



# Estudio, representación gráfica y análisis de las marquesinas y las gradas del Hipódromo de la Zarzuela de Madrid

TFG: Código ETSA - F0009

Presentado por: Enrique Meseguer Capdevila  
Dirigido por: Ivan Cabrera i Fausto

Grado en Fundamentos de la Arquitectura  
Curso: 2019-2020



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

## RESUMEN

El propósito de este trabajo es realizar un estudio de las gradas y la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela desde sus inicios en el proyecto presentado en el concurso hasta su construcción. Este estudio está apoyado más adelante en una representación gráfica y un análisis estructural.

Wright consideraba a Eduardo Torroja como el mejor ingeniero de la época después de haber realizado numerosas obras en las que en su mayor parte utilizaba el hormigón armado mediante procesos constructivos nuevos. Por ello, previamente al estudio del hipódromo, se lleva a cabo una recopilación de datos de la evolución histórica de este material explicando su desarrollo en Europa y más particularmente en España para luego aplicarlo a las estructuras laminares de Torroja.

El Hipódromo de la Zarzuela es un ejemplo de la fusión entre la geometría y la construcción que Torroja siempre buscaba en todas sus obras. Para lograrlo, utiliza geometrías complejas que construye utilizando el hormigón armado.

En la segunda parte se desarrolla gráficamente una reconstrucción digital de cada una de sus partes explicando su modulación y el resultado final del conjunto. Por último, como elemento principal de estudio, en la tercera parte se realiza un análisis estructural de los hiperboloides de la cubierta. A modo de conclusión, se finaliza el trabajo con una valoración de los datos estudiados.

## RESUM

El propòsit d'aquest treball és realitzar un estudi de les grades i la coberta de l'Hipòdrom de la Zarzuela des dels seus inicis en el projecte presentat al concurs fins a la seva construcció. Aquest estudi està recolzat més endavant en una representació gràfica i un anàlisi estructural.

Wright considerava a Eduardo Torroja com el millor enginyer de l'època després d'haver realitzat nombroses obres en què en la major part utilitzava el formigó armat mitjançant processos constructius nous. Per això, prèviament a l'estudi de l'hipòdrom, es porta a terme un recull de dades de l'evolució històrica d'aquest material explicant el seu desenvolupament a Europa i més particularment a Espanya per després aplicar-lo a les estructures laminars de Torroja.

L'Hipòdrom de la Zarzuela és un exemple de la fusió entre la geometria i la construcció que Torroja sempre buscava en totes les seves obres. Per aconseguir-ho, utilitza geometries complexes que construeix utilitzant el formigó armat.

A la segona part es desenvolupa gràficament una reconstrucció digital de cadascuna de les seves parts explicant la seva modulació i el resultat final del conjunt. Finalment, com a element principal d'estudi, a la tercera part es realitza un anàlisi estructural dels hiperboloides de la coberta. A tall de conclusió, es finalitza el treball amb una valoració de les dades estudiades.

## SUMMARY

The purpose of this work is to perform a study of the stands and the roof of the Zarzuela Racecourse from the beginning of the project presented in the contest until its construction. This study is supported later by a graphic representation and a structural analysis.

Wright considered Eduardo Torroja as the best engineer of the time after having carried out numerous works in which he mostly used reinforced concrete through new construction processes. Therefore, prior to the study of the racecourse, a collection of data on the historical evolution of this material is carried out explaining its development in Europe and more particularly in Spain and then applied to the laminar structures of Torroja.

The Zarzuela Racecourse is an example of the fusion between geometry and construction that Torroja always looked for in all his works. To achieve this, he uses complex geometries that he builds using reinforced concrete.

In the second part, a digital reconstruction of each of its parts is developed graphically explaining its modulation and the final result of the set. Finally, as the main element of the study, in the third part a structural analysis of the hyperboloids of the roof is carried out. As a conclusion, the work is completed with an assessment of the data studied.

# ÍNDICE

## Primera Parte

1. Introducción . . . . .	1
1.1. Eduardo Torroja Miret. Biografía . . . . .	1
1.2. Hormigón armado en Europa y España. Primeros ejemplos de estructura laminar . . . . .	1
2. Antecedentes . . . . .	2
2.1. Geometría en la obra de Eduardo Torroja. Estructuras laminares . . . . .	2
2.2. Obras de Eduardo Torroja con estructuras laminares . . . . .	2
3. Hipódromo de la Zarzuela. Concurso . . . . .	3
3.1. El Hipódromo Real . . . . .	3
3.2. El concurso . . . . .	3
3.3. Propuestas presentadas. . . . .	3
3.4. Propuesta ganadora de Arniches-Domínguez-Torroja. . . . .	4
4. El proyecto realizado del Hipódromo de la Zarzuela . . . . .	6

## Segunda Parte

5. Representación Gráfica . . . . .	8
5.1. Estructura Principal . . . . .	8
5.2. Cubierta Posterior . . . . .	8
5.3. Bóvedas del Hall . . . . .	9
5.4. Estructura de las gradas y tipologías . . . . .	9
5.5. Hiperboloides de la cubierta. . . . .	10
5.6. Visualización en render . . . . .	11

## Tercera Parte

6. Análisis Estructural . . . . .	12
6.1. Modelización en AutoCAD . . . . .	12
6.2. Propiedades del modelo . . . . .	12
6.3. Análisis del modelo en Architrave . . . . .	13
6.4. Deformación de los hiperboloides de la cubierta . . . . .	14
6.5. Trabajo de la estructura en su conjunto . . . . .	14
7. Conclusiones. . . . .	14
8. Índice de Imágenes. . . . .	15
9. Bibliografía . . . . .	16



Figura 1. Eduardo Torroja Miret

## 1. Introducción

### 1.1. Eduardo Torroja Miret. Biografía

Eduardo Torroja Miret nació el 27 de agosto de 1899 en Madrid. Era hijo de D<sup>a</sup> Mercedes Miret Salesas y del arquitecto D. Eduardo Torroja Caballé (1847-1918) (Antuña, 2002).

En el año 1917 Torroja ingresó en la Escuela de Ingenieros de Caminos donde terminó sus estudios en 1923. En las dos primeras décadas del siglo XX destacan dos profesores, que además de para Torroja, tuvieron una importante influencia en los ingenieros que estudiaron allí en aquel momento. Estos dos profesores son: José Eugenio Ribera de la asignatura Puentes de fábrica y hormigón armado y Juan Manuel de Zafra de la asignatura Puertos y Señales Marítimas y hormigón armado (Antuña, 2002).

Eugenio Ribera creó una empresa de construcción (*HIDROCIVIL*) que fue la primera empresa nacional que llevó a cabo obras de hormigón armado a partir de 1898 (Fernández 1982). En ella trabajaron con Ribera buena parte de los arquitectos que finalizaban sus estudios, entre ellos Torroja, que estuvo entre 1923 y 1927 (Alarcón 2000).

Por otra parte, Juan Manuel de Zafra, que decidió dejar la práctica profesional y dedicarse a la investigación y la docencia, publicó en 1911 el primer tratado de construcción de hormigón armado en España (Zafra 1911). En los dos años siguientes publicó también varios artículos en la Revista de Obras Públicas donde explicaba los métodos de cálculo de estructuras basados en el trabajo elástico que posteriormente fueron el origen del libro de Cálculo de Estructuras (Zafra 1915). Zafra también indicó aplicaciones prácticas como el sistema de armado de piezas de hormigón para trabajar a flexión, donde en función de la luz determina el despiece de las armaduras, o el sistema de placas abombadas, donde determina en función de la distribución de las cargas a soportar, la forma óptima de la placa. Posteriormente, Torroja siguió estos procedimientos analíticos para sus propios proyectos, además de los procedimientos gráficos que el mismo Zafra no recomendaba ya que consideraba que faltaba rigor y precisión.

Las obras más importantes en la etapa profesional de Eduardo Torroja fueron entre 1926 y 1936. A partir de entonces se dedicó a la investigación y la docencia en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Fue profesor de Cálculo de Estructuras en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid desde 1939 hasta su muerte el 15 de junio de 1961. También impartió otras asignaturas como Resistencia de Materiales y Elasticidad, Tipología Estructural y Fundamentos de Cálculo y Ejecución de Obras de Hormigón Armado y Pretensado (León 2002).

Con la apertura del Instituto Técnico de la Construcción y Edificación en 1934 empezó su etapa más recordada, que posteriormente, en 1939, se integró al CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas). Gracias a sus investigaciones y actividades fue propuesto miembro de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. En 1948 se aprueba el nuevo centro (tras una fusión) como Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento (ITCC), del cual Torroja sería director. En este Instituto se estudia el hormigón armado y pretensado y su comportamiento estructural, enfocándose en la industrialización y la normativa. Tras su muerte en 1961, el ITCC pasaría a llamarse Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento (IETCC) para finalmente pasar a llamarse Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.

En los últimos 10 años viajó al extranjero para impartir cursos cortos y conferencias y asistir a reuniones y congresos. En su vida profesional llevó a cabo obras y proyectos innovadores que optimizaban los procesos de construcción (Cassinello 2011).

### 1.2. Hormigón armado en Europa y España. Primeros ejemplos de estructura laminar

En 1855 se presentó la primera construcción de hormigón armado en Europa, realizada por Lambot, la cual consistía en un barco hecho con cal hidráulica de 5cm de grosor y con una armadura compuesta por barras metálicas redondas. Durante esta década, F. Coignet utilizó el hormigón armado para construir muros de contención y acueductos y más tarde, en 1861, publicó varios artículos sobre los principios de la construcción en hormigón armado. El primer sistema constructivo con hormigón armado fue patentado por Monier, a partir de 1865, desarrollando construcciones de jardineras y más tarde un sistema de bóvedas y puentes que mejoró con losas, vigas y soportes en países como Alemania, Austria y parte del continente americano (Antuña, 2002).

A finales del siglo XIX se desarrollaron importantes avances tecnológicos con el hormigón armado, como el caso de Hennebique en 1892, que patentó su sistema en el cual empleaba una armadura transversal con el fin de unir la armadura traccionada con el hormigón comprimido. A partir de entonces se desarrollaron gran cantidad de sistemas de construcción con el uso del hormigón armado basados con los mismos principios (Antuña, 2002).

Cabe destacar dos importantes empresas especializadas en el hormigón armado que fueron un impulso en el desarrollo de este material: la empresa de Hennebique (de 1892) en Francia y la Wayss und Freytag (de 1893) en Alemania. La empresa francesa difundió su propio sistema constructivo en la revista *Le Béton armé* desde 1898, lo que le llevó a desarrollar una importante actividad comercial. La empresa alemana, con la aportación del ingeniero Ernst Mörsch, fijó las bases de cálculo del hormigón armado, estudiando el comportamiento de la sección a partir de los diagramas de tensión-deformación del acero y hormigón (Antuña, 2002).

Uno de los primeros en aplicar estructuras laminares con hormigón armado fue Freyssinet, que desde 1914 construyó cubiertas con forma de bóveda cilíndrica y más tarde, desde 1927, construiría bóvedas conoides. Ya desde inicios del siglo XX se observa la preocupación por las fisuras que aparecían en la parte traccionada del hormigón, por lo que disponían de sistemas constructivos que comprimían previamente el hormigón poniendo en carga la armadura para reducir el riesgo de fisura (Antuña, 2002).

Con respecto a la situación en España, las primeras construcciones realizadas en hormigón fueron dos puentes en Soria ubicados en los ríos Lavalé y Lumbreras, los cuales fueron proyectados por Ricardo Bellsolá. Pero fue Francesc Maciá, en 1893, quien comenzó a utilizar el hormigón armado para construir depósitos y trabajos de saneamiento (Antuña, 2002).

Como se ha mencionado anteriormente, las primeras construcciones de edificios con hormigón armado fueron con la empresa de Hennebique, que en España estaba representada por José Eugenio Ribera el cual patentaba su propio sistema de construcción con este material. En sus inicios, el uso del hormigón se centraba en el empleo de los sistemas constructivos patentados, lo que llevó a una competencia por conseguir clientes y a una disputa entre Zafra y Hennebique (Antuña, 2002).

A principios del siglo XX se busca la manera de dimensionar secciones con hormigón armado. Fue el español Juan Manuel Zafra quien, en 1911, publicó el primer libro de estructuras sobre el cálculo de hormigón cuando impartía como profesor en la Escuela de Ingenieros de Caminos. En relación a la aplicación de tensión previa a las armaduras, fue Torroja quien realizó el primer intento en España en el acueducto de Tempul de 1925 y posteriormente, en 1927, en el proyecto del paso inferior de la Enramadilla en Sevilla (Antuña, 2002).

## 2. Antecedentes

### 2.1. Geometría en la obra de Eduardo Torroja. Estructuras laminares

De la misma manera que la función práctica está ligada a la obra arquitectónica, también lo está la solución formal que tendrá esta construcción y su encaje con el entorno. Torroja, tras una minuciosa y estricta investigación, modela las estructuras en función de las fuerzas que interactúan y ofrece una solución conciliando la ciencia y el arte de construir. Cabe destacar la completa formación geométrica que Torroja aporta en todas sus obras a través de las superficies geométricas proyectadas y construidas (García 1999).

Podemos clasificar las superficies en función del tipo de generatriz en regladas y no regladas. Las superficies regladas son aquellas que tienen la directriz recta, y estas se pueden subclasificar en desarrollables y alabeadas. Las superficies no regladas son aquellas con generatriz curva y estas solo pueden ser alabeadas (García 1999).

Las superficies desarrollables, como su nombre indica, se pueden desarrollar sobre un plano sin sufrir deformación. *“La superficie reglada desarrollable es engendrada por una recta que se mueve en el espacio de tal modo que dos posiciones consecutivas de la generatriz son coplanarias y por ello determinan un elemento plano”* (García, 1999). Este tipo de superficies pueden ser planos, poliedros (tanto prismáticos como piramidales), superficies radiadas (conos, cilindros...) y el helicoides desarrollable.

Las superficies alabeadas no se pueden desarrollar, es decir, no se pueden extender en un plano. *“La generatriz recta que se mueve en el espacio se cruza con la inmediata siguiente, determinando en el recorrido infinitesimal un elemento superficial no plano sino alabeado”* (García, 1999). Estas superficies pueden ser cuádricas hiperbólicas (hiperboloide hiperbólico y paraboloides hiperbólico), cilindroides, conoides y conos alabeados y varios helicoides.

