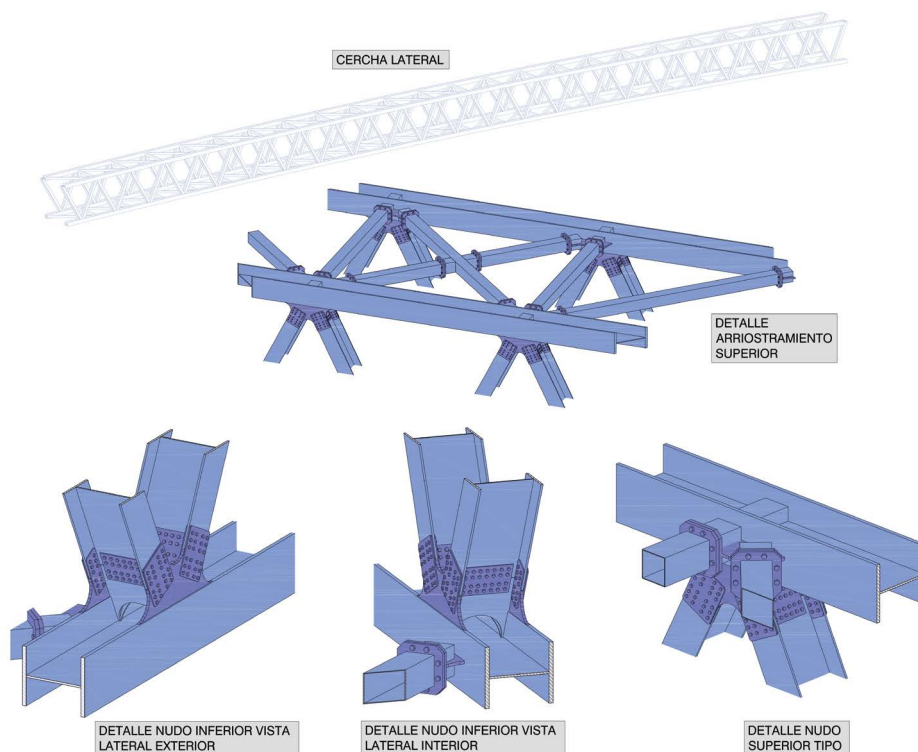


Figura 23. Detalles tipo cerchas transversales laterales.

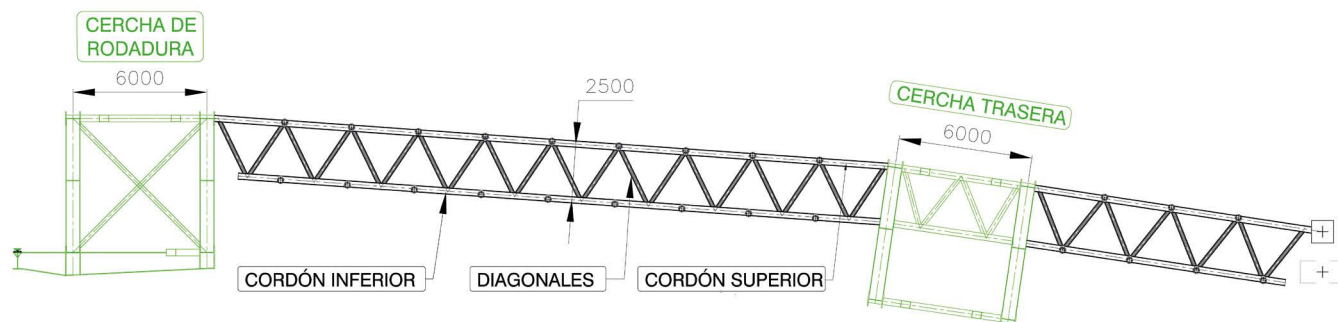


Figura 24. Sección perpendicular a cerchas transversales.

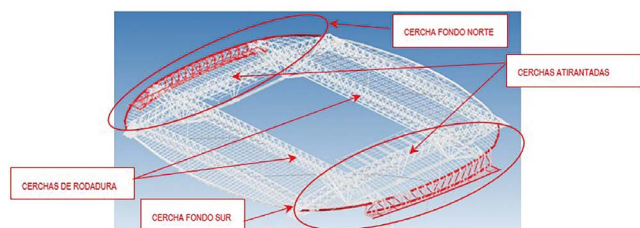


Figura 25. Localización cerchas de fondo.

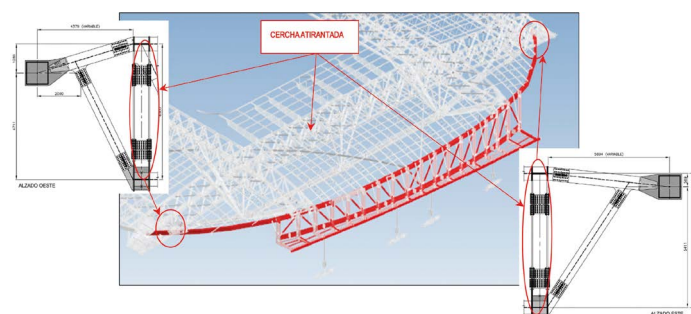


Figura 26. Conexiones cerchas de fondo.

carros de desplazamiento de las vigas atirantadas, y se trasladaron sobre estas hasta su posición definitiva.

4.4. Cerchas transversales laterales.

Se trata, al igual que las otras cerchas principales de la cubierta, atirantada y de rodadura, de una cercha espacial de 144m de luz con cuatro cordones configurados por perfiles en H armados de 6 x 6 m, con uniones atornilladas mediante cubrejuntas.

Estas cerchas transversales laterales forman junto con las transversales de rodadura los elementos sobre los que se apoya todo el relleno de cerchas tubulares que conforman los paños este y oeste de la cubierta.

A diferencia de las cerchas transversales de rodadura, estas cerchas no tienen sus caras en un plano vertical. Esto se debe a que se unen con la atirantada en la zona ascendente de la misma.

4.5. Cerchas de fondo.

Dada la limitada capacidad de las costillas preexistentes y sus cimentaciones, ha sido necesario suspender las fachadas norte y sur de la propia cubierta fija a efectos de cargas verticales, esta función de cuelgue de las fachadas la cumplen las cerchas de fondo; a efectos de cargas horizontales (viento), la fachada se apoya en las costillas en su parte inferior y en la cercha de fondo en la parte superior.

Esta es la principal función de las cerchas de fondo, pero, además, cumplen las siguientes funciones:

- Servir de apoyo a las cerchas secundarias de cubierta en los fondos, en su extremo exterior, en el extremo interior se apoyan en las cerchas principales.
- Apoyo del *skywalk* en la zona de fondo para lo que se disponen

ménsulas en el cordón inferior coincidiendo con cada montante de la cercha.

- La visera de fachada por encima del *skywalk* también va unida al cordón superior y montantes de la cercha de fondo.

La cercha de fondo se sitúa entre las dos cerchas de rodadura en las que se apoya. A partir de estas, se prolonga solo el cordón superior que forma parte del cordón perimetral que delimita toda la cubierta, apoyándose en la cercha atirantada sobre cartabones en ambos extremos; a continuación de los apoyos, se disponen juntas de dilatación en dicho cordón perimetral.

Las cerchas de fondo están formadas por cordones en cajón armados, los montantes son secciones doble T armados y las diagonales son tubos. Los montantes y las diagonales se unen a los cordones mediante uniones atornilladas con cubrejuntas. El canto de las cerchas es variable, en el norte, desde 5.67m, en el este, a 10.15m en el oeste; en el sur, desde 8.36m, en el oeste, a 10.0m en el este.

Las cerchas secundarias, formadas por perfiles huecos cuadrados, se unen a ambos cordones con uniones atornilladas con chapas de testa. Las ménsulas donde apoya el *skywalk* son secciones armadas en T de canto variable cuyas luces son también variables para adaptarse al contorno de la fachada; salen de las prolongaciones de los montantes a los que se unen con uniones atornilladas con chapa de testa.

La fachada de los fondos cuelga de un perfil hueco cuadrado que une todos los extremos de las ménsulas del *skywalk* mediante uniones articuladas. Está afectada por movimientos verticales importantes debidos a las cargas sobre la cubierta (fija y móvil) que hay que tener en cuenta; como ejemplo, indicar que debido a la apertura (cierre) de la cubierta retráctil produce un desplazamiento vertical de la fachada del orden de 100mm.

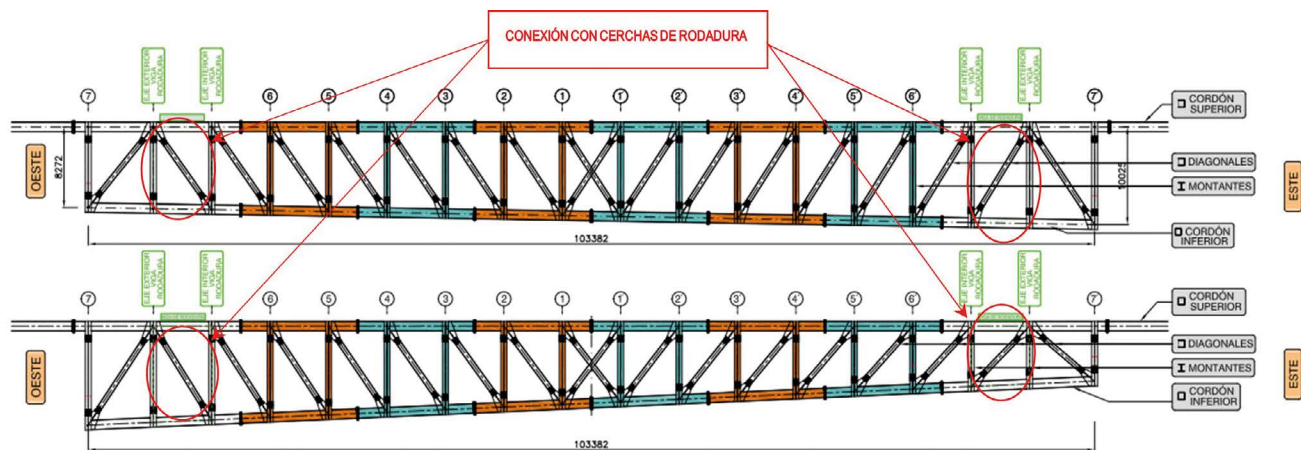


Figura 27. Módulos cerchas de fondo.

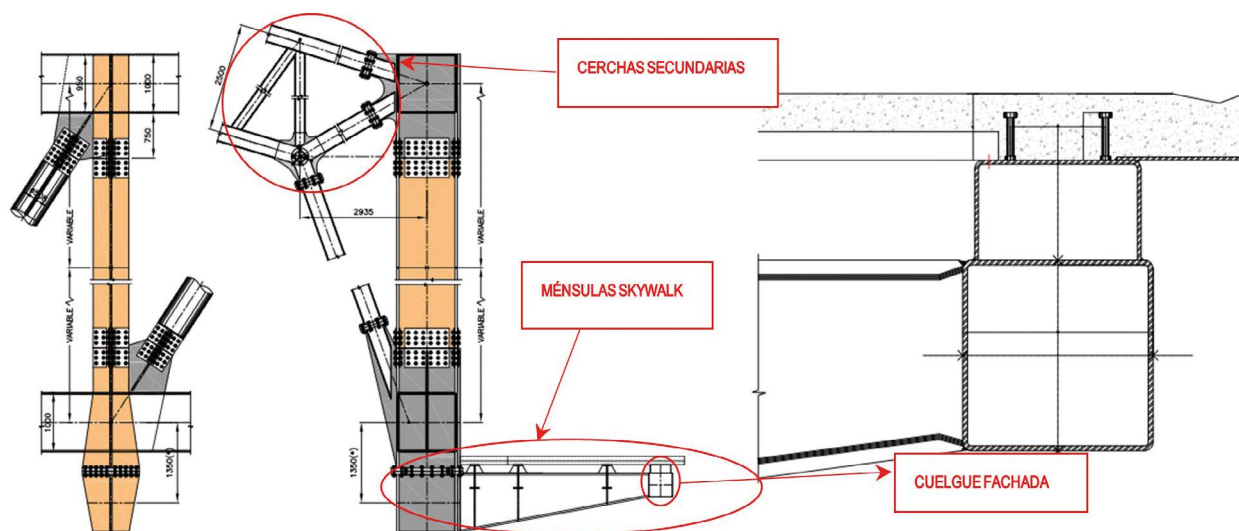


Figura 28. Secciones cerchas de fondo.

