

Renovación del estadio Santiago Bernabéu. Diseño y construcción de la cubierta retráctil

Renovation of the Santiago Bernabéu Stadium Design and Construction of the Movable Roof

José Martínez Salcedo^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 31 de octubre de 2024; revisado el 3 de febrero de 2025, aceptado el 5 de mayo de 2025

RESUMEN

En este artículo se describen algunos de los aspectos del diseño de la estructura y de los mecanismos de la cubierta retráctil del Estadio Santiago Bernabéu (ESB).

Desde un punto de vista estructural la cubierta consta de dos conjuntos de 6 cerchas de 72.5 m, entre los que se disponen 5 cojines inflables de 8.0m de ancho en PTFE. Buscando la máxima ligereza, estas cerchas se resuelven mediante cordones en sándwich de composite híbrido (combina la fibra de vidrio y la fibra de carbono de alta resistencia) y diagonales de acero.

Para cumplir los requisitos arquitectónicos los accionamientos abren y cierran la cubierta mediante una combinación secuencial de traslación horizontal, despliegue y elevación.

Esta combinación de movimientos permite tener en posición abierta la cubierta retráctil protegida bajo la cubierta fija, y a su vez en posición cerrada lograr el mismo nivel de la cubierta fija.

PALABRAS CLAVE: Cubierta retráctil, cordones de composite, cojines hinchables, mecanismos de traslación e izado.

©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 some aspects of the design of the structure and mechanisms of the retractable roof of the Santiago Bernabéu Stadium.

From a structural point of view, the roof consists of two sets of 6 trusses of 72.5 meters, between which 5 inflatable cushions of 8.0 meters wide in PTFE are arranged. Seeking maximum lightness, these trusses are resolved using hybrid composite sandwich chords (combining high-strength fiberglass and carbon fiber) and steel diagonals.

To meet architectural requirements, the mechanisms open and close the roof through a sequential combination of horizontal translation, deployment, and elevation.

This combination of movements allows the retractable roof to be in the open position protected under the fixed roof, and in the closed position to achieve the same level as the fixed roof.

KEYWORDS: Movable roof, composite chords, inflatable cushions, translation and lifting mechanisms.

©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., & del Río, S. (2025). Renovación 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>

1. REQUISITOS ARQUITECTÓNICOS

Las cubiertas móviles empiezan a ser habituales en estadios e instalaciones deportivas, por la funcionalidad que proporcionan a dichos espacios.

Se podrían agrupar en varias tipologías:

- a. Cubiertas con dos paneles rígidos que se desplazan sobre la cubierta fija y rígida.
Son sin duda la gran mayoría, como ejemplo se puede ver la cubierta del Astana.



Figura 1. Vista general estado del Astana.

- b. Cubiertas en las que la cubrición se recoge en un punto central.
Como ejemplo, el Commerzbank.



Figura 2. Vista general estadio Commerzbank.

- c. Cubiertas en las que la distancia entre los elementos estructurales (cerchas) se modifica, es decir, se repliegan.
Es un grupo muy reducido, Al-Baydt, Toyota y Telia Parken siendo el ejemplo más significativo: Wimbledon.



Figura 3. Vista general estadio de Wimbledon.

La singularidad de la cubierta retráctil del ESB deriva de dos requisitos arquitectónicos básicos.

- Cuando la cubierta retráctil se encuentra recogida, es decir, el estadio abierto, ésta no es visible desde el exterior.



Figura 4. Vista general cubierta retráctil recogida.

- Cuando se cierra, la cubierta retráctil debe quedar sensiblemente al mismo nivel que la cubierta fija.

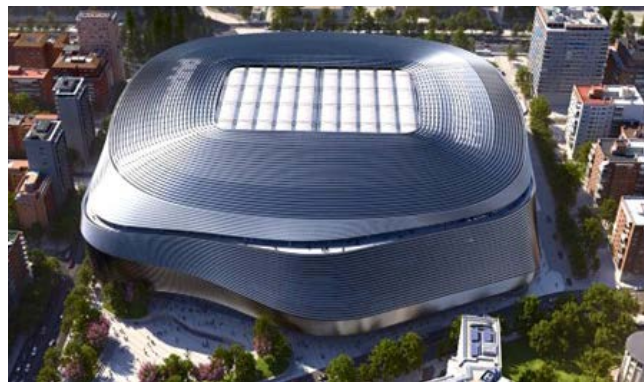


Figura 5. Vista general cubierta retráctil cerrada.

En las cubiertas de Toyota, Telia Parken, Wimbledon o en Al-Baydt (4 retráctiles) esto no se cumple. Las cubiertas se mueven sobre la cubierta fija y permanecen pues visibles desde el exterior.

** En el estadio Telia Parken se dispone un "garaje" encima de la cubierta fija.

Esta singularidad obliga a recoger la cubierta retráctil bajo la cubierta fija y a combinar secuencialmente un movimiento de traslación, presente en todas las cubiertas del tipo "a" & "c" con un movimiento de elevación, lo que no sucede en ninguna de las cubiertas mencionadas.

El proyecto desarrollado por FCC ha permitido materializar con robustez y fiabilidad el requisito expresado por el Club de nivelar la cubierta retráctil con la cubierta fija en posición cerrada.

En la Figura 6 se esquematiza la solución propuesta.

La cubierta retráctil se compone de dos paneles formados por cinco cojines inflables de aproximadamente 72 m x 8.0 m entre seis cerchas híbridas acero-composite de aproximadamente 72.5 m de luz y 5 m de canto.

En el extremo de cada cercha principal se dispone un bogie motorizado que realiza la traslación y que integra también el mecanismo de elevación.

Los elementos básicos de la cubierta retráctil son pues:

- Cerchas híbridas acero-composite.
- Cojines inflables- Sistema de inflado
- Mecanismos de traslación
- Mecanismos de elevación
- Mecanismos de despliegue & estabilización
- Sistema de control.

Salvo los mecanismos de elevación, el resto de los componentes se puede considerar que son comunes a todas las cubiertas replegables, las que se han denominado tipo "c":

- Estadio de Toyota,
- Estadio Telia Parken
- Estadio Al-Bayt
- Cubierta de Wimbledon.

Entre todas estas cubiertas existen notables similitudes, aunque también diferencias. La estructura portante en todas ellas son cerchas y el mecanismo de traslación son bogies.

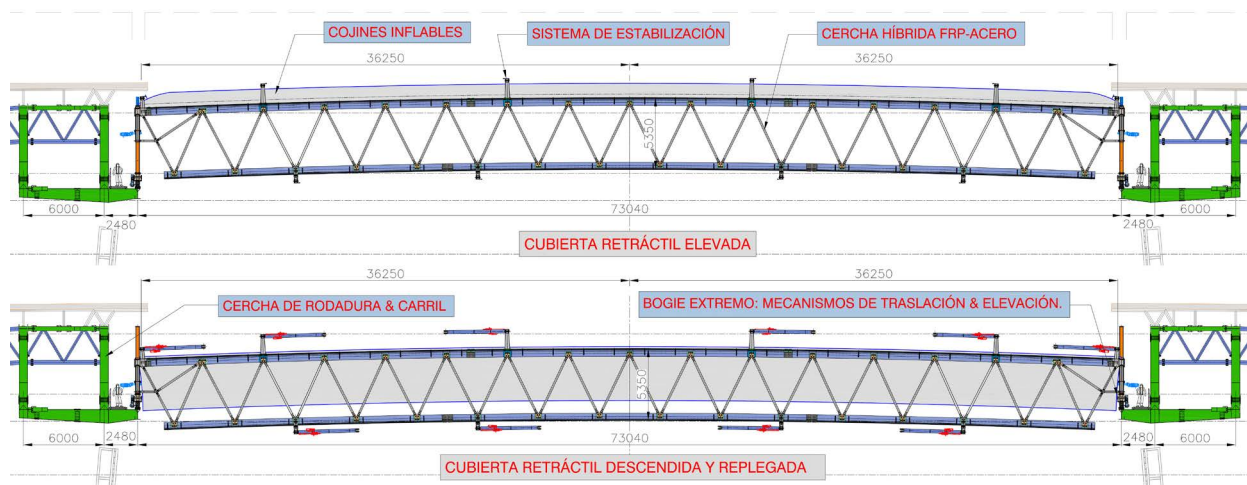


Figura 6. Definición de elementos.



Figura 7. Vista general sistema de traslación.



Figura 8. Vista general sistema de elevación.

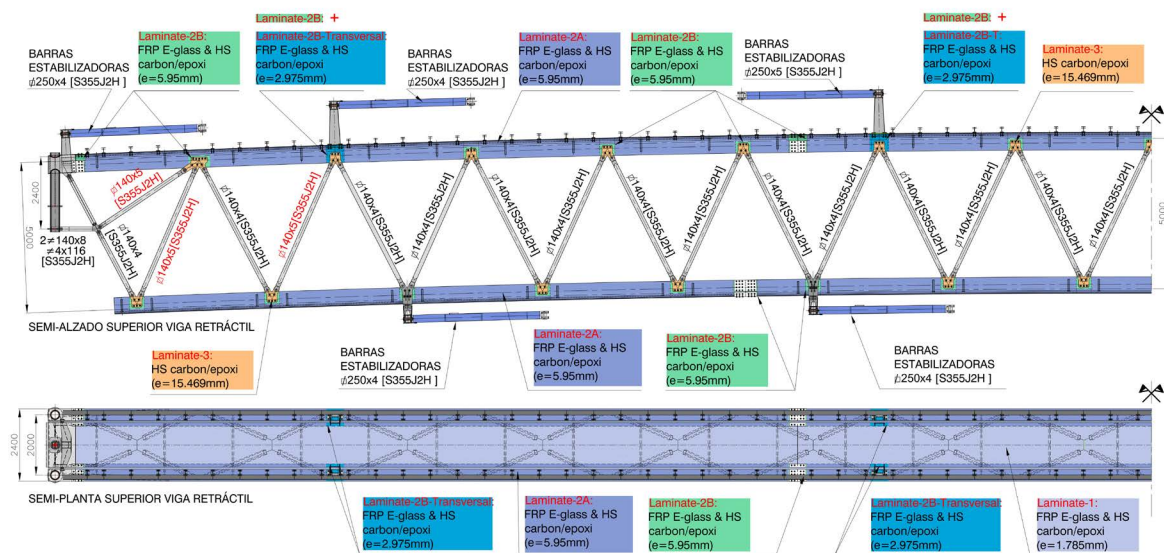


Figura 9. Cercha híbrida. Definición de elementos.

El accionamiento para la traslación en unos casos es por fricción, en otros por cremallera e incluso mediante cables, en función de las fuerzas horizontales implicadas por la pendiente de la rodadura.

En el ESB es el más simple posible, mediante motorreductores/fricción con un solo una línea de rodadura.

2.

ESTRUCTURA: CERCHAS HÍBRIDAS

La estructura consta de dos conjuntos de seis cerchas híbridas de 72.5 m de luz. Las cerchas son triangulares y Warren, tienen un canto de 5.0 m y un ancho de 2.4 m.

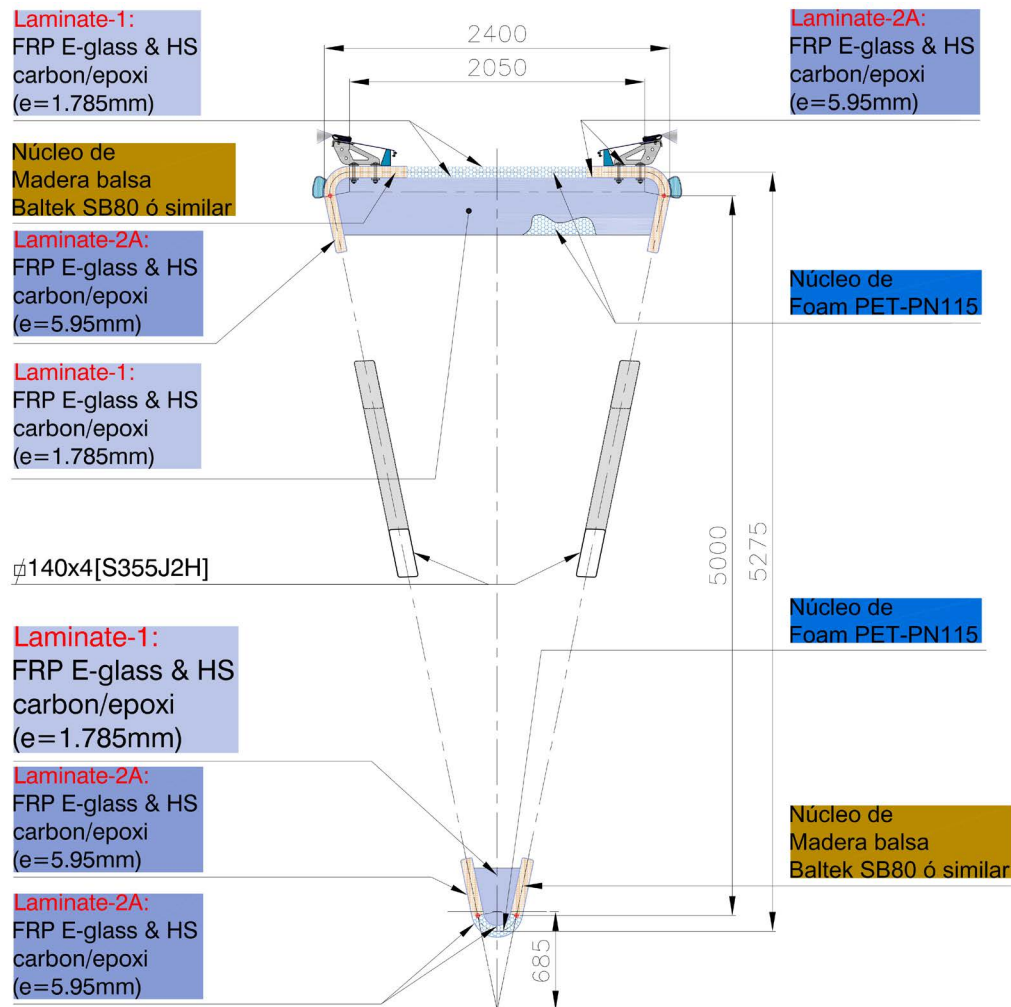


Figura 10. Cercha híbrida. Sección tipo.

