

**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
Escuela Profesional de Arquitectura



**Evaluación estructural en las cubiertas shell de Eduardo Torroja para el  
Hipódromo de la Zarzuela**

Tesis para obtener el Título Profesional de arquitecto

**Autor:**

Luis Alberto Leyva Guerrero

**Asesor:**

Mg. Cristian Pedro Yaraska Aybar

Lima, marzo de 2023

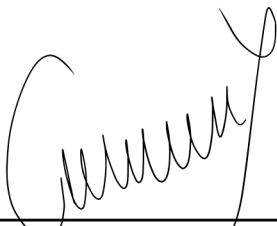
## DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD DE TESIS

Yo, Mg. Cristian Pedro Yarasca Aybar, docente de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de arquitectura de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que la presente investigación titulada: **“EVALUACIÓN ESTRUCTURAL EN LAS CUBIERTAS SHELL DE EDUARDO TORROJA PARA EL HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA”** del autor Luis Alberto Leyva Guerrero tiene un índice de similitud de 3% verificable en el informe del programa Turnitin, y fue realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponde ante cualquier falsedad u omisión de los documentos como de la información aportada, firmo la presente declaración en la ciudad de Lima, a los 10 días del mes de marzo del año 2023.



---

Mg. Cristian Pedro Yarasca Aybar

## ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Lima, Ñaña, Villa Unión, a ...10...día(s) del mes de... **marzo**.....del año **2023** siendo las.**09:00** horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: **Arq. Ruth Yesenia Sosa Quispe**... el secretario: .....**Mach. Daniela Ayala Mariaca** y los demás miembros: **Dra. Denise Morelli Damas de Oliveira y Arq. Astrid Cesia Zapata Antesana**.....y el asesor .....**Mg. Cristian Pedro Yarasca Aybar** ....con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: "**Evaluación Estructural en las Cubiertas Shell de Eduardo Torroja para el Hipódromo de la Zarzuela**".

de el(los)/la(las) bachiller(es): a)... **LUIS ALBERTO LEYVA GUERRERO**

.....b)...

conducente a la obtención del título profesional de.....

.....**ARQUITECTO**.....  
(Nombre del Título Profesional)

con mención en .....

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): **LUIS ALBERTO LEYVA GUERRERO**

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<b>APROBADO</b>	<b>20</b>	<b>A+</b>	<b>CON NOMINACIÓN EXCELENTE</b>	<b>EXCELENCIA</b>

Candidato (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(\*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

\_\_\_\_\_  
Presidente  
Arq. Ruth Yesenia  
Sosa Quispe

  
\_\_\_\_\_  
Secretario  
MArch. Daniela Ayala  
Mariaca

\_\_\_\_\_  
Asesor  
Mg. Cristian Pedro  
Yarasca Aybar

\_\_\_\_\_  
Miembro  
Dra Denise Morelli  
Damas de Oliveira

\_\_\_\_\_  
Miembro  
Arq. Astrid Cesia  
Zapata Antesana

\_\_\_\_\_  
Candidato/a (a)  
Luis Alberto

\_\_\_\_\_  
Candidato/a (b)

ÍNDICE	
Resumen .....	2
Abstract .....	3
INTRODUCCIÓN .....	4
Definición del Tema.....	4
Problema de investigación .....	4
Objetivo y justificación de la investigación .....	5
Incidencia Estructural de las Tipologías Shell .....	5
Contexto Histórico del Hipódromo de la Zarzuela .....	5
METODOLOGÍA .....	6
Diseño de la investigación.....	6
Lugar de estudio.....	6
Recolección de datos (Técnicas e instrumentos).....	7
Análisis de datos .....	8
RESULTADOS.....	8
Análisis de resultados en la cubierta actual para con las demás propuestas .....	8
Esfuerzos estructurales en la cubierta actual y las propuestas para el hipódromo .....	9
<b>Comparativa de la cubierta actual con las propuestas</b> .....	12
DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	14
Síntesis .....	14
Comparaciones.....	14
Limitaciones.....	16
<b>Recomendaciones</b> .....	16
Conclusiones .....	17
Bibliografía .....	18
Figuras y Tablas .....	20
Evidencia de sumisión del artículo a una revista de prestigio.....	28
Copia de resolución de inscripción del perfil del proyecto de tesis en formato artículo aprobado por el consejo de facultad correspondiente .....	29

# EVALUACIÓN ESTRUCTURAL EN LAS CUBIERTAS SHELL DE EDUARDO TORROJA PARA EL HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA

## STRUCTURAL EVALUATION OF EDUARDO TORROJA'S SHELL ROOFS FOR THE ZARZUELA RACECOURSE

**Autor:** Luis Alberto Leyva Guerrero

Código ORCID (<https://orcid.org/0000-0002-2910-0094>)

### Resumen

Las cubiertas del ingeniero Eduardo Torroja para el Hipódromo de la Zarzuela, son estructuras reconocidas a nivel mundial debido a su calidad estructural. La cubierta actual fue construida, luego de que fuera seleccionada como ganadora del concurso de Hormigón y Acero en 1934, en el que participaron otros ingenieros y arquitectos. Esta investigación, busca determinar la eficiencia material de la cubierta actual tomando en cuenta su tipología *shell* o también llamado doble curvatura, poniéndola en contraste con otras tipologías de cubiertas propuestas para el concurso. Para ello, se estudió en todos los tipos de cubiertas, el objeto volumétrico, los esfuerzos estructurales y la materialidad. Posteriormente, los resultados de los estudios indican que, según el objeto volumétrico de cada cubierta, las direcciones de cargas condicionan las fuerzas en puntos específicos de las losas, denotando deformaciones y esfuerzos estructurales en los extremos de las losas y en los puntos de apoyo. Los esfuerzos estructurales se determinaron cuantitativamente, evidenciando la calidad estructural de manera objetiva, donde las ocho cubiertas presentaron, en algunos casos, exuberantes esfuerzos y deformaciones en comparación a otras, para luego proceder con la comparativa estructural de cada cubierta. En lo que respecta a la materialidad de volumen de acero y hormigón de cada cubierta, se lograra obtener los costos finales de estas estructuras.

En virtud de estos resultados sería posible concluir que la tipología *shell* presenta una eficiencia tanto económica como estructural. En definitiva, es menester la futura evaluación entre la eficiencia estructural de cubiertas *shell* y cubiertas tradicionales, con el propósito de nuevas edificaciones sostenibles y sustentables.

**Palabras clave:** Eduardo Torroja Cubiertas; Eficiencia estructural; shell.

## **Abstract**

Eduardo Torroja's roofs for the Zarzuela Racecourse are structures recognized worldwide for their structural quality. The current roof was built after it was selected as the winner of the Concrete and Steel competition in 1934, in which other engineers and architects participated. This research seeks to determine the material efficiency of the current roof, considering its shell typology or double curvature and contrasting it with other roof typologies proposed for the competition. For this purpose, the volumetric object, structural stresses, and materiality were studied on all roofs. Subsequently, the results of the studies indicate that, depending on the volumetric object of each roof, the load directions condition the forces at specific points of the slabs, denoting deformations and structural stresses at the ends of the slabs and the support points. The structural stresses were determined quantitatively, objectively evidencing the structural quality. In some cases, the eight roofs presented exuberant stresses and deformations compared to others to proceed with the structural comparison of each roof. Concerning the materiality of each roof's steel and concrete volume, the final costs of these structures are obtained. Under these results, it would be possible to conclude that the shell typology presents economic and structural efficiency. In short, it is necessary to evaluate the structural efficiency of shell and traditional roofs in the future to create new sustainable and sustainable buildings.

**Keywords:** Eduardo Torroja roofs; Shell; Structural efficiency.

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Definición del Tema

La cubierta del Hipódromo de la Zarzuela (Madrid, España), es un proyecto de hormigón considerado entre las construcciones estructurales más destacadas mundialmente de la primera mitad del siglo XX, valorado críticamente desde la perspectiva del arte estructural, en puntos como calidad estética, sustentabilidad económica, técnicas de razonamiento lógico, y diseño estructural ([Moragues et al., 2015, pp. 2-3](#)). Fue diseñado por los arquitectos Carlos Arniches, Martín Domínguez y el ingeniero estructural Eduardo Torroja, ingeniero destacado por su participación principal en el diseño estructural para la cubierta, el cual también es pionero en el diseño de estructuras *shell* en hormigón, habiendo hecho ya trabajos de cubierta con tipologías similares en España, como La iglesia de San Nicolas, Casa Factory Roof, Frontón de Recoletos, entre otros ([Lozano-Galant & Payá-Zaforteza, 2011](#)) ([Oliver et al., 2016](#)) ([Arnau-Paltor et al., 2020](#); [Nuñez-Collado et al., 2013](#)). La cubierta del Hipódromo de la Zarzuela se ubica dentro de los parámetros de estructuras *shell*, las cuales están configuradas por estructuras de doble curvatura ([Eigenraam et al., 2020, pp. 3-4](#)). Las tipologías *shell* se utilizan como método sostenible y sustentable estructuralmente, debido que, se construyen con bajos recursos, son cuerpos ligeros, transmiten cargas de forma orgánica (lo que involucra un valor estético) entre otros factores ([Dixit et al., 2021, p. 3](#)).

### 1.2. Problema de investigación

Las obras del ingeniero Eduardo Torroja han sido objeto de múltiples estudios, los cuales evalúan la sostenibilidad y sustentabilidad de sus obras ([Pachón et al., 2018, pp. 3-4](#)) ([Nuñez-Collado et al., 2013, pp. 1894-1895](#)). Dentro de estos estudios, en las obras se valoran principalmente aspectos como estructura, tecnología e innovación. Sin embargo, en las obras de Eduardo Torroja desde la perspectiva material, dentro de la documentación en sus proyectos existen escasos estudios, relacionados al uso de placas delgadas, volumen de estructuras con doble curvatura, entre otros. Además hay carente información respecto al material en donde se aplican estos criterios de doble curvatura ([Arnau-Paltor et al., 2020, p. 2](#)). Es importante valorar que las propiedades tipológicas de estructuras *shell* o cónicas, influyen donde sus criterios estructurales se aplican, que es en el material ([Demakos et al., 2018](#)). En este caso, para las cubiertas cónicas del Hipódromo de la Zarzuela, donde la eficiencia de las estructuras *shell* pueden llegar a ser medidas, comparándolas con otras tipologías estructurales como las demás propuestas para el concurso de Hormigón y Acero de 1934, puede denotar la eficacia en el uso de un correcto diseño estructural aplicado en materiales como acero y hormigón. Entonces, este

estudio aborda la siguiente pregunta de investigación, ¿Cuál es la incidencia estructural de las cubiertas cónicas del Hipódromo de la Zarzuela sobre su eficiencia material?

