

# Estructura de Neumáticos Bio-Inspirada en la Madera de Cactus

## Tire Structure Bio-Inspired to the Cactus Wood

### Ludovica Rossi

PhD student, ETSABUPC, España

lurossi@coac.net

### Fernando Juan Ramos Galino

Doctor Arq. Prof. Departamento CA1 UPC, Spain

fernando.ramos@upc.edu

### Abstract

This study aims to reproduce the biological mechanisms of the living tissue of cactus plants. The construction of small-scale physical models, in bicycle tire bands, allows verifying the response of the bands to the applied stresses. The study of the morphology in the elastic field defines the form in relation to different levels of deformations, also according the equilibrium dynamics that are generated. The process of digital representation allows understanding how the morphology works, by coding and systematizing the associated geometries. The virtual model integrates and completes the physical model allowing extrapolating the dynamic aspects of the construction process.

**Keywords:** Morfología; Deformación; Búsqueda de formas; Bio-inspiración; Cinema4D

## Introducción

El presente trabajo analiza una configuración de estructura elástica cuya forma es originada por el comportamiento del material, antes que una tipología definida previamente. Para ello, estudia los principios biológicos de la estructura portante de las plantas cactáceas que permiten observar la relación entre forma y adaptabilidad del tejido vivo (Lienhard, Schleicher y Knippers 2015).

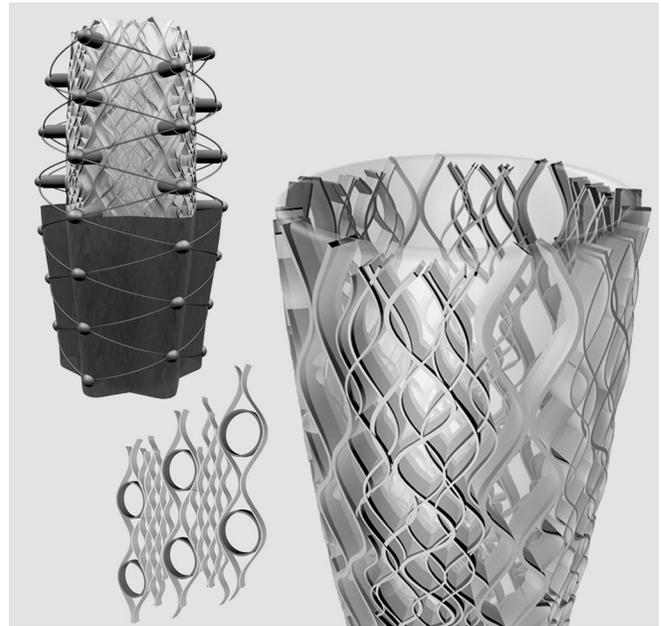
Las plantas cactáceas son organismos que se han adaptados a climas áridos y muy secos. La fisiología de la planta ha evolucionado reduciendo tejido resistente a favor de células no especializadas para la acumulación de líquidos y sustancias nutritivas. La estructura de madera (Fig. 1) de estas plantas tiene la capacidad de adaptarse a las variaciones de hábitats extremos. Los tejidos estructurales se encuentran en el interior del cuerpo de la planta y no son visibles desde el exterior (Altesor y Ezcurrawz, 2003).

El tejido de madera ha sido analizado en su conjunto como un sistema de franjas curvilíneas que se entretrejen entre ellas y se funden en una única estructura leñosa.

Cómo obtener la morfología ondulada observada en los cactus es parte del interrogante biomimético (Gruber, 2011; Addis, 2016). El objetivo de reproducir la dinámica natural 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 la propiedad de adaptabilidad del tejido orgánico y representa un punto límite en el control de la forma arquitectónica.

La morfología orgánica ha sido desarrollada a partir de la construcción de modelos físicos donde se puede observar la deformación de los materiales. Los resultados obtenidos han

sido reproducidos en los modelos virtuales dibujados en 3D, utilizando principalmente el programa Cinema4D.