Las diagonales se resuelven mediante perfiles tubulares de acero S355J2H y los cordones con secciones sándwich en composite. El núcleo es de madera de balsa en la zona con mayores requisitos y foam PET en el resto, mientras que los laminados exteriores combinan fibras de vidrio y carbono HS. Esta combinación optimiza las ventajas resistentes y de rigidez y acota el costo.

Este diseño permite reducir muy significativamente el peso propio de las cerchas lo que combinado con la ligereza propia de los cojines inflables resulta en una optimización de los mecanismos de traslación y en particular de elevación de la cubierta retráctil lo que compensa en gran medida su coste inicial. En total, cada cercha con sus equipos pesa unas 50 t.

Los menores pesos que manejar, y por consiguiente la menor potencia de los accionamientos implicados, redundará en un menor coste de operación de la cubierta a lo largo del tiempo.

2.1. Laminados de composite.

Estos materiales avanzados se emplean desde hace tiempo en la industria aeroespacial, industria naval o en la industria eólica. Su uso en la construcción, en aplicaciones de responsabilidad estructural de esta entidad es muy novedoso.

Los laminados generales de las cerchas y de las zonas de refuerzo, tanto en las uniones entre tramos de cordones como en los nudos de unión a las diagonales consisten en una combinación de los siguientes tejidos:

TEJIDOS NCF:		
TIPO - I	Q-E 435 gr/m ² [0°,90°,±45°]	
TIPO - II	U-C 600 gr/m ² [0°]	
TIPO - III	X-C 300 gr/m ² [±45°]	
TIPO - IV	U-C 600 gr/m ² [90°]	

Figura 11. Definición de laminados tipo.

Unidireccional de fibra de carbono HS (0°):	U-C- 600 gr/m ²
Unidireccional de fibra de carbono HS (90°):	U-C- 600 gr/m ²
Cuatriaxial de fibra de vidrio tipo E (0°, +/- 45°, 90°):	Q-E- 435 gr/m ²
Doble biaxial de fibra de carbono HS (+/-45°):	X-C- 300 gr/m ²

Todos ellos son NCF (*non crimp fabric*). Esto es muy importante a efectos de obtener una buena resistencia a compresión, que es aspecto crítico de estos materiales. La resina es epoxi.



Figura 12. Vista general tejido composite.

Para cada uno de los 4 tejidos, se determinaron las propiedades mecánicas (rigidez & resistencia) con un 60% de volumen de fibra mediante ensayos. La fabricación de las probetas necesarias se realizó con un proceso totalmente análogo al previsto para la pieza.

Se determinaron las siguientes propiedades, con normas ISO o ASTM:

- Tension test: Strength, modulus & Poisson; X1 & X2
n=6 ISO 527-4
- Compression test: Strength and modulus; X1 & X2
n=9 ISO 14126
- In plane shear test: Strength and modulus.
n=6 ISO 14129
- V notch shear : Strength and modulus
n=3 ASTM D5379
- Inter laminar shear strength ILSS
n=6 ISO 14130
- Tg
n=3 ISO 6721
- Volumen de fibra
n=3 EN 2564

** n= Número de probetas por ensayo. Módulos de elasticidad entre 0.1 y 0.5P.
Desviación estándar inferior al 7% del valor medio.

Los ensayos arriba mencionados se realizaron para cada lote homogéneo de fibras & resina, es decir, cualquier cambio de lote de tejido o/y resina implicó nuevos ensayos.

Es importante señalar que las propiedades no solo dependen de la fibra y la resina, sino del modo en que se configura el material.

Dada la importancia de las propiedades del U-C -600 gr/m², la empresa pre-adjudicataria tuvo de presentar antes de la adjudicación definitiva ensayos a tracción y compresión de este en los que se obtuviesen al menos los siguientes valores medios con una desviación estándar inferior al 5% del valor medio:

Ext>138 GPa Exc>125 GPa σ_{xt} =1400 MPa σ_{xc} = -700 MPa

A partir de estos cuatro tejidos se han realizado una serie básica de laminados:

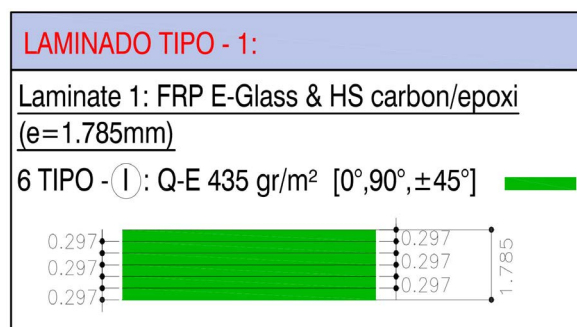


Figura 13. Laminado tipo 1.

Este laminado se utilizó en zonas de menor responsabilidad, en zona central del cordón superior.

El laminado 2A, es el laminado longitudinal básico, que proporciona las propiedades longitudinales de los cordones superior e inferior. El U-C 600 gr/m² es continuo, sin solape alguno en toda la pieza debiendo garantizarse y documentarse su perfecta alineación longitudinal "fiber misalignment" < 1.5°, con el objetivo de optimizar la resistencia a compresión.

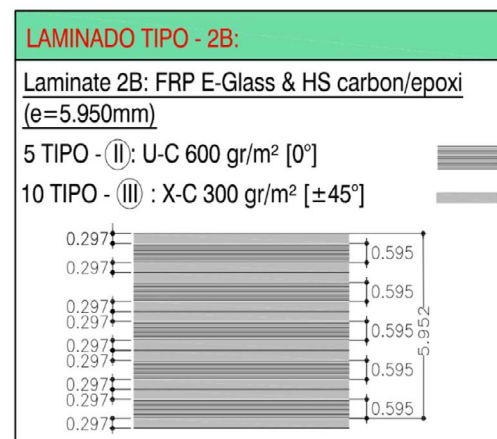
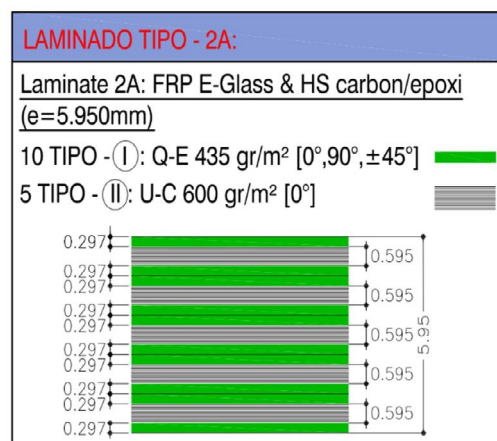


Figura 14. Laminados tipo 2A y 2B.

En las zonas de nudos el laminado 2A se sustituye por el 2B, conservando el espesor de las capas sustituidas para asegurar alineación, y resistencia compresión. Este laminado más isótropo es más adecuado para las uniones atornilladas.

Finalmente, el laminado 3, se utiliza en las cartelas de los nudos, y equivale a un cuatriaxial de fibra de carbono.

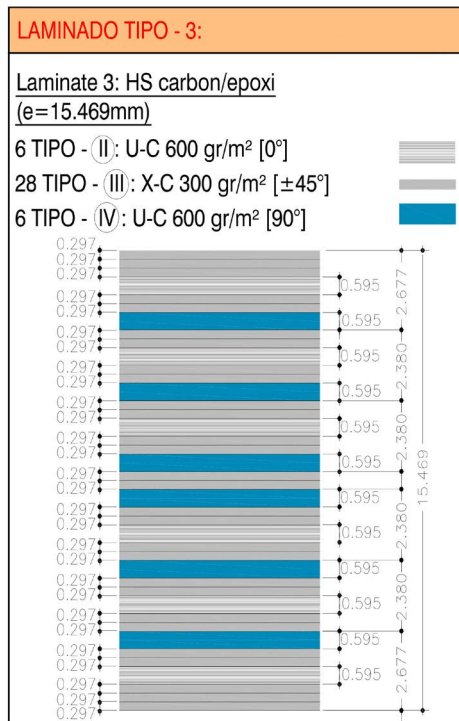


Figura 15. Laminado tipo 3.

Para cada uno de los laminados se ensayaron todas las propiedades mecánicas de las láminas & se verificó que se alcanzan siguientes propiedades, exigidas en pliego:

- Laminado tipo 1:
 $E_{xt} > 22 \text{ GPa}$ $E_{xc} > 20 \text{ GPa}$ $G > 8 \text{ GPa}$
- Laminado tipo 2A:
 $E_{xt} > 80 \text{ GPa}$ $E_{xc} > 72 \text{ GPa}$ $\sigma_{xt} = 700 \text{ MPa}$ $\sigma_{xc} = -400 \text{ MPa}$
- Laminado zona de conexión 2B:
 $\sigma_{xt} = 800 \text{ MPa}$ $\sigma_{xc} = -500 \text{ MPa}$ $T = 200 \text{ MPa}$
- Laminado zona de nudo 3B:
 $\sigma_{xt} = 600 \text{ MPa}$ $\sigma_{xc} = -400 \text{ MPa}$ $T = 200 \text{ MPa}$

+ Los valores anteriores son valores medios. Número de probetas por ensayo igual que para las láminas. Módulos de elasticidad entre 0.1 y 0.5P. Los resultados se homogeneizarán al 60% de fibra. Desviación estándar inferior al 7% de valor medio.

El cuadro adjunto indica propiedades obtenidas en ensayos:

TABLA 1.

Propiedades de materiales.

	QE	UC+QE	UC+XC	QC
LAMINADO	1	2A	2B	3
ENSAYOS				
Et (Gpa)	17	64	63	41
Ec (Gpa)	19	67	56	38
Xt (Mpa)	310	840	870	490
Xc (Mpa)	280	600	570	340
Vf %	50,4	51,6	51,8	50,1
τ (Mpa)	185	158	191	220
G (Gpa)	7,1	6,6	14,2	14,4
PLIEGO				
Et (Gpa)		80		
Ec (Gpa)		72		
Xt (Mpa)		700	800	600
Vf=60%		400	500	400
Xc (Mpa)			200	200
τ (Mpa)				
G (Gpa)	8			

En cuanto a los núcleos, se utilizó un núcleo de madera de balsa & foam PET principalmente. En la zona de nudos, para poder apretar los tornillos se dispuso polietileno, y en la conexión de las barras de estabilización se realizaron zonas monolíticas de fibra de vidrio, que se emplearon como núcleo.

El núcleo de madera de Balsa (Baltek SB80) verificó expresamente: $G13/G23 > 150 \text{ N/mm}^2$ & $E33 > 2100 \text{ N/mm}^2$ con una densidad inferior a 132 kg/m^3 .

