PONENTE

51/85

TÍTULO

Morfología bio-inspirada al tejido del cactus. Construcción de modelos elásticos en bandas de neumáticos de bicicleta reutilizadas

AUTOR

Ludovica Rossi

Universitat Politècnica de Catalunya. Ludovica Rossi titulada como arquitecto en la Università degli Studi di Roma 3 (2004), Máster Universitario de Tecnología en la Arquitectura en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona – UPC (2010). En la actualidad es doctoranda en el programa Tecnología de la Arquitectura, Edificación y Urbanismo (ETSAB – UPC) y desarrolla el diseño de proyecto en su estudio de Salou (Tarragona).
lurossi@coac.net

 ISSN: 2531-1840 e-ISSN 2603-6592

Morfología bio-inspirada al tejido del cactus. Construcción de modelos elásticos en bandas de neumáticos de bicicleta reutilizadas.

Bio-inspired morphology to the cactus tissue. Construction of elastic models in reused bicycle tire bands

_Ludovica Rossi

METODOLOGÍA

Se presentan los resultados de parte de la tesis doctoral que estudia la morfología bio-inspirada al tejido del cactus vivo. La metodología principal aplicada se basa en la construcción de modelos físicos para estudiar la relación entre las fibras orgánicas y el comportamiento del tejido en su conjunto en campo elástico (y no rígido). Empezado por observar diversos ejemplos de tejido seco de cactáceas por medio de la fotografía macro con y sin fuelle de ampliación óptico. La reproducción del tejido con prototipos a pequeña escala permite verificar cuales mecanismos morfogenéticos están ligados al sistema constructivo. Por ser un objeto tangible, el modelo está sujeto a las dinámicas físicas que dependen del tamaño, la geometría, el comportamiento de los materiales, la fuerza de gravedad, etc.

Las plantas cactáceas han evolucionado para responder a climas áridos, han reducido el tejido resistente a favor de tejido no especializado para la acumulación de líquidos y otras sustancias nutritivas. La estructura de madera se encuentra en el interior y es visible si la planta está cortada o se ha secado de forma natural. El tejido seco se compone por sumatoria de unas franjas de madera de forma curvilínea rígidas, el sistema es resistente a la compresión y ha perdido flexibilidad. Cuando el tejido está vivo, las franjas se muestran como una estructura elástica que adapta su curvatura a las necesidades fisiológicas del organismo. Se distinguen dos mecanismos morfológicos: la franja, analizada individualmente, se comporta como un resorte que ejerce y recibe unos empujes en relación a las franjas circunstantes; el tejido en su conjunto trabaja de forma similar a una esponja o fuelle que expande y contrae sus tejidos para responder a las variaciones habitales.

En este contesto, cómo obtener la morfología ondulada observada en los cactus es parte del interrogante biomimético. El objetivo de reproducir las dinámicas naturales del tejido vivo ha determinado la preferencia hacia el uso de materiales con propiedades elásticas y/o flexibles. El uso de materiales deformables permite reproducir las propiedades de adaptabilidad y representa un punto límite en el control de la forma arquitectónica. Para reproducir los mecanismos biológicos de la planta es necesario encontrar un sistema que tenga un adecuado equilibrio entre rigidez y elasticidad. Por diferentes niveles de aproximación los modelos permiten estudiar la morfogenética del tejido vivo.

La construcción de los modelos se orienta hacia una morfología que reproduce los mecanismos orgánicos y mantiene análogas características de adaptabilidad. Desde los primeros experimentos en franjas de papel se ha llegado a utilizar la banda de rodadura de neumáticos de bicicletas reutilizados. Este material es muy flexible por las características de la goma, mientras el tejido textil en su interior proporciona una cierta rigidez, ofreciendo un límite a la deformación elástica de la goma. De forma similar a la planta viva, este material permite construir unas franjas que pueden adaptarse a la morfología general de la estructura, sin por otra parte tener que conformar a priori la forma y geometría de las mismas.

Independientemente del material utilizado, la fibra es reproducida por una banda que tiene la longitud como dimensión predominante, luego la altura es mayor que el espesor de la sección, cuya medida es en la práctica irrelevante en comparación a las dos anteriores. La flexibilidad de los elementos es obtenida por geometría y forma, y no únicamente por el tipo de material empleado. Por su características geométricas, la franja está sujeta a doblarse a los esfuerzos laterales. Esta geometría permite que mientras más larga sea la franja más flexible y deformable sea el elemento morfológico básico.

El conjunto de las franjas, más o menos deformadas, y unidas entre ellas en un ritmo más o menos regular o aleatorio, construye una superficie que se extiende en el espacio tridimensional y que se define como una malla. La combinación de las deformaciones asociadas a las uniones entre las franjas genera dos grupos morfológicos, inspirados en el tejido del cactus vivo y que investigan la correlación entre fibras elásticas. La primera configuración une las franjas neumáticas en un ritmos regular alternado obteniendo una malla sinusoidal regular. El sistema trabaja a tracción y, de forma similar a una membrana, la malla toma rigidez según los esfuerzos externos aplicados. La segunda configuración pre-deformada las franjas aprovechando la flexibilidad por forma. Según como se pre-conforman las franjas se obstine una morfología autoportante por el equilibrio de las fuerzas internas y de fricción que se generan. En este caso la deformación de las fibras es un elemento activo de la definición morfológica del sistema.

La malla en su conjunto puede asumir diversas configuraciones dependiendo de la distribución de las franjas, las deformaciones aplicadas y el tipo/secuencia de las uniones. Asimismo su comportamiento no depende únicamente del material sino también de la geometría y forma de la franja definida como elemento morfológico de base.

Trabajando en campo elástico, no rígido, los modelos físicos permiten una inversión el paradigma: no se dimensiona el elemento arquitectónico por la capacidad portante del material sino que resulta necesario adaptar la forma a las características físicas del material. Trabajar en el espacio tridimensional y definir un objeto tangible permite observar el comportamiento del material altamente flexible, como la banda neumática, donde la forma varía según el estado de tensiones. Los modelos a pequeña escala permiten definir la forma según las deformaciones y el comportamiento físico del material. Esta metodología ha ofrecido la posibilidad de llevar al límite la morfología bio-inspirada al tejido vivo del cactus y verificar la reproducibilidad de las dinámicas naturales del referente orgánico.

Agradecimientos

Un especial agradecimiento al profesor arquitecto Dr. Fernando Ramos, Departament de Construccions Arquitectòniques I de la Universitat Politècnica de Catalunya, por sus aportaciones y revisión científica de este trabajo. Al profesor arquitecto Dr. Piergiorgio Rossi, de la Univerità degli Studi di Roma TRE, por su soporte e inspiración. Al Dr. Stefano Mancuso, profesor de la Università di Firenze director y fundador de LINV - International Laboratory for Plant Neurobiology - por su asesoramiento y evaluación de los comportamientos del mundo vegetal.

TEXTO DE REFERENCIA

Palabras clave

Morfología, bio-inspiración, deformación, flexibilidad, geometría, cactus, neumático de bicicleta, búsqueda de forma, modelos físicos.

