

# **EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL EN LA NATURALEZA COMO FUENTE DE CONOCIMIENTO APLICADO A LA ARQUITECTURA**

Antonio Maciá Mateu (\*), Carlos Pérez Carramiñana (\*\*),  
Mónica Mateo García(\*\*), Beatriz Piedecausa García (\*\*)

*(\*)Departamento de Ingeniería de la Construcción, OO.PP. e Infraestructura Urbana  
(\*\*)Departamento de Construcciones Arquitectónicas*

Universidad de Alicante

## **RESUMEN**

Esta comunicación está basada en el análisis de los modelos estructurales existentes en la naturaleza como punto de partida de proyectos de estructuras en el ámbito de la arquitectura. Pretende resumir la forma de abordar el proyecto estructural arquitectónico desde la experimentación, desde la generación de la forma partiendo de procesos de autoformación y siendo acorde, en todo momento, con los planteamientos de las construcciones ligeras.

Se plantea el análisis del comportamiento estructural de objetos de la naturaleza y la interpretación que de él han realizado arquitectos tan relevantes como Frei Otto, Antonio Gaudí o Bodo Rasch.

En primer lugar se propone el estudio y análisis de una estructura ya proyectada y/o construida por arquitectos especialistas en el diseño de estructuras arquitectónicas. Este análisis se produce a través de la construcción de un modelo a escala. Posteriormente, se pide al alumno que proyecte una segunda maqueta en el que tenga que aplicar los conceptos extraídos del primer ejercicio, valorándolos y, en su caso, proponiendo mejoras. En el proceso de experimentación se trabaja sobre membranas, cáscaras, estructuras de tensegridad, neumáticas, óseas, de crecimiento fractal, en general, estructuras ligeras.

En conclusión, establecer un procedimiento inverso, partir de la experimentación y, posteriormente, buscar las justificaciones teóricas. Este procedimiento permite al alumno conocer, de forma experimental, el comportamiento de los distintos tipos estructurales, cotejándolos con la carga teórica y siendo posible aplicarlo en futuros proyectos originales.

**PALABRAS CLAVES:** arquitectura, estructura, proyecto, conocimiento, naturaleza.

## INTRODUCCIÓN

“ El arte de una estructura estriba en saber cómo y dónde disponer los huecos”. Esta frase de Robert Le Ricolais, define con exactitud el concepto de estructura en general y de estructura ligera en particular. Es en el campo de las estructuras ligeras donde se desarrollará todo el proceso de investigación docente.

La naturaleza “*diseña sus estructuras*” de la manera más eficiente posible. Optimiza el material, adecúa la forma y el volumen y se adapta a los condicionantes externos e internos que debe soportar. Una tela de araña forma una magnífica malla estructural traccionada, o el sistema de músculos y tendones en el ala de un ave se complementan para un óptimo comportamiento estructural. El hecho de que un árbol tenga un tronco con sección muy próxima al círculo no es casual. Éste debe responder adecuadamente al viento que sopla en todas direcciones y, precisamente, es la sección circular la que permite una respuesta uniforme en todas las direcciones.

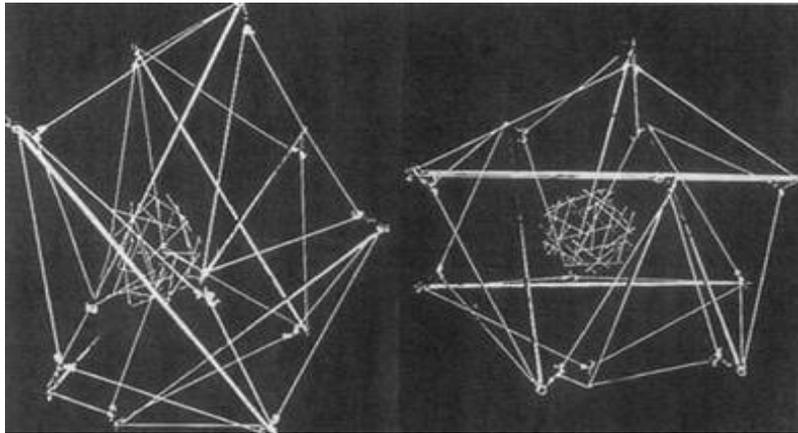


Estructuras de la naturaleza: tela de araña sometida al peso del agua. Catenarias.