Esta fachada está independizada de las fachadas adyacentes, la del edificio del este y la de la corona del oeste cuyas estructuras también son independientes de la de la cubierta fija; estas juntas tienen movimientos relativos importantes.

Lo mismo sucede con el skywalk, que debe tener continuidad en todo el perímetro del estadio, por lo que se han dispuesto losas de transición entre el tramo de fondo y los adyacentes, que tienen que absorber estos movimientos relativos manteniendo su funcionalidad.

4.6. Péndulos en lateral este.

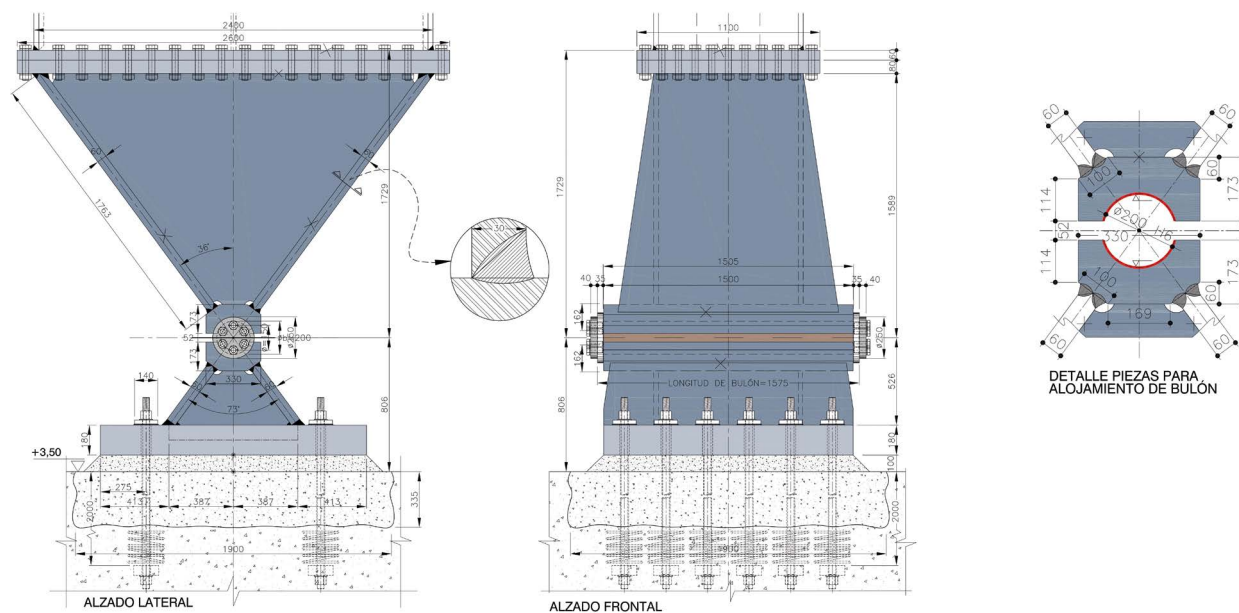
Estos pilares de 50m de altura se ubican en correspondencia con los torreones del este y constituyen los dos apoyos de la cubierta fija del lado este del estadio.

En situación final reciben la carga vertical de las cerchas atirantadas en el lateral este. Para cumplir con el esquema estático de la cubierta, se configuran como elementos pendulares en sentido longitudinal a la cercha atirantada. Esto se materializa disponiendo en cabeza un apoyo metálico esférico análogo al utilizado en el oeste, y en la base una articulación.

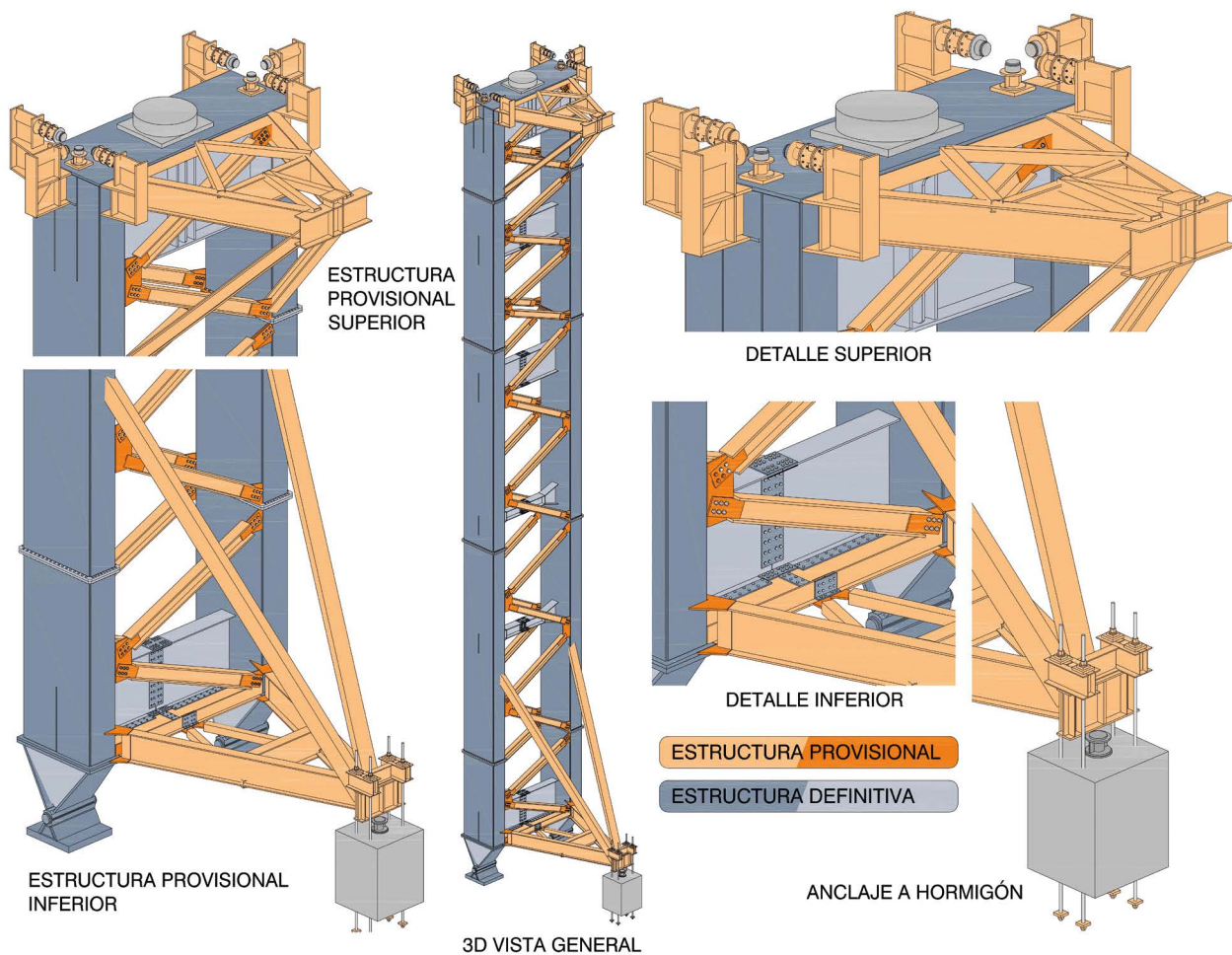
Esta articulación permite el giro alrededor de un eje norte-sur e impide el perpendicular.



Figura 29. Vista péndulo este.



- Chorreado Ra1 a realizar no antes de 8h del resto del tratamiento.
- Pulverización con EVERLUBE 620 C de 12µm de espesor.
- Curado durante 1h a 200°C.



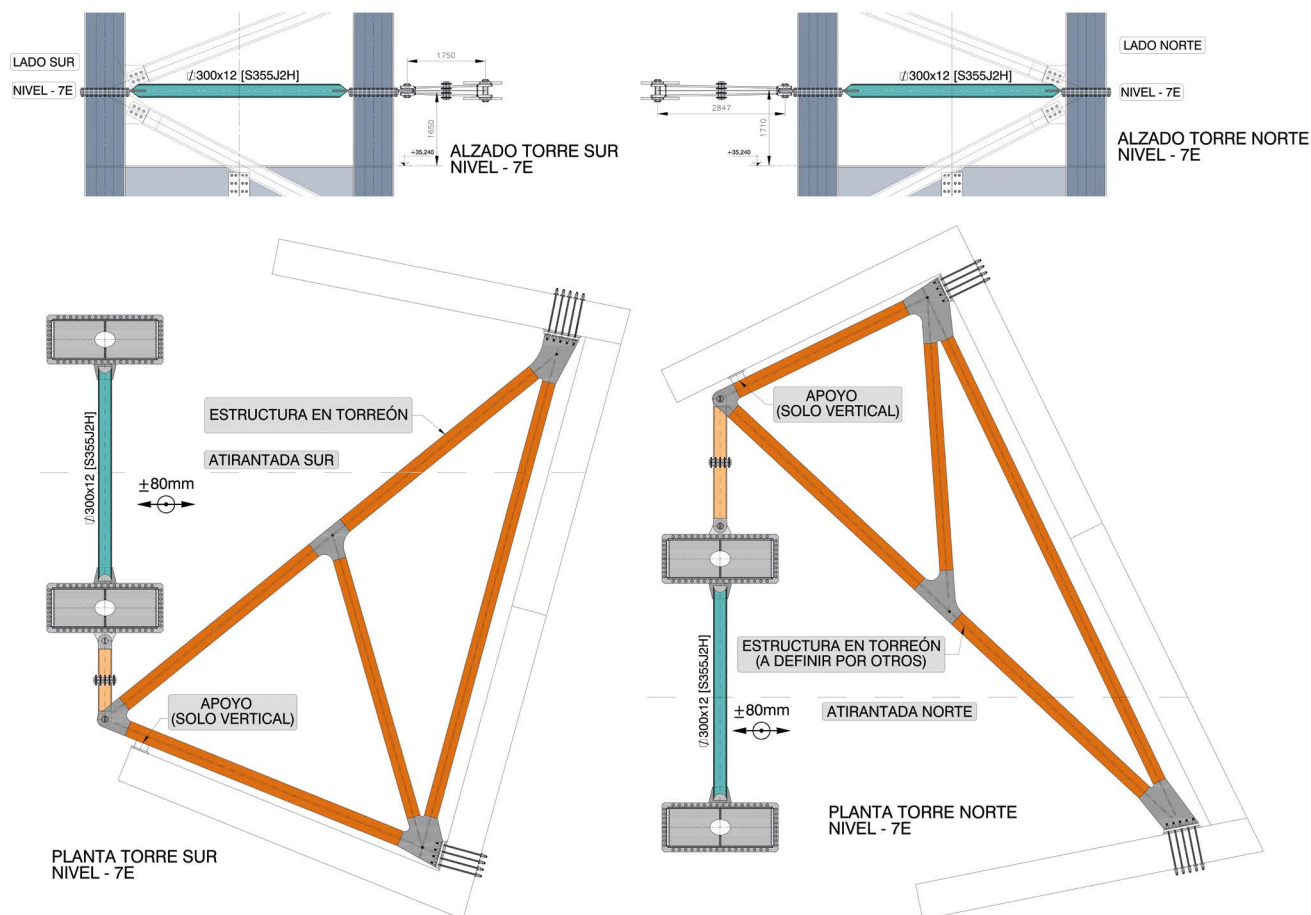


Figura 33. Anclajes péndulos este a torreones durante la construcción.