Morphology, bio-inspiration, deformation, flexibility, geometry, cactus, bike tire, form finding, physical models.

Resumen

El modelo se inspira la estructura interna de las plantas cactáceas e investiga la relación entre las fibras orgánicas y la generación de la forma. El objetivo de reproducir la propiedad de adaptabilidad del tejido vivo ha determinado la preferencia hacia el uso de materiales con propiedades elásticas. Para obtener la morfología ondulada de la estructura del cactus, la construcción de modelos se ha orientado al uso de bandas de rodadura de neumáticos de bicicleta reutilizados. La realización de prototipos a pequeña escala permite verificar cuales mecanismos morfogenéticos están ligados al sistema constructivo. Por ser un objeto tangible, el modelo está sujeto a las dinámicas físicas dependiendo del tamaño, la geometría y el comportamiento de los materiales. Esta metodología permite llevar al limite la morfología bio-inspirada en el tejido vivo del cactus y verificar la reproducibilidad de las dinámicas naturales del referente orgánico. Se define una malla obtenida por sumatoria de elementos lineales de base. La flexibilidad de las franjas es obtenida por geometría y forma, no únicamente por el material elástico. La malla en su conjunto varía la morfología según la distribución de las franjas, la combinación de las deformaciones y el estado de tensiones aplicados.

The model is inspired by the internal structure of cacti or Cactaceae plants and researches the relationship between organics fibers and the generation of form. The objective of reproducing the adaptability property of living tissue has determined the preference of using materials with elastic properties. To obtain the undulating morphology of the cacti structure, model construction has been directed to the use of reused bicycle tires. The realization a small-scales prototypes allows us to verify which morphogenetic mechanisms are linked to the constructive system. Being a tangible object, the model is submitted to the physical dynamics depending on the size, the geometry and the behaviour of the materials. This methodology brings the morphology inspired in the cacti living tissue to the limit and verifies the reproducibility of the natural dynamics of the organic referent. You define a mesh obtained by summation of basic linear elements. The flexibility of the stripes is obtained by geometry and shape, not only by the elastic material. The mesh as a whole varies it's morphology according to the distribution of the stripes, the combination of the deformations and the state of tensions applied.

Las plantas cactáceas han evolucionado para responder a climas áridos y su estructura interna de madera tiene la capacidad de adaptarse a las variaciones de hábitats extremos [1]. El tejido vivo altera su forma dentro de unos límites morfológicos como respuesta a las necesidades fisiológicas del organismo, cuyo objetivo es crecer. El uso de materiales deformables permite reproducir las propiedades de adaptabilidad del tejido vivo y representa un punto límite en el control de la forma arquitectónica. Cómo obtener la morfología ondulada observada en los cactus es parte del interrogante biomimético. El objetivo de reproducir las dinámicas naturales del tejido vivo ha determinado la preferencia hacia el uso de materiales con propiedades elásticas y/o flexibles.

La metodología principal de este estudio es la construcción de modelos físicos que permitieran observar la relación entre las fibras y el comportamiento del tejido en su conjunto. El objetivo específico es estudiar el comportamiento morfológico del tejido orgánico por medio de la reproducción de la forma física. La búsqueda de una aproximación hacia la morfología orgánica para la construcción de una estructura bio-inspirada [1] tiene “sentido, si realmente existe una semejanza geométrica entre los mecanismos que se comparan” [2]. Para reproducir los mecanismos biológicos de la planta, en la construcción de los modelos físicos, es necesario encontrar un sistema que tenga un adecuado equilibrio entre rigidez y elasticidad. Por diferentes niveles de aproximación los modelos permiten estudiar las relaciones entre la morfología del tejido estructural del organismo y la fisiología de la planta. O sea, definir la morfogenética del tejido vivo.

 ISSN: 2531-1840 e-ISSN 2603-6592

Primeros experimentos

En una primera observación de la estructura de la planta se visualiza la forma ondulada del tejido y, ampliando la imagen, se hace evidente su crecimiento en la dirección longitudinal [3]. La fragilidad del tejido seco se evidencia entre las uniones de las fibras y la sección ofrece cierta resistencia [2]. En esta fase la interpretación formal de la madera seca lleva a la reproducción manual por medio de franjas de papel. El mecanismo es simple y responde a la necesidad de copiar el ejemplo natural con el mínimo esfuerzo de manipulación y coste. Cortar las tiras de papel y unirlas con grapas metálicas es un procedimiento manual sencillo que en pocos pasos permite tener entre las manos una malla deformable. Este ha sido el primer instrumento de análisis morfológico que pone en relación el tejido orgánico con su comportamiento y génesis.

Los modelos de partida unen las franjas en forma alternada y obtienen una malla similar a un entramado romboidal, que ofrece algo de resistencia a flexión por la sección vertical de las franjas. La malla, para estar abierta, como el tejido seco de los cactus, necesita ser tensada desde el exterior. En alternativa, las franjas se ponen en tracción con la introducción de elementos internos que trabajan a compresión [3] [4]. Se definen unos elementos interiores como factor de cambio morfológico en el tejido; estos actuadores generan una contraposición de esfuerzos que abren la malla en todos los modelos realizados con franjas flexibles. La morfología definida, se comporta como un fuelle y corresponde a la necesidad fisiológica de la planta de acumular líquidos y otras sustancia nutritivas en los tejidos no especializados, en contra de la reducción de los tejidos resistentes [4].

El ejemplo orgánico muestra un crecimiento irregular de la estructura de madera, por lo cual en otras pruebas se ha orientado la construcción con franjas unidas siguiendo un ritmo discontinuo e irregular [4]. Se generan entre las franjas unas acciones que permiten al tejido quedarse abierto, manteniendo un cierto grado de elasticidad para adaptarse a posibles tensiones externas. En este ámbito morfológico, la franja, analizada individualmente, se comporta como un resorte que ejerce y recibe unos empujes en relación a las franjas circunstantes. El entramado define una malla abierta gracias a la diferencia de longitud, y las mismas franjas trabajan como actuadores internos. El resultado es una malla que se abre por tensiones internas, respetando a un nivel más profundo la morfología natural.

Diferencias entre el tejido seco y vivo de la planta

Resulta difícil observar el crecimiento interior del tejido de la planta para poder responder a un sistema de agregación y organización celular específico. El complejo entramado de la madera de cactus muestra la estratificación de material en el sistema vascular de la planta. Por medio de la variación de la materia leñosa acumulada, se interpreta la historia del tejido, pero en su desarrollo no será posible reconstruir la historia de los esfuerzos de presión interior que han determinado su configuración.

Evaluando el tejido orgánico como franjas interconectadas entre sí, observamos que:

- En el tejido seco las franjas de madera de forma curvilínea son rígidas, el sistema es resistente a la compresión y ha perdido flexibilidad.

- En el tejido vivo las franjas son elásticas para permitir a la planta crecer y adaptarse a las acciones externas y a la acumulación de líquidos internos.