### **1.3. Objetivo y justificación de la investigación**

El objetivo de esta investigación es determinar la incidencia estructural de las cubiertas cónicas del Hipódromo de la Zarzuela en la eficiencia del material, mediante el estudio del objeto volumétrico, esfuerzos estructurales y el material, en las propuestas de cubiertas para el concurso en 1934 del Hipódromo de la Zarzuela. ([Moragues et al., 2015, pp. 2-3](#)) ([Samper et al., 2017, pp. 3-4](#)). Esto a través de cálculos en los esfuerzos estructurales de las cubiertas, las cuales son: deformaciones, modos de vibración, peores esfuerzos y reacciones de cimentación ([Moragues et al., 2015, p. 9](#)). Posteriormente estos esfuerzos compararlos con la cantidad de volumen de material necesario. Para con esto promover el uso de la geometría más eficiente para una cubierta teniendo en cuenta los esfuerzos a los que se somete un material específico en el criterio tipológico de las estructuras *shell* o cónicas ([Pottmann et al., 2015, pp. 146-147](#)) ([Van Craenenbroeck et al., 2016, pp. 3-4](#)). También reforzar el empleo de estructuras cónicas para cubiertas con el correcto uso y consumo de material, generando diseños arquitectónicos y estructurales más eficientemente, sostenibles y sustentables ([Jara et al., 2018, p. 2](#)).

### **1.4. Incidencia Estructural de las Tipologías Shell**

La tipología *Shell*, es un sistema de doble curvatura también llamado tipología de cascarón, aplicable principalmente en cubiertas o techos ([Galindo Díaz et al., 2018, pp. 18-21](#)) ([Chilton & Chuang, 2017, pp. 3-4](#)). Donde la eficiencia de esta tipología se encuentra en la intercepción curvas, lo cual refuerza los vértices dentro de las formas ([Del Cueto Ruiz Funes, 2011, pp. 39-42](#)). Las tipologías *shell* buscan ser estructuras auto justificables, lo que significa: averiguar una geometría óptima para una situación específica, que responda concretamente a los esfuerzos que se necesiten transportar de manera orgánica ([Fenu et al., 2019, p. 3](#)) ([de Pauw et al., 2014, p. 4](#)). Esto aportará directamente a la sostenibilidad y sustentabilidad de la estructura, debido que, al buscar la justa forma que se necesite a diferencia de las formas rectas convencionales como se puede apreciar en diferentes propuestas para la cubierta del Hipódromo (Anexo 1), se podrá utilizar una cantidad específica de material y energía (Anexo 2), sin gastar de más ([Jara et al., 2018, p. 2](#)) ([Dalaq & Barthelat, 2020, p. 6](#)) ([Branam et al., 2019, p. 4](#)).

### **1.5. Contexto Histórico del Hipódromo de la Zarzuela**

El Duque de Osuna, un aficionado de las carreras de caballo, considerado padre de las carreras de caballos en España desarrolló y promovió las carreras en su país. Pero debido a complicaciones



durante la primera guerra mundial en 1916, el cartel de caballos y el uso de hipódromos se minimizó, habiendo un cierre colectivo de hipódromos. Tras esto, se planteó y diseño mediante un concurso en 1934 (Anexo 1), un hipódromo en el Cerro de la Zarzuela. Para finalmente optar por el diseño de Eduardo Torroja, El Hipódromo de la Zarzuela. El hipódromo fue construido en 1935 y suspendido durante la guerra civil en 1936 a 1939 (Figura 1). En 1940 Francisco Franco dictó el mandato de entregar el terreno a la Sociedad de Fomento y Cría Caballar de España. Sociedad que inauguró el hipódromo en 1941 ([Moragues et al., 2015, p. 7](#)). Tras la quiebra de la Sociedad, se instó la transferencia de concesión al Patrimonio Nacional, donde una mala gestión del hipódromo provocó su cierre en 1996. En 2003 firmaron un tratado que cubre el uso de la finca para el hipódromo, finalmente volvieron a abrir sus puertas en 2005. Respecto al lugar en que se ubica, el hipódromo tanto en la cubierta como en la tribuna se planteó el uso de formas cónicas, con tal de mantener un lenguaje orgánico similar (cubierta – tribuna) y su verde contexto (Figura 1) ([Browne, 2008, p. 4](#)).

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Diseño de la investigación**

El diseño de esta investigación tiene un enfoque cuantitativo, a fin de calcular cómo se comporta el material respecto a los esfuerzos estructurales en el mismo, a su vez incidente de la geometría estructural en la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela. Siendo un diseño no experimental y transversal, debido a que se estudiarán y analizarán datos de variables de la cubierta cónica del hipódromo en su estructura y materialidad durante la actualidad. El alcance es correlacional, dada la factibilidad de determinación de una variable sobre la otra, en este caso, se definirá la posible correlación existente entre la estructuración de la forma cónica en la selectividad del material. La primera variable corresponde a la incidencia estructural, la cual es la variable independiente. Mientras que la segunda variable es la eficiencia material de las cubiertas cónicas del Hipódromo de la Zarzuela, siendo esta la variable dependiente.

### **2.2. Lugar de estudio**

El lugar de estudio está ubicado en Madrid, España (Figura 2). Enclavado en el monte de la Zarzuela. Con un clima anual de estepa local, asociado a un clima continental semiárido con veranos muy calurosos mientras que en invierno climas secos y fríos. El objeto de estudio (cubierta) se encuentra dentro del Hipódromo de la Zarzuela, el cual es un sector público, que ha sufrido múltiples cambios estructurales ([Lozano-Galant & Payá-Zaforteza, 2011, p. 2](#)).

### 2.3. Recolección de datos (Técnicas e instrumentos)

La recolección de la información tanto para la cubierta principal como para las cubiertas propuestas en el concurso de 1934, serán las mismas condiciones respecto al cálculos de esfuerzos estructurales y cálculo volumétrico del material, se procederá de la siguiente manera:

- (1) Fase de Modelado: La determinación de las dimensiones en la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela será evaluada bajo la iniciativa de forma cónica (hipérbola). Para determinar las medidas de las cubiertas del concurso, se estableció bajo planimetría en secciones y elevaciones de data en internet. Según las medidas obtenidas para todas las cubiertas, se modelaron en SketchUp, iniciando por los apoyos con bases planas y extendiéndose hasta la losa. Desde este punto se pueden exportar como frames o líneas, para importarlas en AutoCad donde se trabajará en frames, los cuales se limpiarán y unirán como caras 3D. Posteriormente exportadas a Sap2000 (indicador de esfuerzos estructurales), a estos frames se le asignaron materiales y grosor en Sap2000. Por lo que se podrá obtener cuerpos equiparables tanto para la cubierta actual como para las propuestas en el concurso.
- (2) Cálculo de Esfuerzos Estructurales: Posteriormente, se examinaron los modelos 3D obteniendo esfuerzos estructurales calculados por el software SAP 2000. En este software se podrán distinguir los siguientes datos: modos de vibración en la estructura, desplazamientos, peores esfuerzos y reacciones de cimentación. ([Dolores Álvarez & Anaya Día, 2018, p. 3](#)). Para precisar las propiedades del material se aplicarán los parámetros establecidos por las normas EHE (Instrucción Española de Hormigón Estructural) de concreto armado y acero de España. Las propiedades del hormigón a utilizar son las siguientes: Resistencia a compresión = 25 N/mm<sup>2</sup>; Coeficiente de Poisson = 0.2; Peso específico = 24.5KN/m<sup>3</sup>; Módulo de elasticidad = 2.780MPa. Mientras tanto para el acero B500SD, se tomó la resistencia a tracción = 500 N/mm<sup>2</sup>. Una vez dispuestas estas propiedades en Sap2000, se asignan estas características a los frames de las cubiertas.
- (3) Cálculos Volumétricos del Material: Finalmente, mediante cálculos longitudinales determinar el volumen específico del material, determinando: volúmenes de hormigón y metros lineales para el acero. Con el objetivo de comparar los datos y cálculos entre todas las tipologías de cubiertas ([Moragues et al., 2015, p. 9](#)).

## **2.4. Análisis de datos**

Obtenidos los resultados del modelo estructural completo. Se procede a analizar los valores propios del material sometido a la geometría estructural de las propuestas de cubiertas, calculando las deformaciones, modos de vibración, peores esfuerzos y reacciones de cimentación. Los esfuerzos estructurales que se analizaron por medio de frames o líneas, así como las dimensiones del material, se tomaron a partir de los modelos 3D. La cubierta de E. Torroja trabajada en SketchUp y exportada a Sap2000, ayudó a determinar el curso de las cargas, lo cual resultó ser una dependencia de la carga muerta de la losa hacia los apoyos en su mayoría. Esto envuelto en el ámbito de la comparación de cubiertas como se mencionó anteriormente, las cuales son las cubiertas involucradas en el concurso para el Hipódromo de la Zarzuela. Esta comparativa ayudará a evidenciar opciones de cubiertas sustentables y sostenibles de manera eficiente, dependiendo de su geometría estructural y cómo esta influencia en el factor de materialidad y volumen.

## **3. RESULTADOS**

### **3.1. Análisis de resultados en la cubierta actual para con las demás propuestas**

La determinación de las dimensiones en la cubierta del hipódromo de la zarzuela arrojó resultados bajo la iniciativa de forma cónica en la geometría, la cual indicó los esfuerzos estructurales, como en el volumen de ocupación (material; hormigón y acero). En la cubierta actual, las medidas longitudinales fueron colocadas respecto a las curvas laterales, estas definieron el largo de la cubierta. También, en los apoyos, las dimensiones variaron, el apoyo posterior es de forma cónica en su base, lineal en su altura y el apoyo medio con base ortogonal y su altura lineal (Figura 3). En el plano gráfico de las cubiertas, destacó el análisis de la losa, debido a que los resultados denotaron las mayores deformaciones y esfuerzos en las caras superiores e inferiores de las losas.

Los resultados generales de esfuerzos y volumen de ocupación en las propuestas de cubiertas, ayudó a determinar los puntos en común, los cuales son la distribución de cargas uniforme, también la necesidad de refuerzo estructural (Figura 4). Los resultados se vieron condicionados por el grosor, la disposición de los apoyos, además, que las losas frecuentan uniformidad en su longitudinalidad. El refuerzo estructural varía en las caras de las losas, tanto superior como inferior, predominando el refuerzo superior de las losas indicando problemas de tracción y torsión.

