

## *Morfogénesis de la Membrane House.*

### *Diseño de estructura desmontable y transportable basada en un sistema abierto de barras a compresión equilibradas estructuralmente con una membrana a tracción.*

Beatriz Arnaiz Barrio, Ramon Sastre i Sastre, Xavier Gimferrer Vilaplana  
beatriz.arnaiz@upc.edu

En este artículo se introduce el tema de las tensoestructuras, incluyendo en este ámbito el concepto de morfogénesis. Se desarrolla dicho concepto y se aplica al proceso de búsqueda de la forma del equilibrio del prototipo Membrane House.

**Palabras clave:** Prototipo, Tensoestructura, Morfogénesis, Formfinding, Autoformación.

#### 1. Breve introducción a las tensoestructuras

Desde el siglo XIX al mecanizarse el hilado y el tejido de las telas se empezaron a crear tiendas portátiles para las carpas de negocios ambulantes, como los circos que eran muy populares en el último periodo de este siglo. Este tipo de arquitectura efímera, ha continuado desarrollándose y acotándose en conceptos como arquitectura textil, ligera, estructuras de membrana o tensoestructuras. [1]



Figura 1. Tube Innsbruck por Numen / ForUse; Cubierta de Ashgabat Stadium; Umbrellas for Pink Floyd por Frei Otto; columnas de fibra en una iglesia románica de Toshiko Horiuchi; Moom Pavilion de C + A Coelacanth and Associates; Pabellón de Telecomunicaciones de Osaka; Exhibition Pavilion at the 1964 World Fair in New York.

Las estructuras de membrana tienen formas geométricas generadas por equilibrio tensado. Esto hace que puedan ser definidas como estructuras naturales, ya que se rigen por los principios estructurales hallados en la naturaleza. Son estructuras generadas por sistemas de esfuerzos lineales de compresión y tracción. La estructura y la forma están íntimamente ligadas. La curvatura de la forma proporciona estabilidad estructural y mayor rigidez en las membranas tensadas.

Estas formas se generan utilizando procesos de autoformación (concepto creado por Frei Otto en la nueva escuela de diseño en los años 50) basados en el concepto de “superficies mínimas”. Se definen por tener las áreas superficiales más pequeñas y que requieren la menor cantidad de energía potencial debido a su forma dentro de un determinado conjunto de “límites”. Su principal característica es que poseen una distribución de tensiones uniforme.

Las superficies de doble curvatura pueden ser sinclásticas o anticlásticas. En las primeras las dos direcciones de curvatura están orientadas en el mismo sentido. En las últimas las sumas de todos los radios de curvatura positivos y negativos dan cero. Debido a la efectividad de su comportamiento estructural, son capaces de redistribuir grandes cargas en puntos concretos por medio de importantes cambios en la forma de la superficie, sin el correspondiente incremento de sollicitación de la membrana. Esto ofrece como resultado estructuras ligeras que son, no sólo eficaces, sino además de una atractiva sencillez.

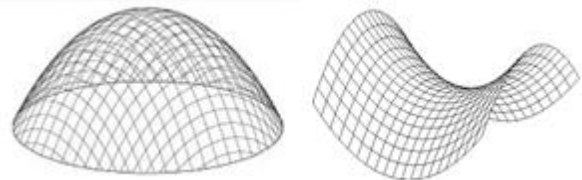


Figura 2. Superficie sinclástica y superficie anticlástica.

Las tensoestructuras son sistemas en los que la morfología y la estructura se diseñan simultáneamente en el proceso de descubrimiento de

la forma, también llamado de búsqueda de la forma de equilibrio o *Form Finding*. Este concepto se definió asociado a este tipo de estructuras pero podemos encontrar referentes de la arquitectura como Walter Gropius que ya defendía el no partir de planteamientos formales previos, sino considerar la forma como resultado de un proceso de búsqueda. [2]

El material utilizado son barras, cables, elementos de sujeción y membrana. La membrana es concebida como elemento estructural, está compuesta de tejidos de fibras sintéticas con un recubrimiento y acabado que aportan resistencia estructural y protección frente a los agentes meteorológicos externos como el sol, la lluvia y la nieve. Los materiales que actualmente se utilizan para conformar la membrana son: tejidos de poliéster con revestimiento de PVC, tejidos de fibra de vidrio con revestimiento de PTFE o de silicona, tejidos de PTFE revestidos con PTFE, y láminas de ETFE (estos últimos son laminados, no compuestos por tejidos).

