

## ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE TRACCIÓN. MODELOS ANALÓGICOS Y LECTURA DE LA IMAGEN

Eje 1: Innovación en sistemas constructivos/estructurales

Arq. Cabrera Victor H.<sup>1</sup>

Dr. Arq. Vedoya Daniel Edgardo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Itdahu- Catedra Estructuras III; Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Resistencia, Chaco, Argentina, vcab.ar18@gmail.com

<sup>2</sup> Profesor Cátedras Estructuras III y Construcciones II; Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Resistencia, Chaco, Argentina, devevoya@gmail.com

### RESUMEN

Las tenso-estructuras forman parte de una tecnología en desarrollo que les brinda a los diseñadores la habilidad para alcanzar mayores niveles de resolución tanto en el plano formal como en el tecnológico-estructural. **La evolución de estas estructuras se debe en gran medida a los esfuerzos que en la esfera científica se han realizado para ampliar los conocimientos sobre los mismos, mediante continuados procesos de investigación.**

El creciente desarrollo en el uso de este tipo de estructura exige la **innovación y creatividad**, no solo en materiales y formas, sino también en los instrumentos de validación científica, incluyendo las herramientas, métodos y procesos, acordes a las grandilocuentes posibilidades de las estructuras de grandes luces.

Es así que la Investigación a realizar plantea la selección de obras arquitectónicas existentes, como parte de la casuística estructural actual, para ser usados como objeto de estudio en el utilizando para su análisis el **Método de la Lectura de la Imagen** y apoyados en el uso de **Modelos Analógicos**.

Dicho método se enfoca en la **progresiva aprehensión intelectual de un objeto por parte del sujeto observador/investigador**, a partir de vincular sus conocimientos y experiencias previas con la imagen visual que la forma expresa.

El uso de modelos analógicos a escala reducida es un recurso indispensable para resolver problemas de diseño de las estructuras en general y, principalmente, de las llamadas **“estructuras livianas”** o **“de grandes luces”** donde la conformación de las mismas ocupa un lugar preponderante en el estudio de su comportamiento mecánico. Además permiten simular en ellos las condiciones de comportamiento estructural del prototipo que se modela; anticipándose a las distintas situaciones y solicitudes a las que estará sometido el prototipo en la realidad.



El análisis de una estructura a través de **modelos analógicos** y la **lectura de la imagen**, es un recurso interesante, tanto para el alumno como para el profesional arquitecto que, sin embargo, suele ser poco utilizado para el estudio y entendimiento de problemas estructurales complejos.

Resaltando la importancia de incorporar estos recursos como eficaces herramientas de análisis, evaluación y diseño de grandes estructuras, el trabajo de investigación aspira a realizar contribuciones al conocimiento científico actual sobre la temática, en un marco de interacción académica, que permita difundir el uso de modelos analógicos y sus resultados para un mejor aprendizaje y comprensión; su vinculación con áreas de investigación complementarias y aplicación de los estudios con la práctica en Obra.

**PALABRAS CLAVES: TENSOESTRUCTURAS - TRACCIÓN PURA - SUSTENTABILIDAD - MODELOS ANALOGICOS**

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente resumen se inscribe dentro del trabajo de investigación sobre el Estudio y análisis del comportamiento de estructuras de Grandes Luces de Tracción Pura mediante modelos analógicos y la lectura de la imagen, que toma como caso de estudio al estadio "*Wanda Metropolitano*" (*Madrid, España*), el cual posee una cubierta diseñada que se incluye dentro de la tipología de las estructuras tensadas; la misma está formada por un anillo de compresión exterior de acero, un anillo interior de tracción de cables, y dos grupos de cables radiales. La malla así formada se cubre mediante membranas tensadas sobre el cuadrilátero alabeado formado por cables superior e inferiores.

Como fase inicial de dicho trabajo, se realizó la búsqueda y ordenamiento de antecedentes, con lo cual se formara el marco conceptual que oficiara de base teórica. En la misma, se revelaron datos técnicos así como la recopilación de experiencias prácticas sobre el uso de modelos analógicos; Se hizo hincapié en la necesidad del estudio innovador y la comprobación empírica de las tensoestructuras para desarrollar procesos más integrales en tareas de diseño.

Estas estructuras se caracterizan por tener al esfuerzo de tracción como principal estrategia para su configuración espacial, con una transmisión de cargas dada especialmente a través de elementos lineales, formando así diferentes sistemas (Módulos, redes, tramas, etc.) que tienen la propiedad de adquirir un equilibrio interno propio.