Cada péndulo está compuesto por dos patas separadas 6m entre sí. Cada pata es un cajón de 2mx0,9m con chapas de 30mm en el sentido largo y chapas de 60mm en la dimensión corta.

Las dos patas están unidas entre sí mediante presillas de 1.8m de canto distanciadas entre sí entre 12 y 10m en función de los requerimientos de uso de los torreones donde quedarán envueltas.

Por cada una de las patas de cada péndulo llegan 4000t mayoradas a la cimentación. Esto implica que la articulación de cada pata tiene que funcionar soportando dicha carga de compresión.

Con el fin de que el bulón de la rótula no se bloquee bajo una carga tan importante, las especificaciones de la cuna y el bulón que conforman la articulación tuvieron que ser muy restrictivas. Toda la zona de la articulación y cunas se fabricaron en acero S690QL y el bulón de 200mm de diámetro y 1500mm de longitud era de 36CrNiMo16+QT. Un aspecto esencial del diseño de este detalle era que la presión a la que estaba sometido el bulón impedía la lubricación de este con productos líquidos tradicionales teniendo que recurrir a soluciones más especiales como los lubricantes sólidos empleados en la industria aeroespacial. Se desarrolló un procedimiento de aplicación y ensayos para garantizar el correcto funcionamiento de la rótula.

Durante la construcción del estadio, el péndulo pasó por varios esquemas estáticos diferentes. Primero, durante su pro-

pio montaje, donde se le añadió una tercera pata formando un triángulo en planta para que fuese estable convirtiendo de este modo el péndulo en una ménsula. Este empotramiento inferior también fue necesario para poder montar la cercha atirantada desde ese lado. Esta tercera pata a su vez era regulable en altura, lo que permitía ajustar longitudinalmente la inclinación del péndulo y mover así las cerchas atirantadas en esa dirección en las últimas fases de su montaje. Una vez conectadas las dos mitades de las cerchas atirantadas se procedió a soltar esta tercera pata del péndulo volviendo a estar articulado en su base.

También hubo que añadir un tercer punto de apoyo superior para empotrar las primeras dovelas de la cercha atirantada que se montaban encima del péndulo. Esta configuración se mantuvo hasta que se llegó con la prolongación de la cercha atirantada hasta la vertical del atirantamiento trasero y se aseguró que el centro de gravedad del conjunto de cercha montado estaba hacia el centro del campo traccionando de este modo dichos cables trasero.

Por otra parte, la carga horizontal de la cubierta fija norte-sur en el lateral este se transmite al edificio este en la configuración definitiva de la estructura. Pero durante el montaje de la cubierta, el edificio del este todavía no se había construido por lo que el esquema debía ser distinto. Esto obligó a disponer en los péndulos arriostramientos adicionales, para transmitir con mayor rigidez los esfuerzos norte-sur a la propia cimentación, conectándose además longitudinalmente al torreón adyacente que se iba construyendo al mismo tiempo.

5. PROCESO CONSTRUCTIVO Y ESTRUCTURAS AUXILIARES

El proceso constructivo previsto combina, técnicas de avance en voladizo, heavy lifting y desplazamiento transversal de paños para conseguir montar toda estructura resistente desde el exterior.

En cada fase se ha asegurado un esquema resistente adecuado, pues aún no se había configurado el esquema final, de modo que en todas las fases intermedias el nivel de seguridad fuese igual, si no superior, al de la situación final.

En el esquema resistente final del proyecto se utilizan como elementos básicos dos cerchas atirantadas orientadas en dirección oeste-este y que transfieren sus cargas a cuatro puntos de apoyo. Estas cerchas son también esenciales en el proceso constructivo previsto para la totalidad de la cubierta.

5.1. Avance en voladizo de las cerchas atirantadas y montaje de las cerchas de fondo.

El propio montaje de estas cerchas se realizó completamente desde el exterior del estadio, mediante avance en voladizo desde ambos extremos, confluyendo en el centro.

Para que este montaje fuese posible, los pilares del este, biarticulados longitudinalmente se referenciaron durante estas fases a sus torreones y en el oeste el apoyo articulado final se empotró transversalmente.

En el plano de las cerchas, la necesaria estabilización de cada voladizo se consiguió disponiendo una prolongación de la cercha atirantada hasta alcanzar la vertical de un contrapeso dispuesto a 30.0m de la torre de apoyo. Antes de llegar a dicho contrapeso, para que las primeras dovelas fuesen estables, hubo que proporcionarlas un punto de apoyo adicional, tanto en los trípodos del oeste como en los péndulos del este.



Figura 34. Vista montaje cerchas atirantadas.

La grúa utilizada para el avance en voladizo era una grúa en celosía LR600, que montaba sucesivamente dovelas de 12.0m de longitud con uniones atornilladas para asegurar el ritmo de montaje requerido. Además, se simultaneó el montaje de las dos cerchas con dos equipos independientes.

Tras la confluencia aproximada en el centro, se debía colocar la dovela de cierre pieza a pieza. Para realizar la aproximación definitiva, se actuó en el gato vertical de la tercera pata del péndulo que permitía que éste pudiese inclinarse longitudinalmente hasta conectar las primeras piezas de la dovela de cierre. Posteriormente, se realizó la igualación de tangencia entre los dos lados de la cercha, actuando sobre los cables verticales de atirantamiento traseros, lo que permitió terminar de montar la dovela de cierre y restituir los esfuerzos previstos en el cálculo de esta cercha.



Figura 35. Esquema estático al llegar al tirante trasero.



Figura 36. Vistas montaje cerchas atirantadas.



Figura 37. Vista aérea montaje cerchas atirantadas.

A continuación, se completó el sistema de atirantamiento inferior de la cercha que se puso en carga actuando de nuevo sobre el sistema vertical de atirantamiento trasero.

Una vez realizada esta operación, se retiraron los atirantamientos traseros verticales y sus contrapesos. Para conseguir el esquema isostático deseado, también se liberó en este momento las articulaciones de la base de los péndulos, quedando en sentido este/oeste, fijas en las torres de la Castellana y libres en los péndulos de la Calle Padre Damián.

Para poder continuar con el montaje de todos los elementos transversales, era necesario completar en esta fase la estabilización transversal de las cerchas atirantadas con objeto de poder servir de carriles para trasladar los paños de la cubierta.

La idea era proporcionar unos apoyos verticales auxiliares en una alineación distinta de la formada por cada cercha atirantada. Para ello, se continuó con el montaje de la estructura de cubierta de los fondos norte y sur, que a través de las prolongaciones de las cerchas transversales se apoyaban en unas torres provisionales situadas en los fondos.

Una vez montadas las prolongaciones de las cerchas transversales de rodadura conectándolas a la cercha atirantada y a sus torres de apeo, se procedió al montaje de la cercha de fondo situada entre dichas prolongaciones. Estas cerchas de fondo, además de servir de apoyo para las cerchas de relleno en los fondos, sirven como soporte de la estructura de fachada en esta zona.



Figura 38. Vista cierre cercha atirantada.

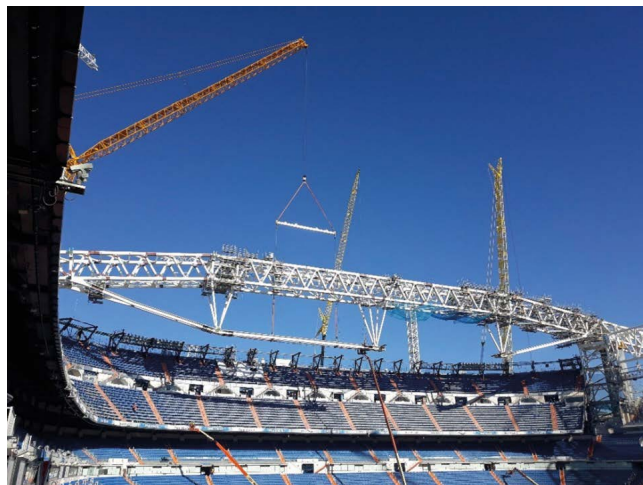


Figura 39. Vista montaje tirantes.

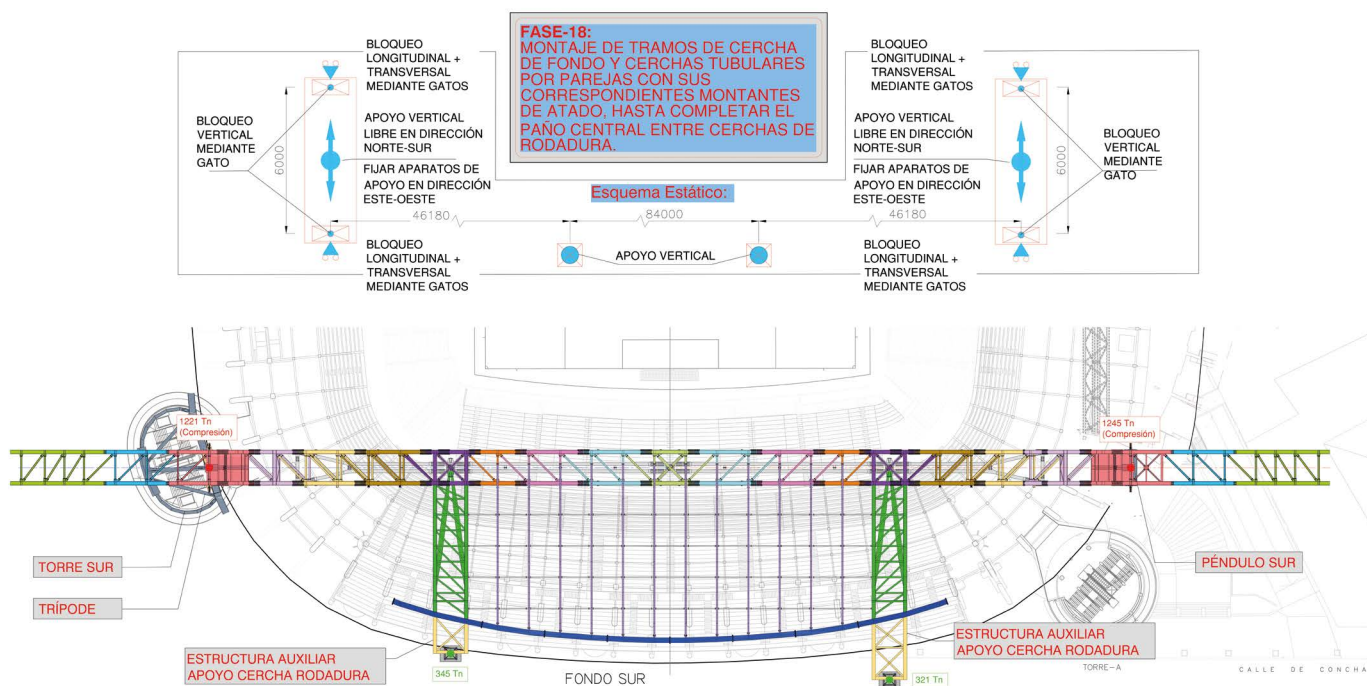


Figura 40. Esquema estático durante la construcción.