Dentro de la multitud de posibilidades que ofrecen este tipo de estructuras, tienen en común frente a la arquitectura convencional una relación muy estrecha entre la estructura y la materia, y la forma adquirida, que resulta mucho más coherente y eficiente que la arbitrariedad o capricho estético que la mano del arquitecto diseñador muchas veces representa. El carácter temporal es otra característica con la que cuenta la arquitectura textil. No quiere decir esto que estas construcciones sean todas de carácter efímero, sino que en el diseño y en la optimización de sus materiales y esfuerzos, se tiene en cuenta la duración que está prevista para dicha estructura. Se diseña ya teniendo en cuenta el sistema de montaje y desmontaje, el transporte, y el impacto en el paisaje.

El proceso de diseño de esta tipología de estructura difiere mucho del de la arquitectura convencional. Ahí es donde radica una nueva práctica de la arquitectura, nuevas aplicaciones, nuevos espacios, una nueva concepción, nuevos resultados que vienen investigándose desde la segunda mitad del siglo XX.

## 2. Generación de la forma

La relación entre la forma y la materia, entre la forma y la estructura es fundamental. La eficiencia que la materia persigue en su búsqueda del equilibrio, es eficiencia estructural. La materia se dispondrá estratégicamente ejerciendo un papel estructural acorde a sus características intrínsecas, para encontrar el equilibrio estable que responde a una forma en coherencia con el potencial de la materia. De ahí se dan tipologías formales diferentes dependiendo del tipo de estructura que genere cada material.

### a. Forma

La elección del material de la membrana es muy determinante. Citando a Gilles Deleuze, *Los recursos involucrados en la génesis de la forma son inmanentes a la materia misma*. [3]

La forma adquirida por estas estructuras está íntimamente ligada con otras dos características: pretensión y deformabilidad.

La forma de la superficie de las estructuras textiles que nos ocupan ha de ser anticlástica, éstas pueden pretensarse en su totalidad sin cambiar su forma general y están muy definidas las líneas de carga, tanto de presión interna como externa. Los tipos genéricos de superficies anticlásticas son: cono, silla de montar o paraboloide hiperbólico, y superficies de crestas y valles. La combinación e hibridación de estas formas da lugar a muchas más opciones. La geometría superficial de la membrana necesita definirse por su “equilibrio de pretensión interno” dentro de un predeterminado sistema perimetral de soporte. La búsqueda de la forma de equilibrio es el proceso para encontrar la forma a partir de unas condiciones de borde, una estructura de soporte interna y/o externa. La forma superficial será resultado de la elección de las condiciones de borde y de la elección de los coeficientes de pretensado dentro de esos bordes.

La pretensión contribuye a la rigidez de la membrana. Tanto mayores sean los radios de curvatura (más planos), harán falta valores de pretensión más altos para controlar el tamaño de las deformaciones en la membrana.

La deformabilidad es una característica importante y útil en las estructuras textiles. La flexibilidad de los soportes de la membrana, y la articulación de sus anclajes también se une a la deformabilidad, haciendo que quede asegurada la estabilidad general, como un sistema conjunto.

Las estructuras de membrana tensada ofrecen una variedad ilimitada de formas (profusión de formas), ofreciendo diferentes cualidades espaciales. A través del proceso de búsqueda de la forma se delimita el área a cubrir y la disposición de los soportes estructurales internos y externos así como las condiciones de borde dentro de las cuales se encontrará la posición de equilibrio de la estructura de membrana tensada. Según estas condiciones de borde concretas, se conseguirá una forma de membrana particular.