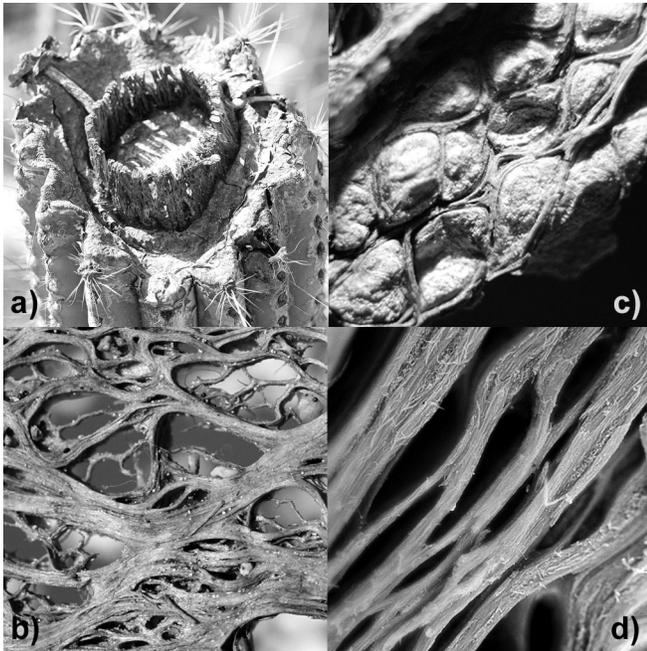
**Figura 1:** Las cactáceas son organismos adaptados a climas áridos: han modificado las hojas en espinas, el tejido de madera resistente se ha reducido al interior a favor de tejido no especializado para la acumulación de líquidos y su tallo de color verde participa en el proceso de la fotosíntesis. Dibujo: Ludovica Rossi, 2017.

## Morfología

La metodología aplicada empieza por definir la morfología mediante la construcción de modelos físicos a pequeña

escala. La realización de estos prototipos permite verificar cuáles mecanismos morfológicos están ligados al sistema constructivo. Este entorno de trabajo se caracteriza por la relación que existe entre objeto y materia; donde a un mayor tamaño del objeto más incide el peso en la construcción. El factor de escala es un aspecto determinante en la construcción de los modelos físicos porque están sujetos a la fuerza de gravedad del espacio físico real (Addis, 2013); a diferencia de los modelos virtuales que están representados en un espacio geométrico abstracto.

Para reproducir los mecanismos biológicos de la planta, en la construcción de los modelos físicos, era necesario encontrar un sistema que tuviese un adecuado equilibrio entre rigidez y elasticidad. Por diferentes niveles de aproximación los modelos han permitido 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.



**Figura 2:** Tejidos leñosos (xilema) de los haces vasculares: a) foto del cactus columnar *Echinopsis Validus*; b) c) d) foto macro con niveles de ampliación progresivos de diversas palas de la Cactáceas del Genero *Opuntia*. Fotografía: Ludovica Rossi, Bcn, 2010/2011

## Geometría

La interpretación realizada sobre la fibra de madera del cactus prioriza una visión lineal de la misma. Al evaluar el tejido como una sumatoria de células, que se agregan progresivamente en la dirección del crecimiento de la planta (Fig.2), se considera que la fibra se extiende en una dirección principal respecto a las otras dos.

La fibra es reproducida como una banda, que se define por tener la extensión de la longitud predominante sobre las otras dos dimensiones (espesor y canto de la sección). Esta geometría permite que mientras más larga sea la franja más flexible y deformable sea el elemento. En términos

morfológicos la franja así definida se curva y flexiona a los empujes laterales.

La flexibilidad de los elementos, en los modelos físicos, es obtenida por geometría y forma (Fig.3), y no únicamente por el tipo de material empleado. La agregación de las franjas define a su vez una malla que asume diversas configuraciones dependiendo: de la distribución de las uniones entre las franjas y de las deformaciones aplicadas.

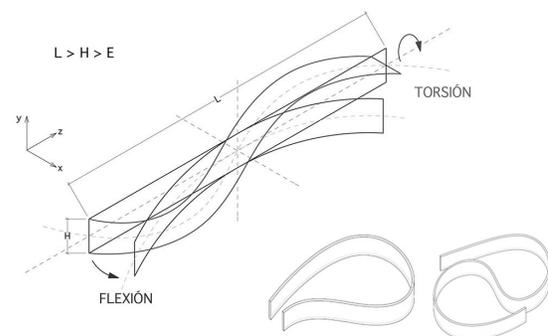
En el presente trabajo se analiza una de las configuraciones posibles: la banda está doblada sobre sí misma según una secuencia de uniones que le permiten asumir una trayectoria curvilínea de pétalos alternados.

## Modelo físico

El estudio morfológico ha sido motivado por la capacidad de adaptación que tiene el tejido orgánico vivo en su crecimiento. En los modelos físicos el elemento morfológico de base es representado por unas bandas neumáticas que permiten verificar la respuesta de la fibra a los esfuerzos aplicados. En este entorno las dinámicas propias del material son un factor para investigar la generación de la forma. Las deformaciones de la franja y del conjunto son elementos fundamentales en la búsqueda de la configuración final.

En la realización de los modelos físicos en bandas neumáticas las características de flexibilidad y elasticidad ayudan a implementar los mecanismos de la deformación, propios del tejido vivo. En algunos casos deviene implícito y resulta difícil separar entre sí causa y efecto. En otros el exceso de deformación de un material no permite el suficiente control de la morfología.