Las superficies no regladas, las cuales tienen una generatriz curva y por tanto son alabeadas, pueden ser cuádricas elípticas (esfera, elipsoide, paraboloides elíptico e hiperboloides elíptico) y superficies de revolución de generatriz curva (plana o alabeada) (García, 1999).

Con respecto a la curvatura de las superficies, estas pueden ser de simple curvatura y de doble curvatura. Una superficie es de simple curvatura cuando una de las secciones principales es una recta. Por el contrario, una superficie es de doble curvatura cuando las dos secciones principales son curvas. En la práctica, cuando se transforman las fuerzas normales en fuerzas de membrana, las superficies de simple curvatura son menos eficientes que las de doble curvatura (García 1999).

En cuanto a las formas más usadas por Torroja fueron el cono, el cilindro y el hiperboloides hiperbólico. Es conveniente estudiar las propiedades de estas superficies para aprovechar al máximo su forma cuando se realizan estructuras. Además, estas láminas de hormigón con las que trabaja Torroja resisten tanto esfuerzos a compresión como a tracción con una rigidez finita a flexión. Una de las condiciones de resistencia en estas superficies será el valor crítico que puede soportar a compresión. Torroja consiguió construir estas superficies con poco espesor debido a la rigidez finita a flexión, como es el ejemplo del Hipódromo de la Zarzuela que, en su cubierta, los bordes de las láminas solo tienen 5 cm de espesor, pudiendo resistir cargas elevadas como veremos más adelante. Cuando sometemos a una superficie en un estado de tensiones, las cargas que recibe se transforman en fuerzas de membrana. Esta transformación se entiende como un flujo de fuerzas con infinitas líneas de presión sobre dicha superficie (Haas, 1971).

### 2.2. Obras de Eduardo Torroja con estructuras laminares

Con el fin de analizar los conceptos en relación a la geometría y la estructura descritos anteriormente, se toman varias obras de Torroja como ejemplo. Se analiza el Mercado de Algeciras, el Frontón de Recoletos en Madrid, la Cuba Hiperbólica de Fedala en Marruecos y más adelante de manera más detallada el Hipódromo de la Zarzuela que tiene por objeto este trabajo.



Figura 2. Mercado de Algeciras



Figura 3. Frontón de Recoletos



Figura 4. Cuba de Fedala

En primer lugar, la Cubierta del Mercado de Algeciras, de 1933, está formada por una superficie curva (no reglada) de doble curvatura. Se trata de una cúpula esférica con poco espesor apoyada sobre ocho soportes en su perímetro. La cúpula tiene un diámetro de 47,80 metros y un radio de curvatura de 44,10 metros. Tiene un espesor que varía desde los 9 cm en la parte central donde hay un lucernario hasta los 50 cm en la zona de los soportes (León 2002).

El perímetro de la cubierta está seccionado en sus ocho lados que forma con los pilares con unas bóvedas cilíndricas que se apoyan en los dos soportes adyacentes, prolongándose hacia el exterior como voladizos. De esta manera consigue rigidizar los bordes de la cúpula transmitiendo las fuerzas que recibe de la cubierta hacia los pilares y consiguiendo a la vez un acabado estético. Estas dos superficies (esfera y cilindro) no tienen sus ejes en un mismo plano. La intersección entre ambas superficies en cada uno de los lados es una línea alabeada (García 1999).

Otra cubierta a destacar es el Frontón de Recoletos en Madrid de 1935, la cual se trataba de una superficie de simple curvatura. Estaba formada por dos cilindros de diferente radio seccionados y unidos en una línea recta (generatriz) que era paralela a los ejes. Así formaban dos arcos de radio 12,20 y 6,40 metros cada uno que empezaban con tangente vertical en los lados y terminaban en una intersección ortogonal entre ambos. Tenían un espesor de 8 cm el cual aumentaba hasta 16 cm en la parte de intersección entre ambos cilindros (León 2002). Alcanzaba una luz transversal de 32,50 metros y 55 metros longitudinalmente. En la parte de los lucernarios se sustituía la lámina de hormigón por una estructura de triángulos equiláteros de 1,40 metros de lado. Tras sufrir varios impactos directos en la cubierta durante la guerra, finalmente se decidió demoler en 1973 por el mal estado de la obra (León 2002).

Por último, la Cuba Hiperbólica de Fedala en Marruecos de 1956 es un ejemplo de superficie reglada de doble curvatura. Se trata de un depósito de agua que puede alcanzar un nivel de hasta ocho metros de altura y está montado sobre unos soportes de hormigón armado organizados circularmente. Está formado por dos hiperboloides hiperbólicos con los ejes verticales coincidentes. Estos tienen una circunferencia de garganta común con un diámetro de 17 metros y los diámetros máximos del hiperboloides superior e inferior son 40 y 19 metros respectivamente. Se ha utilizado este tipo de forma con frecuencia en los depósitos con el fin de conseguir estanqueidad ya que permite un doble pretensado del hormigón y evita mejor el peligro de posibles fisuraciones debidas a la presión del agua (León 2002).

### 3. Hipódromo de la Zarzuela. Concurso

#### 3.1. El Hipódromo Real

El Hipódromo Real estaba situado en el Paseo de la Castellana, donde actualmente están los Nuevos Ministerios. Debido a una prolongación de este paseo, desde 1916 se hicieron varias propuestas donde todas incluían el derribo del hipódromo ya que suponía un tapón para esta vía y así se conseguía expandir la ciudad hacia el norte. Finalmente, en 1925 se cedió este terreno al municipio de Madrid con la condición de construir un nuevo Hipódromo en un plazo de 5 años (Antuña 2002).

Con la proclamación de la República en 1931, al no haberse llevado a cabo las obras en el plazo previsto, el nuevo estado reclamó la titularidad de estos terrenos. Indalecio Prieto, ministro de Obras Públicas, quería la construcción de un nuevo gran edificio que estaría destinado al Ministerio que él ocupaba, además de un enlace ferroviario que uniera el norte de la ciudad con la estación de Atocha. Por otra parte, Secundino Zuazo había estado trabajando en un plan urbanístico sobre la prolongación de la Castellana los años anteriores. Finalmente, en 1933, con la intervención de Zuazo, se llevaron a cabo las obras de derribo de este Hipódromo para permitir la prolongación del Paseo de la Castellana y la construcción de un túnel ferroviario que conectara las dos partes de la ciudad incluyendo en este mismo punto una estación frente al que sería el nuevo edificio de Ministerios (Antuña 2002). En estos proyectos ya participó Torroja realizando la estructura.

El derribo del Hipódromo Real hacía necesario construir uno nuevo el cual se decidió ubicar en el Monte de El Pardo. La decisión de esta ubicación provocó cierta polémica ya que se pensaba que con esta construcción empezaría la invasión de este monte y esto produjo retrasos. Finalmente se consideró que el Hipódromo es una instalación que se puede encontrar en parques extensos sin perjudicar su entorno (Hormigón y Acero, 1934).



Figura 5. Vista aérea del Hipódromo Real de la Castellana

#### 3.2. El concurso

Aunque ya había intenciones desde 1925 de construir un nuevo hipódromo, no fue hasta 1934 que el Gabinete Técnico de Accesos y Extrarradio de Madrid convocó el concurso para hacerlo realidad en el Monte de El Pardo. Se presentaron nueve propuestas de arquitectos o equipos de arquitectos e ingenieros hasta el plazo del 1 de octubre de 1934 y finalmente se hizo público el fallo del jurado el 18 de diciembre del mismo año. El nuevo Hipódromo era un proyecto complejo que debía tener en cuenta los valores ambientales del lugar. Además de las tribunas incluía varios edificios como las cuadras y las viviendas para los empleados. En el exterior se debía urbanizar el entorno organizando las circulaciones y las zonas de estacionamiento. En todas las propuestas predominaba el edificio de tribunas ya que destacaba el problema estructural de la cubierta de las gradas. Esta estructura se resolvía en todos los casos con pórticos de hormigón armado (Antuña 2002).

#### 3.3. Propuestas presentadas

En total se presentaron nueve propuestas de tribuna en el concurso, pero con gran similitud entre ellas. Todas las propuestas resuelven la estructura con pórticos de hormigón armado (no era condición del concurso), con unas vigas inclinadas sobre las que se sitúan las gradas de manera escalonada y unas vigas en ménsula para la cubierta. Estas están representadas en la imagen (Antuña 2002) a la misma escala.

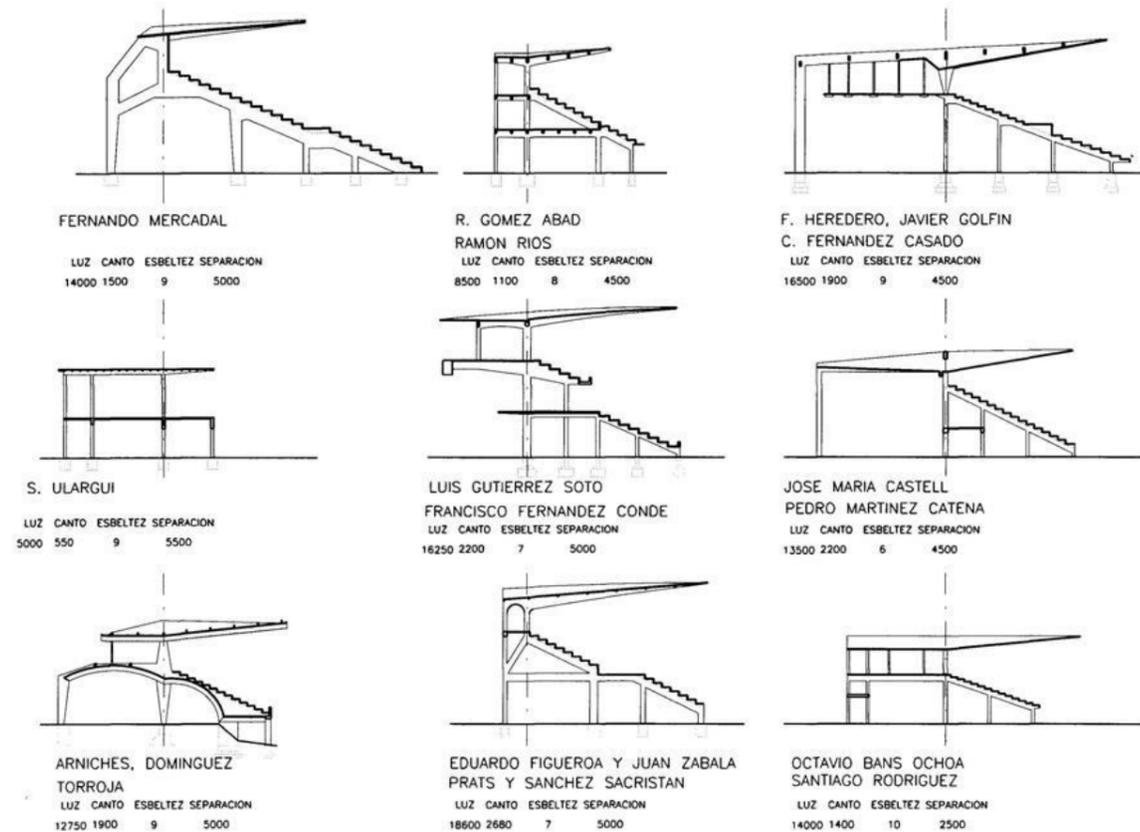


Figura 6. Propuestas Presentadas. Secciones transversales. Los datos indicados son: luz del voladizo, canto en el apoyo de la viga que resiste el vuelo, esbeltez de la viga y separación entre pórticos

Las diferencias entre las propuestas se basan en las dimensiones de la grada y de la cubierta y también en las varias soluciones estructurales que se plantean. La parte posterior de las gradas estaba condicionada por dos requisitos: en primer lugar, es la parte donde se equilibran las fuerzas que se producen con la flexión de la ménsula de la cubierta; y, en segundo lugar, se pretende utilizar este espacio para disponer de un amplio hall (Antuña 2002).

El inconveniente de construir la estructura con hormigón armado es su elevado peso, acentuándose más en el voladizo de la cubierta. Por ello, en todas las soluciones se decide adoptar un canto de viga variable. Los vuelos de estas vigas en cada propuesta oscilan entre los 12,75 y los 16,50 metros. Estas vigas están determinadas por tres parámetros: la luz, la separación entre pórticos y el canto de la ménsula. Estos valores están condicionados entre ellos de modo que fijando dos de ellos, el tercero está condicionado. El forjado de la cubierta se resuelve en todos los casos con una losa reforzada con nervios en la cara superior o inferior (Antuña 2002).



En la Figura 9 se puede observar con mayor profundidad el desarrollo de la planta alta y los perfiles transversales en alzados y sección que se publicaron en la “Revista Nacional de Arquitectura” (1948).

Analizando de más cerca, la estructura de la tribuna se resuelve con pórticos de hormigón armado de dos alturas y separados 5 metros entre ellos. Estos pórticos se componen de cuatro soportes en la primera planta y 2 soportes en la segunda para soportar la cubierta. El primer forjado se forma con una viga de tres tramos siendo uno de ellos inclinado, situado entre los soportes 2 y 3, y los otros dos tramos horizontales, situados entre los soportes 1 y 2 y los soportes 3 y 4, tal y como se marcan en la Imagen 10.

Cabe señalar, tal y como se observa en la imagen, que la parte inferior de las vigas entre los soportes 2 y 4 está formada por dos arcos apoyados en sus dos soportes adyacentes. Esta curvatura corresponde a dos arcos de circunferencia de distinto radio siendo mayor el ubicado entre los soportes 3 y 4 donde se sitúa el Hall. La cara inferior de la losa que hay entre estos pórticos tiene un espesor de 6 cm y se resuelve con una serie de bóvedas tóricas.