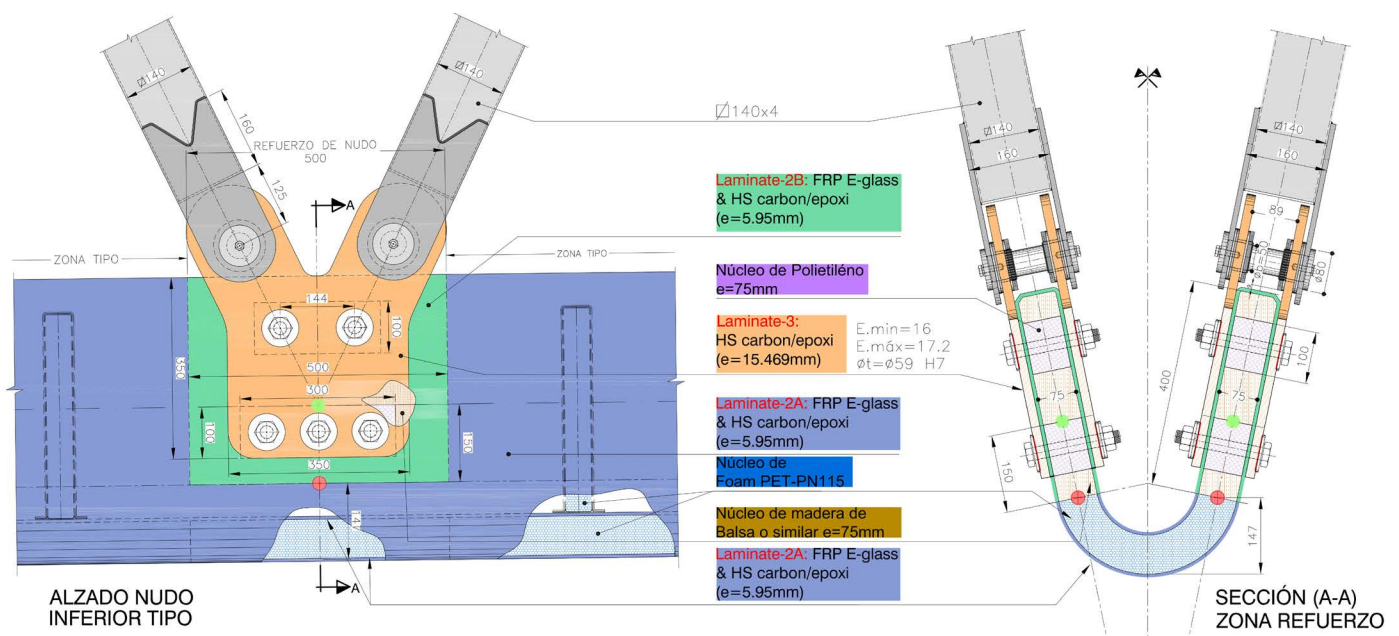


Figura 16. Detalle nudo inferior.

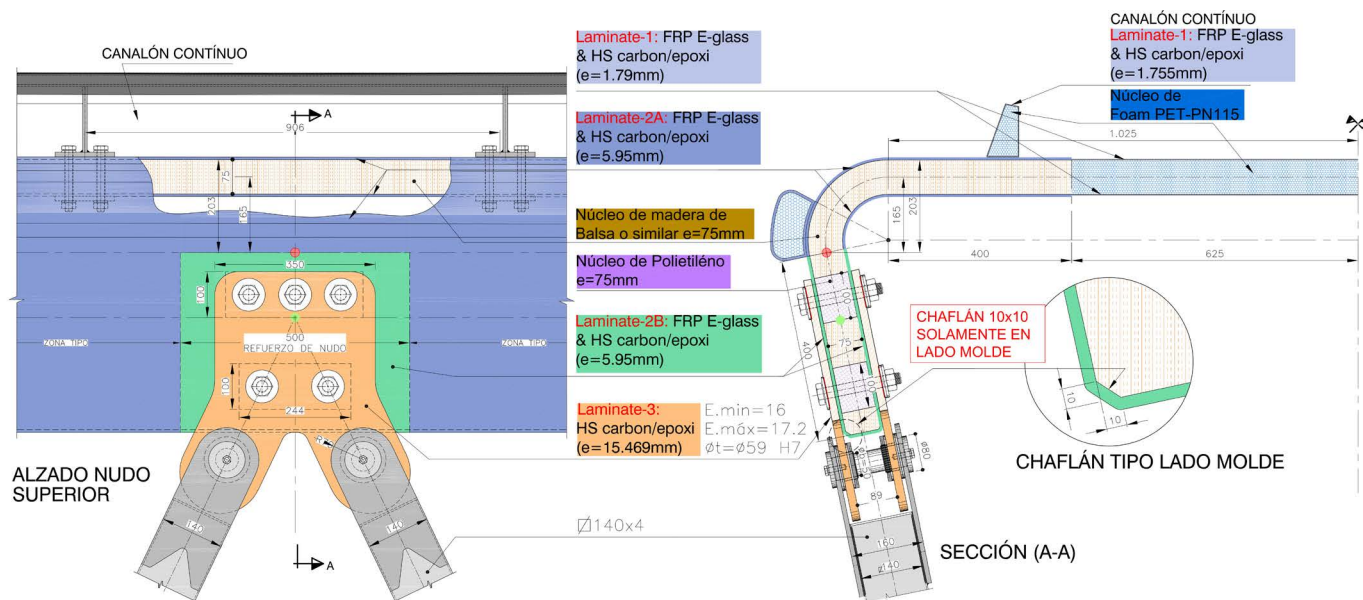


Figura 17. Nudo superior tipo.

El núcleo de foam PET (Divinylcel PN115) verificó expresamente: $G13/G23 > 30 \text{ N/mm}^2$ & $E33 > 150 \text{ N/mm}^2$ con una densidad inferior a 110 kg/m^3 .

+ Valores medios. Número de probetas por ensayo $n=6.0$. Desviación estándar inferior al 7% de valor medio.

2.2. Introducción de la seguridad.

En todas las propiedades del material se ha de pasar de los valores medios de ensayos a valores característicos,

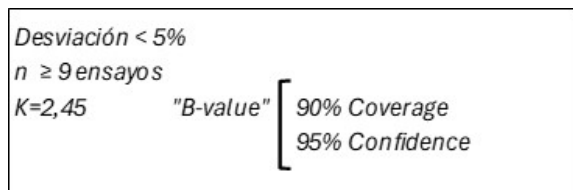


Figura 18. "B-value".

Este valor es un "B-value" y corresponde a 90% Coverage & 95% Confidence, con EN 1990 se requiere un 95% Coverage y un 75% Confidence; el valor sería $k=2.00$ en lugar del 2.45 adoptado.

El cálculo de la capacidad resistente se realiza apoyándose en la siguiente bibliografía de referencia:

- [1] "Guidance Design of FRP" CEN /TC 250 Structural Eurocodes (2016)
- [2] "Structural Design of Polymer Composites" (Design Code and Handbook) European Structural Polymeric Composites Group (1996)
- [3] "Rotor Blades for wind turbines" DNVGL- ST- 0376 (2015)

La seguridad se introduce en [1] de modo enteramente análogo al resto de los eurocódigos:

(1) The design value X_d of a material or product property can be expressed in general terms as:

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m}$$

Figura 19. Valor de diseño.

Donde η introduce las modificaciones de resistencia por condiciones ambientales de humedad, temperatura, duración de carga y fatiga; y γ_m se expresa en este caso [1] como producto de γ_{m1} y γ_{m2} , donde el primero considera las incertidumbres en las propiedades del material y el segundo las incertidumbres del proceso de producción.

Con las especificaciones previstas se adopta:

$$\gamma_m / \eta = 1.15 \times 1.35 / 0.90 \approx 1.725$$

Luego para pasar de valores medios a valores de cálculo se ha de dividir aproximadamente por $1.725 / (1 - 0.05 \times 2.45) = 1.9$

2.3. Elementos singulares del cálculo.

En general, el cálculo de la estructura de composite resulta más laborioso que en acero, material isótropo, y dúctil.

2.3.1. Abolladura.

El cálculo a compresión del cordón superior implica, además del cálculo global de estabilidad típico, el cálculo de la abolladura del sandwich, con caras externas ortótropas con consideración implícita del núcleo, así como de modos de fallo adicionales como el "wrinkling" de las pieles de composite en núcleos muy diferentes como la madera de balsa y el foam.

Resistencia a compresión del sandwich cordón superior (Figura 20).

Luego las tensiones límites con este coeficiente son:

Laminado 2: 254 N/mm^2 & Laminado 1: 100 N/mm^2

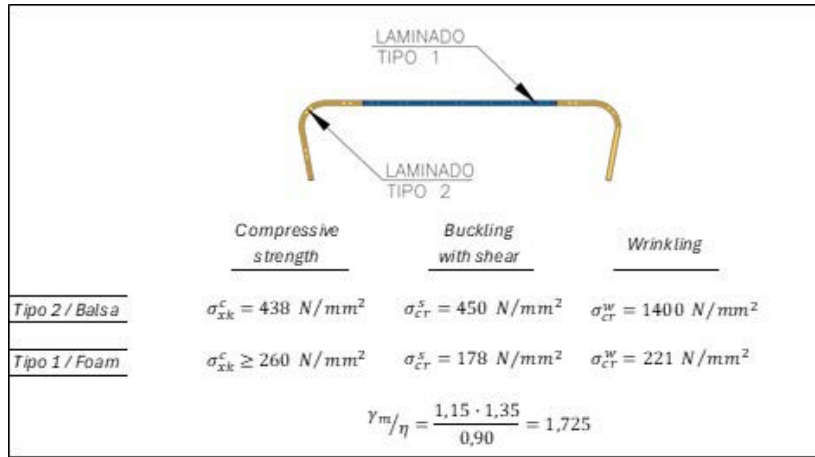


Figura 20. Resumen resistencias.

Los datos anteriores se obtienen de:

4.2 Resultados de compresión

4.2.1 Compresión paralela a la dirección de la fibra: TUFERT-Panel_P51-P_C0

ID operario	F10030	T(°) / %Hr	22.0/50.1
Fecha	19/10/2018	Velocidad	1 mm/min
Dimensiones (mm)	145x25	Acondicionamiento	EN2743 tipo B

Nombre	ID ensayo	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Carga máxima (kN)	Resistencia (MPa)	Módulo (GPa)	PBS (sin unidades)
Specimen 1	18141-15	5.958	24.97	81.07	545	81.23	0.02
Specimen 2	18141-16	6.060	25.07	60.77	400	81.85	0.05
Specimen 3	18141-17	5.966	25.04	73.42	491	81.98	0.10
Specimen 1	18141-42	6.042	24.93	75.86	504	79.10	0.01
Specimen 2	18141-43	6.023	24.93	77.31	515	75.00	0.03
				Promedio	514	79.3	
				sd	23	3.1	
				cv (%)	5	4	

$$\sigma_{xk}^c \geq 500 \text{ MPa}$$

$$\text{Desviación} < 5\%$$

$$n \geq 9 \text{ ensayos}$$

$$K=2,45$$

$$\sigma_{xk}^c \geq 0,875 \cdot \sigma_m^c = 438 \text{ N/mm}^2$$

Figura 21. Resistencia a compresión característica.

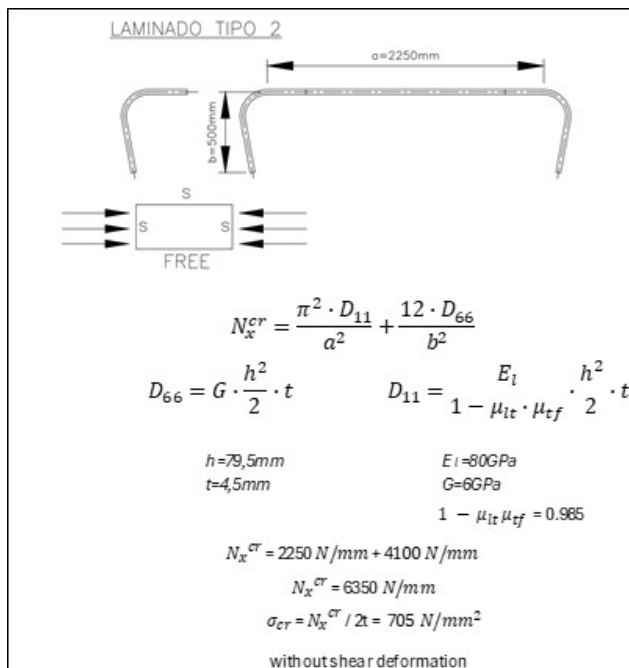


Figura 22. Cálculo abolladura.

Table 17.1 Critical uniaxial running load, N_x^{cr} , for laminated plates. Some solutions are restricted to long plates.⁴ Some solutions do not have aspect ratio restrictions.⁴

		S - simple support C - clamped support F - free edge S/C - simple or clamped support $K = \frac{2D_{66} + D_{12}}{\sqrt{D_{11}D_{22}}}$ $\nu = \frac{D_{12}}{2D_{66} + D_{12}}$	
Case	N_x^{cr}	Restriction	
	$\frac{2\pi^2}{b^2} [\sqrt{D_{11}D_{22}} + D_{12} + 2D_{66}]$	long plate	
	$\frac{\pi^2}{b^2} [3,125\sqrt{D_{11}D_{22}} + 2,33D_{12} + 4,66D_{66}]$	long plate	
	$\frac{\pi^2}{b^2} [4,53\sqrt{D_{11}D_{22}} + 2,62D_{12} + 5,24D_{66}]$	long plate	
	$K \leq 1: \frac{\sqrt{D_{11}D_{22}}}{b} [15,1K\sqrt{1-\nu} + 7(1-K)]$ $K > 1: \frac{\sqrt{D_{11}D_{22}}}{b} [13,1\sqrt{1-\nu} + 6(K-1)(1-\nu)]$	long plate	
	$\frac{\pi^2 D_{11}}{a^2} + \frac{12 D_{66}}{b^2}$	none	
	$\frac{\pi^2 D_{11}}{(0,7a)^2} + \frac{12 D_{66}}{b^2}$	none	
	$\frac{\pi^2 D_{11}}{(0,5a)^2} + \frac{12 D_{66}}{b^2}$	none	

Figura 23. Carga crítica uniaxial en chapa no isotrópica.

with shear

$$\frac{1}{1 + \frac{N_{cr}}{t_c \cdot G_c}} = 0,64$$

6350 N/mm

75 mm · 150 MPa = 11250 N/mm

Balsa

$$\sigma_{crs} = 0,64 \cdot 705 \text{ N/mm}^2 = 450 \text{ N/mm}^2$$

Wrinkling

150 MPa

$$0,5 (E_l E_c G_c)^{\frac{1}{3}} = 1464 \text{ N/mm}^2$$

806 Pa

2100 MPa

Figura 24. Wrinkling.