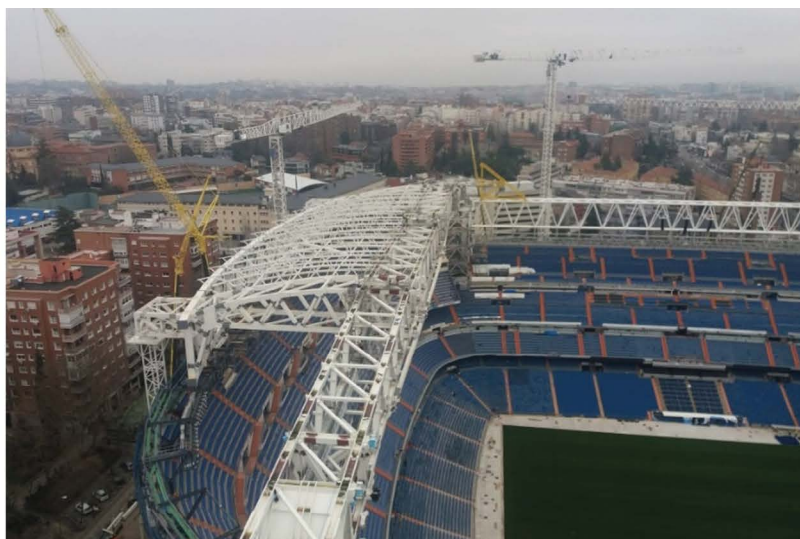
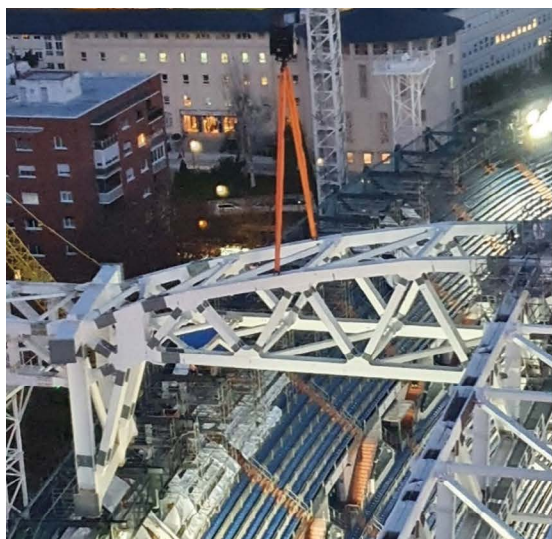


Figura 41. Montaje prolongación cercha transversal de rodadura y cercha de fondo.

Tras estas operaciones, las cerchas principales estaban en disposición de convertirse en medio auxiliar de montaje para gran parte de la cubierta del estadio, incluso se utilizaron en el desmontaje de la cercha actual del lateral este.

Este importante medio auxiliar permitió trabajar de modo continuo y siempre desde el exterior del estadio, sin afección al campo y/o a las gradas.

Como las cerchas transversales embrochalaban en las atirantadas a su mismo nivel hubo que diseñar y fabricar unos carros de traslación que permitiesen esa conexión. Estos carros se movían utilizando las alas de los perfiles como carril y estaban dotados de dispositivos de ajuste de posición de las piezas transportadas. Se hablará de ellos en el apartado de estructuras auxiliares. Todas las uniones atornilladas de las cerchas atirantadas debían llevar los cubrejuntas retranqueados con respecto al borde del ala del cordón superior para permitir el paso de las ruedas de los carros de traslación.



Figura 42. Unión atornillada cercha atirantada y paso de carretones.

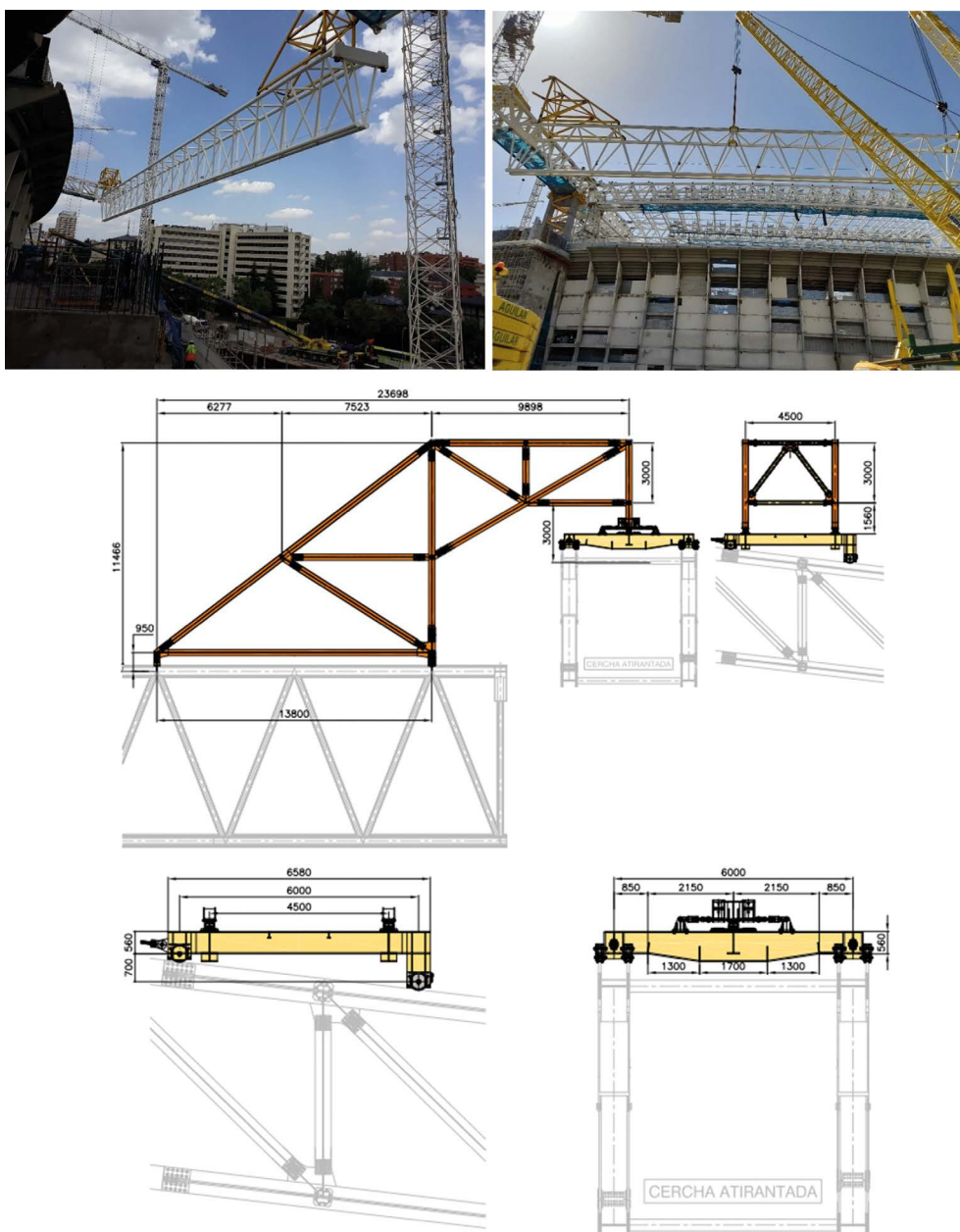


Figura 43. Elementos retirada cercha del este.

5.2. Retirada cercha lateral este

Llegado este punto, no se podía continuar con el montaje de la cubierta sin retirar la antigua celosía del este que sujetaba la cubierta de ese lateral. Para ello, también se utilizaron las cerchas atirantadas como carriles para el desplazamiento de esta cercha hasta su punto de descenso. Se diseñaron unos carros de apoyo y deslizamiento que mediante unos gatos cogían la antigua cercha, la apoyaban en el carro que se desplazaba a su vez sobre las cerchas atirantadas recién colocadas.

Sin embargo, dado el frenético trabajo alrededor del campo fue complicado encontrar un espacio disponible para depositarla en el suelo. Inicialmente se había pensado sacarla por el lateral de la Castellana, obligándola a recorrer toda la longitud de las cerchas atirantadas. Pero, finalmente, se encontró una posibilidad de poderla bajar por el lado este compatibilizando la operación con la construcción del parking y del edificio este. Hasta que llegase el momento justo en el que se pudiese bajar la cercha al suelo, se optó por desplazarla hasta una posición de parking provisional sobre las propias cerchas atirantadas donde no molestase con el montaje del resto de los paños de la cubierta. Finalmente, cuando hubo espacio en el suelo para depositarla, se trasladó hasta el borde de las prolongaciones de las cerchas atirantadas donde fue cogida por dos grúas (LR600 y LR750) y descendida al suelo para desmontarla.

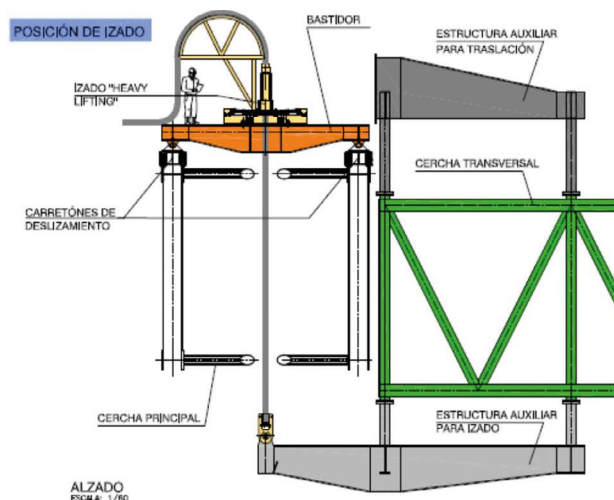


Figura 45. Sistema de izado cerchas transversales.

5.3. Elevación y traslado de paños de cubierta.

Para completar la cubierta, era necesario rellenar el espacio entre las dos cerchas atirantadas. Esta era la misión de los dos paños compuestos por dos cerchas transversales cada uno. Estas cerchas se armaron sobre una plataforma elevada que se dispuso en el lateral de la Castellana. La plataforma permitía montar dos cerchas a la vez mientras se continuaba con el uso habitual del estadio y disponía de un sistema de ripado con el que se podía mover la segunda cercha que se estaba montando en paralelo a su posición de izado una vez levantada la primera.



Figura 44. Elevación cerchas transversales.

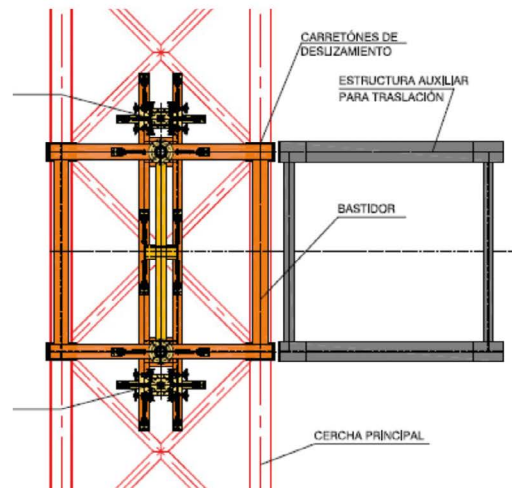


Figura 46. Desplazamiento paño del este.



Figura 47. Vista aérea montaje de la cubierta.

Una vez armada cada cercha transversal de 144.0m se levantaba mediante equipos de heavy lifting hasta los carros de traslado dispuestos sobre las cerchas principales. En ese momento se realizaba la transferencia de carga desde los gatos de heavy lifting a los carros de desplazamiento.

A continuación, se desplazó la cercha horizontalmente hacia el este, hasta una posición que permitía, tras el izado análogo de otra cercha transversal, la configuración del paño este de la cubierta rellenándolo con cerchas tubulares de 2.5m de canto colocadas mediante grúas. Una vez acabado, se trasladó como conjunto hasta su posición definitiva.

Este proceso de traslado transversal del paño este desde la Castellana hasta su posición definitiva fue probablemente una de las operaciones más complejas de todo el proceso de montaje. En primer lugar, la cercha atirantada no era toda recta ya que en su primera parte forma una rampa que hay que subir y luego bajar en su parte final. Eso implica tener que hacer dos transiciones de pendientes con una estructura rígida.

Para que la estructura no se viese afectada durante el desplazamiento y siempre estuviese isostáticamente apoyada en los carros de deslizamiento estos disponen de una barra de conexión articulada entre ellos. Además, cuentan con un gato con un apoyo esférico en la conexión entre gato y estructura que permite girar las cerchas para adaptarlas a su posición definitiva. De todo esto se hablará más adelante en el apartado de estructuras auxiliares.

Así es como el montaje de la parte de la cubierta del este se independizó de la demolición y ejecución de los edificios de ese lateral, evitando cualquier tipo de interferencia con los mismos.