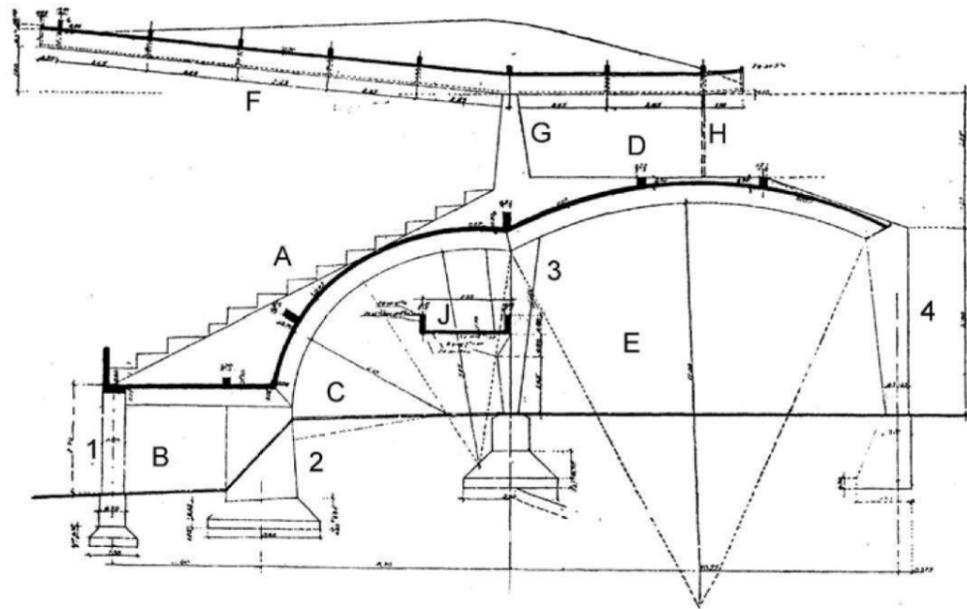


Figura 10. Sección de la Tribuna presentada al concurso

La cubierta se resuelve con una viga de canto variable que apoya en el soporte 3 y tiene un voladizo de 12,75 m sobre las gradas. Esta está anclada con un tirante (en el punto H) a 5,25 m del soporte 3. Entre las vigas se disponen 7 tramos de bóvedas cilíndricas de directriz circular colocando las generatrices en sentido transversal. Estas bóvedas tienen 6 cm de espesor, 55 cm de contraflecha y 5 m de luz. Se disponen unos nervios cada 2,45 m en la cara superior para rigidizarlas, siendo estos de 20 x 10 cm se sección (Antuña 2002).

Estas bóvedas trabajan de tal forma que los empujes de cada tramo se equilibran con el tramo siguiente. Así, se consigue que las vigas solo trabajen en el plano del pórtico. Surge un problema en los vanos extremos ya que estos transmiten empujes horizontales por no tener continuidad. Esto se resuelve dejando en los vanos extremos medio tramo de bóveda volado y colocando lo que los autores llaman “cuerpos de extremidad” para darle la estabilidad y rigidez suficiente (Antuña 2002).

Con todo ello, como decía Torroja, se pretendía buscar la máxima relación entre los elementos estructurales y los arquitectónicos.

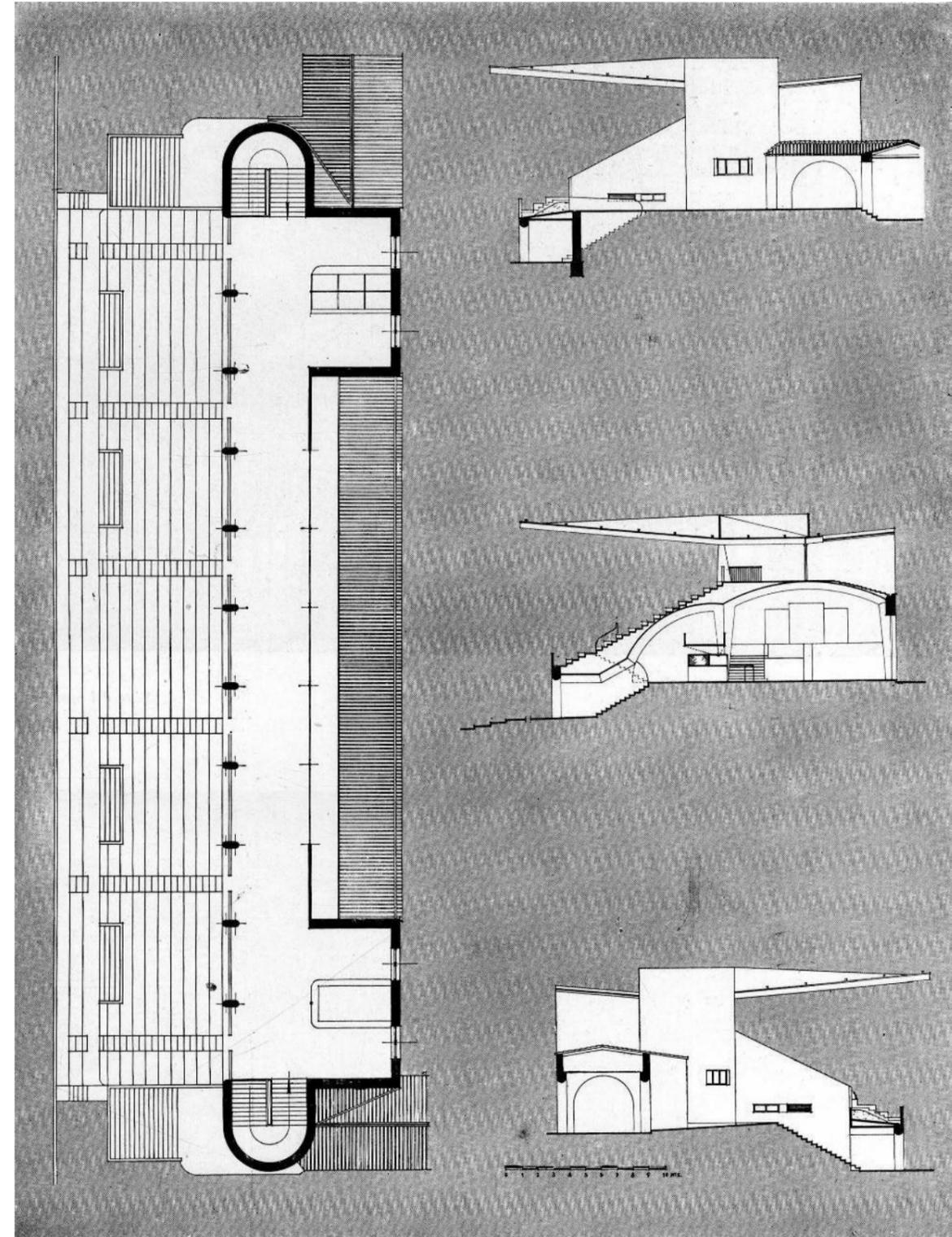


Figura 9. Planta Alta y Secciones de la Tribuna de Preferencia presentadas al concurso

#### 4. El proyecto realizado del Hipódromo de la Zarzuela

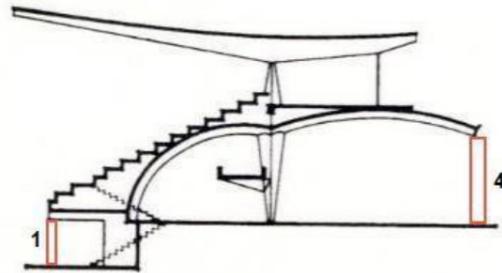


Figura 11. Esquema en sección transversal con los soportes de los extremos eliminados.

En la construcción del Hipódromo se hicieron varias modificaciones con respecto al proyecto inicial con la intención de facilitar su ejecución y resultar así más económico. Por ejemplo, en planta baja se eliminaron los pilares de los extremos (soportes 1 y 4 de la Figura 11) ya que, según Torroja, la mayor parte del esfuerzo de la cubierta carga en el tirante posterior y el esfuerzo de las columnas que sujetan esta cubierta será ligero. De este modo, eliminando el soporte 4 se consigue una mejor circulación y un espacio continuo abierto hacia el exterior.

Por otra parte, en el lado de la pista también eliminó el soporte 1 ya que la luz del vano era casi la misma que el canto de la viga y podría resistir fácilmente las solicitaciones (Antuña 2002). De esta forma, el resultado sería el que se observa en la Imagen 11 con la eliminación de los pilares 1 y 4 marcados, dibujada con más detalle en la Figura 12.

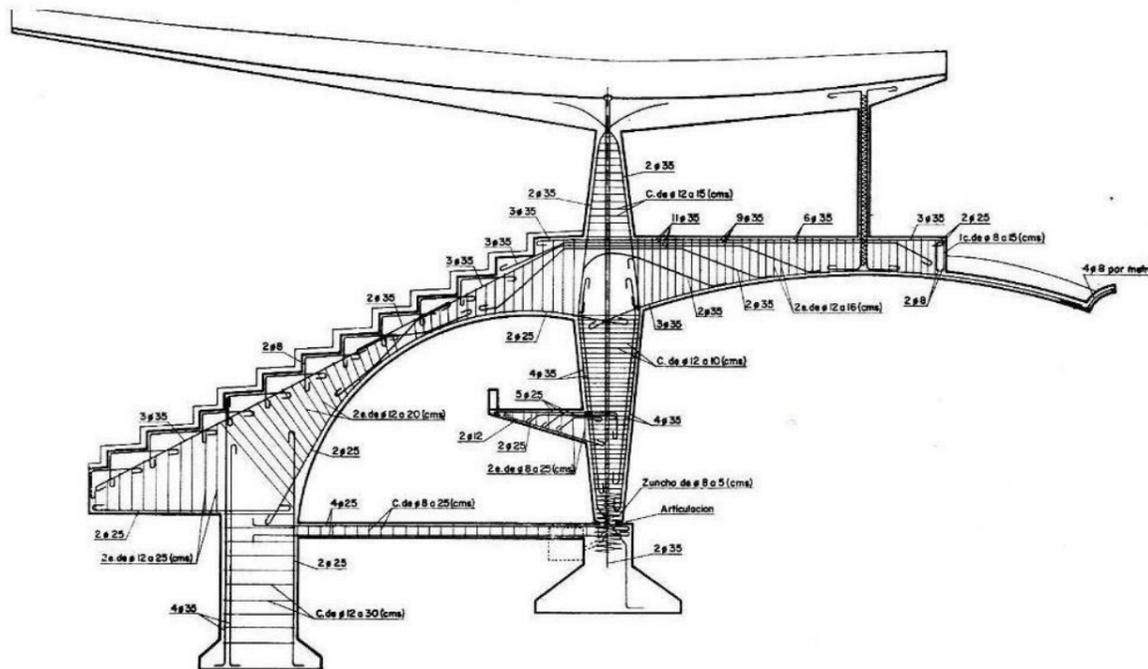


Figura 12. Detalle constructivo de la sección transversal.

Con respecto a la cubierta, esta se había diseñado de tal forma que toda la estructura funcionara como un conjunto en su totalidad, donde no se podía prescindir de ningún elemento ya que era necesario el trabajo de todas sus partes para que la estructura fuera estable. Esto presentaba una dificultad en su ejecución ya que era necesario terminar la construcción de toda la estructura en su conjunto incluyendo los contrafuertes de los extremos obligando a mantener el encofrado del primer forjado y de la cubierta hasta que lograran la resistencia necesaria antes de desencofrar (Antuña 2002). Por otra parte, la cubierta debía ser hormigonada en varias fases debido a la posición de los nervios de las bóvedas y las vigas. Además, la disposición de estas dificultaba la evacuación del agua.

El principal cambio que introdujo Torroja para dar solución a estos problemas fue sustituir estas bóvedas por módulos independientes en cada tramo con el fin de que se pudieran construir de manera independiente. Cada tramo es un módulo de estructura laminar colocadas en ménsula en voladizo y con forma de medio hiperboloide volado a cada lado. De esta forma la cubierta tiene función resistente consiguiendo esa relación entre la estructura y la forma que él buscaba. En la Figura 13 se puede observar los esfuerzos que se producen en la cubierta con esta disposición.



Figura 13. Sentido de los esfuerzos en la cubierta.

Las juntas entre cada tramo ahora se sitúan en la clave de cada arco siendo a la vez la junta de hormigonado. La parte superior de la cubierta tiene un acabado continuo y quedan reducidas las posibles filtraciones de agua ya que la canalización de esta no pasa por las juntas. La separación entre cada pórtico es de 4,88 metros y se dispuso de una viga longitudinal que arriostra todos los pórticos para mayor estabilidad lateral.

En la Figura 14 se puede ver la continuidad que se logra con la unión de los dos medios hiperboloides de cada lado y la inclinación del mismo sobre las gradas; y en la Figura 15 se muestra el módulo conformado por los dos medios hiperboloides proyectados hacia cada lado en forma de voladizos con diagrama de líneas isostáticas.

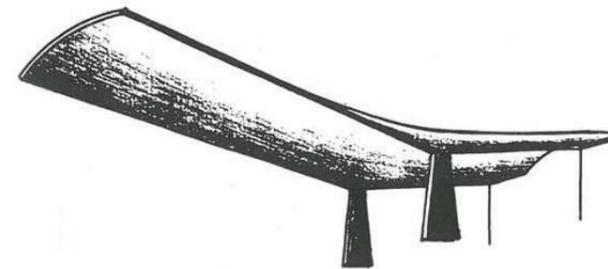


Figura 14. Estructura de la cubierta de las gradas.

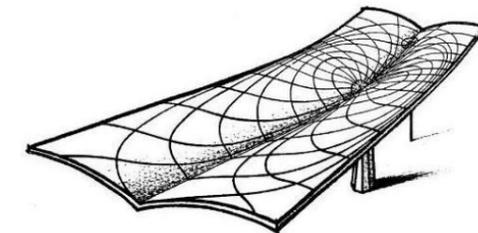


Figura 15. Módulo de la estructura de la cubierta con diagrama de líneas isostáticas.

En definitiva, la cubierta construida resulta en módulos de medio hiperboloide proyectados a cada lado con un vuelo de 12,80 metros en dirección a la pista cubriendo la parte de las gradas y otro vuelo de 1 metro desde el tirante en la parte posterior. La contraflecha es variable, siendo de 140 cm en la línea de los soportes con un radio de curvatura de 275 cm y una flecha de 50 cm en los extremos de los voladizos con un radio de curvatura de 370 cm (Antuña 2002).