La forma deberá responder a una geometría de doble curvatura para que toda la superficie esté en tensión homogénea. La curvatura de la forma proporciona estabilidad estructural y rigidez, así a mayores radios

de curvatura, la membrana soportará esfuerzos más grandes, y con mayores curvaturas, menor esfuerzo como resultado de las cargas aplicadas, lo cual permite diseñar estructuras más ligeras. La continua tridimensionalidad de las membranas de doble curvatura requiere una definición de su geometría precisa en los cálculos y patrones de corte que requiere modelos tridimensionales para generar estas formas. Deberá experimentarse en el proceso de diseño con maquetas y aplicar métodos de cálculo, programas o softwares específicos para el cálculo de estas estructuras, garantizando la comprensión del estado de equilibrio tensado característico de las mismas.

Existe una interdependencia entre la forma y la eficacia estructural, de manera que hay que seguir la lógica y los principios de las estructuras mínimas, con sus características de esfuerzos internos mínimos y de masa constructiva y energía reducidas para encontrar soluciones sencillas y eficaces, y en consecuencia, bellas.

#### b. Morfogénesis

Morfogénesis (del griego "morphè" que significa forma y "génésis" creación, literalmente el "origen de la forma"), es el proceso biológico que lleva a que un organismo desarrolle su forma.

La relación entre vida y forma nos lleva directamente a la relación entre forma y fuerza, cuestionarse qué fuerzas y qué procesos son generadores de formas de vida. *Las formas de la vida y la vida de las formas.* [2]

Morfogénesis es un concepto que tiene mucho que ver con el de la *Autoformación* que acuñó Frei Otto en los años 50.

Desde la observación y el análisis de las formas naturales y de sus procesos de generación, del dinamismo que se puede percibir en ellas, y en su constante evolución, en su naturaleza efímera, se experimenta con esos procesos para comprenderlos y descubrir lo que no se ha buscado, se encuentra lo autogenerado.

Hay un estrecho vínculo entre naturaleza y arquitectura, lo que nos invita a compartir conceptos de un ámbito a otro. Adquirimos el concepto de morfogénesis, trayendo consigo el concepto de organismo. Cambiamos la concepción de nuestros prototipos estructurales en cuanto experimentamos con la perspectiva de descubrir la autogeneración de su forma, su morfogénesis. Se percibe de manera evidente la relación entre las tensiones y la forma. Se concibe la forma como un organismo que crece y se desarrolla en sí mismo. Algo implícito, que va ligado al potencial de su material, su comportamiento natural, su estado de equilibrio. El descubrimiento de la forma es un proceso de optimización de esfuerzos.

Y el resultado de este proceso deviene en un elemento bello.

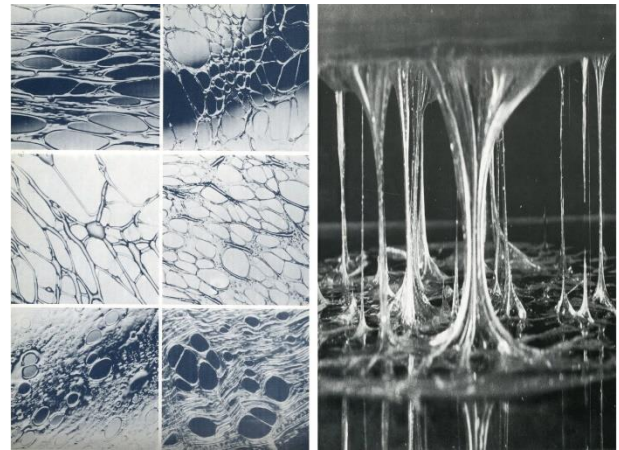


Figura 3. *Threads in Liquid State*, Institute for Lightweight Structures (IL 28) 1994.

Para llevar a cabo estos procesos, existe una controversia entre el diseño digital y la experimentación física. En la actualidad hay un amplio desarrollo de los medios informáticos que abre muchas posibilidades de experimentación digital, que permite hacer cálculos estructurales mucho más fluidos y llegar a conclusiones de diseño gracias a los programas cada vez más desarrollados. Pero hay limitaciones en ese proceso digital, se trabaja desde un marco establecido, como herramienta para resolver lo que se propone se obtienen resultados brillantes, pero no es la herramienta ideal para proponer. Citando a Frei Otto: *El ordenador sólo puede calcular lo que ya está conceptualmente dentro de él; en los ordenadores sólo encuentras lo que buscas. Sin embargo, con la experimentación libre se puede encontrar lo que no se ha buscado.* [4]

La morfogénesis es un proceso de descubrimiento de los materiales, su comportamiento, su potencial, sus esfuerzos, la interacción entre ellos, la búsqueda de todo elemento físico del equilibrio, la sabia optimización de esfuerzos que se descubre sin imponer la forma desde fuera. Desde condiciones externas del entorno se despliega una profusión de formas posibles, dentro de las cuales, el propio material describe su posición ideal.