Uno de los rasgos más significativos de este tipo de resolución estructural es la capacidad de generar formas libres, factibles de articularse dinámicamente según la disposición de sus componentes en una estrecha relación entre forma y función estática. Es a partir de esta propiedad que se establece una relación con las enseñanzas que nos proporciona la naturaleza en sus estructuras, tan orgánicas formalmente como equilibradas en su comportamiento.

Sin embargo, es justamente por ello que el cálculo de sus componentes adquiere una alta complejidad, por tratarse de geometrías no coplanares y discontinuas.

Por otra parte, las exigencias del mundo actual demanda no solo la construcción de superficies que cubran grandes espacios sino también que sean eficientes.



Todas estas consideraciones deben ser tomadas en cuenta en el Diseño, lo cual implica usar métodos acordes a estas tecnologías constructivas. A partir de ello, se considera que el estudio de estructuras mediante métodos innovadores, como el de la “lectura de la imagen”, permiten **comprender** el comportamiento estructural básico de un sistema/caso; e **identificar** los principios naturales de equilibrio que fueron aplicados.

## 2. DESARROLLO

En principio, se buscó no solo la recopilación de información pertinente, tanto teórica como de comprobación empírica (fáctica), sino también vincular los diferentes ejes conceptuales de incumbencia, con el propósito de brindar una perspectiva integral del tema-problema y exhibir los avances en la investigación a modo de reseña.

### Objetivo:

“Conocer los alcances prácticos del estudio de estructuras de grandes luces mediante la lectura de la imagen y los modelos analógicos para incentivar la incorporación y aplicación de estos recursos como eficaz herramienta de análisis, evaluación y diseño de las mismas”

### Objetivos Particulares:

- Describir la importancia del uso de modelos analógicos y el método de la lectura de la imagen en el estudio y diseño de Tensoestructuras, tomando en cuenta la relación histórica entre el hombre, el ambiente y los elementos que su medio le brinda.
- Comprender la relación entre las pautas del diseño de estructuras de Grandes Luces y los principios naturales de eficiencia.
- Identificar experiencias exitosas en la investigación/ producción técnica de estas estructuras en el ámbito local (desempeño del Itdahu, Fau-UNNE.)

## DEFINICIÓN DE TENSOESTRUCTURAS

Se denominan o catalogan como Tensoestructuras a los sistemas estructurales donde predomina el esfuerzo de tracción, estos se caracterizan por requerir un mínimo de masa logrando una eficiencia notable, a diferencia de los sistemas constructivos de “masa activa”.

Por esta característica, su cuerpo principal está conformado por materiales capaces de soportar esfuerzos de tracción (predominando los “no rígidos”), aunque se debe reconocer que estas estructuras no podrían subsistir sin la ayuda de componentes rígidos trabando a compresión, de los cuales colgar, o poder fijarse para su estabilidad.



## CARACTERÍSTICAS ESENCIALES

Los principios que rigen el comportamiento de las estructuras de tracción pura en general se basan en el uso de componentes lineales no rígidos, en donde su resistencia no depende de su rigidez, ya que es independiente a ella. (P. Perles; Estructuras Especiales), es por eso que estas estructuras adquieren un **equilibrio interno propio**, por ende, no dependen de la gravedad para asegurar su propia estabilidad, ya que la tensión generada por la atracción terrestre es reemplazada por las tensiones multidireccionales de cada uno de sus miembros. **De esta manera, es posible comenzar a entender su funcionamiento y forma de trabajo.**

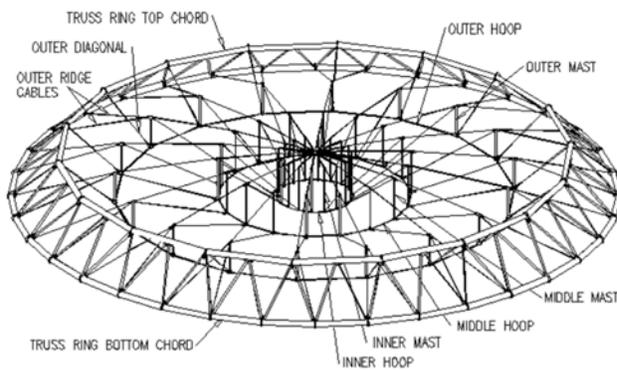


Fig. 1: Cubierta del Estadio "Crown Coliseum" (U.S.A.)