El paño del oeste, con sus dos cerchas transversales, se montaron de modo análogo, pre-armándolas en la plataforma de la Castellana, izándolas, y trasladándolas, completando de este modo la estructura principal de la cubierta fija. Los voladizos laterales y las esquinas de la cubierta que completaban su forma se montaron con grúa desde el exterior del estadio.

5.4. Montaje cubierta retráctil.

El montaje de las cerchas de la cubierta retráctil se efectuó mediante dos grúas en celosía LR800 y LR600, que actuaron desde el fondo norte. Las cerchas híbridas acero-composite, se armaron en una plataforma dispuesta en dicho lateral, incluyendo sus equipos de traslación/elevación y se izaron sucesivamente hasta una misma posición sobre las cerchas de rodadura, lo que permitió acortar el radio requerido.

Las cerchas del fondo sur se trasladaron hasta su posición haciendo uso de su propio sistema de rodadura.



Figura 48. Montaje cerchas cubierta retráctil.

5.5. Medios auxiliares.

Para el proceso de montaje de la cubierta fija, hubo que diseñar gran cantidad de estructuras auxiliares. Las más significativas fueron las empleadas en los montajes y traslados de los paños del este y oeste. En particular, se utilizaron un conjunto de tres estructuras auxiliares principales: una estructura de izado, una estructura de cuelgue y un conjunto de carretes deslizantes para desplazar todo el paño a su posición definitiva.

Estructura de izado.

Para entender el concepto planteado para el izado, primero hay que especificar que todas las uniones definitivas entre cerchas atirantadas y cerchas transversales se producen en el mismo plano horizontal, es decir, las cerchas van embrochadas unas con las otras.

Además, para que sobre las cerchas atirantadas solo actúen cargas verticales, el único modo de izar las cerchas transversales era situar el eje de izado en el centro de la separación entre los dos cordones de las cerchas atirantadas.

Esto obligó a diseñar una estructura que fuera capaz de salvar la distancia horizontal entre este eje de izado y la conexión con las cerchas transversales (3m estrictos a borde de cordón). Esta estructura se denominó “estructura de izado”. Se trata de una pareja de vigas arriostradas entre sí situadas bajo las cerchas transversales y que sobresalen hasta alcanzar la vertical del punto de izado. En el extremo de cada una de estas vigas se conecta un punto de izado.

El motivo por el que esta estructura se colocó bajo las cerchas transversales es que en la parte superior de las mismas se situaba la “estructura de cuelgue” que es la que conectaba las cerchas transversales con los carretes de traslación. Por ello, fue necesario colocar esta estructura de izado en su posición antes de empezar con el montaje de las cerchas a izar ya que éstas iban colocadas sobre ella.

En los nudos de las cerchas transversales es donde se conectaba esta estructura de izado. El nudo delantero, debido a la compresión que producía la excentricidad del punto de izado en este primer apoyo, estaba unido al cordón inferior de la cercha transversal. La unión trasera estaba por lo tanto a tracción por lo que se decidió colgar dicha conexión de un nudo superior de la cercha a izar mediante barras.

Estructura de cuelgue.

Una vez izada la cercha transversal y llegada a la altura correspondiente al plano de los cordones, fue necesario apoyar la cercha izada sobre los carretes que la desplazarían a su posición definitiva. Esta es la función de la estructura de cuelgue.

Al igual que sucede con la estructura de izado en referencia al punto de izado, el peso de las cerchas transversales debía reposar en el eje longitudinal de la cercha atirantada para ser repartido por los carros de traslación a partes iguales a los dos cordones superiores por los que rueda. Esta era la misión de la estructura de cuelgue. Esta estructura se conectaba a los nudos superiores de la cercha transversal y se alargaba hasta llegar al centro de los carros de deslizamiento. Para asegurar un perfecto apoyo articulado sobre los carros, la estructura de cuelgue se apoyaba sobre el carro mediante un gato ENERPAC® de 700Tons. Dicho gato contaba con una rótula en

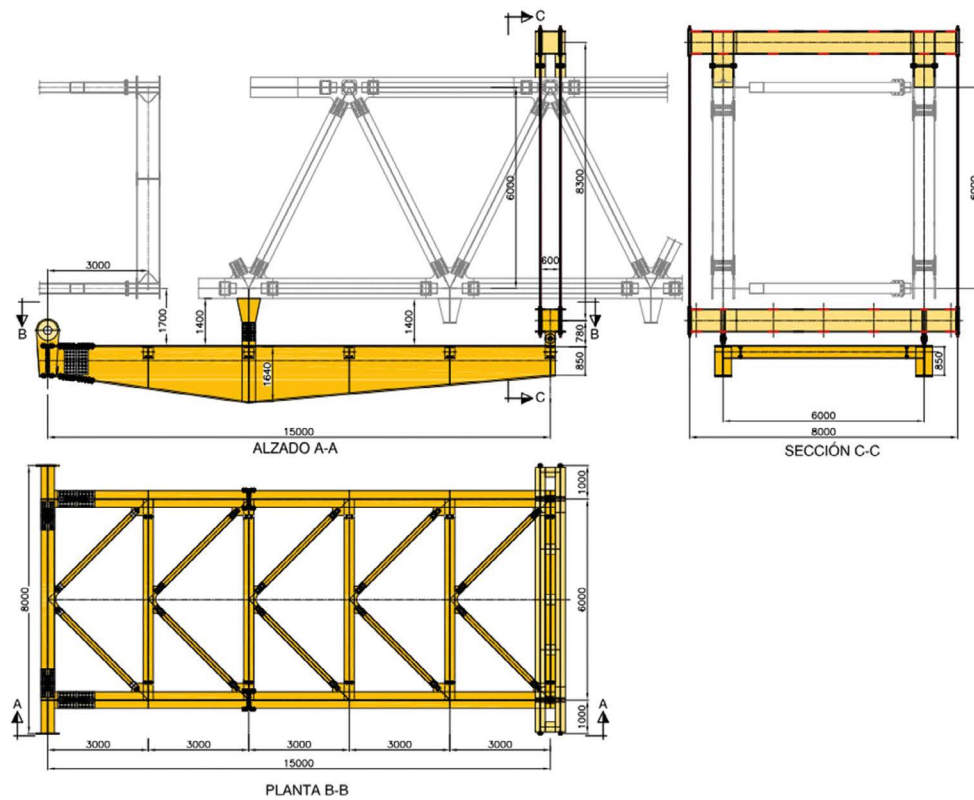


Figura 49. Vista estructura de izado.

cabeza y con una regulación en cota de $\pm 50\text{mm}$, así como de un sistema de ajuste transversal mediante una superficie deslizante con un gato de eje horizontal y $\pm 75\text{mm}$ de carrera.

Adicionalmente, la estructura de cuelgue disponía de un sistema que permitía rotar y bloquear en su eje longitudinal la cercha transversal. Este sistema estaba compuesto por dos gatos separados 4,6m conectados al carro de traslación. Actuando sobre uno de ellos y gracias a la articulación del gato, se podía modificar este giro longitudinal de la cercha transversal. Esto era necesario ya que las cerchas transversales se montan y se izaban con sus caras laterales verticales, pero ésta no era su posición definitiva ya que las cerchas transversales

laterales embrochalaban en la cercha atirantada en la parte inclinada de ésta lo que provocaban que las cerchas transversales debían tener este mismo giro para poder conectarse.

Carros de izado y traslado.

Los carros de izado y traslado fueron los encargados de repartir la carga de las cerchas transversales isostáticamente a los cordones de las cerchas atirantadas ya sea durante el izado o el traslado. Cada carro estaba compuesto por un bastidor que apoya en cuatro bogies dobles articulados con un total de 16 ruedas de 40cm de diámetro que encajaban en las alas de 65mm de los cordones.

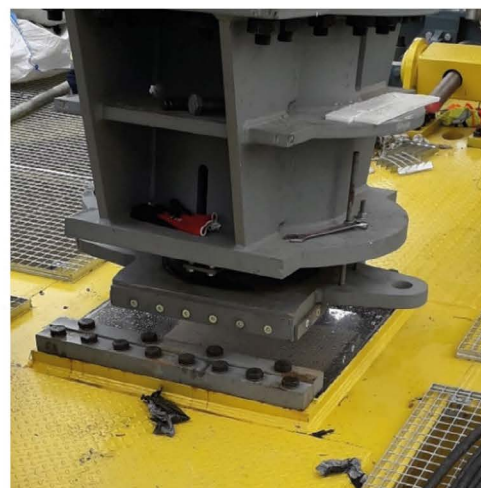
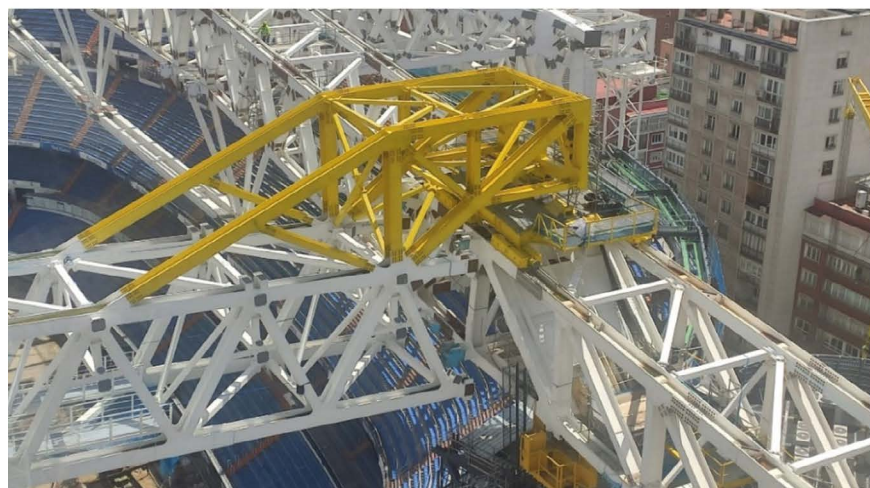
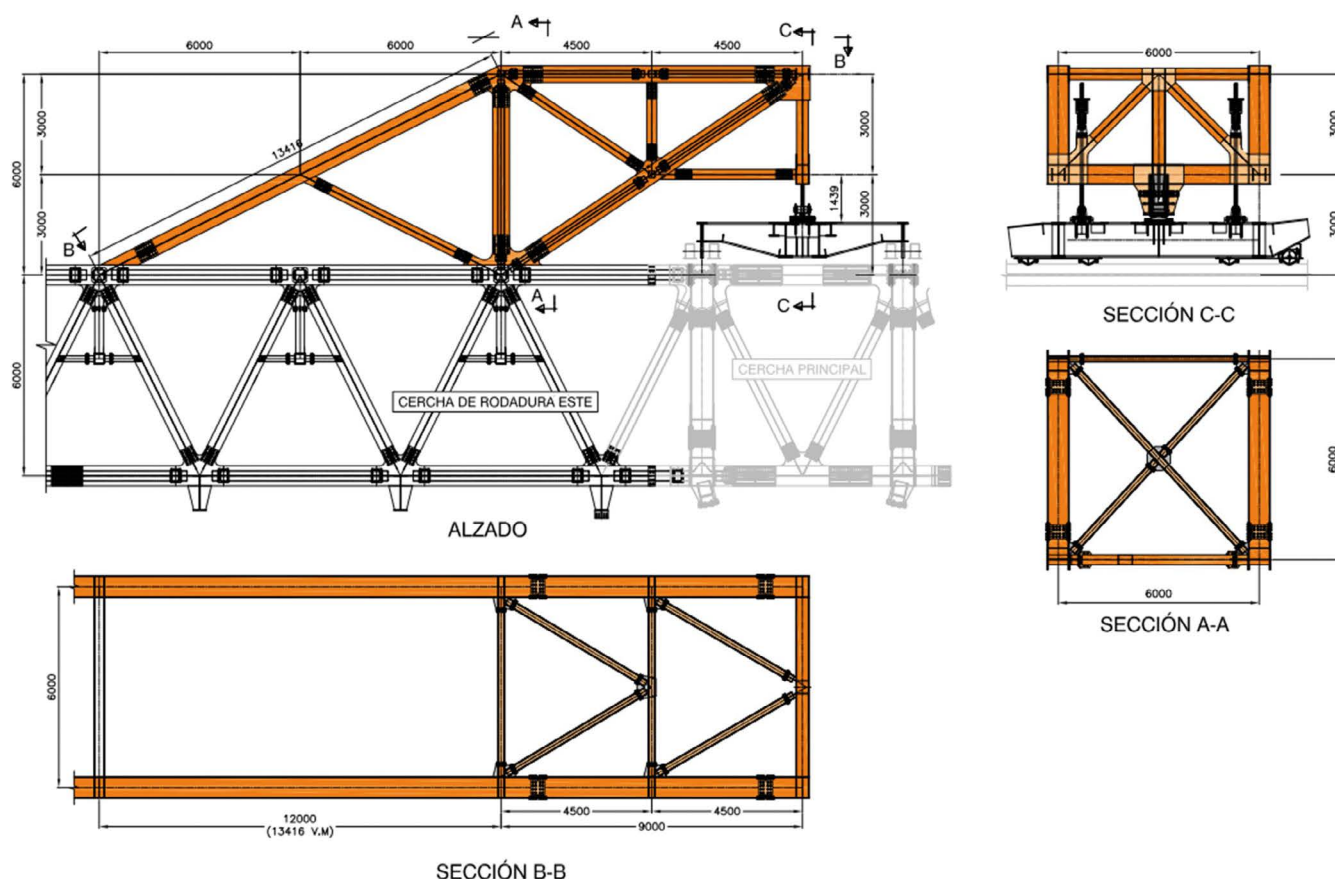


Figura 50. Vista estructura de cuelgue y gato de apoyo.