Si tenemos ante nosotros tan vasto y sabio manual estructural, ¿por qué no aprovecharlo?. A lo largo de la historia de la arquitectura hemos visto como, primero constructores y posteriormente arquitectos, han aplicado estos conocimientos en sus proyectos. Sin embargo es en el último siglo cuando arquitectos como Antonio Gaudí, B.M.

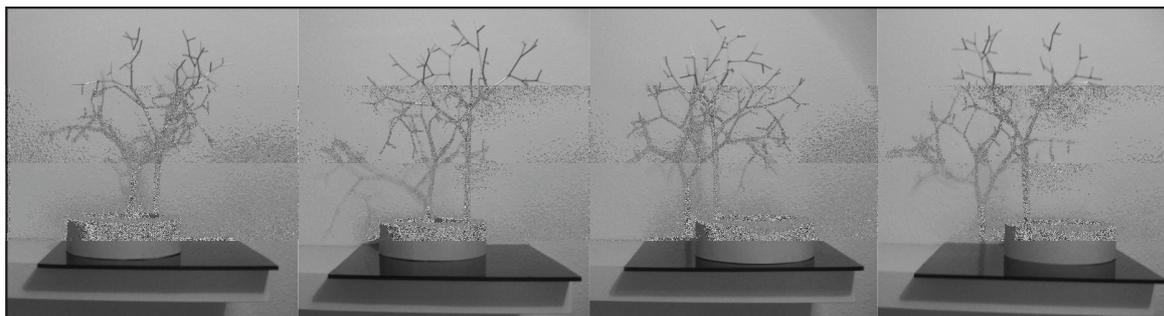
Fuller y Frei Otto o ingenieros como Robert Le Ricolais, han traducido al lenguaje arquitectónico la eficiencia y, en muchas ocasiones, la ligereza de los resultados.

El comportamiento estructural en la naturaleza no solo lo encontramos en los grandes diseños de la naturaleza. El núcleo de las células (citoesqueleto) está formado por una doble estructura de tensegridad, una dentro de otra y que le permite adaptarse adecuadamente a su entorno mediante la modificación de su forma.



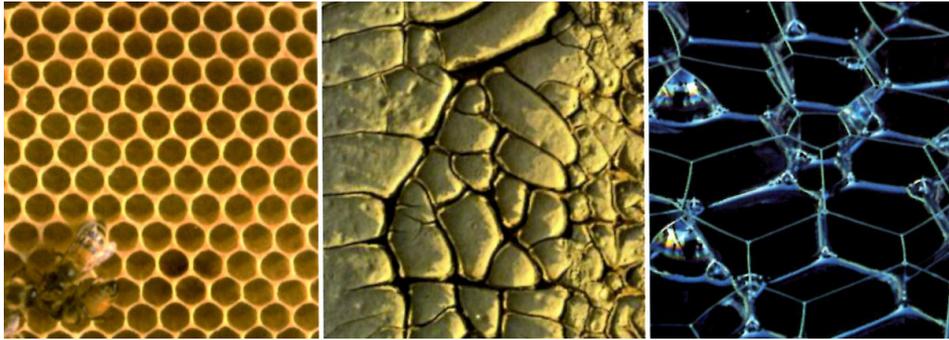
Estructura de tensegridad. Citoesqueleto.

Por otro lado, las formas de la naturaleza tampoco son aleatorias, siguen patrones de tipo geométrico. El estudio de estos patrones también está vinculado con el diseño estructural arquitectónico. Los patrones de crecimiento fractal o la aplicación de series numéricas dan como resultado proyectos como la Christian Wagner fountain de Frei Otto.



Estructura con patrón de crecimiento fractal. Christian Wagner fountain. Frei Otto. Modelo a escala.

Otro de los modelos de organización estructural está basado en el uso de la geometría de Voronoi. Estos fenómenos de organización estructural se pueden considerar como propios de de “la ley de la naturaleza”.



Geometría de Voronoi.

## OBJETIVOS

La investigación docente se desarrolla en el ámbito de la asignatura Proyecto de estructuras singulares que forma parte del plan de estudios de Arquitectura (1996) de la Escuela Politécnica superior de la Universidad de Alicante.