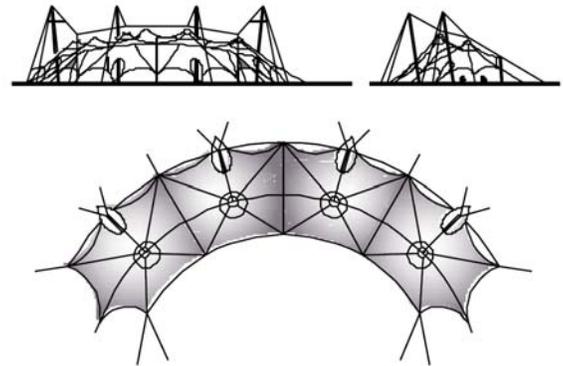


Fig. 2: Sistema en Forma de Tienda. Barragan Sisalima, José L. (2017).

“La forma que adopta siempre una estructura de tracción es la que corresponde al funicular de las cargas actuantes”; Y en todos los casos, **la forma juega un papel importante en la estabilidad de la cubierta. Es una estructura dinámica e inteligente.**

## PROPIEDADES

Las ventajas de **optimizar y reducir al límite la cantidad de material constructivo**, se traducen en mejores condiciones de resistencia y resiliencia frente a acciones de la naturaleza (por Ej. al reducir la masa del edificio es menos vulnerable al colapso en zonas sísmicas).

Otro gran beneficio es el **ahorro energético** en la construcción y vida útil el edificio, por la característica de sus componentes, en su mayoría prefabricados. El **desarrollo industrial de nuevos materiales** con gran resistencia a las deformaciones y poco peso específico, ponen a nuestro alcance un **sistema constructivo versátil y adecuado para cubrir extensos espacios.**

Uno de los aportes de las tensoestructuras radica en su potencial para generar arte, como valor agregado en relación al **significado cultural** en el sitio donde se encuentre.



## ESCENARIO CONTEXTUAL

Actualmente no solo nos desenvolvemos en una sociedad industrializada sino además hemos devenido en una sociedad mediática basada en el conocimiento, un flujo permanente de datos a través de “redes”, economía globalizada y una creciente conciencia orientada hacia políticas medioambientales. En este escenario las Tensoestructuras se han consolidado como alternativa por su eficiencia energética-estructural y su adaptabilidad como instrumento de connotación simbólica. Se presentan como una opción tecnológica, social y ambientalmente viable al poseer las siguientes características:

- Coberturas eficientes y ligeras a partir de materiales de mínimo peso y masa.
- Superficies con materiales translúcidos que favorecen una iluminación natural.
- Materiales reciclables que atenúan el impacto sobre el entorno natural.
- Posibilidad de integración formal con los diversos patrones culturales, tipologías locales y códigos de la arquitectura regional en cada continente.



Fig. 3: Tensoestructuras en pergolado de Jardín Botánico. Medellín, Colombia. La geometría de módulos estructurales y la tecnología elegida para su materialización se adapta hábilmente al carácter de la obra y las características del lugar de implantación.

## REFERENCIAS HISTÓRICAS

Las investigaciones científicas y tecnológicas para el desarrollo de las tensoestructuras, se inician a inicios del siglo XX, con investigaciones sobre la forma resistente y la eficiencia estructural de los sistemas estructurales ligeros. Sin embargo, así como en la naturaleza, las construcciones textiles y arquitectura ligera existieron en diferentes épocas de la historia y en diversas latitudes.

A continuación, se exhibirán a modo de reseña una serie de antecedentes en diferentes culturas.

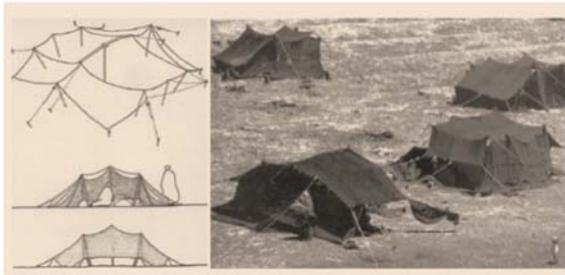


Fig. 4. Tiendas nómadas en IRAN. Fotografía y esquema de tensado de toldos.

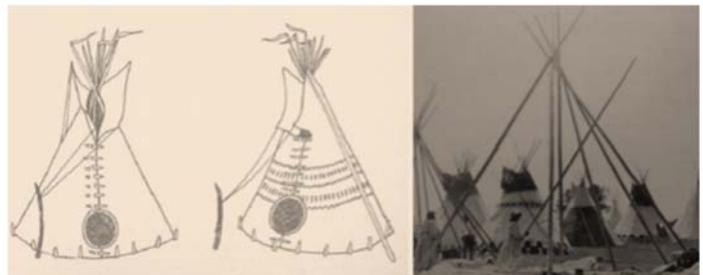


Fig. 5. Tiendas de antiguos pobladores piel roja, cultura “Tipi”. (Norteamérica).