En los modelos físicos se aprovechan las propiedades del material para desarrollar la morfología, forzando el material para asumir una configuración límite. La fibra es un elemento lineal que es curvado y deformado. En paralelo la flexibilidad confiere capacidad de adaptación, esto significa que el modelo físico absorbe las irregularidades de la construcción manual, y tiene un cierto nivel de tolerancia.



**Figura 3:** La geometría de la franja es definida por un elemento lineal de forma rectangular alargada, sus proporciones reducen la resistencia a la flexión y la torsión según el eje longitudinal. Esto permite doblar la franja sobre sí misma y en forma de S. Por otra parte el canto de la sección vertical contribuye a la resistencia de la franja a las deformaciones verticales. Dibujo: Ludovica Rossi, 2017.

## Entorno virtual

Para aplicar al entorno del modelo virtual la morfología definida en los modelos físicos es necesario implementar un proceso de sistematización. En ambos casos (modelo físico y virtual) el sistema ha sido definido a partir de un elemento morfológico de base reiterado en el espacio y al cual se aplican deformaciones y/o variaciones para alcanzar la morfología orgánica.

El modelo tridimensional virtual representa un alto nivel de abstracción de la realidad. Su entorno de partida es totalmente abstracto, es un espacio vacío en el cual no existe la fuerza de gravedad, un plano de apoyo, escala dimensional, etc. En el espacio virtual los objetos se intersecan y sobreponen; dos cuerpos no intercambian fuerzas de equilibrio entre sí y no se adaptan el uno al otro. Asimismo en los dibujos en 3D, por convención, es usual pensar en términos de cuerpos rígidos que luego pueden ser deformados. En este estudio se ha utilizado el modelo virtual para codificar la geometría de modelos elásticos construidos en bandas neumáticas; que se caracterizan por sus propiedades elásticas.

## Límites del modelo

La representación del tejido orgánico se ha desarrollado como un sistema compuesto por elementos finitos, esta es una ejemplificación necesaria del referente natural. En la planta viva el tejido se comporta de manera continua y la repetición de sus células no es igual a sí misma. Existe siempre una variación, por cuanto pequeña, que depende de la capacidad de adaptación del organismo a la vida a lo largo de su crecimiento.

En los modelos físicos esta variación está introducida por las imperfecciones de los procedimientos manuales empleados en la construcción. Estas imperfecciones en la realización confieren al modelo físico una dimensión más dinámica. La repetición del elemento finito (la franjas), que compone el modelo, no es siempre iguales. Al mismo tiempo, los límites físicos, que la fuerza de gravedad ejerce sobre el objeto tangible, no permiten una repetición infinita del elemento de base. Una malla, con una extensión limitada compuesta por pocos elementos, se comportará en su conjunto de forma más rígida, que la misma malla, construida por un mayor número de elementos y con una mayor extensión en el espacio.

Los modelos a pequeña escala permiten definir la forma según las deformaciones y el comportamiento físico del material (Addis, 2013). Esta metodología ofrece 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. El análisis visual del comportamiento de los modelos físicos permite definir el contexto espacial y dimensional en el cual construir el modelo virtual.

El procedimiento realizado, en la representación 3D, quiere ser una aproximación de los resultados obtenidos en los modelos físicos, con el objetivo de determinar las

interacciones que generan la forma en el espacio virtual. Por lo cual los recursos empleados en el diseño siguen los pasos de la construcción del modelo físico. Este marco define las actuaciones con las cuales se han desarrollado los modelos virtuales.

En la definición del objeto virtual las diversas operaciones que llevan a su construcción son más separadas y pautadas en comparación a los modelos físicos, donde varias operaciones se desarrollan conjuntamente. En el modelo virtual las herramientas disponibles permiten ordenar las informaciones y dividir las acciones realizadas manualmente en los modelos físicos. En estos últimos, a diferencia, las operaciones aparecen sobrepuestas entre sí, por las variaciones debidas a la manualidad, la fuerza de gravedad, el comportamiento del material, etc.

Por la morfología elástica desarrollada en este estudio la limitación del modelo virtual está en el hecho que cualquier deformación es posible. Dibujado el entramado de las franjas, será posible aplicar una o más variaciones de forma, como adaptar la superficie a una evolución curvilínea, doblar o torcer la malla. En estos modelos se podrían entrecruzar los volúmenes o las superficies y no es relevante la sección vertical de la franja a diferencia de un entorno físico.