Los objetivos se encaminan en la dirección de establecer relaciones entre las estructuras ligeras y la naturaleza y están desarrollados en cuatro fases de trabajo:

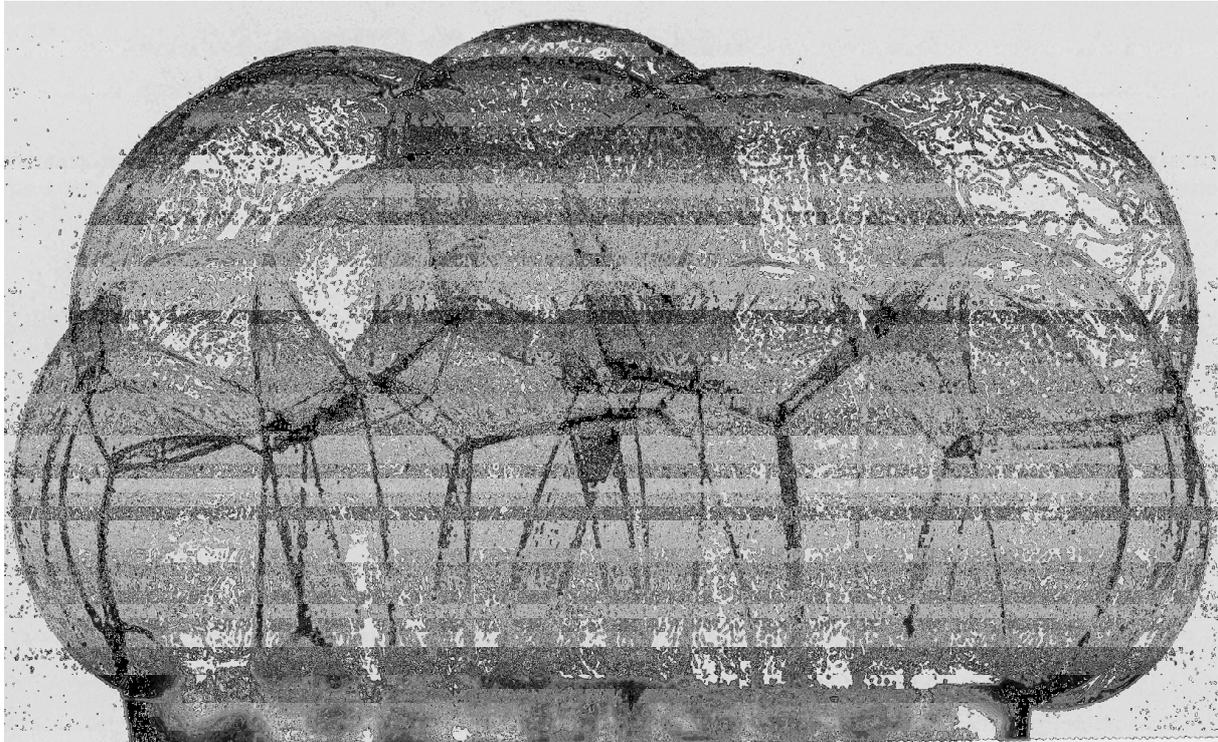
- Primera fase:** Análisis. Toma de datos.
- Segunda fase:** Taller experimental. Construcción de modelos a escala.
- Tercera fase:** Cálculos justificativos de las propuestas desarrolladas.
- Cuarta fase:** Propuestas. Modelos originales a escala.

### **Fase 1. Análisis. Toma de datos.**

En esta fase, el alumno consigue aprender a seleccionar solo la información que necesita utilizar y, consecuentemente, aprende a plantear una base sólida de información que necesita para la posterior experimentación con los modelos estructurales.

### **Fase 2. Taller experimental. Construcción de modelos a escala.**

El alumno debe experimentar. En esta segunda fase debe aprender a manejar la información que ha sido capaz de recopilar a través de la construcción de una maqueta de una obra ya proyectada y construida y que represente un referente en la materia. Durante el proceso de construcción de la maqueta surgen una serie de problemas estructurales y constructivos que el alumno deberá resolver para poder finalizar con éxito el trabajo.