En el tejido vivo las franjas se muestran como una estructura elástica que adapta su curvatura a las necesidades fisiológicas del organismo [3]. La construcción de los modelos ha buscado una morfología que pudiera mantener análogas características de adaptabilidad y acercarse a los mecanismos orgánicos [2]. Las franjas flexibles permiten al tejido adaptarse al crecimiento y, de forma similar, se ha buscado construir unos modelos cuyas franjas pudieran adaptarse a la morfología general de la estructura, sin por otra parte tener que conformar a priori la forma y geométrica de las mismas.

Características generales de los modelos físicos

Los modelos físicos realizados están sujetos a las siguientes características generales, válidas de forma transversal a todo el conjunto de pruebas efectuadas:

- El material principal define la relación entre la morfología del modelo y la interacción de las tensiones que se generan. El comportamiento del modelo será diferente si el material es más o menos flexible/rígido. La forma y posibilidad de trabajar los materiales empleados permitirá la construcción de un modelo u otro.

- Geometría y jerarquía de los elementos (dimensiones y forma). Las proporciones entre los componentes son un factor de coherencia en fase de realización, observación y comparación de los modelos construidos.

Si bien un modelo es una aproximación, en referencia a la construcción a escala humana, está sujeto a las dinámicas físicas según su tamaño, a las dimensiones y al comportamiento de los materiales por ser un objeto tangible. Esto permite verificar cuales mecanismos morfogenéticos están ligados al prototipo constructivo, y son observables desde los primeros modelos construidos en papel, cómo:

- El efecto fuelle de la malla construidas a partir de uniones regulares que se abre y cierra tanto por la acción de esfuerzos de tracción externos como por la introducción de actuadores internos.

- El efecto resorte que ejercen las franjas entre sí en los modelos construidos a partir de uniones irregulares con largos diferentes, donde el tejido queda abierto por equilibrio de esfuerzos internos.

La flexibilidad de los elementos es obtenida por geometría y forma, y no únicamente por el tipo de material empleado. La malla en su conjunto asume diversas configuraciones dependiendo de la distribución de las franjas en el sistema y del tipo de uniones aplicadas. Analizando más en detalle algunos de los modelos físicos realizados observamos comportamientos específicos en función de la relación entre dimensiones, uniones y materiales utilizados.

Materiales principales en la construcción de los modelos físicos

En el desarrollo de los modelos físicos se ha experimentado con diversas medidas, proporciones y deformaciones que han determinado una variedad de configuraciones, y que a su vez han permitido definir las características geométricas y formales de la estructura. Los primeros experimentos en papel han sido aptos para estudiar las configuraciones morfológicas iniciales de la malla, y definir la figura geométrica de la franja. Implementando el uso de otros materiales era visible como cada uno respondía de modo diferente a la morfología que se estaba desarrollando. Estas variaciones han marcado el recorrido hecho hacia la búsqueda de una morfología orgánica inspirada en el tejido de madera del cactus vivo.

Madera. Los modelos han sido reproducidos en delgadas franjas de madera [5]. Este material ha presentado problemas de flexibilidad en las áreas de mayor curvatura de las bandas. En el cambio de dirección de la curvatura se generan fisuras longitudinales (paralelas a la longitud de la franja) e, incluso a pequeña escala, sería necesario aplicar unas modificaciones para que el material pudiese adaptarse a la forma.

Un ejemplo que desarrolla el equilibrio entre la tracción y compresión de franjas de madera es el Twist Pavilion v1.0 realizado por EmTech Studio, AA School of Architecture, en la Timber Expo 2015 (Birmingham, U.K.) [5] [6]. La instalación en forma de Banda de Möebius se compone por una estructura de bandas de madera de contrachapado, que son las costillas del sistema y tienen un desarrollo lineal, a las cuales se acoplan simétricamente dos franjas de madera más delgadas que siguen un movimiento curvilíneo sinusoidal. Las tres franjas definen el elemento base que se repite en el espacio con variaciones sucesivas para obtener la superficie final. Un sub-sistema de peines perpendiculares corre a lo largo de los bordes libres de la superficie articulada bloqueando la geometría. La relación entre las costillas y las alas sinusoidales, coplanares entre sí, permite el control de las propiedades del material sometido a flexión y torsión.

Papel y Cemento. Otras pruebas han sido orientadas por la voluntad de realizar un modelo que tuviese una configuración rígida. Se han realizado dos pruebas, con poco éxito, a partir de una malla en banda de papel, que mojada en cemento blanco, ha sido colgada para seguir un proceso de secado [6]. La falta de equilibrio entre el nivel de fluidez del cemento y la capacidad de absorción del papel no han permitido alcanzar un modelo acabado. En las dos pruebas, el papel se deformaba excesivamente antes de secarse y no alcanzaba una forma rígida. Estos experimentos querían acompañar las maquetas de las fibras flexibles como otro camino posible para desarrollar la forma [7].

Existen diversos modelos de estructuras rígidas que podríamos asimilar a la morfología del cactus. Entre los ejemplos de estructuras en hormigón con trama romboidal encontramos el Palazzetto dello Sport de Pier Luigi Nervi [7], construido a Roma en el 1960 para los Juegos de la XVII Olimpiada. El caparazón está compuesto por segmentos prefabricados en forma de diamante, que se reducen en tamaño desde la circunferencia de base, con unos 60 m de diámetro, hacia la parte superior de la cúpula. Desde el interior se aprecian los nervios que se entrecruzan entre sí siguiendo un patrón en espiral, semejante a un molde invertido de una inflorescencia de girasol.

El pabellón del Lincoln Park Zoo South Pond [8] (Chicago, EE. UU.) diseñado por GANG Architects, tiene un sistema constructivo compuesto por elementos prefabricados en madera laminar, los cuales definen el patrón de la bóveda [8]. La interconexión entre los elementos se obtiene por medio de ranuras fresada a control numérico que definen el arco de curvatura de la superficie, y la extensión lineal es, en términos abstractos, infinita. El pabellón está inspirado en el caparazón de las tortugas, una estructura rígida formada por agregación de elementos. Si bien los elementos que componen la coraza no tienen la misma forma de los del pabellón (su estética parecen más similares a la estructura del cactus que a la tortuga) y las superficies

 ISSN: 2531-1840 e-ISSN 2603-6592

curvas son diferentes (el caparazón tiene una doble curvatura de una cúpula rebajada a base de una oval y el pabellón costa de la sola curvatura del arco de la bóveda), el sistema constructivo y el comportamiento estructural de pabellón responden al organismo de referencia, más que al tejido del cactus.

Estos son dos ejemplos de sistemas rígidos cuya conformación podríamos asimilar a las imágenes o forma de la fibra de madera de cactus. Ambos casos se definen a partir de las fibras como elementos rígidos, la configuración espacial de la superficie depende del tipo de patrón (secuencia en espiral o traslación lineal) y del acoplamiento de los componentes prefabricados.