Estos carros se usaban durante todo el proceso, ya que, en primer lugar, son desde los que se izaron las cerchas transversales. Para ello, los dos gatos de izado del heavy lifting estaban dispuestos en el eje longitudinal del carro, separados 8m, uno en su parte delantera y otro en la trasera. Estos gatos contaban a su vez con un dispositivo de ajuste de posición para poder corregir pequeños movimientos en planta.

Tras el izado, su función cambiaba y servían de apoyo a la estructura de cuelgue situando el gato de conexión en el centro del carro de traslación. También se utilizaban como de punto de apoyo para el sistema de giro y bloqueo longitudinal de las cerchas transversales.

Para la fase de traslado, el paño quedaba apoyado en 4 carros, uno en el extremo de cada cercha transversal. Con el fin de que no se transmitiese ningún tipo de carga adicional al paño de la cubierta, los carros delanteros y traseros de cada cercha atirantada se unían mediante una cadena con “eslabones” que transmitía el tiro desde el carro delantero hasta el trasero. Estos eslabones de la cadena eran necesarios ya que en el camino a recorrer había dos quiebros correspondientes a los cambios de pendiente de la cercha atirantada. Cuando el carro delantero pasaba el quiebro, pero el trasero todavía no, la cadena que los unía debía poder quebrarse.

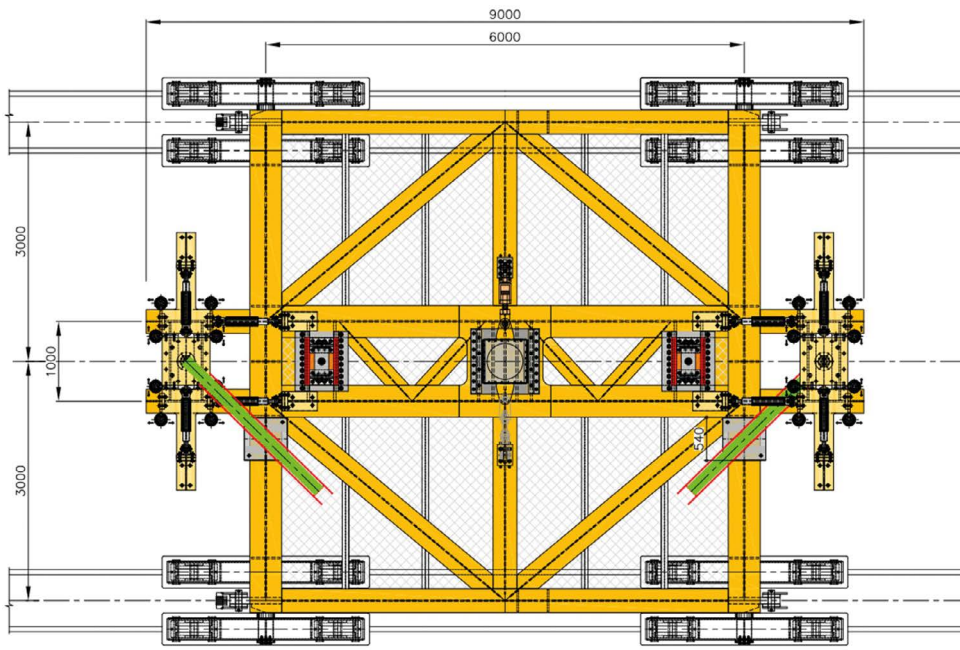


Figura 51. Vista carros de izado y traslación.

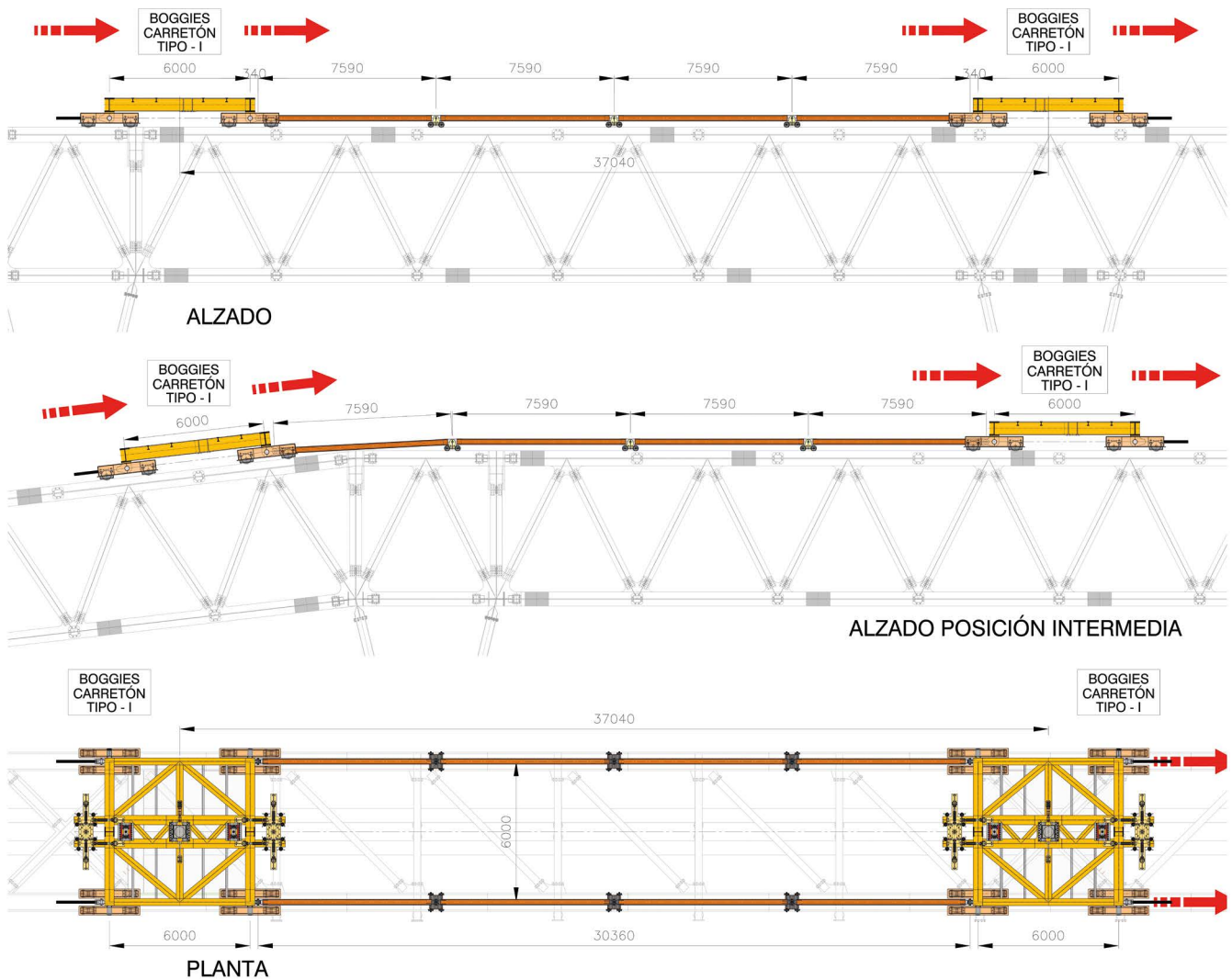


Figura 52. Sistema de atado carros de traslación.

6. DISEÑO DE ALGUNOS ELEMENTOS SINGULARES

Uno de los elementos singulares de la cubierta fueron las losas de transición en el nivel de Skywalk que hubo que diseñar para compatibilizar los movimientos entre los fondos norte y sur y las estructuras de los edificios este y oeste.

Los movimientos diferenciales entre laterales y fondos podían llegar a los $\pm 250\text{mm}$ en dirección norte/sur, $\pm 100\text{mm}$ en dirección este/oeste y $\pm 300\text{mm}$ en vertical.

Con el objetivo de absorber los movimientos en las dos direcciones en planta, los cuatro forjados de las losas basculan-

En las conexiones a los edificios se diseñaron a nivel de la estructura, unos detalles mediante bulones y rótulas esféricas que podían entrar o salir de la losa para adaptar dichos movimientos longitudinales y transversales en planta.

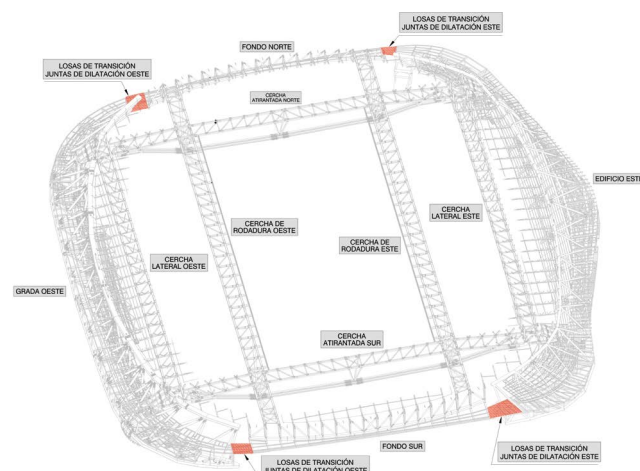


Figura 53. Posición puentes basculantes.

