



Universitat Politècnica de Catalunya



Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona

DISEÑO EN FLEXIÓN ACTIVA CON NEUMÁTICOS RECUPERADOS

Análisis de la morfología bio-inspirada en la estructura del cactus

Tesis doctoral

Ludovica Rossi, arquitecto

Director

Fernando Juan Ramos Galino, Dr. arquitecto

Programa de Doctorado de Tecnologia de l'Arquitectura, de l'Edificació i de l'Urbanisme

Agosto 2019

Titolo in italiano:

DESIGN IN FLESSIONE ATTIVA CON PNEUMATICI RECUPERATI

Analisi della morfologia bio-ispirata nella struttura del cactus

Title in english:

BENDING-ACTIVE DESIGN IN RECOVERED TIRES

Analysis of the bio-inspired morphology in the structure of the cactus

Ludovica Rossi *arquitecto*

e-mail: lurossi@coac.net

www.ludovicarossi.com

Barcelona, Agosto 2019

Agradecimientos

Un especial agradecimiento a mi tutor el profesor arquitecto Dr. Fernando Ramos por la libertad, confianza y paciencia concedida, por su dirección y apoyo para seguir en el trabajo y llegar a la conclusión del mismo.

Al Dr. profesor Stefano Mancuso, por su asesoramiento y evaluación de los comportamientos del mundo vegetal. A los profesores arquitectos el Dr. Josep Ignasi De Llorens Duran y el Dr. Josep Maria Gonzalez Barroso por sus revisiones y aportaciones a lo largo del trabajo de tesis.

A mi padre, profesor arquitecto Dr. Piergiorgio Rossi por su soporte e inspiración.

A mi madre Maria Teresa por su amor y pasión por las plantas crasas.

A mi compañero Alejandro por su paciencia y asistencia con el castellano.

A mi amiga arquitecta Dra. Núria Casquero por su revisión del inglés.

A los profesores y colegas arquitectos que, a lo largo de mi aprendizaje y experiencia profesional, han compartido su pasión e inquietudes sobre la arquitectura. ¡Gracias!

Resumen

Esta tesis trata el estudio metodológico y el desarrollo de un caso práctico de biomímesis aplicada a procesos de diseño en arquitectura. El trabajo integra aspectos de la biología vegetal con el diseño arquitectónico en un marco teórico atento a las problemáticas medioambientales. La investigación se enfoca en el descubrimiento de mecanismos biológicos como fuente para indagar tecnología de forma creativa. El diseño en biomímesis sigue el proceso ascendente (Bottom-Up) que parte del estudio del modelo biológico para definir la abstracción del mecanismo orgánico y su implementación técnica.

La investigación mantiene la misma función del modelo biológico de referencia permaneciendo en el campo de los productos biomiméticos funcionales y biomorficos. El proceso de trabajo libera la comprensión de las dinámicas naturales de una aplicación específica en el ámbito humano. Este marco permite descubrir las morfologías en flexión activa, un principio de diseño innovador que integra los comportamientos estructurales de flexión y pandeo en alternativa a configuraciones de cuerpos rígidos y tipológicas predefinidas.

La aplicación del caso práctico estudia el sistema estructural portante de las cactáceas vivas (Capítulo 1). Se analizan ejemplares de la familia de las Cactáceas de los géneros Echinopsis y Opuntia que han perdido tejido mecánico y resistente a favor de células no especializadas para el almacenamiento de líquidos. La tesis recopila muestras, realiza estudios de campo y análisis bibliográfico para verificar las potencialidades del modelo como generador de conceptos. La abstracción de los mecanismos orgánicos de crecimiento y adaptabilidad permiten separar el modelo biológico y los principios descubiertos (Capítulo 2). Por medio de la construcción de modelos físicos a pequeña escala se definen la banda de rodadura de neumáticos como material principal y la franja como elemento morfológico de base. Las características de elasticidad del material permiten trabajar en el campo del tejido vivo de la planta. Se analizan propiedades mecánicas del material donde la elección de emplear neumáticos recuperados responde a las motivaciones medioambientales de la tesis.

Se definen y examinan tres configuraciones espaciales: la malla sinusoidal, la cúpula en franjas pre-deformadas en pétalos alternados y la cúpula en franjas pre-deformadas cerradas en anillos. Las morfologías generadas se incluyen en las estructuras en flexión activa (Capítulo 3), que se analizan según las deformaciones de las fibras y la resistencia geométrica obtenida por el sistema de agregación. Se obtienen sistemas auto-organizados y/o auto-portantes por equilibrio de esfuerzos internos. Paralelamente la simulación digital de los tres casos (Capítulo 4) permite verificar y sistematizar los factores que determinan las variaciones de forma por medio del diseño generativo. Se establecen las leyes de transformación que permiten diferenciar los procesos implícitos y explícitos que generan la morfología.

Las plantas son una fuente de inspiración prometedora para estructuras en campo elástico. La investigación propone la geometría de la franja como arquetipo morfológico que define la topología del sistema. La estrategia implementada sigue un diseño algorítmico que utiliza la búsqueda de patrones repetitivos para explorar procesos generativos. La iteración y deformaciones aplicadas a las franjas individualizan dos grupos morfológicos y tres configuraciones espaciales. La interacción de las partes generan nuevos fenómenos como propiedades emergentes del sistema. Y el proceso de diseño bio-inspirado genera morfología en flexión activa donde la deformación es una modalidad alternativa para crear formas arquitectónicas.

Palabras claves: Biomímesis, Bio-inspiración, Morfología, Flexión activa, Diseño generativo, Cactus, Reciclaje, Banda rodamiento, Neumáticos fuera de uso

Sommario

Questa tesi si occupa dello studio metodologico e dello sviluppo di un caso pratico di biomimesi applicato ai processi di progettazione architettonica. Il lavoro integra aspetti della biologia vegetale con la progettazione architettonica in un quadro teorico attento ai problemi ambientali. La ricerca si concentra sulla scoperta di meccanismi biologici come fonte per esplorare la tecnologia in modo creativo. Il design in biomimetica segue un processo ascendente (Bottom-Up) che parte dallo studio del modello biologico per definire l'astrazione del meccanismo organico e la sua implementazione tecnica.

La ricerca mantiene la stessa funzione del modello biologico di riferimento, rimanendo nel campo dei prodotti biomimetici funzionali e biomorfi. Il processo di lavoro libera la comprensione delle dinamiche naturali da una specifica applicazione nel campo umano. Questo quadro permette di scoprire le morfologie attive alla flessione, un principio di progettazione innovativo che integra i comportamenti strutturali a flessione e instabilità per carico di punta, in alternativa alle configurazioni di corpi rigidi e tipologie predefinite.

L'applicazione del caso pratico studia il sistema di supporto strutturale dei cactus vivi (Capitolo 1). Sono analizzati i campioni della famiglia delle Cactacee, dei generi *Echinopsis* e *Opuntia*, che hanno perso tessuto meccanico e resistente a favore di cellule non specializzate per l'accumulazione di liquidi. La tesi raccoglie campioni, esegue studi sul campo e analisi bibliografiche per verificare il potenziale del modello biologico come un generatore di concetti. L'astrazione dei meccanismi organici di crescita e adattabilità consente di separare il modello biologico e i principi scoperti (Capitolo 2). Mediante la costruzione di modelli fisici su piccola scala, il battistrada degli pneumatici fuori uso è definito come il materiale principale e la striscia come elemento morfologico di base. Le caratteristiche di elasticità del materiale permettono di lavorare nel campo del tessuto vivente della pianta. Le proprietà meccaniche del materiale vengono analizzate, dove la scelta di utilizzare pneumatici recuperati risponde alle motivazioni ambientali della tesi.

Tre configurazioni spaziali sono definite ed esaminate: la rete sinusoidale, la cupola in strisce pre-deformate in petali alternati e la cupola in strisce pre-deformate chiuse in anelli. Le morfologie generate sono comprese nelle strutture in flessione attiva (Capitolo 3), che sono analizzate in base alle deformazioni delle fibre e la resistenza geometrica ottenuta dal sistema di aggregazione. I sistemi ottenuti sono auto-organizzati e/o autoportanti attraverso il bilanciamento degli sforzi interni. In parallelo, la simulazione digitale dei tre casi (Capitolo 4) consente di verificare e sistematizzare i fattori che determinano le variazioni di forma attraverso il disegno generativo. Vengono stabilite le leggi di trasformazione che consentono di differenziare i processi impliciti ed espliciti che generano la morfologia.

Le piante sono una promettente fonte d'ispirazione per le strutture in campo elastico. La ricerca propone la geometria della striscia come un archetipo morfologico che definisce la topologia del sistema. La strategia implementata segue un disegno algoritmico che utilizza la ricerca di schemi ripetitivi per esplorare i processi generativi. L'iterazione e le deformazioni applicate alle strisce identificano due gruppi morfologici e tre configurazioni spaziali. L'interazione delle parti genera nuovi fenomeni come proprietà emergenti del sistema. E il processo di progettazione bio-ispirato genera morfologia in flessione attiva, dove la deformazione è un modo alternativo per creare forme architettoniche.

Parole chiave: Biomimesi, Bio-ispirazione, Morfologia, Flessione attiva, Disegno generativo, Cactus, Riciclaggio, Battistrada, Pneumatici fuori uso

Abstract

This thesis deals with the methodology and development of a case study of biomimicry applied to the architectural design process. The case study integrates aspects of plant biology with architectural design in a theoretical framework that is sensitive to environmental issues. The research focuses on the discovery of biological mechanisms as a source of inspiration in the creative exploration of new technology. Design in biomimicry follows a bottom-up process that starts from the study of a biological model to define the abstraction of the organic mechanism and its technical implementation.

The research maintains the function of the biological model in question and stays within the field of functional biomimetic and biomorphic products. The work process allows the natural dynamics of a specific application to be seen in a human context. The framework enables the discovery of bending-active morphology, an innovative design principle that integrates the structural behaviors of bending and buckling as an alternative to rigid-body configurations and predefined typologies.

The application of the case study assesses the structural support system of live cacti (Chapter 1). It analyzes specimens of the Cactaceae family of the genera *Echinopsis* and *Opuntia*, which have lost their mechanical and resistant tissue in favor of non-specialized cells for the storage of liquids. The thesis collects samples, performs field studies and bibliographic analysis to verify the potential of the biological model as a generator of concepts. The abstraction of the organic mechanisms of growth and adaptability enable the separation of the biological model and the discovered principles (Chapter 2). In constructing physical models on a small scale, tire tread is used as the main material and the strip as a basic morphological element. The characteristics of elasticity of the material allow to work in the field of the living fabric of the plant. Mechanical properties of the material are analyzed and the choice to use recovered tires is in keeping with the environmental motivation of the thesis

Three spatial configurations are defined and assessed: the sinusoidal mesh, the dome in pre-deformed strips in alternating petals and the dome in pre-deformed strips closed in rings. The morphologies generated are included in the bending-active structures (Chapter 3), which are analyzed according to the deformations of the fibers and the geometric resistance obtained by the aggregation system. The obtained systems are self-organized and/or self-supporting through the balance of internal forces. In parallel, the digital simulation of the three cases (Chapter 4) allows the verification and systematization of the factors that determine the variations of form through the generative design. Laws of transformation are thus established and enable us to differentiate between the implicit and explicit processes that generate the morphology.

Plants are a promising source of inspiration for structures in the field of elasticity. The research proposes the geometry of the strip as a morphological archetype that defines the topology of the system. The implemented strategy follows an algorithmic design that uses the search for repetitive patterns to explore the generative processes. The iteration and deformations applied to the strips identify two morphological groups and three spatial configurations. The interaction of the parts generates new phenomena as emergent properties of the system. And the bio-inspired design process generates bending-active morphology where deformation is an alternative modality to create architectural forms.

Keywords: Biomimetics, Bio-inspiration, Morphology, Bending-active, Generative design, Cactus, Recycling, Tire tread, Tires out of use

Así, hemos aprendido que nuestro estudio de las formas orgánicas, que Goethe llamó morfología, es solo parte de una ciencia más amplia de la forma que estudia las formas de la materia en los aspectos más variados y en las condiciones más variadas y aún más, en el sentido más amplio, que estudia todas las formas imaginables.

(D'Arcy W. Thompson, 1969, 291)

Índice

Capítulo 0

Introducción (en castellano)	15
0.1 Hipótesis y objetivos	15
0.2 Estructura de la tesis	18
0.3 Metodología	21
0.3.1 La metodología de la observación	23
0.3.2 Los modelos como método	25
0.4 Interacciones	27
0.5 Biomimé시스 y bio-inspiración	29
0.5.1 Ideas sobre la evolución	34
0.5.2 Sostenibilidad	38
0.5.3 Reciclaje	40
0.6 Límites del trabajo	43
0.7 Referencias bibliográficas	46

Introduzione (in italiano)

49

0.1 Ipotesi e obiettivi	49
0.2 Struttura della tesi	50
0.3 Metodologia	51
0.3.1 La metodologia dell'osservazione	52
0.3.2 I modelli come metodo	53
0.4 Interazioni	54
0.5 Biomimesi e bio-ispiazione	56
0.5.1 Idee sull'evoluzione	58
0.5.2 Sostenibilità	60
0.5.3 Riciclaggio	61
0.6 Limiti del lavoro	62

Capítulo 1

Orígenes de la investigación	65
Resumen Capítulo 1	65
1.1 El descubrimiento del cactus	67
1.2 La fisiología de la planta	72
1.2.1 El tallo y la corteza del cactus	76
1.2.2 El tejido vascular y la madera del cactus	78
1.3 Bio-inspiración de las plantas	84
1.3.1 Crecimiento	86
1.3.2 Auto-organización	88
1.4 Las geométricas del tejido del cactus	90
1.5 El modelo interpretativo	93
1.6 Conclusiones capítulo 1	95
1.7 Referencias bibliográficas	96

Capítulo 2

La experimentación	99
Resumen Capítulo 2	99
2.1 Primeros experimentos	101
2.1.1 Los modelos de partida	103
2.1.2 Interconexión de las franjas	104
2.1.3 Diferencias entre el tejido seco y vivo de la planta	106
2.2 Materiales principales para la construcción de los modelos físicos	109
2.2.1 Papel	109
2.2.2 Madera	110
2.2.3 Papel y cemento	113
2.2.4 Neumáticos de bicicletas recuperados	115
2.3 Sistema de uniones	119
2.4 La banda neumática	120
2.4.1 Propiedades elastómeros (caucho natural y sintético)	121
2.4.2 Propiedades banda de rodadura (NFU)	124
2.5 La escala de los modelos	129
2.6 Conclusiones capítulo 2	133
2.7 Referencias bibliográficas	136

Capítulo 3

Sistemas de flexión activa	139
Resumen Capítulo 3	139
3.1 Formfinding	141
3.2 La geometría de la franja	142
3.2.1 La deformación de la franja	143
3.3 Malla sinusoidal regular	146
3.3.1 Comparativa entre fibra de papel y banda de neumáticos	148
3.3.2 Del puntal al anillo	150
3.4 Modelos en franjas pre-deformadas	154
3.4.1 Franjas pre-deformadas en pétalos alternados	156
3.4.2 Franjas pre-deformadas cerradas en anillo	163
3.5 Resistencia por forma	166
3.6 Conclusiones capítulo 3	171
3.7 Referencias bibliográficas	173

Capítulo 4

Simulación digital	175
Resumen Capítulo 4	175
4.1 Modelos físicos y virtuales	177
4.1.1 Entornos de trabajo	178
4.1.2 Límites orgánicos, físicos y virtuales	180
4.2 Análisis geométrico	182
4.2.1 Definición del arquetipo	184

4.2.2 Iteración del arquetipo	185
4.2.3 La deformación	185
4.3 Modelo estático y dinámico	188
4.3.1 Malla sinusoidal estática	188
4.3.2 Malla sinusoidal dinámica	189
4.4 El modelo en franjas pre-deformadas	193
4.4.1 Cúpula en fibras continuas	193
4.4.2 Cúpula por teselación de la superficie	197
4.5 Procesos morfológicos	201
4.6 Conclusiones capítulo 4	203
4.7 Referencias bibliográficas	205
Capítulo 5	
Conclusiones (en castellano)	207
5.1 Conclusiones generales	207
5.1 Conclusiones específicas	209
5.3 Perspectivas futuras	211
Conclusioni (in italiano)	214
5.1 Conclusioni generali	214
5.2 Conclusioni specifiche	215
5.3 Prospettive future	216
Bibliografía	219
Referencia de las imágenes	226
Apéndices (material del autor)	
01 Entrevista al profesor Antonio Di Carlo	229
02 Modelos físicos	235
03 Modelos virtuales	251
Anexos (recompilación de datos)	
01 Ejemplos en arquitectura y diseño	275
02 Resistencia a tracción de la banda de rodadura NFU	289

Capítulo 0

Introducción

0.1 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

La presente tesis doctoral surge de la pregunta general si la Naturaleza puede ser fuente de inspiración y avance en arquitectura. La investigación se enfoca sobre el procedimiento de diseño en biomímesis aplicado a la técnica de construcción. El concepto de biomímesis abarca una multitud de ejemplos y ámbitos de aplicaciones. Tiene un amplio significado y su desarrollo cruza de forma transversal diferentes contextos humanos, por lo cual no es posible definir unos límites de aplicación en forma estricta. La biomímesis puede ser tan amplia como el mundo natural que quiere imitar. Esto determina unos márgenes de incertidumbre que han caracterizado el desarrollo teórico de la tesis. Para tratar un ámbito de trabajo tan extenso, la investigación se ha orientado al estudio de un referente orgánico específico del cual, en origen, se desconocía el funcionamiento: la estructura de sostén de las plantas cactáceas.

La elección de un referente natural permite acotar la pregunta general a una dimensión más concreta. El objetivo general es vivenciar la experiencia del descubrimiento del mecanismo biológico para verificar si el referente natural funciona como generador de conceptos. El trabajo desarrolla un proceso de investigación bio-inspirado para aplicar los principios de generación de la forma, agregación y crecimiento en sistemas tipos tejidos y/o retículos.

La experimentación participa en la búsqueda de soluciones biomimética y/o bio-mórficas en las que los organismos vivos se utilizan en términos de generadores de conceptos. Específicamente se investiga la reproducibilidad material y constructiva del referente natural en una dimensión eco-sistémica. La propuesta parte de los modelos realizados en el trabajo final del Máster en Tecnología de la Arquitectura línea de Investigación Construcción e Innovación Tecnológica (ETSAB-UPC) –el Esquema 0.1 muestra una síntesis del trabajo realizado– para seguir desarrollando experimentos que participen en ampliar la casuística de estructuras/tecnologías auto-organizadas.

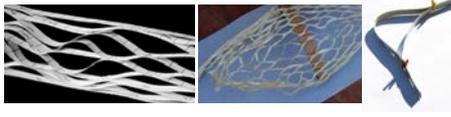
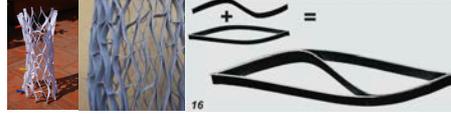
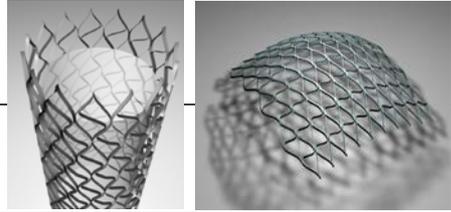
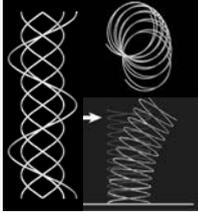
A partir del estudio del mundo vegetal, con particular referencia

a la estructura de madera de las plantas suculentas, se investiga la reproducibilidad material de los tejidos que la conforman. El modelo biológico de referencia es por una parte punto de partida para el desarrollo del diseño, y por otra base de comparación para valorar los resultados.

Las configuraciones estructurales desarrolladas quieren resolver en su interior las tensiones generadas por la acción de fuerzas internas y externas. Esta elección pone en segundo lugar el rol de la función en la arquitectura donde muchas veces una configuración espacial surge de la necesidad de uso y no de los equilibrios de esfuerzos que caracterizan el material usado para la construcción de la misma. La investigación apunta a liberar la forma de la función y el proceso de diseño no se basa sobre una tipología específica, sino sobre las dinámicas de equilibrios que se generan. La ausencia de un objetivo funcional ha permitido llevar el trabajo a estudiar la morfología de estructuras en campo elástico.

Esquema 0.1 Síntesis del trabajo final del máster en Tecnología de la Arquitectura Construcción e Innovación Tecnológica, desde el cual parte la propuesta de tesis. En el trabajo, con el título "Arquitectura y Biomimesis", se realizan los primeros modelos y estudios sobre la fisiología de la planta (analizando sobretudo el tejido seco). © Ludovica Rossi 2011

El trabajo explora la relación entre la forma y el comportamiento material sobre la base de principios biológicos. El punto de partida es el encuentro con las plantas crasas para llegar a la abstracción del mecanismo subyacente y a su implementación técnica. Este enfoque del trabajo determina la pregunta inicial que da origen a la investigación: ¿qué utilidad y/o ventaja

Experimentos desarrollados en el trabajo final de master				desarrollo de los modelos respecto al ejemplo natural	Mundo vegetal: tejido del cactus seco	
modelos físicos	diferentes materiales	relaciones de equilibrio (tracción/compresión)				fibras de cartón seco
	un solo material principal	repetición de franjas con uniones irregulares				fibras de tuna/chumbera
		repetición de un elemento base contruido por 3 franjas (mecanismo tipo resorte)				
modelos virtuales	reproducción de los modelos físicos	costrucción del elemento geométrico base			estudio de las plantas crasas: adaptación a climas áridos	
		configuraciones en el espacio 3D				
	reproducción del tejido del cactus	geometría y variaciones aleatorias				

morfológica ofrece la forma ondulada de las fibras del tejido para la planta? Esto, unido al interés sobre la aplicación de formas orgánicas en la arquitectura, ha llevado a una segunda cuestión: ¿el tejido estructural del cactus podría ser fuente de bio-inspiración sin prever a priori una aplicación específica?

La planta es un organismo complejo, el tejido estructural leñoso de los cactus es parte de un sistema de soporte que involucra también dinámicas de presiones de los líquidos internos por turgencia entre células. Para el desarrollo de la tesis se considera válido analizar únicamente el sistema estructural de los haces vasculares de las cactáceas para evaluar su potencialidad de disparador de conceptos para responder a la pregunta: ¿Si el tejido ofrece una o más prestaciones, cómo y porqué el modelo construido tiene uno u otro comportamiento?

Para describir la mecánica del tejido flexible observado en la planta, el estudio de las fuerzas y del movimiento deben tener lugar simultáneamente, ya que la geometría y las variaciones de la forma dependen de las fuerzas ejercidas sobre y en el tejido. Este contexto aumenta significativamente la complejidad del análisis. Cuando se revelan los componentes esenciales de las plantas y las relaciones morfológicas-funcionales, el siguiente paso es abstraerlos al mecanismo más simple; apuntar a reducir la complejidad para encontrar el principio básico del mecanismo (Schleicher et al., 2014).

El desarrollo de sistemas elásticos y flexibles ha encontrado el obstáculo de conseguir una configuración estática y estable de los modelos elásticos. El uso de un material no convencional, como la banda de rodadura de neumáticos de bicicleta recuperados, ha impulsado la búsqueda de soluciones sucesivas desde la malla tensada, como un sistema auto-organizado en franjas lineales, hasta la morfología de la cúpula con una geometría auto-portante en franjas pre-deformadas. La banda neumática busca respuesta a la pregunta de cómo reproducir la fibra orgánica del tejido vivo en campo elástico y no rígido de la madera seca. También sigue la voluntad de definir un diseño bio-inspirado con una evidente connotación hacia la sostenibilidad buscando un valor añadido mediante el uso de un material reutilizado.

La tesis trabaja en el linde entre el estudio teórico de la biomímesis (dando importancia a los conceptos de evolución y sostenibilidad) y el estudio de un caso práctico que permite aplicar los principios y mecanismos morfológicos a partir del referente biológico (estructura de madera de las cactáceas) hasta llegar a su implementación técnica en el desarrollo de modelos bio-inspirados (físicos y virtuales).

0.2 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La estructura del trabajo sigue, en lo posible, la investigación BID (biologically inspired design) que utiliza sistemáticamente las similitudes entre la naturaleza y los desafíos del diseño para inspirar a los diseñadores (Speck et al., 2017). En primer lugar, se pueden desarrollar aplicaciones en base a una apariencia natural. En la tesis esta fase corresponde a los primeros experimentos que reproducen intuitivamente el tejido orgánico observado. En segundo lugar, la inspiración conceptual permite la creación de reglas o patrones de diseño que siguen modelos de roles biológicos. De forma similar, el avance del trabajo busca definir los mecanismos y patrones con la definición del elemento morfológico de base y el comportamiento del sistema bio-inspirado. En tercer lugar, la inspiración computacional, mediante la transferencia del diseño generativo y la morfogénesis natural, permite la sistematización de la información por medio de su representación.

A partir de los significados de biomimesis y bio-inspiración se plantean las bases teóricas del trabajo sobre los conceptos de evolución y sostenibilidad (Esquema 0.2). La tesis utiliza estos aspectos teóricos para establecer unos límites en el desarrollo del proyecto arquitectónico. Estos devienen unos hilos conductores en la toma de decisiones del estudio, e inciden en la estética de los modelos. Sus significados se tratan en la segunda parte de esta introducción, y son parte de los criterios de valoración de los resultados obtenidos en las conclusiones.

En el primer capítulo se ponen las bases del trabajo bio-inspirado. Se estudia el referente orgánico, mediante el estudio bibliográfico, la observación de campo y la recopilación de muestras de tejido seco de la madera. La comprensión del modelo biológico se obtiene interpolando los estudios sobre la fisiología de la planta con la reproducción del tejido por medio de unos modelos físicos. La construcción de los primeros experimentos permite fomentar la comprensión de los mecanismos biológicos de crecimiento y adaptación del tejido. Se definen los factores iniciales que determinan el proceso de conceptualización de los principios biológicos.

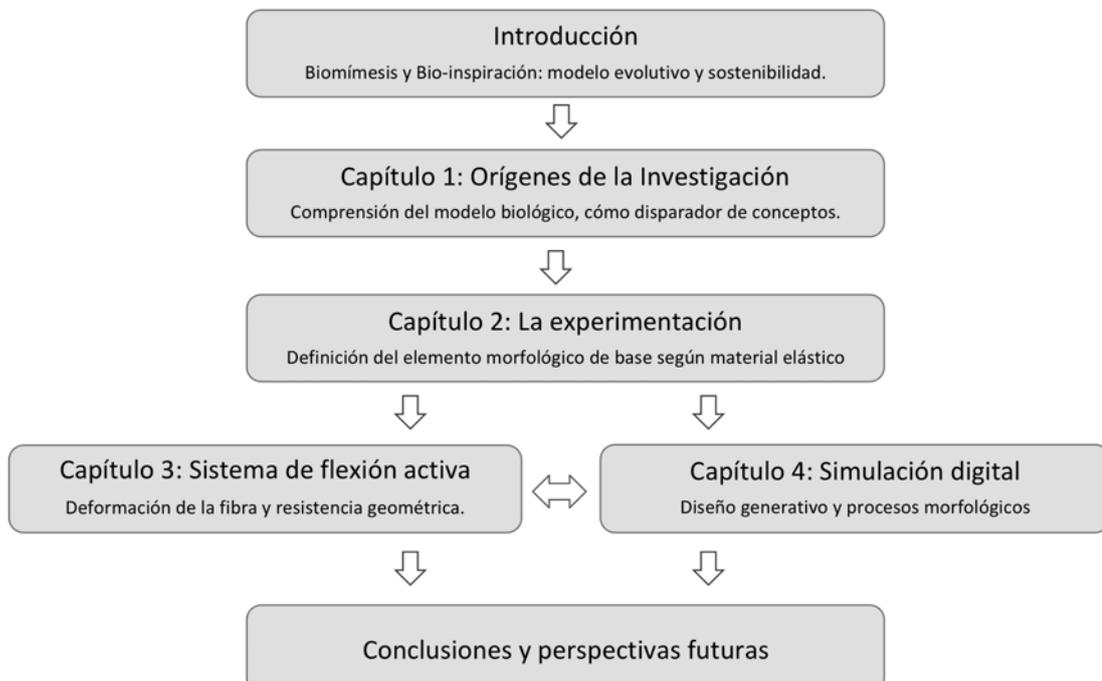
En el segundo capítulo se define el vocabulario del sistema biológico. Por medio de la construcción de modelos físicos con diferentes materiales se llega a definir la banda neumática para la representación de las dinámicas elásticas del tejido vivo. La búsqueda de la forma está ligada al comportamiento del material, donde la forma varía según las deformaciones. El trabajo comparativo entre los modelos a pequeña escala, otros ejemplos de referencia y la platilla biológica, permiten definir el

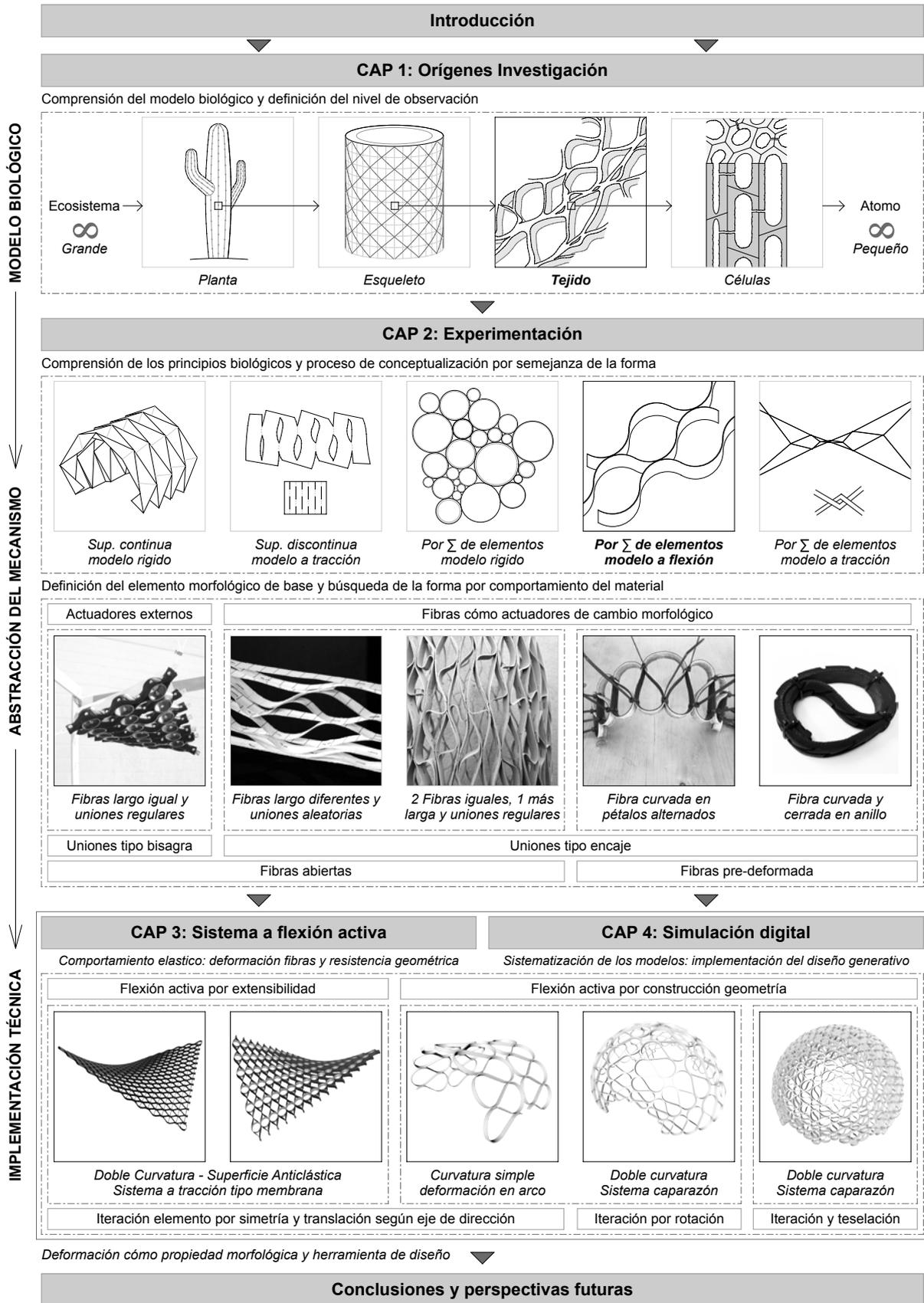
elemento morfológico de base: la franja. Este paso determina la abstracción del mecanismo morfogenético del tejido elástico, separando la solución del referente orgánico. En este capítulo los experimentos realizados se comparan con ejemplos arquitectónicos por similitud en la forma de las ondas.

En el capítulo tres se investiga el comportamiento estructural de los modelos y se buscan sistemas que se basan sobre análogos principios de diseño estructural: la flexión activa. Se analizan los modelos en bandas neumáticas como sistema, donde la agregación de las franjas y las deformaciones aplicadas inciden en el comportamiento global. La configuración general del sistema dependerá de las propiedades mecánicas de un material altamente flexible, como el neumático, y de la resistencia geométrica obtenida por la morfología bio-inspirada.

En el cuarto capítulo se trata el procedimiento de representación de los modelos, como paso necesario para comprender y sistematizar las dinámicas de equilibrio propias del sistema bio-inspirado. Se describen los modelos virtuales dibujados en 3D, en relación con los resultados obtenidos en los modelos físicos del capítulo anterior. La digitalización de la información codifica la forma bio-inspirada, y se desarrolla a partir de un diseño algorítmico que permite combinar procesos implícitos y explícitos por medio de la búsqueda de patrones repetitivos. La representación digital, utilizando el software Cinema4D, permite establecer las leyes de transformación necesarias para definir el modelo geométrico.

Esquema 0.2 Estructura de la tesis por capítulo: en la introducción se establecen las bases teóricas en la cuales desarrollar el caso práctico de diseño bio-inspirado; en los capítulos siguientes se desarrolla el proceso ascendente con la comprensión modelo biológico (capítulo 1), la abstracción del mecanismo (capítulo 2) y la implementación técnica (capítulos 3 y 4). Los capítulos tres y cuatro están interconectados, es el cuerpo que investiga la implementación técnica del rol biológico. En las conclusiones se comentan los resultados obtenidos en general y por capítulos. © Ludovica Rossi 2018





La estructura del trabajo ha priorizado mantener la continuidad sobre la temática material entre los capítulos dos y tres, dejando por último la representación digital de los modelos en el capítulo cuatro. Cabe aclarar que los procesos están interconectados. Sin la representación virtual del capítulo cuatro no hubiera sido posible comprender las dinámicas de rigidez geométrica explicitada en el capítulo tres. Los dos últimos capítulos investigan la implementación técnica del rol biológico y sus resultados se comentan en la conclusiones (Esquema 0.3).

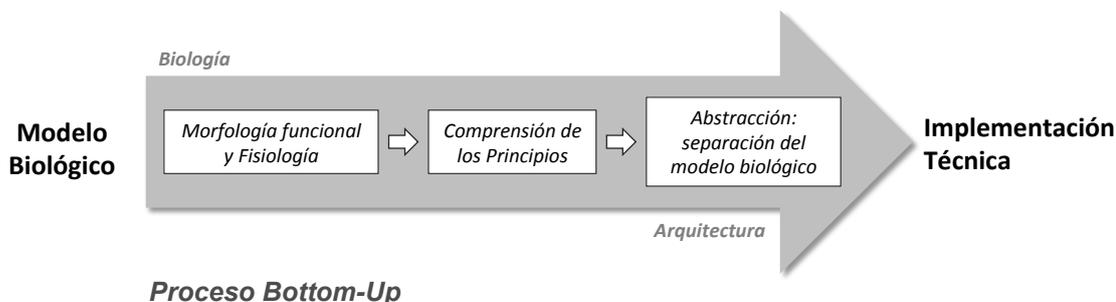
0.3 METODOLOGÍA

La biomimética es una disciplina de investigación interdisciplinaria en la que diversas áreas cooperan en proyectos para la implementación de estrategias naturales en la esfera y la tecnología humana. Dependiendo de la experiencia científica, la investigación se concentra más en los aspectos biológicos o más en los aspectos técnicos de la biomimética (Speck y Speck, 2008). Por los objetivos del trabajo, la tesis prioriza la investigación sobre el referente natural y aplica un enfoque biomimético Bottom-up, que sigue un proceso ascendente de abajo hacia arriba (Esquema 0.4). Partiendo del modelo biológico se individualizan diferentes pasos hasta llegar a la abstracción del referente para su implementación técnica.

El desarrollo biomimético ascendente se basa en los conocimientos de las funciones y estructuras biológicas como punto de partida de la investigación. Un enfoque inverso es el Top-down, que sigue un procedimiento de arriba hacia abajo. El primer paso de este procedimiento es individualizar el problema técnico de un producto, para luego buscar ejemplos naturales con soluciones que parecen prometedoras. Este proceso suele analizar varias plantillas biológicas para buscar las que encajan mejor como generadores de concepto para unos requisitos técnicos específicos (Speck y Speck, 2008). Las más prometedoras son seleccionadas y los pasos a seguir son similares al proceso ascendente: abstracción del mecanismo biológico para su implementación técnica.

Esquema 0.3 (Página anterior) Estructura de la tesis que evidencia las fases según capítulo y decisiones: comprensión de la plantilla biológica según la escala de observación; proceso de conceptualización según modelos y materiales empleados; definición del elemento morfológico de la franja para la abstracción del mecanismo y su separación del referente orgánico; análisis de la implementación técnica del mecanismo según el comportamiento elástico y la construcción geométrica donde la deformación es una propiedad morfológica y una herramienta de diseño.
© Ludovica Rossi 2018

Esquema 0.4 Bottom-up, proceso ascendente de abajo hacia arriba: ejemplificación de los pasos principales en la progresión de un proyecto biomimético desde las plantillas biológicas hasta la implementación técnica del mecanismo.
©Ludovica Rossi 2018



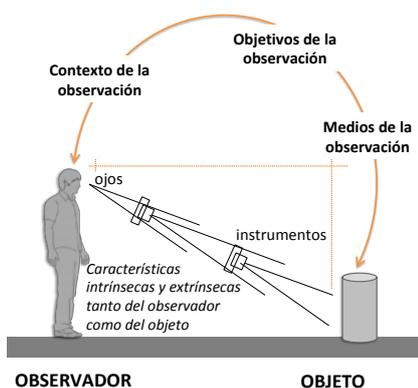
En ambos enfoques, la abstracción del mecanismo es un paso fundamental que separa las soluciones encontradas del referente biológico. Para llegar a una implementación técnica la investigación bio-inspirada se caracteriza por tener niveles sucesivos de abstracción y modificación. Por los objetivos del trabajo se ha aplicado un enfoque ascendente con la voluntad de verificar cómo un modelo biológico puede ser un generador de conceptos y si estos pueden ser aplicados a la tecnología.

La metodología de trabajo empieza por analizar la biomecánica y la morfología funcional del tejido de madera del cactus, entendido como el sistema biológico de referencia. El siguiente paso conduce a una comprensión de las estructuras, formas y funciones biológicas. Es necesaria la comprensión fenomenológica de los principios físicos subyacentes que están involucrados en los mecanismos observados. En este proceso el paso siguiente es la abstracción del rol biológico. Esto significa separar las soluciones encontradas de sus ejemplos naturales (Speck y Speck, 2008). Con el fin de desvelar los principios mecánicos básicos involucrados, es necesario estudiar las relaciones funcionales-morfológicas del modelo biológico de forma sistemática. Aquí se prueba la funcionalidad de un mecanismo separando progresivamente todos los elementos que parecen no estar relacionados con el mecanismo. Siguiendo este enfoque, se pueden reducir las partes constituyentes que juegan un papel clave en el mecanismo. Esto es de particular importancia porque el conocimiento sobre los componentes básicos que se necesitan para un mecanismo abre la puerta para su uso creativo (Lienhard et al., 2014).

Esta visión amplía la libertad de diseño y permite conceptos más allá de la mímica directa del sistema natural. En este trabajo la implementación de modelos físicos a pequeña escala es el instrumento principal para la comprensión y reinterpretación del principio mecánico.

La elaboración del trabajo integra el estudio bibliográfico con dos métodos de análisis según la fase de la investigación: el estudio de campo y recopilación de muestra del referente orgánico; y la experimentación por medio de la construcción de modelos físicos a pequeña escala y el diseño computacional.