El espesor de la cubierta también es variable, donde la clave de cada arco empieza en los 6 cm en los bordes de los voladizos y alcanza los 14,5 cm en la línea de los soportes; y con respecto al punto medio de cada módulo que es el lugar donde se apoya en los soportes, empieza desde los 9 cm en los bordes de los voladizos y alcanza los 73 cm en la línea de los soportes, tal y como se puede observar en la Figura 16. De esta forma, Torroja consigue dar el efecto de ligereza mostrando un espesor menor en los bordes de la cubierta que se visualizan desde la pista (Torroja 1962).

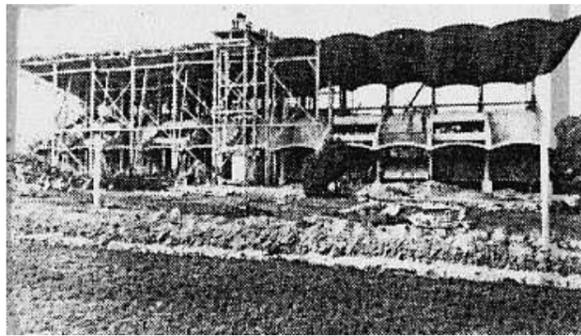


Figura 17. Construcción de la cubierta por partes.

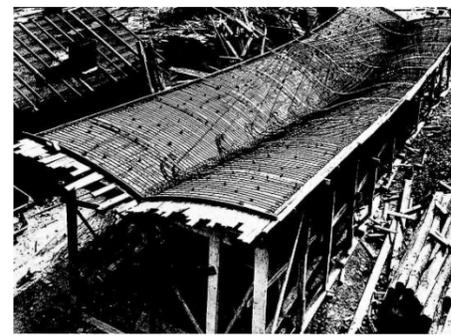


Figura 18. Módulo de la cubierta preparado para hormigonar.

En su construcción, el encofrado de la cubierta se llevó a cabo utilizando varios módulos que se iban colocando sucesivamente de modo que los andamios solo ocupaban una parte de la cubierta (Figura 17). Así, el hormigonado se pudo llevar a cabo con cada módulo de manera independiente (Antuña 2002) (Figura 18). La organización de las armaduras consistió en adaptar estas con las isostáticas de tracción, siguiendo la línea de los criterios del momento.

Se llevaron a cabo un ensayo previo a la construcción del Hipódromo con el fin de garantizar en buen funcionamiento de la cubierta. En este ensayo se cargó un módulo hasta la rotura (Figuras 19 y 20), la cual se produjo con una carga de 605 kg/m<sup>2</sup>. La deformación en los extremos de los voladizos llegó a 15 cm en el vértice inferior y la deformación transversal fue pequeña. Se observó que la principal causa de rotura fue la flexión de la ménsula en voladizo y esta rotura fue debida al colapso del hormigón de la lámina.



Figura 19. Ensayo de carga del módulo.

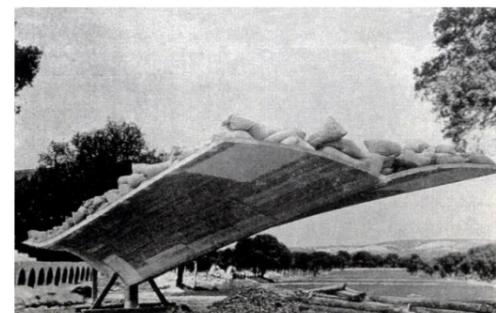


Figura 20. Ensayo de carga del módulo.

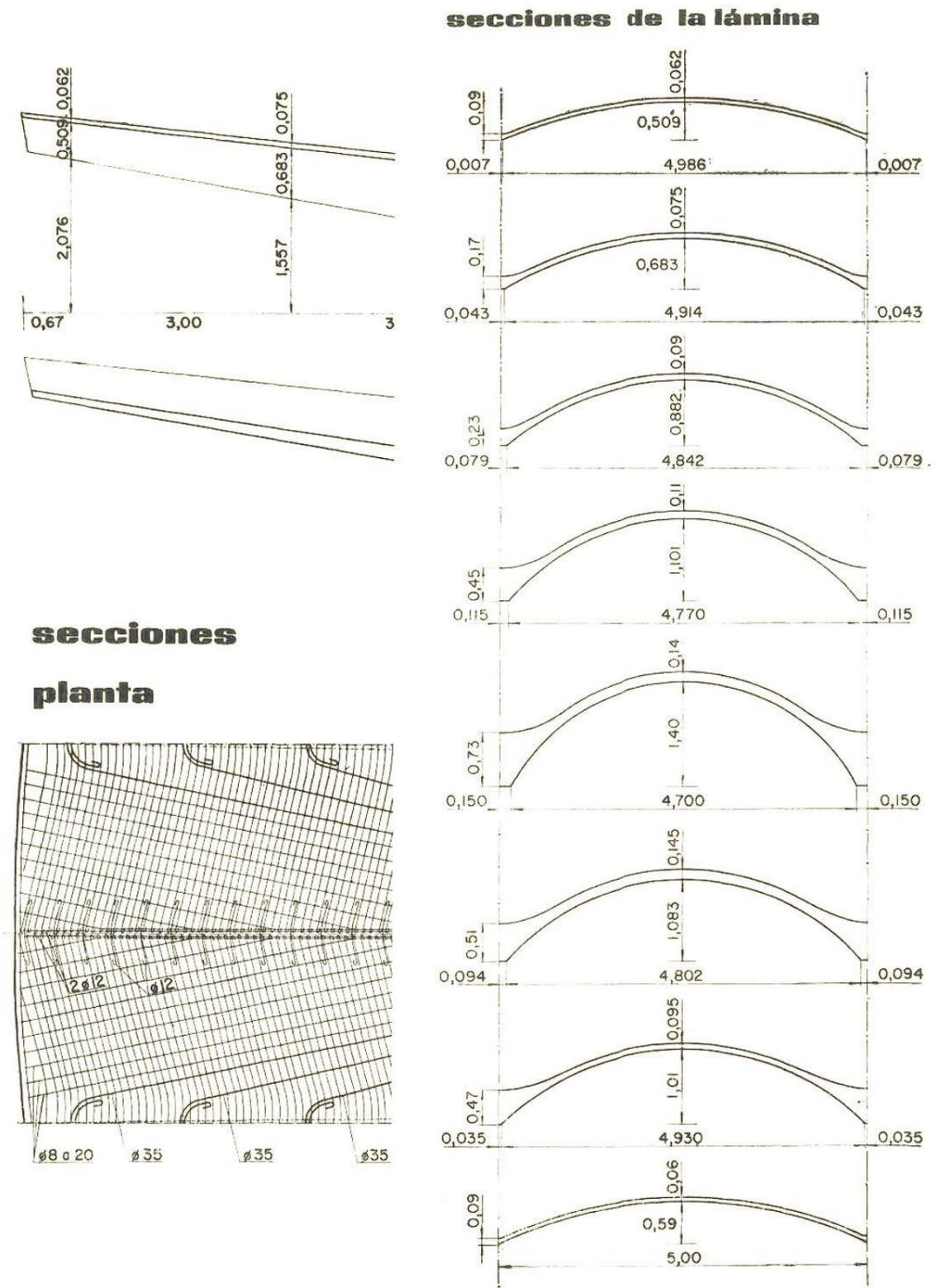


Figura 16. Secciones de la lámina de la cubierta.

## 5. Representación Gráfica

### 5.1. Estructura Principal

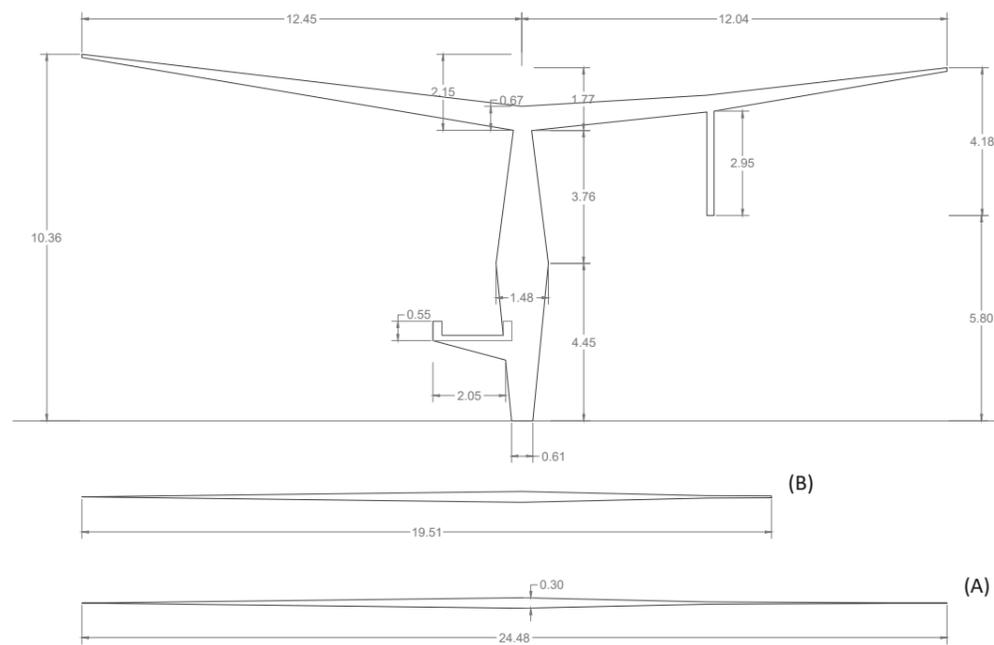
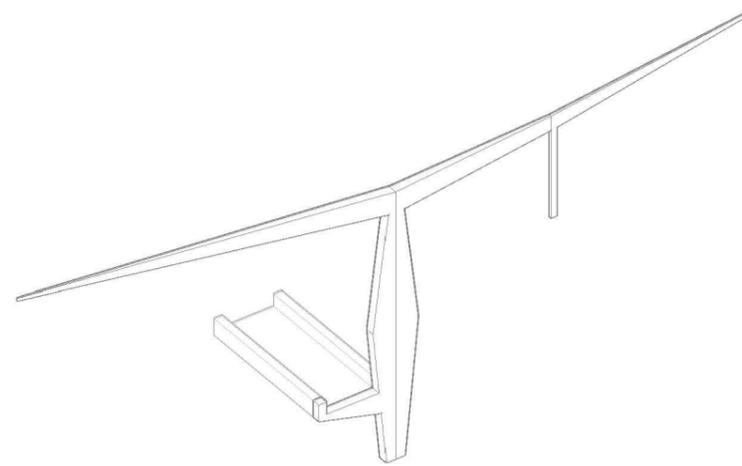


Figura 21. Plantas y Alzado de los soportes (Escala 1:200)

Modelo A



Modelo B

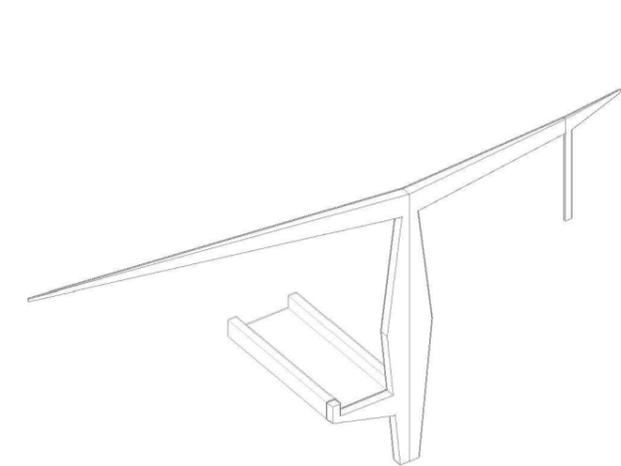


Figura 22. Volumetría de los modelos A y B

En primer lugar, se representan los dos modelos que conforman la estructura principal del hipódromo. El modelo A corresponde a las partes extremas de las gradas y el modelo B a la parte central. Se puede observar en planta como las vigas sobre las que apoya la cubierta son de sección variable tanto en su dimensión en altura como en ancho siendo más esbeltas en sus extremos.

### 5.2. Cubierta Posterior

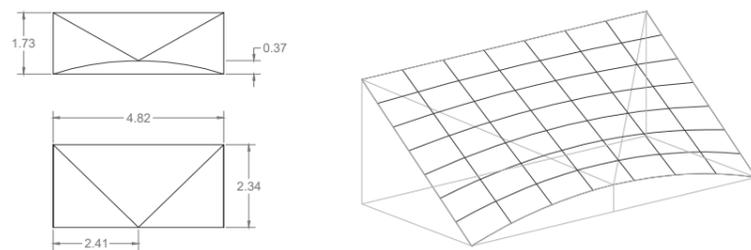


Figura 23. Planta, Alzado y Esquema en 3D de un módulo de la cubierta

Esta cubierta está situada a una altura intermedia en la fachada posterior (entrada a las gradas) quedando debajo los grandes ventanales tal y como está señalado en la figura 24.

Está diseñada con arcos en su parte frontal que ascienden hacia el muro posterior donde llegan a convertirse en una línea recta. Desde el exterior no se observan estos arcos ya que la fachada está resuelta con una línea recta horizontal y solo es posible ver la ondulación desde arriba.