### 3.2. Esfuerzos estructurales en la cubierta actual y las propuestas para el hipódromo

La octava propuesta de cubierta y también la actual en el sitio, diseñada por el ingeniero E. Torroja, presentó una distribución de cargas uniforme en la losa a excepción del encuentro con los apoyos, el refuerzo estructural es necesario en la cara superior. La cubierta, presentó mayores deformaciones desde donde inicia la viga hasta su término. Las fuerzas se acentúan sobre todo en el apoyo frontal y secundariamente en el apoyo posterior, estos en una relación de cargas verticales de 1:200 aproximadamente, lo que indica la necesidad de refuerzo estructural en el apoyo frontal. El resto de la cubierta presenta uniformidad por lo cual analizar la variación de cargas es despreciable. Respecto al volumen de material, la cantidad calculada de hormigón en kilogramos fue de 2,450.000 kg, mientras que el acero ocupa un peso de 313.420 kg. La cubierta diseñada por el arquitecto E. Torroja, presenta una geometría que favorece la distribución de cargas en la losa, con sobrecarga donde converge la viga, lo que proporciona una posible apertura de la losa, requiriendo de refuerzo estructural longitudinal.

La primera propuesta de cubierta, diseñada por el arquitecto F. Mercadal, presentó predominante distribución de las cargas, refuerzo estructural en la cara superior. La cubierta, exhibió mayores deformaciones desde la parte frontal y alta de la cubierta, hasta el primer apoyo, donde las fuerzas son distribuidas por la viga principal, el resto de la cubierta presenta uniformidad por lo cual analizar la variación de cargas es insignificante. El refuerzo estructural en el segundo apoyo (soporte trasero), donde el momento de corte es muy grande en relación con los esfuerzos del otro apoyo, es de razón 1:2. Por consiguiente, en la cubierta, los esfuerzos que soportan cada uno de los apoyos respecto a la distancia que abarcan, no están distribuidos de la manera más eficiente. Respecto al volumen de material, la cantidad calculada de hormigón en kilogramos fue de 36,270.000 kg, mientras que el acero ocupa un peso de 68.034 kg. La cubierta diseñada por el arquitecto F. Mercadal, presenta una geometría que desfavorece la distribución de cargas en los apoyos, teniendo esfuerzos que varían su distribución de cargas.

La segunda propuesta de cubierta, diseñada por el arquitecto R. Gómez, presentó distribución de cargas uniforme, pero variable en los apoyos, con necesidad de refuerzo estructural en la cara inferior. Según resultados, la distribución de cargas, las deformaciones se repartieron desde el tope en la cubierta frontal y la viga principal hasta el apoyo posterior. Las cargas que soportan el apoyo posterior poseen un arco que direcciona parte de sus esfuerzos al apoyo frontal, lo que evidenció aún más un déficit del apoyo posterior respecto al frontal. El resto de la cubierta presenta deformaciones muy uniformes, por lo que su análisis es despreciable. El refuerzo estructural en el soporte trasero respecto al soporte frontal, donde el frontal soporta mucha más

carga en razón de 1:4 teniendo en cuenta que los esfuerzos son medidos en toneladas por metro, por ello se requiere de refuerzo estructural de material. Los esfuerzos estructurales demostraron que, aunque hay una uniformidad y estabilidad estructural en la cubierta, teniendo en cuenta que está cubierta es la más corta longitudinalmente. El volumen de material calculado de hormigón en kilogramos fue de 15,580.000 kg, respecto al acero el peso es de 52.283 kg. La cubierta diseñada por el arquitecto R. Gómez, presenta una geometría muy compacta, funcional pero que abarca muy poca luz.

La tercera propuesta de cubierta, diseñada por el arquitecto F. Heredero, determinó resultados que mostraron variación de distribución en doble sentido hacia un punto en común, también necesidad de refuerzo estructural en mayor medida para la cara. En la losa se evidencian pandeos laterales próximos a los apoyos, producto de las deformaciones, lo cual requiere reforzamiento estructural. También la diferencia en distribución de cargas respecto a las deformaciones en la losa, recaen en el apoyo frontal con el apoyo posterior, que se encuentra en razón de 1:10, donde el apoyo frontal soporta cargas longitudinales frontal y posteriores, mientras que el apoyo secundario, solo soporta cargas posteriores, las deformaciones en el resto de la cubierta son uniformes, por lo cual su análisis es insignificante. También el largo de la losa requiere por la cara superior reforzamiento estructural, sobre todo en el área frontal. Respecto al volumen de material, la cantidad calculada de hormigón en kilogramos fue de 15,225.000 kg, respecto al acero el peso es de 99.580 kg. La cubierta diseñada por el arquitecto F. Heredero, muestra, aunque con un alto uso de material, también sostiene una gran luz.

La cuarta propuesta de cubierta, diseñada por el arquitecto L. Gutiérrez, arrojó resultados que evidenciaron una uniformidad general en la losa de la cubierta, con un punto de esfuerzo máximo, necesidad de refuerzos en caras superior e inferior. Según los resultados obtenidos, el punto de quiebre o esfuerzo máximo resultó el apoyo frontal donde converge esta gran división de la losa, en este punto también se encuentra una diferenciación de esfuerzos respecto de este punto con el resto de la losa en razón de 1:200, lo que requiere de reforzamiento estructural. Por el resto de la losa las deformaciones continuaron uniformes, por lo que su análisis es insignificante. Esta gran división de la losa también evidenció reforzamiento estructural no solo en el apoyo frontal, también es las caras de la losa, la parte frontal requiere de reforzamiento de la cara inferior y la parte de la losa posterior requiere de reforzamiento de la cara superior. Respecto al volumen de material, la cantidad calculada de hormigón en kilogramos fue de 45,565.000 kg, respecto al acero el peso es de 219.916 kg. La cubierta diseñada por el arquitecto L. Gutiérrez, evidencia un

esfuerzo máximo en la cubierta donde depende mucho del apoyo frontal, por lo tanto, reforzamiento estructural.

La quinta propuesta de cubierta, diseñada por el arquitecto J.M. Castell, según los resultados, la distribución de cargas en la geometría divide la losa en dos grandes fragmentos trabajando uno más a tracción y otro a compresión, con necesidad de refuerzo estructural en caras superior e inferior. La geometría de esta cubierta es muy semejante a la cuarta propuesta, con ligeras variaciones en el grosor de la losa, la cual también se fragmenta en dos grandes partes que convergen en el apoyo frontal, la cual vuela casi 13 metros, pero a diferencia de la anterior cubierta no hay un vuelo posterior, es reemplazado por una extensión de la losa y un soporte al final de la cubierta para equilibrar el peso de la losa. El punto de quiebre o esfuerzo máximo, también resultó el apoyo frontal donde converge esta gran división de la losa, en este punto también se encuentra una diferenciación de esfuerzos respecto de este punto con el resto de la losa de 1:13 aproximadamente, por lo que requiere de refuerzo estructural. Por el resto de la losa las deformaciones continuaron uniformes, por lo que su análisis es despreciable. En la losa la parte frontal requiere de reforzamiento de la cara inferior y la parte de la losa posterior requiere de reforzamiento de la cara superior. Respecto al volumen de material, la cantidad calculada de hormigón en kilogramos fue de 53,525.000 kg, respecto al acero el peso es de 236.955 kg. La cubierta diseñada por el arquitecto J.M. Castell, expone cargas de esfuerzo máximo en la cubierta, lo cual evidencia un reforzamiento estructural del apoyo frontal.

La sexta propuesta de cubierta, diseñada por el arquitecto F. Figueroa, los resultados obtenidos, denotan una distribución de cargas con fallos laterales en la losa en la cubierta, esta misma losa requiere refuerzos en la cara inferior. Los resultados denotaron que las deformaciones con más carga son los sectores laterales de la losa. Con una razón de 1:100 aproximadamente, lo que indica refuerzo estructural en las áreas laterales. Esto se debe a que el largo de la losa no distribuye bien su peso desde la viga a los apoyos. Es necesario viguetas para los esfuerzos laterales, esto permite una mejor distribución de cargas y menos refuerzo estructural. Sin embargo, la geometría abarca una gran luz debido a la losa, y esta con relación al volumen de la viga y las columnas es muy marcada, las cuales están en razón aproximada de 1:20. El resto de la losa presenta deformaciones homogéneas por lo que su análisis es insignificante. Según resultados también indican que, en toda la losa, requiere de reforzamiento en la cara inferior. Respecto al volumen de material, la cantidad calculada de hormigón en kilogramos fue de 54,850.000 kg, respecto al acero el peso es de 118.560 kg. La cubierta diseñada por el arquitecto F. Figueroa, persuade de reforzamiento lateral.

La séptima propuesta de cubierta, diseñada por el arquitecto O. Bans Ochoa, arrojó resultados que evidenciaron una uniformidad general en la losa de la cubierta, con un punto de esfuerzo máximo, necesidad de refuerzos en la cara inferior. Según los resultados, las deformaciones con más carga se situaron en el apoyo posterior. Esto debido a que la geometría de la cubierta a diferencia de la mayoría no posee una inclinación que ayude a distribuir las cargas por igual en los apoyos. Por ende, en la carga muerta del voladizo recae más sobre un apoyo que el resto. La razón de cargas en este punto crítico de la a diferencia del resto de la losa, está en razón de 1:800 aproximadamente, lo que indica, necesidad de refuerzo estructural. El resto de la losa aparte del punto más crítico mantiene muy uniforme la distribución de sus cargas, por lo que su análisis es despreciable. También la losa en general requiere de refuerzo en la cara inferior. Respecto al volumen de material, la cantidad calculada de hormigón en kilogramos fue de 19,580.000 kg, respecto al acero el peso es de 115.460 kg. La cubierta diseñada por el arquitecto F. Figueroa, denota un esfuerzo de quiebre en la cubierta, el resto de la cubierta es muy uniforme respecto a sus cargas, y abarca una gran luz con poco material en relación con el resto de las cubiertas.

### **3.3. Comparativa de la cubierta actual con las propuestas**

Los estudios comparativos respecto a la tipología geométrica entre las cubiertas (incluida la actual), aportaron al análisis de las propiedades geométricas. Donde el carácter geométrico de cada objeto condiciona la distribución de cargas que hay en el mismo, en peso muerto. Esto determinó la dirección de las fuerzas a las que se somete cada cubierta. Las formas ortogonales transportaban cargas de manera forzada, ya que redirigen las cargas, mientras que las formas más orgánicas como las cónicas, dirigían las cargas de manera menos forzada. Además, se evaluaron estas características geométricas en las cargas resultantes que posteriormente se analizaron como esfuerzos estructurales (Figura 5). Estas cubiertas se pusieron en un plano evaluativo de cálculos estructurales, los cuales ayudaron a reforzar la idea de diferenciación según formalidad de las cubiertas.