## Deformación

El presente estudio ha sido motivado por la capacidad de adaptación que tiene el tejido orgánico vivo en su crecimiento. Se valora que la búsqueda de una aproximación hacia la morfología orgánica para la construcción de una estructura bio-inspirada (Gruberen, 2011) tiene sentido, si realmente existe una semejanza geométrica entre los mecanismos que se comparan (Hossdorf & Hernández, 1972). El principio de deformación como propiedad intrínseca de los modelos realizados es parte de la investigación sobre la generación de la forma en campo elástico tanto en la construcción de los modelos físicos como en la representación de los modelos virtuales.

### Tejido vivo del cactus

El tejido estructural de la planta modifica su configuración para adaptarse a las dinámicas ambientales. Es posible asociar su comportamiento al de una esponja que trabaja expandiéndose y contrayéndose para permitir a los tejidos orgánicos internos acumular más o menos sustancias nutritivas en forma de líquidos. Estas variaciones pueden ser estacionales y depender de las condiciones climáticas favorables o adversas.

Además de estas variaciones internas, como deformaciones elásticas donde el tejido se modifica pero vuelve a un estado anterior, se identifican unas deformaciones morfológicas no regresivas que dependen de la acumulación de tejido resistente según va creciendo el organismo. Un ejemplo es la capacidad de adaptación que tiene la pala del cactus *Opuntia* (nombre vulgar chumbera y/o tuna) que se deforma para superar obstáculos físicos; como es el caso de la figura 4 donde la planta crece dentro los espacios disponibles de la

mallas para crecer más allá de una valla metálica. El tejido vivo altera su forma, adentro de unos márgenes morfogenéticos definidos, como respuesta a las necesidades fisiológicas del organismo cuyo objetivo es seguir creciendo.

En el tejido vivo las franjas se muestran como una estructura elástica que adapta su curvatura a las necesidades fisiológicas del organismo. La morfología se comporta como un fuelle y corresponde a la necesidad fisiológica de la planta de acumular líquidos y otras sustancias nutritivas en los tejidos no especializados, en contra de la reducción de tejidos resistentes (Altesor & Ezcurrawz, 2003).



**Figura 4:** Capacidad de adaptación del organismo que crece más allá de una valla metálica; las palas del Cactus Opuntia crecen en los espacios disponibles de la malla, doblando y girando sus tejidos.  
Fotografía: Ludovica Rossi, Vilassar de Mar (Bcn), 2015.

### La banda neumática

Los neumáticos de bicicleta reciclados ofrecen una amplia gama de deformaciones. De manera similar al tejido de la planta, este material elástico se adapta a los estímulos externos aplicados. La banda neumática de las bicicletas se compone por un tejido sintético interior y caucho en su exterior, en su conjunto este material ofrece una respuesta a los esfuerzos deformándose.

El exceso de flexibilidad de las bandas neumáticas ha llevado a deformar las franjas neumáticas cerrándolas sobre sí mismas; doblando la franja se aprovecha la flexibilidad del material mientras el sistema de uniones limita y bloquea la deformación aplicada (Fig.5). Se genera una nueva condición de equilibrio cuyas tensiones internas proporcionan mayor rigidez a la geometría de la fibra, descrita anteriormente.

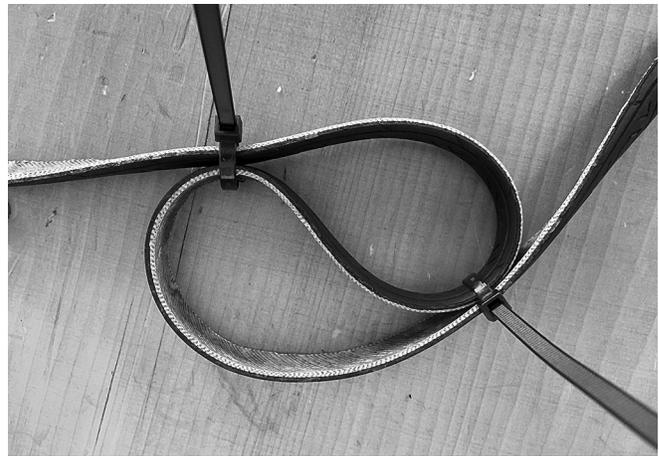
Se puede entonces definir la franja pre-deformada como elemento estructural pretensado porque actúan tensiones en el mismo antes de entrar en carga, es decir, antes de que actúen sobre él las acciones como el peso propio o las sobrecargas (Roland, 1973).