Figura 24. Fachada entrada a las gradas

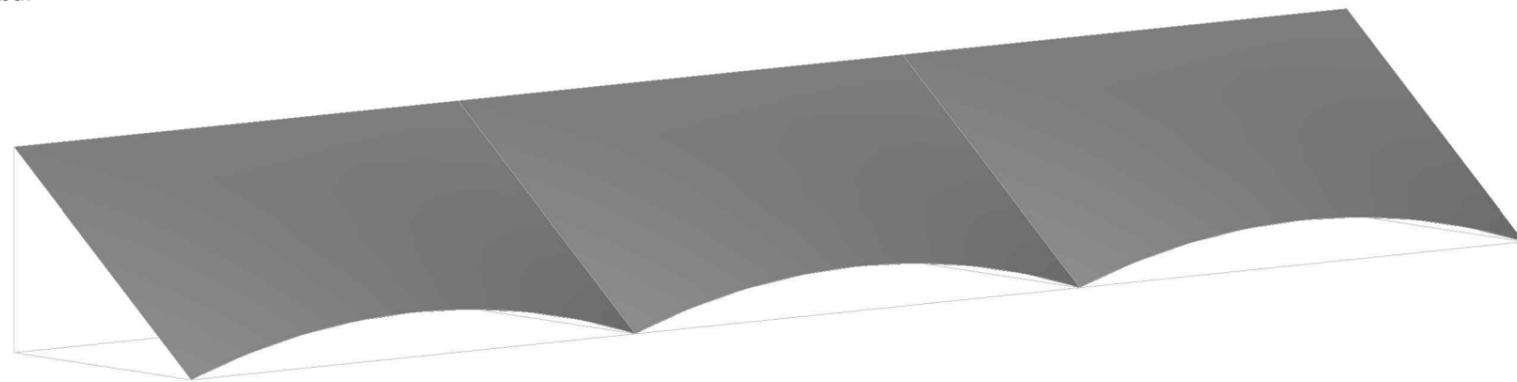


Figura 25. Volumetría de la cubierta

### 5.3. Bóvedas del Hall

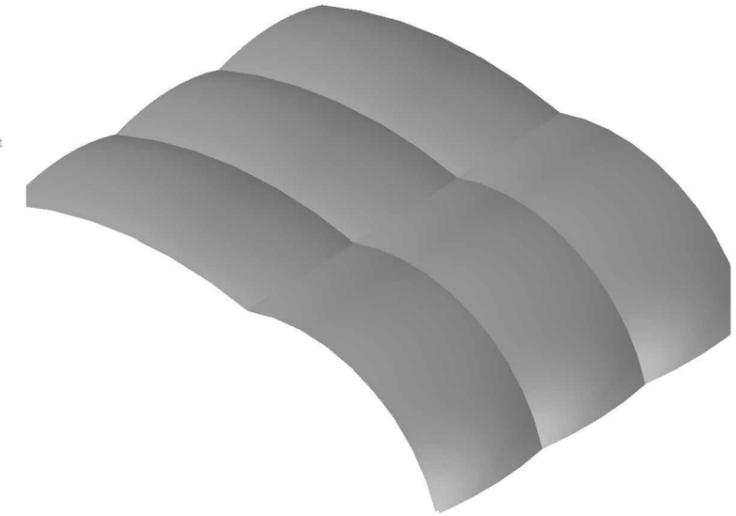
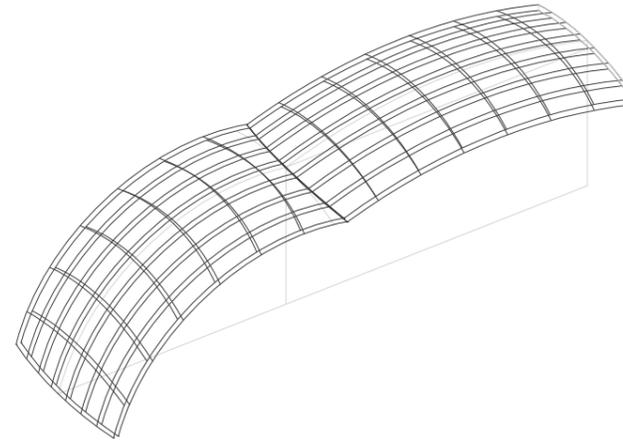
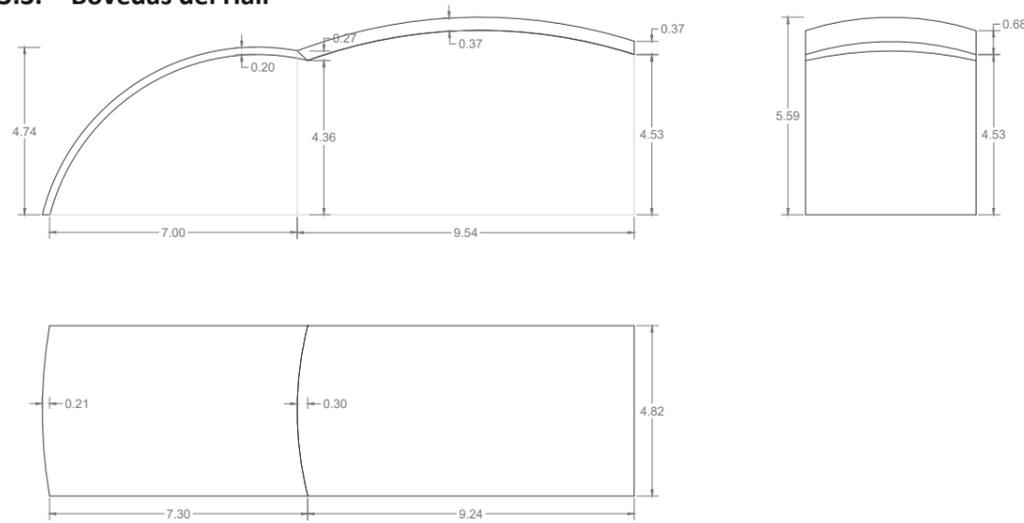


Figura 26. Planta y Alzados del plano superior de las bóvedas (Escala 1:200)

Figura 27. Esquema 3D de las dos caras de las bóvedas

Figura 28. Volumetría de las bóvedas

En el interior del Hall encontramos una serie de bóvedas tóricas que cubren este espacio y sobre las que se apoya la grada. Estas bóvedas están formadas por dos tramos de radio distinto. Cada tramo tiene una curvatura en las dos direcciones dando como resultado una serie de cúpulas seccionadas. En la Planta y Alzados (Figura 26) aparece el plano de la cara superior. Una vez obtenido este plano, se le ha dado un grosor de 20 cm para obtener el plano de la cara inferior (Figura 27). Estas bóvedas se repiten a lo largo de todo el espacio del Hall.

### 5.4. Estructura de las gradas y tipologías

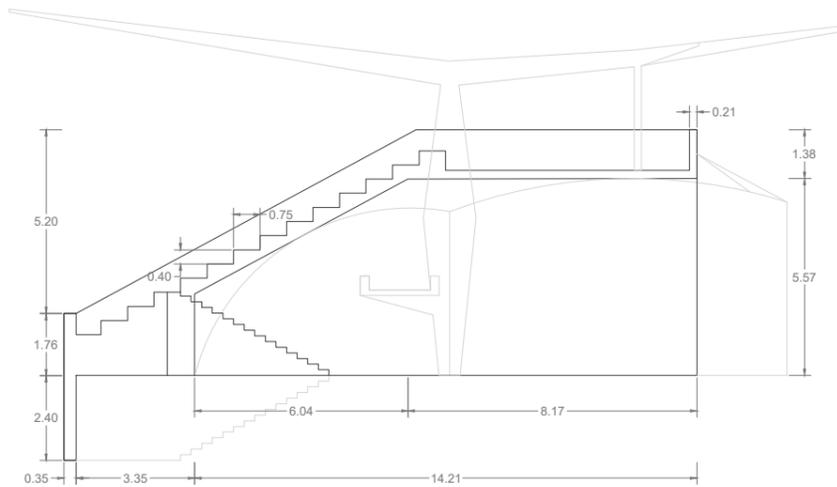


Figura 29. Sección completa de las gradas (Escala 1:200)

Con respecto a la grada, está compuesta por módulos ubicados entre cada soporte. En la Figura 30 se observan las tres tipologías que se combinan entre ellas para construir el conjunto de las gradas. La primera tipología se diferencia por tener unas escaleras que acompañan a la grada hasta llegar a la parte de arriba donde se encuentra la galería alta. En cambio, las escaleras de la segunda tipología atraviesa las gradas que llevan a las taquillas y el hall. La tercera tipología solamente tiene las gradas sin escaleras.

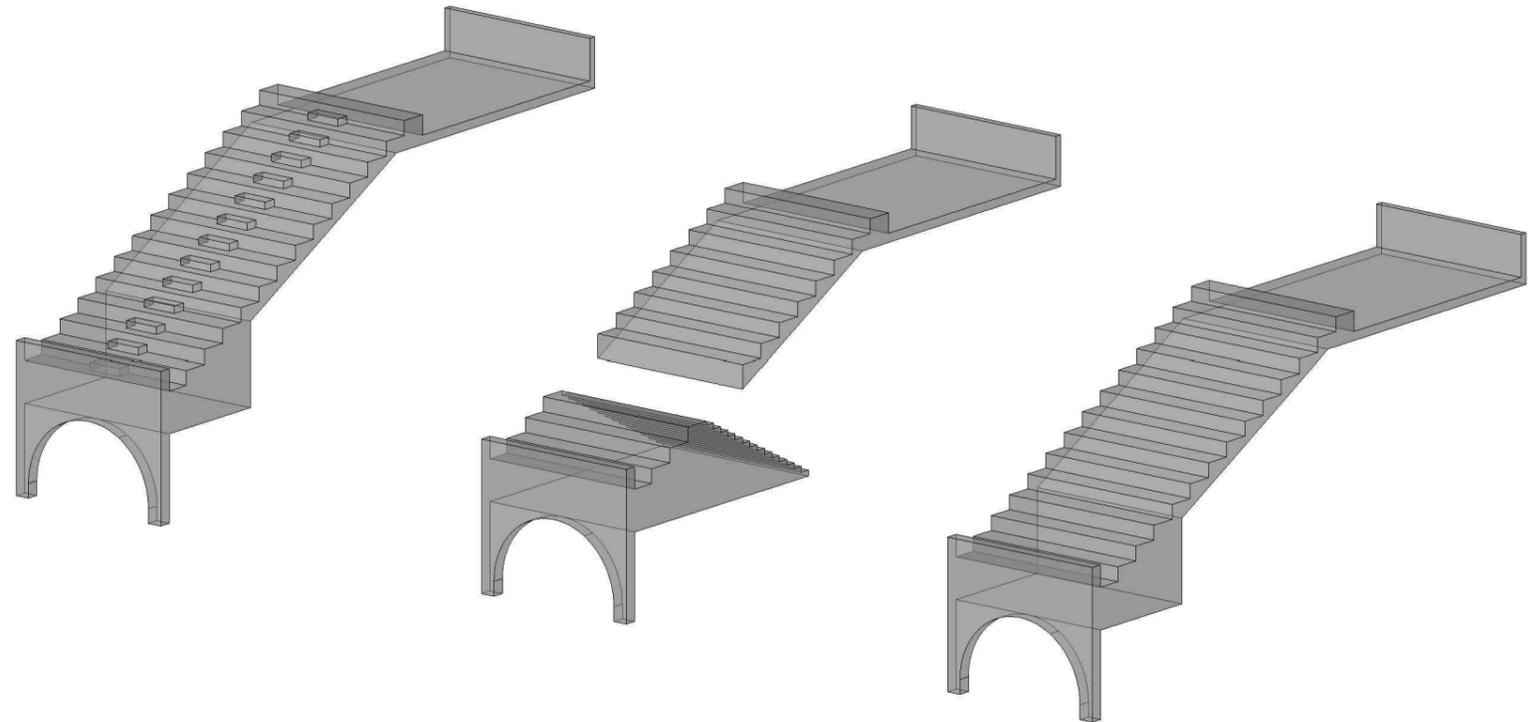


Figura 30. Tipologías de los módulos de las gradas

### 5.5. Hiperboloides de la cubierta

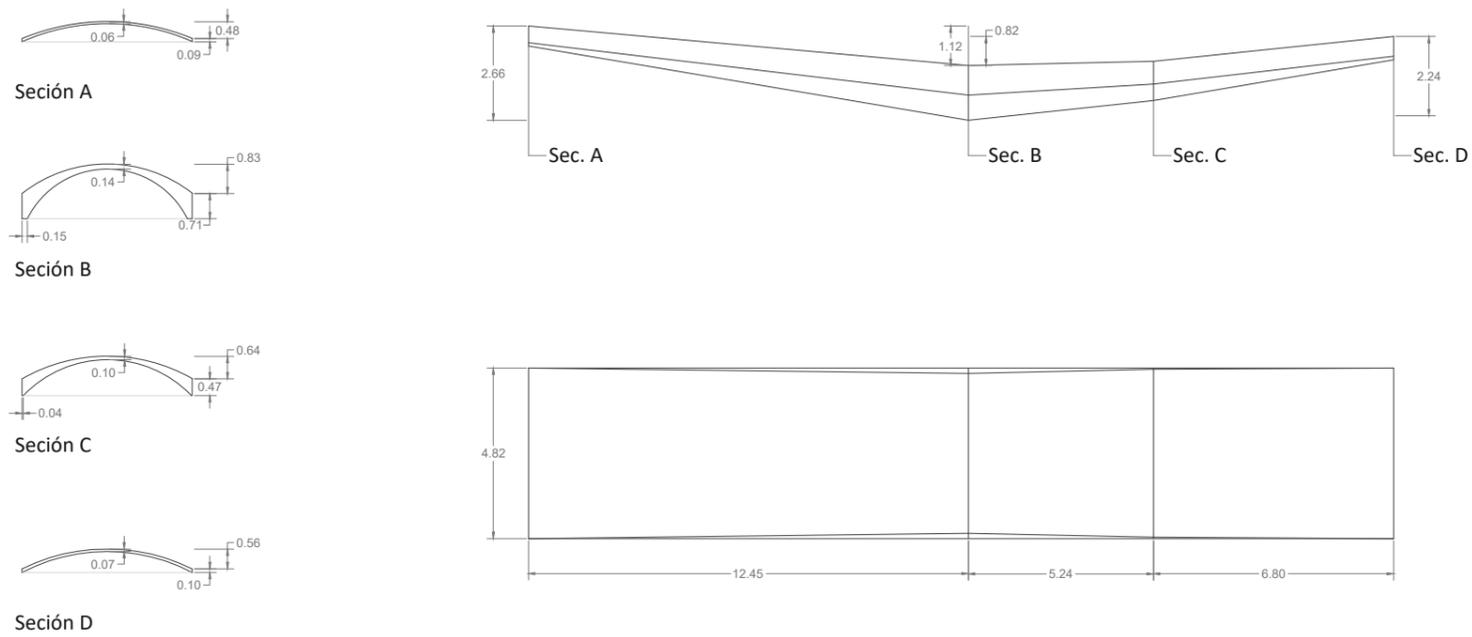


Figura 31. Planta, Alzado y Secciones de los hiperboloides de la cubierta (Escala 1:200)