El problema surgía entonces en cómo disponer un punto fijo longitudinal en la estructura si ambos extremos presentaban anclajes móviles en sentido longitudinal. Para ello se diseñó un sistema de centrado mecánico. Este sistema mediante una serie de barras y levas con distintas geometrías provocaba que

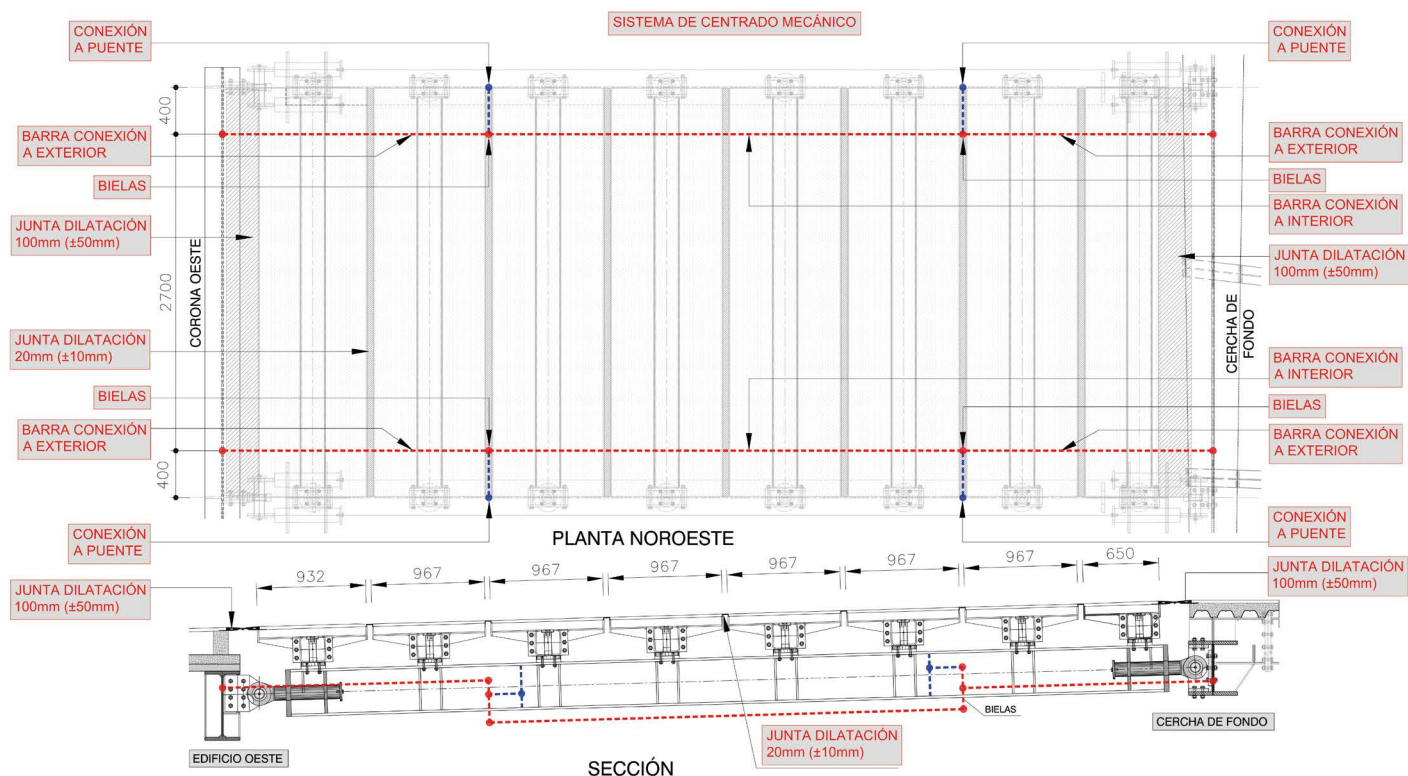


Figura 54. Esquemas puentes basculantes.

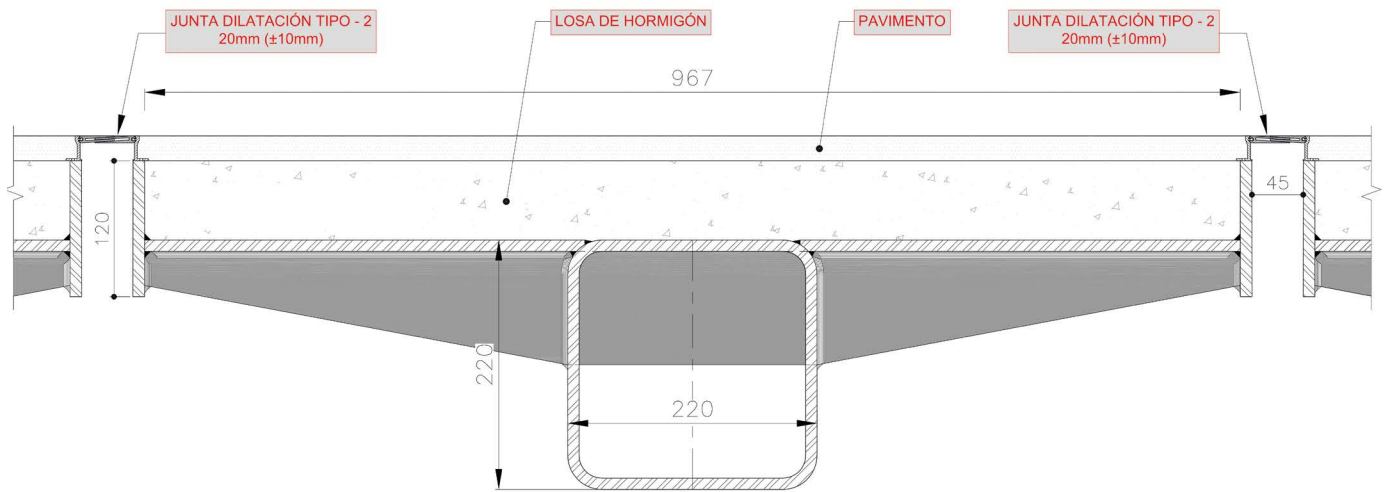


Figura 55. Sección bandeja puente basculante.



Figura 56. Prueba de funcionamiento puentes basculantes.

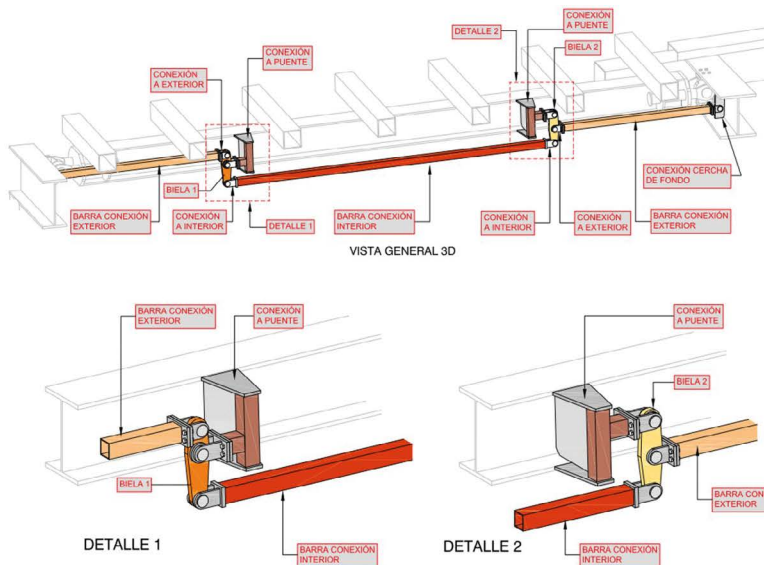


Figura 57. Sistema de centrado mecánico puentes basculantes.

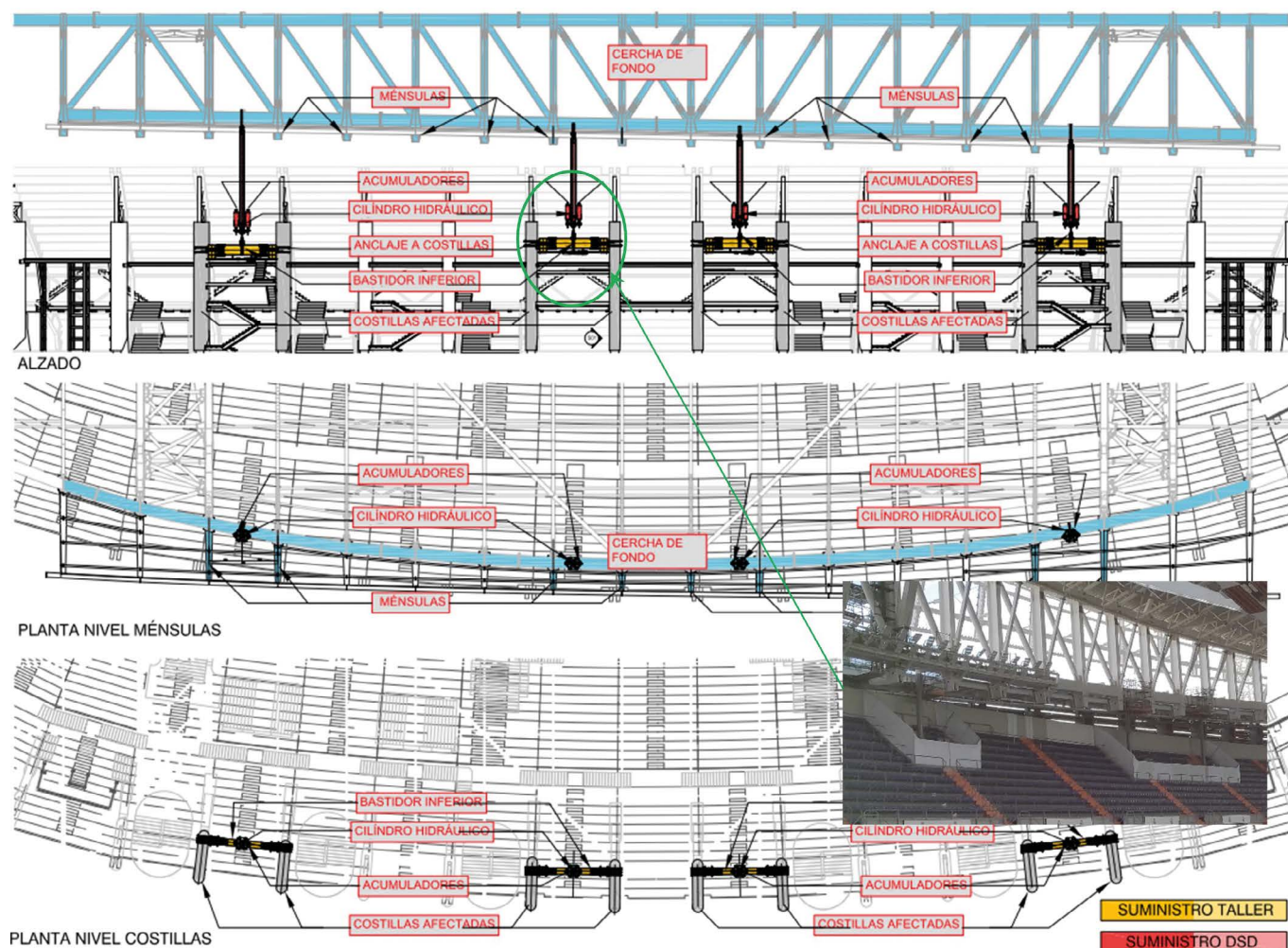


Figura 58. Vista general sistema en fondos.

cualquier desplazamiento horizontal se repartiese equitativamente entre los dos lados de la losa, consiguiendo que, a efectos prácticos, el punto fijo longitudinal se situase en el centro de vano de la losa.

De esta estructura se realizó un montaje en blanco completo en taller para comprobar su correcto funcionamiento.

6.2. Dispositivo de apoyo controlado en fondos.

6.2.1. Objeto del sistema.

Durante la propia ejecución de la obra, se produjeron continuos incrementos de cargas, por requisitos arquitectónicos, con respecto a las utilizadas en el diseño de elementos ya fabricados, en particular en la zona adyacente a los fondos. Para compensar dichas desviaciones hubo que buscar soluciones imaginativas no previstas inicialmente.

Por cada fondo, el incremento de carga podía estimarse en unas 400t. Por ello, algunos elementos de la estructura ya montados veían su coeficiente de seguridad reducido.

La idea fue apoyar en las costillas de los fondos una cantidad de carga equivalente a este aumento, pero sin modificar la respuesta de la estructura frente a sobrecargas de uso o viento. Frente a estas sobrecargas, la cubierta funciona como si no existieran estos apoyos. De este modo, las costillas, que

habían sido liberadas de la cubierta preexistente, no experimentan ningún incremento adicional no controlado.

En definitiva, el objetivo del sistema es que las costillas reciban una carga básicamente constante e igual al incremento de peso experimentado y que no se ve modificada, aunque la cubierta experimente desplazamientos positivos o negativos en el punto de conexión.