A partir de las franjas lineales, curvando los neumáticos en S se genera un primer cambio morfológico. La deformación aplicada pre-conforma la banda y ofrece un mayor control sobre la flexibilidad del material (Fig.6). El acoplamiento de las franjas pre-deformadas, según la secuencia de uniones aplicada, genera una malla que se curva por los empujes

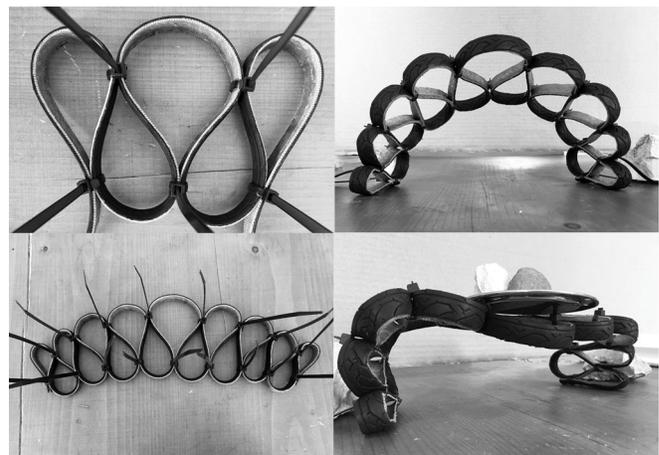
recíprocos que ejercen entre sí las bandas; la cuales a su vez mantienen la flexibilidad por la forma. En esta solución los equilibrios internos del sistema determinan el cambio morfológico a nivel general.

La unión entre sí de las franjas pre-deformadas configura un sistema que tiene un nivel de rigidez suficiente para obtener una superficie a doble-curvatura. La estructura se levanta del plano de apoyo y toma la forma de una cúpula que sostiene su propio peso (Fig.7).

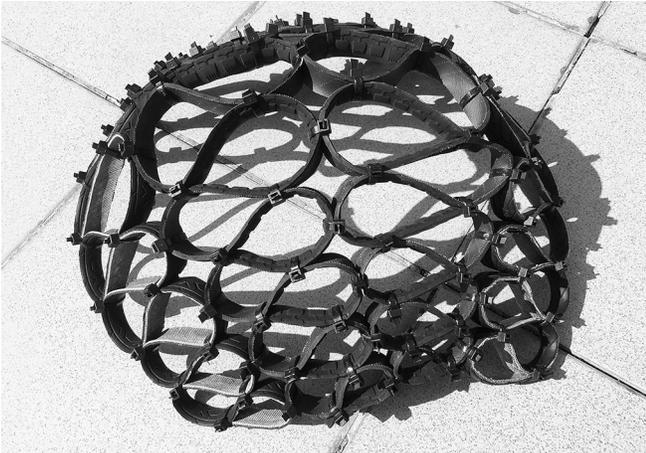
Se obtiene una superficie sinclástica donde las dinámicas de fuerzas internas y de fricción entre las fibras permiten al tejido mantenerse abierto. El equilibrio de los esfuerzos está garantizado por la forma, donde la elasticidad del material, la solidaridad de las partes y la adaptabilidad del sistema hacen que el conjunto se comporte de forma unitaria.



**Figura 5:** Primer nivel de deformación aplicado a la banda de neumáticos de bicicleta recuperados (altura 1 cm) doblada y unida sobre sí misma por bridas de plástico que actúan como un encaje.  
Fotografía: Ludovica Rossi, 2016.



**Figura 6:** La franja pre-deformada en pétalos alternados asume la forma del arco acercando los extremos de la base. La morfología obtenida es autoportante, o sea es capaz de soportar su propio peso. Mientras al cargar el arco, este se deforma por elasticidad del material y vuelve a su estado inicial una vez eliminada la carga.  
Fotografía: Ludovica Rossi, 2016.



**Figura 7:** Cúpula obtenida por la unión de franjas pre-deformadas.  
Fotografía: Ludovica Rossi, 2016.

### Modelo virtual

La construcción del modelo virtual separa entre sí las acciones que permiten definir la configuración de la cúpula. La franja se dibuja a partir de una línea curvilínea que sigue la configuración de la franja pre-deformada del modelo físico. La extrusión de una sección rectangular según la trayectoria en pétalos alternados de dimensiones variables es la geometría de partida que define el elemento de base. La primera deformación aplicada a la franja en los modelos físicos queda implícita en la representación del objeto base del modelo virtual.