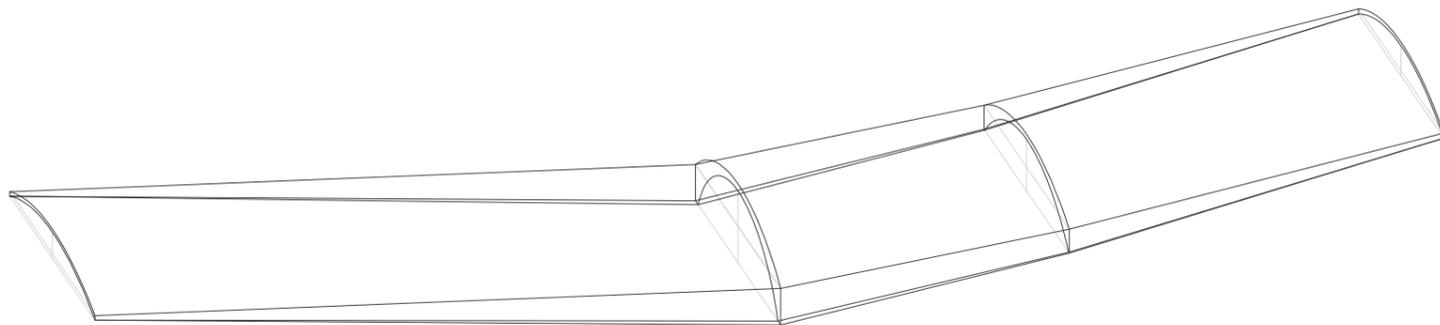


Figura 32. Estructura-Montaje 3D de los hiperboloides

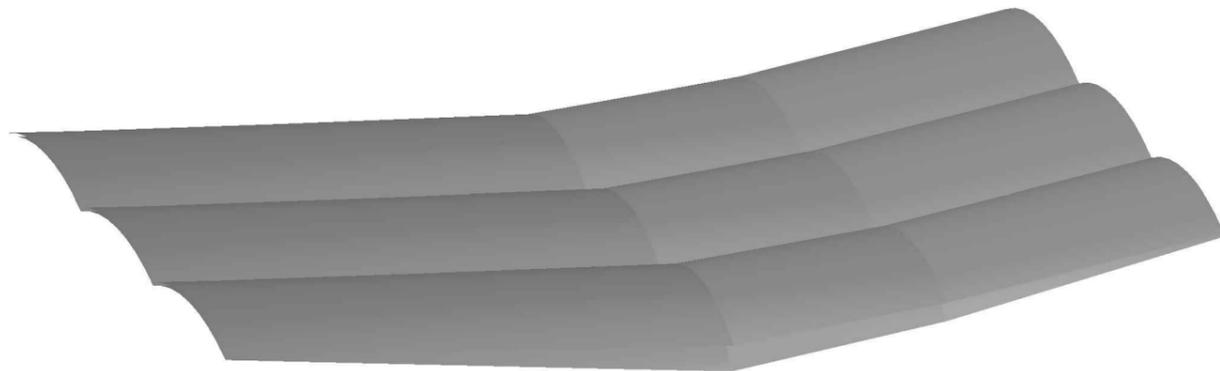
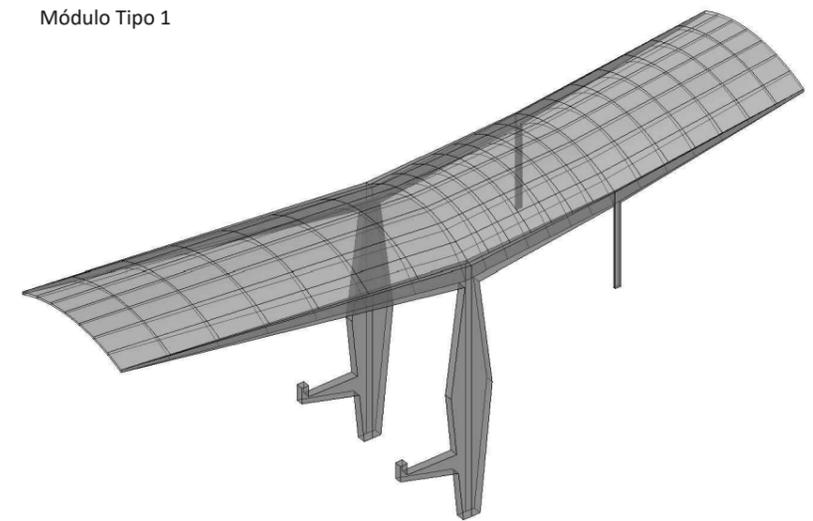


Figura 33. Volumetría de los hiperboloides de la cubierta

Por último, los hiperboloides de la cubierta son el elemento destacado del hipódromo. El diseño de estos hiperboloides es muy complejo por varios factores. Tiene tres inclinaciones distintas en toda su longitud, la cara superior no es igual a la cara inferior y además la altura es distinta en cada punto, siendo así sus secciones distintas en todos sus puntos. Por otra parte, las vigas sobre las que se apoyan también tienen sección variable por lo que el ancho de la cara inferior de los hiperboloides también es variable.

Realmente nos podemos referir a dos tipos de módulos. El módulo tipo 1 es el que está limitado por los soportes y el tipo 2 es el módulo real de la estructura ya que la junta se produce en el punto más alto de los hiperboloides. Debido a que otros elementos como las gradas están diseñados siguiendo el módulo tipo 1, es este el que se ha decidido tomar como módulo de referencia.

Módulo Tipo 1



Módulo Tipo 2

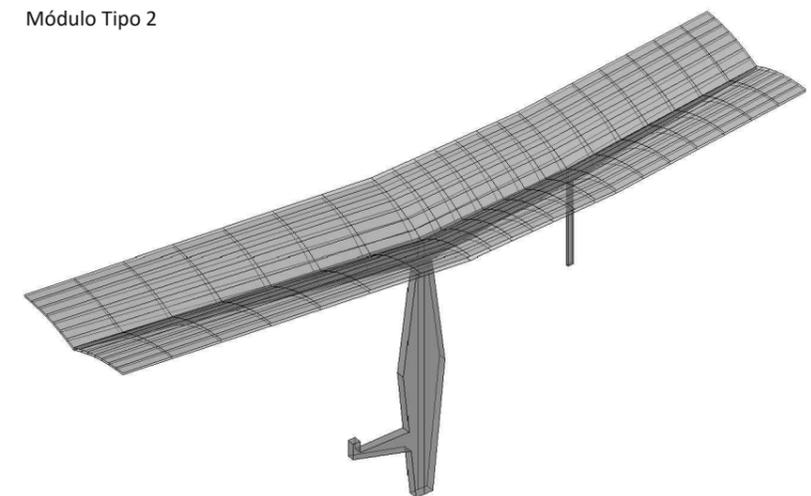


Figura 34. Tipos de módulo

## 5.6. Visualización en render

En las siguientes Figuras (35, 36 y 37) se ha realizado una modelización del conjunto de las partes explicadas anteriormente con la disposición que les corresponde.

Se observa que la longitud de los hiperboloides de la cubierta es mayor en los módulos de los extremos que en los de la parte central. Además, en cada extremo de las gradas se añade un bloque semicircular que corresponde a las escaleras, las cuales dan acceso a la planta intermedia que se sitúa bajo las gradas.

En la fachada vista desde la pista se contempla tanto los arcos que forman los hiperboloides de la cubierta como los arcos que se forman en el muro frontal al nivel del suelo que se prolongan a lo largo de los tres bloques que forman las gradas con el fin de conseguir esa unidad en el proyecto.

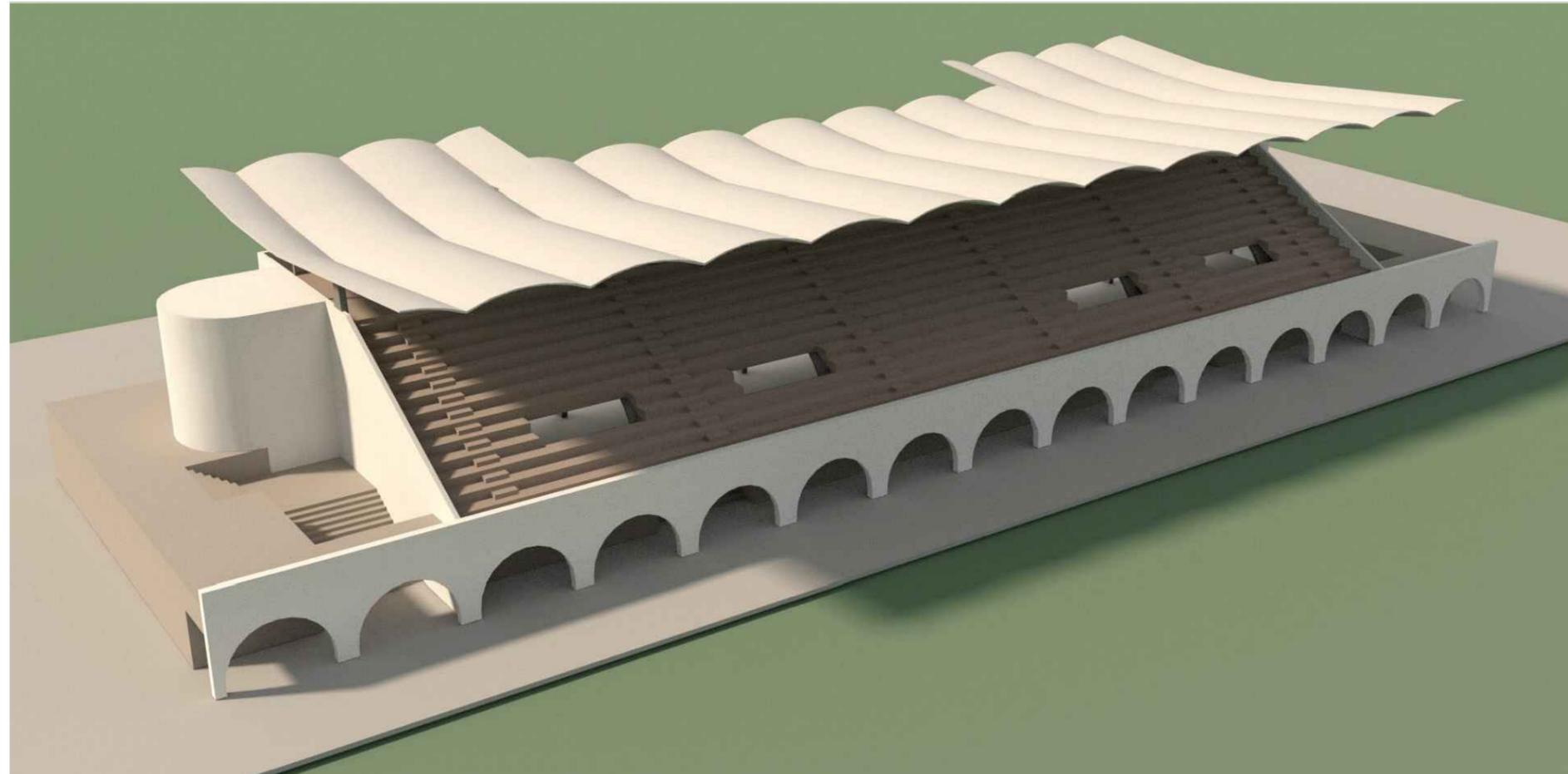


Figura 35. Modelización general con vistas hacia las gradas



Figura 36. Modelización general con vistas a la fachada del hall

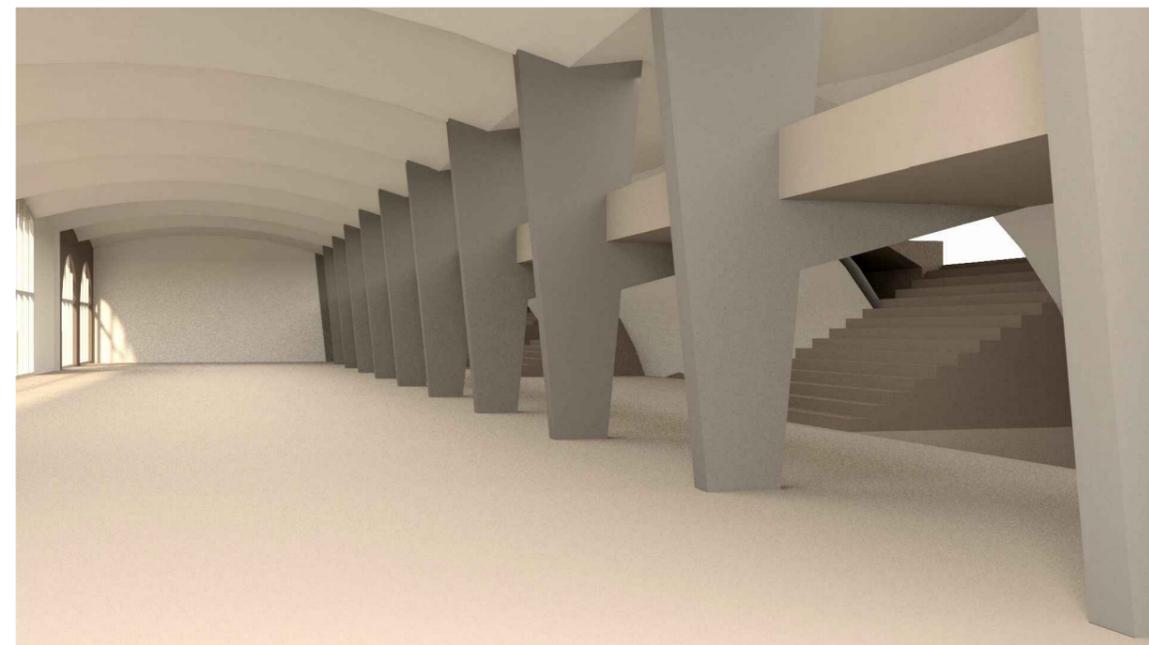


Figura 37. Modelización general del interior del hall

## 6. Análisis Estructural

### 6.1. Modelización en AutoCAD

Como elemento principal del hipódromo, en este apartado se procede a realizar un análisis estructural de los hiperboloides de la cubierta de las gradas mediante el cálculo con Architrave. Todas las modelizaciones que se muestran a continuación son elaboraciones propias. Las medidas han sido tomadas de los planos originales.