La evaluación simultánea de los esfuerzos estructurales de las cubiertas, que, al contar solo el peso de las cubiertas, se evaluó primeramente las deformaciones verticales (deformaciones en el eje Z), ya que esto evidencio paulatinamente el grado de eficiencia respecto a esfuerzos estructurales en carga muerta, sin embargo, en el eje Y, también se analizaron para profundizar más el grado de comparación (Figura 6). La gama de colores en azul data los puntos más críticos respecto al azul más oscuro, en cuanto a los puntos de cubierta más dóciles que están en azul más claro y grises. Simultáneamente fue importante la evaluación de los momentos de flexión (eje Y)

en las cubiertas, donde se puede observar en la figura 6, los puntos más críticos de corte en las cubiertas, con la gama de rojo oscuro donde se ejercen mayores esfuerzos hasta los puntos en rojo claro donde se pueden notar los menores esfuerzos de flexión. Ya habiendo obtenido los esfuerzos estructurales, se procedió a determinar la cantidad de material utilizado en estas cubiertas.

La comparación del volumen de material ocupado en las cubiertas tanto para el hormigón armado (HA-25) como para el acero, se vieron a partir del modelado 3D en SketchUp, lo cual determinó la volumetría del material, ya que desde este mismo software se procedió al dimensionamiento del material en Sap2000. Tanto para las cubiertas ortogonales como para la cónicas. El volumen de ocupación del hormigón según cálculos geométricos varía de acuerdo con el tipo de geometría de cada cubierta, sin embargo, para una mayor precisión, se corroboraron las cifras en Autocad. Respecto al cálculo del acero, se tomaron las medidas estándar del B500SD, para únicamente determinar los metros lineales de este material. La diferencia de ocupación de material varía considerablemente entre las cubiertas, dependiendo mucho de la luz que abarcaban, hasta la misma morfología. Finalmente, los cálculos de los esfuerzos estructurales respecto al volumen de material ocupado en cada una de las cubiertas, puso en contraste estas estructuras (Tabla 1).

Las conclusiones comparativas respecto a la eficiencia de las cubiertas arrojaron resultados para conocer los diferentes esfuerzos que se dan en diversos casos geométricos. Las estructuras de cubierta fueron sometidas, a necesidad de refuerzo estructural, lo que indica que hay un factor de morfología que condiciona estos puntos críticos, aun calculando los esfuerzos y volumen de estas cubiertas de manera estandarizada. Además, cabe resaltar el uso de material diverso, para los casos propuestos, el hormigón simplifica el conjunto volumétrico, para otros casos como el de E. Torroja, el acero es relevante para mantener un ligero grosor de hormigón. Los sistemas de cargas se pueden considerar abstractos para algunos casos dependiendo del grado de complejidad en el volumen, como es el caso de las estructuras de doble curvatura o *shell*.



## 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 4.1. Síntesis

Los resultados, en las ocho cubiertas propuestas para el concurso, se identificaron tres variables, que condicionan la eficiencia estructural y a su vez trabajando simultáneamente; el objeto volumétrico, los esfuerzos estructurales y el material. Respecto a la volumetría, compone las dimensiones de los elementos estructurales en las cubiertas, esto condiciona la distribución de cargas. Los esfuerzos estructurales, se determinaron en cuatro aspectos, principalmente deformaciones y momentos de corte, también peores esfuerzos y reacciones de cimentación, estos aspectos evidencian cuantitativamente el grado de esfuerzo que trabaja cada cubierta, según los resultados, la geometría y el material de las cubiertas, condiciona las áreas donde se requería mayor reforzamiento estructural, en los diversos elementos de las cubiertas. Por otro lado, los materiales que componen las cubiertas condicionan los esfuerzos estructurales, según las propiedades del hormigón y acero. Los materiales también determinan los costos para cada una de las cubiertas, hallando un valor estimado. Estas tres variables, los objetos volumétricos, esfuerzos estructurales y el material se superpusieron para su estudio, con el objetivo de determinar la eficiencia estructural del material, el cual fue condicionado por la geometría que posee cada cubierta, y de acuerdo con esto el cálculo de costos de acuerdo a cada cubierta (Figura 7).

### 4.2. Comparaciones

La volumetría del objeto arquitectónico condiciona a través de sus dimensiones la dirección de cargas, estas pueden ser carga muerta o viva, discrepando del tipo de material que posea el objeto. Lo importante es lo eficaz del volumen para responder a una necesidad estructural, lo que corresponde a una distribución de cargas eficiente. Según estudio, las estructuras deben tener un equilibrio estético, económico y estructural, mientras que esta investigación se enfoca en la eficiencia estructural, lo cual se evidencia en el costo final de la estructura, y la estética es solo un resultado final ([Moragues et al., 2015, p. 12](#)). En otro estudio, la geometría cónica es evaluada como una forma que denota belleza visual, por la formalidad orgánica que posee, lo cual lo asemeja más a una forma natural, estos elementos de doble curvatura (*Shell*), son considerados como formas simples, eficientes y estéticamente atractivas, mientras que en esta investigación, predomina la eficiencia estructural sobre todo, y sigue teniendo la estética como un resultado final, más no una prioridad ([Browne, 2008, p. 11](#)). Mientras que otra investigación, destaca otra obra de E. Torroja, la cual predomina la geometría estructural de cuerpos delgados, donde se busca la forma geométrica óptima para el justo uso de material, a comparación de las cubiertas

actuales del Hipódromo de la Zarzuela, la geometría y las dimensiones que posee, son las esenciales para la funcionalidad que se busca ([Nuñez-Collado et al., 2013, p. 7](#)).

Los esfuerzos estructurales, son las diversas fuerzas que ejercen los elementos estructurales para no deformarse por las cargas que comprende. Los esfuerzos estructurales, están condicionados directamente por la geometría del objeto estructural y los materiales que posee. Por el contrario del objeto cónico del hipódromo, las estructuras hexatruss, se calcularon sus esfuerzos bajo los mismos parámetros de cálculo que las cubiertas propuestas para el hipódromo, modos de vibración, desplazamientos, peores esfuerzos y reacciones de cimentación, donde la geometría óptima fue evaluada a partir de los esfuerzos de los tensores interconectados en la estructura, lo que incide a un objeto con un volumen hueco y definido por nodos, a diferencia de las cubiertas cónicas del hipódromo estas asumen otra forma geométrica, más la forma varía según la función estructural que se requiera ([Dolores Álvarez & Anaya Día, 2018, p. 211](#)). Los esfuerzos estructurales en las formas irregulares, tienden a poseer puntos débiles en algún/os elemento/s estructural/es en unas áreas más que en otras, el caso de seguimiento de áreas con necesidad de refuerzo estructural es esencial para la correcta estabilidad de la estructura, una investigación en el diseño del puente de Eduardo Torroja, denota los puntos débiles con necesidad de reforzamiento estructural, lo cual es vital para el diseño de su correcta estabilidad y distribución de cargas, mientras que en esta investigación, los cálculos para evidenciar refuerzo estructural en las propuestas del hipódromo son denotadas bajo las deformaciones en diferentes ejes, especialmente el eje Z ([Pachón et al., 2018, p. 5](#)). Un punto importante para el cálculo estructural es el razonamiento lógico previo de la formalidad del objeto. Una investigación que contrapone la comprensión estructural general del diseño, en las finas cáscaras de hormigón para el Frontón de Recoletos por E. Torroja, denota la eficiencia que comprende esta clase de estructura cuando está correctamente dispuesta, en el caso de la cubierta actual del hipódromo, la dirección de cargas fue analizada en conjunto con las cáscaras de hormigón que posee, esto ayudó a comprender de manera general la dirección de las fuerzas, para su posterior cálculo estructural ([Lozano-Galant & Payá-Zaforteza, 2011, p. 5](#)).

Del material dependen los cálculos para los esfuerzos estructurales, debido a que según las propiedades físicas del material, ayudará a determinar la estabilidad o deficiencia estructural del objeto. Además, del material delimitado por la volumetría, se podrá calcular los costos de los objetos estructurales. Respecto a la ligera forma de trabajar el material de E. Torroja, este libro destaca el uso de material para diseños ligeros, con la intención de generar ahorros de peso en las estructuras y reducir costos, en el caso de las propuestas del para el Hipódromo de la Zarzuela, la

cubierta de E. Torroja resulta la más económica a su vez, la más ligera ([Tempelman, 2014, p. 251](#)). Con relación a las estructuras finas de hormigón, como es el caso de la cubierta de E. Torroja, según la investigación del Frontón de Recoletos, tienen la característica de ser económicas y de gran valor estético, el elemento finito de hormigón con el que trabaja el Frontón, depende completamente de la geometría *shell* que posee, ya que esta doble curvatura permite que el hormigón se sostenga de una manera estable, en relación a la cubierta actual del hipódromo, la doble curvatura permite que la estructura se sostenga con un uso mínimo de material ([Lozano-Galant & Payá-Zaforteza, 2011, p. 5](#)). Otra investigación, respecto a la Casa Factory Roof también de E. Torroja, destaca el análisis material en elementos finitos, desde una perspectiva estructural basada en la carga muerta del propio techo, esto ayuda a comprender mejor los esfuerzos estructurales, de igual modo el análisis de las propuesta para la cubierta del hipódromo se evaluaron respecto al peso muerto del material, sin embargo, bajo diferentes formas geométricas ([Oliver et al., 2016, p. 84](#)).

#### **4.3. Limitaciones**

Durante la investigación, se recopiló información respecto al material de las cubiertas. Particularmente a la hora de buscar datos respecto al acero ocupado en las cubiertas, se encontró solo planimetría en elevación que denotaban la ubicación de este material en un solo sentido (longitudinal). Por lo que, para determinar el acero en las demás cubiertas, se estandarizó con el software Sap2000, la distancia entre el reforzamiento de acero, longitudinal y transversalmente. Para así mantener congruencia y semejanza con la realidad de las propuestas de cubiertas. Por último, la información se trasladó de la planimetría a la tridimensionalidad, quiere decir, desde Autocad a Sap2000, para concretar la ubicación del acero, con el modelo de cada cubierta.

#### **4.4. Recomendaciones**

En función de esta investigación, se busca promover el desarrollo de la lógica estructural, para el posterior análisis de eficiencia de un objeto geométrico y la importancia del diseño sostenible y sustentable. Dentro de la disciplina de la arquitectura, aspirar al diseño óptimo y eficaz para su utilidad desde la perspectiva estructural, teniendo en cuenta lo que involucra, una correcta distribución de cargas de la mano con un presupuesto, lo más económico posible. Se recomienda aplicar los criterios de esta investigación para cubrir amplias luces en sectores públicos, donde el clima pueda llegar a afectar la salud de la población, ya que independiente del material (que condiciona las propiedades de la estructura), de acuerdo con el lugar donde se diseñe, la geometría sea eficaz para cumplir la labor de habitar. Otro aspecto fundamental para desarrollar es el estudio

profundo de las estructuras con doble curvatura o *shell*, sus propiedades estructurales y formas orgánicas son poco empleadas de manera cotidiana, el estudio de estas geometrías ayudará a fomentar el uso de estas formas para futuras estructuras con óptimos factores de eficiencia.