2.3.2. Uniones atornilladas & bulonadas.

Las uniones entre tramos de cordones de cerchas son atornilladas, y las uniones a las diagonales bulonadas.

En las uniones atornilladas, dado el carácter no dúctil del composite, no es posible asumir que la carga se distribuye por igual entre los tornillos de una línea de 3 tornillos.

Por otra parte, es preciso tener en cuenta la concentración de tensiones en el entorno del taladro, no pudiendo efectuar como en el acero un simple cálculo de la sección neta.

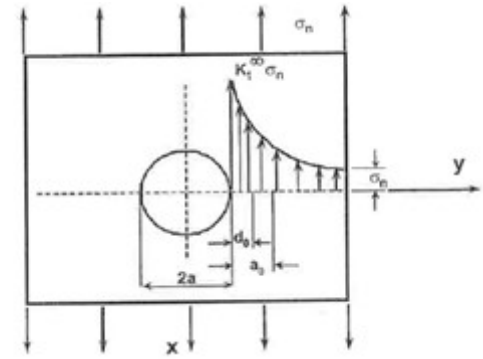


Figura 26. Factor de concentración de tensiones.

A su vez, el factor de concentración de tensiones depende de la distribución de rigideces de la lámina.

$$K_t^{\infty} = 1 + \sqrt{2 \cdot \left(\frac{E_x}{E_y} - \nu_{xy} + \frac{E_x}{2 \cdot G_{xy}} \right)}$$

Figura 27. Factor de concentración de tensiones en chapa no isotrópica.

Pero realmente, un laminado, aunque está lejos de ser dúctil, tampoco es totalmente elástico y el fallo requiere de cierta zona afectada, la comprobación no se hace en el borde del agujero.

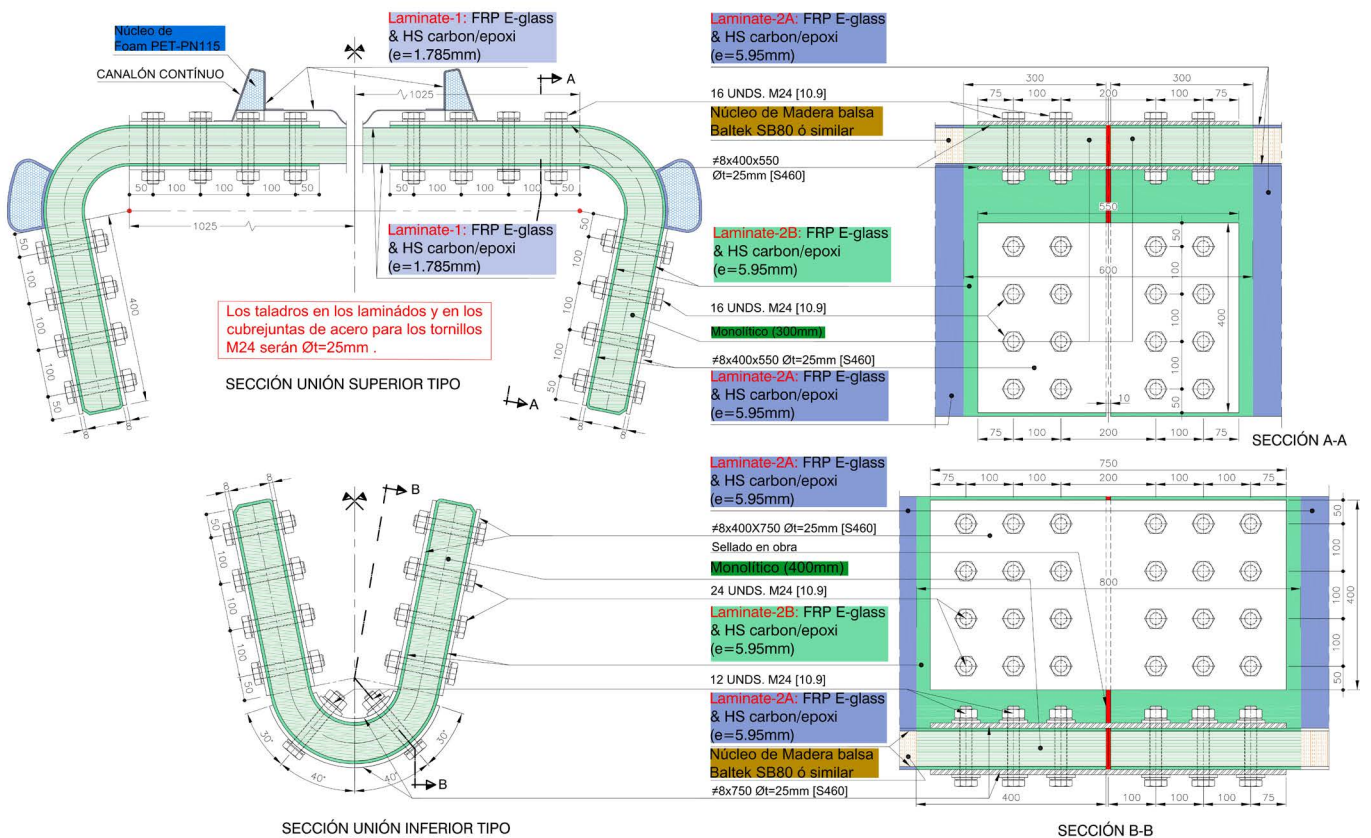


Figura 25. Unión atornillada entre módulos.

Sin ánimo de ser exhaustivo, se expone el ASC (average stress criterion) aplicado en una unión de 3 tornillos del cordón.

Este criterio parte del análisis tensional medio en una zona a0, una distancia característica al borde del agujero.

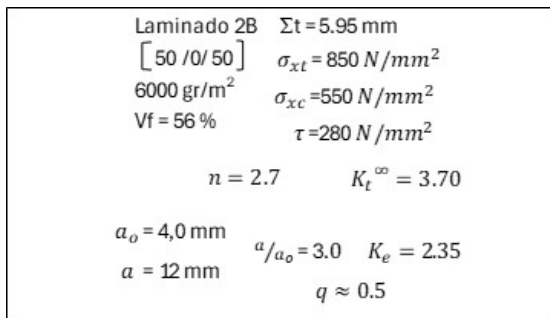


Figura 28. Corrección al factor de concentración.

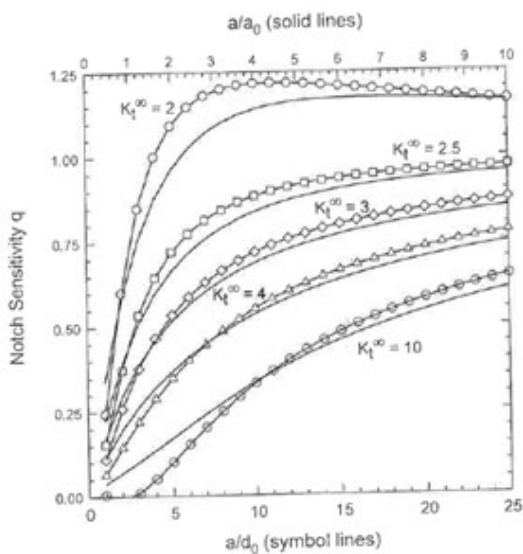


Figura 29. Corrección al factor de concentración.

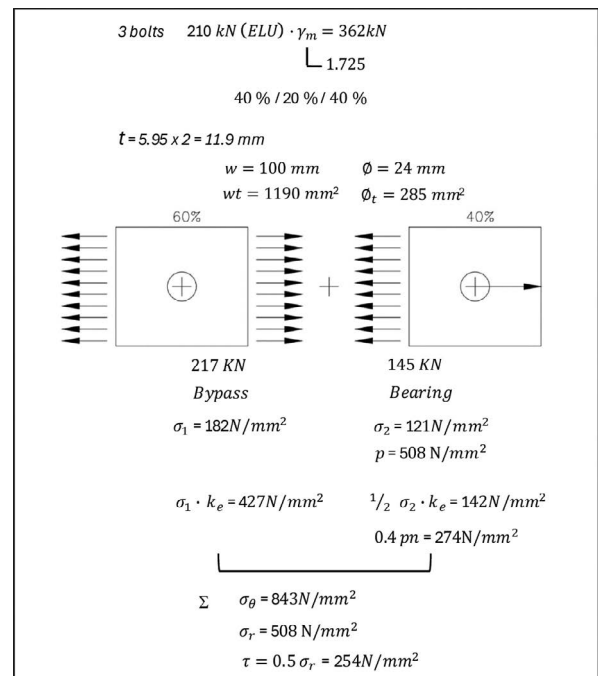


Figura 30. Tensiones existentes alrededor del agujero.

Se puede ver que las tensiones serían aceptables para el laminado 2B

Las uniones bulonadas se calculan de modo análogo.

2.4. Ensayos estructurales piezas de composite.

Además de los ensayos de los materiales base, se realizaron una serie de ensayos estructurales de piezas en laboratorio con el fin de validar los cálculos analíticos que se habían realizado de uniones atornilladas, uniones bulonadas, nudos tipo...

Ensayo 1 (uniones atornilladas):

El objetivo de este ensayo era validar la resistencia estimada en una unión atornillada de laminado de composite con cubrejuntas metálicos. Este detalle es usado principalmente en las uniones entre las piezas de cordón superior e inferior entre sí.

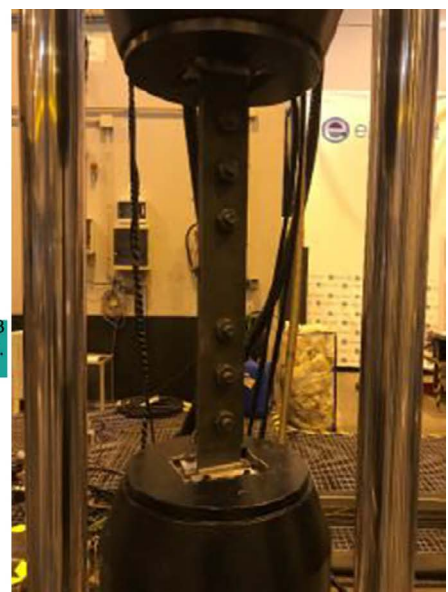
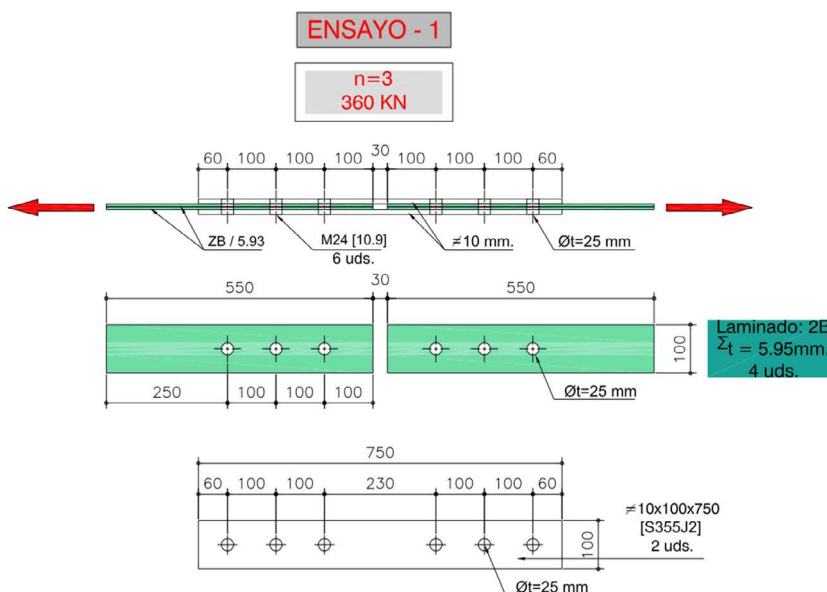


Figura 31. Ensayo uniones atornilladas.

Ensayo 2 (uniones bulonadas):

Con este ensayo se validaba la resistencia estimada en una unión bulonada mediante cubrejuntas de composite. Esta unión se utiliza en todas las conexiones de las diagonales metálicas.