Neumáticos de bicicleta. La observación de ejemplos rígidos ha puesto en evidencia con mayor claridad el interés hacia la construcción de modelos flexibles donde la relación de fuerzas internas sea dinámica y no estática. Un ejemplo de interés sobre modelos flexibles es la instalación HybGrid [9], realizada por S. Felipe y J. Truco, en 2004 a la Architectural Association School de Londres (UK), compuesta por un entramado tridimensional de franjas de fibra plástica. Las bandas son pre-conformadas favoreciendo la forma ondulada de las mismas, y entre ellas se colocan unos elementos metálicos de separación con 4 longitudes posibles. El conjunto es una malla espacial que puede generar diversas formas sin cambios significativos en el proceso de producción. La capacidad de adaptación del sistema está dada por las propiedades de deformación elástica, utilizando las características de los materiales plásticos y manteniendo la continuidad de las fibras.

Este modelo ha sido reproducido con franjas de papel y madera [9]. Las limitaciones de estos materiales, comentadas en los párrafos anteriores, ha llevado a la búsqueda de alternativas: los modelos sucesivos han sido realizados en las bandas de rodadura de neumáticos de bicicleta reutilizados. Este material es muy flexible por las características de la goma, mientras el tejido textil en su interior proporciona una cierta rigidez, ofreciendo un límite a la deformación elástica de la goma.

En los primeros experimentos [10] con neumáticos de bicicletas se ha reproducido el ejemplo de la instalación HybGrid. Los modelos realizados con el doble entramado en el espacio tridimensional muestran como a mayor extensión de la malla el comportamiento es similar a una membrana; mientras por superficies reducidas los elementos verticales permiten dar mayor rigidez a la carga vertical. El sistema en su conjunto tiene una fuerza espacial cautivadora, sin embargo el sistema no es autoportante y su realización es lenta por la complejidad de las intersecciones y el proceso manual de montaje con varillas metálicas y tornillos.

En las fases sucesivas se ha abandonado el entramado tridimensional de la malla, desarrollando experimentos con un único nivel de urdimbre. La malla plana generada por las fibras unidas entre sí tiene mayor correspondencia con el referente natural por la orientación vertical de la banda. La comparación entre los diferentes resultados obtenidos ha puesto en evidencia el comportamiento altamente elástico y flexible de las bandas neumáticas. Y en la sucesión de los experimentos se ha optado por definir la deformación de las fibras como elemento activo de la definición morfológica del sistema.

Geometría y deformación de la franja

La interpretación realizada sobre la fibra de madera del cactus prioriza una visión linear de la misma. Al evaluar el tejido como una sumatoria de células, que se agregan progresivamente en la dirección del crecimiento de la planta, se considera que la fibra se extiende en una dirección principal respecto a las otras dos. La fibra aumenta su longitud, mientras en paralelo la planta agrega tejidos para aumentar la resistencia de la sección. En los modelos físicos la fibra es reproducida por una banda (independientemente del material) que se define por tener la extensión predominante de la longitud (L) sobre las otras dos dimensiones. Sucesivamente la altura de la fibra (H) es mayor que el espesor de la sección (E), cuya medida es en la práctica irrelevante en comparación a las dos anteriores. Se define un orden jerárquico de las medidas que constituyen la banda o franja como el elemento morfológico básico para la construcción de los modelos (L>H>E). En términos morfológicos el elemento así definido se deforma, curva y flexiona a los empujes laterales. Esto permite unir las franjas entre ellas y obtener el sistema ondulado y curvilíneo que caracteriza los modelos realizados [11].

Esta geometría permite que mientras más larga sea la franja más flexible y deformable sea el elemento morfológico básico. Para segmentos cortos de franja, el sistema tiene una mayor rigidez a la flexión debido a que la altura o canto de la sección incide mayormente. Análogamente, al aumentar la medida transversal de la sección, o sea la profundidad de la banda, se reduciría la flexibilidad transversal del elemento.

Definido el rectángulo (cuya longitud es muy mayor a la altura y el espesor) se situa el elemento en el espacio tridimensional y se imagina puesto de canto respecto al plano horizontal (XZ). En el plano XZ se desarrollan las dimensiones de la longitud (L) y el espesor (E), mientras la altura (H) de la sección corresponde al eje Y. Por su características geométricas, la franja, así definida, está sujeta a doblarse por los esfuerzos laterales paralelos al plano XZ.

Si el esfuerzo está situado a un lateral de la franja, ésta se curva en forma de una C. Si aplicamos dos fuerzas a una cierta distancia entre ellas y en direcciones opuestas, cada una en una cara lateral de la banda, ésta se deformará y se obtendrá la

forma de una S [11]. La geometría rectangular de la franja concebida como un elemento linear sigue ahora una trayectoria curvilínea. A mayores niveles de deformación, la franja puede curvarse sobre sí misma de tal manera que toma la forma de una curva cerrada: una circunferencia, en forma ovalada o de pétalo. Si aumentamos la deformación en más de una curva se genera como S cerrada sobre sí misma [11]. El aumento de las deformaciones aplicadas sobre una franja dependerá del largo de la misma: a mayor longitud mayores serán los pliegues que se pueden aplicar. Podemos definir las franjas deformadas como elemento estructural pretensado porque actúan tensiones en el mismo antes de entrar en carga, es decir, antes de que actúen sobre él las acciones como el peso propio o las sobrecargas [10].

Morfología de la malla

El conjunto de las franjas, más o menos deformadas, y unidas entre ellas en un ritmo más o menos regular o aleatorio, construye una superficie que se extiende en el espacio tridimensional y que se define como una malla. La combinación de las deformaciones asociadas a las uniones entre las franjas genera dos grupos morfológicos.

Malla sinusoidal regular. La malla aparecerá como una red de forma romboidal que adquiere la forma de una superficie; y mientras más extensa más se deforma en el espacio. El sistema así conformado modifica la curvatura según las tensiones aplicadas y las fuerzas externas determinan la configuración espacial; por ejemplo a de una silla de montar y/o paraboloide [12]. Como en el caso de las membranas, el comportamiento depende esencialmente por su características geométricas de la curvatura y distorsión [11]. La malla toma rigidez según el sistema de doble curvatura aplicado.

Las bandas neumáticas asumen una trayectoria sinusoidal y su curvatura depende del ritmo de unión entre franjas y el esfuerzo de tracción aplicado a la malla. El material es altamente elástico y extensible por lo cual la introducción de elementos actuadores internos, como cilindros rígidos, limita la deformación y favorece el control de la forma [13].

Malla de franjas predeformadas. Los experimentos con franjas de largo diferente unidas de forma aleatoria han puesto en evidencia que las franjas ejercen unos empujes entre sí llegando a una configuración que mantiene abierto el tejido dependiendo de la elasticidad y flexibilidad del material sin la introducción de actuadores externos. La variación de longitud de las franjas en comparación con otras, es otro elemento a tomar en cuenta y que contribuye a la variación morfológica de una malla. Por ejemplo, en el modelo de papel donde las franjas se unen siguiendo longitudes diferentes aumenta la rigidez del sistema. Las franjas mantienen la flexibilidad por la forma y, dependiendo de la secuencia de las uniones, se curvan ejerciendo entre ellas unos empujes recíprocos que mantienen abierta la malla por sí sola. En esta solución los equilibrios internos del sistema determinan un cambio morfológico a nivel general.