Previamente, se ha construido el modelo en AutoCAD (Figura 38) mediante las herramientas de Architrave. La cubierta se ha construido con un mallado siguiendo la curva que la define. El soporte y la viga se han modelizado como elementos planos debido a que el espesor es mucho menor que la dimensión en sus otras caras. Por último, el tirante posterior se ha modelizado como una barra circular.

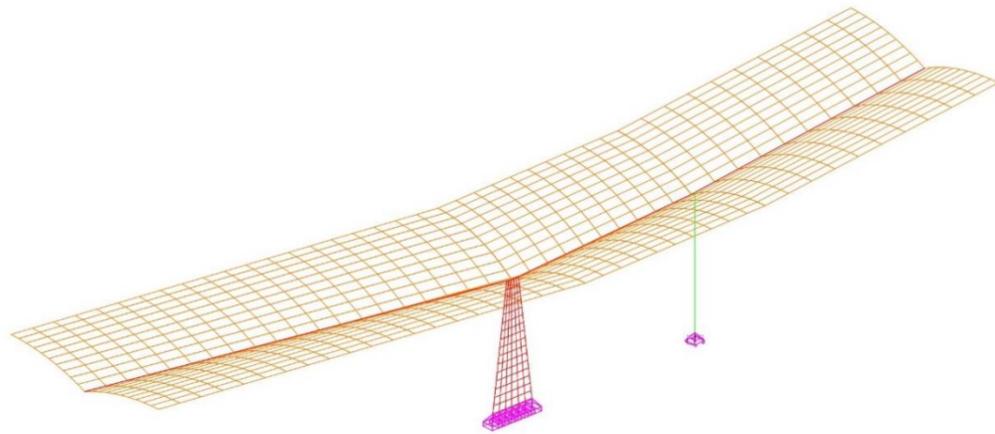


Figura 38. Modelo en AutoCAD

### 6.2. Propiedades del modelo

Debido a que no hay datos exactos de los materiales que se emplearon, se estudiará con los materiales que se emplean actualmente. De esta forma, las características para el dimensionado de la estructura que se toman son las que se señalan a continuación:

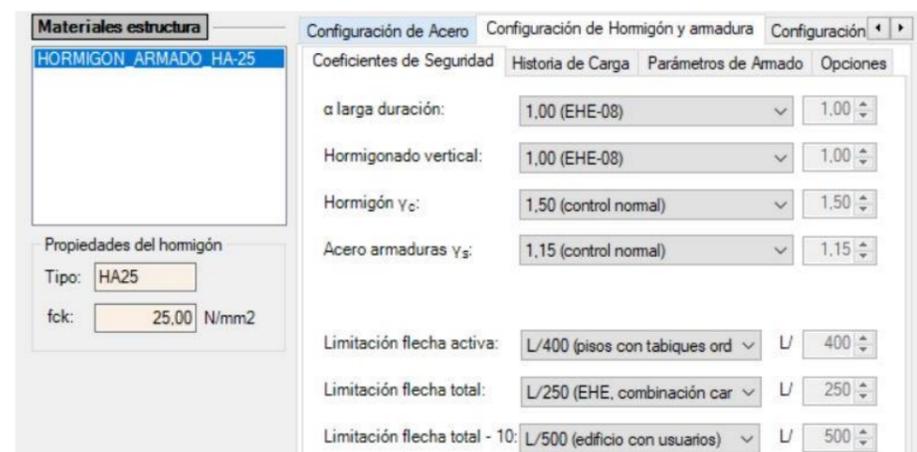


Figura 39. Coeficientes de seguridad

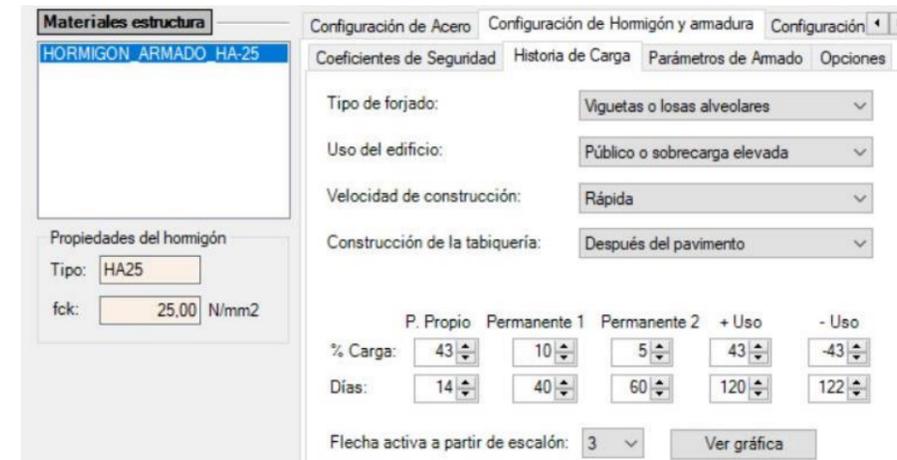


Figura 40. Historia de Carga

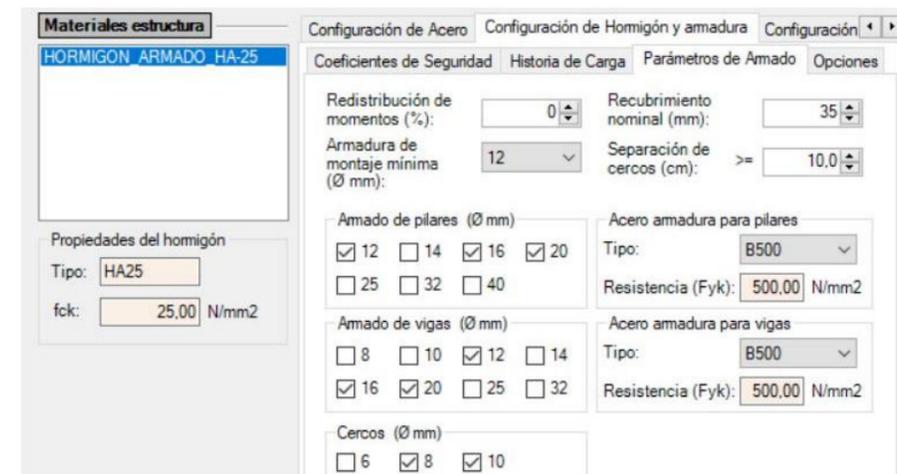


Figura 41. Parámetros de armado

El soporte, la viga y la cubierta están modelizados con hormigón armado. El soporte es de sección variable con forma rectangular y la viga es de canto variable también con forma rectangular. Tanto el soporte como la viga están orientados con su eje fuerte perpendicularmente al plano del pórtico. En cuanto al tirante posterior, se ha resuelto con una sección de 25 cm de diámetro.

Con respecto a los apoyos, se ha considerado que el soporte central está empotrado en toda su sección y el tirante posterior se ha proyectado como articulado, ya que este último está fijado en la parte superior de la cubierta toroide del hall.

Las acciones que deberá soportar la cubierta son las siguientes:

Carga permanente (peso propio): 25 KN/m<sup>3</sup>

Carga variable de uso para conservación: 1 KN/m<sup>2</sup>

Carga variable de viento: se determina un valor de 1,5 KN/m<sup>2</sup> para succión y para presión.

Para el análisis del modelo en Architrave se decide realizarlo solamente bajo cargas gravitatorias.

### 6.3. Análisis del modelo en Architrave

Tras poner en carga la cubierta con las acciones señaladas en el apartado anterior, vemos en las Figuras 42 y 43 una representación gráfica de las deformaciones que se producen en los ejes X y Z indicados.

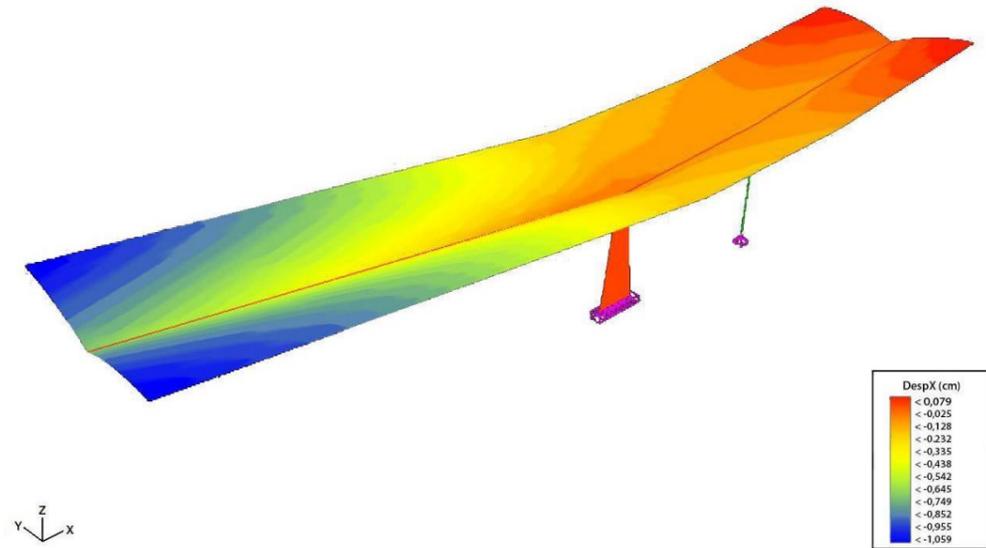


Figura 42. Deformaciones del módulo en el eje X

En el caso del eje X (en horizontal), se puede observar que los puntos de mayor deformación se producen en los vértices del voladizo que cubre las gradas llegando a ser de hasta 1,06 cm. Resulta de mayor importancia la deformación que se produce en el eje Z (en vertical) ya que en la Figura 45 observamos que también se produce en los mismos puntos, pero alcanzando una flecha de hasta 7,15 cm. Una deformación como esta no es perceptible a simple vista debido a las grandes dimensiones que tiene la cubierta.

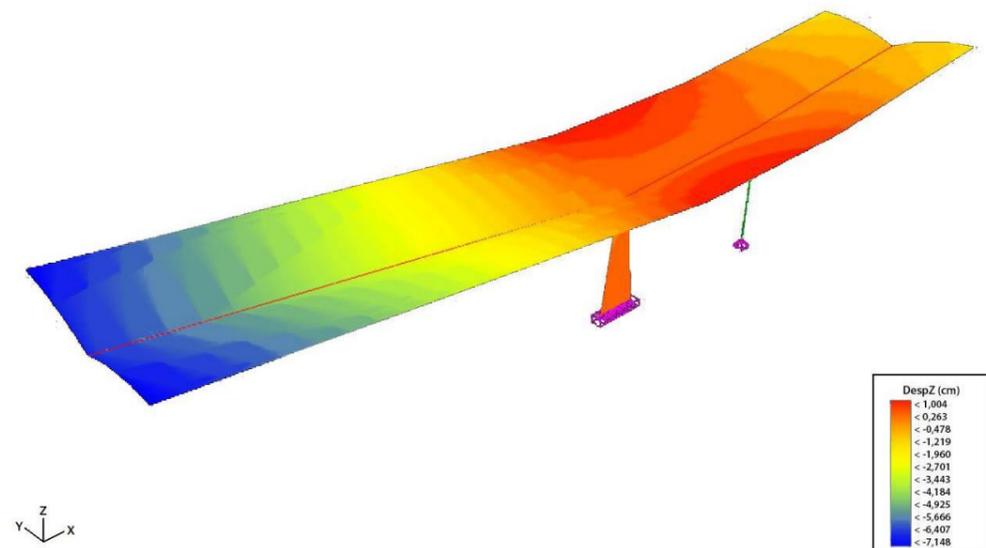


Figura 43. Deformaciones del módulo en el eje Z

Hay que tener en cuenta que este análisis se ha realizado únicamente con un módulo, por lo que no se está considerando la interacción entre ellos, sobre todo en estos puntos que alcanzan una deformación considerable, ya que es el lugar donde se forman los arcos tan representativos del hipódromo. Resulta necesario tener en cuenta la interacción en el eje Y con los módulos contiguos como se muestra a continuación.

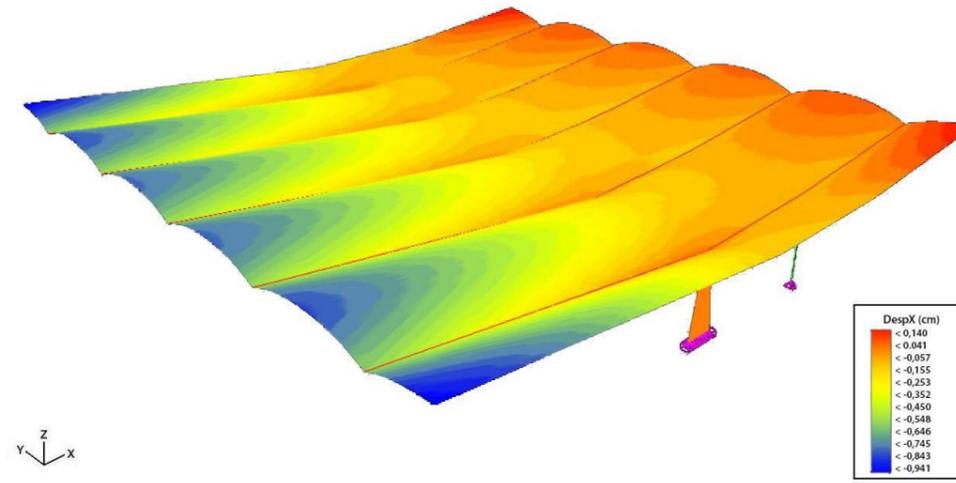


Figura 44. Deformaciones del conjunto en el eje X

En el conjunto de la estructura se obtiene un resultado más aproximado a la realidad sobre cómo trabaja la cubierta del hipódromo. Observamos en la Figura 44 y 45 que los puntos de mayor deformación son los mismos de antes pero únicamente en los módulos de los extremos. En los módulos intermedios se observa que la deformación disminuye gracias al trabajo en conjunto que realiza la cubierta al formar estos arcos. En el punto medio de estos arcos, que es donde se produce la junta, obtenemos que la deformación en el eje X es de 0,82 cm y en el eje Z tiene una flecha de 5,47 cm.

Se llega a la conclusión que los puntos más desfavorables son los medios hiperboloides ubicados en los extremos de la cubierta en los puntos más alejados del soporte por encima de las gradas.