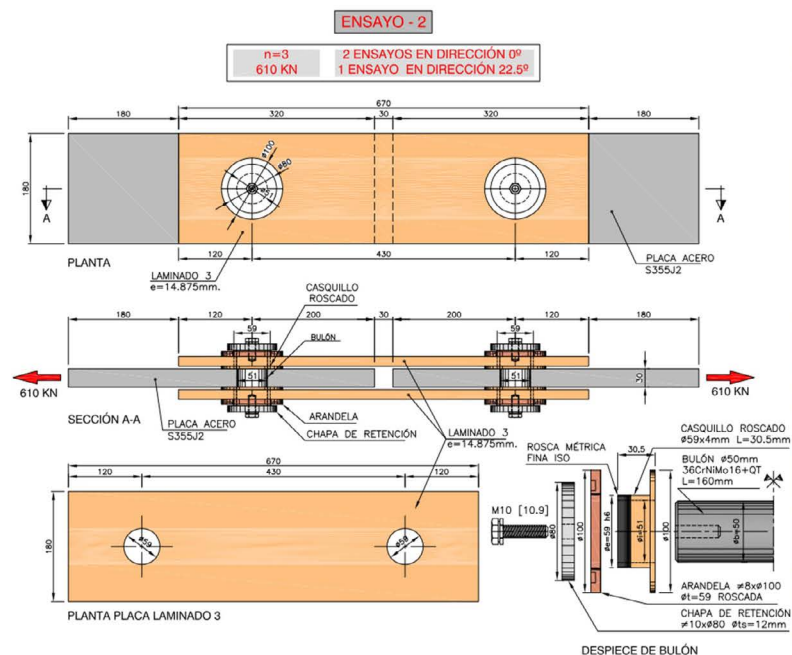


Figura 32. Ensayo uniones bulonadas.

Ensayo 3 (cambios de membrana):

En este ensayo se comprobaba la resistencia en las uniones entre diferentes tipos de membranas. Este detalle es tipo del cordón superior donde hay transiciones entre distintos tipos de laminado y núcleos.

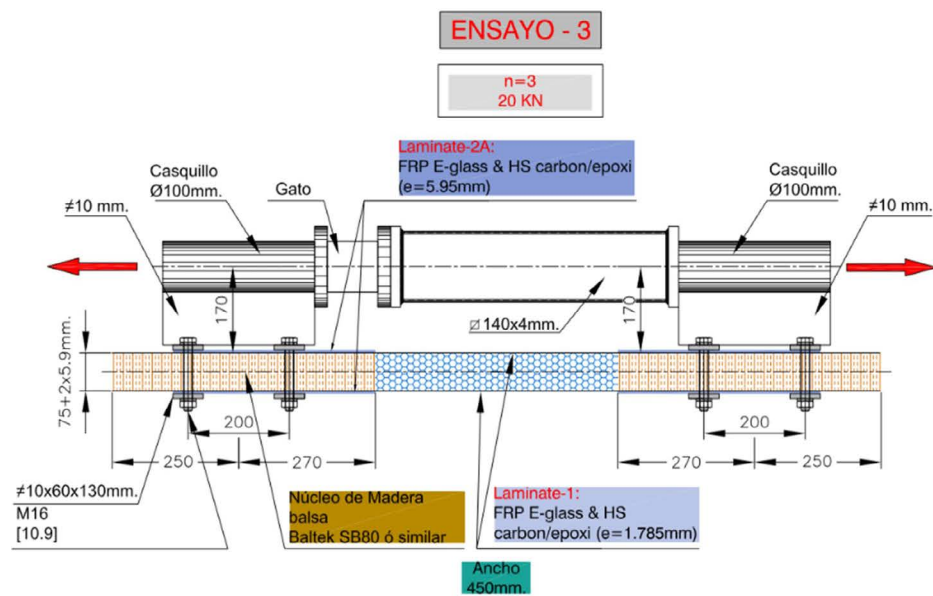


Figura 33. Ensayos cambios de membrana.

Ensayo 4 (zona curva):

En este caso se estudiaba el comportamiento de la zona monolítica en su parte curva. Estas zonas curvas están presentes tanto en el cordón superior como en el inferior.

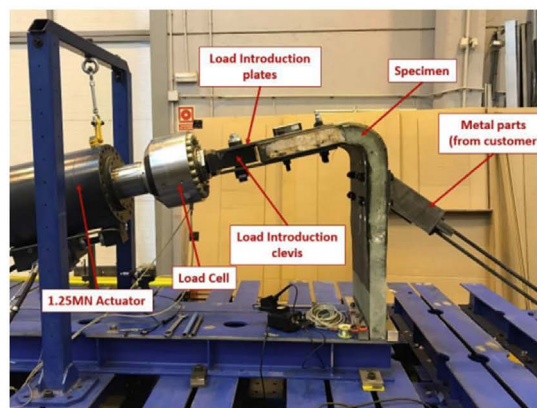
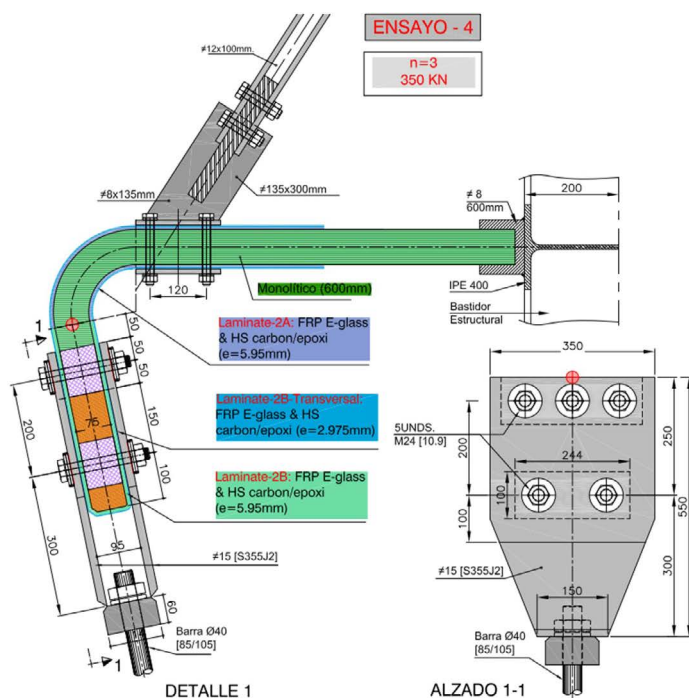


Figura 34. Ensayos zona curva.

Ensayo 5 (piezas a compresión):

Este ensayo comprobaba el comportamiento a compresión de una de las piezas de composite. Aunque la forma de la pieza se asemeje a un cordón inferior que está básicamente a tracción, la idea era representar la zona curva del cordón superior que sí que está sometida a compresiones.

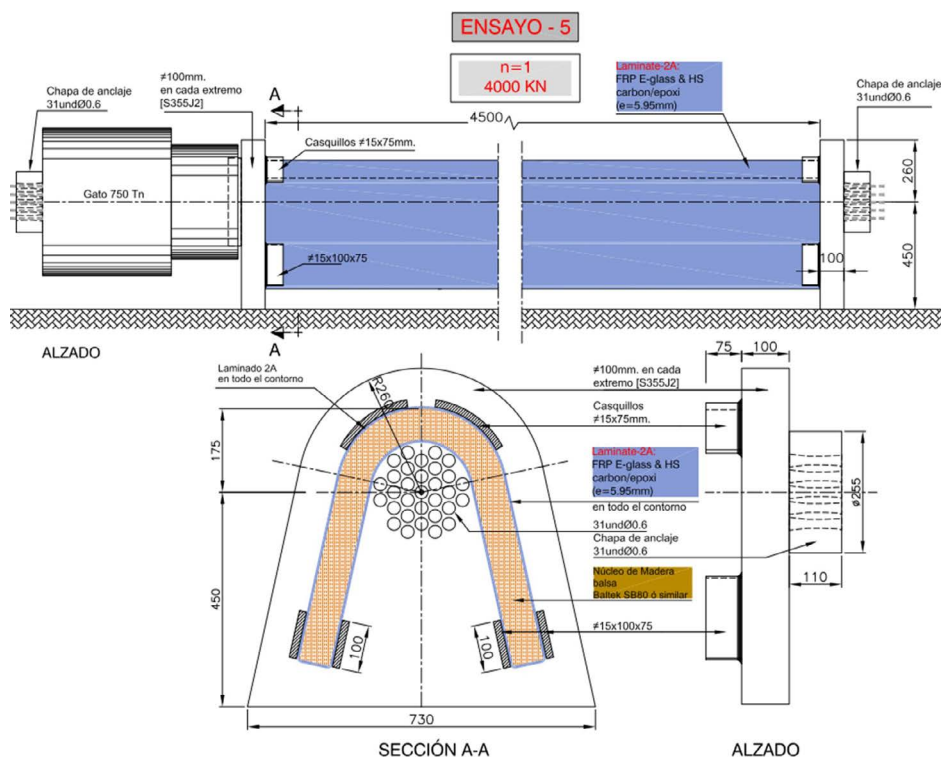


Figura 35. Ensayos pieza a compresión.

En este ensayo se comprueba la capacidad resistente de un nudo tipo completo de cordón con diagonal.

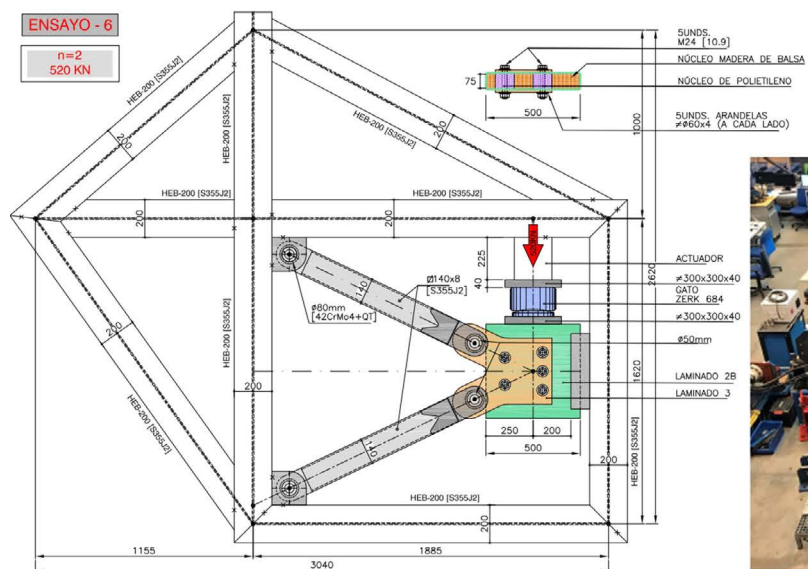


Figura 36. Ensayo nudo tipo.

2.5. Fabricación piezas de composite.

La fabricación de los cordones se realizó por infusión con bolsa de vacío VARTM. Cada cordón, superior e inferior se realizó en 3 piezas que se unían entre sí mediante uniones atornilladas.

Con objeto de facilitar la colocación de las telas, los moldes de ambos cordones son rectos pese a la geometría curva de la cercha.

La fabricación de los moldes no cilíndricos, y sobre todo la colocación del apilado de telas y núcleos en un molde con zonas de doble curvatura incrementaría notablemente la dificultad y las posibilidades de error.

La secuencia simplificada de fabricación consta de las siguientes fases:

- Preparación del molde
- Colocación de auxiliares inferiores
- Laminado inferior
- Colocación de núcleo
- Laminación superior
- Colocación de auxiliares superiores
- Infusión
- Curado

A continuación, se muestran unas fotos del proceso en el cordón superior.

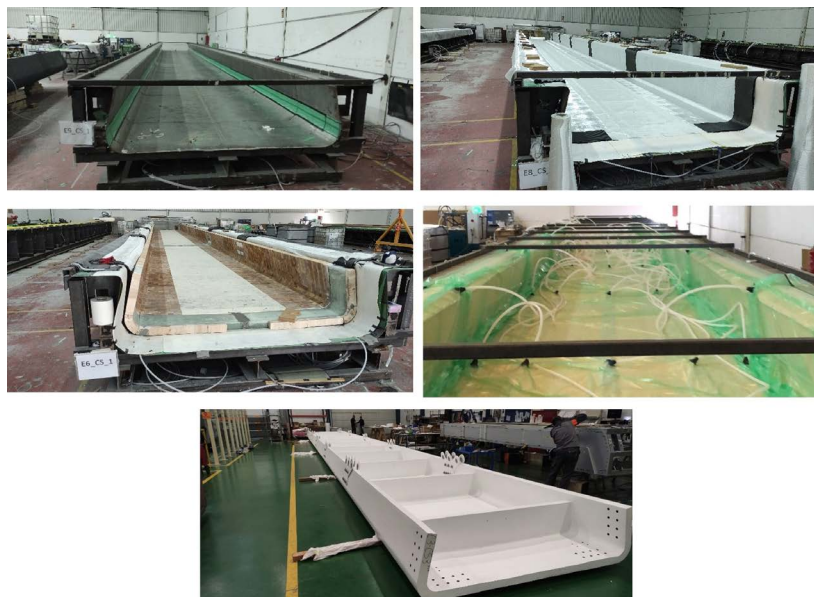


Figura 37. Proceso de fabricación cordón superior.

El mismo procedimiento se usa en el cordón inferior.