La investigación teórica, mediante el estudio bibliográfico, permite comprobar los datos obtenidos en las fases de observación y experimentación. En el capítulo primero, proporciona la información sobre la fisiología de la planta para verificar los mecanismos biológicos involucrados. En los capítulos dos y tres, los modelos realizados se comparan, mediante análisis bibliográfico, con otros ejemplos arquitectónicos por similitud



Esquema 0.5 En el procedimiento de observación intervienen diferentes factores que inciden en los resultados. Estos son tanto internos como externos al proceso de observar: relación dimensional entre objeto y observador, instrumentos utilizados, objetivos de la observación, etc.
© Ludovica Rossi 2009

de forma y comportamiento, lo que permite determinar en qué ámbito enfocar la investigación. Además, en el capítulo dos, el análisis de las propiedades del material y, en el capítulo tres, el estudio del comportamiento dinámico de las estructuras elásticas ofrecen los conocimientos teóricos necesarios para la implementación técnica de la plantilla biológica. En el capítulo cuatro se realiza el estudio teórico del modelo generativo para la comprensión de los fenómenos subyacentes en la construcción digital.

A nivel más general, la investigación teórica permite establecer el marco de interpretación y aplicación de la biomimesis. La documentación define las líneas generales de la investigación: mecanismo evolutivo de la simbiosis y experimentación con un material recuperado por su connotación medioambiental.

Las herramientas empleadas, junto al trabajo documental, para el desarrollo del trabajo han sido: recopilación de muestras de plantas cactáceas, fotografía macro con o sin fuente de ampliación, construcción de modelos físicos y representación digital en dos y tres dimensiones.

0.3.1 La metodología de la observación

La experimentación en su primera fase es desordenada y creativa. La observación como metodología de análisis compara la información, el conocimiento y los resultados obtenidos a lo largo del trabajo para su codificación y valoración. El descubrimiento casual del tejido vegetal lignificado del cactus, se puede definir como la primera fase de observación, anterior a un estudio sistemático. Las fases sucesivas de observación se convierten en una parte integral del proyecto y ponen en evidencia que:

- El procedimiento de observar implica una interpretación del elemento/objeto observado.
- Los instrumentos utilizados inciden tanto en el procedimiento como en la interpretación.

El proceso de observación (Esquema 0.5) se ha aplicado desde un primer momento en el estudio de las plantas cactáceas. La estructura de madera de las plantas crasas, por su tamaño, ofrece la ventaja que algunas de las características son visibles a la escala real. Mediante el instrumento de la fotografía macro (Fig. 1), con o sin fuente de aplicación óptico, se ha observado el tejido seco del cactus (Fig. 2) a una escala ampliada, no visible a simple vista. Este procedimiento ha focalizado la interpretación del tejido orgánico por fibras con la dirección longitudinal dominante respecto a las otras.



Fig. 1 Utilización de la máquina fotográfica con el objetivo macro y un fuente de ampliación óptica para la observación y documentación de las muestras de tejido de cactus seco. © Ludovica Rossi 2011



Fig. 2 Ejemplo de muestra de tejido de cactus seco, fragmento de pala de una planta del género una Opuntia recogido en los Jardins de Mossèn Costa i Llobera situado en la montaña del Montjuïc de Barcelona. © Ludovica Rossi 2011

Fig. 3 (Página siguiente) Secuencia de la puesta en tensión de una malla regular en banda de neumáticos recuperados de bicicletas, el modelo permite observar el comportamiento dinámico del tejido elástico según los esfuerzos externos aplicados. El experimento utiliza un sistema tipo jaula como entorno rígido de donde tirar de los cables para estirar la malla. Según la posición y dirección de los cables la configuración espacial de la malla varía.
© Ludovica Rossi 2013

Se han analizados diferentes especies de la familia de la Cactaceae pertenecientes a las dos subfamilias de Cactoideae y Opuntioideae. Las muestras estudiadas del tejido seco y la observación de plantas vivas hacen referencia a tres lugares: el complejo arqueológico de Pucará de Tilcara en el altiplano de la Puna andina, los Jardins de Mossèn Costa i Llobera situado en la montaña del Montjuïc de Barcelona y L'Orto Botanico de Catania, Sicilia. A estos se acompaña la observación cotidiana de plantas cultivadas en casa y encuentros puntuales de casos que se han valorados de interés incluir en la investigación

La observación de las plantas en su entorno natural, permite estudiar cómo el organismo ha crecido de forma diferente y se ha adaptado al medioambiente (particularmente significativo es el caso del género *Opuntia*). También la observación de algunos individuos en maceta durante un periodo prolongado ha permitido estudiar la fisiología de esta familia de plantas. Es el caso de un individuo del género *Echinopsis* con un tamaño pequeño (individuo joven), que se ha podido secar reproduciendo en parte las condiciones observadas en el entorno natural de los primeros ejemplos de madera seca de cactus. El estudio de campo, mediante la comparación de diferentes individuos, ha proporcionado las bases que unen el conocimiento teórico de la fisiología del organismo (obtenido con el estudio bibliográfico) con la respuesta que la planta debe dar para adaptarse y seguir creciendo en su medio natural por ofrecer una evidencia del comportamiento y adaptación del organismo al medio ambiente.

- La observación no se aplica únicamente al estudio del referente biológico. Esta metodología está presente a lo largo del trabajo de investigación y el procedimiento ha sido aplicado en los casos siguientes:
- en la fase de construcción de los primeros modelos físicos donde el objetivo era definir el mecanismo morfológico y fisiológico de la planta;
- para la comparación de los modelos realizado en diferentes materiales para ir definiendo e identificando el ámbito de trabajo, en particular en la evaluación de trabajar en un entorno de estructura elástica;
- en la fase de construcción de modelos en bandas elásticas para la definición del comportamiento morfológico del tejido según las dinámicas de adaptación y crecimiento observadas;
- en la fase de representación de los modelos virtuales para la codificación y sistematización de las deformaciones aplicadas y/o generadas según la morfología obtenida.

0.3.2 Los modelos como método

Una metodología ampliamente utilizada es la construcción de modelos como parte experimental del trabajo. Estos representan un eje central de la investigación y responde a la idea/imaginario de descubrir lo desconocido siguiendo el ejemplo del arquitecto Frei Otto. Se ha tratado de pensar en tres dimensiones: *“El ojo interior del cerebro no debe ser plano sino tridimensional para que todo sea un objeto en el espacio. No estamos viviendo en un mundo bidimensional”* (Frei Otto, icon 023 - McGuirk, 2015).

- Modelos físicos.** El desarrollo de estructuras en campo elástico necesita la implementación de modelos físicos sin los cuales no sería posible entender la forma en su totalidad. La construcción de modelos físicos, a pequeña escala, es el método aplicado para estudiar la relación entre las fibras orgánicas y el comportamiento del tejido en campo elástico (y no rígido). La reproducción material del tejido permite verificar cuales mecanismos morfogenéticos están ligados al sistema constructivo y pone en relación la observación de la plantilla biológica estática con el comportamiento dinámico del tejido (Fig. 3). La implementación técnica del mecanismo biológico en forma de prototipo no se encuentra al final, sino más bien en medio de un proceso de diseño iterativo en el que la retroalimentación de la construcción puede llegar tan lejos, como para fomentar la comprensión del modelo biológico (Lienhard et al., 2014). Debido a que la metodología principal está orientada a la construcción de modelos físicos los conceptos de materialidad y manipulación son fundamentales en el desarrollo del análisis.
- Modelos virtuales.** La simulación digital es la metodología de representación utilizada para comprobar la morfología obtenida en los modelos físicos. Por medio del programa Cinema 4D la construcción de diferentes modelos virtuales es necesaria para comprensión de las dinámicas que generan la forma. La representación es el instrumento base de la disciplina, sin la cual no es posible definir el lenguaje arquitectónico. La definición del modelo generativo permite establecer cuáles son los patrones, la topología, los elementos repetitivos, etc. para la construcción de una estructura compleja.

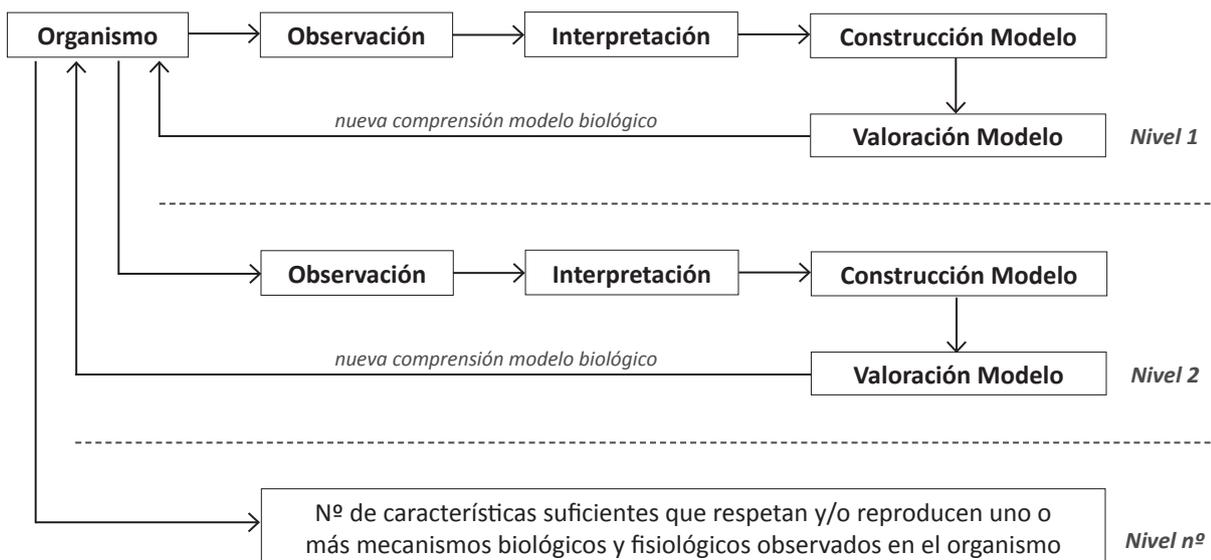
La realización de modelos tanto físicos como virtuales permite la comprensión fenomenológica de los principios físicos subyacentes que están involucrados en los mecanismos del referente orgánico. El proceso de trabajo puede ser abierto para reconfiguraciones y adaptaciones en un proceso de diseño



iterativo en el que la retroalimentación de la construcción real puede llegar tan lejos como para fomentar la comprensión del modelo biológico (Lienhard et al., 2014). Donde una interpretación aplicada a un prototipo permite extraer unas valoraciones o conclusiones, las cuales inciden en la observación del organismo y a su vez en la interpretación (Esquema 0.6). Hasta llegar a la construcción de un modelo capaz de agrupar un número suficiente de características que respetan los mecanismos biológicos y/o fisiológicos del organismo. En este esquema de relaciones el proceso de interpretación y la construcción de los modelos asumen suficiente coherencia y pueden ser considerados válidos.

La experimentación con modelos sucesivos, tanto físicos como virtuales, lleva implícita la metodología de prueba y error. El método tiene un componente intuitivo y práctico. Por medio de la repetición de experimentos sucesivos en los cuales cambiando una o más variables se modifica el comportamiento del sistema y se obtienen diferentes resultados. Estos a su vez se han valorado necesarios, relevantes o no significativos para la temática tratada, según el caso. El procedimiento se considera válido porque la investigación estudia la forma ondulada de las fibras orgánicas sin proponer a priori una técnica constructiva y/o una solución espacial. Si bien a lo largo del trabajo algunos experimentos no han llegado a un resultado formalmente satisfactorio, han permitido definir unos momentos de cambio en el desarrollo del presente estudio.

Esquema 0.6 El procedimiento para la definición del modelo bio-inspirado no es lineal. A partir de un primer nivel de observación e interpretación que lleva a la construcción de un modelo. La valoración de éste incide, a su vez, en un nivel sucesivo de observación, y así se repite hasta llegar a la construcción de un modelo que agrupa un número suficiente de mecanismos biológicos y/o fisiológicos del organismo. En este esquema, cuando las relaciones entre interpretación del organismo y el comportamiento de los modelos asumen coherencia, los resultados se consideran válidos. © Ludovica Rossi 2017



0.4 INTERACCIONES

La identificación del tema de tesis surge de un ejercicio que el profesor arquitecto Fernando Ramos me había asignado en la búsqueda de aclarar las ideas y que ha sido eficaz para focalizar el interés en el estudio de entramados auto-organizados que resuelven el equilibrio de los esfuerzos en su interior. El profesor F. Ramos me ha guiado en el proceso de investigación, desarrollo y formalización del trabajo de tesis. Su contribución ha permitido focalizar el trabajo sin por ello encajar el tema en un esquema predeterminado como pueden ser los aspectos funcionales, tipológicos, etc. Este enfoque ha consentido integrar el ámbito científico de la arquitectura con cuestiones no propiamente de la construcción como la biología y la observación del cactus.

Para poder trabajar en el campo de la biomímesis era necesario contactar con expertos que desde diferentes ámbitos pudieran orientarme en la comprensión de cómo canalizar el conocimiento de la planta (y la naturaleza en general) hacia un enfoque bio-inspirado. La observación e interpretación de referente orgánico son pasos importantes en el procedimiento de investigación y conocer la experiencia de otros era percibido como una necesidad para la toma de decisiones y valoraciones del trabajo. En este sentido ha sido esencial, al inicio del desarrollo de la tesis, la entrevista realizada al profesor ingeniero Antonio Di Carlo, del *Dipartimento di Strutture* [1] de la *Università degli Studi di Roma TRE* y coordinador del *Laboratorio di Modellazione & Simulazione* (LaMS), reproducida en el apéndice 1. Hablar con el prof. A. Di Carlo ha sido relevante para definir cómo incide la observación en el estudio y decidir qué escala de análisis del organismo aplicar para la definición del mecanismo biológico, entre los muchos posibles. Además la entrevista ha permitido entender cuestiones técnicas del funcionamiento de las células y las diferencias básicas del movimiento celular vegetal y animal.

Se valora de importancia haber podido conocer al profesor Stefano Mancuso del *Dipartimento di Scienze Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente* (DISPAA) de la *Università degli Studi di Firenze* y director del *International Laboratory for Plant Neurobiology* (LINV). La oportunidad de visitar el laboratorio ha permitido entender en persona qué métodos se utilizaban para estudiar el comportamiento de los organismos vegetales. Aunque no compartimos su estructura funcional, sin los primeros organismos fotosintéticos no se hubiera desarrollado la vida como la entendemos actualmente. Revalorizar el rol biológico de las plantas significa participar en cambiar la percepción que hay sobre ellas. El trabajo del profesor S. Mancuso muestra cómo el mundo vegetal es una fuente de inspiración para encontrar soluciones a los retos que concierne la vida humana.



Fig. 4 Fotografía del final de obra de la construcción de la casa en el árbol "Cloudster", expuesta en el Ternifestival 16/25 de Septiembre 2016 en el Centro Arti Opificio Siri (Terni -Italia). El grupo Equalogical Lab ha identificado un arquetipo de geometrías de adaptación mutua para interpretar la complejidad entre naturaleza, hombre y arte. La solución constructiva ha sido realizar una estructura recíproca que se adapta a la copa del árbol apoyada sobre una tensegrity tweest de 5 brazos que gira alrededor del tronco sin sobrecargar el mismo. © Equalogical Lab 2016

[1] Actualmente en parte absorbido en el Dipartimento di Matematica e Fisica.



Fig. 5 Instalación "Tensions Cromàtiques" realizada en la 60ª edición del Girona Temps de Flors, 10-19 de mayo de 2015. Es una estructura ligera formada por cables y cintas de colores suspendida entre los árboles de la zona arqueológica de la ciudad. El sistema a tracción permite obtener una sensación de volumen que flota en el espacio para establecer un diálogo entre la tierra y el cielo. ©Equalogical Lab 2015



Fig. 6 Workshop "Tensegrity Pavillon" en el marco de la 5ª edición de IFAC2016 - Festival Internacional de Arte y Construcción, 16/25 de Septiembre de 2016 en Los Baños de Sierra Alhamilla, Pechina (Almería, España). El espacio se origina de la unión de 4 tensegrits tweest de 4 astas cada una que se utilizan como elementos verticales de la cubierta tensada, inspirada en las telarañas y conformada por una trama de cables. © Equalogical Lab 2016

Como en la naturaleza, las interacciones con el entorno inciden en la evolución del trabajo de tesis. Con diferentes relevancias, y de forma más o menos directa, hay experiencias que han participado en el proceso de investigación, un camino con diferentes ramificaciones posibles. Importantes han sido las revisiones con el profesor arquitecto Josep Ignasi de Llorens Duran, que han contribuido a definir la elección de trabajar la configuración de un entramado bidimensional en alternativa a uno tridimensional (capítulo 2 párrafo 2.2.4). Esta valoración ha sido relevante para afrontar las limitaciones del material por la característica de estiramiento de la banda de neumático y dirigir la investigación hacia la franja pre-deformada. Esta transición en el desarrollo del diseño ha permitido profundizar en los mecanismos morfogénéticos del tejido vivo del cactus.

Relevantes también son las colaboraciones y los trabajos realizados con el grupo Equalogical Lab, una plataforma que une arquitectos interesados en experimentar morfologías bio-inspiradas y tecnologías low-cost con una atención hacia la sostenibilidad. Gracias a la colaboración de la arquitecta Elisabetta Gaglio y el arquitecto Laurens Schocher hemos realizado estructuras efímeras, entre otras, que implementan mecanismos del mundo de la naturaleza. Las experimentaciones, a escala 1:1, tienen el comportamiento morfológico que se observa en referentes naturales como las estructuras en tensegrity, un sistema que se encuentra en las células y le permite extenderse y contraerse, o las estructuras tensadas de mallas y/o cables bio-inspirada en la telaraña. Estas experiencias contribuyen en afianzar el conocimiento sobre los sistemas bio-inspirados. Asimismo son necesarias para a construir una manualidad que permita experimentar con los modelos físicos para implementar la variación geométrica de la deformación en relación a las características del material, como parte relevante de las aportaciones del trabajo de tesis.

En la base de la investigación, la red de informaciones, conexiones e interacciones inherentes a temas de arquitectura, pero procedentes de otras áreas, se asocia a la temática de la sostenibilidad. En particular la experiencia de colaboración en los cursos on-line de Arquitectura Sostenible UNAUS (University Network for Architectural and Urban Sustainability), dirigidos por el profesor F. Ramos, ha ofrecido la oportunidad de trabajar con diferentes profesores y colegas del *Departament de Construccions Arquitectòniques I* (UPC) que han contribuido a los fundamentos teóricos del trabajo de investigación. La búsqueda de un marco claramente sostenible define la elección de centrar la investigación hacia el concepto de tecnoesfera, para la reincorporación de materiales y productos en el ciclo productivo en forma independiente de los ciclos biológicos.

0.5 BIOMÍMESIS Y BIO-INSPIRACIÓN

Biomimética es un término maleta construido desde la unión del sufijo bio [2], que significa biológico, y la palabra mimesis, que indica imitación. En 1957, el ingeniero y físico estadounidense Otto Herbert Schmitt [3] acuñó el término “biomiméticos”, cómo un enfoque biológico de la ingeniería en contraste con la “biofísica”, que describe un enfoque físico de la biología. El término “biomiméticos” apareció por primera vez en 1974 en el diccionario Webster, definido como el estudio de la formación, estructura o función de los materiales, mecanismos y procesos biológicos con el fin de sintetizar productos artificiales que imitan a los naturales (Speck et al, 2017). En el diccionario inglés Collins “biomimetic” hace referencia a un producto hecho por el hombre, imitando la naturaleza o un proceso natural. En la Real Academia Española se encuentra el término “biomimetismo” para indicar la *“imitación de los diseños y procesos de la naturaleza en la resolución de problemas técnicos”* [4].

La problemática y búsqueda de significados alrededor del término biomimesis están ligadas a la amplia gama de palabras que han ido surgiendo en las últimas décadas. Cada una conlleva matices diferentes y a veces se sobreponen en sus usos.

Biomimética es la realización de aplicaciones técnicas basadas en las ideas resultantes de la investigación biológica fundamental. Los desarrollos biomiméticos no son transferencias directas de la biología. Los organismos vivos funcionan como generadores de conceptos para aplicaciones técnicas innovadoras pero no están directamente involucrados en la producción de productos biomiméticos [5] (Speck y Speck, 2008).

Desde el año 2015 la norma ISO 18458 describe diversos términos con el objetivo de proporcionar un marco adecuado para aplicaciones biomiméticas. En la norma ISO Biomiméticos se define como una *“cooperación interdisciplinaria de biología y tecnología u otros campos de innovación con el objetivo de resolver problemas prácticos a través del análisis de función de sistemas biológicos, su abstracción en modelos, y la transferencia y aplicación de estos modelos a la solución”*. La norma distingue el término “biónica” como una *“disciplina técnica que busca replicar, aumentar o reemplazar funciones biológicas por sus equivalentes electrónicos y/o mecánicos”* [6]. Dependiendo del contexto, es posible que el término biónica se utilice con cierta frecuencia como sinónimo de biomiméticos, ambos términos expresan el aprendizaje de la biología para las innovaciones técnicas; esto se debe a la problemática de traducción entre diferentes idiomas, con particular referencia entre inglés y alemán [7].

[2] Según la Real Academia Española el primer significado del elemento compuesto hace referencia al significado de “vida” u “organismo vivo”. El segundo es *“biológico, que implica respeto al medio ambiente”*.

[3] Otto Herbert Schmitt (06 abril 1913 - 06 enero 1998) fue ingeniero estadounidense conocido por sus contribuciones científicas a la biofísica y por establecer el campo de la ingeniería biomédica.

[4] La palabra biomimesis todavía fatiga a entrar en los diccionarios de la lengua italiana. No está incluido en la edición en línea de la enciclopedia Treccani, que si incluye biomimético como proceso. Esto solo está asociado con la rama científica de la química, y es un *“proceso realizado con el propósito de imitar y reproducir un fenómeno observado en los sistemas biológicos”* (Treccani).

[5] A diferencia de lo que sucede en el campo de la biotecnología los organismos vivos (bacterias, protozoos, hongos, plantas, animales) están directamente involucrados en el proceso de producción o degradación. Por lo cual el uso de organismo vivo participa en el desarrollo tecnológico para producir sustancias deseadas o para reducir sustancias indeseables (Speck and Speck, 2008).

[6] El diccionario de la Real Academia Española en ámbito tecnológico tiene un significado similar referente a la aplicación del estudio de los fenómenos biológicos a la técnica de los sistemas electrónicos y mecánicos. En medicina concierne el desarrollo de órganos artificiales que recuerdan el funcionamiento natural por medios electromecánicos.

[7] En alemán la segunda parte de la palabra biónica viene de “Technik”, que significa ingeniería. El término Bionik combina entonces las palabras biología e ingeniería asumiendo un significado similar a biomimética (fuente: BIONIK Kompetenz Netz <http://www.bionik.de>). La definición del término “bionik” se acordó en 1993 en una reunión de la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI), y fue extendida por Werner Nachtigall en 1998: disciplina científica, que trata sistemáticamente con la ejecución técnica y la implementación de construcciones, procesos y principios de desarrollo de los sistemas biológicos. Esto también incluye varias formas de interacción entre los elementos y sistemas vivos y no vivos (Grubber, 2011).



Fig. 7 Interior de la Fábrica de lana Gatti, Roma 1953 de Pier Luigi Nervi. En su obra hay una relación técnica con los modelos biológicos. En una especificación de patente para elementos de hormigón prefabricados, se refiere directamente al rol del modelo biológico de los huesos: “La naturaleza a menudo ofrece ejemplos de eso (que las costillas isostáticas siguen las trayectorias de estrés) y las trabéculas del hueso, observadas por primera vez por Culmann, son clásicas” (Antony at all, 2014). Fuente: © Halpern at all, 2013.



Fig. 8 Interior del aeropuerto de Baraja Madrid Terminal T4, diseñado por los arquitectos Richard Rogers y Antonio Lamela e inaugurado en 2006. Sus pilares ramificados recuerdan la forma de los árboles, donde la estructura ramificada redistribuyen la carga vertical optimizando el comportamiento estructural. Fotografía: © Ludovica Rossi 2007

La biomimética o biónica combinan las disciplinas de biología y tecnología con el objetivo de resolver problemas técnicos a través de la abstracción, la transferencia y la aplicación del conocimiento obtenido a partir de modelos biológicos (Speck at all, 2017). Se definen como actividades, que llevan información del campo de la biología (o naturaleza en general) a la tecnología (Gruber, 2011). El campo de aplicación es extenso e involucra sistemas tecnológicos tratando la relación forma–función y entrando en el campo de la morfología funcional (Fig. 7).

La científica forestal estadounidense Janine M. Benyus popularizó el término Biomimicry con la publicación del libro “*Biomimicry-Innovation Inspired by Nature*” en 1997 y fundó el Biomimicry Institute en 2006 junto a Bryony Schwan. El termino Biomimicry tiene un enfoque holístico incluyendo la innovación tecnológica cómo el diseño ecológico. En general, “biomimetismo” significa aprender del mundo natural al imitar o inspirarse en los diseños y procesos de la naturaleza para resolver problemas humanos (Speck at all, 2017). Además, hace especial hincapié en las ideas de diseño sostenible emulando de la naturaleza, y aborda aspectos filosóficos y de diseño interdisciplinario, donde la naturaleza es un modelo para enfrentar los desafíos del desarrollo sostenible (social, ambiental y económico) (ISO 18458:2015).

En alternativa a biomimético se utilizan a veces “biológicamente inspirado” o “bio-inspirado”. Estos términos son más amplios. La bio-inspiración se basa en observar las funciones desempeñadas como resultado de milenios de evolución darwiniana, en comprender los procesos que subyacen a estas funciones, y luego en imitar aspectos interesantes o relevantes de estas funciones sin las restricciones impuestas por la biología. En el estudio de los organismos vivos, en todas las escalas, la función es una idea central: los organismos no pueden permitirse “decorarse” a sí mismos con alguna característica que no cumpla una función (Whitesides, 2015). Al tratar de imitar los comportamientos y las propiedades de los sistemas vivientes, se implica por consiguiente imitar los procesos y las estructuras funcionales (Fig. 8).

El enfoque es creativo y se basa en la observación de sistemas biológicos, entendido como un grupo coherente de elementos observables que se originan en el mundo de la vida, que abarcan desde la escala nanométrica hasta la macro-escala (ISO 18458:2015). Los sistemas vivos son extraordinariamente complicados, incluso los organismos unicelulares más primordiales. Los complejos mecanismos y estructuras se combinan para convertirse en funciones aparentemente simples (Fig. 9). A pesar de la complejidad final, una comprensión de los

rudimentos de la función biológica permite comenzar a apreciar los procesos de optimización de la función que han aparecido durante miles de millones de años de evolución (Whitesides, 2015).

La terminología alrededor del concepto de la biomímesis se extiende y matiza los ámbitos de aplicación (promesa biomimética, biomimética de los ecosistemas, desarrollo biomórfico, entre otros). Foco de la investigación son los procesos propios del mundo de la naturaleza y sus aplicaciones a la tecnología humana. La rama científica es interdisciplinar y el campo de aplicación se extiende a diferentes áreas entre las cuales se encuentra la arquitectura (Fig. 10). La idea central es que la naturaleza, imaginativa por necesidad, ya ha resuelto muchos de los problemas que estamos intentando resolver, buscando así soluciones sostenibles mediante la emulación de patrones probados por la naturaleza a lo largo del tiempo (Riechmann, 2003).

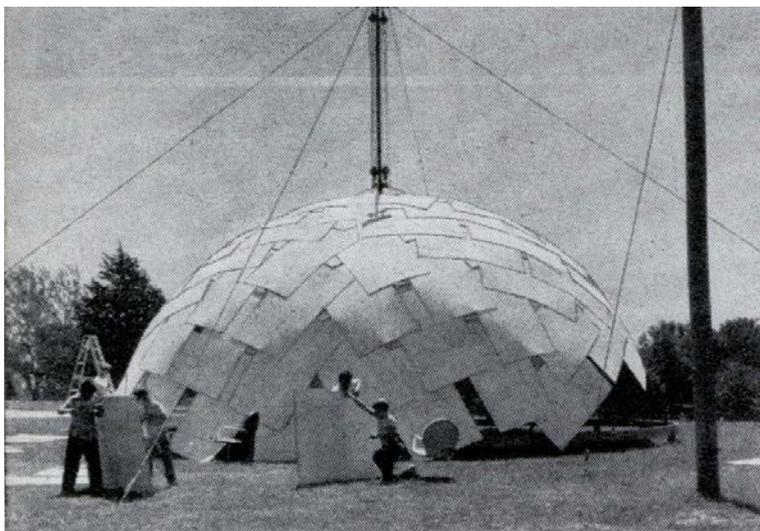


Fig. 9 Iglesia en Naju, Corea del Sur 1958, construida según el modelo de la cúpula geodésica Plydome (1957) del arquitecto Buckminster Fuller. El edificio (con un diámetro de unos 12 m) se compone de 136 placas de madera contrachapada que definen el patrón geométrico sobre la forma global de la esfera. B. Fuller ha introducido un enfoque único sobre la construcción de cáscaras livianas, como parte de sus estudios sobre cúpulas geodésicas, donde aproxima la geometría básica de una esfera a un poliedro regular. Los bordes y ángulos se utilizan para colocar múltiples placas en un patrón de mosaico espacial, que se sujetan entre sí doblando las placas en sus esquinas. Fuente: © Popular Mechanics



Fig. 10 Instalación experimental The Loop de Howeler + Yoon Architecture, proyecto finalista del concurso Programa Jóvenes Arquitectos, Museo de Arte Contemporáneo (MoMA) New York 2006. El prototipo muestra el interés en la libertad de crear formas curvas complejas por medio de franjas en polímeros dobladas in situ. Medidas aproximadas 2 m x 2 m x 2 m. Fuente: © Lienhard at all, 2013

Fig. 11 ICD/ITKE Research Pavilion 2010 conformado por tiras planas de madera contrachapada acopladas posteriormente en una estructura de arco auto-equilibrada en tramos de 4 m. La disposición radial y la interconexión de los arcos desarrollan al diseño final en forma de toro que define las propiedades de carga de la carcasa. La estructura innovadora demuestra los desarrollos en el diseño computacional orientado a materiales, simulación y procesos de producción en arquitectura. El resultado es una estructura de flexión activa hecha completamente de tiras de contrachapado extremadamente delgadas y elásticamente dobladas. Fuente: <http://www.achimmenges.net/?p=4443>



Fig. 12 Pabellón PARA-Sita expuesto en el Construmat 2011 de Barcelona. Está formado por una estructura dinámica que interacciona con el entorno y que auto-modifica su espacio interior según los visitantes. Las fibras flexibles en material sintético modifican su curvatura gracias a unos sensores que reconocen los cambios del entorno. Tiene una altura máx. de 3 m por 13,5 m de largo y 4,5 m de ancho. La superficie total es de unos 60 m². Realizado en el ámbito del Màster Disseny Avançat i Arquitectura Digital (ADDA) - ELISAVA, dirección del proyecto: arq. Jordi Truco, equipo de diseño: Biodesign. Fotografías: © Ludovica Rossi 2011

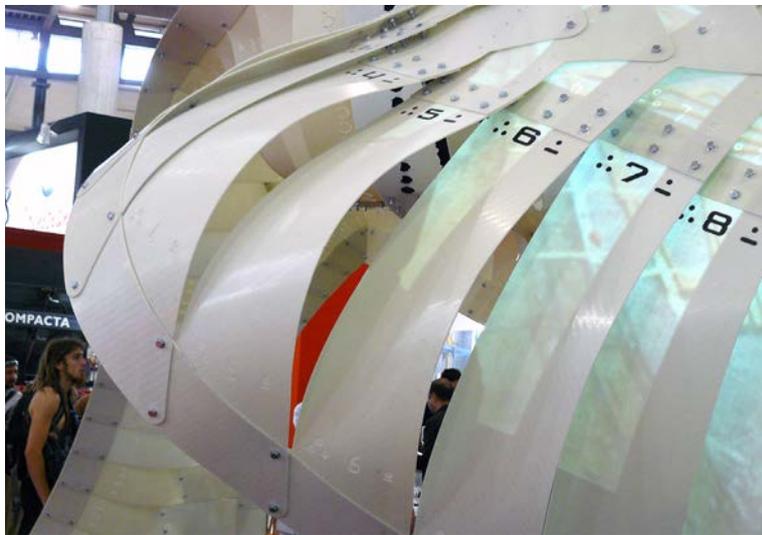




Fig. 13 Pabellón Almond, de CODA (Computational Design Affairs), ETSAV 2013. El proyecto, en el marco del curso Reset, investiga el desarrollo de cáscara elástica de doble curvatura con listones de madera planos, inicialmente rectos. La construcción se realiza a partir de listones de madera aserrada aún verde y húmedos para aprovechar las propiedades elásticas del material. Estos son curvados y cruzados para obtener una trama de curvas geodésicas. Fuente: © Soriano E., 2017



Fig. 14 The Caterpillar, el pabellón oruga fue construido en 2014 como un ejercicio académico colaborativo entre estudiantes de Arquitectura e Ingeniería de Edificación de la Universidad de Sevilla. El pabellón explora la generación de formas complejas sobre la base del diseño de bóvedas y cúpulas clásicas. Se trata de una galería de 10 metros de largo y 3.5 de alto, construida a través de planchas de madera laminada de 5 mm de espesor. Si por una parte material permite una considerable deformación en las tres dimensiones por otra el comportamiento en las tiras de unión permiten la continuidad de la curvatura y la estabilidad del conjunto. Fuente: © Narváez-Rodríguez et al, 2015

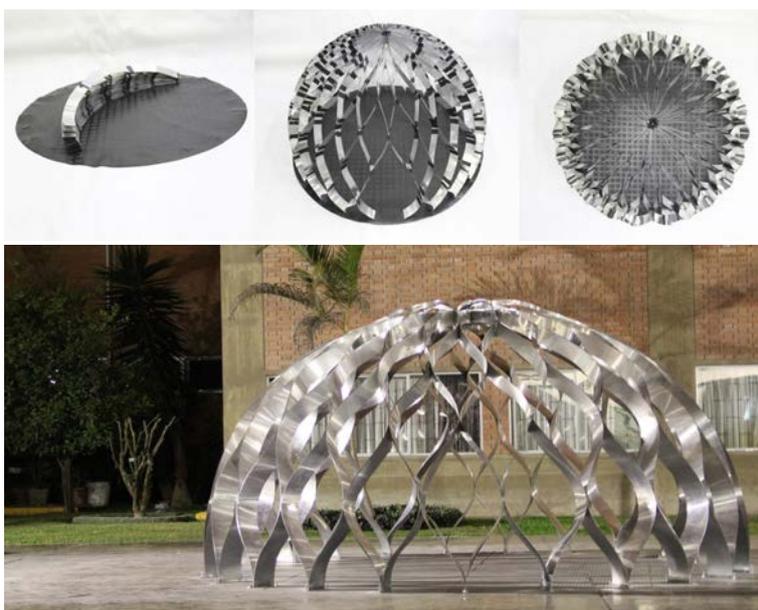


Fig. 15 La Matriz, módulo de emergencia desplegable diseñado por alumnos de la Facultad de arquitectura de la Pontificia Universidad Católica del Perú, 2015, proyecto dirigido por los profesores F. Ferrer Cárdenas y P. Seinfeld Balbo. La estructura del módulo se compone por láminas planas de aluminio con un canto variable desde 10cm en la cumbre hasta 20 cm en la base. Estas tienen una trayectoria en arco que define la curvatura de la cúpula. El sistema y ritmo de la uniones dobla las láminas y permite obtener el sistema autoportante. La estructura está asegurada a una base circular de PVC. Diámetro de la base 4,5 m aprox. Capacidad módulo 8 personas. Fuente: <http://www.x-tec.com.mx/?p=26745>

Por medio del proceso evolutivo, la naturaleza ha desarrollado sistemas optimizados con un menor consumo de energía, seleccionando los mecanismos que funcionan y/o duran en el contexto ambiental actual. Sus mecanismos siguen principios como el ahorro energético, el reciclaje, la optimización de las formas (Fig. 11), la economía de materiales (Fig. 13), la adaptación al medio (Fig. 12) o la sostenibilidad (Llorens, 2008). A pesar que el nombre de biomímesis es de uso relativamente reciente, el área científica relacionada encuentra sus orígenes formales al comienzo del siglo XX. En el contexto actual y futuro tiene validez por su connotación medio ambiental, con el objetivo de generar una tecnología sostenible integrada en el medio. El punto de partida es que los organismos, por medio del proceso evolutivo, han modificado su fisiología adaptándose a los cambios del entorno sin comprometer la continuidad del mismo.

A diferencia de las dinámicas presentes en la naturaleza, la tecnología humana modifica el entorno para mejorar las condiciones de vida, pero los modelos generados siguen alejados de la producción de un ciclo de vida cerrado. Por eso desde la primera mitad del siglo XX arquitectos e ingenieros investigan en forma sistemática los principios y los mecanismos naturales (Fig. 7, 9). A partir de una visión idealizada de la naturaleza como forma única y óptima, se ha ido desarrollando una analogía biológica y orgánica.

0.5.1 Ideas sobre la evolución

Unos de los puntos de partida que permite evaluar como válida la bio-inspiración de la naturaleza para su aplicación a la tecnología es el concepto de evolución. Hace unos 550 millones de años, la vida floreció en una explosión única de creatividad. La inventiva de la naturaleza no ha dejado de generar criaturas que han colonizado hasta el último rincón de la Tierra (Solé, 2009).

A partir de esta premisa, al inicio del planteamiento del trabajo ha dedicado parte del estudio a focalizar el concepto de evolución, que no pertenece directamente al campo científico de la arquitecta. Al profundizar este concepto se descubre un amplio campo de investigación. Desde la teoría de la evolución de Darwin por selección natural, hay diferentes avances hacia la comprensión de este fenómeno con teorías a veces en contraste y desacuerdo entre sí. Por una parte, las cuestiones inherentes a la evolución biológica de los organismos superan los límites del presente trabajo. Por otra, en términos teóricos la cuestión incide en la forma de interpretar la naturaleza y la observación de los procesos en la aplicación práctica de la biomímesis.

Darwin formuló el mecanismo de la selección natural, en su libro “*El origen de las especies*” publicado en 1859, y que es la base de la idea de la evolución biológica. Darwin observó la enorme variedad de especies del planeta y propuso un mecanismo simple y elegante, un procedimiento por pasos, que podía explicar su existencia. En su trabajo distingue dos elementos fundamentales: tenía que haber un generador de variedad y un filtro de variedad (Fig. 16). Darwin apela al hecho conocido por sus contemporáneos de que la naturaleza produce variabilidad en la descendencia de organismos (Langton, 1996).

La variedad es producto de diversos procesos naturales en la reproducción de animales y vegetales. El injerto entre plantas como método de propagación vegetativa artificial y los cruces entre animales para la selección artificial son ampliamente conocidos desde tiempos antiguos. Aceptada la variedad, Darwin demostró cómo la naturaleza podía desempeñar el papel de filtro selectivo: los organismos se adaptan a su medio ambiente. Mientras, el alcance y el poder de la selección natural y los grados de adaptación que produce permanecen sujetos a diferentes estudios e interpretaciones. La selección natural no es un concepto cerrado y en ella reside la creatividad de la evolución biológica (Wagensberg, 2005).

En el enfoque genético de la selección natural, el gen [8] es una unidad de selección. Es lo que persiste a través de un gran número de generaciones. En este planteamiento “*son los genes los que por su propio interés, manipulan los cuerpos que los transportan. El organismo individual es una máquina de supervivencia para sus genes*” (Dawkins, 1996, 70).

El darwinismo y neodarwinismo explican cómo la adaptación de un organismo se produce por pequeños cambios en la especie. Entonces la diversificación entre los organismos se obtendría por acumulación de pequeños cambios. Se asume en general que si se acumulan suficientes diferencias genéticas se obtiene algo cualitativamente diferente. Esta es una hipótesis razonable, no obstante no se ha demostrado su mecanismo. El darwinismo da cuenta del cambio a pequeña escala. No puede dar cuenta del origen de las grandes diferencias de forma que surgen durante la evolución (Goodwin, 1996). Queda abierta la comprensión del mecanismo evolutivo en referencia a la generación de la forma. La morfogénesis involucra las relaciones entre proceso y estructuras en el tiempo y el espacio, para poder comprender cómo pueden surgir formas complejas a partir de condiciones iniciales simples.