El sistema de Toldos para la confección de espacios del hábitat ha sido desarrollado de manera desde épocas remotas con soluciones inteligentes que responden de manera óptima a las posibilidades técnicas y materiales disponibles.

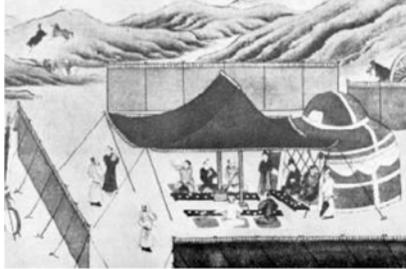


Fig. 6. Pintura China donde se representa una cobertura textil generada a partir del tensado de sogas.

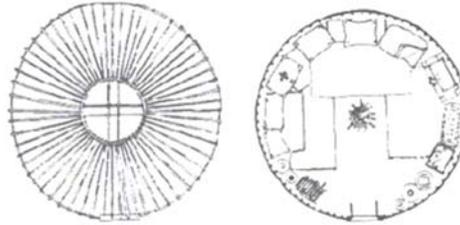


Fig. 7. Las tiendas kazajas son llamadas “yurts”, tienen planta circular y cubren un área cilíndrica con una cubierta cónica a través de una estructura de madera y sogas.



## LAS GRANDES LUCES Y LOS ESPECTÁCULOS PÚBLICOS

La resolución del problema que presenta la cobertura de grandes vanos se encuentra íntimamente relacionada con el progreso en el arte de construir, ante la necesidad de reguardar a un gran número de personas (congregadas ante una actividad cultural) de las variables climáticas.

La evolución histórica de los sistemas siguió diferentes trayectorias, de las cuales existen clasificaciones variables según el autor. En el presente trabajo, por inscribirse dentro del estudio de la cubierta de un Estadio Deportivo, se hizo foco en la **estructura velaria**, la cual aparece por primera vez en Grecia y Roma como forma de cubrir anfiteatros. Según Frei Otto y otros, los teatros griegos y romanos estaban cubiertos por grandes lonas que iban hasta la cabecera del decorado.

- Haciendo una introducción historia a las estructuras tensadas podemos ilustra este cuadro:

<b>Estructura velaria</b>		
Rama histórica	{ Griegos Romanos	grandes luces
Phylum actual	{ Simetría central (Montevideo, Bruselas) Simetría axil (Yale, Raleigh, Tokio) Forma libre (Tokio, Munich)	

Fig. 8: Clasificación evolución Histórica de las estructuras. (Alarcón Álvarez, 1971)

El coliseo de Roma contaba con una cubierta de tela desplegable accionada mediante poleas. Fue hecha con tela de vela y luego sustituida por lino, se apoyaba sobre un entramado de cuerdas. Cada sector de tela podía moverse por separado. Sobre la sección superior de la fachada de han identificado los huecos donde se insertaban los 250 mástiles de madera que soportaban los cables.

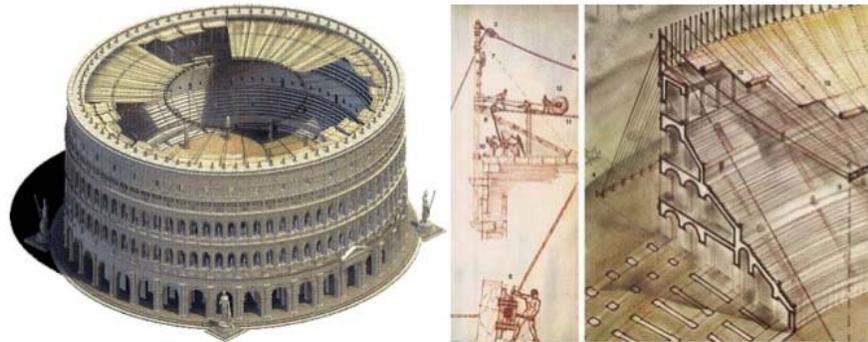


Fig. 9: Coliseo Romano, Construido en el Siglo I d.C. Perspectiva y Detalle estructura "velaría" de Cubierta.