Por ejemplo, las telas de araña, nunca son iguales, ya que las condiciones de entorno cambian en cada caso, pero el proceso para generar esas formas es similar en todos los casos. La araña conoce el material que ella misma produce, y sabe optimizar su potencial, generando a base de líneas una red que responde a estrategias de suma eficiencia estructural, que geoméricamente son clasificables desde el punto de vista humano. [5] No se trata de reproducir esas geometrías, se trata de entender cómo funciona ese material en la generación de su forma. La naturaleza

no es un modelo a imitar, se investigan sus fenómenos sin pretensiones de aplicación a la arquitectura, sólo comprendiendo sus procesos. [6] A este nivel de profundidad el concepto de morfogénesis se queda en una analogía metafórica, pero tiene gran potencial teórico ligándolo con el ya definido por Frei Otto de autogeneración de formas. Rescatar y adaptar conceptos de otras disciplinas propicia el replanteamiento de los procesos que de otra manera se asumirían por defecto, o no serían planteados, aporta nuevos puntos de vista si el concepto es adecuado y ofrece conceptos ya existentes para poder describir ciertos procesos o elementos complejos que se convierten en patrones comunes en la observación y análisis de este tipo de estructuras. Además de aportar un grado de interdisciplinariedad a los ámbitos científicos, que parecen estar muy desligados. El filósofo Manuel de Landa ya utiliza el término morfogénesis en sus teorías y bajo la influencia del ya citado G. Deleuze y Felix Guattari, definiéndolo como *la producción de estructuras estables surgidas de flujos materiales*. [3] Es una concepción en discursos más abstractos, pero se establecen analogías interesantes en las nociones de estos términos.

Acompañando al concepto de morfogénesis, también del campo de la biología, y gracias a Niklas Luhmann (entre otros) del campo de la sociología, podríamos rescatar y desarrollar el concepto de *autopoiesis*, [7] en tanto en cuanto planteásemos los prototipos estructurales de membranas a tensión (extrapolable potencialmente también a las estructuras desplegables y recíprocas) como *organismos*. Claro que hablamos de estos conceptos para apropiarnoslos desde el ámbito de la arquitectura y requieren una cierta redefinición, funcionando luego como conceptos llenos de contenido de cierta complejidad, que simplifican los discursos al poder disponer de ellos. Sin entrar en profundidad, y dejándolo en calidad de metáfora, se plantean cinco propiedades básicas (redefinibles análogamente en el campo de la arquitectura) que caracterizan el fenómeno autopoietico, y que pueden cobrar coherencia en el discurso arquitectónico: autonomía, emergencia (de emerger), clausura operativa, autoconstrucción de estructuras o autoestructuración y reproducción autopoietica. Habría que profundizar sustancialmente en esta materia para darle un sentido estricto en el ámbito arquitectónico, pero resulta interesante en tanto en cuanto se califica un prototipo arquitectónico como organismo (evidentemente redefiniendo en cierto sentido este concepto biológico) utilizar términos que tienen coherencia dentro de los campos en los que se plantea la analogía. En esta idea orgánica, del proceso de búsqueda de la forma del equilibrio, del proceso de

diseño, *la forma externa de la obra de arte, al igual que la de las plantas y los animales, debería ser fruto de una fuerza o esencia interior, en lugar de venir impuesta desde el exterior*, citando palabras de Alan Colquhoun. [8] Si comparamos un prototipo con un organismo vivo, tiene sentido ir a buscar en el análisis y observación de la naturaleza, conceptos que ya describen el funcionamiento de elementos o procesos naturales, y que pueden iluminar características o procedimientos en el recorrido del diseño arquitectónico. Entender el equilibrio natural, pasa también por asumir el dinamismo de todo sistema estructural. Ese movimiento, más o menos perceptible, nos aleja de la arquitectura tradicional estática y masiva, y confiere a las estructuras ligeras un carácter dinámico, en cierto modo vivo.