En el mundo real los organismos interactúan entre sí en el contexto de un entorno dinámico, y los criterios selectivos

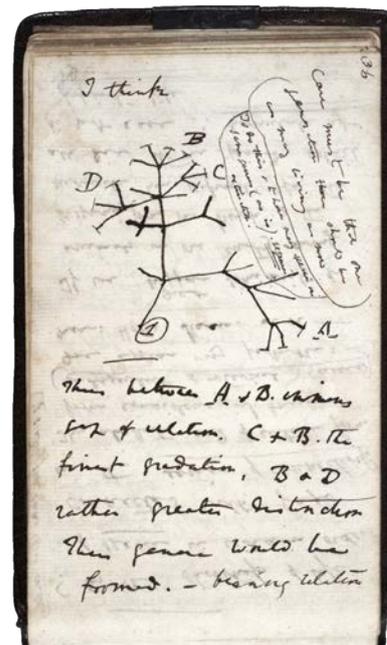


Fig. 16 Boceto de Charles Darwin del 1837, diagrama de un árbol evolutivo en su cuaderno de apuntes B sobre la transmutación (o evolución) de las especies: “Creo... El caso debe ser que una generación debería ser tanta como la que vivimos ahora. Hacer esto y tener muchas especies en el mismo género (como es) requiere la extinción. Por lo tanto, entre A y B inmensa brecha de relación. C & B la gradación más fina, B & D distinción bastante mayor. Así se formarán géneros. - relación de rodamiento”. @Darwin 1837

[8] Gen (m. Biol.): Secuencia de ADN que constituye la unidad funcional para la transmisión de los caracteres hereditarios (Real Academia Española)

emergen simplemente de forma natural. Es en la “naturaleza” de las interacciones entre todos los organismos –entre sí y con el medio– lo que determina qué entidades sobrevivirán. No hay poblaciones aisladas, sino que existe un intercambio continuo de individuos entre ellas.

La selección natural se ejerce sobre la estabilidad de diferentes tipos de ciclo vital, en diversos hábitats para que una especie sobreviva, para que persista, debe tener estabilidad dinámica en un hábitat particular. La cuestión global de la evolución a gran escala se mantiene abierta (Goodwin, 1996). Los organismos muestran un sinfín de características emergentes. En otras palabras, los genes interactúan de forma no lineal (Fig. 17). La selección natural actúa de manera simultánea en una jerarquía de niveles: los genes son un nivel y los organismos otros. También hay niveles superiores, como las poblaciones y las especies, en los que la selección natural es muy efectiva, y el resultado final no es siempre la adaptación –especialmente cuando se observa el proceso a lo largo de un periodo de millones de años (Gould, 1996).

De la observación del proceso de selección y la gran variedad de organismos aparecen propiedades emergentes, que no pueden explicarse desde las propiedades de las partes de un sistema. Existe un orden irreducible que reside en la presencia de las interacciones. El todo es más que la suma de sus partes, o quizás más apropiadamente, el todo es distinto de la suma de las partes (Solé, 2009).

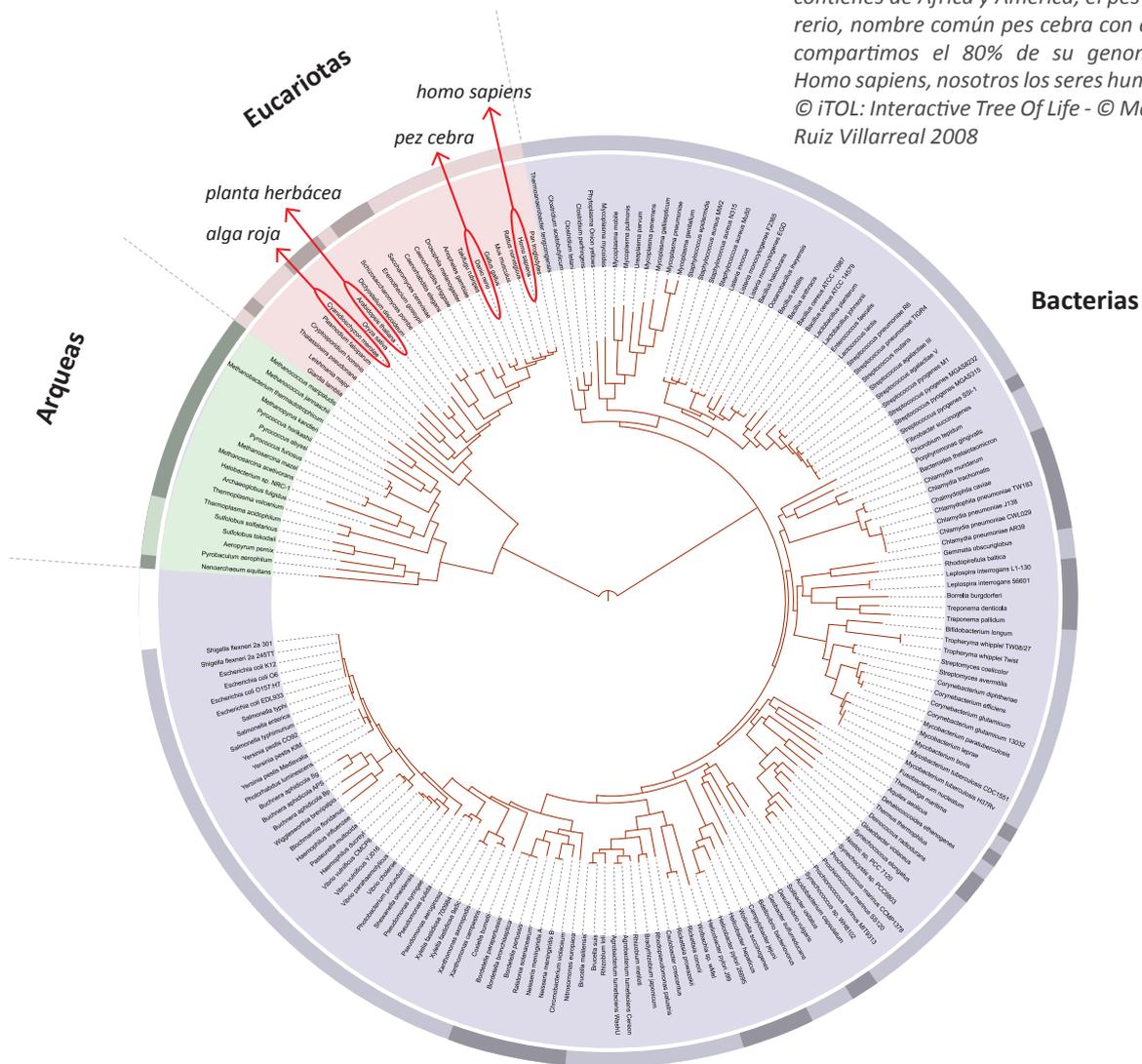
Esta visión permite entender la existencia de la complejidad. Los elementos básicos que componen un sistema explican lo que tiene lugar a escalas inferiores. Mientras la complejidad del sistema es definida por la red de interacciones entre las partes, y por la naturaleza de las interacciones. *“Lo complejo tiene mucho más que ver con la naturaleza de las interacciones que con la naturaleza de los objetos que interactúan, aunque estos últimos imponen algunas limitaciones sobre lo que puede ocurrir en el siguiente nivel”* (Solé, 2009, 25).

El darwinismo y sus interpretaciones más estrictas han puesto el acento en el conflicto y la competencia, pero no son las únicas dinámicas que se encuentra en realidad. Otros mecanismos muestran cómo la cooperación es parte de la evolución. La simbiosis es una asociación física entre organismo, la convivencia de organismos de diferentes especies en el mismo tiempo y lugar. Muchas simbiosis son obligatorias, es decir, que los practicantes de ella no sobrevivirían sin la interacción; por ejemplo, un líquen es una relación simbiótica obligatoria entre un alga o una bacteria azul-verde y un hongo [9].

[9] Definición y ejemplo de simbiosis por BioDic - Diccionario de Biología on-line

La interacción biológica de la simbiosis a largo plazo se define “simbiogénesis”. Esta se considera un mecanismo de novedad evolutiva, y su noción ha ido adquiriendo protagonismo. La bióloga Lynn Margulis propone el fenómeno de la simbiogénesis como una fuente principal de cambio evolutivo. “Es el resultado de una convivencia a largo plazo –especialmente entre microbios– y que es la principal fuente de innovación evolutiva en todos los linajes de organismos superiores no bacterianos” (Margulis, 1996, 125). Está reconocido que la selección natural actúa sobre la variación, queda la cuestión de dónde procede la variación útil sobre la cual actúa la selección. Según Lynn Margulis las variaciones hereditarias más significativas proceden de las fusiones, y dan como resultado seres nuevos y más complejos. La teoría se aplica al mundo de los microbios: las bacterias, bajo presión ecológica, se asocian experimentando cambios metabólicos y genéticos. Esta interacción surge de la individualidad hacia un nivel de organización más complejo.

Fig. 17 Esquema de árbol filogenético de la vida: muestra la relación entre las especies cuyos genomas han sido secuenciados a partir del 2006. El centro representa el antepasado universal de toda la vida en la tierra. Los diferentes colores representan los tres dominios de la vida: el rosa los organismos Eucariotas (animales, plantas y hongos); el azul representa las Bacterias; y el verde las Arqueas (microorganismos unicelulares). El árbol es una simplificación que pone en evidencia la gran variedad de organismos. En el dominio Eucariotas se han evidenciado, siguiendo la curva en sentido horario: la alga roja *Cyanidioschyzon merolae* cuyo genoma ha sido entre los primeros en ser secuenciado en 2004; la planta herbácea *Arabidopsis thaliana* de la clase Magnoliopsida común con las Cactaceae probablemente comparte ancestro de antes que se separaran los continentes de África y América; el pez *Danio rerio*, nombre común pez cebra con el cual compartimos el 80% de su genoma; el *Homo sapiens*, nosotros los seres humanos. © iTOL: Interactive Tree Of Life - © Mariana Ruiz Villarreal 2008



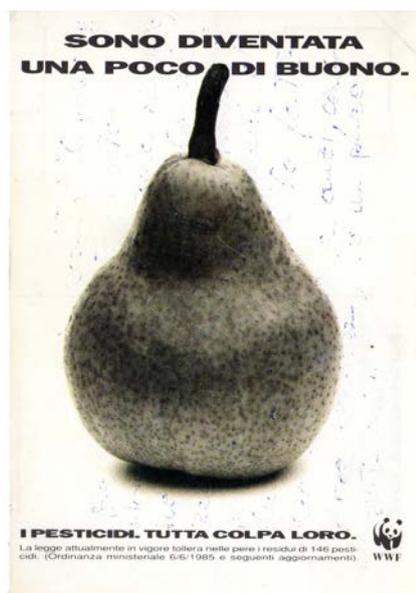


Fig. 18 Postal del WWF Italia de finales de los años 80 del siglo XX para sensibilizar sobre la contaminación ambiental, el efecto invernadero y el agujero de la capa de ozono; el lema de la postal juega con la ambigüedad de no ser buena de comer con: "me he vuelto mala". © WWF - Postal de Ludovica Rossi

En la división de los organismos distinguimos los procariotas, organismos unicelulares sin núcleo, y los organismos compuestos por células eucariotas (como los seres humanos). En la actualidad está reconocido el nacimiento de las células eucariotas a partir de la transformación de lo que en principio fue una infección parasitaria de una célula por otra (Margulis, 1996). Esta forma de simbiogénesis, por fusión biológica, determina un gran cambio en el desarrollo evolutivo y en el aumento de su complejidad.

0.5.2 Sostenibilidad

La validez del biomimetismo depende en general de su connotación medioambiental. Es un campo de investigación interdisciplinar donde la división entre disciplinas "puras" cede lugar a un área de investigación que apunta a generar materiales o procesos que sean de alguna manera sensibles al medio ambiente (Weinstock, 1998). En términos específicos su efectividad se basa en la observación, estudio y reproducción de mecanismos y/o procesos naturales, que se encuentran en equilibrio con su medio natural y que no comprometen la continuidad general del sistema.

La promesa biomimética puede aportar soluciones con un potencial específico para contribuir al desarrollo tecnológico sostenible [10], por medio del flujo inspiratorio de la biología a los productos técnicos. La suposición es que la naturaleza viviente puede servir como generador de conceptos para enfrentar los desafíos del desarrollo sostenible en términos de objetivos sociales, ambientales y económicos (Speck at all, 2017).

Aprender de la naturaleza viva está relacionado con el deseo de implementar soluciones biológicas que se han optimizado en el transcurso de 3.800 millones de años de evolución. La esperanza es que la biomimética aplicada a la arquitectura ayude a desarrollar una cultura de diseño ambiental activo (Gruber, 2011); y donde las soluciones bio-inspiradas se combinen con la promesa de contribución al desarrollo sostenible. Se individualizan cuatro objetivos principales para aplicar la biomimética a la sostenibilidad industrial: a través de la eficiencia energética y de los recursos, la eliminación y el control de sustancias peligrosas, el uso de materiales renovables y biológicos, y la funcionalidad adicional en materiales y estructuras (John at all, 2005).

Los edificios en general, y específicamente las ciudades, son actores claves en la sostenibilidad y determinarán el destino de la humanidad. El consumo de recursos y la producción de residuos respectivos de las ciudades superan por mucho las

[10] La primera vez que el concepto de sostenibilidad es ampliamente aceptado (al menos formalmente) es por medio del Informe Brundtland (ONU 1987) conocido por su definición del concepto de desarrollo sostenible: "El desarrollo sostenible es el desarrollo que satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades". Fuente: Bermejo Gómez de Segura, 2014

[11] Más información en: <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs#> (última visita 28/07/2018)

capacidades de su entorno. La industria de la construcción es un gran contribuyente a las emisiones de CO₂, los edificios son responsables del 40% del consumo total de energía en Europa y un tercio de las emisiones de CO₂. Al mismo tiempo, la industria de la construcción está entre los mayores consumidores de recursos (Speck et al., 2017). De hecho la UE integra, en sus programas de desarrollo, soluciones basadas en la naturaleza [11]. A pesar de que en su web no utiliza específicamente el sufijo bio-, se reconoce que la naturaleza puede ayudar a proporcionar soluciones viables que ofrecen alternativas sostenibles, rentables, polivalentes y flexibles para diversos objetivos. Trabajar con la naturaleza, en lugar de combatirla, puede allanar el camino hacia una economía más eficiente, competitiva y ecológica.

El hombre, y por lo tanto la construcción, se convierten y son parte de la naturaleza y de los procesos ecológicos relacionados con ella; en consecuencia, la evaluación de los materiales está estrechamente vinculada a un análisis del ecosistema. La atención del proyecto se dirige a la gestión de los recursos y la consecuente producción de residuos. Entre los desafíos hacia una industria compatible con el medio ambiente está la problemática de los residuos y desechos que producimos. Desde la toma de conciencia sobre el agujero de la capa de ozono a finales de los años 80 del siglo XXI (Fig. 18), nos encontramos en la actualidad (casi 40 años después) con la “emergencia plástico”. La organización Greenpeace tiene activa una campaña “No más plásticos en nuestra comida” para reducir los envoltorios de plástico de la comida fresca en los supermercados. La asociación del WWF España tiene otra campaña de recogida de firmas #AtrapadosEnPlásticos para prohibir los vertidos de plásticos en los océanos. La situación aparece insostenible, más de 8 millones de toneladas de plástico son vertidas al mar cada año y se estima que en 2050 habrá más toneladas de plástico que de peces en los océanos (Fig. 19). “Hasta el momento hay pruebas documentales de que animales de unas 700 especies marinas han ingerido plástico o se han visto atrapados en él. Todavía no comprendemos del todo cuál será el impacto a largo plazo del plástico sobre la fauna (ni sobre nosotros)” (Daily, 2018).

Abordar el tema de los residuos y desechos implica tomar contacto con una simbología que culturalmente rechazamos (Fig. 20). “Desearíamos que las cosas fueran puras y que duraran para siempre. Escogemos el consumo como medida de bienestar pero no nos gustan sus consecuencias; enfatizamos la creación y despreciamos las cosas y los lugares degradados. Pensamos en forma de dicotomía, en clases cerradas, y no queremos comprender el flujo y la degradación” (Lynch, 2005, 51).



Fig. 19 Portada de la revista National Geographic España de junio 2018 que representa una bolsa de plástico como un iceberg para comunicar que lo que se ve es solo una pequeña parte de lo que hay en realidad. © National Geographic 2018

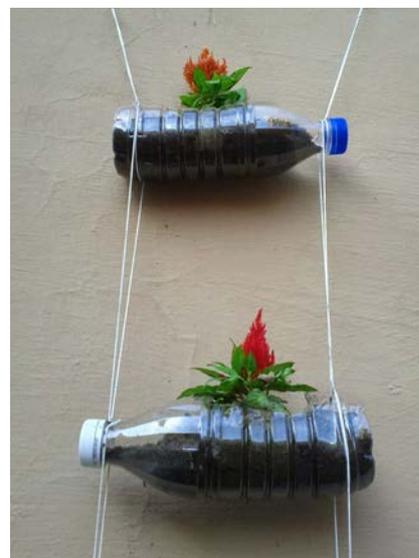


Fig. 20 Reutilización de botellas de plástico para maceteros colgantes. Una experiencia de auto-producción de la escuela primaria Aurelio Saffi en la ciudad de Roma, en el barrio de S. Lorenzo. © Ludovica Rossi 2014



Fig. 21 Foto al microscopio electrónico de la bacteria *Ideonella sakaiensis* que come plástico PET, descubierta y aislada en 2016 por Shosuke Yoshida, del Instituto de Tecnología de Kyoto, en colaboración con otros científicos e investigadores de varias universidades japonesas. El microorganismo produce una enzima (ISF6_4831) que en presencia de agua desdobra el PET en una sustancia intermedia que a su vez es degradada por una segunda proteína (ISF6_0224), este procedimiento convierte enzimáticamente PET de manera eficiente en sus dos monómeros benignos para el medio ambiente, el ácido tereftálico y el etilenglicol. © Yoshida S. et al, 2016

En esta percepción de los desechos se encuentra el modelo económico occidental a escala global que está orientado al consumo y necesita una constante aceleración del deterioro de productos para mantener la estructura productiva. Pero la consecuente acumulación de basura ha entrado en conflicto con las dinámicas de funcionamiento de la Tierra.

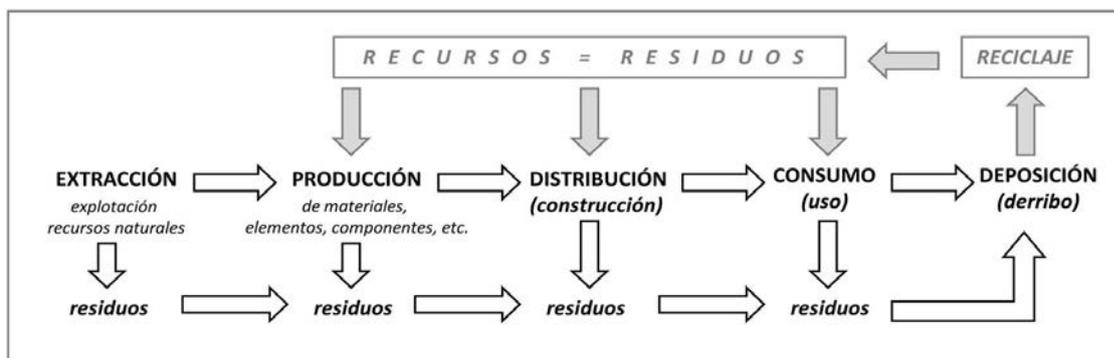
El escenario es sin duda complejo y relaciona cambios de naturaleza productiva y cultural en la sociedad. Si analizamos las interacciones involucradas según un planteamiento sistémico, podremos interpretar los fenómenos humanos como totalidades integradas en un sistema de relaciones en redes que definen el patrón de organización de la vida. Es una “visión del mundo que reconoce el valor inherente de la vida no humana. Todos los seres vivos son miembro de comunidades ecológicas vinculados por una red de interdependencias” (Capra, 1996, 32). En el curso de la evolución los organismos que han sido capaces de incrementar o modificar las interconexiones de las redes a diferentes niveles son los que se han desarrollado y están ahora presentes en la biosfera.

El concepto de evolución, en la base de la biomimesis, muestra cómo la naturaleza emplea diferentes mecanismos para la continua adaptación de la vida al medio (Fig. 21). El estudio y comprensión de las interacciones de los ecosistemas son un medio para mitigar la causa del cambio climático, del cual el entorno construido es en parte responsable, y/o adaptarse al impacto del cambio climático que afecta el planeta. Imitar los procesos de los ecosistemas y las interacciones biológicas (entre los cuales la simbiosis y la simbiogénesis) es uno de los muchos enfoques para mejorar la sostenibilidad de los procesos y diseños arquitectónicos.

Esquema 0.7 Esquema del análisis del ciclo de vida de los materiales: en negro el sistema productivo actual lineal y abierto, en gris el sistema cerrado con la reincorporación de los residuos y su reciclaje. En cada sección hay también que evaluar la actual contaminación del aire, del agua y la tierra. © Ludovica Rossi 2012

0.5.3 Reciclaje

En una visión holística de las dinámicas naturales, de las cuales la actividad humana es parte, la gestión de los residuos vistos como recursos es una estrategia para alargar la vida útil de



un material y su revalorización en ámbitos tecnológicos. La implementación del reciclaje contribuye a la construcción de modelos productivos sostenibles, modificando las interacciones entre ámbitos y actividades en principio no relacionadas entre sí. En la búsqueda hacia nuevas soluciones sostenibles, la arquitectura permite actuar sobre las estructuras materiales (desde la experimentación hasta la producción), que a su vez participan en forma sustancial en la modificación de los procesos de naturaleza simbólica y dialéctica para el desarrollo de un nuevo sistema ecosocial (Saura, 2003).

El reciclaje (Fig. 22) es una práctica que reincorpora en el ciclo productivo parte de los residuos sólidos que generamos en el actual modelo de consumo de la sociedad. Hay materiales de origen reciclados que están presentes en la construcción, unos ejemplos son: los paneles de fibra de madera provenientes de desecho tras el procesamiento de la madera, o las pavimentaciones en caucho reciclado que se utilizan para las zonas de juegos infantiles o ciclovías. El reciclaje o reutilización de productos están muy extendidos en casos donde la falta de recursos lleva a estimular la creatividad para encontrar nuevas soluciones arquitectónicas. Las problemáticas ambientales, como la complejidad de gestión del modelo material, involucran toda la actividad humana y su relación con la biosfera. Por su naturaleza creativa la arquitectura es una disciplina capaz de aceptar tales desafíos en sus ámbitos de intervención.

En el marco del análisis del ciclo de vida de los materiales, el reciclaje permite alargar sus vidas útiles. Según las formas de reciclar, se identifica la reincorporación de materiales o productos en diferentes fases del ciclo de vida. Cabe aclarar que el análisis del ciclo de vida se entiende aplicado a la actividad humana en general. Los modelos que muestran a nivel teórico el sistema del ciclo de vida, sean abiertos o cerrados, simplifican por necesidad las dinámicas reales relacionadas (Esquema 0.7).

El sistema empieza a articularse aplicando el modelo a un producto concreto donde son visibles las interacciones entre diferentes ámbitos industriales en relación a los materiales y procesos utilizados para su producción/construcción. De la misma forma, si quisiéramos formalizar todos los productos que producimos y utilizamos, así como sus múltiples variantes, nos daríamos cuenta de la vastedad del sistema y de su elevada complejidad.

Si imaginamos que desde mañana nuestro sistema de producción a escala global fuese cerrado, igualmente tendríamos ya acumulada una cantidad de desecho que hoy en día no sabemos cómo deshacer. Para llegar a un ciclo de vida cerrado,



Fig. 22 Secuencia del proceso de reciclaje de diversos plásticos en la Cooperativa Etilplast (Buenos Aires, Argentina): desde la limpieza del plástico, previamente separado por tipos y troceado, fundición y producción del material granulado para la venta. © Ludovica Rossi 2005.

[12] El reciclaje es parte de la regla de las tres erres (3R) para desarrollar hábitos de consumo responsables, propuesta en el G8 de 2004 por el primer ministro de Japón Koizumi Junichiro, y popularizada por la organización ecologista Greenpeace: Reducir – Reutilizar – Reciclar. Con el tiempo se ha añadido una cuarta R con el significado de Recuperar.



Fig. 23 Maison Gomme, proyecto de Denis Oudendijk y Jan Körbes (La Haya, Baises Bajos, 2005). La vivienda-estudio, realizada en autoconstrucción, tiene un revestimiento exterior en banda de rodadura de neumáticos recuperados. Las franjas están colocadas alternando sus caras (interior-externo) y actúan como unas tejas continuas que canalizan el agua hacia abajo. © Refunk 2005



Fig. 24 Teja en caucho reciclado de NFU para cubiertas inclinadas desarrollada por la ONG CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica) en colaboración con CINTEMAC, Universidad Tecnológica Nacional (Argentina). Está elaborada con neumáticos fuera de uso procedentes de desechos. El procedimiento de elaboración consiste en el triturado, la extrusión, y el moldeado en prensa. © CEVE 2015

Tabla 0.1 Valores energía primaria y emisiones globales de CO₂ por unidad de neumático nuevo (Sánchez y Guzmán, 2013)

deberíamos conseguir que nuestros residuos se transformen en nuestros recursos. Esto implica eliminar el concepto de residuo rediseñando los procesos y los productos desde su origen.

“Significa que los valiosos nutrientes contenidos en los materiales conforman y determinan el diseño: la forma sigue a la evolución, no solo la función” (Braungart y McDonough, 2005, 98).

El reciclaje [12] es una práctica que a nivel de producción industrial permite aumentar o modificar las interacciones existentes para responder a las problemáticas ambientales. En particular si la reincorporación de materiales desechados genera nuevas conexiones entre diversas aéreas y no está limitada el mismo ámbito industrial.

En el caso de aplicar la reutilización (Fig. 23) o el reciclaje (Fig. 24) de productos a la arquitectura, esto implica modificar el proceso de diseño que dependerá de las características, propiedades y disponibilidades. Los productos a diferencia de los materiales no se caracterizan solo por sus propiedades intrínsecas sino también por su forma, geometría, dimensión, etc. Y todas estas características participan en el proceso de definición del diseño y son objeto del lenguaje arquitectónico. Los cambios que se implementan en lenguaje arquitectónico actúan sobre la percepción estética y simbólica contribuyendo a la construcción de una visión ecológica de la sociedad.

Cuando reincorporamos productos ya utilizados en otros contextos de usos hay que evaluar aspectos de salubridad. En el actual sistema productivo en la mayoría de los casos un objeto ha sido producido únicamente por su primer uso y no para otras aplicaciones. Esto plantea un cambio profundo y radical sobre la capacidad de previsión del modelo productivo, difícilmente imaginable para un futuro cercano. Todas las experimentaciones, aunque con carácter temporal, contribuyen a construir nuevas visiones de la arquitectura, mostrando qué se podría hacer y cómo se podría reciclar. Para posteriormente volver a la fase de producción y modificar los procesos con el fin que los productos sean útiles y salubres para su primer uso como para otros sucesivos.

Impacto ambiental producción neumáticos nuevos*:	
Energía Primaria	847,96 MJ / unidad
	15,52 L petróleo/ unidad
Emisiones CO₂	63,64 Kg of CO ₂ eq/ unidad

0.6 LÍMITES DEL TRABAJO

El estudio propone la bio-inspiración del tejido del cactus definiendo dos niveles de relación en biomímesis:

- Análisis morfológico, como un proceso de generación de la forma natural de sistemas elásticos inspirados en el comportamiento de los tejidos vivos.
- Dimensión ecológica, mediante el uso de materiales no convencionales de origen recuperado, aplicando el concepto de metabolismo técnico.

La elección de los materiales permite pasar del tamaño del modelo a la escala del proyecto experimental, saliendo así del plano del diseño. La descripción del proyecto está vinculada al proceso constructivo que describe su comportamiento. En los capítulos del presente trabajo se describe el desarrollo biomórfico, desde el estudio del organismo hasta una propuesta de implementación técnica de la morfología orgánica. En paralelo el marco teórico se aplica al proyecto que se convierte en un pretexto para verificar la aplicación de la biomímesis.

La elección de investigar con un material reciclado (cómo los neumáticos fuera de uso - NFU) corresponde al interés de aplicar a nivel teórico el concepto de simbiogénesis como proceso que puede conectar diferentes ámbitos industriales entre sí. Trabajar en el ámbito de la tecnosfera permite buscar soluciones para reincorporar los materiales contaminantes no biodegradables en un metabolismo técnico (Braungart y McDonough, 2005) separado e independiente de los ciclos biológicos orgánicos.

Esquema 0.8 (Abajo) Modelo de un ciclo de vida cerrado donde el reciclaje es parte de un metabolismo técnico que reincorpora materiales y productos en el ciclo productivo, evitando el abandono en vertedero. El modelo apunta a reproducir los ciclos biológicos que reincorporan el desecho como materia orgánica (compostaje). © Ludovica Rossi 2013

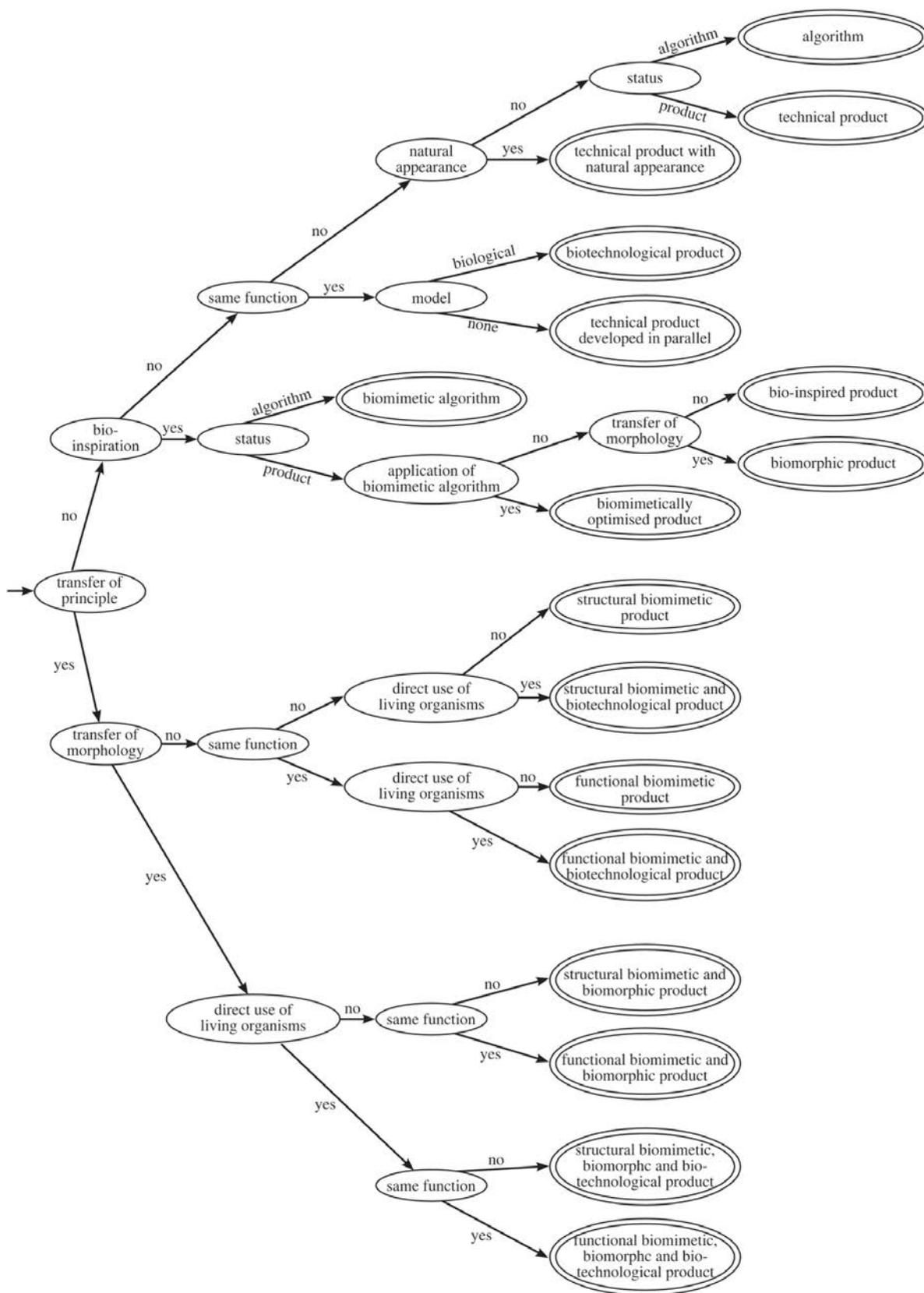


Fig. 25 (Página siguiente) Árbol de decisiones como una herramienta de análisis directa para identificar varios tipos de productos y algoritmos derivados de la biología y derivados de la tecnología. La clasificación comienza en el nodo raíz representado por el atributo "transferencia de principio". Cada nodo interno (representado por un óvalo) prueba un atributo nominal, cada rama (ilustrada por una flecha) representa el resultado de la prueba y se etiqueta con el valor del atributo correspondiente, y cada nodo hoja (representado por un doble óvalo) asigna una clase. Fuente: Speck et al., 2017

Hasta cierto punto, cuando una tecnología es obsoleta es reemplazada por completo por una distinta y con un nuevo diseño. En biología, una nueva combinación de las piezas puede dar lugar a un salto cualitativo enorme, pero cualquier innovación se lleva a cabo empleando una y otra vez las piezas antiguas. Esta reutilización está en el corazón del diseño evolutivo (Solé, 2009). La voluntad de volver a incorporar un material muy contaminante y no biodegradable con altos costos de energía en la fase de producción, responde a la necesidad de contribuir a un modelo de un ciclo de vida cerrado y no lineal (Esquema 0.8). Las respuestas que ofrece la evolución de los sistemas biológicos, como la simbiosis (Capra, 1996), abren nuevos escenarios para buscar interacciones entre diferentes campos: la construcción y la industria automotriz. La integración de procesos aparentemente separados ofrece la ocasión de un cambio tecnológico para desarrollar modelos sostenibles y convertir el desperdicio en una oportunidad.

Los modelos desarrollados no ofrecen un objeto arquitectónico terminado. La propuesta de diseño biomimético no propone un campo de aplicación diferente al referente natural. La búsqueda del campo de aplicación es una tarea en sí misma, y podría llevarse a cabo independientemente de la investigación sobre el modelo del rol biológico o natural (Gruber, 2011). La propuesta de implementación técnica transfiere los principios biológicos observados, aplicando la morfología a diferentes niveles jerárquicos del sistema y manteniendo la misma función del referente natural.

Los resultados obtenidos se verifican según el árbol de decisiones desarrollado en el marco del proyecto de CRC-Transregio 141 "Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture" (Speck et al., 2017). Este es una herramienta de análisis directa que permite identificar varios tipos de productos y algoritmos derivados de la biología y derivados de la tecnología (Fig. 25). Cada nodo interno (representado por un óvalo) prueba un atributo nominal, cada rama (ilustrada por una flecha) representa el resultado de la prueba y se etiqueta con el valor del atributo correspondiente, y cada nodo hoja (representado por un doble óvalo) asigna una clase. Iniciando por el nodo raíz, representado por el atributo "transferencia de principio", y según las comprobaciones de las propiedades morfológicas conseguidas, se verifica a qué tipo de producto biomimético han llevado las decisiones en el proceso de diseño.



0.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Daily N., 2018, *¿Cómo afectan los residuos plásticos a los animales?*, en *Revista National Geografic España*, 24 de mayo de 2018, link on-line: http://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/grandes-reportajes/como-afectan-residuos-plasticos-a-animales_12738/4 (ultima visita 08/2018)
- Speck O., Speck D., Horn R., Gantner J. y Sedlbauer K. P., 2017, *Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments*, en *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol 12 num. 1, Ed. IOP Publishing Ltd, DOI: 10.1088/1748-3190/12/1/011004
- Whitesides G. M., 2015, *Bioinspiration: something for everyone*, en *Interface Focus - Bioinspiration: something for everyone*, vol 5 núm. 4, Ed. The Royal Society, DOI: 10.1098/rsfs.2015.0031
- McGuirk J., 2015, *Entrevista a Frei Otto*, publicada en ICON 023, Mayo 2015, on-line: <https://www.iconeye.com/design/item/2627-frei-otto-%7C-icon-023-%7C-may-2005> (ultima visita 08/2018)
- ISO 18458:2015 (en) *Biomimetics - Terminology, concepts and methodology*, Online Browsing Platform (OBP): <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18458:ed-1:v1:en>
- Lienhard J., Schleicher S., y Knippers J., 2014, *Bio-inspired, flexible structures and materials*, capítulo 11, libro: *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering Edition*, editores: E. Pacheco Torgal at all, Springer Ed., ISBN: 978-3-319-09287-4, DOI: 10.1007/978-3-319-09287-4_12
- Schleicher S., Lienhard J., Poppinga S., Speck T. y Knippers K., 2014, *A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture*, pp. 105-117, en *Computer-Aided Design*, vol. 60, Ed. Elsevier Ltd., ISSN: 0010-4485, DOI: 10.1016/j.cad.2014.01.005.
- Antony F., Griebhammer R., Speck T. y Speck O., 2014, *Sustainability assessment of a lightweight biomimetic ceiling structure*, en *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 9, núm. 1, Ed. IOP Science, UK, ISSN: 1748-3190, DOI:10.1088/1748-3182/9/1/016013
- Bermejo Gómez de Segura R., 2014, *Del desarrollo sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como biomimesis*, Ed. Hegoa UPV/EHU, Bilbao, ISBN: 978-84-89916-92-0
- Sánchez M. y Guzmán M., 2013, *Análisis de la eficiencia medioambiental del recauchutado de neumáticos*, Ed. UMH Editorial Electrónica, Universidad Miguel Hernández (MH), ISBN: 978-84-96297-92-0
- Gruber P., 2011, *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings*, Ed. Spinger-Verlag/Wien, impreso en Alemania, ISBN: 978-3-7091-0331-9
- Solé R., 2009, *Redes Complejas. Del genoma a Internet*, Ed. Tusquets S.A. Barcelona, ISBN: 978-84-8383-117-5
- Speck T. y Speck O., 2008, *Process sequences in biomimetic research*, pp. 3-11, en *Design and Nature IV Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, Ed. WIT Transactions on Ecology and the Environment, ISBN: 978-1-84564-120-7, DOI: 10.2495/DN080011
- Llorens Durán J. I., 2008, *Zoomorfismo y bio-arquitectura. Entre la analogía formal y la aplicación de los principios de la naturaleza*, *Conference report: II Jornadas de investigación en construcción*, Actas de las Jornadas, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, España <http://hdl.handle.net/2117/2156> (ultima visita 09/2018)
- Capra Fritjof, 2006, *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*, Ed. Anagrama, Barcelona, 6ª edición, ISBN: 978-84-339-0554
- Braungart M. y McBonough W., 2005, *Cradle To Cradle = De La Cuna A La Cuna: Rediseñando la forma en que hacemos las cosas*, Ed. McGraw-Hill / Interamericana de España S.A.U., Madrid, ISBN: 9788448142957
- John G., Clements-Croome D. y Jeronimidis G., 2005, *Sustainable building solutions: a review of lessons from the natural world*, pp. 319-328, en *Building and Environment*, vol. 40 núm. 3, Ed. Elsevier, ISSN: 0360-1323
- Lynch K., 2005, *Echar a Perder. Un análisis del deterioro*, editor: Southworth M., Ed. Gustavo Gili SA, Barcelona, ISBN: 84-252-2044-0

- Wagensberg J., 2005, *La rebelión de las formas. O como preservar cuando la incertidumbre aprieta*, Ed. Tusquets S.A. Barcelona, 2ª edición, ISBN: 84-8310-975-1
- Saura Carles, 2003, *Arquitectura y Medio Ambiente*, en núm. monográfico Revista Architectonics. Mind, Land & Society, pp. 77-81, Edicions UPC, Barcelona ISBN: 84-8301-718-0
- Riechmann J., 2003, *Biomímesis: Un concepto clave para pensar la sustentabilidad*, pp. 28-31, publicado en la revista *El Ecologista*, núm. 36, ISSN: 0211-6472
- Weinstock M., 1998, *TS: artefacts and instruments: material forms and formulation of thoughts*, Ed. London Architectural Association, ISBN: 1870890876
- Gould S. J., 1996, *El cuadro de la historia de la vida*, en *La Tercera Cultura*, pp. 47-68, editor: John Brockman, Ed. Tusquets S.A. Barcelona, 2ª edición, ISBN: 84-7223-954-3
- Dawkins R., 1996, *Una máquina de supervivencia*, en *La Tercera Cultura*, pp. 47-68, editor: John Brockman, Ed. Tusquets S.A. Barcelona, 2ª edición, ISBN: 84-7223-954-3
- Goodwin B., 1996, *La biología es una danza*, en *La Tercera Cultura*, pp. 47-68, editor: John Brockman, Ed. Tusquets S.A. Barcelona, 2ª edición, ISBN: 84-7223-954-3
- Margulis L., 1996, *Gaia es una pícara tenaz*, en *La Tercera Cultura*, pp. 47-68, editor: John Brockman, Ed. Tusquets S.A. Barcelona, 2ª edición, ISBN: 84-7223-954-3
- Langton C. G., 1996, *Un modelo dinámico*, en *La Tercera Cultura*, pp. 47-68, editor: John Brockman, Ed. Tusquets S.A. Barcelona, 2ª edición, ISBN: 84-7223-954-3

Capitolo 0 (italiano)

Introduzione

0.1 IPOTESI E OBIETTIVI

La presente tesi dottorale nasce dalla domanda generale se la natura può essere una fonte di ispirazione e progresso in architettura. La ricerca si concentra sul processo di progettazione in biomimetica applicata alla tecnica costruttiva. Il concetto di biomimesi comprende una varietà di esempi e campi di applicazione. Ha un'accezione ampia e il suo sviluppo attraversa diverse aree disciplinari, per questo motivo non è possibile definire dei limiti applicativi rigorosi. La biomimetica è estesa quanto il mondo naturale che vuole imitare. Questo definisce i margini d'incertezza che hanno caratterizzato lo sviluppo teorico della tesi. Per trattare un campo di lavoro così esteso la ricerca è stata orientata allo studio di un riferimento organico specifico, del quale di partenza non si conosceva il funzionamento: la struttura di sostegno delle piante cactacee.