## ANALOGÍAS BIOLÓGICAS Y DISEÑO ARQUITECTÓNICO

Al investigar las características presentes en la configuración estructural de organismos y construcciones generadas por la naturaleza, estas pueden ser utilizadas de forma análoga para la creación de estructuras adaptables y en la generación de arquitectura. Si analizamos las construcciones de la naturaleza, se reconoce como estrategia de diseño la utilización de una configuración formal propicia para trabajar a esfuerzos de tracción, la cual es fabricada con materiales orgánicos que poseen extraordinarias propiedades de resiliencia y elasticidad.

## ANTECEDENTES BIOMIMÉTICOS

En la naturaleza, las telas de araña representan un excelente modelo de eficiencia estructural basado en el esfuerzo de tracción, ya que posee propiedades mecánicas resistentes superiores al acero y a la vez con mayor elasticidad que la obtenida en el nylon, ambas propiedades le permiten absorber y disipar gran cantidad de energía.



Fig. 10: Estructuras orgánicas de Tracción. Redes de tela de araña.

El desempeño, eficiencia y complejidad de los **diseños observados en los organismos naturales** aún sorprende día a día a científicos e investigadores. Los principios de diseño utilizados en el mundo natural son innumerables y en todos ellos encontramos un denominador común: la armónica **combinación de las partes en unión al todo** (sinergia) destinada a un propósito y en perfecto balance con su medio ambiente. (Marroquin R; 2007).

## FREI OTTO Y EL INSTITUTO DE ESTRUCTURAS LIGERAS

Las tensoestructuras lograron alcanzar un impulso y desarrollo hasta después de la Segunda Guerra Mundial. En la década de los 50's Frei Otto fue la figura clave en el desarrollo de las tensoestructuras, fue el primero en llevar lejos las soluciones geométricas simples a formas más complejas (orgánicas) sin la limitación de los complicados métodos de cálculo.



El secreto del éxito de Otto se encuentra en su estudio sistematizado de Formas de la naturaleza, partiendo desde los procesos de auto-formación de burbujas de jabón, configuración de cristales, plantas microscópicas y sistemas de ramificación en árboles.



Fig. 11: Estudio sistematizado de las tensoestructuras por Frei Otto.

En 1960, Otto fundó el Instituto de estructuras Ligeras (ILEK), allí se estudiaron y desarrollaron innumerables modelos experimentales y prototipos a escala para la comprensión y análisis de los principios constructivos u operacionales de organismos naturales susceptibles de ser copiados o aplicados al mejoramiento de la tecnología constructiva existente. Su éxito parte de la capacidad de poder **traducir las formas orgánicas en modelos**, que generaran la **geometría esencial** del prototipo desarrollado.

### SÍNTESIS CONCEPTOS ESTRUCTURALES

El ejemplo más claro de eficiencia con, logrando cubrir luces que se extienden más allá de su único apoyo lo exhibe la naturaleza en los árboles. Es precisamente este principio de vectorización logrado por las ramas es el que las tensoestructuras buscan reproducir. Tal como se observa en la Figura 12.

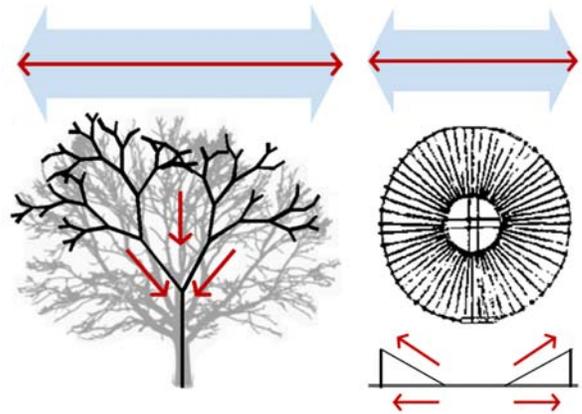


Figura 12 -13. Elaboración propia.

La disposición en planta de las Tiendas kazajas y la estructura Velaría Romana son asimilables morfológicamente, presentando un sistema concéntrico con descarga a compresión perimetral y líneas a modo de “rayos” trabajando a tracción. Tal como se muestra en la Figura 13.

El diseño de estructuras eficientes que respondan a las condiciones del medio, es una faceta esencial de toda construcción que encuentra en las tensoestructuras potencialidad.