#### **4.5. Conclusiones**

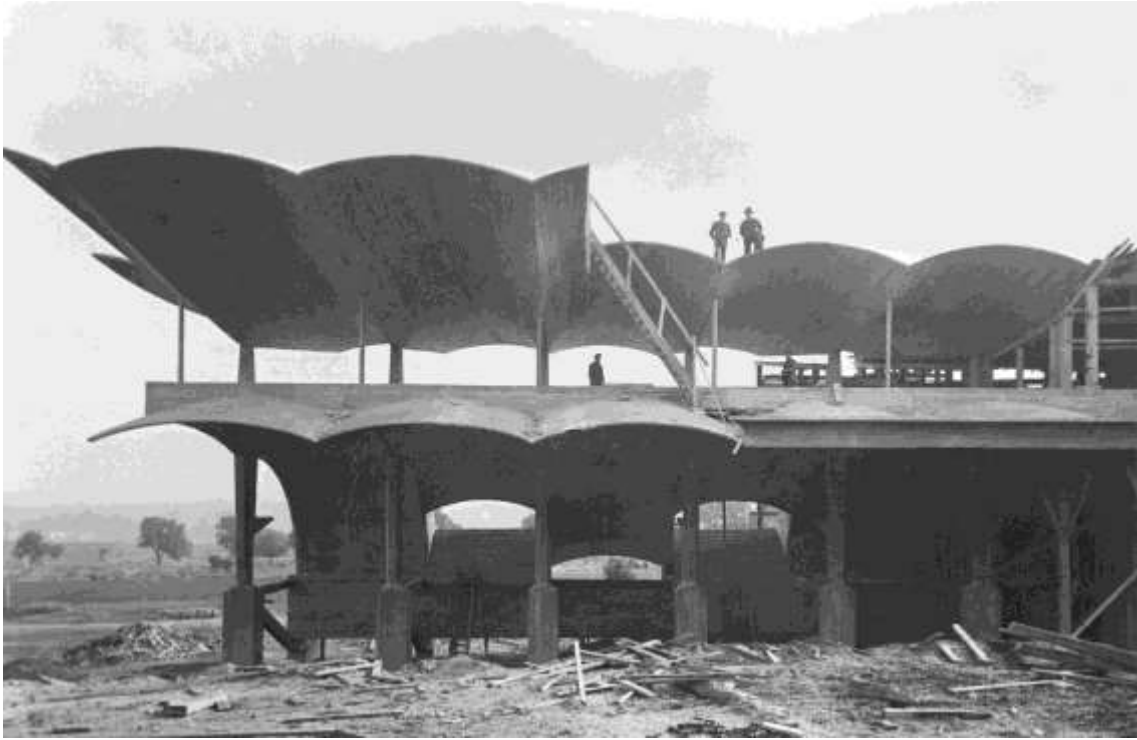
La cubierta del Hipódromo de la Zarzuela ha resultado ser un gran ejemplo de eficiencia estructural, lo cual no solo compete en el aspecto económico, aunque es una prioridad, otros factores intervienen en la tipología estructural que posee la cubierta actual, como un fin estético y estructuralmente funcional. Según este estudio, la cubierta actual del ingeniero Eduardo Torroja, resultó ser la cubierta más eficiente, respecto factores económicos y estructuralmente funcionales, además un valor agregado estético. Económico debido a que ha resultado ser una cubierta que ocupa una luz considerable para el grosor de su losa. La función estructural, en la cubierta de Eduardo Torroja, asume eficientemente la distribución de cargas considerando que se trabajó la losa con cinco centímetros de espesor, por lo cual requeriría reforzamiento de material según el estudio, sin embargo, el grosor no cambiaría tan considerablemente a más de un centímetro aproximadamente, lo que mantiene la cubierta de Eduardo Torroja, como una cubierta que transporta eficazmente las cargas, aprovechando el mínimo de material posible. Respecto al ámbito estético, la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela comprende una gradería de carácter cónico, y un frontón con una pasarela de arcos, además el contexto natural que envuelve el río Alberche con un paisaje arborizado provoca que la cubierta de Eduardo Torroja se integre en el espacio del hipódromo, expresando una apariencia agradable y estética. Este estudio evidencia la utilidad de las formas cónicas, principalmente de doble curvatura, las propiedades de estas formas dependen del material que se aplique a una estructura de doble curvatura. Las propiedades de estas estructuras se podrán aprovechar eficientemente con un presupuesto de bajo costo, debido a que no siempre podremos contar con los medios, pero sí aprovechar al máximo lo que tengamos a nuestra disposición. Finalmente, esta investigación aportará al estudio de tecnologías estructurales más sostenible y sustentable con sus recursos.

## Bibliografía

- Antuña Bernardo, J. (2002). *LAS ESTRUCTURAS DE EDIFICACIÓN DE EDUARDO TORROJA MIRET*. <https://oa.upm.es/1348/>
- Arnau-Paltor, F., Serrano-Lanzarote, B., & Fenollosa, E. (2020). The post-tensioned concrete technique in the work of Eduardo Torroja. The case of the Church of San Nicolás in Gandía. *Structures*, 23, 518-528. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.11.006>
- Branam, N. J., Arcaro, V., & Adeli, H. (2019). A unified approach for analysis of cable and tensegrity structures using memoryless quasi-newton minimization of total strain energy. *Engineering Structures*, 179, 332-340. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.004>
- Browne, C. (2008). Gaudí's organic geometry. *Computers & Graphics*, 32(1), 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2007.09.005>
- Chilton, J., & Chuang, C.-C. (2017). Rooted in Nature: Aesthetics, Geometry and Structure in the Shells of Heinz Isler. *Nexus Network Journal*, 19(3), 763-785. 10.1007/s00004-017-0357-5
- Dalaq, A. S., & Barthelat, F. (2020). Manipulating the geometry of architected beams for maximum toughness and strength. *Materials & Design*, 194, 108889. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108889>
- de Pauw, I. C., Kandachar, P., & Karana, E. (2014). Assessing sustainability in nature-inspired design. *International Journal of Sustainable Engineering*, 8(1), 5-13. 10.1080/19397038.2014.977373
- Del Cueto Ruiz Funes, J. (2011). *Las bóvedas por arista de Félix Candela: Variaciones sobre un mismo tema*. Universidad Autónoma de México. <http://www.revistas.unam.mx/index.php/bitacora/article/view/30898>
- Demakos, C. B., Kyriazopoulos, A., Pnevmatikos, N., & Drivas, D. (2018). Experimental investigation and numerical simulation of curved frame structures. *Procedia Structural Integrity*, 10, 148-154. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.09.022>
- Dixit, S., Stefańska, A., & Musiuk, A. (2021). Architectural form finding in arboreal supporting structure optimisation. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(2), 2321-2329. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.022>
- Dolores Álvarez, E., & Anaya Díaz, J. (2018). Development of reentrant hexatruss structures to apply to architecture. <http://dx.doi.org/10.7764/rdlc.17.2.209>.
- Eigenraam, P., Borgart, A., Chilton, J., & Li, Q. (2020). Structural analysis of Heinz Isler's bubble shell. *Engineering Structures*, 210, 110265. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110265>
- Fenu, L., Congiu, E., Lavorato, D., Briseghella, B., & Marano, G. C. (2019). Curved footbridges supported by a shell obtained through thrust network analysis. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 6(1), 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.10.007>
- Galindo Díaz, J., Salazar Marulanda, C., & Escobar García, D. (2018). El legado de Félix Candela en Colombia a través de seis proyectos inéditos. *Arquitectura Revista*, 14(1). <https://doi.org/10.4013/arq.2018.141.02>
- INEI. (2021). *Madrid: Población por municipios y sexo*. INEI. <https://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2881>
- Jara, P., Likerman, J., Charrier, R., Herrera, S., Pinto, L., Villarroel, M., & Winocur, D. (2018). Closure type effects on the structural pattern of an inverted extensional basin of variable width: Results from analogue models. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981117303073>
- Lozano-Galant, J. A., & Payá-Zaforteza, I. (2011). Structural analysis of Eduardo Torroja's Frontón de Recoletos' roof. *Engineering Structures*, 33(3), 843-854. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.006>

- Moragues, J. J., Paya-Zaforteza, I., Medina, O., & Adam, J. M. (2015). Eduardo Torroja's Zarzuela Racecourse grandstand: Design, construction, evolution and critical assessment from the Structural Art perspective. *Engineering Structures*, *105*, 186-196. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.008>
- Nuñez-Collado, G., Garzon-Roca, J., Paya-Zaforteza, I., & Adam, J. M. (2013). The San Nicolas Church in Gandia (Spain) or how Eduardo Torroja devised a new, innovative and sustainable structural system for long-span roofs. *Engineering Structures*, *56*, 1893-1904. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.003>
- Oliver, M., Buitrago, M., Paya-Zaforteza, I., & Adam, J. M. (2016). Eduardo Torroja's CASA factory roof: An unbuilt Structural Art masterpiece. *Engineering Structures*, *128*, 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.09.028>
- Pachón, P., Castro, R., García-Macías, E., Compan, V., & Puertas, E. (2018). E. Torroja's bridge: Tailored experimental setup for SHM of a historical bridge with a reduced number of sensors. *Engineering Structures*, *162*, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.035>
- Pottmann, H., Eigensatz, M., Vaxman, A., & Wallner, J. (2015). Architectural geometry. *Computers & Graphics*, *47*, 145-164. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2014.11.002>
- Ramírez, A. (2019). Las cubiertas Torroja del Hipódromo de la Zarzuela son un hito de la arquitectura. <https://www.expansion.com/fueradeserie/arquitectura/2019/04/05/5ca2126222601da0228b45bc.html>
- Samper, A., González, G., & Herrera, B. (2017). Determination of the geometric shape which best fits an architectural arch within each of the conical curve types and hyperbolic-cosine curve types: The case of Palau Güell by Antoni Gaudí. *Journal of Cultural Heritage*, *25*, 56-64. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2016.11.015>
- Tempelman, E. (2014). Chapter 18 - Lightweight Materials, Lightweight Design? In E. Karana, O. Pedgley, & V. Rognoli (Eds.), *Materials Experience* (pp. 247-258). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099359-1.00018-7>
- Van Craenenbroeck, M., Puystiens, S., De Laet, L., Van Hemelrijck, D., Van Paeppegem, W., & Mollaert, M. (2016). Integrated analysis of kinematic form active structures for architectural applications: Experimental verification. *Engineering Structures*, *123*, 59-70. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.05.032>