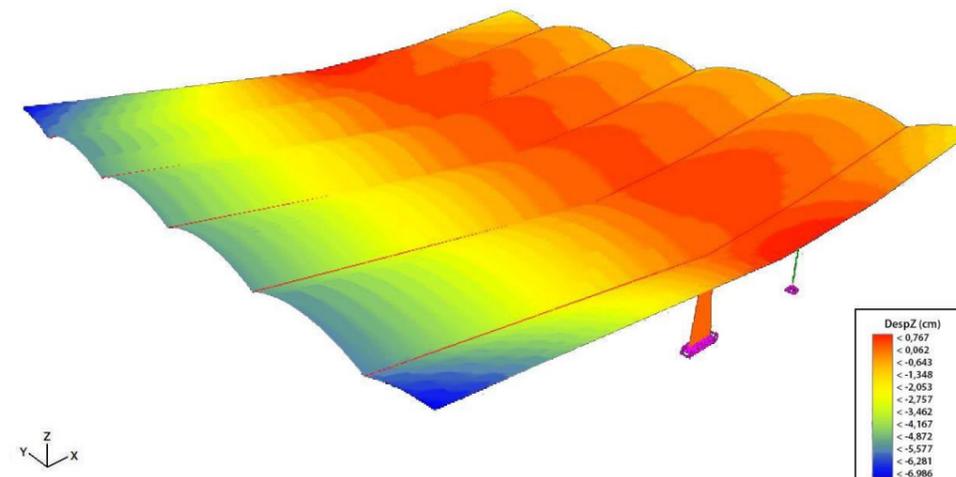


Figura 45. Deformaciones del conjunto en el eje Z

#### 6.4. Deformación de los hiperboloides de la cubierta

Con el uso del programa de Architrave, en la Figura 46 observamos un modelo 3D mostrando la deformación que se produce en la cubierta en uno de sus módulos. En este modelo no se ha tenido en cuenta la interacción con los módulos contiguos y se ha decidido mostrar un único módulo para visualizar y entender mejor los resultados. Para apreciar mejor la deformación se ha aplicado una escala de 5 veces la deformación del cálculo.



Figura 46. Modelización 3D de la cubierta deformada

Se debe señalar que el espesor de la cubierta es variable, por lo que en los extremos de la misma tienen una dimensión menor que en los puntos de la cubierta donde se apoya al soporte. El espesor de los extremos es de 6 cm por lo que supone una capacidad de tensión menor y de esta forma una mayor deformación.

#### 6.5. Trabajo de la estructura en su conjunto

La cubierta toroide que cubre toda la parte interior del hipódromo está formada por unas superficies de doble curvatura que transmiten las tensiones a los soportes. Dentro de cada módulo (en este caso se considera el módulo formado entre los soportes) se ubican dos bóvedas contiguas de las cuales la más grande está en voladizo cubriendo la parte del hall y la más pequeña apoyada en los dos pilares a un lado y en el suelo al otro lado.

En necesario destacar la función estructural del tirante y el arriostamiento marcados en la Figura 47 ya que sin ellos la estructura no funcionaría y de esta manera se consigue que toda la estructura trabaje en conjunto.

Con respecto al tirante posterior, tiene una sección de 25 cm de diámetro de hormigón armado que trabaja a tracción. Este esfuerzo se transmite al punto más elevado de la cubierta toroide que tiene el hall. Así, la cubierta del hall queda en voladizo dejando libre de elementos estructurales la fachada de la entrada al hipódromo.

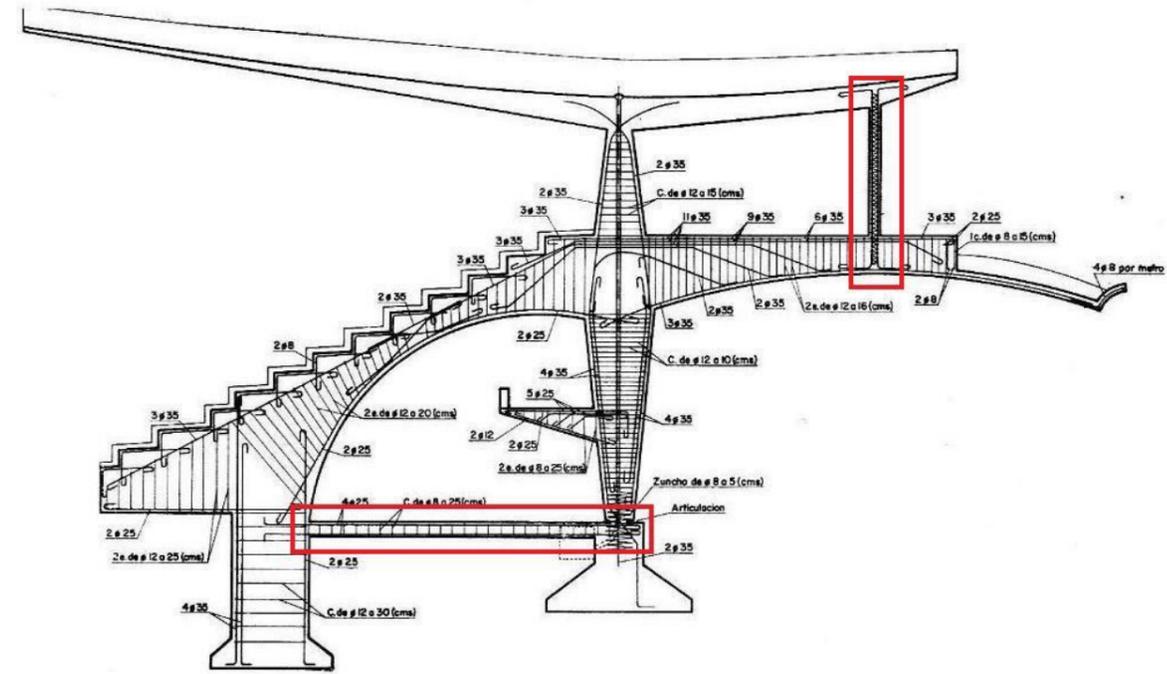


Figura 47. Detalle constructivo de la sección transversal

### 7. Conclusiones

La obra de Torroja fue una constante investigación en el empleo del hormigón armado utilizando su conocimiento en la geometría y nuevos sistemas de construcción en función del momento y las circunstancias. Siempre mantuvo la intención de utilizar este material en todas sus obras. Para ello, siempre realizaba ensayos previamente con el fin de garantizar que la estructura resultara segura una vez construida. Esto es debido a que en aquel momento era un material novedoso y no se disponía de los datos suficientes para poner en práctica directamente el empleo de este material.

Con la construcción de las marquesinas del hipódromo de la Zarzuela se manifiesta la voluntad de realizar la propuesta inicial de manera económica y viable. Siempre trató que la construcción resultara sencilla y la solución fuera lo más económica posible. Mediante el uso de superficies hiperbólicas y un gran voladizo con pequeños espesores logró el resultado final que Torroja venía buscando.

Lo más destacable de sus estructuras es el trabajo en conjunto que desempeñan todas sus partes siendo necesarias cada una de ellas, ya que con la eliminación de algunos de estos elementos estructurales la obra ya no funcionaría. Además, el resultado final tiene una relación directa entre la forma y el material utilizado.

Hay que tener en cuenta que a día de hoy todavía no existe un programa de cálculo informático capaz de analizar una estructura de estas características de una manera tan exacta como se pretende. Es por ello que los resultados obtenidos en este análisis y su dimensionado son muy aproximados.

Torroja logró con sus obras impulsar el uso del hormigón armado en las décadas siguientes, siendo a día de hoy el material más utilizado en la construcción, sobre todo en las estructuras de los edificios.

## 8. Índice de imágenes

Figura 1. Retrato de Eduardo Torroja Miret (fundacioneduardotorroja.org)

Figura 2. Mercado de Algeciras (torrojaingenieria.es)

Figura 3. Frontón de Recoletos (revistaad.es)

Figura 4. La Cuba Hiperbólica de Fedala (torroja.eu)

Figura 5. Hipódromo Real de la Castellana (urbancidades.wordpress.com)

Figura 6. Secciones transversales de las 9 propuestas presentadas en el concurso del nuevo Hipódromo (Antuña 2002)

Figura 7. Planta General de la Propuesta (coam.es, revista)

Figura 8. Esquemas de la evolución del diseño de la Propuesta (coam.es, revista)

Figura 9. Planta Alta y Secciones de la Tribuna de Preferencia presentadas al concurso (coam.es, revista)

Figura 10. Sección del a Tribuna presentada al concurso (coam.es, revista)

Figura 11. Esquema en sección transversal con los soportes de los extremos eliminados (Torroja 1962) (Imagen modificada)

Figura 12. Detalle constructivo de la sección transversal (revistas.csic.es)

Figura 13. Sentido de los esfuerzos en la cubierta (revistas.csic.es)

Figura 14. Estructura de la cubierta de las gradas (revistas.csic.es)

Figura 15. Módulo de la estructura de la cubierta e isostáticas (revistas.csic.es)

Figura 16. Secciones de la lámina de la cubierta (revistas.csic.es)

Figura 17. Construcción de la cubierta por partes (Antuña 2002)

Figura 18. Módulo de la cubierta preparado para hormigonar (revistas.csic.es)

Figura 19. Ensayo de carga del módulo (Antuña 2002)

Figura 20. Ensayo de carga del módulo (revistas.csic.es)

Figura 21. Plantas y Alzado de los soportes (elaboración propia)

Figura 22. Volumetría de los modelos A y B (elaboración propia)

Figura 23. Planta, Alzado y Esquema en 3D de un módulo de la cubierta (elaboración propia)

Figura 24. Fachada entrada a las gradas (coam.org)

Figura 25. Volumetría de la cubierta (elaboración propia)

Figura 26. Planta y Alzados del plano superior de las bóvedas (elaboración propia)

Figura 27. Esquema 3D de las dos caras de las bóvedas (elaboración propia)

Figura 28. Volumetría de las bóvedas (elaboración propia)

Figura 29. Sección completa de las gradas (elaboración propia)

Figura 30. Tipologías de los módulos de las gradas (elaboración propia)

Figura 31. Planta, Alzado y Secciones de los hiperboloides de la cubierta (elaboración propia)

Figura 32. Estructura-Montaje 3D de los hiperboloides (elaboración propia)

Figura 33. Volumetría de los hiperboloides de la cubierta (elaboración propia)

Figura 34. Tipos de módulo (elaboración propia)

Figura 35. Modelización general con vistas hacia las gradas (elaboración propia)

Figura 36. Modelización general con vistas a la fachada del hall (elaboración propia)

Figura 37. Modelización general del interior del hall (elaboración propia)

Figura 38. Modelo en AutoCAD (elaboración propia)

Figura 39. Coeficientes de seguridad (elaboración propia)

Figura 40. Historia de carga (elaboración propia)

Figura 41. Parámetros de armado (elaboración propia)

Figura 42. Deformaciones del módulo en el eje X (elaboración propia)

Figura 43. Deformaciones del módulo en el eje Z (elaboración propia)

Figura 44. Deformaciones del conjunto en el eje X (elaboración propia)

Figura 45. Deformaciones del conjunto en el eje Z (elaboración propia)

Figura 46. Modelización 3D de la cubierta deformada (elaboración propia)

Figura 47. Detalle constructivo de la sección transversal (revistas.csic.es) (Imagen modificada)

## 9. Bibliografía

- Alarcón, Enrique (2000). "Los métodos de Cálculo", (De la construcción a la ciencia: ayer y hoy de Eduardo Torroja). Academia de Ingeniería, Madrid.  
[http://oa.upm.es/23486/1/metodos\\_calculo.pdf](http://oa.upm.es/23486/1/metodos_calculo.pdf)
- Antuña Bernardo, Joaquín (2002). "Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret". Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Madrid.
- Cassinello Plaza, María Josefa (2011). "Fundación Eduardo Torroja Miret". Biografía.  
<http://www.fundacioneduardotorroja.org/index.php/es/eduardo-torroja/>
- Fernández Ordóñez, José Antonio (1982). Introducción en "José Eugenio de Ribera, ingeniero de caminos 1864-1936: Catálogo de la exposición celebrada en el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, junio de 1982".
- García Reig, Carmen (1999). "La geometría en la obra de Eduardo Torroja". Revistas de Obras Públicas, nº 3393, Madrid.
- Haas, Alois Maria (1971). "Láminas de Hormigón", Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento, Madrid.
- León, Miguel Ángel (2002). "Geometría y superficies a través de las estructuras emblemáticas del ingeniero Eduardo Torroja", Revista Fabrikart. Arte, Tecnología, Industria, Sociedad, nº 2, País Vasco.
- Torroja, Eduardo (1962). "Hipódromo de la Zarzuela", Informes de la construcción Vol.14 (Nº137).  
<http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4930/5736>
- Zafra, Juan Manuel (1911). "Construcciones de hormigón armado". V. Tordesillas, Madrid.  
<https://archive.org/details/ConstruccionesDeHormignArmado>
- Zafra, Juan Manuel (1912). "Cálculo de estructuras". Prudencio Pérez de Velasco, Madrid.  
<https://archive.org/details/LosMtodosDeClculoDeEstructurasDerivadosDelTrabajoElastico>
- "Concurso de proyectos del Hipódromo de Madrid", Revista técnica mensual de construcción: Hormigón y Acero, nº7, Noviembre 1934  
[http://hemerotecadigital.bne.es/pdf.raw?query=parent%3A0005270568+type%3Apress%2Fpage&name=Hormig%C3%B3n+y+acero+\(Madrid\).+11-1934%2C+no.+7](http://hemerotecadigital.bne.es/pdf.raw?query=parent%3A0005270568+type%3Apress%2Fpage&name=Hormig%C3%B3n+y+acero+(Madrid).+11-1934%2C+no.+7)
- "Revista Nacional de Arquitectura", Num. 81 (1948).  
<http://www.coam.es/media/Default%20Files/fundacion/biblioteca/revista-arquitectura-100/1946-1958/docs/revista-completa/revista-nacional-arquitectura-1948-n81.pdf>

Herramientas informáticas utilizadas:

Architrave 2019 (v2.3), © 2015 Architrave® Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. 46022 Valencia (España)

Autodesk AutoCAD 2017, © 2017 Autodesk, Inc.

Autodesk 3ds Max 2017, © 2017 Autodesk, Inc.