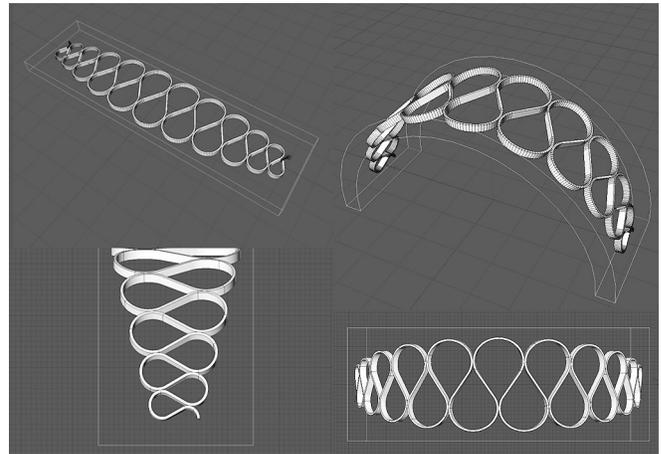
La franja en el espacio virtual está representada como la franja pre-deformada del objeto material. El elemento es plano y para generar la forma en arco se aplica la primera deformación con un pliegue de 180°. Esta fase es similar al arco del modelo físico obtenido por el acercamiento entre sí de los dos extremos de la base (Fig.8).

La repetición del objeto en arco, así definido, no es suficiente para generar la forma de la cúpula observada en el modelo físico. Para obtener la doble curvatura es necesario introducir un nivel más de deformación. En el modelo físico, a la vez que se unen las franjas pre-conformadas, se van generando las deformaciones que permiten al sistema asumir la forma esférica.

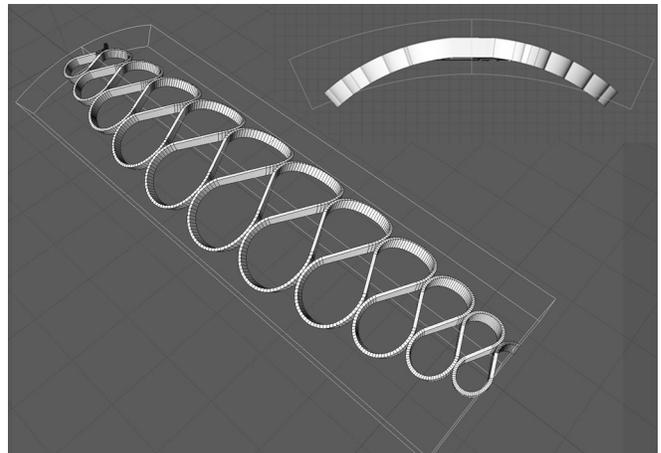
En el modelo virtual la doble curvatura de la cúpula se obtiene aplicando dos tipos de deformaciones, aplicadas según directrices perpendiculares entre sí. Sucesivamente es posible clonar el elemento en el espacio para obtener la configuración final.

El primer nivel de deformación, comentado anteriormente, permite proporcionar a la franja la forma en arco aplicando la deformación con respecto al eje horizontal. El segundo nivel de curvatura se implementa con una misma operación de deformación aplicada según el cato de la fibra y de forma simétrica el eje vertical (Fig. 9). Esta deformación permite obtener el efecto inflado, que en los modelos físicos se obtiene en la fase de unión de las franjas pre-deformadas.

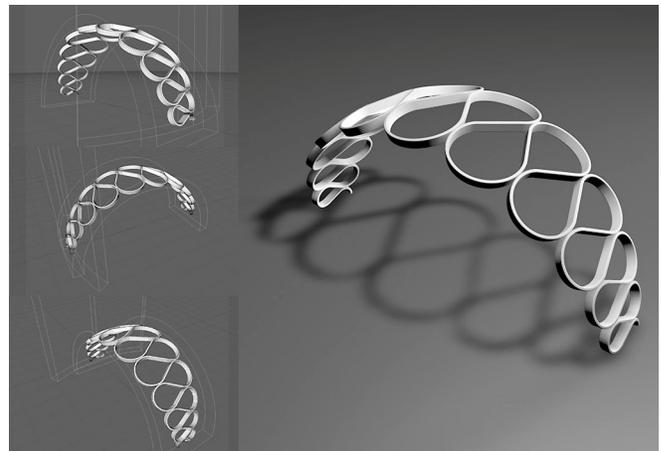
Para obtener el conjunto de las variaciones de la forma que ofrece el modelo físico es necesario aplicar conjuntamente los dos tipos de deformaciones en el entorno virtual para reproducir un efecto similar.



**Figura 8:** Franja obtenida por extrusión y primera deformación aplicada para adquirir la forma del arco. Dibujos: L. Rossi, 2017.