En los modelos en bandas neumáticas esta solución ofrece un mayor control sobre la flexibilidad del material. Aplicar un cambio de forma a la fibra cerrándola sobre sí misma en ø significa ejercer una solicitación que modifica la fibra y la obliga a mantener una configuración determinada [14]. La sumatoria de las fibras pre-deformadas permite obtener una morfología autoportante. Por las características del material es necesario aplicar dos diversas deformaciones para obtener la morfología orgánica: girar la fibra sobre sí y deformar la malla en su conjunto. Se establece una dinámica de equilibrios que permite al sistema tomar una forma tridimensional (sin la introducción de elementos externos), como por ejemplo la de la cúpula. En general este tipo de equilibrio es más válido para los modelos en neumáticos que en papel, ya que los primeros aceptan mejor la torsión que los segundos.

Se han obtenido dos configuraciones inspiradas en el tejido del cactus vivo y que buscan investigar la relación entre fibras elásticas (no rígidas). En el caso de la malla sinusoidal regular el sistema trabaja a tracción de forma similar a una membrana y en el caso de la malla con franjas pre-deformadas se obtiene una morfología autoportante similar a un caparazón [15]. La secuencia de las relaciones entre los diferentes factores que generan la forma puede ser sistematizada con las siguientes correlaciones:

- Relación jerárquica de las dimensiones del elemento de base L>H>E.

- Deformación de la franja individual en la dirección transversal y/o perpendicular al plano de la longitud, que a su vez se diferencia por:

    - Deformación abierta en forma de C o S,

    - Deformación cerrada de la franja sobre sí misma.

- Relación entre la deformación aplicada y el largo de las franjas en la agregación de varios elementos.

- Ritmo de la uniones en relación a la deformaciones aplicadas.

Las variaciones aplicadas inciden sobre la configuración espacial de la malla, generada por agregación de elementos de base:

- Superficie anticlástica deformable en el espacio tridimensional según las tensiones aplicadas.

- Superficie sinclástica obtenida por equilibrio de fuerzas internas y de fricción.

Conclusiones: la escala del modelo

La influencia de los factores físicos depende en gran medida del tamaño del objeto. La realización de los modelos tiene en cuenta que la escala de realización es reducida. El análisis desarrollado pone en relación los elementos entre sí, ancho y largo de las franjas, ritmo y secuencia de las uniones, dentro de una escala de magnitudes parecida.

A una mayor escala de aplicación el uso de la banda de bicicleta permite formular la hipótesis de utilizar neumáticos de otros vehículos (moto, auto, camión, etc.). El tejido interno textil en caso de las bicicletas, y metálico en caso de los coches, es un componente que ofrece un límite a la deformación elástica de la goma. Plantear el uso de la banda de rodamiento del neumático para la construcción de la malla en modelos a mayor escala, significa utilizar el material para sistema tipo membrana y/o cáscaras. A mayor extensión de la malla mayor flexibilidad tiene el sistema, y mayor serán los esfuerzos a aplicar para tensar/deformar la superficie. Asimismo los modelos desarrollados permiten valorar cómo incidiría el peso del neumático de auto sobre el comportamiento de la estructura a una escala mayor. El tamaño influye en la relación con el entorno y en particular cambian las dinámicas en las cuales actúan las fuerzas físicas que nos rodean [12]. A mayor escala de los modelos físicos, por lo cual a un mayor volumen y a un mayor peso, la fuerza de gravedad incidirá de forma diferente.

Si bien “no es posible hacer una estructura de un modelo de escala que represente la estructura de tamaño completo y su comportamiento en todos los aspectos” [13], trabajar en el espacio tridimensional y definir un objeto tangible permite observar el comportamiento del material altamente flexible, como la banda neumática, donde la forma varía según el estado de tensiones. Los modelos a pequeña escala permiten definir la forma según las deformaciones y el comportamiento físico del material. Esta metodología ha ofrecido la posibilidad de llevar al límite la morfología bio-inspirada al tejido vivo del cactus y verificar la reproducibilidad de las dinámicas naturales del referente orgánico.

Notas

[1] Bio-inspiración, según la definición de Petra Gruberen “es la expresión más general para el diseño inspirado en modelos de naturaleza, incluyendo todos los niveles de abstracción, también interpretaciones puramente morfológicas” (GRUBEREN Petra. Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings. Germany, Spinger-Verlag/Wien, 2011. p. 17).

[2] HOSSDORF Heinz, HERNÁNDEZ Carlos Benito. Modelos reducidos. Madrid, Ed. IETcc, 1972. p. 76

[3] “Mirando más de cerca se observa la estructura perforada fibrosa de reducida densidad. Con un mínimo de peso se consigue un máximo de resistencia al pandeo” (ROLAND Conrad, Frei Otto: Estructuras. Albardané Francesc (trad.), Barcelona, Ed.Gustavo Gili, 1973. pp. 114-115).

[4] ALTESOR Alice, EZCURRAWZ E., Functional morphology and evolution of stem succulence in cacti. Journal of Arid Environments v.:53, Holanda, Elsevier Science Ltd, 2003. pp. 557-567

[5] The TWIST installation at Timber Expo | AA School of Architecture, 2005 http://www.arch2o.com/the-twist-installation-aa-school/

[6] La construcción de los modelos utilizaba la fuerza de gravedad para configurar el sistema de fuerzas internas. El peso del mismo material generaba el sistema de tensiones para mantener abierta la malla y dar forma a la estructura. Se aplicaba el sistema funicular desarrollado por Gaudí en sus modelos de estudio.

[7] La construcción de una estructura rígida ha sido descartada debido a que hacen referencia a la bio-inspiración del tejido seco de la planta y la morfología es estática con una sola configuración posible.

[8] “La Banda del Club de los Corazones Solitarios del Sargento Pepper”. Álbum de los Beatles.

[9] FELIPE Silvia, TRUCO Jordi. HYBGRID: Adaptabilitat/Adaptability. Quaderns d’arquitectura i urbanisme 242: Q 2.0, Barcelona, Col·legi d’Arquitectes de Catalunya, 2004. pp. 84-89

[10] ROLAND Conrad. Frei Otto: Estructuras. Albardané Francesc (trad.), Barcelona, Ed.Gustavo Gili, 1973.