La scelta di un riferimento naturale permette restringere la domanda iniziale a un dimensione più specifica. L'obiettivo generale è sperimentare la scoperta del meccanismo biologico per verificare se il referente naturale funziona come un generatore di concetti. Il lavoro utilizza un processo di ricerca bio-ispirato per applicare i principi di generazione della forma, aggregazione e crescita in sistemi strutturali (tessuti e reticoli) capaci di risolvere gli sforzi generati all'interno del sistema.

La sperimentazione partecipa nella ricerca di soluzioni biomimetiche e/o bio-morfiche nelle quali gli organismi vivi sono utilizzati in termini di generatori di concetti. Specificatamente la ricerca tratta la riproducibilità materiale e costruttiva del riferimento organico in una dimensione eco-sistemica. Il lavoro si orienta alla realizzazione di modelli per lo studio di processi architettonici in biomimesi. La proposta parte dei modelli realizzati per la tesina finale del "Máster en Tecnología de la Arquitectura", linea di ricerca "Investigación Construcción e Innovación Tecnológica" (ETSAB-UPC) – lo schema 0.1 mostra una sintesi del lavoro realizzato – per continuare nello sviluppo degli esperimenti che partecipano ad ampliare la casistica delle strutture/tecnologie auto-organizzate.

A partire dello studio del mondo vegetale, con particolare riferimento alla struttura di legno delle piante succulente, si ricerca la riproducibilità materiale dei tessuti che la conformano. Il modello biologico di riferimento è per una parte punto di partenza per lo sviluppo del progetto e per un'altra è la base di comparazione per la valutazione dei risultati.

Le configurazioni strutturali sviluppate cercano di risolvere al proprio interno le tensioni generate per azione delle forze interne ed esterne. Questa scelta mette in un secondo luogo il ruolo della funzione in architettura, dove molte volte una configurazione spaziale sorge dai bisogni di uso e non dagli equilibri degli sforzi che caratterizzano il materiale utilizzato per la costruzione. La ricerca si orienta a liberare la forma dalla funzione e il processo di disegno non si basa su una tipologia specifica, ma sulle dinamiche di equilibrio che si generano. L'assenza di un obiettivo funzionale ha permesso di indirizzare il lavoro allo studio morfologico di strutture in campo elastico.

Il lavoro esplora la relazione tra la forma e il comportamento del materiale sulla base dei principi biologici. Il punto di partenza è l'incontro con le piante grasse fino ad arrivare all'astrazione del meccanismo sottostante e alla sua implementazione tecnica. Questa impostazione del lavoro da forma alla domanda iniziale che ha dato origine alla ricerca: quale utilità e/o vantaggio morfologico offre la forma ondulata delle fibre del

tessuto per la pianta? Questo unito all'interesse per l'applicazione di forme organiche in architettura, ha portato alla seconda questione: il tessuto strutturale del cactus potrebbe essere fonte di bio-ispirazione senza prevedere a priori un'applicazione concreta?

La pianta è un organismo complesso, il tessuto ligneo dei cactus è parte di un sistema di supporto che coinvolge anche le dinamiche di pressione dei liquidi interni per turgenza tra le cellule. Per lo studio della tesi si considera valido analizzare unicamente il sistema strutturale dei fasci vascolari legnosi delle cactacee per valutare le loro potenzialità di generare concetti e rispondere alla domanda: se il tessuto offre una o più prestazioni, come e perché il modello costruito ha uno o un altro comportamento?

Per descrivere la meccanica del tessuto flessibile osservato nella pianta, lo studio delle forze e del movimento si devono sviluppare simultaneamente, perché la geometria e le variazioni della forma dipendono dalle forze esercitate fuori e dentro il tessuto. Questo contesto aumenta significativamente la complessità dell'analisi. Quando si rivelano i componenti essenziali delle piante e le relazioni morfologiche funzionali, il seguente passo è astrarre in un meccanismo semplice; cercare di ridurre la complessità per incontrare il principio di base del meccanismo (Schleicher et al., 2014).

Lo sviluppo di sistemi elastici e flessibili ha incontrato l'ostacolo di ottenere una configurazione statica e stabile dei modelli elastici. L'uso di un materiale non convenzionale, come il battistrada degli pneumatici di bicicletta recuperati, ha motivato la ricerca di successive soluzioni: dalla maglia tesa, come sistema auto-organizzato con fasce aperte, fino alla morfologia della cupola con una geometria autoportante di fasce pre-deformate. La banda di pneumatico cerca risposte alla domanda di come riprodurre la fibra organica del tessuto vivo in campo elastico e non rigido del legno secco. Inoltre segue la volontà di definire un disegno bio-ispirato con un'evidente connotazione verso la sostenibilità con il valore aggiunto del riutilizzo di un materiale da smaltire.

La tesi lavora nel limite tra lo studio teorico della biomimesi (dando maggior importanza ai concetti di evoluzione e sostenibilità) e lo studio di un caso pratico (struttura di legno delle cactacee) fino ad arrivare all'implementazione tecnica nello sviluppo di modelli bio-ispirati (fisici e virtuali).

0.2 STRUTTURA DELLA TESI

La struttura del lavoro segue, nei limiti del possibile, la ricerca BID (biologically inspired design) che utilizza sistematicamente le similitudini tra natura e le sfide del design per ispirare i progettisti (Speck et al., 2017). In primo luogo, si possono sviluppare applicazioni in base ad un'apparenza naturale. Nella tesi questa fase corrisponde ai primi esperimenti che riproducono intuitivamente il tessuto organico osservato. In una posizione successiva si trova l'ispirazione concettuale che significa la creazione di regole o archetipi di disegno che seguono modelli dei ruoli biologici. In un modo simile, lo sviluppo del lavoro cerca definire i meccanismi e gli archetipi con la definizione dell'elemento morfologico di base e il comportamento del sistema bio-ispirato. In terzo luogo, l'ispirazione computazionale, mediante il trasferimento dell'algoritmo evolutivo e della morfogenetica naturale, permette di sistematizzare l'informazione mediante la rappresentazione.

Partendo dai significati di biomimesi e bio-ispirazione si stabiliscono le basi teoriche del lavoro sui concetti di evoluzione e sostenibilità (Schema 0.2). La tesi utilizza questi aspetti teorici per stabilire dei limiti per lo sviluppo del progetto architettonico. Questi diventano dei fili conduttori nel processo decisionale della ricerca, e incidono nell'estetica dei modelli realizzati. I loro significati sono trattati nella seconda parte di questa introduzione, per apparire nuovamente come criteri di valutazione dei risultati ottenuti nelle conclusioni.

Nel primo capitolo si mettono le basi del lavoro bio-ispirato. Si studia il riferimento organico del cactus, mediante lo studio bibliografico, l'osservazione di campo e la ricompilazione di campioni di tessuto secco

di legno. La comprensione del modello biologico si ottiene interpolando gli studi sulla fisiologia della pianta con la riproduzione del tessuto mediante i modelli fisici. La costruzione dei primi esperimenti favorisce la comprensione dei meccanismi biologici di crescita e adattabilità del tessuto. Si definiscono i fattori iniziali che determinano il processo di concettualizzazione dei principi biologici.

Nel secondo capitolo si definisce il vocabolario del sistema biologico. Per mezzo della costruzione di modelli fisici con differenti materiali si arriva a selezionare il battistrada degli pneumatici per la rappresentazione delle dinamiche elastiche del tessuto vivo. La ricerca della forma è legata al comportamento del materiale, dove la forma cambia con le deformazioni. Il lavoro comparativo tra i modelli a piccola scala, altri esempi di riferimento e il modello biologico permettono definire l'elemento morfologico di base: la striscia. Questo passo determina l'astrazione del meccanismo morfologico del tessuto elastico, separando la soluzione dal riferimento organico.

Nel capitolo tre s'investiga il comportamento strutturale dei modelli e si cercano sistemi che si basano su analoghi principi di disegno strutturale: la flessione attiva. A differenza del secondo capitolo dove si comparavano gli esperimenti realizzati con esempi architettonici per similitudine con la forma dell'onda. Nel terzo capitolo si analizzano i modelli con il battistrada degli pneumatici di bicicletta come sistema, dove l'unione delle strisce e le deformazioni applicate incidono nel comportamento globale. La configurazione generale del sistema dipenderà dalle proprietà meccaniche di un materiale altamente flessibile, come gli pneumatici, e dalla resistenza geometrica ottenuta grazie alla morfologia bio-ispirata.

Il quarto capitolo tratta il procedimento di rappresentazione dei modelli, come passo necessario per comprendere e sistematizzare le dinamiche di equilibrio proprie del sistema bio-ispirato. Si descrivono i modelli virtuali disegnati in 3D, in relazione con i risultati ottenuti nei modelli fisici del capitolo precedente. La digitalizzazione dell'informazione codifica la forma bio-ispirata, e si sviluppa a partire da un disegno algoritmico che permette di combinare processi impliciti ed espliciti per medio della ricerca di modelli ripetitivi. La rappresentazione digitale, utilizzando il software Cinema4D, permette stabilire le leggi di trasformazione necessarie alla definizione del modello geometrico.

La struttura del lavoro ha dato priorità alla continuità sul tema del materiale tra i capitoli due e tre, lasciando per ultima la rappresentazione digitale dei modelli nel capitolo quattro. È necessario chiarire che i processi sono interconnessi. Senza la rappresentazione virtuale del capitolo quattro non sarebbe stato possibile comprendere le dinamiche di rigidità geometrica descritta nel capitolo tre. Nei due ultimi capitoli si ricerca l'implementazione tecnica del ruolo biologico e i risultati sono trattati nelle conclusioni (Schema 0.3).

0.3 METODOLOGIA

La biomimetica è una disciplina di ricerca interdisciplinare nella quale diverse aree cooperano in progetti per l'implementazione di strategie naturali nella sfera della tecnologia umana. Dipendendo dall'esperienza scientifica, la ricerca può concentrarsi più sugli aspetti biologici o più sugli aspetti tecnici della biomimetica (Speck e Speck, 2008). Per gli obiettivi del lavoro, la tesi ha dato priorità allo studio sul referente naturale e applica un approccio biomimetico Bottom-up, che segue un processo ascendente dal basso verso l'alto (Schema 0.4). Partendo dal modello biologico si individuano differenti passi fino ad arrivare all'astrazione del riferimento per la sua implementazione tecnica.

Lo sviluppo biomimetico ascendente si basa nella conoscenza delle funzioni e strutture biologiche come punto di partenza della ricerca. Un approccio inverso è il Top-down, che segue un procedimento da sopra a sotto. Il primo passo, in questo caso, è individuare il problema tecnico di un prodotto, per poi cercare esempi naturali con soluzioni che sembrano promettenti. Normalmente questo processo analizza diversi campioni biologici per cercare quelli che si adattano meglio come generatori di concetti in relazione a requisiti tecnici specifici (Speck e Speck, 2008). I più promettenti tra i campioni sono selezionati e i passi seguenti sono simili

al processo ascendente: astrazione del meccanismo per la sua implementazione tecnica.

In entrambi gli approcci, l'astrazione del meccanismo è un passo fondamentale per separare le soluzioni incontrate dal riferimento biologico studiato. Per arrivare ad una implementazione tecnica la ricerca bioispirata si caratterizza per avere successivi livelli di astrazione e modifiche. Per gli obiettivi di questo lavoro è stato applicato un approccio ascendente con la volontà di verificare come un modello biologico può essere un generatore di concetti e se questi possono essere applicati alla tecnologia.

La metodologia di lavoro inizia analizzando la biomeccanica e la morfologia funzionale del tessuto di legno di cactus, inteso come sistema di riferimento biologico. Il passo successivo porta alla comprensione delle strutture, delle forme e delle funzioni biologiche. È necessaria una comprensione fenomenologica dei principi fisici di base coinvolti nei meccanismi osservati. In questo processo il passo successivo è l'astrazione del ruolo biologico. Ciò significa separare le soluzioni trovate dai loro esempi naturali (Speck e Speck, 2008). Al fine di rivelare i principi meccanici di base coinvolti, è necessario studiare le relazioni morfologiche-funzionali del modello biologico in modo sistematico. Qui la funzionalità di un meccanismo viene testata separando progressivamente tutti gli elementi che sembrano non essere direttamente correlati al meccanismo. Seguendo questo approccio, si possono ridurre le parti costitutive che svolgono un ruolo chiave nel meccanismo. Questo è particolarmente importante perché la conoscenza dei componenti di base necessari per un meccanismo apre la porta per un suo uso creativo (Lienhard, 2014).

Questa visione amplifica la libertà di progettazione e consente concetti al di là della mimica diretta del sistema naturale. In questo lavoro, l'implementazione di modelli fisici su piccola scala è lo strumento principale per la comprensione e la reinterpretazione del principio meccanico.

L'elaborazione del lavoro integra lo studio bibliografico con due metodi di analisi a seconda della fase della ricerca: lo studio di campo e ricompilazione di campioni del riferimento organico; la sperimentazione per mezzo della costruzione di modelli fisici a piccola scala e del disegno computazionale.

L'investigazione teorica, per mezzo dello studio bibliografico, permette verificare i dati ottenuti nelle fasi di osservazione e sperimentazione. Nel primo capitolo proporziona l'informazione è correlata alla fisiologia della pianta per verificare i meccanismi biologici coinvolti. Nei capitoli due e tre vengono comparati, per mezzo dell'analisi bibliografica, i modelli realizzati con altri esempi architettonici per similitudine della forma e del comportamento, permettendo di determinare in che ambito focalizzare la ricerca. Inoltre nel capitolo due lo studio sulle proprietà del materiale e nel capitolo tre lo studio del comportamento dinamico delle strutture elastiche offrono la conoscenza teorica necessaria per la implementazione tecnica del modello biologico. Nel quarto capitolo lo studio teorico del modello generativo è necessario per comprendere i fenomeni soggiacenti alla costruzione digitale.

Ad un livello più generale, la ricerca teorica permette stabilire il quadro d'interpretazione e applicazione della biomimesi. La documentazione definisce le linee generali dell'investigazione: meccanismo evolutivo della simbiosi e sperimentazione con un materiale recuperato per la sua valorizzazione ambientale.

Gli strumenti utilizzati, insieme al lavoro documentale, per lo sviluppo della tesi sono stati: ricompilazione dei campioni di piante cactacee, fotografia macro con o senza soffietto d'ingrandimento ottico, costruzione di modelli fisici e rappresentazione digitale in due e tre dimensioni.

0.3.1 La metodologia dell'osservazione

La sperimentazione in una fase iniziale è disordinata e creativa. L'osservazione come metodologia di analisi confronta l'informazione, la conoscenza e i risultati ottenuti durante il lavoro per la loro codificazione e valutazione. La scoperta casuale del tessuto vegetale lignificato del cactus può essere definita come la prima

fase di osservazione, prima di uno studio sistematico. Le fasi successive di osservazione diventano parte integrante del progetto e mostrano che:

- La procedura di osservazione implica un'interpretazione dell'elemento / oggetto osservato.
- Gli strumenti usati influenzano sia la procedura che l'interpretazione.

Il processo di osservazione (Schema 0.5) è stato applicato sino dal primo momento allo studio delle piante cactacee. La struttura di legno delle piante grasse, per le sue dimensioni, offre il vantaggio che alcune caratteristiche sono visibili a scala reale. Per mezzo della fotografia macro (Fig. 1), con o senza soffietto di ampliamento ottico, è stato osservato il tessuto secco del cactus (Fig. 2) a una scala aumentata, non visibile a semplice vista. Questo procedimento ha focalizzato l'interpretazione del tessuto organico mediante strisce con la direzione longitudinale dominante rispetto alle altre.

Sono state analizzate diverse specie di famiglie delle Cactacea appartenenti alle due sottofamiglie delle Cactoideae e Opuntioideae. I campioni sudati del tessuto secco e l'osservazione delle piante vive fa riferimento a tre luoghi: il complesso archeologico di Pucará di Tilcara nell'altopiano della Puna andina, i Jardins de Mossèn Costa i Llobera nella montagna del Montjuïc di Barcellona e l'orto botanico di Catania in Sicilia. A questi si accompagna l'osservazione quotidiana di piante coltivate in casa e incontri puntuali di casi che sono stati valutati d'interesse per la ricerca.

L'osservazione delle piante nel loro intono naturale, permette di studiare come l'organismo è cresciuto con una forma differente e si è adattato all'ambiente (particolarmente significativo è il caso del genere *Opuntia*). Inoltre l'osservazione di alcuni individui in vaso durante periodi prolungati ha permesso di studiare la fisiologia di questa famiglia di piante. È il caso del genere *Echinopsis* di dimensioni ridotte (individuo giovane), che è stato possibile seccare riproducendo in parte le condizioni osservate nel contesto naturale degli esempi di legno secco di cactus. Lo studio di campo, per mezzo della comparazione di differenti individui, ha fornito le basi che uniscono la conoscenza teorica della fisiologia dell'organismo (ottenuta dallo studio bibliografico) con la risposta che la pianta deve dare per adattarsi e continuare a crescere nel suo contesto naturale, per offrire un'evidenza del comportamento e adattabile dell'organismo all'ambiente.

La metodologia dell'osservazione non è stata applicata unicamente allo studio del referente biologico. Questa metodologia di raccolta dati e analisi è stata presente per tutto il lavoro di ricerca e il procedimento è stato applicato nei seguenti casi:

- nella fase di costruzione dei primi modelli fisici dove l'obbiettivo era definire il meccanismo morfologico e fisiologico della pianta;
- nel confronto dei modelli realizzati in differenti materiali per poter definire e identificare l'ambito del lavoro, in particolare nella valutazione del lavoro di ricerca nel campo delle strutture elastiche;
- nella fase di costruzione dei modelli in strisce elastiche per la definizione del comportamento morfologico del tessuto secondo le dinamiche di adattabilità e crescita osservate;
- nella fase di rappresentazione dei modelli virtuali per la codificazione e sistematizzazione delle deformazioni applicate e/o generate secondo la morfologia ottenuta (superfici anticlastiche e/o sinclastiche).

0.3.2 I modelli come metodo

Una metodologia ampiamente utilizzata è la costruzione di modelli come parte sperimentale del lavoro. Questi rappresentano un asse centrale della ricerca e rispondono all'idea/immaginario di scoprire lo sconosciuto seguendo l'esempio dell'architetto Frei Otto. Si tratta di pensare in tre dimensioni: "L'occhio

interiore del cervello non deve essere piano ma tridimensionale in modo che tutto sia un oggetto nello spazio. Non stiamo vivendo in un mondo bidimensionale". (Frei Otto, icon 023 - McGuirk, 2015)

- **Modelli fisici.** Lo sviluppo di strutture in campo elastico ha bisogno di realizzare modelli fisici senza i quali non sarebbe possibile comprendere la forma nella sua totalità. La costruzione di modelli fisici, a piccola scala, è la metodologia applicata per studiare la relazione tra la fibra organica e il comportamento del tessuto in campo elastico (e non rigido). La riproduzione del tessuto con prototipi, permette verificare quali meccanismi morfogenetici sono legati al sistema costruttivo e mette in relazione l'osservazione del modello biologico statico con il comportamento dinamico del tessuto (Fig. 3). L'implementazione tecnica del meccanismo biologico in forma di prototipo non si incontra alla fine, ma piuttosto nel mezzo di un processo di progetto iterativo nel quale la retro-alimentazione della costruzione può arrivare tanto lontano da incoraggiare la comprensione del modello biologico (Lienhard et al., 2014). Siccome la metodologia è orientata alla costruzione di modelli fisici, i concetti di materialità e manipolazione sono fondamentali nello sviluppo dell'analisi.
- **Modelli virtuali.** La simulazione digitale è la metodologia di rappresentazione utilizzata per verificare la morfologia ottenuta nei modelli fisici. Per mezzo del programma Cinema4D la costruzione di differenti modelli virtuali è necessaria per comprendere le dinamiche che generano la forma. La rappresentazione è lo strumento base della disciplina, senza il quale non è possibile definire il linguaggio architettonico. La definizione del modello generativo permette stabilire quali sono gli archetipi, la topologia, gli elementi ripetitivi, ecc. per la costruzione di una struttura complessa.

La realizzazione di modelli fisici e virtuali consente la comprensione fenomenologica dei principi fisici di base, che sono coinvolti nei meccanismi del referente organico. Il processo di lavoro può essere aperto per riconfigurazioni e adattamenti in un processo di progettazione iterativo in cui il feedback della costruzione reale può andare lontano come per incoraggiare la comprensione del modello biologico (Lienhard, 2014). Dove un'interpretazione applicata a un prototipo consente di estrarre delle valutazioni o conclusioni, che influiscono sull'osservazione dell'organismo e, a sua volta, nell'interpretazione (Schema 0.6). Fino a raggiungere la costruzione di un modello in grado di raggruppare un numero sufficiente di caratteristiche che rispettano i meccanismi biologici e / o fisiologici dell'organismo. In questo schema di relazioni, il processo di interpretazione e la costruzione dei modelli assumono una coerenza sufficiente e possono essere considerati validi.

La sperimentazione con modelli successivi, tanto fisici quanto virtuali, porta con se in modo implicito la metodologia della prova ed errore. Il metodo ha una componente intuitiva e pratica. Per mezzo della ripetizione di esperimenti successivi, nei quali cambiano una o più variabili, si modifica il comportamento del sistema e si ottengono risultati diversificati. Questi a loro volta sono stati considerati necessari, rilevanti o non significativi, a seconda dei casi. Il procedimento si considera valido perché la ricerca studia la forma ondulata delle fibre organiche senza proporre a priori una tecnica costruttiva e/o una soluzione spaziale. Sebbene, durante il lavoro, alcuni esperimenti non hanno portato a un risultato soddisfacente, hanno permesso di definire alcuni momenti di snodo nello sviluppo di questo studio.

0.4 INTERAZIONI

La definizione del tema della tesi consegue ad un esercizio che il professore architetto Fernando Ramos mi ha assegnato nel corso della ricerca; il chiarimento è stato efficace per focalizzare l'interesse nello studio di reticoli auto-organizzati che risolvessero l'equilibrio degli sforzi al loro interno. Il professore F. Ramos mi ha guidato nel processo di ricerca, sviluppo e formazione del lavoro di tesi. Il suo contributo ha permesso focalizzare il lavoro senza per questo inscatolare il tema in uno schema predeterminato e condizionato dagli aspetti funzionali, tipologici, ecc. Questo approccio ha consentito di integrare l'ambito scientifico dell'architettura con questioni non propriamente costruttive come la biologia e l'osservazione del cactus.

Per poter lavorare nel campo della biomimesi era necessario contattare gli esperti che da differenti campi potessero orientarmi nella comprensione di come canalizzare la conoscenza della pianta (e la natura in generale) verso un approccio bio-ispirato. L'osservazione e interpretazione del riferimento organico sono passaggi importanti nel procedimento di ricerca e conoscere l'esperienza di altri era percepito come una necessità per il processo decisionale e la valutazione del lavoro. In questo senso è stata essenziale, all'inizio del lavoro, l'intervista realizzata al professore ingegner Antonio Di Carlo, del Dipartimento di Strutture [1] dell'Università degli Studi di Roma TRE e coordinatore del Laboratorio di Modellazione & Simulazione (LaMS), riprodotta nell'appendice 1. Parlare con il prof. A. Di Carlo è stato rilevante per definire come incide l'osservazione nello studio e decidere che scala di analisi dell'organismo utilizzare per la definizione del meccanismo biologico, tra le molte possibili. Inoltre l'intervista ha permesso di comprendere alcune questioni tecniche relative al funzionamento delle cellule e le differenze basilari del movimento cellulare vegetale e animale.

Ugualmente importante l'aver potuto conoscere il professore Stefano Mancuso del Dipartimento di Scienze Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA) dell'Università degli Studi di Firenze e direttore di International Laboratory for Plant Neurobiology (LINV). L'opportunità di visitare il laboratorio mi ha permesso di comprendere in prima persona quali metodi si utilizzano per studiare il comportamento degli organismi vegetali. Anche se non condividiamo la loro struttura funzionale, senza i primi organismi fotosintetici non si sarebbe sviluppata la vita come la conosciamo attualmente. Riscoprire il ruolo biologico delle piante significa sollecitare un cambiamento della percezione che si ha. Il lavoro del professore S. Mancuso mostra come il mondo vegetale è una fonte d'ispirazione per cercare/trovare soluzioni alle sfide che riguardano la vita del genere umano.

Come in natura, le interazioni con l'ambiente che ci circonda hanno inciso nell'evoluzione del lavoro di tesi. Con differente rilievo, e in modo più o meno diretto, alcune esperienze sono state implicate nel processo di ricerca, un cammino con diverse ramificazioni possibili. Importanti sono state le revisioni con il professore architetto Josep Ignasi de Llorens Duran, che hanno contribuito a scegliere la configurazione in un reticolo bidimensionale in alternativa a uno tridimensionale (capitolo 2, paragrafo 2.2.4). Questa valutazione è stata rilevante per affrontare le limitazioni del materiale per la caratteristica dello stiramento del battistrada dello pneumatico e dirigere la ricerca verso le strisce pre-deformate. Questa transizione nello sviluppo del disegno ha permesso di approfondire i meccanismi morfogenetici del tessuto vivo del cactus.

Importante sono state, anche, le collaborazioni e i lavori realizzati con il gruppo Equalogical Lab, una piattaforma che unisce alcuni architetti interessati a sperimentare morfologie bio-ispirate e tecnologie low-cost con un'attenzione verso la sostenibilità. Insieme all'architetta Elisabetta Gaglio e all'architetto Laurens Schocher, abbiamo realizzato strutture effimere (oltre ad altri allestimenti temporanei) che interpretano tecnologicamente i meccanismi del mondo della natura. Gli esperimenti, a scala 1:1, hanno un comportamento morfologico che si osserva in riferimenti naturali come le strutture in tensegrity, un sistema che si incontra anche nelle cellule e che gli permette espandersi o contrarsi, o le strutture tese di maglie o cavi bio-ispirate alle ragnatele. Queste esperienze contribuiscono a garantire una più ampia conoscenza nel campo dei sistemi bio-ispirati. Inoltre hanno contribuito a maturare una manualità che migliora la sperimentazione con i modelli fisici per osservare la variazione geometrica determinata dalla deformazione in relazione alle caratteristiche del materiale, come parte rilevante dei contributi del lavoro della tesi.

Nella base della ricerca, la rete di informazioni, connessioni e interazioni inerenti questioni dell'architettura, ma provenienti da altre aree, sono correlate alla questione della sostenibilità. In particolare l'esperienza della collaborazione nei corsi on-line di Arquitectura Sostenible UNAUS (University Network for Architectural and Urban Sustainability), diretti dal professore F. Ramos, ha offerto l'opportunità di lavorare con diversi professori e colleghi del Departament de Construccions Arquitectòniques I (UPC) che hanno suggerito o

[1] Attualmente parzialmente assorbito dal Dipartimento di Matematica e Fisica.

integrato i fondamenti teorici del lavoro di indagine. La ricerca di un quadro chiaramente incentrato sulla sostenibilità definisce la scelta di centrare la ricerca verso il concetto di tecno-sfera, per la re-incorporazione di materiali e prodotti nel ciclo produttivo in modo indipendente dai cicli biologici.

0.5 BIOMIMESI E BIO-INSPIRAZIONE

Biomimesi è un termine “valigia” costruito dall’unione del prefisso bio [2], che significa biologico, e la parola mimesi, che indica imitazione. Nel 1957, l’ingegnere e fisico statunitense Otto Herbert Schmitt [3] mimesi crea il termine “biomimetico”, come un approccio biologico dell’ingegneria in opposizione con la “biofisica”, che descrive un approccio fisico alla biologia (Fig. 7 e 8). La parola “biomimetico” è apparsa per la prima volta nel 1974 nel dizionario Webster, definita come lo studio della formazione, strutture o funzioni dei materiali, meccanismi e processi biologici con la finalità di sintetizzare prodotti artificiali che imitano i naturali (Speck et al., 2017). Nel dizionario on-line inglese Collins “biomimetico” fa riferimento a un prodotto fatto per l’essere umano, imitando la natura o processi naturali. Nella Reale Accademia Spagnola si trova la parola “biomimetismo” per indicare “l’imitazione dei disegni e processi della natura nella soluzione di problemi tecnici” [4].

La questione dei significati intorno al termine biomimesi è legata all’ampia gamma di parole che sono sorte nell’ultima decade. Ognuna ha una sfumatura differente e a volte se ne sovrappongono gli usi. Biomimetica è la realizzazione di applicazioni tecniche basate sulle idee risultanti dalla ricerca biologica fondamentale. Gli sviluppi biomimetici non sono un trasferimento diretto della biologia. Gli organismi vivi funzionano come generatori di concetti per applicazioni tecniche innovatrici, ma non sono direttamente coinvolti nella produzione di prodotti biomimetici [5] (Speck e Speck, 2008).

Dall’anno 2015 la norma ISO 18458 descrive diversi termini con l’obiettivo di dare un quadro adeguato per le applicazioni biomimetiche. Nella norma ISO Biomimetico si definisce come una “cooperazione interdisciplinare di biologia e tecnologia o altri campi di innovazione con l’obiettivo di risolvere problemi partecipi per mezzo dell’analisi funzionale dei sistemi biologici, la loro astrazione in modelli, e il trasferimento e applicazione di questi modelli alla soluzione”. La norma distingue la parola “bionica” come una “disciplina tecnica che cerca replicare, aumentare o rimpiazzare funzioni biologiche per i loro equivalenti elettronici e/o meccanici” [6]. Dipendendo dal contesto, è possibile che la parola bionica si utilizzi con frequenza come sinonimo di biomimetico, entrambi i termini spiegano come l’innovazione tecnica apprende dalla biologia; questo è dovuto a problemi di traduzione tra differenti lingue, con particolare riferimento tra l’inglese e il tedesco [7].

La biomimetica o bionica combina le discipline della biologia e della tecnologia con l’obiettivo di risolvere problemi tecnici per mezzo dell’astrazione, il trasferimento e l’applicazione della conoscenza attenuata a

[2] Secondo il dizionario della Real Academia Española, il primo significato dell’elemento composito si riferisce al significato di “vita” o “organismo vivente”. Il secondo significato è “biologico, che implica rispetto per l’ambiente”.

[3] Otto Herbert Schmitt (6 aprile 1913 - 6 gennaio 1998) è stato l’ingegnere biomedico e biofisico americano che ha coniato il termine “biomimetica”. È noto per i suoi contributi scientifici alla biofisica e nel campo della medicina biomedica.

[4] La voce biomimesi stenta ancora a entrare nei dizionari della lingua italiana. Non si trova compresa nell’edizione on-line dell’enciclopedia Treccani che annovera biomimetico come processo. Questo è associato unicamente al ramo scientifico della chimica, ed è “un processo realizzato allo scopo di imitare e riprodurre un fenomeno osservato in sistemi biologici” (Treccani).

[5] Diversamente, nel campo della Biotecnologia gli organismi viventi (batteri, protozoi, funghi, piante, animali) sono direttamente coinvolti nel processo di produzione o degrado. Pertanto, l’uso di un organismo vivente partecipa allo sviluppo tecnologico per produrre sostanze desiderate o per ridurre sostanze indesiderabili (Speck and Speck, 2008).

[6] Il dizionario della Real Academia Española nel campo tecnologico ha un significato simile per quanto riguarda l’applicazione dello studio dei fenomeni biologici alla tecnica dei sistemi elettronici e meccanici. In medicina riguarda lo sviluppo di organi artificiali che ricordano il funzionamento naturale mediante mezzi elettromeccanici.

partire dei modelli biologici (Speck at all, 2017). Si definiscono come attività, che portano l'informazione dal campo della biologia (o natura in generale) alla tecnologia (Gruber, 2011). Il campo di applicazione è esteso e comprende sistemi tecnologici che trattano la relazione forma-funzione ed entrano nel campo della morfologia funzionale (Fig. 7).

La scienziata forestale statunitense Janine M. Benyus ha popolarizzato il termine Biomimicry con il suo libro *"Biomimicry-Innovation Inspired by Nature"*, pubblicato nel 1997 e ha fondato il Biomimicry Institute nel 2006 insieme a Bryony Schwan. Il termine Biomimicry ha un approccio olistico comprendendo l'innovazione tecnologica come il design ecologico. In generale, "biomimetismo" significa apprendere del mondo naturale all'imitare o ispirarsi nei disegni e processi della natura per risolvere problemi umani (Speck at all, 2017). Inoltre, si pone un' enfasi speciale nell'idea del disegno sostenibile emulando la natura, e aborda aspetti filosofici e di disegno interdisciplinare, dove la natura è un modello per affrontare le sfide dello sviluppo sostenibile (sociale, ambientale, economico) (ISO 18458:2015).

In alternativa a biomimetico si utilizzano avvolta "biologicamente ispirato" o "bio-ispirato". Questi termini sono più ampi. La bio-ispirazione si basa sull'osservazione delle funzioni svolte, come il risultato di millenni di evoluzione darwiniana, sulla comprensione dei processi soggiacenti a queste funzioni, e in seguito sull'imitazione degli aspetti interessanti o rilevanti di queste funzioni senza le restrizioni imposte dalla biologia. Nello studio degli organismi vivi, a tutte le scale, la funzione è un'idea centrale: gli organismi non possono permettersi di "decorare" se stessi con alcune caratteristiche che non compiono una funzione (Whitesides, 2015). Quando si cerca di imitare i comportamenti e le proprietà dei sistemi vivi, s'implica per conseguenza di imitare i processi e le strutture funzionali (Fig. 8).

L'approccio è creativo e si basa nell'osservazione di sistemi biologici, intesi come un gruppo coerente di elementi osservabili che hanno origine nel mondo della vita, che comprendono dalla scala nanometrica fino alla macro-scala (ISO 18458:2015). I sistemi vivi sono straordinariamente complicati, compresi gli organismi unicellulari più primordiali. I complessi meccanismi e strutture si combinano per convertirsi in funzioni apparentemente semplici (Fig. 9). Se si pensa alla complessità finale, una comprensione dei rudimenti della funzione biologica permette iniziare ad apprezzare i processi di ottimizzazione della funzione che sono apparsi durante mille milioni di anni di evoluzione (Whitesides, 2015).

La terminologia attorno al concetto di biomimesi si estende e si attenua secondo i campi di applicazione (promessa biomimetica, biomimetica degli ecosistemi, sviluppo biomorfo, ecc.). Centro della ricerca sono i processi propri del mondo della natura e le sue applicazioni alla tecnologia umana. Il campo scientifico è interdisciplinare e l'ambito d'applicazione si estende a diverse aree tra cui l'architettura (Fig. 10). L'idea centrale è che la natura, immaginativa per necessità, abbia già risolto molti dei problemi che stiamo cercando di risolvere, ricercando soluzioni sostenibili attraverso l'emulazione di modelli sperimentati dalla natura nel corso del tempo (Riechmann, 2003).

Attraverso il processo evolutivo, la natura ha sviluppato sistemi ottimizzati con un minore consumo di energia, selezionando i meccanismi che funzionano e/o perdurano nel contesto ambientale attuale. I suoi meccanismi seguono i principi come il risparmio energetico, il riciclaggio, l'ottimizzazione delle forme (Fig. 11), l'economia dei materiali (Fig. 13), l'adattamento all'ambiente (Fig. 12) o la sostenibilità (Llorens, 2008). Sebbene il termine di biomimetica è di uso relativamente recente, l'area scientifica corrispondente trova le sue origini formali all'inizio del XX secolo. Nel contesto attuale e futuro, è valida per la sua connotazione

[7] In tedesco la seconda parte della parola bionica deriva da "Technik", che significa ingegneria. Il termine Bionik combina quindi le parole biologia e ingegneria assumendo un significato simile alla biomimetica (fonte: BIONIKON Bionik Kompetenz Netz <http://www.biokon.de>). La definizione del termine "bionik" è stata concordata nel 1993 in una riunione dell'Associazione degli ingegneri tedeschi (VDI) ed è stata estesa da Werner Nachtigall nel 1998: disciplina scientifica, che tratta sistematicamente l'esecuzione tecnica e l'implementazione di costruzioni, processi e principi di sviluppo dei sistemi biologici. Ciò include anche varie forme d'interazione tra elementi e sistemi viventi e non viventi (Gruber, 2011).

ambientale, con l'obiettivo di generare una tecnologia sostenibile integrata nell'ambiente. Il punto di partenza è che gli organismi, attraverso il processo evolutivo, hanno modificato la loro fisiologia adattandosi ai cambiamenti nell'ambiente senza comprometterne la continuità.

A differenza delle dinamiche presenti in natura, la tecnologia umana modifica l'ambiente per migliorare le condizioni di vita, ma i modelli generati sono ancora lontani dalla produzione di un ciclo di vita chiuso. Ecco perché, dall'inizio del XX secolo, architetti e ingegneri indagano sistematicamente i principi e meccanismi naturali (Fig. 7, 9). Partendo da una visione idealizzata della natura come forma unica e ottimale, si è andata sviluppando un'analogia biologica e organica.

0.5.1 Idee sull'evoluzione

Partendo da questa premessa, una parte iniziale del lavoro è stata incentrata sul concetto di evoluzione, che non appartiene direttamente al campo scientifico dell'architetto. Approfondendo questo concetto si scopre un ampio campo di ricerca. Dalla teoria dell'evoluzione di Darwin per selezione naturale, ci sono diversi progressi verso la comprensione di questo fenomeno con teorie a volte in contrasto e disaccordo tra loro. Da un lato, i problemi che riguardano l'evoluzione della biologia degli organismi superano i limiti di questo lavoro. D'altra parte, in termini teorici, la domanda influenza il modo di interpretare la natura e l'osservazione dei processi nell'applicazione pratica della biomimetica.

Darwin ha formulato il meccanismo di selezione naturale, nel suo libro "*L'origine delle specie*" pubblicato nel 1859, che è la base dell'idea di evoluzione biologica. Darwin ha osservato l'enorme varietà di specie sul pianeta e ha proposto un meccanismo semplice ed elegante, una procedura passo-passo, che poteva spiegare la sua esistenza. Nel suo lavoro distingue due elementi fondamentali: doveva esserci un generatore di varietà e un filtro per la varietà (Fig. 16). Darwin fa appello al fatto, noto ai suoi contemporanei, che la natura produce variabilità nella progenie degli organismi (Langton, 1996).

La varietà è il prodotto dei processi naturali nella riproduzione di animali e vegetali. L'innesto tra le piante come metodo di propagazione vegetativa artificiale e incroci tra animali per la selezione artificiale sono ampiamente noti fin dall'antichità. Accettata la varietà, Darwin ha dimostrato come la natura possa svolgere il ruolo di filtro selettivo: gli organismi si adattano al loro ambiente. Nel frattempo, la portata e il potere della selezione naturale e i gradi di adattamento che produce rimangono soggetti a diversi studi e interpretazioni. La selezione naturale non è un concetto delimitato e in essa si trova la creatività dell'evoluzione biologica (Wagensberg, 2005).

Nell'approccio genetico della selezione naturale, il gene [8] è un'unità di selezione. È ciò che persiste attraverso un gran numero di generazioni. In questo approccio "*sono i geni che, nel loro stesso interesse, manipolano i corpi che li trasportano. L'organismo individuale è una macchina di sopravvivenza per i suoi geni*" (Dawkins, 1996, 70).