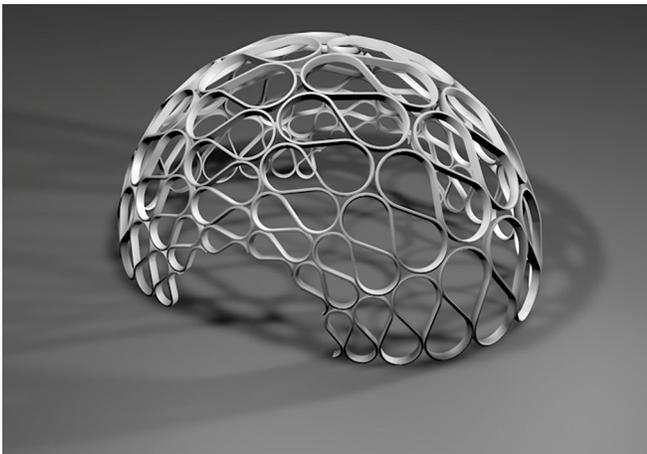
**Figura 9:** Simulación del efecto inflado por deformación es aplicada simétricamente al eje vertical. Dibujos: Ludovica Rossi, 2017.



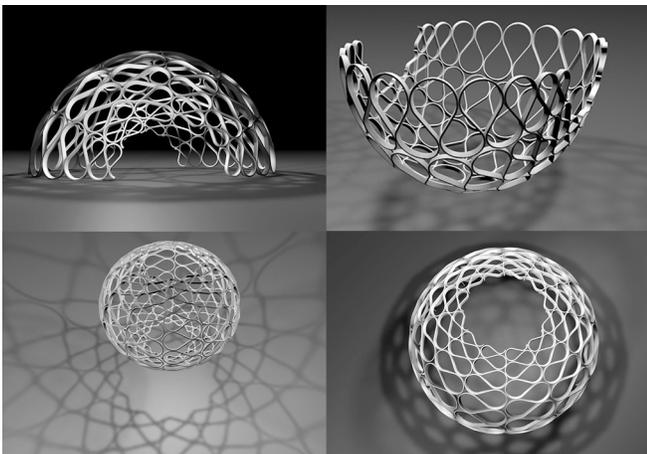
**Figura 10:** Las dos deformaciones aplicadas conjuntamente según los ejes horizontal y vertical. Dibujos: Ludovica Rossi, 2017.

La repetición por rotación del elemento deformado según las dos curvaturas (ejes horizontal y vertical) completa las operaciones geométricas que definen la configuración de la cúpula (Fig.11). La operación de reiteración indica el número de fibras y sus posiciones en el espacio de representación. Por medio de la operación de clonación las franjas están todas vinculadas entre sí a posibles variaciones sucesivas (modificando el elemento de base referenciado cambian todos los demás). Esta interacción no existe en el modelo físico, donde el objeto de base (la fibra) es realizado por copias hechas manualmente, que no son perfectamente idénticas entre ellas. Son objetos independientes entre sí, no exactamente iguales, que están interconectados por medio de uniones.

La grafica por computadora aplica diversas deformaciones, propias de los cuerpos flexibles, para implementar las dinámicas físicas de la estructura elástica (Naibaei, Baverel & Weinand, 2015). El objeto así representado puede variar su orientación o extensión en el espacio, y permite verificar otros efectos espaciales de modo más ágil que la construcción de un modelo físico (Fig.12).



**Figura 11:** Reiteración radial del elemento morfológico de base que genera la forma de la cúpula. Dibujos: Ludovica Rossi, 2017.



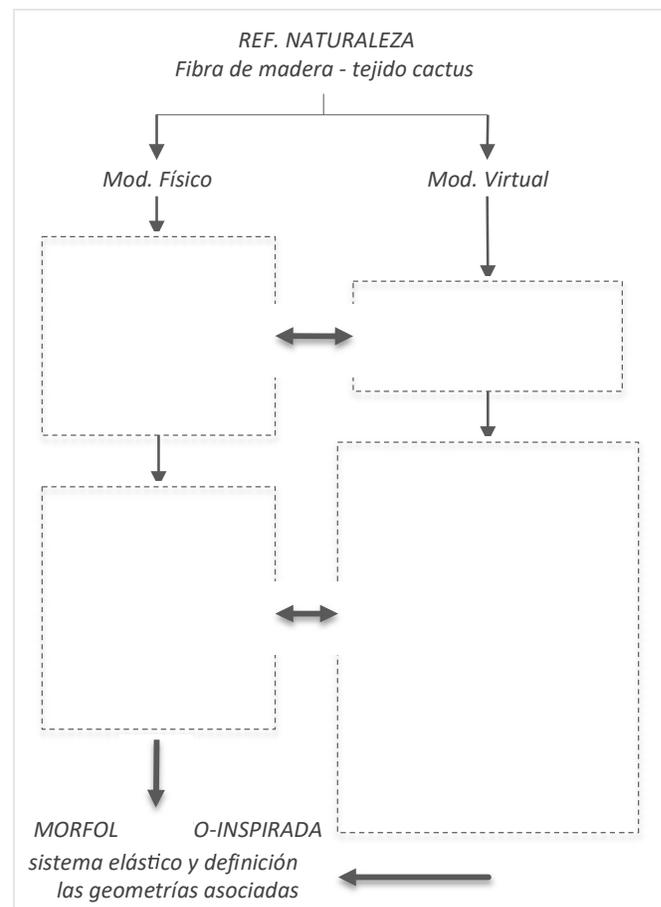
**Figura 12:** Vistas de la cúpula por franjas orientadas según los paralelos y/o meridianos de la esfera. Dibujos: Ludovica Rossi, 2017