[11] SALVADORI Mario, HELLER Robert. Le strutture in architettura. Edición ampliada Nervi Pier Luigi (prol.), Milano, Etaslibri, 3ª ed. 1992. pp. 207-214

[12] THOMPSON D’Arcy Wentworth. Crescita e forma. La geometria della forma. versión reducida por J. T. Bonner, Torino, Universale Scentifica Boringhieri, 1969. Titulo original “On Grow and Form” Canbridge University Press 1961

[13] ADDIS Bill. Toys that save millions: a history of using physical models in structural design. The Structural Engineer Feature, London, April 2013 Vol. 91 Issue 4. p. 13

Bibliografía

ADDIS Bill. *In Search of Some Principles of Bio-mimetics in Structural Engineering*. En: Biomimetic Research for Architecture and Building Construction. Biological Design and Integrative Structures. Editors: Knippers J., Nickel K.G., Speck T., Switzerland, Springer, 2016. Cap. 5 pp. 85-95

ADDIS Bill. *Toys that save millions: a history of using physical models in structural design.* The Structural Engineer Feature, London, April 2013 Vol. 91 Issue 4.

GRUBEREN Petra. *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings.* Germany, Spinger-Verlag/Wien, 2011

RUBY Ilka & Andreas (Eds.). *Re-inventing Construction.* Berlin, Ruby Press, 2010.

FELIPE Silvia, TRUCO Jordi. HYBGRID:*Adaptabilitat/Adaptability.* Quaderns d’arquitectura i urbanisme 242: Q 2.0, Barcelona, Col·legi d’Arquitectes de Catalunya, 2004

ALTESOR Alice, EZCURRAWZ E., *Functional morphology and evolution of stem succulence in cacti. Journal of Arid Environments v.:53*, Holanda, Elsevier Science Ltd, 2003.

VOGEL Steven. *Anca y palanca: Mecánica natural y mecánica humana*. Barcelona, Ed. Tusquets, 2000.

SALVADORI Mario, HELLER Robert. *Le strutture in architettura. Edición ampliada Nervi Pier Luigi (prol.)*, Milano, Etaslibri, 3ª ed. 1992.

ROLAND Conrad. Frei Otto: *Estructuras. Albardané Francesc (trad.),* Barcelona, Ed.Gustavo Gili, 1973.

HOSSDORF Heinz, HERNÁNDEZ Carlos Benito. *Modelos reducidos. Madrid*, Ed. IETcc, 1972.

THOMPSON D'Arcy Wentworth. Crescita e forma. *La geometria della forma.* versión reducida por J. T. Bonner, Torino, Universale Scentifica Boringhieri, 1969. Titulo orginal "On Grow and Form" Canbridge University Press 1961

Pies de foto

[1] Tejidos leñoso (xilema) de los haces vasculares de la planta cactáceas Echinopsis Validus, cactus de forma columnar donde es visible el crecimiento de la estructura portante interna a la planta por el corte horizontal recibido anteriormente. Fotografía: Ludovica Rossi - Jardins de Mossèn Costa i Llobera en el Montjuïc (Bcn), Barcelona 2010.

[2] Fotografía macro con fuelle de ampliación de la madera seca de una Cactáceas del Genero Opuntia, las fibras onduladas permiten la acumulación de líquidos y aumentan su espesor según el crecimiento del organismo. El comportamiento es similar a una esponja que expande y contrae los tejidos orgánicos permitiendo al organismo adaptarse y crecer. Fotografía: Ludovica Rossi, Barcelona, 2010.

[3] Cactus Opuntia donde se observa la capacidad de modificación de la planta para seguir creciendo más allá de una valla metálica. La planta crece dentro los espacios disponibles de la malla, dobla y gira sus tejidos. Fotografía: Ludovica Rossi, Vilassar de Mar (Bcn), 2015.

[4] Primeros modelos realizados en franjas de papel de 1 cm de altura por 30 de largo unidas por grapas metálicas de forma alternada y regular: a) malla abierta por esfuerzos de tracción externos aplicados en sus cuatros extremos; b) c) la misma queda abierta por la introducción de unas cerillas o unos globos inflados, son elementos resistentes a compresión y trabajan como actuadores internos de cambio morfológico. d) Malla con franjas de largo variable unidas con un ritmo aleatorio donde el tejido queda abierto por equilibrio de acciones internas, las mismas franjas trabajan como actuadores internos respetando a un nivel más profundo la morfología del referente orgánico. Fotografías: Ludovica Rossi, Roma, 2010.

[5] Modelo en franja de madera de 1 cm de ancho y varillas metálicas; en los puntos de máxima curvatura la franja se fisura en la dirección longitudinal de la fibra. La sección de las varillas metálicas es muy grande en relación al ancho de la franja y a la escala del modelo en general. La maqueta tiene un largo total de unos 20 cm por 10 cm de alto. Fotografía: Ludovica Rossi, Barcelona, 2011.

[6] Twist Pavillon v1.0 en madera de contrachapado de EmTech Studio, AA School of Architecture, para la Timber Expo 2015 (Birmingham, U.K.). El elemento de base se compone por: una banda central que actúa como costilla, de forma lineal o arqueada que define el desarrollo curvilíneo de la superficie; dos bandas laterales más delgadas contrapuestas que siguen un movimiento curvilíneo sinusoidal. La relación entre la costilla central y las dos alas sinusoidales permite el control de las propiedades del material sometido a flexión y torsión. Croquis: Ludovica Rossi, 2017

[7] Palazzetto dello Sport (1956-57) de Pier Luigi Nervi y Annibale Vitellozzi tiene una planta circular con un diámetro de unos 60 metros, la cúpula formada por elementos prefabricados ha sido construida en unos 40 días. Se observa el patrón en espiral de las costillas de la cúpula que sigue la misma distribución de las inflorescencias de una flor de girasol. Fotografía: Ludovica Rossi, Roma, 2010.

[8] Pabellón del Lincoln Park Zoo South Pond (estudio GANG Architects finalización de la construcción junio 2010, Chicago, EE. UU.) construido en módulos de madera laminada. El sistema está inspirado en el caparazón de las tortugas. Croquis: Ludovica Rossi, 2017.

[9] Experimento con un entramado tridimensional de doble nivel en banda de madera realizado en julio de 2011, que está inspirado en el ejemplo de la instalación HybGrid realizada por S. Felipe y J. Truco, en 2004 a la Architectural Association School de Londres (UK). Fotografía: Ludovica Rossi, Barcelona, 2011.

[10] Unos de los primeros experimentos construidos en bandas reutilizadas de neumáticos de bicicleta. Las franjas están separadas por varillas metálicas, el tejido se compone a partir de un entramado tridimensional de dos niveles trenzado según una red a base cuadrada. Para mayores extensiones del modelo tridimensional el comportamiento es similar al de una membrana. Modelo realizado en febrero 2012. Fotografía: Ludovica Rossi, Barcelona, 2012.

[11] La geometría de la franja definida por un elemento rectilíneo de forma rectangular alargada: a) la medida dominante es la longitud frente a las otras (L>H>E), este orden jerárquico conforma la banda como el elemento morfológico básico que no opone resistencia a la flexión trasversal y a la torsión según su eje longitudinal; b) deformación curva en forma de C de una franja abierta sujeta a un empuje lateral; b) deformación en forma de S de una franja abierta por dos empujes laterales situados a una cierta distancia y en las dos caras opuestas; d) deformación de la franja que se curva en un círculo con los extremos solapados entre sí; e) deformación en forma de pétalo, la banda se cierra manteniendo en contacto las caras interiores entre sí; f) deformación cerrada que aumenta el efecto de los empujes opuestos fija los extremos de la franja en una S cerrada sobre si misma. Dibujos: Ludovica Rossi, 2017.