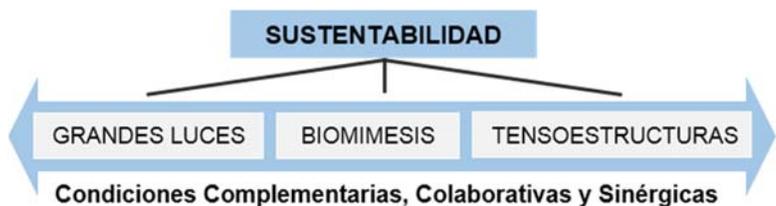


Fig. 14: Esquema ejes transversales. Elaboración propia



## EXPERIENCIAS EN MODELOS ANALÓGICOS

Ante la imposibilidad de trabajar directamente con la realidad, se recurre a modelos Analógicos (MA) como un medio de representar de manera simplificada las características esenciales de una estructura formal. En el campo de la investigación estructural, los MA aparecen no solo como un componente del proceso de diseño y definición de la forma, sino que constituye un modo de estudiar variables de su geometría en relación a su estabilidad y materialización. Son de extrema utilidad en el diseño de tensoestructuras porque permiten pre visualizar geometrías complejas.



Fig. 15: Modelos Analógicos desarrollados por equipo Itdahu entre los años 2013 y 2015.

Una característica de los “modelos analógicos” para diseñar tensoestructuras es el **equilibrio de fuerzas y dominio de esfuerzos** que generan los materiales que la conforman, como cables y tejidos sintéticos (nylon tensado, licras) para asimilar las solicitaciones de ensayo.

En la figura 15, se muestran los modelos analógicos realizados durante el Trabajo de Campo Final de la Cátedra de Estructuras III de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la UNNE, para Alumnos de 5º Año de dicha Carrera. El mismo consistió en una materialización a escala, con la finalidad de estudiar el comportamiento de las tensoestructuras, previo a la construcción del modelo real.



Fig. 16: Imágenes proceso de Montaje de tensoestructura en patio de Facultad de Arquitectura de la UNNE (2017).

## 3. CONCLUSIONES

Los métodos de estudio que se enfocan en reproducciones tridimensionales (digitales o analógicas) son indispensables para un correcto abordaje e interpretación de las posibilidades estáticas y funcionales de las tensoestructuras, ya que permiten: En primer lugar, facilitar la comprensión global del sistema, analizando los esquemas de fuerzas en relación a las propiedades de sus materiales y su espacialidad; y en segundo lugar, promueven la formación en



el diseñador de un pensamiento más amplio y dinámico, integrando las nociones estructurales desde las primeras ideas (generadoras) durante su proceso de diseño, consolidando en sí criterios que mejoraran su proyección del hábitat en todas las escalas. En esta línea, se espera que proyectos como el del Itdahu en el estudio de modelos, sirvan como experiencias promotoras, tanto por implantar un modelo real y hacerlo visible, como por incentivar el interés sobre el proceso de diseño y verificación de estas versátiles estructuras.

Es por ello que el uso de modelos analógicos y el método de la lectura de la imagen, se presentan como herramientas válidas de diseño previas a la verificación analítica, que permiten tener un conocimiento más expeditivo sobre las tensoestructuras, brindando una reproducción tridimensional de su comportamiento y ayudando a entender los principios naturales que la rigen.

## BIBLIOGRAFÍA

Alarcón Álvarez, C. y Alarcón Álvarez, E. (1971). *Las Cubiertas de Grandes Luces. Soluciones actuales*. (España). Informes de la Construcción Vol. 23, nº 229. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Del Re Giannina y Puig José (2010). *TENSOESTRUCTURAS*. Caracas (Venezuela). Universidad Central de Venezuela.

Fernández Rodríguez, Alba M. (2017). *Arquitectura Deportiva. Cubiertas Simbólicas, experiencias memorables*. Madrid (España). Escuela Técnica Superior de Arquitectura.

Marroquín Rivera, Luis Alberto S. (2012). *TENSOESTRUCTURAS*. Lima (Perú). Universidad de San Martín de Porres.

Marroquín Rivera, Luis Alberto S. (2010). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS ADAPTABLES INSPIRADAS EN NATURALEZA*. Apuntes. Revista Digital de Arquitectura. <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2010/12/disenio-de-estructuras-adaptables.html>

Perles, P. (2008). *Temas de Estructuras Especiales*. Buenos Aires (Argentina). Ed. Klisckowski.

Vedoya Daniel E. y Prat Emma S. (2009). *Libro Estructuras de Grandes Luces. Corrientes* (Argentina). Ed. ITDAHu.

Barragan Sisalima, José L. (2017). *Tenso estructuras para eventos en espacios públicos*. Loja (Ecuador). Universidad Técnica Particular de Loja.