Figura 38. Proceso de fabricación cordón inferior.



Figura 39. Proceso de curvado cercha en taller.

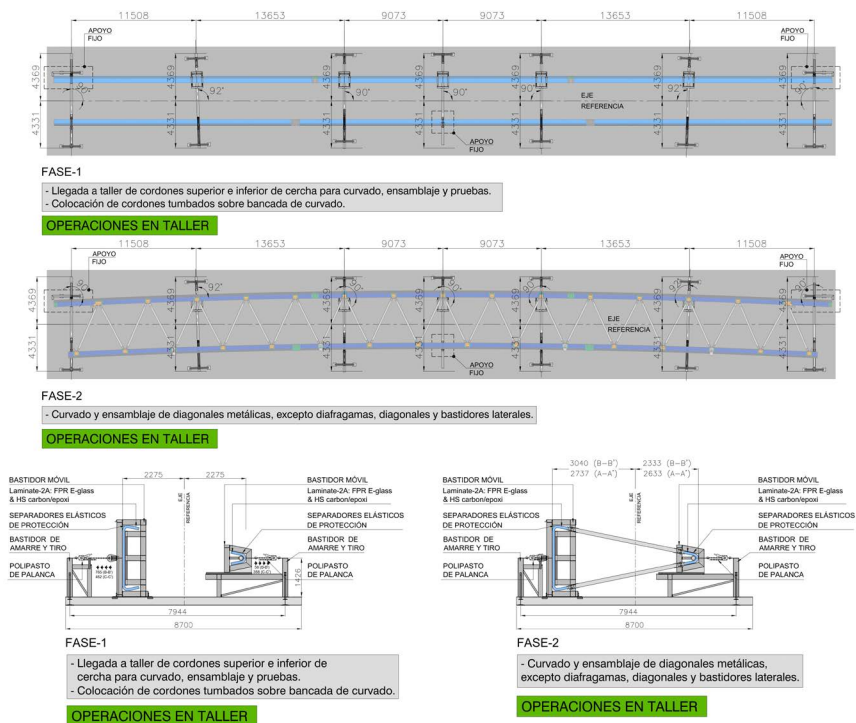


Figura 40. Esquema proceso de curvado cercha.

Una vez fabricados los cordones rectos, se obtiene la geometría curva longitudinal buscada de la cercha, curvando individualmente, mediante un útil diseñado al efecto, ambos cordones e insertando las diagonales de acero en las cartelas cuya separación entre nudos corresponde a la geometría deseada.

Las tensiones inducidas por este proceso son plenamente asumibles tanto por los cordones como por la cercha.

Para que este curvado sea correcto es imprescindible que la geometría del conjunto sea exacta. Por ello, la ejecución de las operaciones de taladrado de las piezas de composite se llevó a cabo en una empresa (Jupasa) dotada de máquinas capaces de realizar todos los taladros de la pieza sin desplazamiento de ésta. Con esto se consiguió una precisión máxima.



Figura 41. Proceso de taladrado cercha.

3. COJINES INFLABLES

3.1. Material.

Los cojines de la cubierta consisten en una doble capa de membrana de tejido PTFE revestido de fluoropolímero, TENARA4T40.

Este material es la opción más flexible y por lo tanto la más adecuada para estructura plegables. Sin embargo, una vez en carga, esta flexibilidad inducía un alargamiento excesivo que obligó a disponer “belts” intermedios para limitar su deformación. Este fenómeno se corroboró en el prototipo de cojín realizado, en cuya primera versión sólo estaba el cojín y en su versión final se dispusieron los belts comprobando su correcto funcionamiento.

La membrana se fija a las cerchas híbridas mediante perfiles de aluminio en sus bordes largos y en los bordes cortos mediante un “belt” curvo.

[FactBox]	[TechSpecs]	Fabric
Light transmission Diffuse light component (haze) Very high Outdoor applications Large-scale, retractable or nonretractable permanent structures, roofings, membrane structures, etc. Benefits - Foldable - Permanently UV-resistant and colourfast - Weather resistant - Dirt- and waterrepellent - No absorption of moisture - Free of any plasticisers - High functional and aesthetic qualities thanks to optimized technical specifications for fabric manufacture and light transmission Fabric specifications 4T = 4000 N/5cm 40 = Light transmission 4F = High frequency	Fabric material Coating material Fabric width Weave Weight Thickness Max. tensile strength, warp Max. tensile strength, weft Trapezoidal tear, warp Trapezoidal tear, weft Water column Fire behaviour	ePTFE (e Polytetrafluoroethylene) 100 % Fluoropolymer 157.5 cm 62" Plain weave 1:1 1080 g/m² 31.85 oz/yd² 0.55 mm 0.022" 4000 N/5cm (EN ISO 13934-1) 4000 N/5cm (EN ISO 13934-1) 798 N (ASTM D4851) 752 N (ASTM D4851) > 10000 mm 142.23 psi B1 (DIN 4102; B-s1, d0; DIN EN 13501-1) Class A (ASTM E84; NFPA 701)
	[TechSpecs] Light Degree of transmission Degree of reflection Absorption	38 % (ASTM D 1003) 59 % 3 %

Figura 42. Propiedades material cojines.

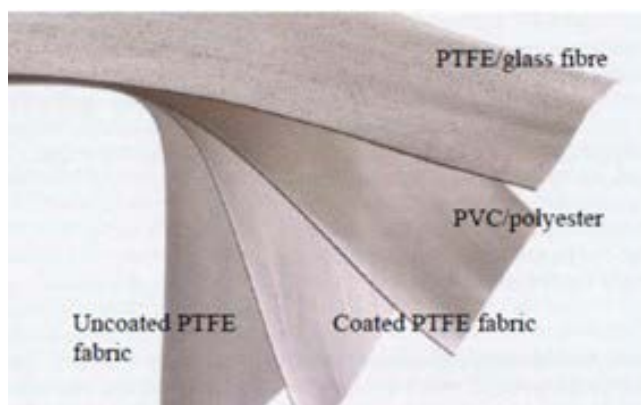


Figura 43. Tipos materiales cojines.



Figura 44. Prototipo de cojín (arriba) – Cojines instalados (abajo).

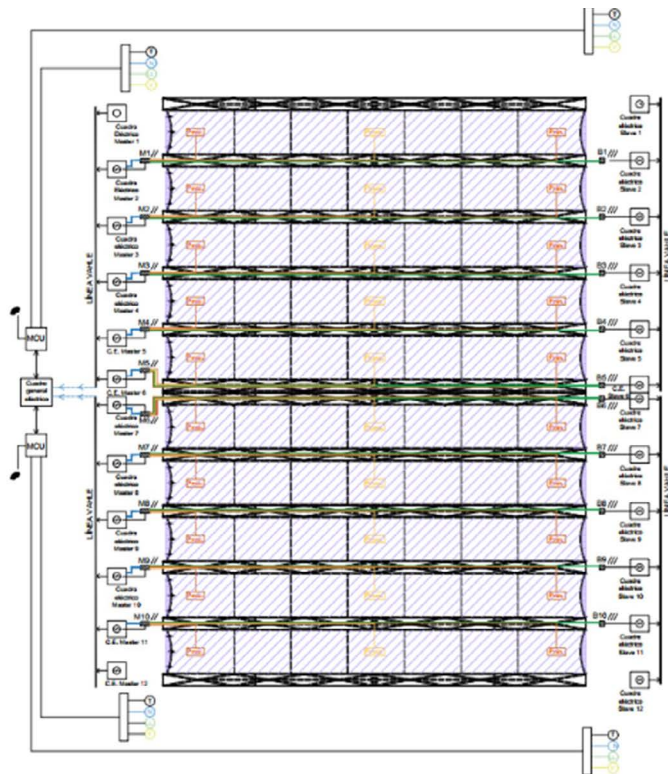
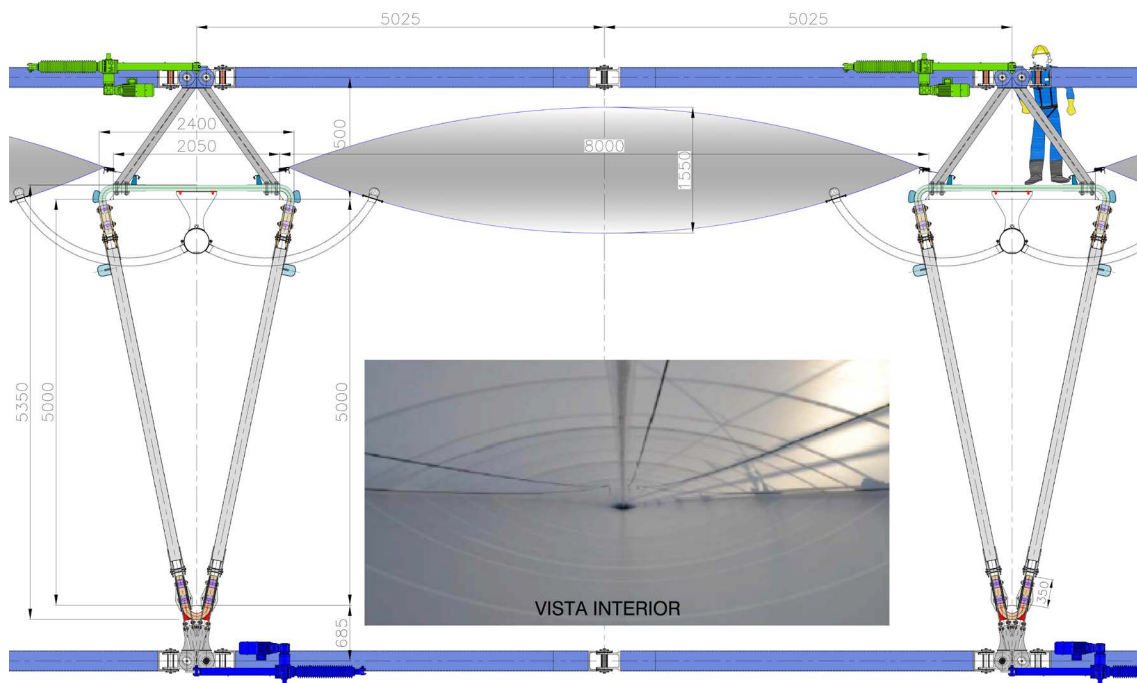


Figura 45. Sistema máquinas de inflado.



SECCIÓN CUBIERTA CERRADA

Figura 46. Sección transversal cojines.

3.2. Cojines de inflado.

Los cojines se inflan con ventiladores dispuestos en los bogies extremos de las cerchas. Cada máquina dispone realmente de dos ventiladores (redundancia), solo funcionando los dos durante el inflado. Durante el mantenimiento necesario para compensar las pérdidas (< 2% por hora) se alternan uno y otro.

4.

MECANISMOS

Como se ha comentado anteriormente, se necesita combinar, para cumplir los requisitos arquitectónicos, traslación y elevación. En la solución base de este proyecto, esto se conseguía mediante un carril con rampa. Las cerchas ascendían por la

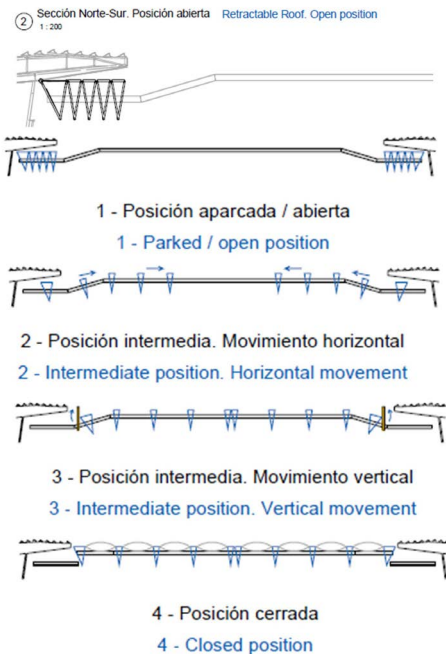


Figura 47. Esquema funcionamiento proyecto original.

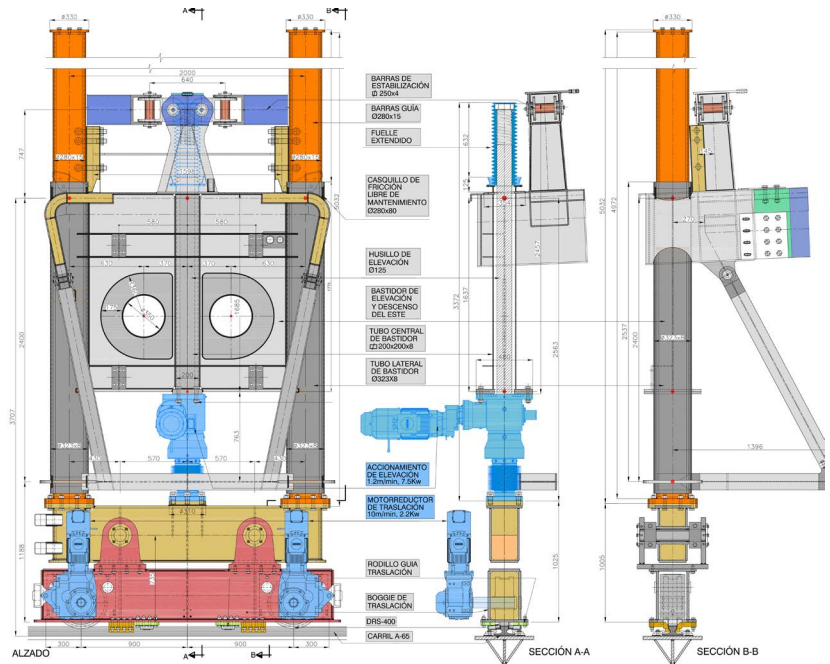


Figura 48. Detalles sistemas de traslación y elevación.