## Figuras y Tablas



*Figura 1. Construcción en hormigón de la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela interrumpida por la guerra civil. Fuente: Diario Expansión, elaborado con información extraída de la Fundación Torroja (Ramírez, 2019).*

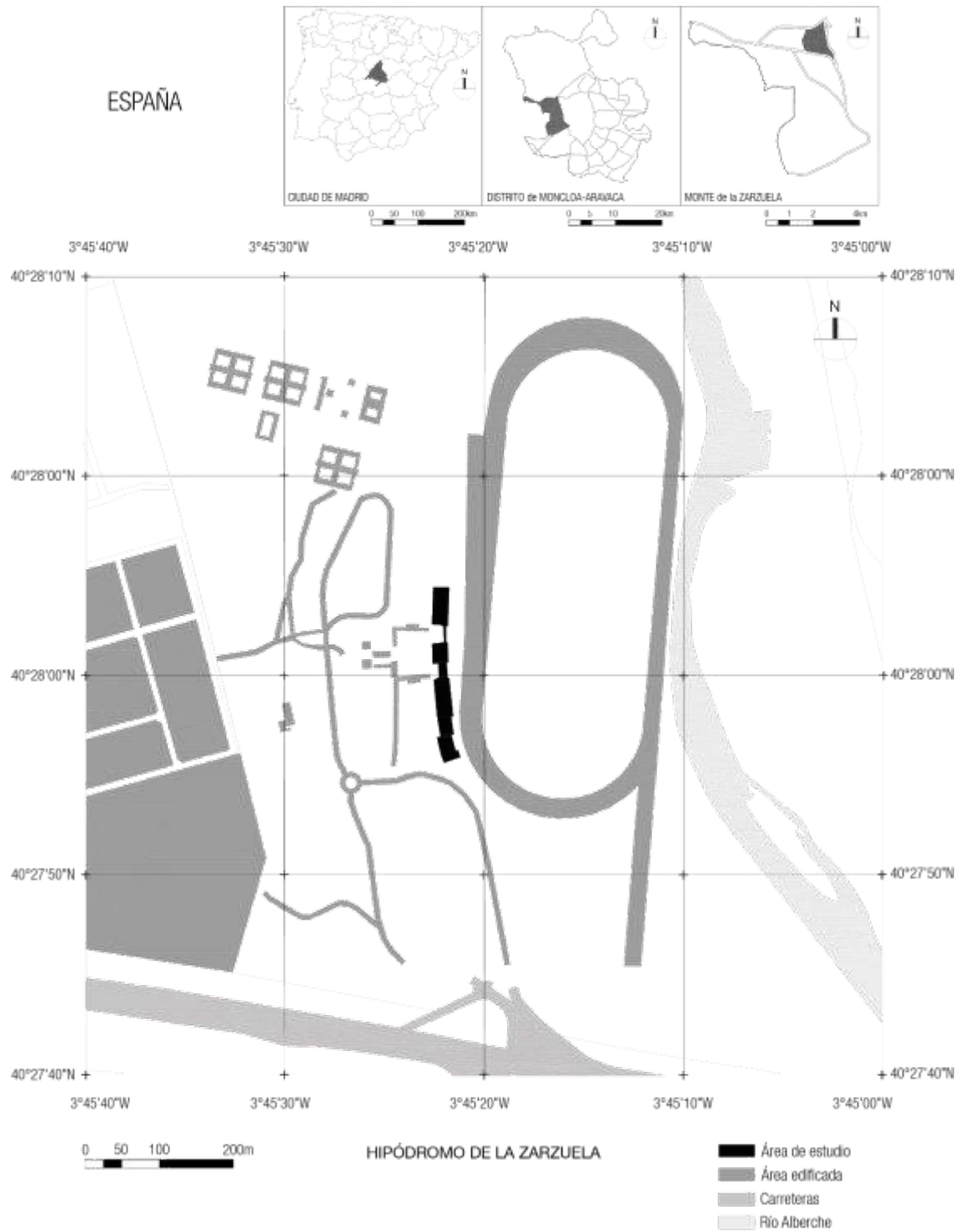


Figura 2. Ubicación del Hipódromo de la Zarzuela, en Madrid, España. Fuente: Elaboración propia con datos del Instituto Geográfico Nacional de España (INEI, 2021).



### Sección Axonométrica Hipódromo de la Zarzuela

**Pista de carreras:** circuito cerrado, utilizado para las carreras de caballos.

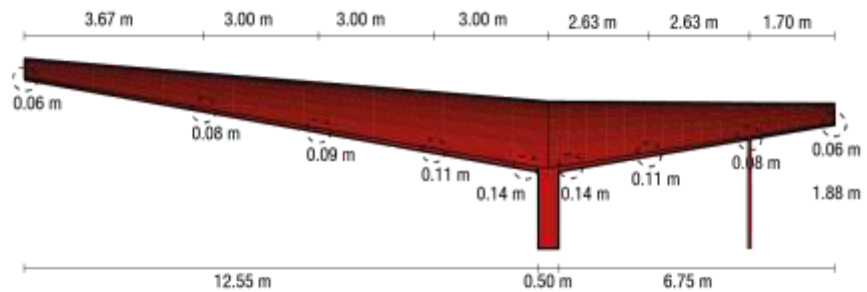
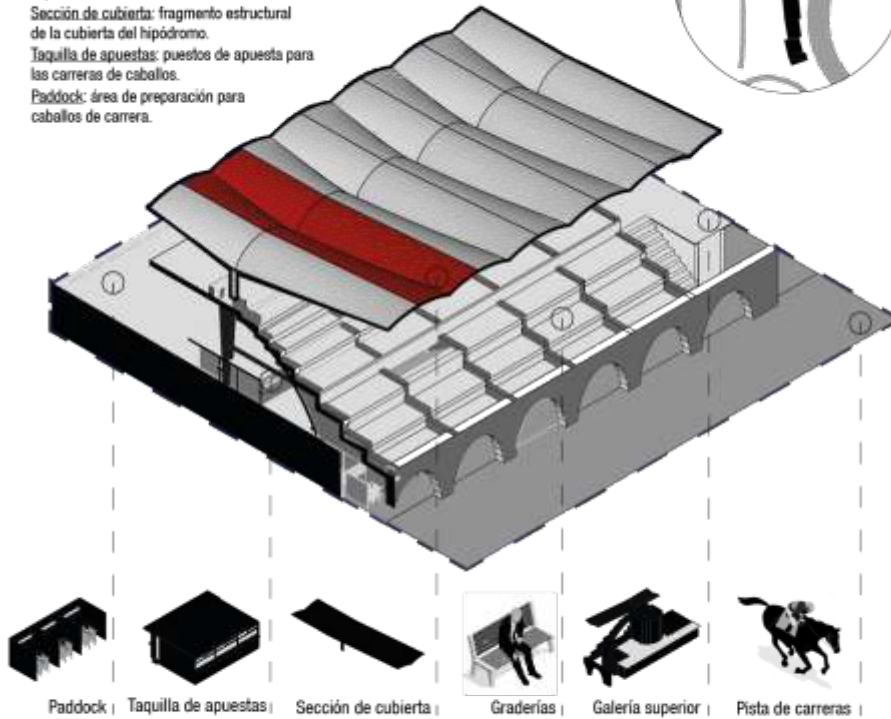
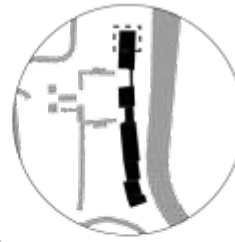
**Galería superior:** espacio descubierto de recreación, también usado para iluminar espacios interiores.

**Graderías:** conjunto de gradas y pasillos para esperar las carreras de caballos.

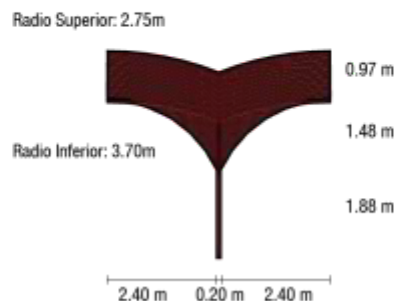
**Sección de cubierta:** fragmento estructural de la cubierta del hipódromo.

**Taquilla de apuestas:** puestos de apuesta para las carreras de caballos.

**Paddock:** área de preparación para caballos de carrera.



Elevación Lateral Cubierta del Hipódromo



Elevación Frontal Cubierta del Hipódromo

Figura 3. Sección de estudio en la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela. Fuente: Elaboración propia con datos de Diseño, construcción, evolución y valoración crítica desde la perspectiva del arte estructural (Moragues et al., 2015, p. 2).