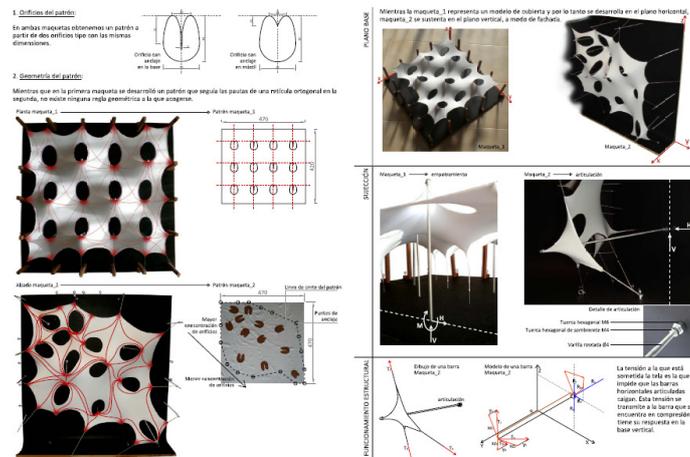


Problemas que, en el ámbito de las estructuras ligeras, coinciden, en gran medida, con los reales.

Estructuras de jabón-agua.

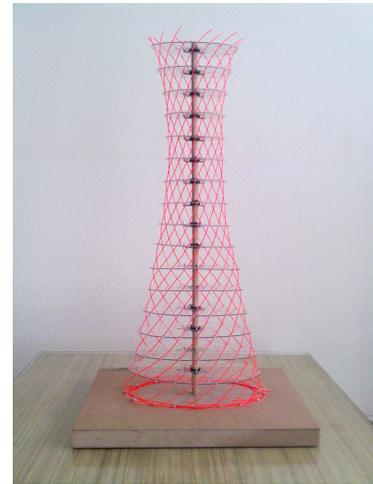
### Fase 3. Cálculos justificativos de las propuestas desarrolladas.

Estudio basado en la ciencia de la elasticidad y conceptos propios de la resistencia de materiales. En esta tercera fase se centra en la justificación científica de los modelos utilizados en la experimentación constructiva: justificaciones geométricas, patrones de crecimiento estructural y los cálculos numéricos necesarios para el correcto dimensionado de la estructura.



#### **Fase 4. Propuestas. Modelos originales a escala.**

El alumno deberá proyectar y construir una nueva maqueta estructural en la que se apliquen todos los conocimientos adquiridos en los anteriores niveles. De todo ello se concluye que “detrás de lo que parece complejo en la naturaleza, suele haber un mecanismo muy simple” tal y como plantea Shohei Matsukawa.

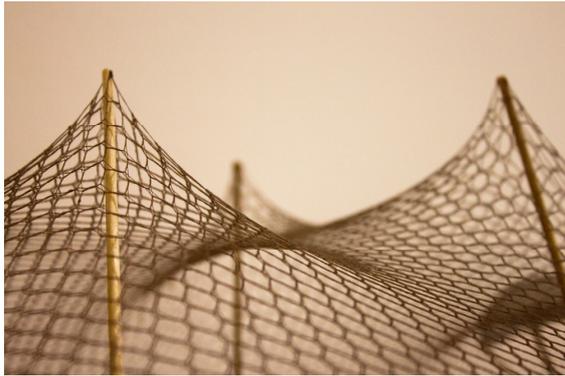


#### **MÉTODO Y PROCESO DE INVESTIGACIÓN**

El taller se desarrolla en un semestre con un total de 6 créditos desarrollados, a su vez, en cuatro horas semanales de sesión continua. El 50% de cada sesión se dedica a presentar y justificar, a nivel teórico, los distintos tipos estructurales y constructivos de las estructuras ligeras y sus relaciones con la naturaleza. En el 50% restante se desarrolla un taller en el que los alumnos muestran, debaten y corrigen sus análisis, experimentaciones, justificaciones y propuestas. La docencia se completa con charlas que, sin estar directamente relacionadas con los trabajos específicos, sí plantean las claves para el desarrollo de las cuatro fases de trabajo.