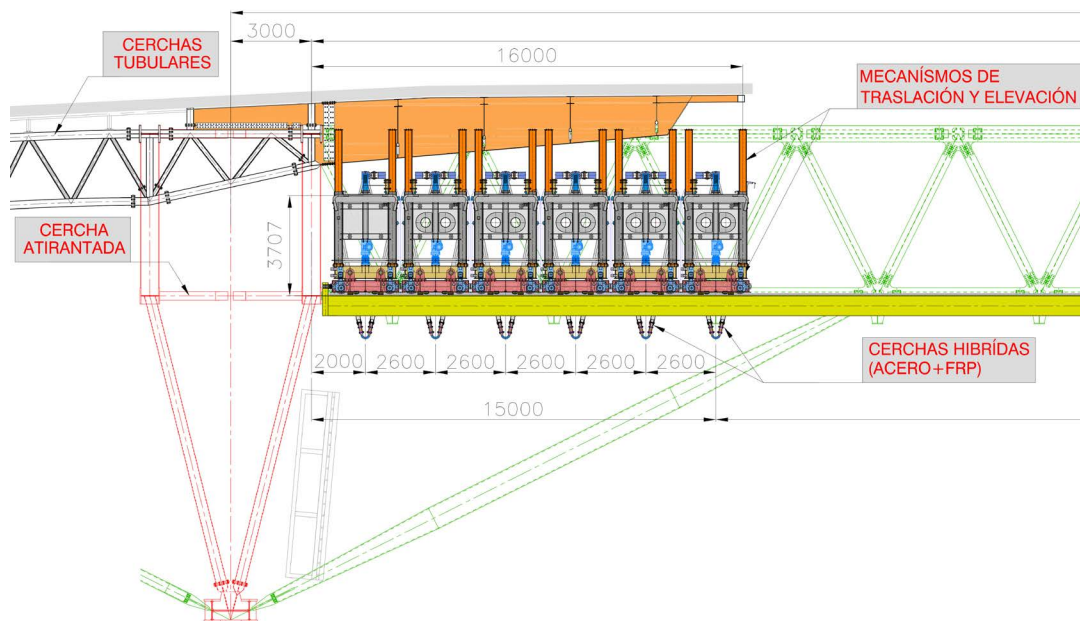


Figura 49. Posición 1: plegada & estacionada.

rampa mediante cremalleras, y luego se elevaba la viga carril mediante gatos hidráulicos. Esta solución planteaba a todas luces importantes inconvenientes.

El proyecto de FCC para la cubierta retráctil ha permitido materializar con claramente mayor robustez y fiabilidad el requisito expresado por el Club de nivelar la cubierta retráctil con la cubierta fija en posición cerrada.

Los elementos básicos, tanto de la traslación como de la elevación, se ubican en la estructura metálica dispuesta en los externos de las cerchas híbridas.

El carril permanece fijo y nominalmente horizontal.

4.1. Cinemática básica de operación.

En posición plegada & estacionada la cubierta retráctil permanece debajo de la cubierta fija, en los fondos norte y sur, junto a las cerchas atirantadas principales.

Una vez verificadas por el sistema de control las condiciones meteorológicas requeridas para operar, se puede iniciar la operación de cierre a partir de la mencionada posición de estacionamiento; las cerchas de cada panel se trasladan inicialmente agrupadas, mediante los bogies motorizados dispuestos en los extremos de cada una de ellas. Estos bogies se mueven sobre un único carril por fricción.

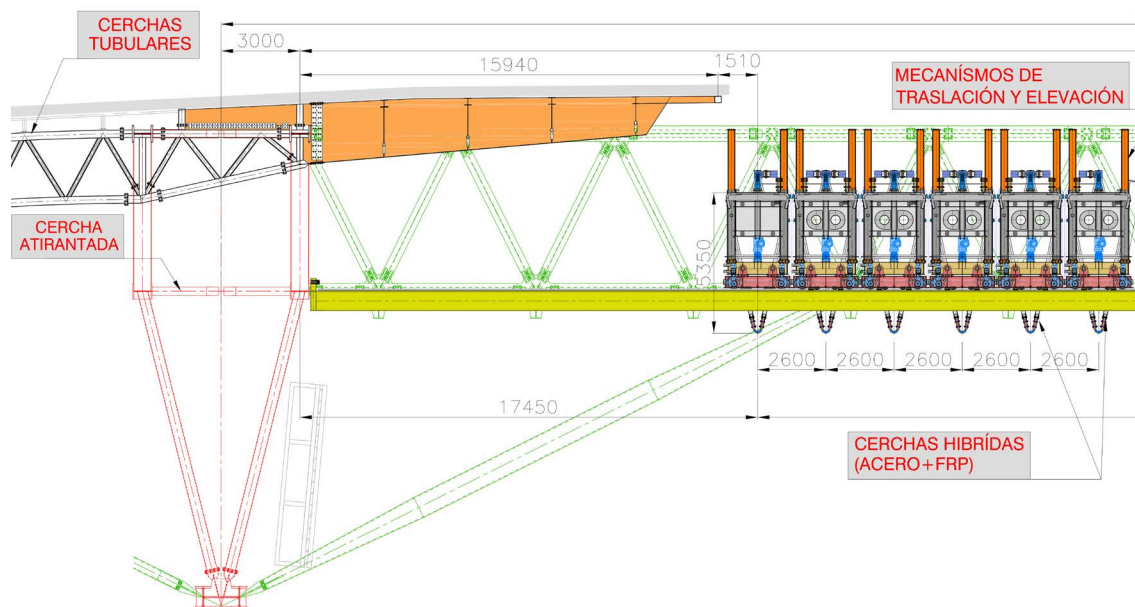


Figura 50. Posición 2. Desplazada.

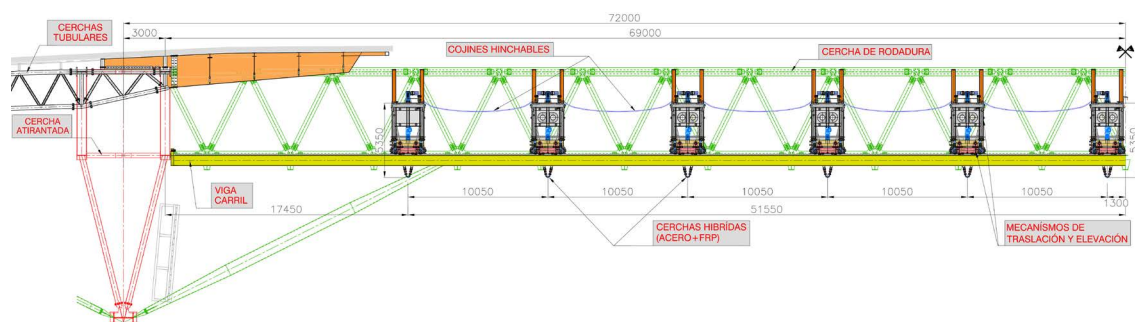


Figura 51. Posición 3. Desplegada desinflada.

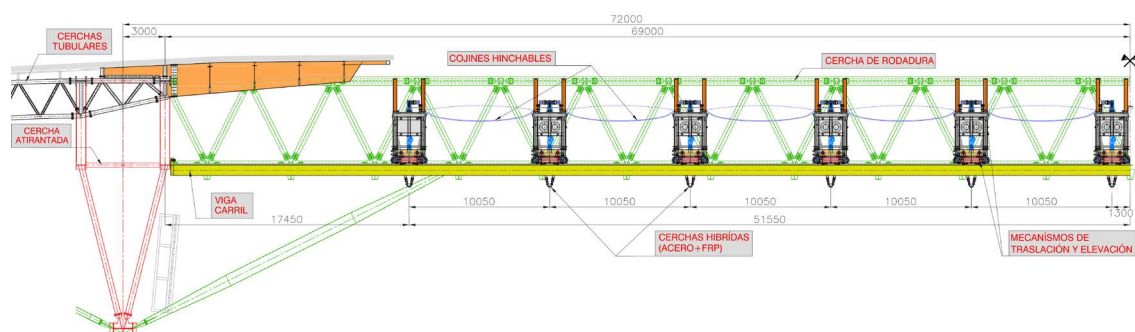


Figura 52. Posición 5. Desplegada hinchada.

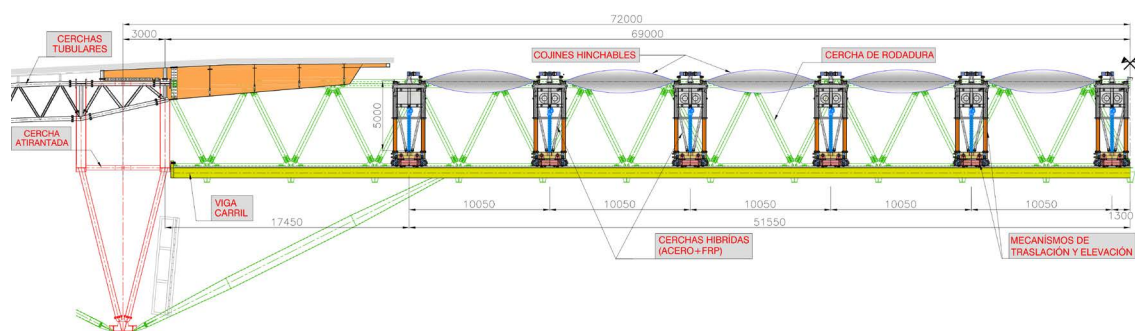


Figura 53. Posición 5. Desplegada y elevada.

Alcanzada la posición de referencia se procede a desplegar secuencialmente las cerchas en abanico actuando con los propios motores y con los cilindros electromecánicos de accionamiento dispuestos en las barras horizontales de estabilización.

Tras proceder al inflado de los cojines con la presión tipo, se lleva a cabo la elevación de los paneles mediante los gatos electromecánicos de husillo dispuestos en los dos extremos de cada cercha.

El proceso de apertura / replegado es completamente inverso.

4.2. Mecanismos de traslación.

En el extremo de cada cercha se dispone un bogie motorizado, con dos ruedas DRS 400 mm, cada una accionada por un motorreductor que se trasladan por un único carril DIN A75 con su correspondiente intercalador elástico y grapas ajustables.

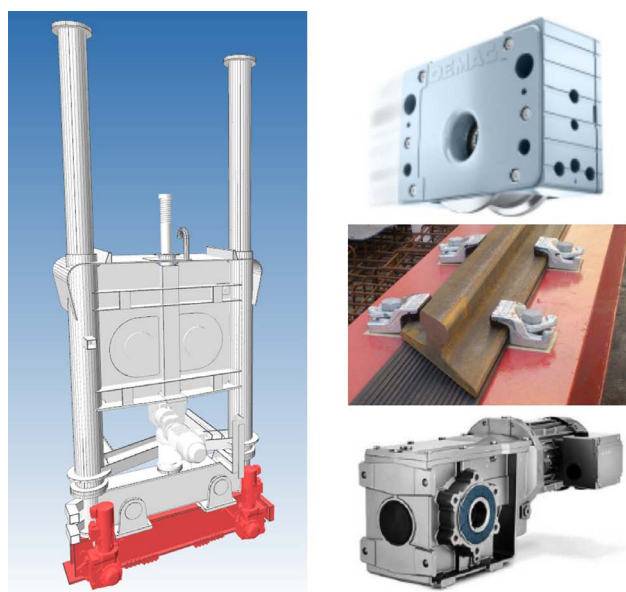


Figura 54. Sistema de traslación.

La velocidad de traslación es programable pues todos los motores van comandados por variadores de frecuencia.

Los principales parámetros de diseño son:

- Velocidad de traslación: 10 m/min.
- Rampa de aceleración/deceleración: inferior a 0.05 m/s^2
- Carga en movimiento: $2 \times 100 \text{ kN}$
- Carga en posición: $2 \times 260 \text{ kN}$
- Grupo de sollicitación/mecanismo: Carga pesada & promedio diario de marcha 2 horas FEM 2m / ISO M5

Los bogies de un extremo son fijos transversalmente con respecto al carril mientras que los del otro extremo son deslizantes permitiendo de este modo acomodar los desplazamientos relativos debidos a cambio de temperatura o rotaciones de las cerchas híbridas.