### 3. Morfogénesis de la Membrane House

En el proceso de diseño de la Membrane House, ha habido diferentes etapas, y mientras permanece siendo objeto de estudio, se vuelve y se avanza en dichas etapas del proceso. No es todo el proceso de diseño lo que se pretende exponer en este artículo, sino el proceso de generación de la forma, el proceso de experimentación libre por el que se obtuvo la forma en equilibrio que representa el prototipo. Se podría considerar que esta morfogénesis estaría en el inicio del proceso de diseño, siendo desde luego un proceso diferente al aplicado en la arquitectura convencional. Primero se plantearon las condiciones de partida, el área que debía ocupar en planta, la función que debía desempeñar y el volumen que podía abarcar partiendo de las bases del concurso eme3, edición 2016.

La solución de una tensoestructura resolvía de la manera más eficiente las condiciones de transportabilidad y desmontaje que planteaba el concurso, además de ofrecer una versatilidad interior muy amplia. Se planteó a escala el rectángulo en planta de 2mx3m que correspondía a las condiciones de partida, y por las premisas de ser transportable y desmontable se decidió para la estructura soporte utilizar barras de un máximo de 1,40m. Se planteó una unión de dichas barras flexible, que no determinara su forma en la composición de elementos, generar unos nexos que aceptaran recibir un máximo de 6 barras sin fijar su posición.

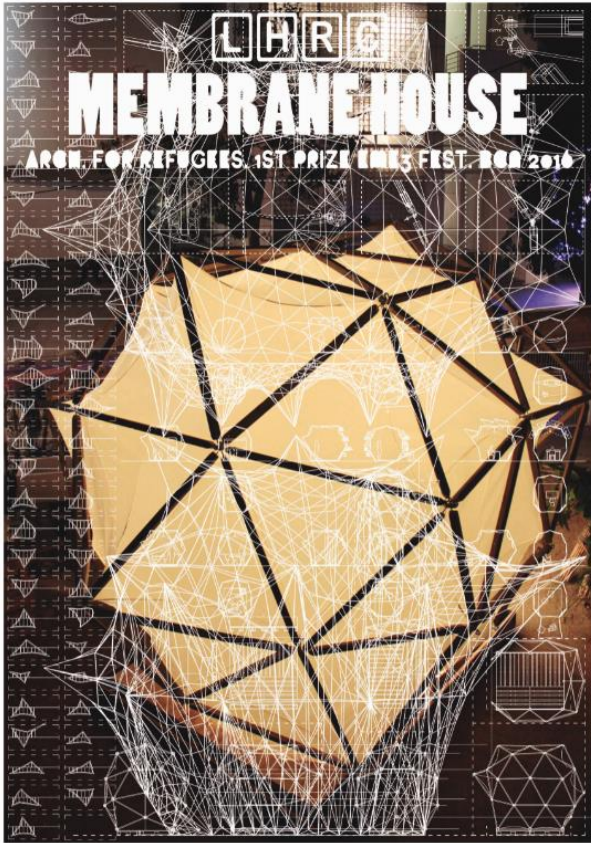


Figura 4. Póster para Verkami, Membrane House, LHRG Colectivo de Arquitectura Ligera.

Optimizando las medidas máximas que nos permitían las bases del concurso, y con la medida máxima de barras establecida, se fue componiendo una malla triangular, que podía optimizar en cuestiones volumétricas los máximos dados. Se trabajó a nivel de maqueta con barras de madera, y la membrana fue planteada con lycra isotropa en términos de elasticidad. Los puntos de conexión entre la red triangulada de barras rígidas con nudos flexibles y la membrana, estaban abocados a ser dichos nudos, que ya en su esencia son elementos nexos, de anclaje. Teniendo planteados los puntos de anclaje en planta de la red de barras, se generaba un volumen sin ninguna rigidez al ser todos los nudos libres. Cuando se fue anclando la membrana a los diferentes nudos, el sistema cobra rigidez y estabilidad. La flexibilidad de los nudos permitió que la estructura de barras comprimidas en combinación con la membrana y sus esfuerzos a tracción, generase su forma final, en la cual se encuentra el equilibrio y la estabilidad. Los nudos no sólo eran flexibles en la orientación de las barras recibidas, sino que permitían un margen de entrada en la recepción de las barras, pudiendo éstas quedar en su posición de equilibrio más fuera o más dentro, más cerca del centro del nudo o más lejos, obteniendo una longitud de barra de la red triangulada más larga o más corta.