Il darwinismo e il neodarwinismo spiegano come l'adattamento di un organismo sia prodotto da piccoli cambiamenti nella specie. Quindi la diversificazione tra gli organismi si otterrebbe mediante l'accumulo di piccoli cambiamenti. Generalmente si presume che se si accumulano abbastanza differenze genetiche, si ottiene qualcosa di qualitativamente diverso. Questa è un'ipotesi ragionevole, tuttavia il suo meccanismo non è stato dimostrato. Il darwinismo rappresenta un cambiamento su piccola scala. Non può spiegare l'origine delle grandi differenze nella forma che sorgono durante l'evoluzione (Goodwin, 1996). La comprensione del meccanismo evolutivo, rispetto alla generazione della forma, rimane aperta. La morfogenesi coinvolge le relazioni tra processo e strutture nel tempo e nello spazio, al fine di comprendere come forme complesse

[8] Gene (m. Bio.): Sequenza di DNA che costituisce l'unità funzionale per la trasmissione dei caratteri ereditari (Real Academia Española)

possano nascere da semplici condizioni iniziali.

Nel mondo reale, gli organismi interagiscono l'uno con l'altro nell'ambito di un ambiente dinamico, e i criteri selettivi emergono semplicemente in modo naturale. È nella "natura" delle interazioni tra tutti gli organismi – tra loro e con l'ambiente – ciò che determina quali entità sopravvivranno. Non ci sono popolazioni isolate, ma esiste uno scambio continuo tra loro e gli individui che le compongono.

La selezione naturale si esercita sulla stabilità dei diversi tipi del ciclo vitale, in habitat diversi, in modo che una specie possa sopravvivere, possa persistere; la specie deve avere una stabilità dinamica in un particolare habitat. La questione globale dell'evoluzione su vasta scala rimane aperta (Goodwin, 1996). Gli organismi mostrano una moltitudine di caratteristiche emergenti. In altre parole, i geni interagiscono in modo non lineare (Fig. 17). La selezione naturale agisce simultaneamente in una gerarchia di livelli: i geni sono un livello e gli organismi sono un altro. Ci sono anche livelli più alti, come popolazioni e specie, in cui la selezione naturale è molto efficace, e il risultato finale non è sempre l'adattamento - specialmente quando il processo è osservato in un periodo di milioni di anni (Gould, 1996).

Dall'osservazione del processo di selezione e dalla grande varietà di organismi, appaiono le proprietà emergenti, che non possono essere spiegate dalle proprietà delle parti di un sistema. Esiste un ordine irriducibile che dipende dalla presenza delle interazioni. Il tutto è più della somma delle sue parti, o forse più appropriatamente, il tutto è diverso dalla somma delle parti (Solé, 2009).

Questa visione ci consente di comprendere l'esistenza della complessità. Gli elementi di base che compongono un sistema spiegano cosa avviene a scale inferiori. Mentre la complessità del sistema è definita dalla rete d'interazioni tra le parti e dalla natura delle interazioni. *"L'insieme ha molto più a che fare con la natura delle interazioni che con la natura degli oggetti che interagiscono, anche se quest'ultimo impone alcune limitazioni su ciò che può accadere al livello successivo"* (Solé, 2009, 25).

Il darwinismo e le sue interpretazioni più severe hanno posto l'accento sul conflitto e sulla competizione, ma non sono le uniche dinamiche che si trovano nella realtà. Altri meccanismi mostrano come la cooperazione sia parte dell'evoluzione. La simbiosi è un'associazione fisica tra organismi, la coesistenza di organismi di specie diverse nello stesso momento e luogo. Molte simbiosi sono obbligatorie, cioè i praticanti non sopravviverebbero senza l'interazione; per esempio, un lichene è una relazione simbiotica obbligatoria tra un'alga o un batterio blu-verde e un fungo [9].

L'interazione biologica della simbiosi a lungo termine è definita come "simbiogenesi". Questa è considerata un meccanismo di novità evolutiva, e la sua nozione ha acquisito importanza. La biologa Lynn Margulis propone il fenomeno della simbiogenesi come principale fonte di cambiamento evolutivo. *"È il risultato di una coesistenza a lungo termine – specialmente tra microbi – ed è la principale fonte d'innovazione evolutiva in tutti i ceppi di organismi superiori non batterici"* (Margulis 1996, 125). È riconosciuto che la selezione naturale agisce sulla variazione, mentre rimane aperta la domanda di dove proviene la variazione utile che agisce sulla selezione. Per Lynn Margulis, le variazioni ereditarie più significative derivano dalle fusioni e danno come risultato esseri nuovi più complessi. La teoria si applica al mondo dei microbi: i batteri, sotto pressione ecologica, si associano sperimentando cambiamenti metabolici e genetici. Questa interazione nasce dall'individualità che tende verso un livello più complesso di organizzazione.

Nella divisione degli organismi si distinguono i procarioti, gli organismi unicellulari senza nuclei, e gli organismi composti da cellule eucariotiche (tra cui gli esseri umani). Attualmente si riconosce la nascita delle cellule eucariotiche come trasformazione di ciò che in origine era un'infezione parassitaria trasferita da una cellula a un'altra (Margulis, 1996). Questa forma di simbiogenesi, per fusione biologica, determina

[9] Definizione e esempio di simbiote per per BioDic - Diccionario de Biología on-line

un grande cambiamento nello sviluppo evolutivo e nell'aumento della sua complessità.

0.5.2 Sostenibilità

La validità della biomimetica dipende in generale dalla sua connotazione ambientale. È un campo di ricerca interdisciplinare in cui la divisione tra discipline "pure" dà luogo a un'area di ricerca che mira a generare materiali o processi che sono in qualche modo sensibili all'ambiente (Weinstock, 1998). In termini specifici, la sua efficacia si basa sull'osservazione, lo studio e la riproduzione di meccanismi e/o processi naturali, che sono in equilibrio con il loro ambiente naturale e non compromettono la continuità generale del sistema.

La validità della biomimetica dipende in generale dalla sua connotazione ambientale. È un campo di ricerca interdisciplinare in cui la divisione tra discipline "pure" dà luogo a un'area di ricerca che mira a generare materiali o processi che sono in qualche modo sensibili all'ambiente (Weinstock, 1998). In termini specifici, la sua efficacia si basa sull'osservazione, lo studio e la riproduzione di meccanismi e/o processi naturali, che sono in equilibrio con il loro ambiente naturale e non compromettono la continuità generale del sistema.

La promessa biomimetica può offrire soluzioni con un potenziale specifico per contribuire allo sviluppo tecnologico sostenibile [10], attraverso il flusso ispiratorio dalla biologia ai prodotti tecnici. L'assunto è che la natura vivente può servire come un generatore di concetti per affrontare le sfide dello sviluppo sostenibile in termini di obiettivi sociali, ambientali ed economici (Speck a tutti, 2017).

Imparare dalla natura vivente è legato all'interesse di implementare soluzioni biologiche che si sono ottimizzate nel corso di 3,8 miliardi di anni di evoluzione. La speranza è che la biomimetica applicata all'architettura contribuirà a sviluppare una cultura attiva del design ambientale (Gruber, 2011); e dove le soluzioni bio-ispirate si combinano con la promessa di contribuire allo sviluppo sostenibile. S'identificano quattro obiettivi principali per applicare la biomimetica alla sostenibilità industriale: attraverso l'efficienza nell'uso dell'energia e delle risorse, l'eliminazione e il controllo delle sostanze pericolose, l'uso di materiali rinnovabili e biologici, e l'incorporazione di funzioni aggiuntive nei materiali e nelle strutture (John at all, 2005).

Gli edifici in generale, e in particolare le città, sono attori chiave della sostenibilità e determineranno il destino dell'umanità. Il consumo di risorse e la rispettiva produzione di rifiuti delle città superano di gran lunga le capacità del loro ambiente. Il settore delle costruzioni contribuisce in modo significativo alle emissioni di CO₂, gli edifici sono responsabili del 40% del consumo totale di energia in Europa e di un terzo delle emissioni di CO₂. Allo stesso tempo, l'industria delle costruzioni è tra i maggiori consumatori di risorse (Speck a tutti, 2017). Di fatto, l'Unione Europea integra soluzioni basate sulla natura nei suoi programmi di sviluppo [11]. Sebbene il portale Web non utilizzi specificamente il suffisso bio-, si riconosce che la natura può aiutare a fornire soluzioni valide che offrano alternative sostenibili, fruttifere, versatili e flessibili per vari scopi. Lavorare con la natura, invece di combatterla, può aprire la strada a un'economia più efficiente, competitiva ed ecologica.

L'uomo, e quindi la costruzione, diventano e fanno parte della natura e dei processi ecologici a essa correlati; di conseguenza, la valutazione dei materiali è strettamente legata all'analisi degli ecosistemi. L'attenzione del progetto è rivolta alla gestione delle risorse e alla conseguente produzione di rifiuti. Tra le sfide per un settore compatibile con l'ambiente c'è il problema dei rifiuti o scarti che produciamo. La presa di coscienza

[10] La prima volta che il concetto di sostenibilità è ampiamente accettato (almeno formalmente) è attraverso il Brundtland Report (UN 1987) noto per la sua definizione del concetto di sviluppo sostenibile: "Lo sviluppo sostenibile è uno sviluppo che soddisfa i bisogni della generazione attuale senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni". Fonte: Bermejo Gómez de Segura, 2014

[11] Più informazioni in: <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs#> (ultima visita 28/07/2018)

del buco nello strato di ozono inizia alla fine degli anni '80 del XXI secolo (Fig. 18), quasi quarant'anni dopo ci ritroviamo con "l'emergenza della plastica". L'organizzazione Greenpeace ha attivato la campagna "*Niente più plastica nei nostri alimenti*" per ridurre gli involucri di plastica dei cibi freschi nei supermercati. L'associazione WWF Spagna ha attivato un'altra campagna con la raccolta firme *#AtrapadosEnPlásticos* per vietare lo scarico di plastica negli oceani. La situazione sembra insostenibile, più di 8 milioni di tonnellate di plastica vengono scaricate in mare ogni anno e si stima che nel 2050 ci saranno più tonnellate di plastica che pesci negli oceani (Fig.19). "*Finora ci sono prove documentali che gli animali di circa 700 specie marine hanno ingerito o sono rimasti intrappolati nella plastica. Non capiamo ancora quale sarà l'impatto a lungo termine della plastica sulla fauna selvatica (o su di noi)*" (Daily, 2018).

Affrontare la questione dei rifiuti e degli scarti significa prendere contatto con una simbologia che culturalmente respingiamo (Fig. 20). "*Desideriamo che le cose fossero pure e che durassero per sempre. Abbiamo scelto il consumo come misura di benessere, ma non ci piacciono le sue conseguenze; esaltiamo la creazione e disprezziamo le cose e i luoghi degradati. Pesiamo in forma dicotomica, in classi chiuse, e non vogliamo comprendere il flusso e il degrado*" (Lynch, 2005, 51).

In questa percezione dei rifiuti si trova il modello economico occidentale su scala globale, che è orientato al consumo e ha bisogno di una costante accelerazione del deterioramento dei prodotti per mantenere la struttura produttiva. Tuttavia la conseguente accumulazione di rifiuti è in conflitto con la dinamica di funzionamento della Terra. Lo scenario è certamente complesso e mette in relazione cambiamenti di carattere produttivo e culturale della società. Se analizziamo le interazioni coinvolte secondo un approccio sistemico, siamo in grado di interpretare i fenomeni umani come insiemi integrati in un sistema di relazioni di rete che definiscono il modello di organizzazione della vita. Si tratta di una "*visione del mondo che riconosce il valore intrinseco della vita non umana. Tutti gli esseri viventi sono membri di comunità ecologiche collegate da una rete d'interdipendenze*" (Capra, 1996, 32). Nel corso dell'evoluzione gli organismi, che sono stati in grado di aumentare o modificare le interconnessioni delle reti a diversi livelli, sono quelli che si sono sviluppati e sono oggi presenti nella biosfera.

Il concetto di evoluzione, alla base della biomimesi, mostra come la natura utilizza diversi meccanismi per il continuo adeguamento della vita al contesto (Fig. 21). Lo studio e la comprensione delle interazioni degli ecosistemi sono un mezzo per attenuare le cause del cambiamento climatico, del quale l'ambiente costruito è in parte responsabile, e/o permettere di adattarsi agli effetti dei cambiamenti climatici che interessano il pianeta. Imitare i processi degli ecosistemi e le interazioni biologiche (tra i quali la simbiosi e la simbiogenesi) è uno dei molti approcci per migliorare la sostenibilità dei processi e dei disegni architettonici.

0.5.3 Riciclaggio

In una visione olistica delle dinamiche naturali, di cui l'attività umana è una parte, la gestione dei rifiuti, intesi come risorse, è una strategia per estendere la vita utile di un materiale e per la sua rivalutazione in ambito tecnologico. L'implementazione del riciclaggio contribuisce alla costruzione di modelli di produzione sostenibili, modificando le interazioni tra aree e attività che in principio non sono correlate tra loro. Nella ricerca verso nuove soluzioni sostenibili, l'architettura permette di agire sulle strutture materiali (dalla sperimentazione alla produzione), che a loro volta partecipano in modo sostanziale alla modifica dei processi di natura simbolica e dialettica per lo sviluppo di un nuovo sistema ecosociale (Saura, 2003).

Il riciclo (Fig. 22) è una pratica che reincorpora nel ciclo produttivo parte dei rifiuti solidi che generiamo nell'attuale modello di consumo della società. Esistono materiali originati dal riciclo che sono attualmente presenti nella costruzione; alcuni esempi: pannelli in fibra di legno provenienti dagli scarti del processo di lavorazione del legno, o pavimenti in gomma riciclata che vengono utilizzati per parchi giochi o piste ciclabili. Il riciclaggio e il riutilizzo dei prodotti sono, inoltre, molto diffusi nei casi in cui la mancanza di risorse porta a stimolare la creatività per trovare nuove soluzioni architettoniche. I problemi ambientali, come la

complessità della gestione del modello materiale, coinvolgono tutte le attività umane e il suo rapporto con la biosfera. Grazie alla sua natura creativa, l'architettura è una disciplina in grado di accettare queste sfide nelle sue aree d'intervento.

Nell'ambito dell'analisi del ciclo di vita dei materiali, il riciclaggio consente di estendere la loro vita utile. Secondo le forme di riciclaggio, s'identifica la re-incorporazione di materiali o prodotti in diverse fasi del ciclo di vita. Va chiarito che l'analisi del ciclo di vita è intesa come applicata all'attività umana in generale. I modelli che mostrano teoricamente il sistema del ciclo di vita, sia aperto che chiuso, semplificano le dinamiche reali collegate per necessità (Schema 0.7).

Il sistema inizia ad articolarsi applicando il modello a un prodotto concreto in cui sono visibili le interazioni tra le diverse aree industriali in relazione ai materiali e ai processi utilizzati per la produzione/costruzione. Allo stesso modo, se volessimo formalizzare tutti i prodotti che produciamo e usiamo, così come le sue molteplici varianti, ci renderemmo conto della vastità del sistema e della sua elevata complessità. Anche immaginando che da domani il nostro sistema di produzione su scala globale possa essere chiuso, resterebbe comunque una quantità di rifiuti già accumulata che oggi non sappiamo come incorporare. Per raggiungere un ciclo di vita chiuso, dovremmo ottenere che i nostri rifiuti si trasformassero nelle nostre risorse. Ciò comporta l'eliminazione del concetto di rifiuto ridisegnando processi e prodotti dalla loro origine.

“Significa che le preziose sostanze nutritive contenute nei materiali conformano e definiscono il disegno: la forma segue la valutazione, non solo la funzione” (Braungart e McDonough, 2005, 98).

Il riciclaggio [12] è una pratica che a livello di produzione industriale consente di aumentare o modificare le interazioni esistenti per rispondere ai problemi ambientali. In particolare, la re-incorporazione dei materiali di scarto genera nuove connessioni tra aree diverse e non è limitata a una stessa area industriale.

Nel caso di applicazione il riutilizzo (Fig. 23) o il riciclaggio (Fig. 24) dei prodotti all'architettura, ciò implica cambiare il processo di progettazione che dipenderà dalle caratteristiche, proprietà e disponibilità. I prodotti, a differenza dei materiali, non sono solo caratterizzati dalle loro proprietà intrinseche, ma anche dalla loro forma, geometria, dimensione, ecc. E tutte queste caratteristiche partecipano al processo di definizione del design e sono l'oggetto del linguaggio architettonico. I cambiamenti che sono implementati nel linguaggio architettonico agiscono sulla percezione estetica e simbolica che contribuisce alla costruzione di una visione ecologica della società.

Quando reincorporiamo i prodotti già utilizzati in altri ambiti di utilizzo, dobbiamo valutare gli aspetti di salubrità. Nell'attuale sistema di produzione nella maggior parte dei casi un oggetto è stato prodotto solo per il suo primo utilizzo e non per altre applicazioni. Ciò mostra un profondo e radicale cambiamento della capacità di previsione del modello produttivo, difficilmente immaginabile per il prossimo futuro. Tutte le sperimentazioni, sebbene su base temporanea, aiutano a costruire nuove visioni dell'architettura, mostrando cosa si potrebbe fare e come si potrebbe riciclare. A conclusione dell'esperimento diventa necessario tornare alla fase di produzione dove modificare i processi industriali in modo che i prodotti siano utili e sicuri tanto per il loro primo utilizzo come per quelli successivi.

0.6 LIMITI DI LAVORO

La ricerca qui illustrata propone la bio-ispirazione del tessuto del cactus definendo due livelli di relazione in biomimesi:

[12] Il riciclaggio fa parte della regola delle tre R (3R) per sviluppare abitudini di consumo responsabili, proposta nel G8 del 2004 dal primo ministro giapponese Koizumi Junichiro e resa popolare dall'organizzazione ambientale Greenpeace: Ridurre - Riutilizzare - Riciclare. Nel corso del tempo è stata aggiunta una quarta R con il significato di Recuperare.

- Analisi morfologica, come processo di generazione della forma naturale nei sistemi elastici ispirati al comportamento dei tessuti vivi.
- Dimensione ecologica, mediante l'uso di materiali non convenzionali originati dal recupero, applicando il concetto di metabolismo tecnico.

La scelta dei materiali consente di passare dalla dimensione del modello alla scala del progetto sperimentale, uscendo così dal piano della progettazione. La descrizione del progetto è legata al processo costruttivo che descrive il suo comportamento. Nei capitoli seguenti del presente lavoro si descrive lo sviluppo biomorfico, dallo studio dell'organismo a una proposta d'implementazione tecnica della morfologia organica. In parallelo, la struttura teorica è applicata al progetto che diventa un pretesto per verificare l'applicazione della biomimetica.

La scelta di indagare con un materiale riciclato (come le gomme fuori uso - NFU) corrisponde all'interesse di applicare a livello teorico il concetto di simbiogenesi come un processo in grado di connettere tra loro diverse aree industriali. Lavorare nel campo della tecnosfera permette la ricerca di soluzioni per reintegrare i materiali inquinanti non biodegradabili in un metabolismo tecnico (Braungart e McDonough, 2005) separato e indipendente dai cicli biologici organici.

In una certa misura, quando una tecnologia è obsoleta viene sostituita completamente da un diverso processo e con un nuovo design. In biologia, una nuova combinazione di pezzi può portare a un enorme salto qualitativo, ma ogni innovazione viene eseguita ripetutamente. Questo riutilizzo è al centro del design evolutivo (Solé, 2009). La volontà di reintegrare un materiale altamente inquinante e non biodegradabile con alti costi energetici nella fase di produzione, risponde alla necessità di contribuire a un modello di un ciclo di vita chiuso e non lineare (Schema 0.8). Le risposte offerte dall'evoluzione dei sistemi biologici, come la simbiosi (Capra, 1996), aprono nuovi scenari alla ricerca d'interazioni tra diversi campi: la costruzione e l'industria automobilistica. L'integrazione di processi apparentemente separati offre l'opportunità per il cambiamento tecnologico di sviluppare modelli sostenibili e trasformare i rifiuti in un'opportunità.

I modelli sviluppati non offrono un oggetto architettonico finito. La proposta di progetto biomimetico non propone un campo di applicazione diverso dal riferimento naturale. La ricerca del campo di applicazione è di per sé un'attività e potrebbe essere svolta indipendentemente dalla ricerca sul modello del ruolo biologico o naturale (Gruber, 2011). La proposta di implementazione tecnica trasferisce i principi biologici osservati, applicando la morfologia a diversi livelli gerarchici del sistema e mantenendo la stessa funzione del referente naturale.

I risultati ottenuti sono verificati secondo l'albero decisionale sviluppato nell'ambito del progetto CRC-Transregio 141 "*Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture*" (Speck del 2017). Si tratta di uno strumento di analisi diretta che consente l'identificazione di vari tipi di prodotti e algoritmi derivati dalla biologia e dai derivati della tecnologia (Fig. 25). Ogni nodo interno (rappresentato da un ovale) verifica un attributo nominale, ogni ramo (illustrato da una freccia) rappresenta il risultato del test ed è etichettato con il valore dell'attributo corrispondente e ciascun nodo foglia (rappresentato da un doppio ovale) assegna una classe A partire dal nodo radice, rappresentato dall'attributo "trasferimento di principi", e in base ai controlli delle proprietà morfologiche raggiunte, viene verificato a quale tipo di prodotto biomimetico sono state prese le decisioni nel processo di progettazione.

Capítulo 1

Orígenes de la investigación

Resumen

El primer capítulo define los factores iniciales que determinan la interpretación del referente orgánico en base al estudio bibliográfico, el estudio de campo de la planta cactácea, el análisis de muestras del tejido de madera y la construcción de unos primeros modelos físicos. La abstracción del análisis del tejido resistente de la planta y el proceso de conceptualización del referente orgánico son a la base del proceso de análisis.

El trabajo plantea como referentes orgánicos válidos, los cactus con tallo suculento, fotosintético y donde la disposición de las aréolas exteriores tiene una distribución romboidal y/o helicoidal. Bajo estas características se estudian ejemplares de la familia de las Cactáceas, de los géneros *Echinopsis* y *Opuntia*.

Por su adaptación a la sequía, las cactáceas se caracterizan por la pérdida de resistencia mecánica a favor del tejido para el almacenamiento de agua y otros nutrientes. La estructura leñosa se encuentra en el interior del tallo y está formada por haces vasculares entrecruzados. Estos están organizados en un conjunto de hélices de dos vías donde el esqueleto leñoso aparece como un retículo.

La forma en la cual la planta se sostiene es un sistema complejo que basa su relación entre los tejidos de madera de los haces vasculares y los equilibrios de presión internos por el intercambio de líquidos entre las células. Cuando la arquitectura hidráulica de la planta no es suficiente como soporte se desencadena un cambio de fase de la madera para garantizar el sostén de la planta: de una más elástica con mayor capacidad de acumulación de líquidos a una fibrosa más rígida y resistente. Esta respuesta morfogenética adaptativa está relacionada con el estrés del peso cuando la planta crece y con las condiciones ambientales a las cuales ha sido expuesta.

El análisis morfogenético de la estructura de la planta viva pone en relación la forma con la fisiología del organismo en un estado dinámico. El capítulo trata la biomecánica y la morfología funcional del tejido de madera fibrosa del cactus y se centra en los procesos biológicos de crecimiento y auto-organización. La adaptación mecánica se basa en variaciones de formas por flexibilidad de sus tejidos que se accionan hidráulicamente y/o mediante inestabilidades elásticas por pandeo. Estos mecanismos permiten a las cactáceas adaptarse a las condiciones medioambientales y responder a las necesidades de crecimiento del organismo.

El estudio biomimético implica una interpretación del referente orgánico, donde los instrumentos utilizados y la escala de observación inciden tanto en el procedimiento como en la interpretación. El procedimiento de abstracción define la estructura del cactus como una sumatoria de elementos lineares que se desarrollan en la misma dirección del crecimiento de la planta y se expanden por agregación de tejidos. Esta interpretación define la forma de la franja como el elemento morfológico de base.

Sommario

Il primo capitolo definisce i fattori iniziali che determinano l'interpretazione del referente organico basato sullo studio bibliografico, lo studio sul campo della pianta cactacea, l'analisi dei campioni di tessuto di legno e la costruzione di primi esperimenti fisici. L'astrazione dell'analisi del tessuto resistente della pianta e il processo di concettualizzazione del referente organico sono la base del processo di analisi.

La ricerca propone, come referenti organici validi, cactus con fusto succulento e fotosintetico e, dove la disposizione delle areole esterne ha una distribuzione romboidale e/o elicoidale. Sotto queste caratteristiche, si studiano esemplari della famiglia delle Cactaceae, dei generi *Echinopsis* e *Opuntia*.

Grazie al loro adattamento alla siccità, i cactus sono caratterizzati dalla perdita di resistenza meccanica a favore del tessuto per lo stoccaggio di acqua e altri nutrienti. La struttura legnosa si trova all'interno dello stelo ed è formata da fasci vascolari reticolati. Questi sono organizzati in una serie di eliche a due vie in cui lo scheletro legnoso appare come un reticolo.

Il modo in cui la pianta si sostiene, è un sistema complesso che basa la sua relazione tra i tessuti legnosi dei fasci vascolari e l'equilibrio della pressione interna mediante lo scambio di liquidi tra le cellule. Quando l'architettura idraulica della pianta non è sufficiente come supporto, è attivato un cambio di fase del legno per garantire il supporto della pianta: da un legno più elastico con maggiore capacità di accumulo di liquidi a un fibroso più rigido e resistente. Questa risposta morfogenica adattativa è correlata allo stress del peso quando la pianta cresce e alle condizioni ambientali a cui è stata esposta.

L'analisi morfogenetica della struttura della pianta vivente mette in relazione la forma con la fisiologia dell'organismo in uno stato dinamico. Il capitolo tratta della biomeccanica e della morfologia funzionale del tessuto fibroso del legno di cactus e si concentra sui processi biologici di crescita e di auto-organizzazione. L'adattamento meccanico è basato su variazioni di forme dovute alla flessibilità dei suoi tessuti che sono innescati idraulicamente e/o dalle instabilità elastiche dovute a carichi di punta. Questi meccanismi consentono ai cactus di adattarsi alle condizioni ambientali e di rispondere ai bisogni di crescita dell'organismo.

Lo studio biomimetico implica un'interpretazione del referente organico, in cui gli strumenti utilizzati e la scala di osservazione influenzano sia la procedura che l'interpretazione. Il processo di astrazione definisce la struttura del cactus come una somma di elementi lineari che si sviluppano nella stessa direzione della crescita della pianta e si espandono per aggregazione di tessuti. Questa interpretazione definisce la forma della striscia come l'elemento morfologico di base.

Abstract

The first chapter defines the initial factors that determine the interpretation of the organic referent based on the bibliographic study, the field study of the cactus plant, the analysis of wood tissue samples and the construction of first physical experiments. The abstraction of the analysis of the resistant tissue of the plant and the process of conceptualization of the organic referent are the basis of the process of analysis.

The work proposes, as valid organic referents, cactus with succulent, photosynthetic stem and where the arrangement of the areolas outer has a rhomboidal and/or helical distribution. Under these characteristics, specimens of the Cactaceae family, of the genera *Echinopsis* and *Opuntia* are studied.

Thanks to their adaptation to drought, cacti are characterized by the loss of mechanical resistance in favor of the tissue for the storage of water and other nutrients. The woody structure is found inside the stem and is formed by cross-linked vascular bundles. These are organized in a set of two-way propellers where the woody skeleton appears as a reticle.

The way in which the plant is sustained, is a complex system that bases its relationship between the wood tissues of the vascular bundles and the internal pressure equilibrium by the exchange of liquids between the cells. When the hydraulic architecture of the plant is not sufficient as a support, a phase change of the wood is triggered to guarantee the support of the plant: from a more elastic wood one with greater capacity of accumulation of liquids to a more rigid and resistant fibrous. This adaptive morphogenic response is related to weight stress when the plant grows and to the environmental conditions to which it has been exposed.

The morphogenetic analysis of the structure of the living plant relates the form to the physiology of the organism in a dynamic state. The chapter deals with the biomechanics and functional morphology of the cactus fibrous wood tissue and focuses on the biological processes of growth and self-organization. The mechanical adaptation is based on variations of shapes due to flexibility of its tissues that are hydraulically triggered and / or by the elastic instabilities due to buckling. These mechanisms allow cacti to adapt to environmental conditions and respond to the growth needs of the organism.

The biomimetic study implies an interpretation of the organic referent, where the instruments used and the scale of observation affect both the procedure and the interpretation. The process of abstraction defines the structure of the cactus as a sum of linear elements that develop in the same direction of the growth of the plant and expand by aggregation of tissues. This interpretation defines the shape of the stripe as the basic morphological element.

Capítulo 1

Orígenes de la investigación

<<La primera observación de las plantas crasas ha sido por el descubrimiento, a lo largo de un viaje, de la forma seca de la estructura portante de los cactus columnares, endémicos del norte de Argentina, hacia el confín noroeste con Bolivia. En el viaje realizado en mayo 2005, visitando el complejo arqueológico de Pucará de Tilcara (Fig. 1), he quedado sorprendida mirando la reconstrucción del interior del techo de una casa indígena. Las vigas principales parecían en madera pero la estructura del material presentaba una densidad diferente y la morfología era, dependiendo de las zonas, ondulada y/o con vacíos. Si bien el método de construcción era simple, la cubierta parecía no ser practicable y con la capacidad de soportar poca carga. El material utilizado había atraído mi curiosidad. Luego caminando por el parque he visto los esqueletos de los cactus secos junto a plantas aun vivas, y así me ha sido posible reconocer el material natural empleado en origen. A este punto, a lo largo del viaje, era visible el uso de la madera de cactus no únicamente para vigas en sistemas constructivos de poca carga, sino también en tableros para cubiertas, puertas formadas por varias tablas, dinteles y otros objetos de artesanía>>.

1.1 EL DESCUBRIMIENTO DEL CACTUS

Los factores que han ejercido un interés en evaluar la planta como fuente de inspiración son:

- La imagen que este material, que de facto es una madera, está compuesto por sub-elementos con forma de fibras onduladas que parecen conformar un tejido adaptable y eficiente en relación a la cantidad de material empleado.
- El encuentro con un material, en principio desconocido, empleado en la arquitectura, aunque con bajas prestaciones estructurales.

Los primeros cactus secos observados en Argentina son de la especie *Echinopsis atacamensis* (Fig. 1), nombre común *cardón*, de forma arborescente. La estructura interior aparece como una columna vacía, a veces ligeramente abombada, compuesta de madera discontinua con vacíos alternados. La morfología cilíndrica hueca del tejido leñoso pertenece a diferentes especies del género *Echinopsis* y de la subfamilia *Cactoideae*. Una vez abierto el cilindro, queda visible la cara interior formada por una secuencia de fibras de madera, en forma de ondas, en la dirección vertical (Fig. 2 y 3). Por el uso de este material, aplicado a la construcción, se deduce que el cactus



Fig. 1 Ejemplo de la estructura seca interior del cactus columnar *Echinopsis atacamensis* (nombre común *cardón*) en su entorno natural. Complejo arqueológico de Pucará de Tilcara, en el altiplano de la Puna de la cordillera andina, a una altura de 2.450 m sobre el nivel del mar (provincia de Salta, Argentina). © Ludovica Rossi 2005



Fig. 2 (Arriba) Vista interior de una vivienda de una sola planta, con una altura interior de 1,80 m, conformada por muro de piedra en seco, techo en vigas de madera de cactus, barro y cañizo. Complejo arqueológico de Pucará de Tilcara © Ludovica Rossi 2005



Fig. 3 (Arriba derecha) Detalle de la estructura de la cubierta en madera seca del cactus cardón (*Echinopsis atacamensis*). El sistema estructural se compone de la viga principal, similar a un cilindro aplanado que muestra la cara exterior del tronco, y la viga secundaria compuesta por una sección longitudinal del cilindro de madera de cactus donde es visible la cara interior del tejido. © Ludovica Rossi 2005

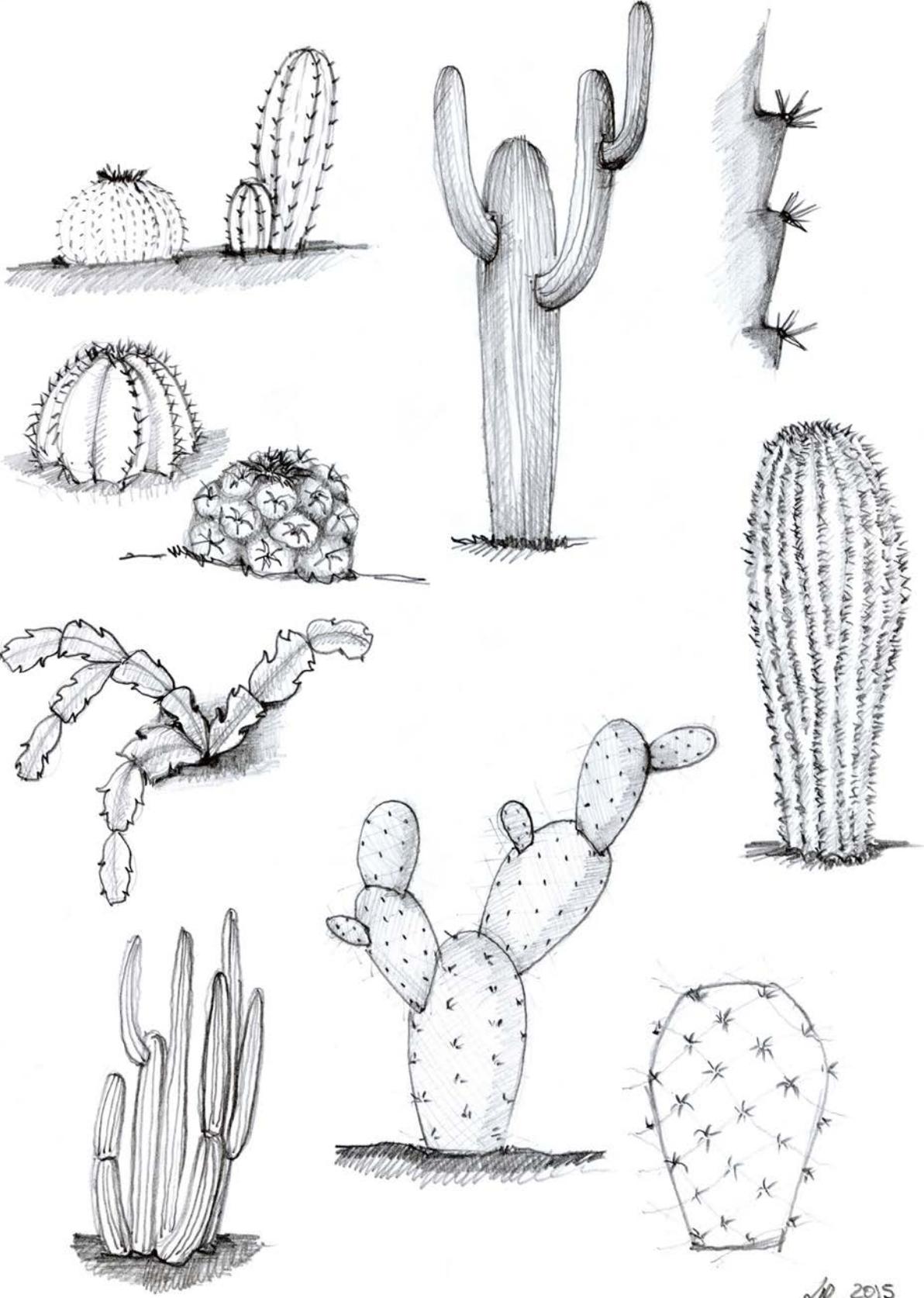
seco mantiene una cierta maleabilidad. Una pieza vertical del cilindro es deformable desde la sección arqueada del aro a la forma plana para la producción de tablas.

En análisis posteriores el estudio ha sido orientado también a los cactus del género *Opuntia* (Fig. 5), nombre común chumbera o tuna, de forma arbustiva y compuesta de palas, por su disponibilidad y facilidad de observación en el clima mediterráneo. Si bien las dos plantas presentan diferencias morfológicas importantes (sobre todo a nivel exterior), en una observación más cercana, los mecanismos fisiológicos son análogos. Además el principio que compone la estructura portante a la base de estas plantas es extensible a diferentes géneros de la familia de las Cactáceas (Fig. 4).

En los *Jardins de Mossèn Costa i Llobera* (Fig. 6), especializados en cactus y plantas crasas, situado en la montaña del *Montjuïc* de Barcelona, se observan diversos tipos de cactus y en algunos casos es posible ver sus estructuras internas en madera. La observación en el sitio de las plantas permite identificar algunos aspectos comunes que han sido tratados de forma transversal independientemente del género de la planta. La estructura de madera del cactus es discontinua y cambia de densidad dependiendo del tipo de planta. En algunos casos la madera se presenta con una mayor densidad y es más continuo, en otros ejemplos el material aparece con mayores vacíos y más discontinuidades. Esta diferencia no está ligada solo al tipo de planta, sino que también depende de la edad de la misma.

Fig. 4 (Página siguiente) Croquis que muestra la variedad morfológica de las plantas crasas: unas con formas bulbosas-esféricas, otras columnares con más o menos ramificaciones del cuerpo, formas más arbustivas o colgantes. © Ludovica Rossi 2015

Al caminar por el *Orto Botanico di Catania* (Sicilia, Italia) (Fig. 5) se descubre una amplia y rica colección de plantas suculentas de aproximadamente unas 2.000 especies y cuyas primeras



SR 2015

Fig. 5 (Página siguiente) Cambios morfológicos de las plantas cactáceas género *Opuntia* en la isla de Sicilia (Italia). **a)** Planta de *Opuntia tomentosa* del jardín botánico de Catania en forma de árbol por la podadura. **b)** En la parte superior las palas crecen de forma arbustiva similar a la planta más joven. **c)** El tronco está formado por la conexión de las palas, que de la forma plana han pasado a la cilíndrica, por estratificación de los tejidos internos de madera. La superficie toma la textura de la corteza y son visibles algunas aureolas y espinas. **d)** La pala modificada en tronco cilíndrico según la edad y las condiciones ambientales de un cactus *Opuntia* en el parque Valle dei Tempi de Agrigento (Sicilia) y unión de una pala seca más joven que muestra el tejido reticulado. **e)** Corte transversal de tronco de un cactus que muestra cómo el interior está compuesto por capas de tejido concéntricas (Valle dei Tempi Agrigento). © Ludovica Rossi 2011

Fig. 6 Fotografía de los Jardins de Mossèn Costa i Llobera en la montaña del Montjuïc, donde se distinguen a la izquierda una Cactácea *Opuntia* de forma arbustiva con segmento aplanado y a la derecha una Cactácea *Echinopsis* de forma cilíndrica columnar. © Ludovica Rossi 2011

plantas colocadas datan del 1862 (según información histórica del centro). Entre las diversas plantas se encuentra una tuna o chumbera (*Opuntia*) que de la forma arbustiva ha tomado la conformación de un árbol (Fig. 5 a, b, c). El tronco está formado por la conexión de las palas, como muestran los signos horizontales que se subsiguen. Las palas de la forma plana han pasado a la cilíndrica, a partir de la estratificación de los tejidos internos de madera, hasta llegar a un cambio morfológico exterior. La superficie toma la textura y forma de la corteza del árbol y son aun visibles algunas aureolas de donde salían las espinas. En la parte superior las palas se suceden, como en la forma arbustiva de la planta más joven, pero en este caso formando la copa del árbol.

Desde la visita al jardín botánico de Catania en el verano del 2011 (en el cual se ha observado por primera vez el desarrollo de una chumbera en forma de árbol) y de otras plantas de *Opuntia* en la isla de Sicilia, se han podido identificar otros casos donde según la edad de la planta se asocia un cambio de los tejidos estructurales internos (Fig. 5 d, e). En la base hay un aumento de la estructura de madera, y el exterior se asemeja a la corteza de un árbol y pierde el color verde. El caso de la *Opuntia* es uno de los más evidentes por el manifiesto cambio morfológico externo que experimenta, aunque este cambio es visible también en otras plantas suculentas.





1.2 LA FISIOLÓGÍA DE LA PLANTA

En los registros fósiles más antiguos las primeras plantas vasculares datan 400 millones de años atrás. Con la aparición de las primeras plantas acuáticas en la superficie de la tierra y su adaptación al aire, se estima que la diversificación de los cactus comenzó en medio de la era del Cenozoico hace 30 millones de años. Diferentes estudios atribuyen edades más jóvenes, llegando a fechas más cercanas de hasta unos 3,1 millones de años (Angiosperm Phylogeny Group, 2017).