6.2.2. Descripción general.

Se han dispuesto en cada fondo cuatro dispositivos de apoyo controlado DAC, basados cada uno en un conjunto de cilindro hidráulico más dos acumuladores de vejiga. Cada acumulador de vejiga se complementa con dos botellas de Nitrogas, lo que amplía el rango de desplazamientos posible sin modificar sensiblemente la carga transmitida.

Cada unidad consta de un cilindro de émbolo con una brida de tubo de soporte montada directamente en la parte superior para extender la altura de apoyo. El cilindro tiene una carrera útil de 500 mm. Para asegurarse de que la presión y la fuerza de actuación se mantengan dentro de los límites requeridos, se proporcionó una pequeña unidad de potencia hidráulica.

La unidad de potencia hidráulica permanece en modo de espera durante el funcionamiento normal y no interfiere

con el procedimiento pasivo, sólo se activa cuando se acerca a los límites del rango de presión permitido y administra la cantidad de aceite dentro del sistema para mantenerse dentro de esos límites.

La parte superior del tubo de soporte y el extremo inferior del cilindro están conectados a la estructura circundante con cojinetes esféricos radiales para permitir un poco de movimiento en todas las direcciones.

Cada una de las unidades del sistema DAC puede operar de forma independiente. Los datos de los sensores de estas unidades se recopilan en un PLC central desde donde es posible el acceso remoto a los datos.



Figura 59. Vista del sistema.

6.2.3. Descripción del sistema DAC.

El sistema funciona tanto de forma activa como pasiva para mantener la fuerza en un rango de desviación de $\pm 5\%$. Está diseñado para funcionar pasivamente durante la mayor parte del tiempo y sólo se activa cuando se acerca el final de la carrera, en condiciones de temperatura cercanas al límite del rango de funcionamiento y en combinaciones desfavorables de carrera y temperatura.

La transición entre el procedimiento activo y pasivo se realiza según los sensores de presión. En el rango de 190 bar a 210 bar, el sistema funciona pasivamente utilizando los acumuladores de vejiga:

- Si la estructura del techo que se mueve hacia abajo aumenta la presión del aceite hidráulico en el cilindro, esto obliga al aceite a salir del cilindro y entrar en la sección de fluido de los acumuladores de vejiga, lo que permite que el cilindro se retraiga; el volumen creciente de aceite en la sección de fluido comprime el nitrógeno en la sección de gas de los acumuladores.
- Si la estructura del techo se mueve hacia arriba, se alivia la presión del aceite en el cilindro. Esto hace que el nitrógeno comprimido empuje el aceite de los acumuladores hacia el cilindro y, por lo tanto, lo extienda.

Ambos procesos continúan hasta que se logra un equilibrio de presión entre la sección de gas y fluido de los acumuladores de vejiga.

El cambio a un sistema activo ocurre cuando se alcanza uno de los límites de presión del procedimiento pasivo:

- Si la presión cae por debajo de 190 bar, el motor -M01 se activa y hace girar la bomba para suministrar más aceite al sistema, esto eleva la presión nuevamente por encima de 190 bar.
- Si la presión aumenta por encima de 210 bar, la válvula -Y01 se abre para dejar que el aceite pase del sistema al tanque para bajar la presión nuevamente por debajo de 210 bar.

El sistema regresa al procedimiento pasivo una vez que la presión vuelve a estar dentro del rango deseado.

6.2.4. Estructura soporte.

Cada cilindro se monta sobre un tubo de soporte y el conjunto se une mediante bulones al cordón inferior de la cercha de

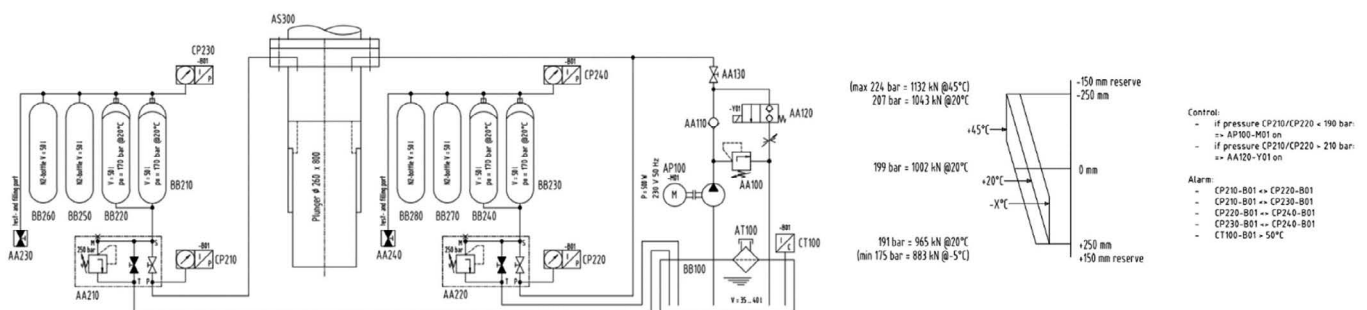


Figure 2: Hydraulic schematic diagram

Figura 60. Esquemas de funcionamiento.

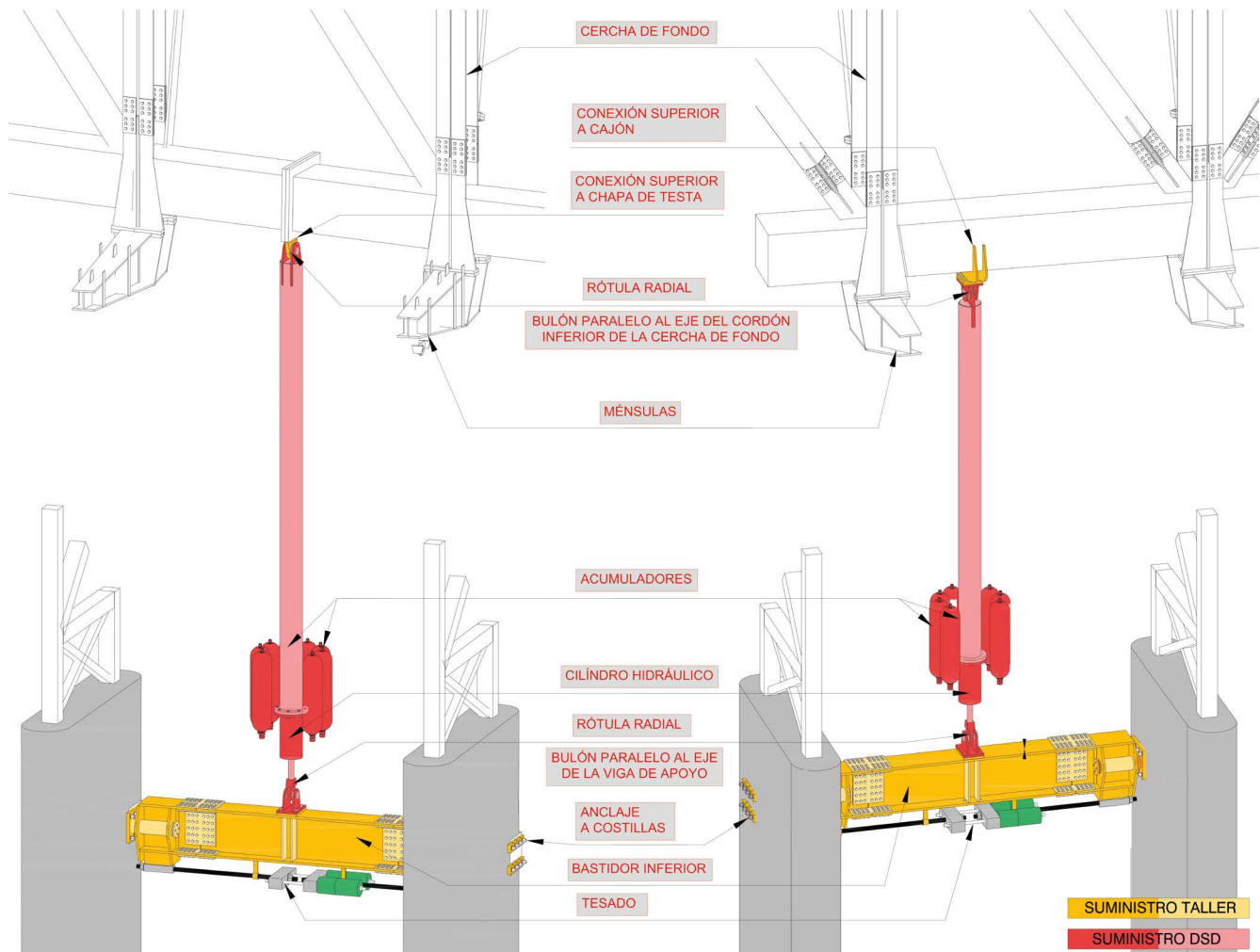


Figura 61. Vistas generales estructura de apoyo.

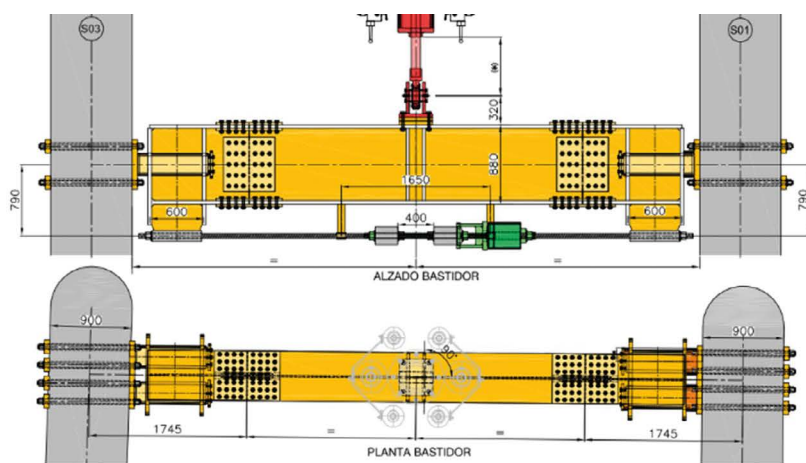


Figura 62. Viga de conexión entre costillas.

fondo de cubierta, en la parte superior y a la viga metálica de apoyo, en la parte inferior.

La viga metálica de apoyo se ancla a las costillas del graderío; dada la limitada capacidad de la costilla de hormigón existente, para evitar que la viga le transmita momento flector debido a la excentricidad de la reacción (en la cara de la

costilla), se dispone un sistema de tesado en la parte inferior de la viga que compense dicho momento flector.

La puesta en carga de los cilindros se realizó por escalones de 25t (100t de carga total) y simultáneamente al tesado del tirante inferior de la viga de apoyo, con escalones de 37.5t (150t de carga total)

7.

CONCLUSIÓN

Se ha intentado explicar en este artículo la definición de proyecto y la construcción de esta estructura novedosa.

En una obra tan singular es necesaria la confianza mutua entre todas las personas que participan en su diseño y construcción. Muchas personas han tenido una participación fundamental en este proceso: en particular, además de la colaboración con el equipo de arquitectura de TYPESA, queremos agradecer el apoyo de la asistencia de obra, Antonio Molina (Ayesa), del gerente José Luis Fernández Sánchez-Largo y sin duda de la obra, personalizada en Manuel Rodríguez San Juan y Ángel Lanusse.

La estructura metálica de la cubierta fue fabricada y montada por los talleres Horta, los péndulos del oeste por Inbersa, y para todas las maniobras de izado y traslado de módulos fue imprescindible la colaboración de Juan Manuel Linero de BBR/FCC.

Referencias

- [1] Martínez, J., & del Río, S. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. Diseño y construcción de la cubierta retráctil. *Hormigón y Acero*. 76(307):175-197. <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3995>
- [2] Martínez, J., Yustres, A., Curbelo, A., & del Río, S. (2025). Remodelación del estadio Santiago Bernabéu. El edificio oeste: las torres - la corona - la viga museo. *Hormigón y Acero*. 76(307): 131-152 <https://doi.org/10.33586/hya.2025.3987>
- [3] EN 1090-2:2008: Annex G.