[12] Modelo en bandas de bicicleta de 1 cm de altura y 45 cm de largo. Las franjas son unidas en un ritmo regular alternado y la malla es puesta en tensión en sus cuatro extremos con fuerzas aplicadas simétricamente dos hacia arriba y dos hacia abajo. El modelo asume la forma de un paraboloide hiperbólico con una extensión de 40x40 cm y una altura de 20 cm aprox. Fotografía: Ludovica Rossi, Barcelona, 2012.

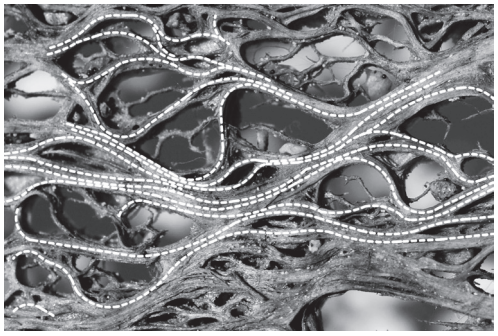
[13] Malla sinusoidal regular: a) relaciones geométricas entre la forma sinusoidal y el ángulo de abertura en el punto de unión de dos franjas - Dibujos: Ludovica Rossi 2015; b) modelo de malla en fibra de 30 cm de largo y 2,5 cm de altura es tensada en sus cuatros extremos y asume la morfología del paraboloide hiperbólico, extensión modelo 28x32 cm por unos 14 cm de altura, la deformación es controlada por la introducción de unos cilindros de PVC de 4 cm de diámetro que limitan el estiramiento del material. Fotografía: Ronald Stallard, Barcelona, 2014 (www.ronaldstallard.com).

[14] Modelo con banda de neumáticos de 1 cm pre-conformada: a) y b) fibra unida sobre sí misma en forma de pétalos alternados; c) modelo en arco que se obtiene acercando los dos extremos de una fibra deformada previamente. La deformación aplicada sobre la banda ofrece un mayor control de la flexibilidad del material y la sumatoria de las fibras pre-deformadas permite obtener una superficie autoportante. Fotografía: Ludovica Rossi, Italia 2016.

[15] Esquema de las relaciones entre la geometría de la franja en neumáticos de bicicleta, la deformación aplicada al elemento morfológico de base, la secuencia de acoplamiento de las franjas que componen una malla y las configuraciones finales de los modelos realizados. La morfología bio-inspirada en el tejido del cactus depende del como trabajan fibras elásticas según la deformación aplicada: un sistema tipo membrana con una malla obtenida por uniones regulares y un sistema autoportante con franjas pre-deformadas. Autor: Ludovica Rossi, 2017.

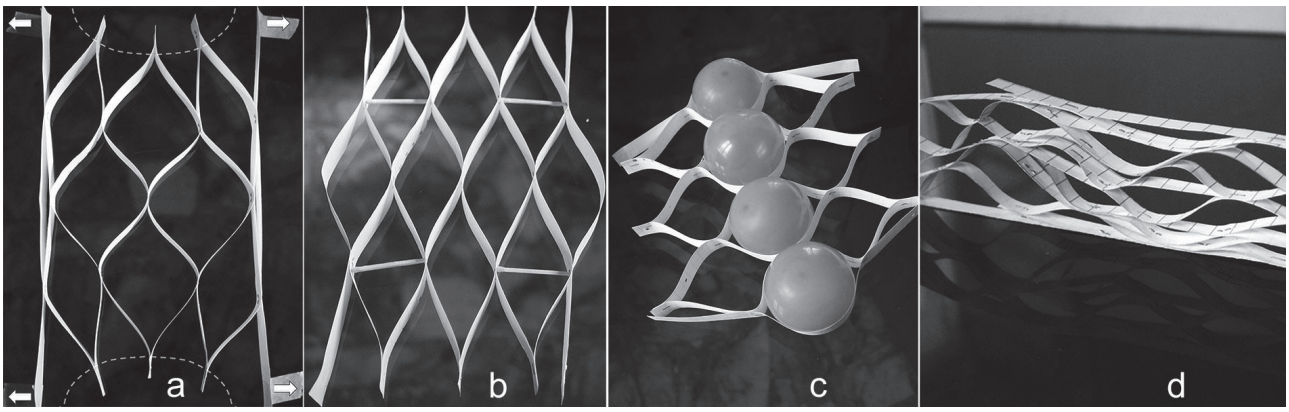
ISSN: 2531-1840 e-ISSN 2603-6592

[1]



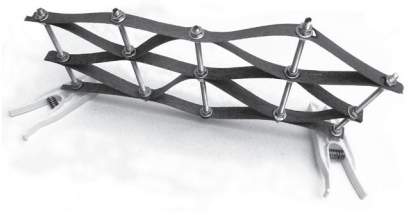
[2]

[3]

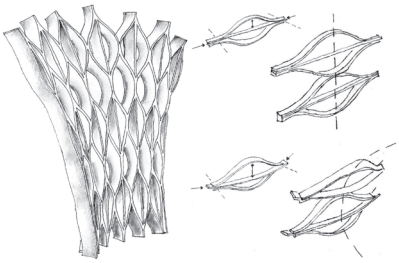


[4]

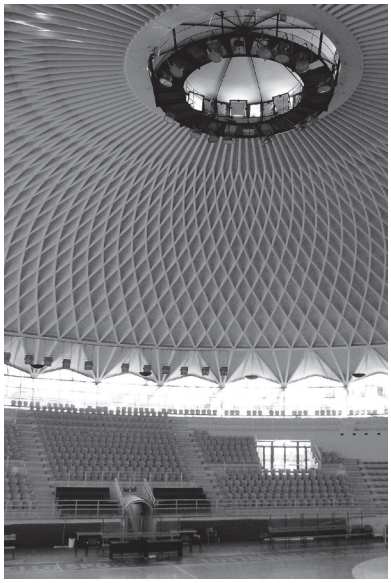
[5]



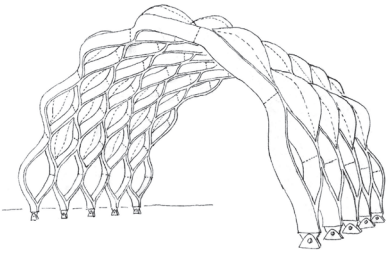
[6]



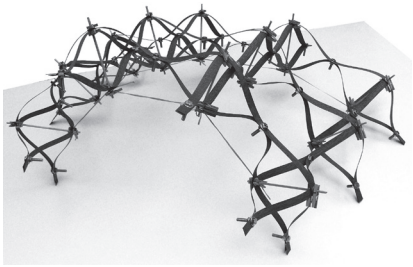
[7]