La familia de las cactáceas se caracteriza por tener una gran variedad de formas y tamaños a lo largo de su extensión geográfica. Está representada por ejemplares arborescentes como el cardón (*Echinopsis*) o arbustivos como la chumbera (*Opuntia*), ambos con tallo suculento. También se encuentran individuos con tallo leñoso u hojas suculentas. Las plantas de tallo suculento [1] pueden articularse en formas planas, cilíndricas, arboladas o globosas, y tener o no espinas distribuidas uniformemente alrededor del tallo o costillas longitudinales.

Los cactus son extremadamente diversos estructural y ecológicamente, sin embargo, todos tienen la misma organización que la mayoría de las dicotiledóneas [2]. Ninguno difiere fundamentalmente de *Arabidopsis* [3] u otras plantas modelo utilizadas para el estudio de la biología vegetal (Mauseth, 2006). Hasta el cactus más extraño tiene los tejidos y órganos fundamentales de una dicotiledónea común. Tienen la organización corporal básica de las plantas no suculentas, solo que poseen un poco más de corteza, hojas más pequeñas y brotes axilares [4] que se desarrollan como grupos de espinas. Cabe enfatizar la diversidad de estructura, ecología y reproducción, en esta familia de plantas. Probablemente ninguna otra excede a la Cactácea en diversidad de estructura; sus miembros incluyen árboles, enanos, gigantes, enredaderas, epífitas [5] y bulbosas. Muchos son dimórficos [6] y producen diferentes tipos de anatomía o morfología en las diferentes etapas de sus vidas (Mauseth, 2006).

Las cactáceas se distribuyen por todo el continente americano, desde el sur y oeste de Canadá hasta el sur de la Patagonia en Argentina y Chile. Esta familia pertenece a las Cariofilales sensu APG II (Angiosperm Phylogeny Group, 2017) e incluye alrededor de 1.500 especies y aproximadamente 100 géneros (García de Almeida et al., 2010).

La evolución de Cactus ha sido un proceso de diversificación. Partiendo de una organización ancestral de tallos, hojas y raíces, los cactus se han diversificado en una multiplicidad de

[1] Tallo suculento: en botánica el tallo es el órgano de las plantas que se prolonga en sentido contrario al de la raíz y sirve de sustentáculo a las hojas, flores y frutos. La definición de suculento expresa su modificación en una nueva especialización que permite el almacenamiento de agua en cantidades mucho mayores que en el resto de las plantas (fuentes RAE y Wikipedia).

[2] Dicotiledóneas: Clase de las angiospermas caracterizada por tener en las primeras etapas del desarrollo dos cotiledones, con una raíz principal formada a partir de la radícula y con crecimiento secundario en espesor, por el tallo con haces conductores abiertos y dispuestos en un círculo, y por las hojas pecioladas y de nervadura reticulada. Las flores generalmente son pentámeras o tetrámeras, raramente trímeras (fuente BioDic - Diccionario de Biología).

[3] *Arabidopsis*: es un género de plantas herbáceas de la familia de las brasicáceas, que ha sido objeto de intensos estudios en épocas recientes como modelos para la investigación fitobiológica. Fue la primera planta cuyo genoma se secuenció por completo, una tarea completada en diciembre del 2000 por el proyecto AGI - Iniciativa para el Genoma de la *Arabidopsis* (fuente Wikipedia).

[4] Brote axilar: Pimpollo o renuevo que empieza a desarrollarse (acción de brotar). Término usual con el que se designa el vástago en estado de desarrollo, a partir de la yema hasta que ha terminado su crecimiento. El término axilar indica que el brote nace en la axila de una hoja, en la zona de unión de la hoja con el tallo (fuente BioDic - Diccionario de Biología).

formas corporales. El aspecto distintivo de estas plantas por las cuales son conocidas, es que son organismos adaptados a medios áridos y desérticos. Unas plantas, en principio, no suculentas modificaron sus caracteres fisiológicos para sobrevivir a los cambios ambientales del hábitat en el cual vivían (Fig. 7). Los cactus muestran notables adaptaciones a la sequía, a la exposición a intensas radiaciones solares y a una elevada excursión térmica diaria por las condiciones climáticas de las zonas desérticas de las cuales son originarios, como son los altiplanos andinos. También hay especies presentes en otros tipos de climas mostrando una adaptación posterior a la vida epífita [5] o trepadora en las selvas tropicales húmedas, etc. (Bravo-Hollis, 1978).



[5] Epífita: se refiere a cualquier planta que crece sobre otro vegetal usándolo solamente como soporte, pero que no lo parasita nutricionalmente (fuente Wikipedia).

[6] Dimórfico: en biología el dimorfismo es la condición de las especies animales o vegetales que presentan dos formas o dos aspectos anatómicos diferentes (fuente RAE).

Fig. 7 Croquis sobre el proceso de diversificación de las plantas cactáceas. Una planta en principio no suculenta con una organización en tallos, hojas y raíces ha modificado su fisiología para adaptarse a climas áridos. Entre las mutaciones morfológicas se destacan: la reducción de tejido resistente a favor de tejido no especializado para el almacenamiento de agua, la función de la fotosíntesis en el tallo de color verde, y la modificación de las hojas en espinas para reducir la superficie total de transpiración y proteger el agua almacenada. © Ludovica Rossi 2015

El objetivo del organismo es la sobrevivencia y se ha adaptado a vivir en ambientes secos, factor que marca las variaciones fisiológicas respecto a otras plantas. En el describir la evolución de los cactus, hay tres modificaciones importantes:

- la modificación de las hojas, que redujo la superficie total de transpiración,
- la expansión de la corteza en un tejido suculento para el almacenamiento de agua,
- la conversión de hojas en espinas, que protegen el agua almacenada.

Estas modificaciones inciden en diferentes características fisiológicas de las cactáceas, y para la finalidad de este estudio, se tratan las que conciernen la estructura de madera de la planta. Esta se ha retraído en el interior del tallo (Fig. 8) y, de forma similar al tronco de un árbol, se compone por haces vasculares que transportan aguas y nutrientes al interior del organismo. En los cactus las hojas se encuentran transformadas y reducidas a las aréolas con sus espinas, su distribución en el tallo está ligada a la distribución interna de los haces vasculares



Fig. 8 Cactus del género *Echinopsis*. Queda visible la estructura portante de madera interior al cuerpo de la planta, Jardins de Mossèn Costa i Llobera, montaña del Montjuïc. © Ludovica Rossi 2011

Fig. 9 Diferentes tipos de plantas de la familia de las Cactáceas: **a)** *Opuntia spinulifera*, el género *Opuntia* ha sido tomado como referencia para el presente estudio y se han observado diferentes especies; **b)** Planta del género *Echinopsis*, es del mismo género de las plantas observadas por primera vez en Argentina y la morfogénesis del tejido cilíndrico es punto de partida del presente estudio; **c)** *Trichocereus candicans*, también del género *Echinopsis*, muestra cómo la estructura de madera tiene diferentes densidades según la especie y edad de la planta; **d)** *Stenocereus marginatus*, género *Pachycereus*, esta planta muestra unos haces vasculares verticales en principio no interconectados entre sí en un único tejido por lo cual este tipo de cactus no es parte de la investigación. Jardins de Mossèn Costa i Llobera, en la montaña del Montjuïc © Ludovica Rossi 2011

(Altesor y Ezcurrawz, 2003). Y cabe la hipótesis que la forma en la cual se disponen exteriormente las aréolas refleja la forma de los tejidos de soporte que se distribuyen al interior de la planta.

Los mecanismos empleados que inciden directamente sobre la estructura de madera son:

- La fotosíntesis es realizada también en el tallo. Todo el cuerpo de la planta participa en el proceso de la fotosíntesis y el color verde indica la presencia de clorofila en las células.
- El almacenamiento de agua, cuando es disponible, en los tejidos del tallo como adaptación para evitar la pérdida de agua por transpiración, para ser almacenado en los períodos favorables.

Estos mecanismos determinan que el tronco de sostén de la planta se encuentra en el interior de la misma y no es visible desde el exterior. Por su evolución las cactáceas se caracterizan por la pérdida de resistencia mecánica debido a la reducción de estructura leñosa a favor del tejido para el almacenamiento de agua y otros nutrientes como resultado de la elaboración de succulencia. De hecho las plantas crasas mantienen la misma estructura arquitectónica que otras plantas, aunque en términos morfológicos no sea directamente evidente.



Las cactáceas se dividen en 4 subfamilias y en este estudio se han observado especies perteneciente a dos: Opuntioideae (Fig. 9a) y Cactoideae (Fig. 9b). Los miembros de estas dos subfamilias ocupan casi todos los hábitats terrestres: desiertos calientes, regiones frías, pastizales, bosques sombríos, bosques lluviosos, y zonas alpinas frías, húmedas o cubiertas de nieve por encima de la línea de árboles (Mauseth, 2006).

La disposición de los haces liberoleñosos [7], con sus elementos mecánicos, varía y a veces es bastante compleja. De estos haces salen paquetes vasculares hacia la corteza, que terminan en los parénquimas [8] o en los tejidos indiferenciados de las aréolas (Bravo-Hollis, 1978). Se encuentran diferentes variaciones en la distribución de los haces vasculares en los cactus: desde una distribución de haces vasculares en forma de cuerdas gruesas y largas que, como varillas, se disponen en torno al tejido medular, hasta la formación de un cilindro grueso y compacto (Fig. 9c).

Por el fin de este estudio, que supone analizar la morfología funcional de la estructura interior de la planta como disparador de conceptos aplicables a la arquitectura, se evaluaron como referentes válidos las cactáceas con tallo succulento, fotosintético y donde la disposición de las aréolas es romboidal y/o helicoidal (Fig. 10a). Esta característica indica que los haces vasculares internos están dispuestos en un conjunto de hélices (Altesor y

[7] Haces liberoleñosos: Los elementos conductores, que se agrupan en número mayor o menor, y constituyen a modo de cordones o fascículos los hacesillos conductores. Los elementos que los constituyen se colocan unos junto a otros, sin espacios huecos. En general los haces normales o completos varían por la disposición que afectan en él el xilema y el floema. Se hallan en los órganos vegetales de estructura primaria y secundaria (fuente BioDic - Diccionario de Biología).

[8] Parénquima: En botánica, es el tejido fundamental, por ser preponderante en la mayoría de los órganos vegetales, está constituido por células de forma aproximadamente esférica o cúbica, con membranas sutiles y no lignificadas. Llenan los espacios en todos los órganos vegetales y están poco especializadas. Por las finalidades de este estudio, la referencia a estos tejidos es por su función de almacenar agua (fuente BioDic - Diccionario de Biología).



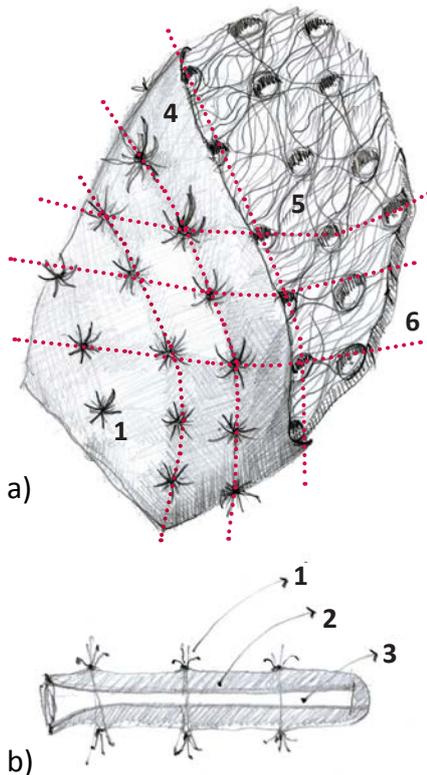


Fig. 10 Croquis de una pala (segmento aplanado) de Cactáceas Opuntia: **a)** Relación entre estructura de madera interior y la distribución de las aréolas exteriores; **b)** Sección transversal del pala - **1)** aréolas y espinas; **2)** tejido no especializado para el acumulación de agua y otros nutrientes; **3)** medula y haces vasculares de la planta; **4)** epidermis; **5)** estructura de madera interior; **6)** ejes distribución según una trama romboidal de las aréolas. © Ludovica Rossi 2015



Fig. 11 Cactus columnar género Echinopsis formado por filas continuas de tubérculos que forman las costillas y de los cuales crecen las aréolas y espinas de la planta. Jardins de Mossèn Costa i Llobera, montaña del Montjuïc. © Ludovica Rossi 2011

Ezcurrawz, 2003), como en el caso de los cactus cilíndricos del cardón (Echinopsis) observados en Argentina. Análogamente se incluyen varias especies del subgénero Opuntia donde la disposición de los haces vasculares integran un cilindro reticulado y aplanado (Fig. 10b) de acuerdo con la forma del tallo (Bravo-Hollis, 1978).

Quedan excluidos de la investigación los cactus de las subfamilias Pereskia (una variedad de cactus tropical) y Maihuenia. Así como las especies con una estructura de haces vasculares verticales (Fig. 11d) correspondiente a las plantas que muestran una disposición de las aréolas exteriores puestas según una retícula ortogonal (Altesor y Ezcurrawz, 2003) y las plantas crasas con tallo no suculento o fotosintético.

1.2.1 El tallo y la corteza del cactus

El tallo identifica el cuerpo de las plantas y su principal función es la de sostén. En el caso de las plantas crasas el tallo es también un órgano fotosintético y su epidermis se ha convertido en un tejido persistente con una alta densidad de estomas [9]. Por lo cual estos tejidos deben funcionar durante años en lugar de solo unos pocos meses, como es el caso de las hojas caducifolias de corta vida (Mauseth, 1988/2004).

La superficie del tallo es comúnmente cubierta de tubérculos, o más exactamente de filas continuas de tubérculos, formando las que se denominan costillas (Fig. 11). Los tubérculos representan la sublimación de las ramas que en tiempos pasados tenía la planta. Cada tubérculo tiene una aréola desde la cual crecen las espinas.

En las cactáceas de tallo vascular y fotosintético, la corteza del tallo consta de tres regiones (Fig 12a): una corteza de epidermis fotosintética, clorofílica, más externa (a.1); una región no clorofílica en el centro (corteza central del nervio) (a.2); y una corteza interna no clorofílica (a.3) ubicada entre el anillo del tallo de los haces vasculares y las bases de las costillas o tubérculos (Mauseth, 2006).

En la parte central del cuerpo del cactus interior a los haces vasculares (Fig. 12c) se sitúa la médula de la planta (Fig 12b). La corteza entre el cilindro vascular central y las bases de las costillas o tubérculos es el sitio principal de almacenamiento de agua (Fig 12a). En los cactus columnares o globosos (casi la totalidad de las Cactoideae) este paquete cortical es una innovación clave que permite vascularizar la corteza y crecer a un grosor que no se encuentra en ninguna otra planta. En la subfamilia Opuntioideae [10] está ausente el paquete cortical:

los haces vasculares se encuentran muy cerca de la epidermis fotosintética y los tubérculos resultan casi planos.

Ningún otro grupo de plantas tiene una corteza tan gruesa. La corteza del cactus es capaz de ser tan gruesa porque el sistema de haces corticales [11] transfiere agua, minerales y nutrientes orgánicos en todo su volumen. La corteza se ha modificado para permitir ser fotosintética, para que se hinche y se contraiga sin desgarrarse, y para tener células de almacenamiento de agua que ceden el agua según las necesidades fisiológicas del organismo. El agua almacenada está presente como una reserva tridimensional con la corteza, la médula, los haces, etc., todos interconectados y a disposición de los vasos.

Se observa entonces que los cambios que ocurrieron en la corteza durante la evolución de los cactus implicaron más modificaciones que únicamente agregar más capacidad de almacenamiento de agua con un aumento de las células de parénquima [12]. Entre estas destaca la capacidad de cambiar el volumen sin cambiar el área de superficie, modificación que afecta directamente la morfología de la planta.

La expansión evolutiva de los tejidos de almacenamiento de agua en la corteza crea problemas para la epidermis de la planta. Los cactus producen nuevas células epidérmicas solo en las puntas de los tallos [13], además de las raíces o en el desarrollo de hojas y flores, por lo cual un cambio de volumen necesitaría agregación o reducción de tejido superficial. La morfología de la planta responde a esta necesidad por la

[9] Estoma: en botánica es la abertura microscópica en la epidermis de las partes verdes de los vegetales superiores que permite el intercambio de gases y líquidos con el exterior (fuente RAE).

[10] La Opuntia no tiene un tejido parenquimático muy espeso entre la epidermis y los haces vasculares, por otro lado muchos miembros tienen altas concentraciones de células de mucílago que ayuda a la planta a retener el agua (Mauseth, 2006).

[11] Sistema de haces corticales: la dinámica de transporte de agua y otras sustancia al interior de la corteza de la planta suculenta está resuelto por la producción de un extenso sistema de haces vasculares corticales que vascularizan por completo la corteza, mantienen el flujo tanto en sentido vertical como horizontal. Los haces corticales son muy semejantes a las venas de las hojas, aunque a diferencia de estas vascularizan el tejido perene que de hecho es muy longevo. (Mauseth, 2001, pp. 120)

[12] Células parenquimáticas: ver nota 8

[13] A diferencia de los animales, producen nuevas células epidérmicas en casi cualquier parte de su cuerpo a lo largo de su vida (Mauseth, 1988/2004).

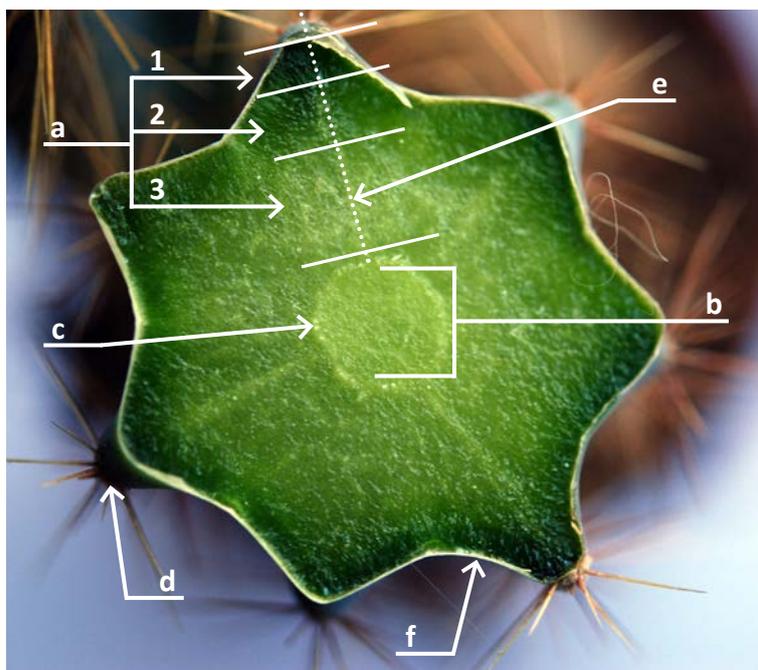


Fig. 12 Sección transversal de un cactus con tallo columnar: **a)** Corteza **1)** parte fotosintética más externa, **2)** corteza central no clorofílica, **3)** corteza interna no clorofílica; **b)** Médula de la planta; **c)** Cilindro de haces vasculares; **d)** Aréolas y espinas; **e)** Hazes vasculares de conexión entre el cilindro central y las aréolas; **f)** Epidermis. © Ludovica Rossi 2016

[14] Células parenquimáticas o de parénquima: ver nota 8

[15] Turgencia: Acción y efecto de hincharse. Calidad o cualidad de turgente. En biología, el fenómeno a favor del cual una célula o una parte orgánica viva se pone turgente. En medicina, el estado de distensión y congestión (fuente Wikipedia).



Fig. 13 Sección transversal de un cactus *Echinopsis pachanoi*, el esqueleto de madera sobresale del corte por el crecimiento de las haces vasculares mientras la planta cicatrizaba sus tejidos. La separación entre la corteza exterior compuesta por las costillas y la corteza interior en forma cilíndrica permite a los cactus las variaciones de volumen por almacenamiento y/o pérdida de agua sin variar su área de superficie y por consiguiente la cantidad de tejido y células que lo componen. © Ludovica Rossi 2015

Fig. 14 (Página siguiente) Desnudando un cactus *Echinopsis pachanoi*: la planta cultivada ha presentado problemas empezando un proceso de putrefacción interior, entonces se ha procedido a secar la planta. La limpieza posterior pone en relación las raíces con el esqueleto interior de madera (de sostén para la planta) mientras los restos de los tejidos de la corteza y la medula han sido removidos. Queda descubierta la estructura de haces vasculares en el interior del tallo columnar, donde los huecos más grande del tejido corresponden a las conexiones con las aréolas. © Ludovica Rossi 2015

superficie plisada compuesta por costillas (pliegues verticales solamente) o tubérculos (pliegues verticales y transversales). La separación entre la corteza exterior compuesta por las costillas en forma de estrella y la corteza interior en forma cilíndrica permite a los cactus una variación de volumen sin variar su área de superficie correspondientemente (Fig. 13). Cuando la planta pierde agua, durante periodos de sequía, la corteza interna se vuelve más delgada por deshidratación y reduce su cilindro. Cuando vuelven las lluvias y la planta absorbe agua, la corteza interna puede hincharse, volviéndose más gruesa y teniendo una circunferencia exterior más grande. Este aumento en la circunferencia exterior se acomoda mediante una expansión de la base de cada costilla: el volumen tanto de la corteza interna como de las costillas aumenta, mientras que el área superficial del tallo permanece sin cambios (Mauseth, 1988/2004).

Otros aspectos biológicos del cactus, derivados del aumento del ancho del tallo, incluyen modificaciones en el transporte del agua y el azúcar dentro de la misma corteza y en los tejidos mecánicos necesarios para soportar el mayor peso de los tallos debido a tener una corteza cada vez más ancha (Fig. 14). El sistema de haces vasculares se encuentra en el interior de la corteza con una reducción de la estructura resistente, una disminución de las fibras de xilema-floema y un aumento de las células parenquimáticas [14] pocas especializadas para la acumulación de agua. En muchos casos la fibra de madera se ha reducido y las plantas se sostienen también por el mecanismo de turgencia [15], no únicamente en la madera (Mauseth, 2006). La forma en la cual la planta se sostiene se presenta entonces como un sistema complejo que basa su relación entre los tejidos de madera de los haces vasculares y los equilibrios de presión interna por medio del intercambio de líquidos entre las células.

1.2.2 El tejido vascular y la madera del cactus

En los cactus se ha demostrado que hay un retraso en el desarrollo de los tejidos leñosos y el mantenimiento de las características juveniles en los tallos adultos (Altesor y Ezcurrawz, 2003): reducción de tejido de madera a favor de tejido parénquimático no especializado para la acumulación de agua. Este mecanismo evolutivo ha permitido el desarrollo de la succulencia, como se ha descrito en los párrafos anteriores.

Los tejidos parenquimáticos en la corteza de la planta ofrecen el intercambio de líquidos entre células para adaptar las necesidades de hidratación interna del organismo a las condiciones ambientales y así permitir a la planta vivir en condiciones de sequías. En paralelo la función fotosintética del tallo, que en las plantas no suculentas está desarrollada en las



[16] Dicotiledónea: ver nota 2

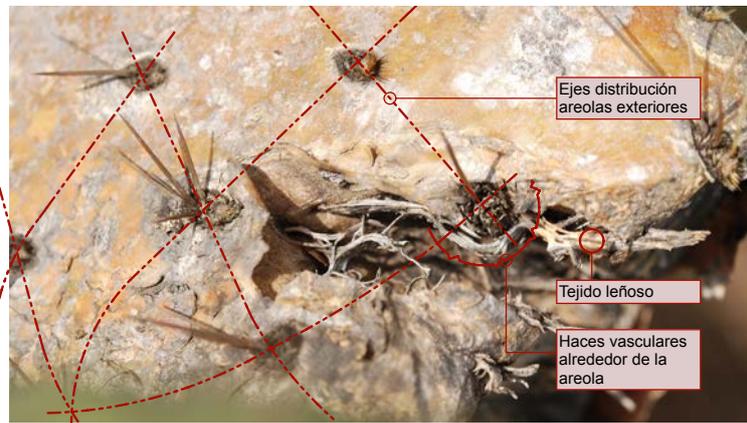
[17] Plántula: en botánica la planta joven, al poco tiempo de brotar desde la semilla (fuente RAE)

[18] Cambium vascular: en botánica, el cámbium es un tejido responsable del crecimiento vegetal específico de las plantas leñosas, situado entre la corteza y el leño. El cámbium vascular es un tejido de crecimiento lateral del tejido vascular de las plantas. Es el origen del xilema secundario (que crece hacia adentro) y del floema secundario (que crece hacia afuera), y se localiza entre estos tejidos en el tallo y la raíz. Algunos tipos de hojas también tienen cámbium vascular (fuente Wikipedia).

hojas y brotes verde, es unas de las mutaciones que permite reducir la transpiración y controlar la pérdida de agua de la planta.

Igualmente el transporte de líquidos y nutrientes en el desarrollo de la plantas crasas es similar a las otras plantas vasculares y su estructura no difiere de la mayoría de las dicotiledóneas [16], donde los brotes primarios y los haces vasculares, que recorren el tallo, desempeñan la función básica de conectar las hojas al resto de la planta. Por lo tanto, los haces vasculares unen las hojas a lo largo del tallo, y su distribución dentro del tallo está fuertemente relacionada con la disposición externa de las hojas, que en el casos de los cactus está asociada a la distribución de aréolas y espinas (Fig. 15). La morfología vascular básica de los cactus es similar a la de las plántulas [17] de dicotiledóneas no suculentas y los haces vasculares se extienden a lo largo del tallo que conecta las aréolas vecinas (Altesor y Ezcurrawz, 2003).

Fig. 15 Foto de un de cactus *Opuntia* realizada en los Jardins de Mossèn Costa i Llobera en el Montjuïc, donde es visible la relación entre las aréolas con sus espinas en el cuerpo exterior de la planta y la estructura de madera interna; por lo cual la distribución de las aréolas da información de la trama interior del tejido vascular de la planta. © Ludovica Rossi 2011



En las plántulas o brotes de las plantas se encuentra el sistema vascular con células que diferencian el interior en xilema primario (tejido conductor de agua) y el exterior en floema primario (tejido conductor de alimentos). Con el desarrollo de la planta se define el crecimiento secundario, donde de la adicción de capa de xilema y floema secundarios resulta el aumento del diámetro del tallo (Glimn-Lacy y Kaufman, 2006). En los árboles este crecimiento es evidente en el desarrollo del tronco y ramas con su corteza, sin función fotosintética. Los anillos de crecimiento del tronco dan información sobre las edades de los árboles. A diferencia de las hierbas, son un ejemplo básico de plantas que no producen un crecimiento secundario. Con la aparición del crecimiento secundario los haces vasculares desaparecen y las hojas (o las ramas que se han desarrollado a partir de los brotes axilares) se conectan a un tejido leñoso continuo. Los cactus, sin embargo, comúnmente retienen la disposición del haz de los tejidos vasculares durante la mayor parte de sus vidas (Altesor y Ezcurrawz, 2003).

Cabe aclarar que todos los cactus son plantas leñosas (Fig. 16), todos desarrollan un cambium vascular [18] que produce xilema secundario y floema secundario. Aunque muchos cactus tienen cuerpos parenquimatosos blandos, ninguno es verdaderamente una hierba (Fig. 17). Hay ejemplos de cactus enanos que producen una pequeña cantidad de madera delicada que se descompone rápidamente después de que el brote muere, pero igual tienen madera (Mauseth, 2006). Esta es la particularidad que se observa en los cactus y que permite estudiar la morfología de los haces vasculares de la planta como disparador de conceptos bio-inspirados.

La evolución de la succulencia del tallo implica la necesidad de soportar grandes masas de parénquima no especializado sostenidas mecánicamente por una cantidad limitada de haces vasculares organizados en una configuración biomecánica específica. Se puede formular la hipótesis de que la forma en

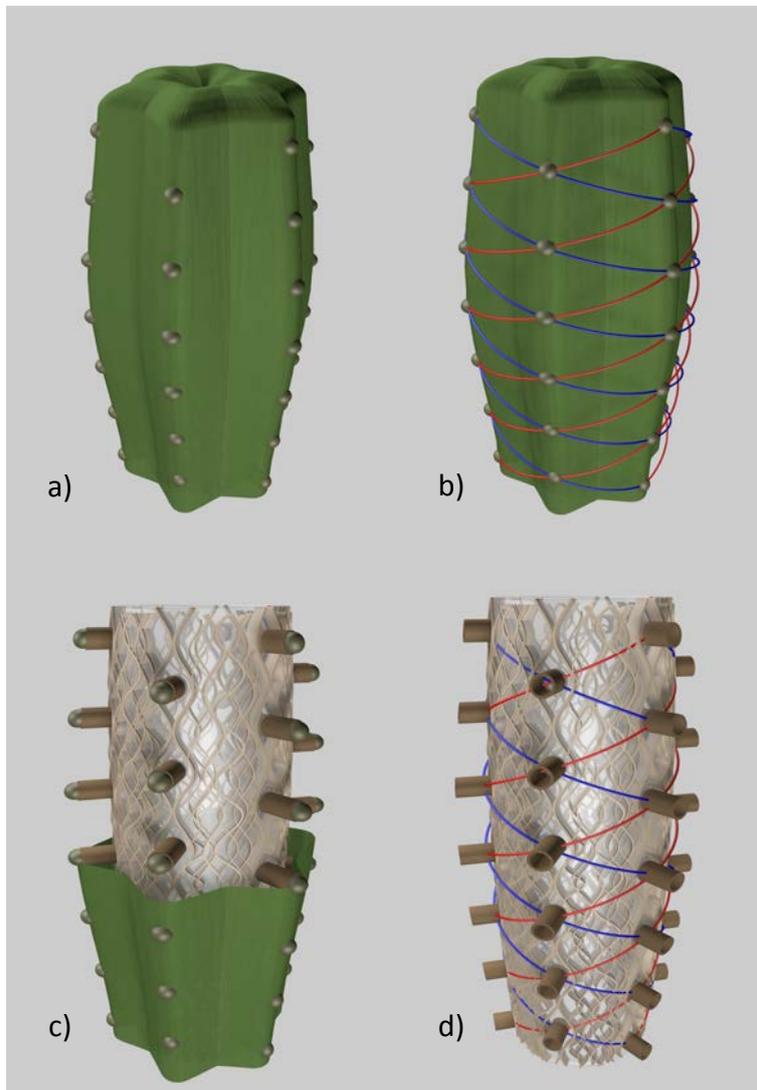
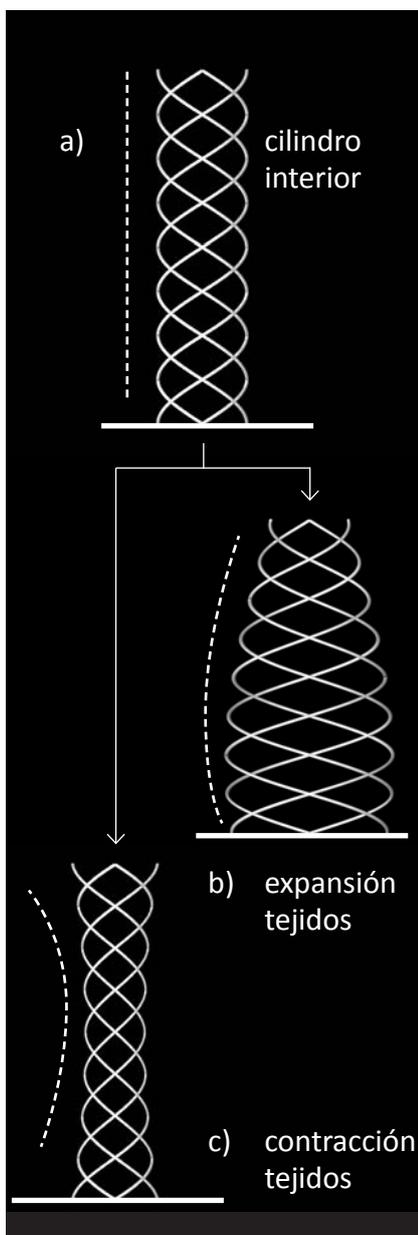


Fig. 16 Sección transversal de cactus cilíndrico (*Oreocereus Fossulatus*) donde es visible la estructura de madera interior y el sistema de interconexión entre los haces vasculares verticales y las aréolas en la parte exterior del cuerpo de la planta. Jardins de Mossèn Costa i Llobera, Montjuïc © Ludovica Rossi 2011

Fig. 17 Simulación 3D de un cactus columnar: **a)** Cuerpo exterior de la planta con la forma de estrella por las costillas e identificación de las aréolas; **b)** Ejes helicoidales en dos direcciones según colores que marcan la distribución exterior de las aréolas; **c)** Estructura de sostén interior e interconexión entre las areolas y los haces vasculares; **d)** La densidad del tejido reticulado de madera de sostén varía según los ejes helicoidales que definen el transporte de líquidos al interior de la planta y está interconectado con la distribución de las aréolas (hojas modificadas). © Ludovica Rossi 2016

Fig. 18 Simulación 3D, adaptación del tejido interior de sostén a las variaciones de líquidos almacenados en el cuerpo de la planta según las condiciones medioambientales: **a)** La configuración cilíndrica del esqueleto en los cactus columnares; **b)** Expansión del tejido para almacenamiento de agua y otros nutrientes en periodos de condiciones climáticas favorables; **c)** Contracción del tejido en condiciones de sequía y/o pérdida de agua por transpiración. @ Ludovica Rossi 2010



que las aréolas están dispuestas externamente puede reflejar cómo se distribuyen los tejidos de soporte dentro de la planta (Altesor y Ezcurrawz, 2003).

La distribución de los haces vasculares dentro del tallo se puede observar fácilmente en la estructuras secas, ya que la epidermis fotosintética externa y el parénquima succulento interno se pudren rápidamente una vez que la planta muere, y solo quedan los tejidos vasculares lignificados. Las muestras de madera observadas para este trabajo se concentran en ejemplos con los haces vasculares que se organizan en un conjunto de hélices de dos vías, y donde los haces leñosos de los esqueletos aparecen como un retículo.

La morfología de la estructura de madera interior se identifica desde el exterior según la disposición exterior de las aréolas. La relación está determinada por el patrón en espiral de las aréolas que se desplazan entre las costillas adyacentes siguiendo una retícula romboidal con variaciones en su grado de inclinación según la planta. En este caso los haces vasculares se disponen en una doble vía formando un conjunto de hélices (Altesor y Ezcurrawz, 2003). Esta característica se observa claramente en la forma columnar del género *Echinopsis* y está presente también en la familia de la *Opuntia*, aunque la forma cilíndrica de los haces vasculares resulta muy aplanada.

La estructura formada por haces vasculares entrecruzados ofrecen por lo menos dos ventajas importantes para la sobrevivencia del individuo.

- Es una configuración geométrica que permite el cambio de volumen de la planta para facilitar la acumulación de agua en los tejidos (Fig. 18). Trabaja de manera similar a una esponja al tratarse de un tejido vivo que soporta los esfuerzos, pero puede también extenderse. Es un material que está en la frontera entre los flexibles y rígidos. La retícula estructural de las cactáceas permite a la planta adaptarse (extenderse o encoger) según las necesidades vitales de la misma.
- La estructura vascular con patrón helicoidal ofrece ventajas para el crecimiento de la planta (Fig. 19). Todos los organismos tienen que crecer desde un tamaño inicial pequeño hasta otro tamaño mayor, sin pérdida de funcionalidad. La estructura reticulada del cactus permite a la planta crecer tanto en la dirección vertical como en horizontal aumentando así su sección transversal, de esta forma no se reducen las limitaciones mecánicas debidas al tamaño.

Si bien es cierto que la función de sostén de la planta no es realizada únicamente por los tejidos estructurales, todos los cactus altos o con tallos delgados dependen de la madera fuerte al igual que cualquier planta leñosa no suculenta. Tienen una madera fibrosa dura similar a la que se encuentra en la mayoría de los árboles de dicotiledóneas [19]. El grosor de la pared y la dureza varían de taxón [20] a taxón (Mauseth, 2006).

Cabe destacar que algunos tipos de cactus se caracterizan por tener una madera dimórfica [21], que experimenta un cambio de fase en el tiempo. Las plantas producen un tipo de madera cuando son jóvenes y un segundo tipo cuando envejecen (Stevenson y Mauseth, 2004).

En la primera fase la planta produce una madera WTB - traqueidas de banda ancha - [22] que carece de fibra y permite que la madera se contraiga durante la sequía y, viceversa, expandirse para favorecer el acumulación de líquidos en el interior. Según va creciendo el organismo la presión de turgencia puede no ser suficiente, y fisiológicamente se produce el cambio de fase a madera fibrosa garantizando el sostén de la planta.

La madera fibrosa tiene poca capacidad para almacenar agua dentro de sí misma y no está particularmente adaptada a los hábitats secos (siendo menos elástica). Sin embargo, la madera fibrosa está presente en todos los brotes largos y delgados que requieren rigidez mecánica (cactus erguidos verticales y especies colgantes), y tales cactus se producen en muchos hábitats, desde los desiertos costeros severamente xerófilos de Chile y Perú hasta los bosques lluviosos (Mauseth, 2006).

Estudios realizados sobre diferentes tipos de cactus muestran que el cambio de fase puede ser tardío, en el que la primera fase dura años. Este no se asocia únicamente al organismo entre la fase joven o adulta, sino que el desarrollo de la transición entre los tipos de madera puede verse afectado por el medio ambiente. Hay indicaciones sólidas de que las condiciones ambientales desencadenan respuestas morfogénicas adaptativas específicas (Stevenson y Mauseth, 2004). Dependiendo de las condiciones climáticas de sequía o abundancia de agua, la planta modifica el cambio de fase en la producción de la madera (de una más elástica con mayor capacidad de acumulación de líquidos a una con fibras más rígida y resistente) favoreciendo la adaptación al medio; siempre y cuando se mantenga la integridad estructural. Cuando la arquitectura hidráulica de la planta no es suficiente como soporte existe la hipótesis que se desencadena el cambio de fase relacionado con el estrés del peso (Stevenson y Mauseth, 2004).

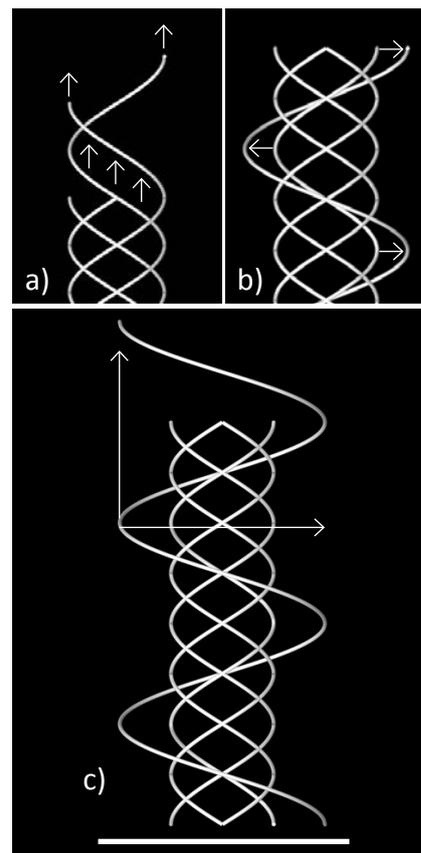


Fig. 19 Esquema del crecimiento de las haces vasculares en cactus columnar con patrón helicoidal del tejido: **a)** Crecimiento vertical; **b)** Horizontal; **c)** Combinación de las dos direcciones de crecimiento. ©Ludovica Rossi 2010

[19] Dicotiledónea: ver nota 2

[20] Taxón: cada división que se establece en la clasificación de los seres vivos (fuente BioDic - Diccionario de Biología).

[21] Madera dimórfica: indica la propiedad de un cambio de fase de la madera. A diferencia de la mayoría de las plantas (entre las cuales algunos cactus globosos) producen solo un tipo de madera en cualquier brote, la madera es en este caso definida monomórfica (Mauseth, 1998÷2003).

[22] WTB traqueidas de banda ancha: es un tipo de células de madera tan elástica que permite la reducción del volumen del tejido para coincidir con la variación del agua almacenada, a medida que en las épocas de sequías disminuye el volumen de agua en la madera interior de la planta. Este mecanismo permite que la célula no pueda cavitarse (Mauseth, 1998/2004).