En las dos primeras semanas del taller se realiza la presentación de un elenco de proyectos de estructuras ligeras ya elaborados por arquitectos maestros en la materia. Cada alumno debe analizar uno de ellos. Las estructuras propuestas presentan unos contenidos concretos y unas relaciones singulares con la naturaleza.

Tras la fase de análisis, el alumno construye la maqueta correspondiente a la estructura que le ha sido asignada. Este es el punto más importante del proceso, el alumno aprende por experimentación, comprueba el conocimiento teórico recibido con la realidad construida que representa la maqueta. En este proceso debe analizar y proponer los materiales que mejor se adapten al funcionamiento estructural de su modelo, lo que obliga, necesariamente, a conocer las características mecánicas y físicas de los materiales.



Estructura tensada.



Estructura tridimensional de filamentos.

El alumno se enfrenta a la fase final: el proyecto original que se plantea a nivel gráfico, escrito y maqueta con posterioridad al trabajo de justificación científica basada en el conocimiento adquirido en las sesiones teóricas.

El alumno trabaja en un tema concreto y sin embargo recibe la información de todos los temas planteados para su análisis y propuesta. Los alumnos muestran, durante las sesiones de taller, el conjunto de resultados con un doble fin: poder ser corregidos por el profesor y, sobre todo, transmitir la información al resto, de tal manera que se produce un fructífero cambio de información.

La evaluación se realiza a través de dos entregas que corresponden, la primera, a los tres primeros niveles y la segunda al cuarto nivel. La documentación a entregar en ambos casos consiste en el modelo a escala realizado y una justificación gráfica y escrita resumida en un DIN-A3.

## **RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

Este proceso plantea la asimilación de conocimiento de manera natural, intuitiva que permite entender el comportamiento estructural a través de la comprensión de modelos reales o propios de la naturaleza, sin perder el rigor científico que requiere la enseñanza universitaria.

De los resultados obtenidos se deduce que los procesos de aprendizaje mediante experimentación con modelos reales a escala, en el ámbito del diseño estructural arquitectónico, son más efectivos que los planteamientos tradicionales.

Estos procesos de aprendizaje suponen un estímulo entre el alumnado de arquitectura, caracterizado por su gran capacidad creativa.

A nivel de repercusión entre el alumnado es interesante destacar que, tratándose de una asignatura optativa, su demanda paso de 0 alumnos a una media de 40 en el momento en el que se implantó este sistema de aprendizaje aplicado a los sistemas estructurales en arquitectura.

Permite la interrelación con otras asignaturas en las que se desarrollan sistemas constructivos, lo que contribuye a que el alumno no reciba informaciones parciales e inconexas puesto que un proyecto arquitectónico debe entenderse como una unidad casi indivisible.

La implicación del alumnado ha excedido del ámbito de la propia asignatura, desembocando en exposiciones públicas de los resultados de los trabajos desarrollados (Colegio territorial de arquitectos de Alicante \_CTAA en 2008 y MUA en 2010).



Lightness. Exposición realizada en el CTAA en febrero de 2008.



Lightness. Exposición realizada en el MUA en mayo-septiembre de 2010.

Cada uno de los trabajos desarrollados por los alumnos queda resumido en unas fichas que contienen información sobre la tipología estructural, las referencias de la naturaleza o de proyectos ya desarrollados, materiales, procesos constructivos y funcionamiento estructural. A modo resumen de resultados se adjuntan dos de ellas.

**TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL**

Tensegrity

**REFERENCIA**

Kenneth Snelson\_Needle Tower II, 1969

**MATERIALES EMPLEADOS**

Tubos de aluminio, varilla roscada, resina epoxi, cable de nylon de 6kp, conectores eléctricos roscados, tablero DM para la base

**PROCESO CONSTRUCTIVO**

Medición y marcado de las distancias entre uniones sobre los cables. Fijación de los cables a los conectores de unión formando toda la malla sobre un plano. Montaje tridimensional y cierre de la malla, replanteándola mediante varillas de madera auxiliares. Corte de los tubos de aluminio y fijación con resina epoxi de la varilla roscada en su interior. Sustitución de las varillas auxiliares por los tubos de aluminio. Colocación de los tres conectores base sobre el tablero y fijación de los cables inferiores a éstos. Tensado final de la estructura mediante la rotación sobre su eje de cada uno de los tubos.