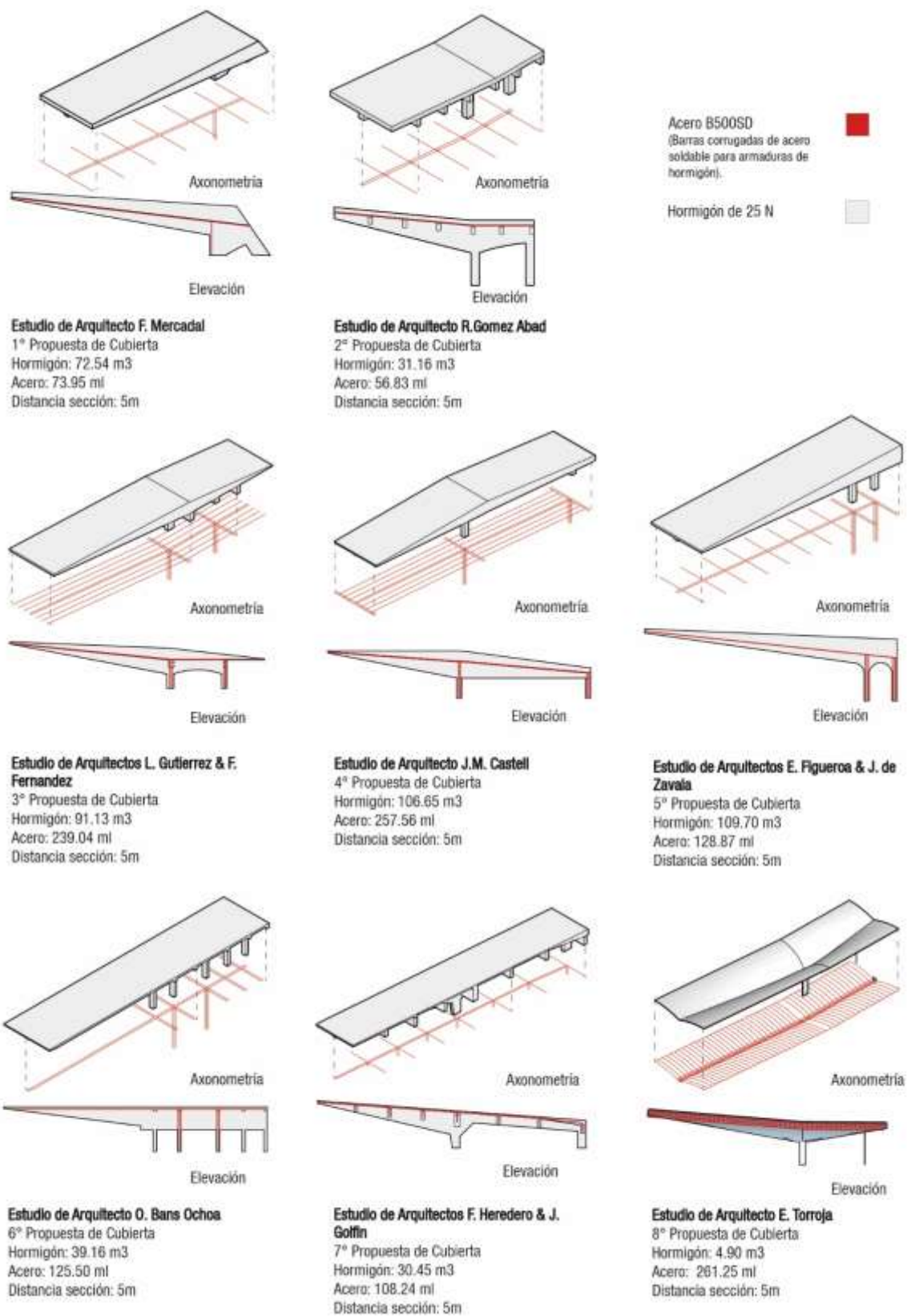


Figura 4. Características físicas del material en las cubiertas. Fuente: Elaboración propia con datos de Eduardo Torroja's Zarzuela Racecourse (Moragues et al., 2015, pp. 2-3).

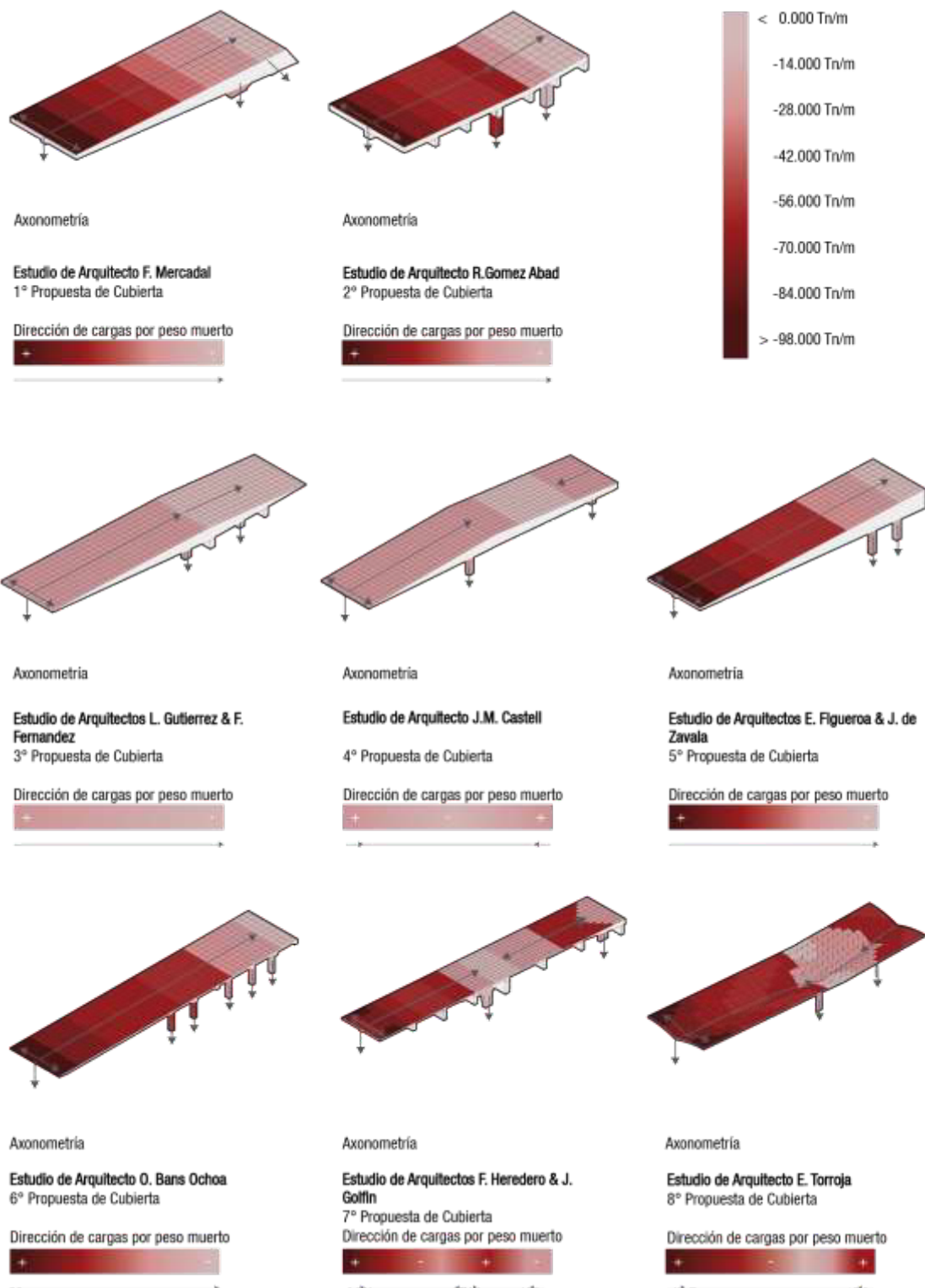


Figura 5. Dirección de cargas según la geometría de cubierta. Fuente: Elaboración propia con datos de Las Estructuras de Edificación de Eduardo Torroja Miret, p. 227 (Antuña Bernardo, 2002).

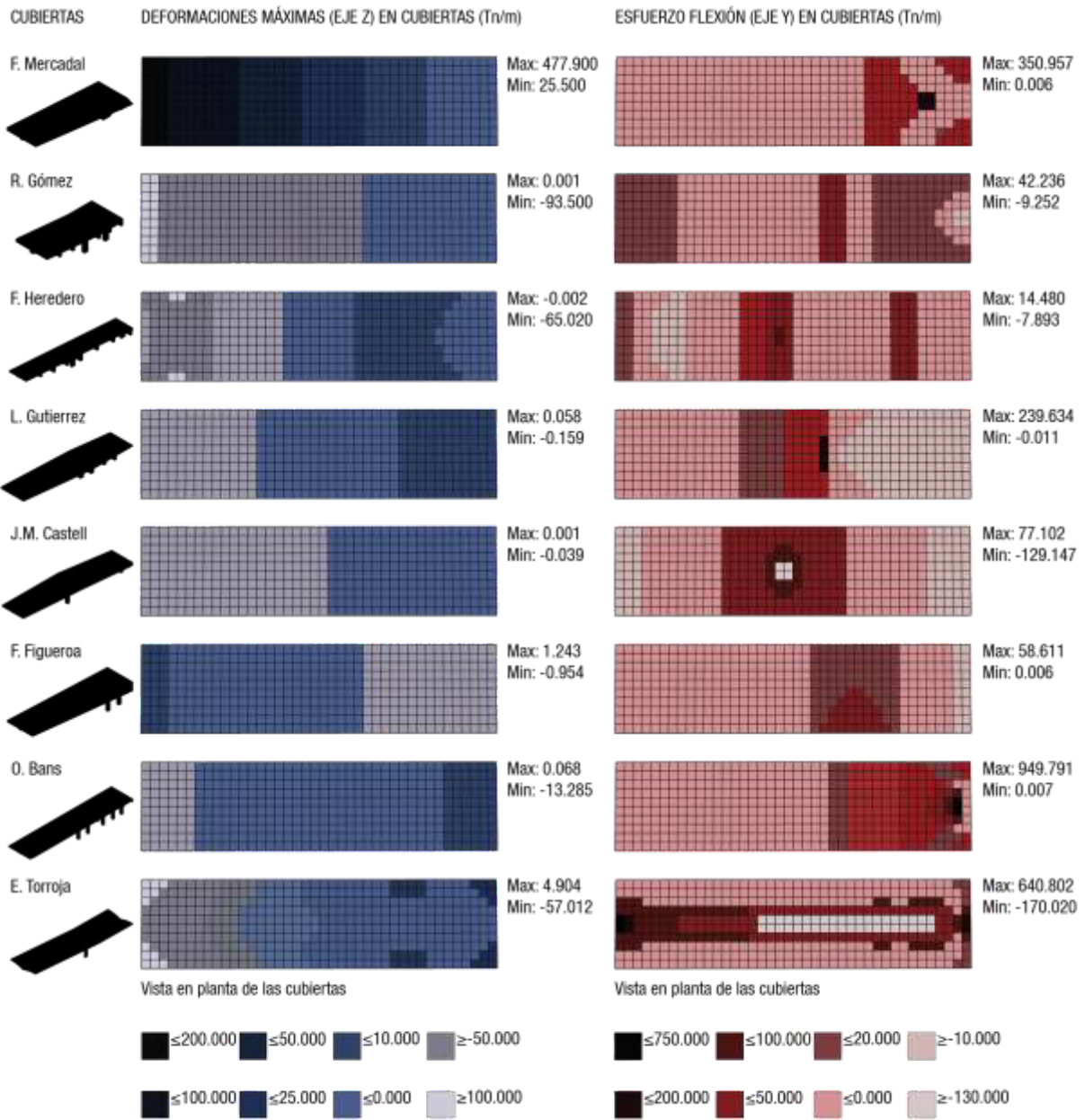


Figura 6. Comparativo estructural entre las diferentes propuestas para la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela.  
Fuente: Elaboración propia con datos de *Las Estructuras de Edificación* de Eduardo Torroja Miret, p. 227.  
(Antuña Bernardo, 2002).

Tabla 1. Esfuerzos estructurales y calculos volumétricos.