En cuanto aparecían diferentes medidas de barras, se clasificaron en 7 tipos diferentes, con medidas que oscilaban entre 80cm y 126cm. La curvatura de la membrana nos la ofrecía la resistencia del material y la distancia entre los anclajes, describiendo curvaturas con efectos estéticos bellos desde el exterior y desde el interior del prototipo en maqueta. El planteamiento simplificado es una red de barras que funcionan a compresión, equilibradas y estabilizadas por una membrana continua que trabaja a tracción. Esto sería si fuese un sistema cerrado, es decir exento, al ser un conjunto abierto por estar anclado al suelo (a la estructura de base) y tener la apertura de acceso, habría barras que también trabajan a tracción, por lo que se colocan unos cables dibujando estas líneas de tensión.

La estructura triangulada de barras a compresión hace referencia a una geodésica, donde la geometría de la superficie sería claramente de curvatura sinclástica. Al ir modificando la longitud de las barras y los ángulos de conexión, se deforma la geometría de lo que sería esa media cúpula, obteniendo puntos exteriores de anclaje, con diferentes distancias entre sí, que hacen que la membrana con un patronaje triangular encuentre la estabilidad y rigidez del sistema gracias a su doble curvatura.

La morfogénesis de esta membrana, pasó por la experimentación en maqueta, y por la fase de *FormFinding* digital gracias al software WinTess 3.0 [9].

Se encuentra así su forma definitiva como resultado de unas condiciones de borde determinadas, y de las propiedades del material principal utilizado en el prototipo: membrana Precontraint 502 Satin, donado por la empresa Serge Ferrari.

#### 4. Conclusiones

Cambiar la mirada para descubrir lo no buscado, desde la no imposición, planteando un nuevo proceso de investigación a través de la observación, el análisis y la experimentación, una nueva forma de proyectar, replanteando el proceso de diseño arquitectónico en estructuras ligeras. Estructuras que pueden entenderse como organismos, con carácter dinámico (atributo de temporalidad), cambiando también la concepción de la obra, ampliando horizontes a conocimientos interdisciplinares que potencien el saber compartido.

Trabajar desde las características propias del material y desde su comportamiento natural, buscando el énfasis en la relación entre estructura y forma. Perseguir los principios de lo mínimo, de la optimización, eficiencia estructural, y sencillez que nos abocan a resultados de gran atractivo estético.

## Referencias

- [1] Foster, B.; Mollaert, M. "Arquitectura Textil. Guía Europea de Estructuras Superficiales Tensadas"
- [2] Songel, J. M. "De Goethe a Frei Otto: un itinerario romántico en busca de las formas de la vida y sus fuerzas generadoras en la naturaleza y en la técnica."
- [3] De Landa, M. "Inmanencia y trascendencia en la génesis de la forma" N°28 Revista Arquine, 2004
- [4] Songel, J. M. "Frei Otto. Conversación con Juan María Songel"
- [5] Zschokke, S. University of Basel, Section of Conservation Biology. Spider Web Gallery.
- [6] Songel, J. M., "Frei Otto y el debate sobre la génesis de la forma"
- [7] Rodríguez M., D.; Torres N., J. "Autopoiesis, la unidad de una diferencia: Luhmann y Maturana." Sociologias, Porto Alegre, año 5 n°9, jan/jun 2003, p. 106-140.
- [8] Colquhoun, A. "La arquitectura moderna: una historia desapasionada". G. Gili. Barcelona, 2005 (2002).
- [9] Software desarrollado por Ramon Sastre.