## Conclusiones

Las condiciones de equilibrio en el modelo virtual responden a los parámetros de coherencia que pueden ser aplicados respecto a criterios fijados previamente. El proceso de diseño de los modelos virtuales permite comprender como funciona la morfológica generada en los modelos físicos, codificando y definiendo las geometrías y deformaciones asociadas (Fig.13). La separación de los procesos, para llegar a la representación abstracta del objeto 3D, pone en evidencia las geometrías necesarias a la construcción.

La secuencia constructiva, muchas veces implícita en el modelo físico, está subdividida en el espacio virtual en fases sucesivas y jerárquicas. Cómo dibujar la franja, según que plano orientarla, cuales deformaciones aplicar y cómo repetir los elementos, son las informaciones que permiten la representación del modelo.

El modelo físico a pequeña escala se encuentra en el medio de un proceso de diseño reiterativo, el cual impulsa la comprensión de las dinámicas orgánicas del referente natural. Este modelo pone en evidencia el comportamiento de la estructura elástica y es consecuencia de las accesiones físicas que generan la morfología auto-portante de la cúpula.



**Figura 13:** Esquema de relaciones entre la secuencia en que se genera la morfología en los modelos físicos en paralelo a como se aplican las geometrías y deformaciones en el modelos virtual.

En paralelo la construcción real conlleva un tiempo de ejecución que no se observa en el objeto una vez terminado. El modelo virtual permite compensar la dimensión dinámica del modelo físico, que fotografía un momento finito del proceso constructivo. Extrapolando los aspectos de la realización material, el modelo virtual permite compensar unos momentos de cambio morfológico que de otra forma no serían observables en los modelos físicos terminados.

En el estudio de la morfología en campo elástico (y no rígido) el modelo construido permite definir la forma en relación a las dinámicas de equilibrio de los esfuerzos físicos internos. En paralelo la configuración en el espacio de representación conduce a sistematizar las acciones que generan la forma.

En el modelo virtual el primer nivel de deformación es determinado por la geometría de base que describe la franja. A esta se aplican en paralelo dos deformaciones de curvatura, según los ejes de referencia horizontal y vertical. Por medio de la reiteración radial del elemento deformado se define la morfología general. En este marco el orden, secuencia y jerarquía de las operaciones gráficas de representación en el modelo virtual son factores que integran y completan la información generada en el modelo físico.

## 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 en 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.

## Referencias

- Addis B. (2016). 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. Cap. 5 pp. 85-95
- Naibaei S., Baverel O. y Weinand Y. (2015). Form Finding of Twisted Interlaced Structure: A Hybrid Approach. En: Advances in Architectural Geometry 2014. Editors: Block, P., Knippers, J., Mitra, N.J., Wang, W. (Eds), London, Springer. pp.127-143
- Lienhard J., Schleicher S. y Knippers J. (2015). Bio-inspired, Flexible Structures and Materials. En: Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering. Editors: F. Pacheco Torgal, J. A. Labrincha, M. V. Diamanti, C.P. Yu, H. K. Lee (Eds), London, Springer. Chapter: 11
- Addis B. (2013). Toys that save millions: a history of using physical models in structural design. The Structural Engineer Feature. London, Vol. 91, Issue 4
- Gruberen P. (2011). Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings. Germany, Spinger-Verlag/Wien. p-14. En la amplia variedad de interpretaciones existentes sobre el significado de Biomimesis, este estudio toma a referencia el Centre for Biomimetics de la University of Reading que la define como “*la abstracción de un buen diseño de la naturaleza*”. p-17. Este estudio toma a referencia la definición de de Petra Gruberen por la cual la Bio-inspiración “*es la expresión más general para el diseño inspirado en modelos de naturaleza, incluyendo todos los niveles de abstracción, también interpretaciones puramente morfológicas*”.
- Altesor A. y Ezcurrawz E., (2003) Functional morphology and evolution of stem succulence in cacti. Journal of Arid Environments v.:53, Holanda, Elsevier Science Ltd. 557-567
- Roland C. (1973). Frei Otto: Estructuras. Albardané Francesc (trad.), Barcelona, Ed. Gustavo Gili.
- Hosdorf H. y Hernández C. B. (1972) Modelos reducidos. Madrid, Ed. IETcc. p-76