4.3. Mecanismos de elevación.

Para el mecanismo de elevación se utilizan husillos electromecánicos de bolas que proporcionan máxima seguridad &

máxima precisión de posicionamiento (en cada vuelta la cubierta se eleva 2.34 mm $i = 10.66:1$).

En cada bogie se dispone un husillo 125 x 25 accionado por un motor de 7.5 Kw, y un sistema de guiado compuesto por 2 guías de $\varnothing 280 \times 15$ por las que desliza, a través de dos casquillos de fricción tipo Glycodur, el bastidor extremo de las cerchas. De este modo las guías configuran junto con las cerchas un pórtico que proporciona la necesaria estabilidad transversal y longitudinal.

Los principales parámetros de diseño son:

- Velocidad de elevación: 1100 mm/min
- Altura de elevación: aprox. 3000 mm
- Clase de servicio motor: Intermitente S3 con ED 40%
- Carga dinámica (elevación a 25°C): 160 kN
- Carga estática (en posición): 480 kN

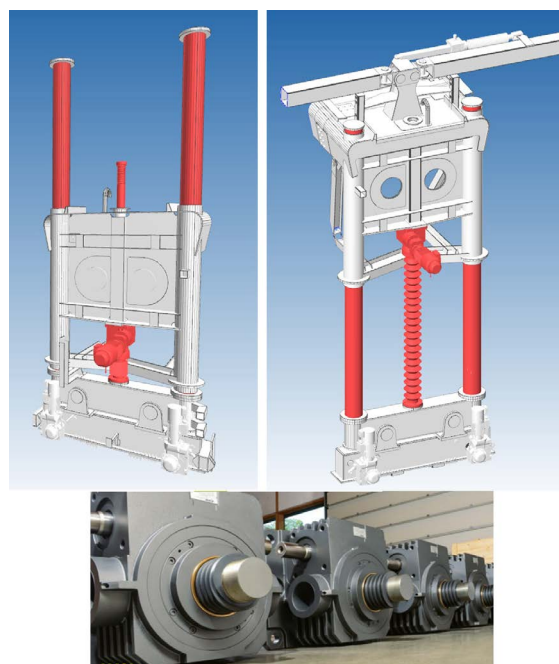


Figura 55. Sistema de elevación.

4.4. Mecanismos de despliegue & estabilización.

Consiste en un conjunto de barras horizontales superiores e inferiores, que unen todas las cerchas de cada panel entre sí, para compensar internamente las tracciones impuestas sobre las cerchas por los cojines inflables.

Las dos mitades de la cubierta pueden moverse independientemente.

Estas barras horizontales requieren de accionamiento electromecánico y en principio de un enclavamiento central también accionado.

Al final, se suprimió el enclavamiento central, sustituyéndose por una geometría auto bloqueante, las barras de estabilización no quedan en línea sino ligeramente quebradas, por lo que la compresión impuesta por el inflado de los cojines las mantiene en posición.

De este modo se simplifica el número de enclavamientos y sensores a controlar.

Los accionamientos son en ambos casos electromecánicos para facilitar el mantenimiento y la programación de los mismos. En estos accionamientos se emplean husillos de bolas

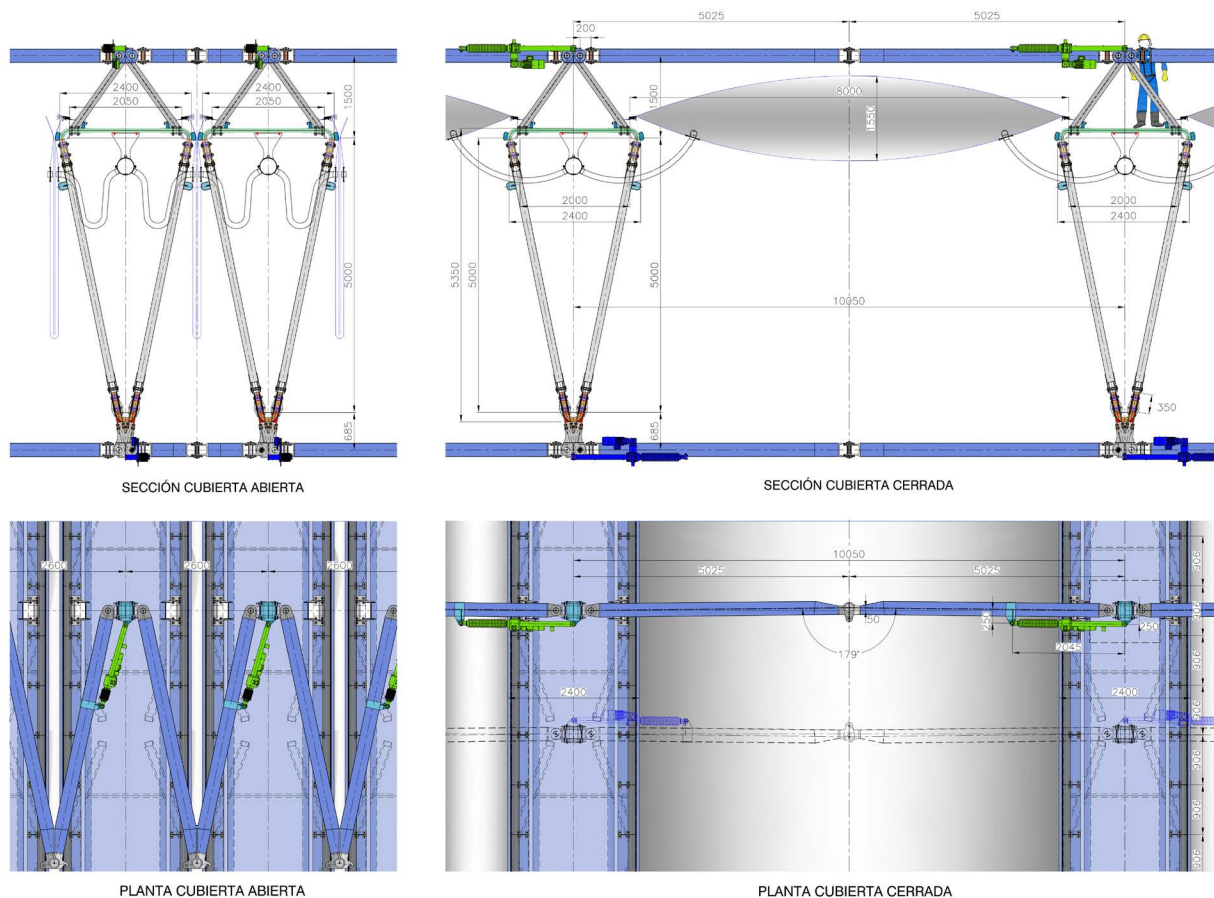


Figura 56. Mecanismos de despliegue y estabilización.

por su mayor rendimiento, lo que se traduce en motores más pequeños y ligeros.

Para el accionamiento de las barras, se han considerado equipos de 100 kN y carrera 670 mm para las barras extremas y equipos de 50 kN y carrera 670 mm para las interiores, tanto superiores como inferiores.

4.5. Sistema de control.

El sistema de control está basado en la utilización de un PLC de última generación Siemens S7-1500 especialmente dedicado a funciones de control y sincronización de movimientos y funciones de control de seguridad.

Este PLC controla los equipos variadores de velocidad que gobiernan los motores de los movimientos (traslación, despliegue/estabilización & elevación).

El sistema permite el desplazamiento sincronizado de los dos conjuntos de bogies que soportan cada panel, y en la fase de despliegue, con el de accionamiento de las barras horizontales. Para el control de estos motores se instala un sistema de control de posición y velocidad en lazo cerrado por PLC y variadores de velocidad combinado con los motorreductores. Para el control del desplazamiento de cada panel se instalaron sistemas de posicionamiento en tiempo real y en comunicación Profinet de altas prestaciones (resolución de 1mm) que se encargaron de medir el desplazamiento de los bogies y de analizar las posibles desviaciones entre el lado derecho y el izquierdo.

Se instalaron variadores de velocidad para cada bogie (dos motores) que realizan el control de posición y velocidad en lazo cerrado. Del mismo modo cada actuador de brazos horizontales incorpora un variador de velocidad.



Figura 57. Sistema de control.

Dentro del conjunto de la automatización se encuentran dispositivos tipo sensores, elementos de posicionamiento, escáner de seguridad, paradas de emergencia, etc.

Se instalaron scanners de seguridad, con objeto de detectar cualquier posible cuerpo en la zona de la vía de rodadura que pueda interferir durante el cierre de la cubierta y así poder efectuar una parada segura.

Hay 4 anemómetros encargados de obtener la lectura de la velocidad del viento. La señal de cada uno de ellos será tratada en el PLC de control.



Figura 59. Mecanización diafragma.



Figura 60. Diafragma ensamblado preparado para el transporte.

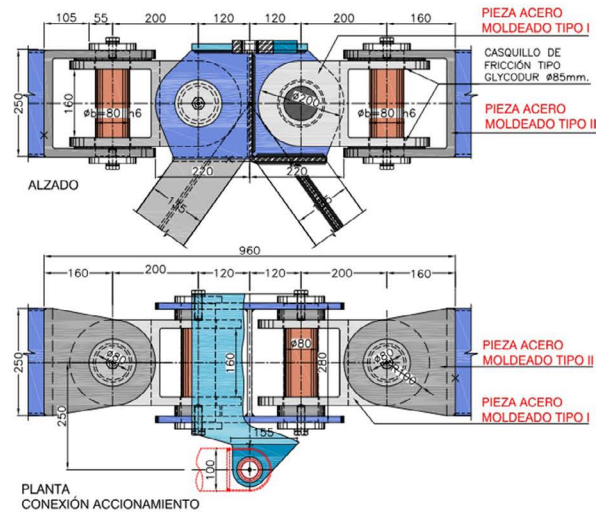
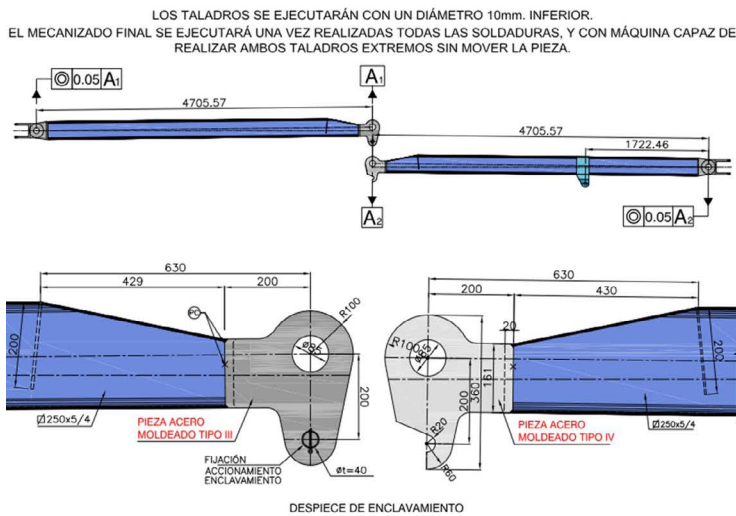


Figura 61. Mecanizado y ensamblado barras de estabilización.

chas, llevan en sus extremos unas conexiones Cardán cuyos bulones, discos y casquillos de fricción necesitaban de mecanización. Por ello, todas las barras fueron fabricadas en taller y después transportadas a la empresa de mecanizados para su mecanizado y montaje.

Por último, se efectuó un montaje en blanco en Taller de cada cercha, así como de un conjunto de 4 cerchas con todos sus mecanismos de traslación, elevación y despliegue.

En esta situación se efectuó un completo programa de pruebas de movimientos y elevación. Los únicos elementos que no se montaron fueron los cojines.

Para simular los cojines y además realizar una prueba de carga del conjunto durante todas las fases del movimiento se colocaron unos sensores con pesos entre cerchas con los que se realizaron un nuevo juego de pruebas.



Figura 62. Montaje en blanco en taller.



Figura 63. Prueba de carga.

5. CONCLUSIÓN

La cubierta retráctil es un elemento emblemático del estadio de gran complejidad que simboliza la avanzada ingeniería y tecnología aplicada en su construcción. Destaca por la incorporación de materiales innovadores cuyas conexiones entre sí han requerido soluciones únicas. Además, para permitir todos los movimientos proyectados, la complejidad de la motorización y precisión de mecanismos requirieron pruebas y ensayos complejos para lograr su puesta a punto. Integrar todos estos elementos ha representado un desafío significativo.

En esta estructura participaron varias empresas, la estructura metálica y los mecanismos fueron fabricados y montados

por Inbersa, el composite por Nanotures, los mecanizados los realizó Jupasa, la motorización fue suministrada por Siemens y Artabro, el control por Niprona y los cojines por Iaso. Sin una buena coordinación entre ellas y el buen hacer de cada persona en su trabajo, esta estructura no hubiese podido llevarse a cabo. En este sentido es de agradecer la labor de Jesús Pena Antelo en el trabajo de integración del conjunto, del gerente José Luis Fernández Sánchez-Largo y sin duda de la obra, personalizada en Manuel Rodríguez San Juan, Rafael Ruiz López y Alberto Corrochano.