Fig. 20 Fotografía macro de una hoja de agrifolio, sendero Barra del Ferro en L'Esquirol (Vic). © Ludovica Rossi 2010

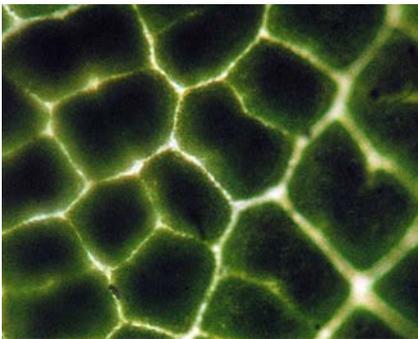


Fig. 21 Fotografía macro con fuente de ampliación óptica de una hoja de salvia en contraluz. Este tipo de hoja es bastante gruesa con una superficie rugosa, se distingue la trama entre las conexiones vasculares claras y el tejido clorofílico verde. © Ludovica Rossi 2010



Fig. 22 Fotografía macro con fuente de ampliación óptica de una hoja seca, donde se distingue la trama del tejido leñoso de interconexión. © Ludovica Rossi 2013

1.3 BIO-INSPIRACIÓN DE LAS PLANTAS

En todos los tiempos, la arquitectura ha estado íntimamente interrelacionada con el mundo de las plantas. Hasta el día de hoy, las plantas entregan material para la construcción, y la eficacia de los materiales naturales en términos de comportamiento estructural no se cuestiona. Existen analogías normalmente reconocidas entre los requisitos que deben cumplir las plantas y los edificios (Gruber, 2009).

El aspecto que más comúnmente hace relacionar el reino de las plantas con la arquitectura es que, como regla general, las plantas como los edificios no se mueven. Si bien esta consideración no es precisa, es verdad que las plantas como los edificios no se desplazan y su inmutabilidad implica la necesidad de adaptarse a las condiciones medioambientales en las cuales se encuentran.

En la antigüedad el principal interés sobre las plantas ha estado limitado a su uso como materia prima (para la alimentación, la construcción, los medicamentos, etc.). Hará falta esperar el siglo XVI para encontrar los primeros estudios sobre la comprensión de las plantas en términos tanto de estructura como de función. En la segunda mitad del 1600 Robert Hooke basa en el estudio de las plantas la primera hipótesis de la naturaleza de las células de los organismos vivos (Fig. 21). Y hay que llegar al final del siglo XIX para ver las plantas y los animales como organismos similares (Mancuso, 2006). En 1867, el botánico Federico Delpino definió la biología vegetal, no en el amplio sentido general de la ciencia de los seres vivos, sino como una rama de las ciencias naturales dedicada al estudio de la vida vegetal en relación con el medio ambiente. En su visión, las plantas son organismos inteligentes e intencionados, y en sus estudios utiliza un enfoque de inspiración biológica, para describir las soluciones técnicas observadas (Mancuso, 2010). Las plantas han desarrollado estrategias directas o indirectas en el intento de defenderse de sus depredadores, así como mecanismos de seducción para la polinización y propagación de semillas.

A partir de la década de 1990, el análisis de ADN ha transformado el conocimiento y la clasificación de los organismos permitiendo acomunarlos por sus características genéticas. El análisis filogenético de los organismos conocidos permite el estudio de los genes considerados como la unidad básica del almacenamiento de información genética. Algunos de los beneficios de tener tal información incluyen poder determinar el número de genes en un genoma dado, lo cual significa identificar el conjunto de genes implicados en un proceso específico y las funciones celulares y bioquímicas de dichos genes. Esto toma interés en el mundo

vegetal también por el hallazgo de que los genomas vegetales contienen más genes que los genomas de especies no vegetales, ya que a excepción de algunas plantas son organismos autótrofos [23] y tienen que sintetizar muchos compuestos que otros organismos adquieren a través de su comida (Pichersky y Gerats, 2011). Esto se puede entender ya que las plantas revisten un rol de mediadores entre el sol y el mundo animal. Por medio de sus orgánulos [24] celulares más conocidos, los cloroplastos [25] representan la unión de la actividad de todo el mundo orgánico, todo aquello que llamamos vida. Los animales usan la energía producida por las plantas. Estas a su vez utilizan la energía del sol para satisfacer sus necesidades. Se llega así a una más general condición de la vida y a la comprensión de su rol en la biosfera. En este sentido es posible entender una función universal de la planta. El valor de las secuencias del genoma va más allá de ayudar a asignar una función específica a un gen específico. El objetivo final es comprender mecánicamente cómo se produce cada faceta del ciclo de vida de la planta como consecuencia de la interacción entre la información contenida en el genoma y las señales del entorno en el que se encuentra la planta (Fig. 22). De hecho, una de las mayores preguntas holísticas es cómo puede surgir una amplia gama de especies [26] morfológicas y ecológicamente distintas a partir de un conjunto similar de genes/proteínas (Pichersky y Gerats, 2011).

Los avances tecnológicos inciden en el curso de la historia sobre el conocimiento e interpretación del mundo que nos rodea. Los arquetipos históricos donde la columna se convierte en la metáfora (Fig. 23) y la réplica abstracta del árbol se modifica e integra con la observación de los movimientos de las plantas. Estas no son más vistas como organismos inmóviles y su mecánica suave abre el estudio de los principios de movimientos flexibles (Fig. 20) que pueden transferirse, ampliarse e integrarse con éxito en dispositivos mecánicos bio-inspirados más ligeros y menos complejos (Schleicher et al., 2014).

Por lo general, las respuestas más evolucionadas y robustas pueden encontrarse en organismos que se desarrollaron bajo alta presión selectiva. Los sistemas de actuación de las plantas (sus movimientos) suelen estar optimizados evolutivamente para realizar un solo tipo de movimiento, a diferencia de la locomoción animal, que suele estar diseñada para una variedad de movimientos complejos. Además, las estructuras de las plantas mayormente sésiles [27] se adaptan a menudo para condiciones de contorno similares, tales como las que afectan al diseño de las estructuras arquitectónicas (Lienhard et al., 2014).

Con sus innumerables principios de movimiento, las plantas pueden ser una fuente de inspiración prometedora. Dado



Fig. 23 Planta de *Opuntia podada* para tener la morfología arbórea (no arbustiva) con en el fondo uno de los templos griegos en la Valle dei Templi de Agrigento, Sicilia. © Ludovica Rossi 2011

[23] Autótrofo: organismo que elabora su propia materia orgánica a partir de sustancias inorgánicas de las que se nutre (fuente RAE).

[24] Orgánulo: Unidad estructural y funcional de una célula u organismo unicelular (fuente BioDic - Diccionario de Biología).

[25] Cloroplasto: es una célula con pigmento de color verde que realiza la síntesis de los hidratos de carbono. Los cloroplastos tienen una organización compleja, y se ocupan del proceso de la fotosíntesis convirtiendo materia inorgánica en materia orgánica gracias a la energía que aporta la luz (fuentes Wikipedia y BioDic - Diccionario de Biología).

[26] Se destaca que más del 99% de la biomasa del planeta es vegetal.

[27] Sésil: en biología dicho de un órgano o de un organismo sujeto al sustrato (fuente RAE).

Fig. 26 (Página siguiente) Diferentes fotos de cortezas de árboles comunes en clima mediterráneo: **a)** Pino; **b)** Plátano; **c)** Olivo; **d)** Fresno; **e)** Abedul; **f)** Eucalipto. Fotos de cortezas de plantas suculentas: **g)** Cactácea *opuntia tomentosa*; **h)** Cactácea *cereus hildmannianus*; **i)** *Euphorbia candelabrum*. Esta última planta no pertenece a los cactus. Es originaria de Africa y muestra una convergencia evolutiva con las plantas crasas por sus similitudes fisiológicas (este organismo no es parte del estudio del tejido del cactus). © Ludovica Rossi 2011-2017

que las plantas tienen poca diversidad en los materiales de construcción (por ejemplo, celulosa, hemicelulosa, pectina, lignina), la adaptación mecánica se basa principalmente en variaciones de forma y estructura en diferentes niveles jerárquicos. La flexibilidad global a menudo se logra a través del comportamiento versátil de regiones localmente diferenciadas con características morfológicas especiales que permiten grandes deformaciones elásticas (Schleicher et al., 2014).

Estos comportamientos se observan también en la estructura de sostén de los cactus de tallo suculento. El principio de movimiento de esta estructura biológica se basa en la flexibilidad de sus miembros (tejidos) y no en la unión de elementos rígidos con bisagras. Los movimientos se pueden accionar hidráulicamente mediante un desplazamiento de agua entre los tejidos (dependiendo de las épocas de sequía) y mediante la implementación de inestabilidades elásticas por flexibilidad y pandeo. Estos mecanismos permiten a las cactáceas adaptarse a las condiciones medioambientales y responder a las necesidades de crecimiento del organismo.

1.3.1 Crecimiento

El caso de la chumbera o tuna (*Opuntia*) en forma de arbórea, observada en el jardín botánico de Catania y otros lugares, pone en evidencia el cambio morfológico que la planta experimenta, en la transición de la forma arbustiva a la arborescente (Fig. 25). Esta es una modificación propia de las cactáceas (Fig. 26)

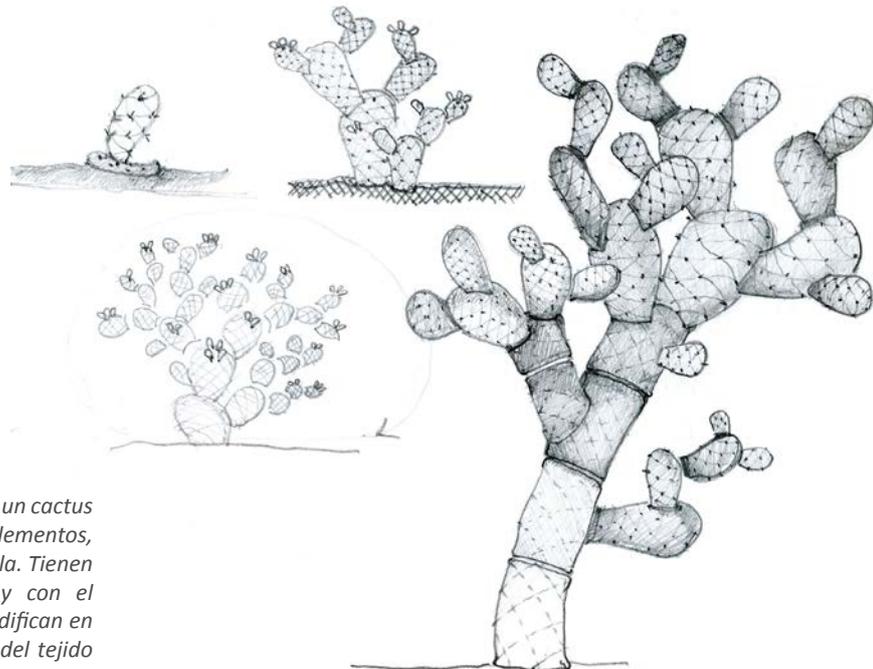


Fig. 25 Croquis del crecimiento de un cactus *Opuntia* por agregación de elementos, cada uno es equivalente a una pala. Tienen una forma ovalada aplanada y con el crecimiento del organismo se modifican en la forma cilíndrica por aumento del tejido leñoso interno. © Ludovica Rossi 2015





Fig. 26 Sección transversal de una pala circular de *Opuntia* donde es visible la agregación de tejidos resistentes en anillos concéntricos, Jardins de Mossèn Costa i Llobera, Montjuïc. © Ludovica Rossi 2011



Fig. 27 Sección transversal de un cactus columnar, género *Echinopsis*, que muestra la estructura de sostén interior en madera similar a la sección de una corteza de un árbol, Jardins de Mossèn Costa i Llobera, Montjuïc. © Ludovica Rossi 2011

en general que tienen un cambio de fase en la madera que empieza a producir tejido fibroso con el crecimiento, aunque no sea evidente un cambio morfológico externo. Este cambio dependerá de la edad del individuo según las necesidades fisiológicas y las condiciones ambientales al cual ha sido expuesto durante su crecimiento.

El crecimiento es posible gracias a la actividad metabólica y la transformación de la energía y la materia en nuevo tejido orgánico. Sentir y reaccionar son trabajos necesarios, de la misma manera que el comportamiento adaptativo, para determinar y orientar la acción de crecimiento. El crecimiento es la base para el ciclo de la vida, desde la célula individual hasta la evolución de organismos complejos e incluso ecosistemas. Este se manifiesta como un aumento gradual del tamaño físico y se considera como un proceso de auto-organización controlada genéticamente (Gruber, 2016).

Al observar la estructura de la pala de la chumbera se aprecia una sobreposición de tejidos de madera fibrosa en anillos concéntricos (Fig. 26) a lo largo del crecimiento del organismo. Esto sucede también en la mayoría de los cactus columnares (menos probables en los cactus globosos) aunque es menos evidente ya que, por lo general, no hay una modificación morfológica exterior (Fig. 27). En ambos casos la estructura de los haces vasculares internos está construida por superposición de tejidos de forma análoga al crecimiento del tronco de un árbol que agrega tejidos y del cual podemos determinar las fases de su crecimiento por el diseño de sus anillos.

Las plantas son organismos de crecimiento continuo, que a diferencia de los animales forman tejidos celulares durante toda su vida (esto no significa que no tengan un ciclo de vida definido como los otros organismos), y en el caso de las cactáceas se puede observar un característico cambio morfológico en el tiempo. Esto muestra una interesante capacidad de adaptación de la planta a nivel fisiológico: los tejidos vegetales fibrosos crecen y modifican su agregación para responder a nuevas necesidades estructurales de soporte del individuo.

1.3.2 Auto-organización

La auto-organización es un concepto central que tiende un puente sobre la brecha entre la naturaleza viviente y la no viviente. Todos los procesos biológicos se basan en procesos básicos de auto-organización física. Los sistemas auto-organizados son capaces de desarrollarse espontáneamente y mantener el orden sin ningún control externo, donde la estabilidad y el cambio de los sistemas auto-organizados dependen de mecanismos de

retroalimentación (Gruber, 2016).

Se evalúa la estructura de sostén de las cactáceas como un sistema auto-organizado por su capacidad de adaptarse a las condiciones ambientales (Fig. 28), una propiedad sin la cual la planta no podría sobrevivir. Esta es un conjunto de unidades, auto-organizadas en varios niveles de jerarquía, que interaccionan entre sí de manera no-lineal mediante un cierto número de reglas, de manera que los cambios en alguna parte del sistema se propagan a otras partes del mismo. El sistema en su globalidad exhibe un comportamiento y unas propiedades emergentes, que no pueden deducirse por el análisis de las unidades que lo componen (Álvarez Ríos, 2007). El tejido de madera fibrosa de los cactus de tallo suculento muestran el comportamiento emergente por mantener fija las relaciones topológicas entre los elementos mientras que la definición morfológica general es variable (Fig. 29) (Schleicher et al., 2014).

Además según los estudios de Mauseth se podría aventurar la hipótesis que la estructura de la planta, y específicamente el cambio de fase que experimenta la madera, se puede asociar a un comportamiento estigmético. El cambio de una madera no fibrosa a una fibrosa parece estar asociado no únicamente a factores propios del organismo como la edad, sino también una respuesta medioambiental. La estigmargia es un mecanismo de control indirecto de un sistema a través de información derivada del entorno. Es un tipo especial de auto-organización (Gruber, 2016), aunque comúnmente está asociada a las colonias de hormigas, donde los diferentes individuos colaboran a través de pautas o hitos dejados en el medio. Sin embargo la hipótesis de atribuir esta propiedad al tejido de las plantas crasas, con tallo suculento, al parecer sería algo arriesgada, debiéndose comparar los avances en el estudio de la madera dimórfica de la Cactácea.



Fig. 28 Fotografía macro con fuelle de ampliación óptico de la estructura seca de una *Opuntia* donde es visible el tejido celular entre los haces vasculares de madera. Se pone en evidencia cómo un organismo es un sistema complejo con diferentes niveles jerárquicos. © Ludovica Rossi 2011



Fig. 29 Cactus del género *Opuntia* donde se observa la capacidad de modificación de la planta para seguir creciendo más allá de una red metálica. La planta crece dentro los espacios disponibles de la valla, doblando y girando sus tejidos. Vilassar de Mar © Ludovica Rossi 2015

1.4 LAS GEOMETRÍAS DEL TEJIDO DEL CACTUS

La percepción del espacio está sujeta a diferentes niveles de observación y atención. Si bien las funciones de varios elementos se repiten en diferentes espacios, la construcción adquiere múltiples configuraciones. Una viga es un elemento constructivo conocido que forma parte de una estructura trilita, en origen simple. Con formas geométricas más complejas (a igualdad de material) encontramos múltiples desarrollos tecnológicos que por lo general tienen el objetivo de mejorar las prestaciones del elemento viga (por ej. soportar una luz mayor con un menor uso de material). A su vez, también el material que la conforma define sus características y comportamientos.

Cuando se observa una viga de madera nos detenemos en el proceso de producción: si mantiene la forma del tronco con los nudos visibles se definiría como una viga de estética rústica. También se puede mirar el tipo de sección, el tratamiento que tiene, si es de madera laminar, etc. En la mayoría de los casos el material es en apariencia homogéneo, mientras la madera del cactus aparece como discontinua (Fig. 30). El tejido estructural de la planta desarrolla una morfología no homogénea visible cuando la planta ha perdido sus funciones vitales. *“Los cactus son como esponjas gigantes, sus tejidos internos están saturados con hasta 90% de agua. Cuando se derriban, se convierten en una sopa orgánica húmeda que rebosa vida, e inmediatamente después de la muerte todo se mueve, por la acción de insectos, gusanos y todo tipo de microorganismos”* (Fischer, 2013, 32). En el proceso natural de secado, la planta pierde los líquidos retenidos, los tejidos no estructurales se descomponen y queda visible el tejido de madera en su aspecto rígido y no continuo.

La observación del material está ligada a la noción de escala y dependiendo de la distancia de observación, la percepción de su estructura es diferente. La composición anisótropa del tejido de madera del tronco de un árbol es visible a una escala microscópica, mientras en el tejido de la madera del cactus la discontinuidad es visible a una escala macroscópica (sin la ayuda del microscopio).

Aunque con ciertas variaciones, en las cactáceas el sistema morfológico de la estructura es sustancialmente uno y depende de la agregación de los tejidos de madera fibrosa. Estos desempeñan diferentes funciones vitales y responden a los estímulos del ambiente externo para permitir a la planta crecer (o sea vivir). La geometría general varía dependiendo del género de la planta: si es columnar-arbóreo como el cardón (Echinopsis) será cilíndrica y ramificada (Fig. 31); mientras en el caso de la chumbera (Opuntia) será plana por agregación de palas en la

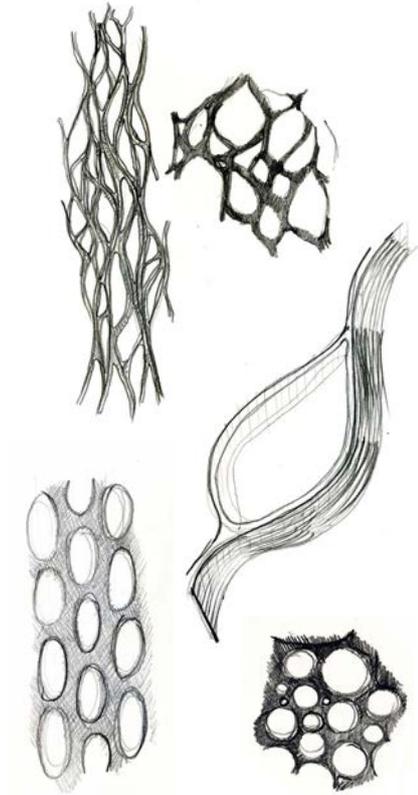


Fig. 30 Croquis de estudio, sobre el tejido de madera de las cactáceas, que investiga la relación entre los llenos y vacíos de la trama. © Ludovica Rossi 2013



Fig. 31 Fotografía macro del tejido de madera de una planta Echinopsis. El retículo está compuesto por fibras yuxtapuestas; diámetro exterior cilindro 20 mm, espesor tejido 2 mm. © Ludovica Rossi 2015

forma arbustiva (Fig. 32). En una escala de visión más próxima, la geometría de las estructuras de los dos géneros de cactus tienen semejanza en el patrón ondulado de las fibras de madera. La distribución de los vacíos está ligada a la posición de las aréolas externas y a los tejidos no especializados para la acumulación de líquidos internos (como tratado en los párrafos 1.2).

Para comprender los mecanismos implícitos del organismo es necesario observarlo cuando sus funciones vitales son activas: cómo se infla por la acumulación de agua en sus tejidos parénquimáticos o, por lo contrario, cómo pierde volumen en los momentos de sequía; cómo crece siguiendo la exposición del sol que incide en el desarrollo de los ejes helicoidales y las aréolas, etc. Entonces cuando la planta está seca se observa una configuración estática de la madera, mientras que, cuando la planta está viva, el material es elástico y se adapta a diversas situaciones ambientales. Para asociar la observación de la planta viva a la del tejido de madera seca, la construcción de los modelos físicos hace evidente las relaciones dinámicas de crecimiento y adaptación del tejido. Es posible entonces deducir el comportamiento del tejido vivo, aunque esto no es visible porque la estructura es interna a la planta.

La disposición de los haces liberoleñosos, con sus elementos mecánicos, varía y a veces es bastante compleja según la planta (Bravo-Hollis, 1978). El sistema de sostén responde al binomio forma-función donde la propiedad de la forma tiene el valor añadido de la función que se da por haber superado algún tipo de selección. Detrás de la forma está entonces la estructura de un sistema entendido como un conjunto de unidades auto-organizadas. Este es un sistema complejo que se encuentra y se mantiene fuera de equilibrio como consecuencia de la entrada de información, energía o materia desde su entorno inmediato. El sistema absorbe y procesa esta información, acomodándose a los cambios impuestos por la misma (Álvarez Ríos, 2007).

La estructura interna del cactus se describe como la agregación del tejido de madera fibrosa (xilema y floema) que creciendo toma un patrón de ondas y genera una trama discontinua. La forma de la onda pone de manifiesto la idea más simple para mover un objeto material en el seno de un fluido (Fig. 33). La movilidad es una función de la materia viva para mantener o ganar independencia con respecto al medio (Álvarez Ríos, 2007). En cambio la discontinuidad de la secuencia con llenos y vacíos sigue un patrón que recuerda las celdas hexagonales de las colmenas. En la madera seca del cactus los vacíos pavimentan la superficie (Fig. 34) y, aunque de forma no tan regular y homogénea como la geometría hexagonal de la producción de los insectos, no hacen perder espacio y ahorran material



Fig. 32 Tejido seco de una pala de *Opuntia* en su entorno natural: el tejido de madera varía su densidad en la trama discontinua. Formentera © Ludovica Rossi 2011

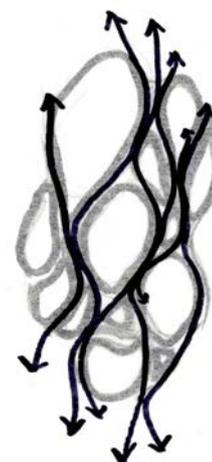


Fig. 33 Croquis de la relación entre el flujo de líquidos en los haces vasculares y los vacíos que conforman la trama del tejido. © Ludovica Rossi 2013

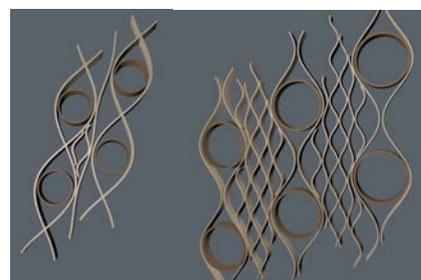


Fig. 34 Simulación 3D de la organización de los vacíos que pavimentan la superficie, siguiendo la distribución romboidal de las aréolas externas. © Ludovica Rossi 2016

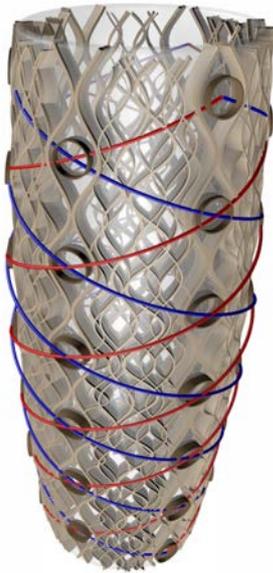


Fig. 35 Simulación 3D del tejido de un cactus columnar compuesto por agregación de fibras onduladas junto al patrón helicoidal para la interconexión de las haces vasculares en relación a la distribución de las areolas. © Ludovica Rossi 2016



Fig. 36 Fotografías macro con fuente de ampliación óptica de una pala de Opuntia seca. © Ludovica Rossi 2011

(Wagensberg, 2005). En su conjunto los haces vasculares siguen un patrón helicoidal (Fig. 35), que da solidez al sistema y permite la comunicación del tejido en todas sus partes.

Se identifican tres diferentes formas geométricas en el tejido de sostén del cactus que responden a diferentes funciones morfológicas:

- la onda para el transporte de los fluidos,
- la pavimentación según los vacíos para un uso eficiente del material,
- las hélices para unificar el sistema

La respuesta fisiológica del organismo depende de las dinámicas ambientales y esta se refleja en la capacidad de adaptación según el crecimiento la planta. Las dinámicas de adaptabilidad y crecimiento se han abstraído interpolando la observación de diferentes cactus en sus ambientes naturales con las informaciones teóricas sobre las células vegetales y la fisiología de las plantas crasas. Estos dos mecanismos son dinámicos y están sujetos al parámetro tiempo. La planta crece por agregación celular. Los tejidos vivos son simplificables como una suma de las células que los componen, y estos, a su vez, están agregados entre ellos para cumplir determinadas funciones fisiológicas. Los tejidos leñosos son la estructura resistente de la planta. Si bien no es posible conocer el recorrido exacto de crecimiento de un tejido (porque este se observa en una fase determinada de la vida del organismo) es posible observar las plantas en diversos ambientes y fases de desarrollo. Esta observación, temporal y espacial, permite individuar las dinámicas de adaptabilidad de la planta independientemente de la secuencia de crecimiento del tejido de madera de un individuo específico.

El esquema interpretativo valora la fibra de madera como continua. Esta es rígida cuando el tejido orgánico se ha secado, y se considera elástica cuando la planta desarrolla sus funciones vitales. De forma independiente de la secuencia de crecimiento y de agregación de las células en el tejido, cuando tenemos entre las manos la madera seca del cactus, éste tenderá a romperse y separarse entre las líneas sinusoidales que conforman las olas. El estudio sistemático de las relaciones funcionales-morfológicas tiene el objetivo de individuar los principios mecánicos básicos (Speck y Speck, 2008). La forma curvada de las fibras, que corresponde a la geometría de las olas y/o a una trayectoria sinusoidal, pone a prueba la funcionalidad de un mecanismo para separar progresivamente todos los elementos que parecen no estar relacionados con el mecanismo, abriendo la puerta para su uso creativo (Lienhard at all, 2014).

1.5 EL MODELO INTERPRETATIVO

Los mecanismos descritos en los párrafos anteriores no son exclusivos de las cactáceas, la ventaja que ofrecen estas plantas es por su modificación evolutiva en suculenta. El tallo mantiene por más tiempo las características del brote de las plantas dicotiledóneas y la fibra de la madera se desarrolla en muchos casos años después del crecimiento de la planta. Entonces se observan los cambios morfológicos con un organismo de mayor tamaño que una plántula. Esto ofrece una ventaja en la observación de los cactus que permiten recabar información sobre la planta a partir de la escala 1:1, equivalente a lo que puede ver el ojo “desnudo”. El tamaño de la planta favorece un análisis a escala real en diferentes circunstancias naturales, poniendo en evidencia la respuesta del organismo a los agentes ambientales (exposición al viento, radiación solar, sequía, etc.).

Para obtener mayores informaciones sobre los mecanismos fisiológicos del organismo se ha trabajado a una escala de observación inferior, comparando lo que se mira con el estudio bibliográfico de ámbitos científicos como la biología vegetal. El uso de la fotografía macro (con o sin fuelle de expansión) ha permitido un nivel de aproximación ulterior a la escala real y visualizar con mejor detalle el tejido de madera del cactus (Fig. 36). Por las características de la investigación y el interés generado por la estructura seca de la planta, este trabajo no explora una visión de la madera del cactus por microscopio evaluando idónea la información bibliográfica obtenida (Esquema 1.1).

La observación de un organismo es el punto de partida para la comprensión del mecanismo fisiológico, y para alcanzar su aplicación es necesario desarrollar una interpretación o conceptualización. Esta depende de varios factores no necesariamente mesurables. El tejido del cactus se hubiera podido evaluar por la secuencia de llenos y vacíos e interpretar la estructura de madera como una superficie continua. Un ejemplo material de esta interpretación es la reproducción del tejido por secciones circulares de diferentes diámetros

Esquema 1.1 El organismo es un sistema complejo con múltiples niveles jerárquicos. El trabajo se centra en el comportamiento del tejido de sostén en madera de la planta viva. Este está interconectado a escalas mayores e inferiores, desde la escala ecosistémica hasta las relaciones bio-químicas que definen el funcionamiento y la fisiología del organismo a escala atómica.
© Ludovica Rossi 2018

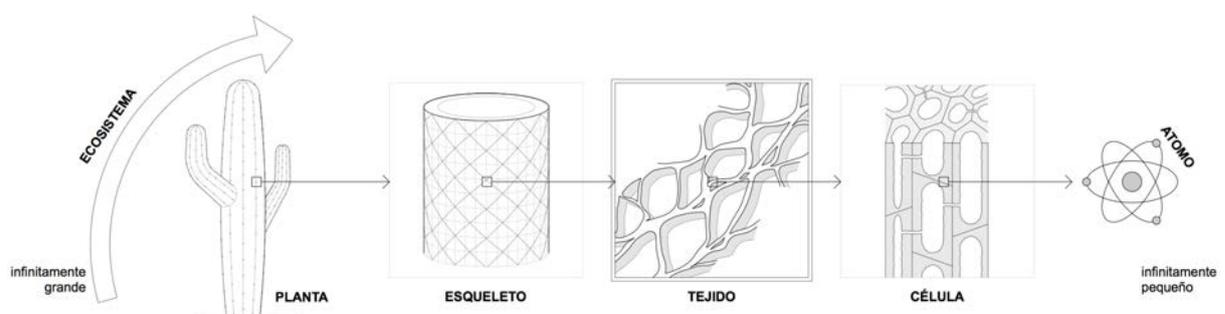




Fig. 37 Stand de la ONG Arquitectos Sin Fronteras España realizado por el Construmat 2011 y construido en tubos de cartón reciclados. En total se utilizaron alrededor de unos 1.150 tubos con un diámetro variable entre un mínimo de 2,5 cm hasta un máximo de 24 cm por un largo de 25 cm. El resultado es una pared permeable a la vista y de forma orgánica. Barcelona © Ludovica Rossi 2011



Fig. 38 Una avispa al inicio de la construcción de un nido. Es visible la estructura a celdas hexagonales donde se realizará la cría de los insectos. © Ludovica Rossi 2011

conectadas entre ellas. Como en el caso del stand realizado para la ONG Arquitectos Sin Fronteras de Catalunya en el ámbito del Construmat 2011 de Barcelona formado por tramos en tubos de cartón reutilizados (Fig. 37). Esta interpretación hubiera llevado a diferentes posibilidades morfológicas. Se obtienen una cierta similitud por la distribución alternada de los vacíos y recuerda las estructuras alveolares (Fig. 38), eficientes por obtener resistencia con una reducción de material.

El tejido en la forma estática ha sido interpretado como homogéneo, compuesto por células leñosas y ha sido definido por la geometría de la franja. Esta última deviene entonces la escala de representación del organismo en los experimentos desarrollados. Mientras a una escala inferior, por ejemplo, se podría observar la estructura celular, y a una escala mayor el sistema de ramificación de la planta. A la escala de análisis definida en este estudio, el tejido de madera del cactus es interpretado como un material continuo que crece linealmente y sus variaciones dependen de las condiciones ambientales externas en las cuales ha vivido la planta. El material está conformado por franjas curvilíneas que se entretajan entre ellas y se funden en una única estructura leñosa. La estructura muerta es rígida y ha perdido su flexibilidad, pero cuando la planta está viva la estructura funciona en su conjunto como una esponja adaptándose a las variaciones de presión para la conducción y transporte de los líquidos internos y de los nutrientes almacenados.

En este marco, las interpretaciones realizadas han llevado a definir la estructura del cactus como una suma de elementos lineares (Fig. 39). Esto está motivado por el hecho que:

- La planta se desarrolla en la misma dirección del crecimiento de las fibras de madera
- Se expande por sumatoria aumentando el número de franjas en el tejido y agregando tejidos compuestos por franjas.

Estos factores han determinado la interpretación del tejido del cactus en un modelo compuesto por agregación de elementos lineares en comparación a, por ejemplo, un tejido homogéneo con llenos y vacíos entre las varias conceptualizaciones posibles. La morfología se define a partir de la agrupación de franjas unidas entre ellas de forma más o menos regulares. Esta interpretación tiene origen en la construcción de diversos modelos físicos que, por aproximación, han permitido identificar la morfología orgánica (Fig. 40).

El análisis morfo-genético de la estructura de la planta pone en

relación la forma con la fisiología y el crecimiento del organismo vivo. En las fases de estudio se ha observado físicamente la estructura seca en su estado estático (o sea del organismo muerto) y analizando el comportamiento de la planta viva en un estado dinámico (comparando diferentes muestras en su entorno natural). Paralelamente la reproducción abstracta del tejido orgánico, por medio de modelos, permite iniciar el análisis sobre el proceso de generación de la forma y definir la franja como el elemento morfológico de base. Ésta por sí sola no responde necesariamente a los principios de agregación o adaptabilidad del tejido orgánico. Definir la franja ha permitido individuar una forma que se arquea, sometida a las deformaciones laterales. En los primeros modelos de agregación y yuxtaposición de las franjas se ha generado un entramado que se abre y cierra también en relación a las características de elasticidad del material utilizado (Fig. 42).

1.6 CONCLUSIONES CAPÍTULO 1

En este primer capítulo se han definido los factores iniciales que determinan la interpretación del referente orgánico. La abstracción del tejido resistente de la planta y el proceso de conceptualización del referente orgánico están en la base del análisis de un estudio en campo bio-inspirado. La reproducción abstracta del tejido orgánico permite la comprensión del comportamiento del tejido vivo, poniendo en evidencia las relaciones dinámicas de crecimiento, auto-organización y adaptabilidad en fase elástica y no rígida. El procedimiento metodológico iterativo ha sido desarrollado por diferentes fases de aproximación, y cuando se ha valorado que un número suficiente de mecanismos biológicos del organismo se encuentran representados en uno o más modelos, entonces éstos asumen coherencia y pueden considerarse válidos.

El procedimiento metodológico está dado, en este caso, por la actividad manual intrínseca en la construcción del modelo físico. La tejeduría y el ritmo de las uniones determinan las variaciones de la configuración geométrica general. El montaje del modelo se basa en la repetición de procedimientos en esencia simples: unir las franjas entre ellas (Fig. 43). Las características dimensionales de las franjas en relación a las medidas del modelo, la variación del largo de las franjas entre ellas, la deformación de la franja y el ritmo de unión entre las mismas, representan el vocabulario que genera la estructura. Sus repeticiones, variaciones y alternancias en el procedimiento de construcción del modelo ofrecen las variaciones de las posibles configuraciones. En el capítulo siguiente se analizan en detalle los experimentos físicos realizados.



Fig. 39 Maqueta en fibras de papel unidas de forma regular que quedan abierta por los empujes generados por los globos colocados en el interior de la forma cilíndrica, de manera similar a las dinámicas observadas en los cactus columnares. © Ludovica Rossi 2010



Fig. 40 Maqueta en fibras de papel unidas de forma regular y alternadas, con la inserción de fibras de largo diferente. La forma del cilindro se obtiene por empuje internos entre las fibras que abren el tejido. © Ludovica Rossi 2010

1.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angiosperm Phylogeny Grup, 2017, website, version 14 - ultima visita: 08/2018 - Link: <http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>
- Gruber P., Vincent J., Vermeulen A. y Speck T., 2016, *Aspects of Life*, capítulo 1, libro: *Built to Grow: Blending Architecture and Biology*, editores: Barbara Imhof y Petra Gruber, Ed. Angewandte, Birkhäuser Verlag, ISBN: 978-3-0356-0920-2
- Lienhard J., Schleicher S., y Knippers J., 2014, *Bio-inspired, flexible structures and materials*, capítulo 11, libro: *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering Edition*, editores: E. Pacheco Torgal et al., Springer Ed., ISBN: 978-3-319-09287-4, DOI: 10.1007/978-3-319-09287-4_12
- Schleicher S., Lienhard J., Poppinga S., Speck T. y Knippers J., 2014, *A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture*, pp. 105-117, en *Computer-Aided Design*, vol. 60, Ed. Elsevier Ltd., ISSN: 0010-4485, DOI: 10.1016/j.cad.2014.01.005.
- Fischer A., 2013, *The Science of Seeing. Jewels of the Desert*, pp. 27-39, en *Zygote Quarterly*: zq07, núm. 07, zqjournal.org, ISSN 1927-8314
- Pichersky E. y Gerats T., 2011, *The plant genome: an evolutionary perspective on structure and function*, pp. 1-3, en *The Plant Journal*, SEB Society for Experimental Biology, vol. 66, Ed. Blackwell Ltd., DOI: 10.1111/j.1365-313X.2011.04564.x
- Garcia de Almeida O. J., Sartori-Paoli A. A. y Souza L. A., 2010, *Flower morpho-anatomy in Epiphyllum phyllanthus (Cactaceae)*, pp. 65-80, en *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 81, núm. 1, Eds. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Biología (IBUNAM), ISSN-e 2007-8706, disponible online en: <http://revista.ib.unam.mx/index.php/bio/article/view/185>
- Mancuso S., 2010, *Federico Delpino and the foundation of plant biology*, pp. 1067-1071, en *Plant Signaling & Behavior*, vol. 5, núm. 9, Ed. Landes Bioscience, DOI: 10.4161/psb.5.9.12102, disponible online en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4161/psb.5.9.12102>
- Gruber P., 2009, *Biomimetics in architecture - inspiration from plants*, pp. 412-419, actas congreso: *6º Plant Biomechanics Conference*, 16-21 Noviembre 2009, Cayena (Guayana Francesa), Ed. UMR EcoFoG, ISSN 2105-1089, disponible online en: <http://www.ecofog.gf/Docs/PBM2009Proceedings.pdf>
- Speck T. y Speck O., 2008, *Process sequences in biomimetic research*, pp. 3-11, en *Design and Nature IV Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, Ed. WIT Transactions on Ecology and the Environment, ISBN: 978-1-84564-120-7, DOI: 10.2495/DN080011
- Álvarez-Ríos Y., 2007, *La Geometría de las Formas de la Naturaleza*, pp. 103-136, en *Revista Tecnológica*, núm. 18, Ed. Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, ISSN 0123-7799
- Glimn-Lacy J. y Kaufman P. B., 2006, *Botany Illustrated. Introduction to Plants, Major Group, Flowering Plant Families*, Ed. Springer, New York, 2ª edición, ISBN-10: 0-387-28870-8
- Mancuso S., 2006, *Alcuni Aspetti di Neurobiologia Vegetale*, pp- 239-251, en *SILVAE Rivista Tecnico-Scientifica*, Ed. Corpo Forestale dello Stato, año II, núm. 4, Italia, ISBN: 88-901825-3-9
- Mauseth James D., 2006, *Structure-Function Relationships in Highly Modified Shoots of Cactaceae*, pp. 901-926, en *Annals of Botany*, vol. 98, núm. 5, Ed. Oxford Academic, ISSN 0305-7364 DOI:10.1093/aob/mcl133 disponible online en: www.aob.oxfordjournals.org
- Wagensberg J., 2005, *La rebelión de las formas. O como preservar cuando la incertidumbre aprieta*, Colección Metatemáticas, Ed. Tusquets S.A., Barcelona, 2ª edición, ISBN: 84-8310-975-1
- Stevenson J. F. y Mauseth J. D., 2004, *Effects of Environment on Vessel Characters in Cactus Wood*, pp. 347-357, en *International Journal of Plant Sciences*, vol. 165, núm. 3, Ed. The University of Chicago Press, DOI: 10.1086/382807

- Mauseth James D., 1988/2004, *Mauseth Research: Cacti*, website, Section of Integrative Biology, University of Texas - última visita: 08/2018 - Link: <http://www.sbs.utexas.edu/mauseth/ResearchOnCacti/index.htm>
- Altesor A. y Ezcurrawz E., 2003, Functional morphology and evolution of stem succulence in cacti, pp. 557-567, en *Journal of Arid Environments*, vol. 53, núm. 4, Ed. Elsevier Ltd., ISSN: 0140-1963, DOI: 10.1006/jare.2002.1059
- Mauseth J.D., 2001, *Anatomía y diversificación de las Cactaceae*, pp. 115-127, libro: *Enfoques contemporáneos para el estudio de la biodiversidad*, autores varios, ed. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México D.F., ISBN: 9789683683052
- Bravo-Hollis H., 1978, *Las Cactáceas de Mexico*, vol. 1, Ed. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México D.F., 2ª edición, ISBN-10: 9683617581

Capítulo 2

La experimentación

Resumen

En el segundo capítulo se describe la construcción de los modelos físicos que ponen en relación la fibra orgánica con el comportamiento del tejido en su conjunto. Los modelos físicos se comparan con la biomecánica y la morfología funcional del cactus. Se analiza la relación entre el movimiento curvilíneo del tejido vegetal y la construcción de un modelo con análogas características de adaptabilidad. Este procedimiento conduce a la abstracción del mecanismo orgánico y representa la fase de separación entre el modelo biológico y los principios descubiertos.