Estructura de tensegridad. Needle tower II.

**TIPOLOGÍA ESTRUCTURAL**

Estructura ósea.

**REFERENCIA**

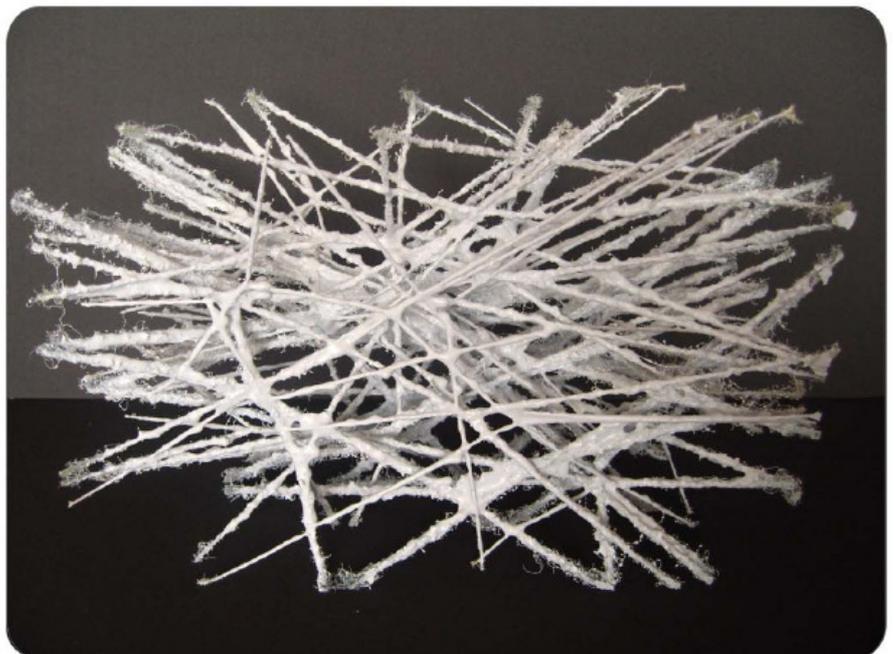
Estructura de filamentos óseos.

**MATERIALES EMPLEADOS**

Hilo de lana de diferentes grosores, resina, spray blanco. Se utilizó para su elaboración una estructura auxiliar conformada por un cajón de madera y tela mosquitera.

**PROCESO CONSTRUCTIVO**

En primer lugar se hizo una estructura auxiliar de madera que constaba de un cajón con el fondo hueco. Las paredes interiores del cajón se forraron con tela mosquitera. Utilizando una aguja, se fueron entretejiendo los hilos, conformando la trama definitiva. Una vez conseguida la trama se procedió a rigidizarla con resina, que se aplicó con la ayuda de un pincel. Cuando estuvo dura, se cortaron los extremos de los hilos librando la maqueta de su estructura auxiliar. Para finalizar, la figura obtenida se cubrió con pintura blanca en spray.



Estructura tridimensional de filamentos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Otto, Frei. (2008). *Frei Otto. Conversación con Juan María Songel*. Barcelona: Gustavo Gili.

Otto, F., Nerdinger, W., Meissner, I., Möller, E. y Grdanjski, M. (2005). *Frei Otto Complete works: lightweight. Construction natural design*. Basel: Birkhäuser.

Crippa, M. A., Solá, R. (2007). *Antoni Gaudí, 1852-1926: de la naturaleza a la arquitectura*. Madrid: Alianza.

Otto, F., Rasch, B. (2006). *Finding form*. Axel Mengues.

VV.AA. (2008). *From control to design. Parametric/Algorithmic Architecture*. Barcelona: Tomoko Sakamoto, Albert Ferré.

VV.AA. (2006). *Verb architecture boogazine. NATURES*. Barcelona: Actar.

VV.AA. (2008). *Design and the elastic mind*. New York: The museum of modern art.

Shophia Vytoviti (2006). *Supersurfaces. Folding as a method of generating forms for architecture, products and fashion*. Amsterdam: BIS publishers.

Shophia Vytoviti (2003). *Folding architecture. Spatial, structural and organizational diagrams*. USA, Paradise drive: Gingo Press Inc.