Cubiertas	Modos de Vibración (seg)	Desplazamientos (Tn/m)			Peores esfuerzos (Tn/m)			Reacciones de Cimentación (Kgf)		Volumen de Hormigón (Kg)	Volumen de Acero (Kg)
		Máximo	Eje	Max.	Min.	Eje	Max.	Min.	Eje		
F. Mercadal	3.609	(X)	0.002	-37.700	(MM X)	146.160	-34.608	(X)	-30.855	36,270.000	68.030
		(Y)	2.110	-2.110	(MM Y)	350.957	0.006	(Y)	1.914		
		(Z)	23.010	-477.910				(Z)	396.478		
R. Gómez	0.864	(X)	0.001	-9.350	(MM X)	20.882	-3.825	(X)	262.250	15,580.000	52.280
		(Y)	3.720	-3.720	(MM Y)	42.236	-9.252	(Y)	-1.800		
		(Z)	0.001	-93.500				(Z)	8.052		
F. Heredero	0.930	(X)	-0.310	-8.002	(MM X)	5.120	-1.406	(X)	256.011	35,760.000	99.580
		(Y)	4.930	-4.930	(MM Y)	14.480	-7.893	(Y)	-4.720		
		(Z)	0.010	-65.300				(Z)	77.110		
L. Gutierrez	2.006	(X)	-2.900	-18.000	(MM X)	57.710	0.110	(X)	1833.120	45,565.000	219.910
		(Y)	1.049	-1.049	(MM Y)	239.634	-11.002	(Y)	-4.980		
		(Z)	-2.900	-15.900				(Z)	213.130		
J.M. Castell	1.252	(X)	-6.000	-30.000	(MM X)	-0.173	-47.267	(X)	2620.120	53,525.000	236.950
		(Y)	61.700	-61.700	(MM Y)	8.020	-129.147	(Y)	-4.560		
		(Z)	-0.005	-0.390				(Z)	245.070		
F. Figueroa	2.181	(X)	296.014	20.631	(MM X)	7.195	-8.124	(X)	1.192	54,850.000	118.560
		(Y)	55.678	-55.678	(MM Y)	58.611	0.060	(Y)	-3.277		
		(Z)	1.243	-0.954				(Z)	29.247		
O. Bans	5.901	(X)	-1.100	-57.000	(MM X)	70.110	0.002	(X)	882.800	19,580.000	115.460
		(Y)	11.820	-11.820	(MM Y)	949.791	0.007	(Y)	-4.060		
		(Z)	0.689	-13.285				(Z)	95.870		
E. Torroja (Actual en el sitio)	1.891	(X)	5.100	0.003	(MM X)	188.675	-139.686	(X)	5.830	2,450.000	313.420
		(Y)	11.000	-11.000	(MM Y)	640.802	-255.324	(Y)	-52.930		
		(Z)	4.900	-56.600					15.220		

Tabla 1. Esfuerzos estructurales y cálculos volumétricos del material en las diferentes cubiertas. Fuente: Elaboración propia (Antuña Bernardo, 2002).

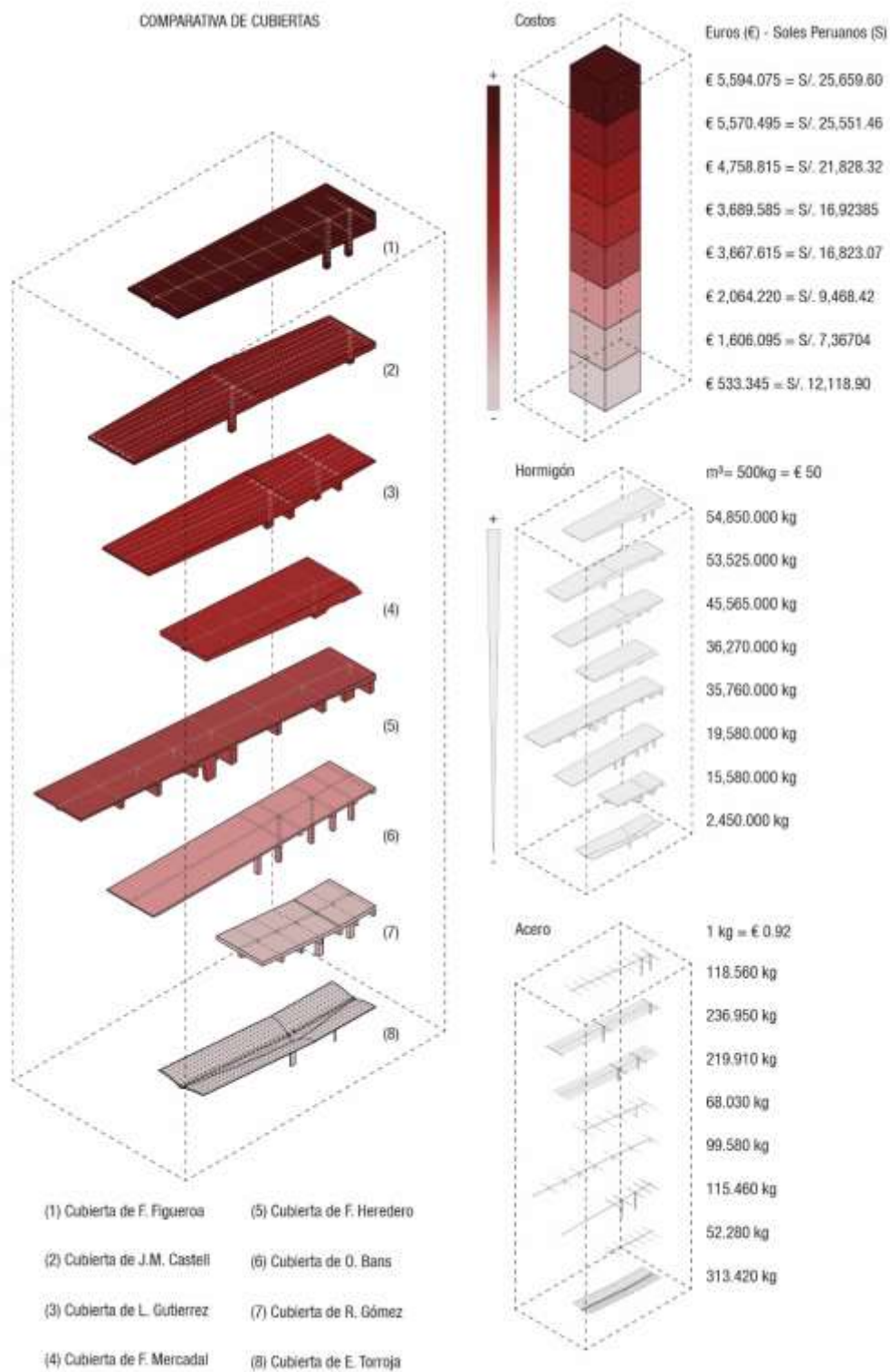


Figura 7. Comparativa de cubiertas de acuerdo con costos en materiales. Fuente: Elaboración propia con datos de Las Estructuras de Edificación de Eduardo Torroja Miret ([Antuña Bernardo, 2002](#)).

## Evidencia de sumisión del artículo a una revista de prestigio

### Frontiers of Architectural Research

#### Structural evaluation of Eduardo Torroja's shell roofs for the Zarzuela Racecourse: Comparison with the competition proposals --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Full Length Article
Keywords:	Eduardo Torroja; Shell typology; Structural efficiency; Spain
Corresponding Author:	Cristian Yarasca-Aybar, PhD.(c) Universidad Peruana Union Lima, Lima PERU
First Author:	Luis Leyva
Order of Authors:	Luis Leyva Cristian Yarasca-Aybar, PhD.(c)
Abstract:	<p>Eduardo Torroja's roofs for the Zarzuela Racecourse (Hipódromo de la Zarzuela) are structures recognized worldwide for their structural quality. The current roof was built after it was selected as the winner of the Concrete and Steel competition in 1934, in which other engineers and architects participated. This research seeks to determine the material efficiency of the current roof, considering its shell typology or double curvature and contrasting it with other roof typologies proposed for the competition. The volumetric object, structural stresses, and materiality were studied on all roofs. The results indicate that, depending on the volumetric object of each roof, the load directions condition the forces at specific points of the slabs, denoting deformations and structural stresses at the ends of the slabs and the support points. The structural stresses were determined quantitatively, objectively evidencing the structural quality. In some cases, the eight roofs presented exuberant stresses and deformations compared to others to proceed with the structural comparison of each roof. Concerning the materiality of each roof's steel and concrete volume, the final costs of these structures are obtained. It is concluded that the shell typology presents economic and structural efficiency in the Zarzuela Racecourse.</p>

“AÑO DEL FORTALECIMIENTO DE LA SOBERANÍA NACIONAL”

RESOLUCIÓN N° 0756-2022/UPeU-FIA-CF-T

Lima, Ñaña 16 de agosto de 2022

**VISTO:**

El expediente de **Luis Alberto Leyva Guerrero**, identificado(a) con Código Universitario N° 201420145, de la Escuela Profesional de Arquitectura de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión;

**CONSIDERANDO:**

Que la Universidad Peruana Unión tiene autonomía académica, administrativa y normativa, dentro del ámbito establecido por la Ley Universitaria N° 30220 y el Estatuto de la Universidad;

Que la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, mediante sus reglamentos académicos y administrativos, ha establecido las formas y procedimientos para la aprobación e inscripción del perfil de proyecto de tesis en formato artículo y la designación o nombramiento del asesor para la obtención del título profesional;

Que **Luis Alberto Leyva Guerrero**, ha solicitado: la inscripción del perfil de proyecto de tesis titulado "Eficiencia del Material en las Cubiertas Shell de Eduardo Torroja para el Hipódromo de la Zarzuela, Madrid, España" y la designación del Asesor, encargado de orientar y asesorar la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo;

Estando a lo acordado en la sesión del Consejo de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Peruana Unión, celebrada el 16 de agosto de 2022, y en aplicación del Estatuto y el Reglamento General de Investigación de la Universidad;

**SE RESUELVE:**

Aprobar el perfil de proyecto de tesis en formato artículo titulado "**Eficiencia del Material en las Cubiertas Shell de Eduardo Torroja para el Hipódromo de la Zarzuela, Madrid, España**" y disponer su inscripción en el registro correspondiente, designar como asesor a **Mg. Cristian Pedro Yarasca Aybar** para que oriente y asesore la ejecución del perfil de proyecto de tesis en formato artículo el cual fue dictaminado por: **Dra. Denise Morelli Damas de Oliveira y Arq. Astrid Cesia Zapata Antesana**, otorgándoles un plazo máximo de doce (12) meses para la ejecución.

Regístrese, comuníquese y archívese.



Dra. Erika Inés Acuña Salinas  
**DECANA**



Dr. Santiago Ramírez López  
**SECRETARÍA ACADÉMICA**

cc:  
-Interesado  
Asesor  
Dirección General de Investigación  
Archivo