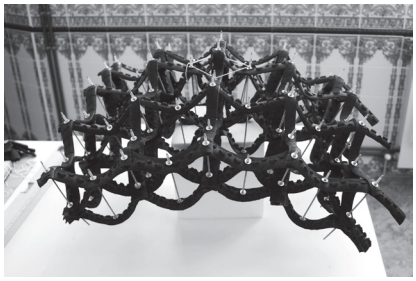
[8]

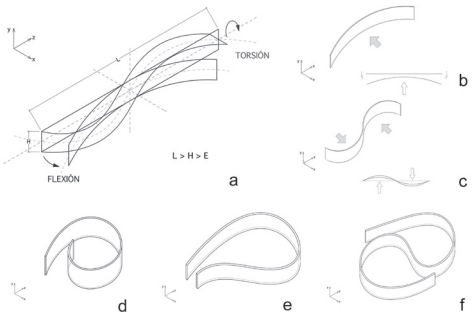


[9]

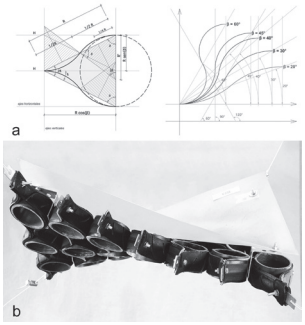


[10]

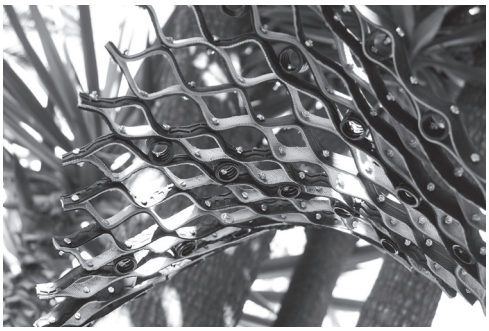



TORSIÓN
FLEXIÓN
L > H > E
a
b
c
d
e
f

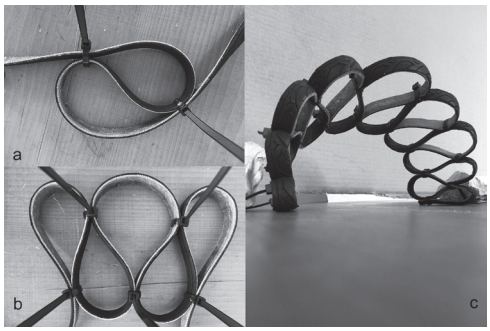
[11]


a
b

[13]

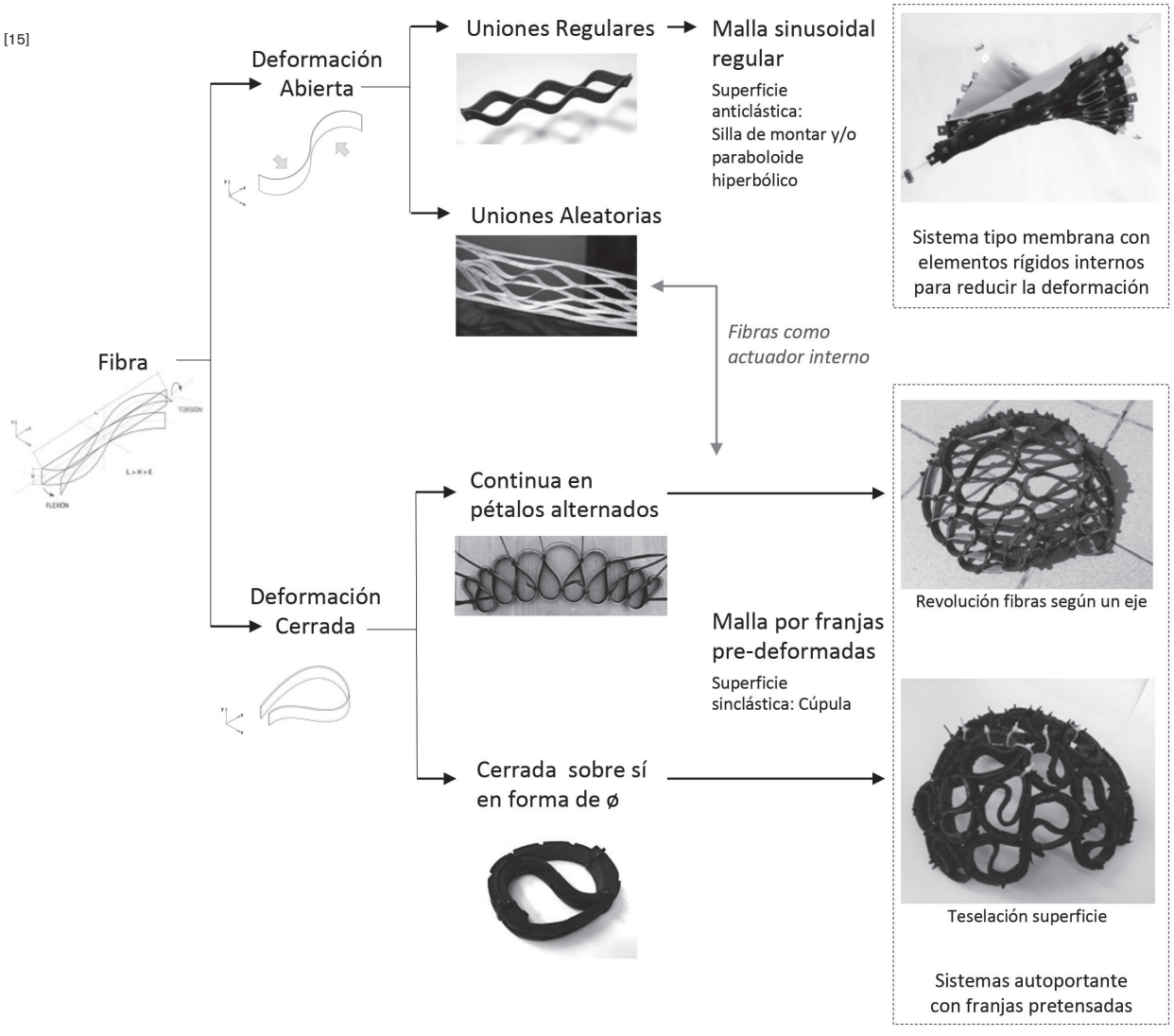


[12]


a
b
c

[14]

[15]


Deformación Abierta
Uniones Regulares
Malla sinusoidal regular
Superficie anticlástica: Silla de montar y/o paraboloide hiperbólico
Uniones Aleatorias
Sistema tipo membrana con elementos rígidos internos para reducir la deformación
Fibras como actuador interno
Fibra
TORSIÓN
L > H > E
FLEXIÓN
Continua en pétalos alternados
Revolución fibras según un eje
Deformación Cerrada
Malla por franjas pre-deformadas
Superficie sinclástica: Cúpula
Cerrada sobre sí en forma de ø
Teselación superficie
Sistemas autoportante con franjas pretensadas