Se exploran las condiciones por las cuales la morfología puede adaptarse sin tener que conformar a priori la forma. Esta limitación permite garantizar la capacidad de auto-organización del sistema. La interpretación del mecanismo biológico define un sistema por unión de elementos longitudinales, con una sección vertical dominante respecto a la transversal, configurando la franja como elemento morfológico básico. Los modelos se analizan según el material principal que define la relación entre la morfología y las interacciones de las fuerzas internas y/o externas que se generan. Hasta definir el material de la banda de rodadura de neumáticos de bicicletas recuperados para la construcción de la fibra flexible. Los resultados obtenidos varían también en función del sistema de uniones aplicado. Este es un factor que incide en los grados de libertad del modelo y ofrece diferentes prestaciones en el control de la construcción de la forma.

Paralelamente se analiza la posibilidad de utilizar la banda de rodadura del neumático de vehículos para modelos a mayor escala. La banda es un material compuesto por goma vulcanizada reforzada con fibras metálicas y sintéticas. La mezcla de caucho trabaja como fase matriz del material compuesto. Las fibras internas aumentan la rigidez inicial del material y el límite del enlace del caucho define la resistencia máxima. Se recompilan unos valores característicos de la banda de rodadura fuera de uso para comprender y comparar las propiedades del material. Los valores de resistencia a tracción y módulo de elasticidad obtenidos son significativamente más bajos de los materiales estructurales convencionales. Y la falta de homogeneidad de los datos no permite considerarlos válidos para un estudio de carga específico.

La escala de construcción influye en el comportamiento de los modelos realizados. Definir un objeto tangible permite observar el comportamiento del material en el campo elástico, donde la forma varía según el estado de tensiones. Se analizan las morfologías generadas según el tamaño de los modelos donde el material flexible permite reproducir las dinámicas del tejido vivo del cactus.

Se identifican dos mecanismos morfogenéticos: el efecto resorte de la franja en relación con las franjas circunstantes y el efecto fuelle de la malla que se abre y cierra según los equilibrios generales del sistema. Para sus implementación se definen los actuadores externos e internos como factores de cambio morfológico. Se obtienen dos grupos morfológicos: uno por unión regular y alternada de las franjas, generando una malla sinusoidal que trabaja a tracción, y otro por unión de franjas pre-deformadas que permite obtener cáscaras auto-portantes por equilibrio de esfuerzos internos.

Sommario

Nel secondo capitolo si descrive la costruzione dei modelli fisici che mettono in relazione la fibra organica con il comportamento del tessuto nel suo insieme. I modelli fisici sono confrontati con la biomeccanica e la morfologia funzionale del cactus. Si analizza la relazione tra il movimento curvilineo del tessuto vegetale e la costruzione di un modello con caratteristiche analoghe di adattabilità. Questo procedimento porta all'astrazione del meccanismo organico e rappresenta il momento di separazione tra il modello biologico e i principi scoperti.

Si esplorano le condizioni in base alle quali la morfologia si adatta senza dover conformare a priori la forma. Questa limitazione consente di garantire la capacità di auto-organizzazione del sistema. L'interpretazione del meccanismo biologico definisce un sistema per unione di elementi longitudinali, con una sezione verticale dominante rispetto alla trasversale, configurando la striscia come elemento morfologico di base. I modelli sono analizzati in base al materiale principale utilizzato che definisce la relazione tra la morfologia e le interazioni delle forze interne e / o esterne che si generano. Fino a definire il materiale del battistrada dello pneumatico di bicicletta recuperato per la costruzione della fibra flessibile. I risultati ottenuti variano anche in base al sistema di incollaggio applicato. Questo è un fattore che influenza i gradi di libertà del modello e offre diverse prestazioni nel controllo della costruzione della forma.

Parallelamente, si analizza la possibilità di utilizzare il battistrada degli pneumatici di veicoli per modelli a maggiore scala. La banda è un materiale composto da gomma vulcanizzata rinforzata con fibre metalliche e sintetiche. La miscela di gomma funziona come la fase matrice del materiale composito. Le fibre interne aumentano la rigidità iniziale del materiale e il limite del legame della gomma definisce la resistenza massima. I valori caratteristici del battistrada fuori uso sono ricompilati per comprendere e confrontare le proprietà del materiale. I valori di resistenza a trazione e modulo di elasticità ottenuti sono significativamente inferiori rispetto ai materiali strutturali convenzionali. Inoltre la mancanza di omogeneità dei dati raccolti non consentono loro di essere considerati validi per uno studio sul carico specifico.

La scala di costruzione influenza il comportamento dei modelli realizzati. La definizione di un oggetto tangibile consente di osservare il comportamento del materiale nel campo elastico, in cui la forma varia con lo stato di tensione. Le morfologie generate sono analizzate in base alle dimensioni dei modelli, dove il materiale flessibile consente di riprodurre le dinamiche del tessuto vivo del cactus.

Si identificano due meccanismi morfogenetici: l'effetto molla della striscia rispetto alle fasce circostanti e l'effetto a soffiato della rete che si apre e si chiude in base agli equilibri generali del sistema. Per la loro implementazione, si definiscono gli attuatori esterni e interni come fattori di cambiamento morfologico. Si ottengono due gruppi morfologici: uno per l'unione regolare alternata delle fasce, generando una maglia sinusoidale che lavora a trazione e un altro per unione di fasce pre-deformate che permettono ottenere gusci autoportanti per equilibrio di sforzi interni.

Abstract

The second chapter describes the construction of the physical models that relate the organic fiber to the behavior of the tissue as a whole. The physical models are compared to the biomechanics and the functional morphology of the cactus. The relationship between the curvilinear movement of the vegetal tissue and the construction of a model with analogous adaptability characteristics is analyzed. This procedure leads to the abstraction of the organic mechanism and represents the moment of separation between the biological model and the principles discovered.

The conditions by which the morphology can be adapted without having to conform a priori the form are explored. This limitation allows guaranteeing the self-organization capacity of the system. The interpretation of the biological mechanism defines a system by union of longitudinal elements, with a vertical section dominant with respect to the transversal, defining the strip as the basic morphological element. The models are analyzed according to the main material that defines the relationship between the morphology and the interactions of the internal/external forces that are generated. Until to define the tread material of the recovered bicycle tire for the construction of the flexible fiber. This is a factor that affects the degrees of freedom of the model and offers different features in the control of the construction of the form.

At the same time, the possibility of using the tread of vehicle tires on a larger scale models is analyzed. The tread of the tire is a material composed of vulcanized rubber reinforced with metallic and synthetic fibers. The rubber mixture works as the matrix phase of the composite material. The internal fibers increase the initial stiffness of the material and the boundary of the rubber bond defines the maximum strength. The characteristic values of the tread out of use are recompiled to understand and compare the properties of the material. The values of tensile strength and modulus of elasticity obtained are significantly lower than conventional structural materials. Furthermore, the lack of homogeneity of the collected data does not allow them to be considered valid for a specific load study.

The scale of construction influences the behavior of the models made. The definition of a tangible object allows observing the behavior of the material in the elastic field, where the shape changes with the state of tension. The morphologies generated are analyzed according to the dimensions of the models, where the flexible material allows reproducing the dynamics of the living tissue of the cactus.

Two morphogenetic mechanisms are identified: the spring effect of the strip with respect to the surrounding strips and the bellows effect of the net that opens and closes based on the general equilibrium of the system. For their implementation, external and internal actuators as factors of morphological change are defined. Two morphological groups are obtained: one for the regular alternating union of the bands, generating a sinusoidal mesh that works in traction and another one for the union of pre-deformed bands that allow to obtain self-supporting shells for balance of internal efforts.

Capítulo 2

La experimentación

2.1 PRIMEROS EXPERIMENTOS

La forma ondulada del tejido de sostén es visible desde una primera observación y ampliando la imagen por medio de la fotografía macro se hace evidente su crecimiento en la trayectoria longitudinal (Fig. 1). La fragilidad del tejido seco se observa en el contacto de las uniones entre las fibras, más que en su espesor, donde la sección ofrece una cierta resistencia por las propiedades del material. Debido a estas características físicas de la madera seca del cactus, desde el inicio del trabajo, la interpretación de la estructura se ha orientado hacia la unión de elementos longitudinales, con una sección vertical dominante respecto a la transversal. Esta es una abstracción geométrica del referente orgánico, la cual determina el desarrollo sucesivo de la investigación biomimética.

En el capítulo anterior se ha analizado la biomecánica y la morfología funcional del tejido de madera fibrosa del cactus. El estudio permite la comprensión de su estructura, forma y funciones biológicas. A continuación se describe el proceso de abstracción del mecanismo, siendo este uno de los pasos relevantes para separar los principios biológicos descubiertos del referente natural (Speck y Speck, 2008). Cada fenómeno natural por cuanto simple es en realidad compuesto, y cada efecto visible es la suma de un número infinito de acciones subordinadas. El

Fig. 1 (Abajo izquierda) Fotografía macro con fuente de expansión óptica del tejido de madera seca de cactus. Se destaca el andamio curvilíneo y el ancho de las fibras. Éstas varían según las concisiones específicas que ha vivido el organismo. ©Ludovica Rossi 2016

Fig. 2 (Abajo derecha) Detalle modelo en franjas de papel unidas por grapas metálicas de forma alternada y regular. La malla queda abierta por tracción en sus extremos. © Ludovica Rossi 2010



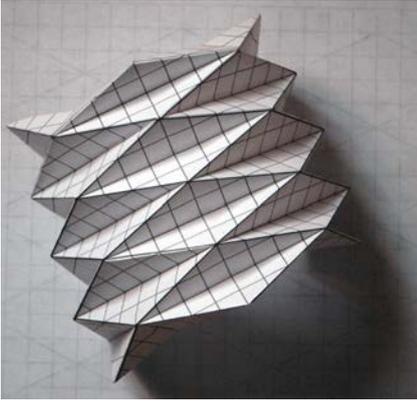


Fig. 3 Modelo en papel plegado. La trama romboidal quiere imitar la trayectoria diagonal de las nervaduras del tejido del cactus. © Ludovica Rossi 2010



Fig. 4 Modelo en papel que aplica la técnica del kirigami japonés. Los cortes alternados y regulares transforman la hoja en una malla dinámica. © Ludovica Rossi 2018

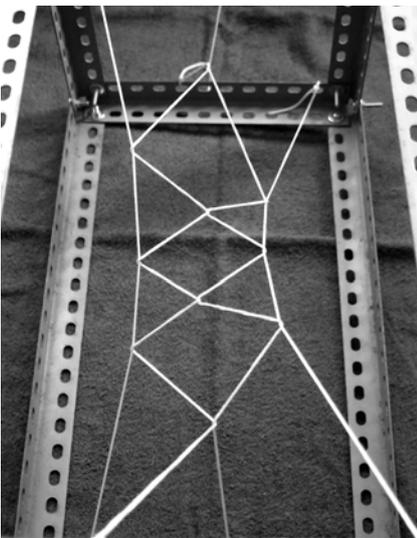


Fig. 5 Modelo realizado en cables con entramado romboidal que imita la trayectoria diagonal de las nervaduras del tejido del cactus. © Ludovica Rossi 2010

crecimiento y la forma son, bajo todos los aspectos, de naturaleza compuesta (Thompson, 1969, 292). Para separar los fenómenos involucrados, el estudio de la morfología emplea la construcción de modelos físicos que permiten observar la relación dinámica 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. Las fibras han sido reproducidas como franjas unidas entre ellas a diferentes intervalos y medidas dependiendo del experimento realizado. En el primer nivel de aproximación se ha empleado el papel como material inicial (Fig. 2).

En esta primera, fase la reproducción del mecanismo es simple y conceptualmente lineal. Responde formalmente a la necesidad de copiar el ejemplo natural con el mínimo esfuerzo de manipulación y coste, por lo cual los primeros modelos son en papel. Cortar las tiras de papel y unir las 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.

En paralelo a los experimentos con franjas de papel se han realizados otras pruebas que planteaban otras interpretaciones posibles y han sido descartadas; entre las cuales se recuerdan:

- Una hoja de papel donde se aplicaron unos pliegues romboidales que en cierta forma imitan las nervaduras de los plenos y vacíos del tejido del cactus (Fig. 3). Esta prueba ha sido descartada porque a una mayor escala no sería posible mantener la continuidad del papel. Además estéticamente la estructura llena y continua parecía alejarse demasiado del ejemplo orgánico. La estructura parecía inspirarse en el crecimiento de unos tipos de hojas, cuyos pliegues del tejido son asimilables a los origami japonés.
- Una hoja de papel donde se realizaron unos cortes alternados, aplicando un sistema similar a la técnica del kirigami japonés o del metal estirado en déployé, para obtener una malla romboidal discontinua (Fig. 4). Este modelo ha sido descartado porque la hoja continua parecía alejarse nuevamente del ejemplo natural, aunque por forma y deformaciones mantenía una correspondencia.
- Un tejido de cables, con un entramado romboidal, que ofrecía amplias posibilidades de configuración pero dejaba dudas sobre la sección del cable (resistente únicamente a tracción). Este es diferente a la sección

de la madera seca de la planta con el canto dominante respecto al ancho (Fig. 5). Una red de cables parece más bien inspirada en la telaraña, definida por el comportamiento funicular de cada cable y el sistema de la membrana en su conjunto.

- Sistema por diámetros de diferentes medidas que se auto-organizan por la sección circular (Fig. 6). El uso de tubos en cartón ha llevado a una configuración rígida inspirada en la madera seca de la planta.



Fig. 6 Sistema con secciones en tubos en cartón que se adaptan recíprocamente por gravedad, Stand ASF - Construmat 2011. ©Ludovica Rossi 2011

La totalidad de las primeras pruebas realizadas junto al análisis del tejido de madera de la planta ha definido la elección de orientar la construcción de los modelos por franjas unidas entre ellas (Esquema 2.1). El conjunto de los experimentos realizados se ha catalogado por orden cronológico en el Apéndice II.

2.1.1 Los modelos de partida

El modelo que une las franjas en forma alternada regular permite obtener una malla similar a un entramado romboidal, que ofrece algo de resistencia a flexión por la sección vertical (el canto de la franja de papel), evaluada en proporción a la extensión general del modelo (Fig. 7). Este modelo puede ser resumido según las siguientes características:



Fig. 7 Modelo de malla en franjas de papel con uniones regulares y alternadas abierta por tracción. © Ludovica Rossi 2010

- La unión entre las franjas actúa como un encaje. En este punto las dos franjas se mueven juntas y están sometidas a las mismas deformaciones.
- La malla tiene necesidad de una acción posterior para ser abierta y activar la dinámica de los llenos y vacíos propios del referente orgánico.

Esquema 2.1 Proceso de conceptualización para llegar al abstracción del mecanismo e investigar su implementación técnica. ©Ludovica Rossi 2018

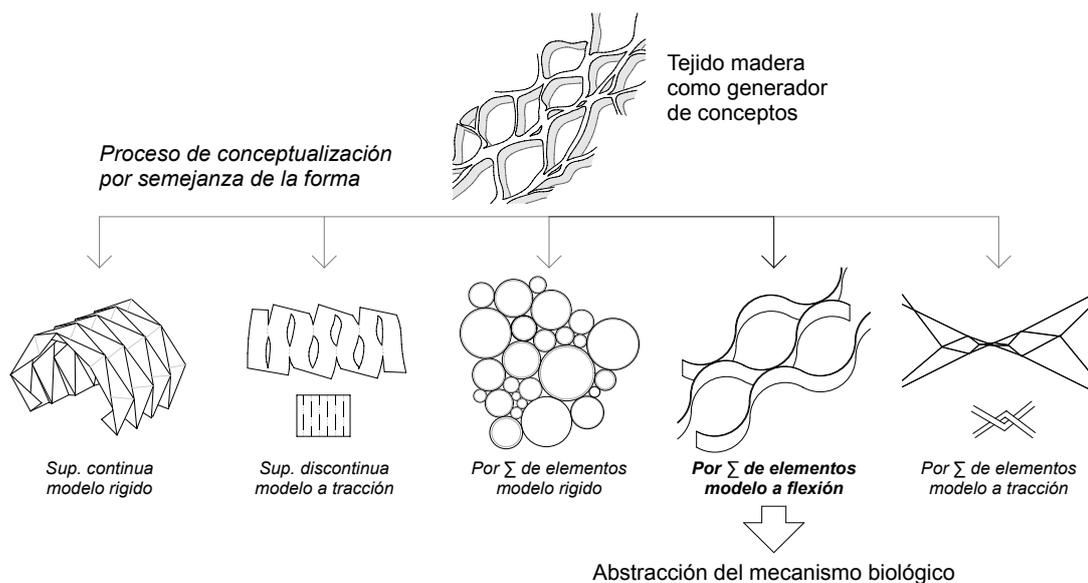
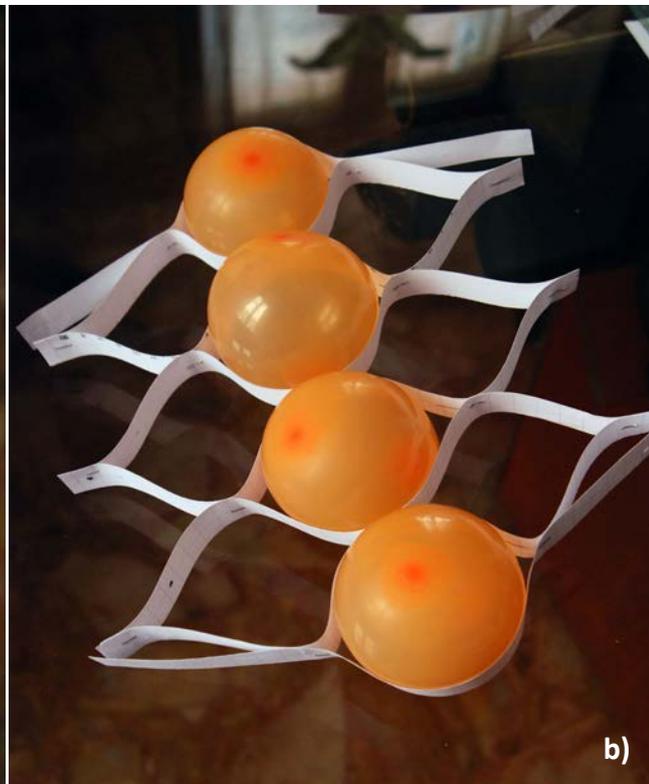




Fig. 8 Modelo en franjas de papel unidas de forma alternada y regular. La malla queda abierta por la aplicación de esfuerzos de tracción en los cuatro extremos y la diferencia de apertura entre las bandas muestra la variación de las tensiones en la trama. © Ludovica Rossi 2010

Fig. 9 Modelo en franjas de papel. La malla queda abierta por la introducción de actuadores externos: **a)** Palitos de madera; **b)** Globos inflados. © Ludovica Rossi 2010



Se define el punto de partida para estudiar las relaciones de fuerzas que se desarrollan en el organismo vivo. La morfología se comporta como un fuelle (Fig. 11 a, b) 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 los tejidos resistentes.

La valoración de estos primeros resultados está también ligada al material utilizado por la metodología de investigación implementada. El papel tiene un elevado nivel de manipulación (por su facilidad de corte, pliegue y unión) y mantiene una cierta memoria de la forma, ofreciendo flexibilidad y resistencia al mismo tiempo. Por otra parte el papel parece ser poco adecuado para el desarrollo del trabajo, y para experimentos sucesivos se ha valorado necesario experimentar con otros materiales, con el fin de analizar si el tejido de cactus era un referente válido como generador de conceptos a la escala arquitectónica.

2.1.2 Interconexión de las franjas

En la fase de observación del cactus, la interpretación formal de la madera seca ha llevado a una reproducción manual por medio de la franja de papel. El análisis del comportamiento mecánico de la malla, obtenida por agregación de franjas en papel, muestra que para estar abierta (como el tejido seco de

los cactus observados) necesita ser tensada desde el exterior (Fig. 8) mediante la aplicación de esfuerzos en sus extremos. En alternativa, la introducción de elementos externos pone en tracción el sistema abriendo las franjas. Estos tienen la función de actuadores que trabajan a compresión (Fig. 9). Se genera una contraposición de esfuerzos que abren la malla, una condición válida para todos los modelos realizados con franjas flexibles. En este contexto la génesis y construcción del modelo material define el elemento interior como factor de cambio morfológico del tejido, y se puede definir como *actuador externo* (Felipe y Truco, 2004).

En las pruebas se ha trabajado con la introducción reiterativa de diversos actuadores externos introducidos entre las franjas de la malla, obteniendo diferentes combinaciones posibles. Todas estas opciones permiten a la malla quedar abierta. Comparando los modelos físicos realizados con el estudio del comportamiento de la planta viva es visible cómo las maquetas quedan en una fase de interpretación estática del modelo natural sin responder a comportamientos dinámicos propios del organismo vivo. El ejemplo orgánico muestra un crecimiento irregular de la estructura de madera, y en otra prueba se ha dirigido la construcción de los modelos con franjas unidas siguiendo un ritmo irregular y aleatorio.

Las franjas unidas de forma irregular generan entre ellas unas acciones que permiten al tejido quedarse abierto, manteniendo al mismo tiempo un cierto grado de elasticidad para adaptarse a las tensiones externas (Fig. 10). En este ámbito morfológico, la franja analizada individualmente se comporta como un resorte

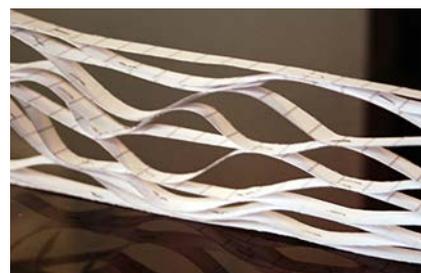


Fig. 10 Modelo en franjas de papel de 1 cm de alto y largo variable unidas de forma aleatoria con grapas metálicas. La malla queda abierta por acciones de equilibrio de los esfuerzos internos del tejido, donde las mismas franjas trabajan como actuadores internos. © Ludovica Rossi 2010

Fig. 11 Modelos de relación entre fibras: **a)** Efecto fuelle obtenido con un elemento lineal rígido entre dos fibras de la misma longitud, unidas en sus extremos; **b)** Dos fibras de largo igual y una tercera fibra del mismo material colocada transversalmente entre las dos, muestra la relación de empuje a igualdad de características de material; **c)** Efecto resorte entre dos fibras de largo diferente. La fibra más corta está sujeta a un esfuerzo de tracción y la más larga queda separada y hace un efecto "burbuja". ©Ludovica Rossi 2010

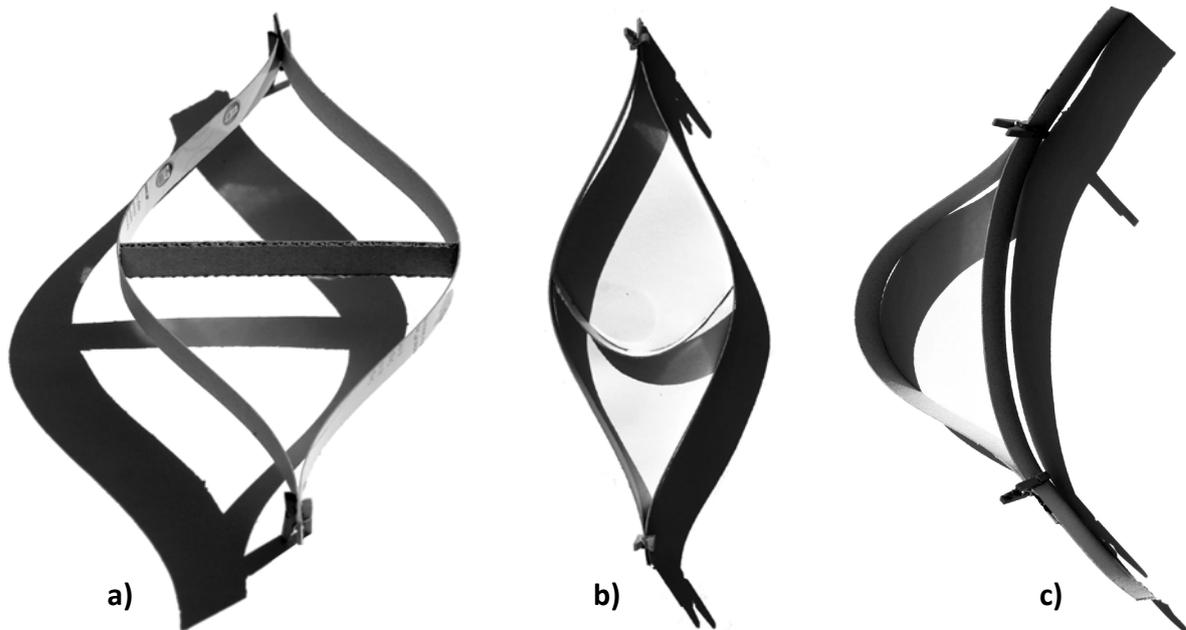




Fig. 12 Detalle del modelo conformado por una malla de franjas de papel unidas de forma regular y alternada con la introducción de franjas más largas como actuadores internos. ©Ludovica Rossi 2010

(Fig. 11c) que ejerce y recibe unos empujes en relación a las franjas circunstantes. El entramado define una malla abierta gracias a la diferencia de longitud de las franjas, y las mismas trabajan como actuadores internos (Esquema 2.2). El resultado es una malla que se abre por tensiones internas entre las franjas, respetando a un nivel más profundo la morfología natural.

Experimentos sucesivos que apuntan a sistematizar la relación entre las franjas han trabajado con dos franjas iguales con la introducción en el centro de una tercera franja de mayor longitud (Fig. 12). La diferencia en el largo de las franjas genera una diferencia de tensiones, y las dos franjas más cortas se abren por empuje de la franja central más larga. Esta última trabaja como un actuador en el cambio morfológico del tejido.

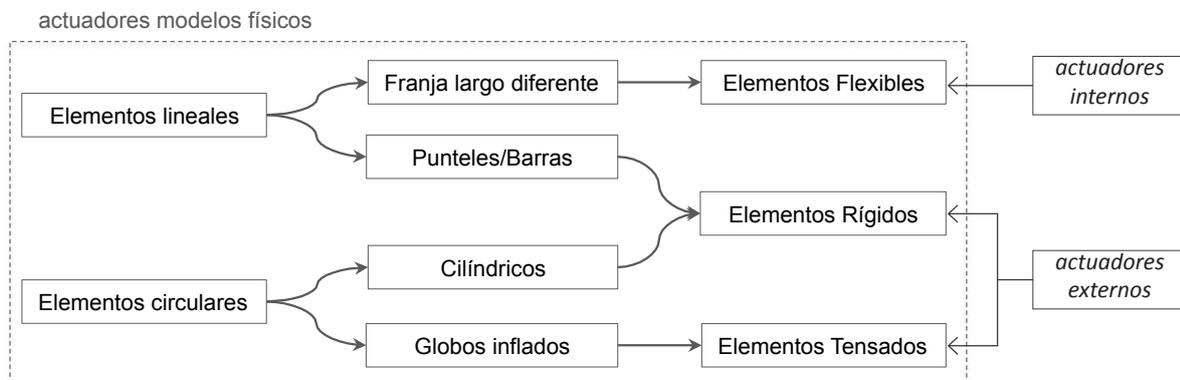
2.1.3 Diferencias entre el tejido seco y vivo de la planta

Resulta difícil, sino imposible, observar el crecimiento interior del tejido de la planta para poder responder a un sistema de agregación y organización celular específico, sin quedar en interpretaciones más generales como la dirección principal del crecimiento de la planta entera. El complejo entramado de la madera de cactus muestra la estratificación de material del sistema vascular de la planta (Fig. 13). Por medio de la mayor o menor cantidad de materia leñosa acumulada se interpreta la historia del tejido a lo largo de la vida de la planta. Por otra parte en su desarrollo hacia arriba no será posible interpretar si en el entramado se ha ido acumulando material, por ejemplo, antes hacia la derecha que a la izquierda o viceversa. O sea reconstruir la historia de los esfuerzos de presión internos que han determinado una configuración respecto a otra.

Esquema 2.2 Actuadores internos utilizados en los modelos, que permiten generar una relación de esfuerzos para abrir la malla, clasificados por forma geométrica y comportamiento. © Ludovica Rossi 2017

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

- En el tejido seco de la planta las franjas de madera son



rígidas y tienen una forma curvilínea predeterminada. El sistema es resistente a la compresión y ha perdido flexibilidad.

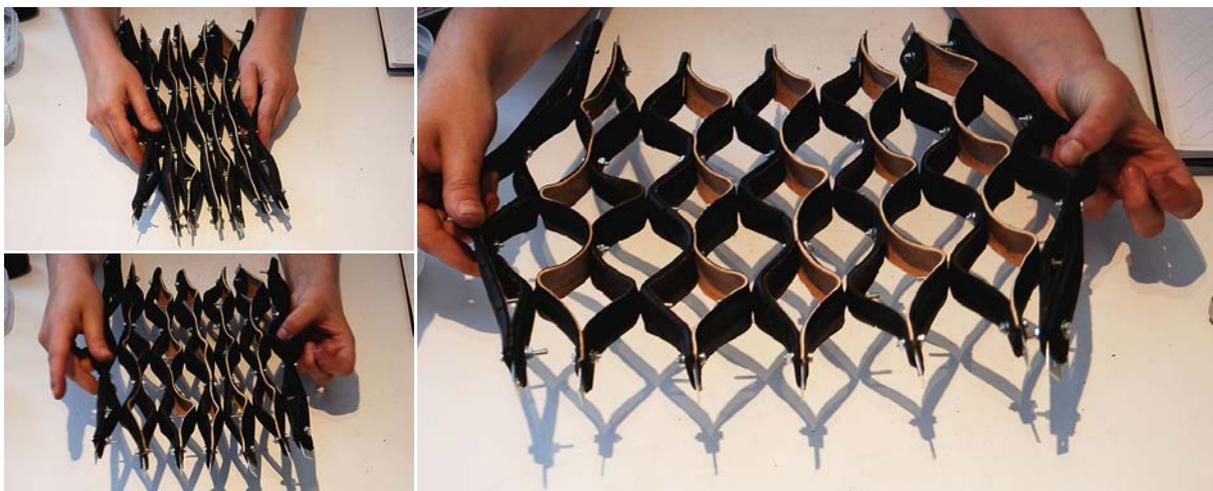
- En el tejido vivo las franjas son elásticas para permitir a la planta crecer y adaptarse a las acciones externas e internas del organismo.

En el tejido vivo las franjas se muestran como una estructura elástica que adapta su curvatura a las necesidades fisiológicas del organismo (Fig. 14). Análogamente los modelos deberían acercarse lo máximo posible a esta característica. D'Arcy Thompson, en su libro *"Sobre el crecimiento y la forma"*, cuando trata la relación de resistencia que debe ofrecer el hueso y las fuerzas que deben generar, recuerda que hace referencia al hueso vivo, compuesto por sustancias orgánicas e inorgánicas, y que un hueso muerto y seco es una cosa muy diferente



Fig. 13 Fotografía de una pala seca de *Opuntia* donde se destaca el andamio curvilíneo de las fibras. El entramado de madera muestra la estratificación de material del sistema vascular de la planta. La variación de materia leñosa acumulada muestra la historia del tejido a lo largo de la vida de la planta. © Ludovica Rossi 2016

Fig. 14 (Abajo) Modelo en banda de neumáticos de bicicletas. La reproducción de las dinámicas de adaptabilidad del tejido vivo son obtenidas por medio del diseño de uniones alternadas y de las propiedades elásticas del material. La malla se abre y cierra de forma similar al tejido vivo, que extiende y contrae sus tejidos según las necesidades de acumulación de líquidos y otras sustancias. © Ludovica Rossi 2013



(Thompson, 1969, 244).

De hecho uno de los aspectos recurrentes en las diversas fases de observación, interpretación y construcción de los modelos, ha sido la relación entre el movimiento curvilíneo del tejido vegetal y la construcción de un modelo que pudiera mantener análogas características de adaptabilidad (Tabla 2.1). 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. Esta se puede definir como la principal limitación aplicada a los experimentos para garantizar la capacidad de auto-organización del sistema.

Entonces, 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. En paralelo por diferentes niveles de aproximación, los modelos han permitido estudiar las relaciones entre la morfología del tejido estructural de madera y la fisiología de la planta, y definir la morfogenética del tejido vivo.

En este intercambio de información entre estudio de las soluciones biológicas y la construcción de los modelos para la comprobación del mecanismo bio-inspirado, surgen nuevos hallazgos que también contribuyen a una mejor comprensión del funcionamiento de los generadores de conceptos biológicos (el referente orgánico). Se activa la dinámica de “biomimética inversa”, y esto requiere una nueva investigación de las muestras biológicas para lograr una mejora continua del modelo técnico (Speck et al, 2017).

Tabla 2.1 Relación entre la observación del organismo y sus interpretaciones para la formalización de los modelos. En el análisis de la estructura de la planta se observa la forma ondulada de las fibras. La interpretación del tejido orgánico se orienta a una visión discontinua obtenida por agregación elementos lineares. Estos son elementos independientes conectados entre sí por uniones acopladas. Esta formalización del referente orgánico permite construir modelos con una trama ondulada. © Ludovica Rossi 2016

Observación e interpretación del organismo		Técnicas de formalización en la fase de observación	
Análisis del tejido de la planta	Evaluación de la estructura portante	Tipos de elementos	Tipos de uniones
Seguir lleno y vacío	Tejido continuo (superficie)	Continuo	Superpuestas
Seguir las diagonales	>> Tejido discontinuo		>> Independientes
>> Seguir las ondulaciones		>> Elementos ondulados (fibras)	

2.2 MATERIALES PRINCIPALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LOS MODELOS FÍSICOS

Una de las propiedades primaria que definen los modelos físicos es el material principal empleado para sus construcción. Este determina la relación entre la morfología del modelo y la interacción de las fuerzas internas y/o externas que se generan. El comportamiento del modelo será diferente si el material, que define las franjas, es más o menos rígido, o más o menos flexible. Además la forma y posibilidad de trabajar los materiales empleados permitirá la construcción de un modelo u otro.

A lo largo del trabajo se han realizados pruebas con diversos materiales para la construcción de las maquetas. Cada material permitía y respondía de modo diferente a la morfología que se estaba desarrollando (Tabla 2.2). Estas variaciones han marcado el recorrido hacia la búsqueda de una morfología orgánica inspirada en el tejido de madera del cactus vivo. En paralelo se ha experimentado con diversas medidas, proporciones y/o tipos de uniones que han determinado una variedad de configuraciones que se describirán en apartados sucesivos y permiten definir las características geométricas y formales del sistema. A continuación se describen los modelos según el uso del material para definir la franja, hasta llegar a la definición del neumático de bicicleta recuperado.

2.2.1 Papel

El papel en diferentes espesores (mas o menos rígidos) ha sido el material de partida por su facilidad de manipulación y bajo coste, como se ha comentado en párrafos anteriores. La caracterización principal de los modelos físicos está determinada por el material de la banda, pero también otros elementos y materiales son parte de la construcción de las maquetas e inciden en sus comportamiento, como: grapas metálicas para

Tabla 2.2 Relación entre los materiales utilizados para la materialización de las fibras y el nivel de urdimbre aplicado a la trama en los diferentes modelos físicos construidos. © Ludovica Rossi 2018

		<i>materiales</i>			
		papel	madera	cemento	neumáticos (NFU)
<i>urdimbre</i>	n.1 nivel				
	n.2 niveles				

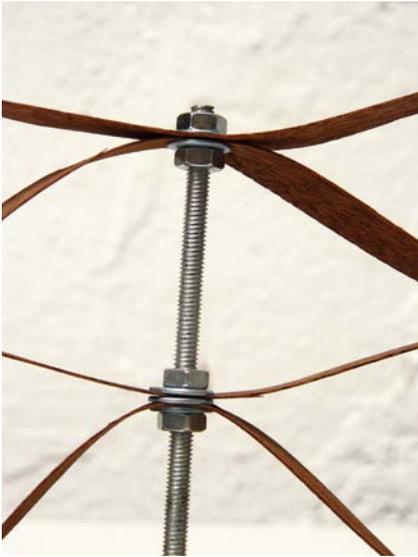


Fig. 15 Detalle modelo en fibra de madera y varillas metálicas como actuadores internos. © Ludovica Rossi 2011

las uniones; pequeños listones de madera y/o globos inflables como elementos resistentes a compresión, utilizados como actuadores externos para abrir la malla en las configuraciones mas regulares.

El uso del papel ha sido interpretado apto para estudiar las configuraciones morfológicas iniciales de la malla, y ha permitido definir la figura geométrica de la franja. Este ha sido un paso base en el proceso de comprensión y abstracción del referente orgánico. El cambio de material principal para la realización de los modelos se evalúa necesario para investigar la validez del tejido del cactus como un disparador de concepto (Speck y Speck, 2008) y su implementación técnica en arquitectura.

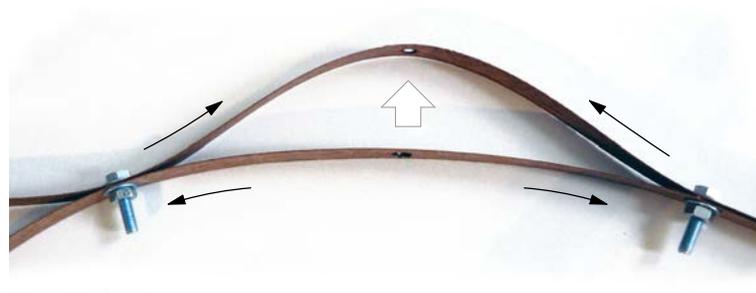
2.2.2 Madera

Los modelos de papel han sido reproducidos en delgadas franjas de madera (Fig. 16). Los actuadores internos han sido realizados con puntales rígidos en pequeños listones de madera y/o varillas metálicas roscadas (Fig. 15), según prueba realizada. Un material como la madera presenta problemas de flexibilidad en los tramos de mayor curvatura de las bandas. Especialmente, donde la onda cambia la dirección de curvatura (de positiva a negativa), se generan fisuras longitudinales paralelas a la longitud de la franja (Fig. 17). Y es evidente que, incluso a

Fig. 16 Modelo en franja de madera de 1 cm de ancho y varillas metálicas. En los puntos de máxima curvatura la franja se fisuraba en la dirección longitudinal de la fibra. La maqueta tiene un largo total de unos 20 cm por 10 cm de alto. © Ludovica Rossi 2011.



Fig. 17 Relaciones de esfuerzo entre franjas de madera delgadas (ancho 1 cm) de largo diferente y unidas en sí. La franja inferior de menor longitud está sujeta a tracción, y la superior de mayor longitud a compresión. El equilibrio entre los esfuerzos contrapuestos actúa abriendo las franjas. © Ludovica Rossi 2011.



pequeña escala, era necesario aplicar modificaciones para que el material pudiese adaptarse a la forma, como por ejemplo:

- Cambiar la sección de la banda para aumentar la resistencia, aunque esto modifica la flexibilidad del elemento.
- Aplicar unos elementos de refuerzo externos en los puntos más débiles.
- Usar una madera laminada renunciando a la flexibilidad del material a favor de un elemento previamente conformado con la forma de la onda abierta.
- Cambiar la forma y la construcción del elemento por otras más adaptas a las características del material.

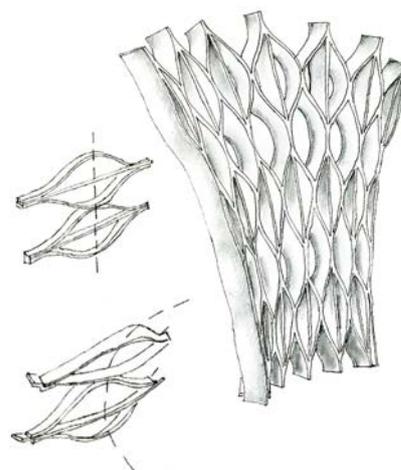


Fig. 18 Croquis de un módulo para el Twist Pavillon (EmTech, AA) y relación de las tres franjas de madera según un desarrollo plano o curvilíneo. © Ludovica Rossi 2017

Un ejemplo interesante que desarrolla el equilibrio entre la tracción y compresión de franjas de madera es el Twist Pavillon v1.0 (Fig. 19) realizado por Emergent Technologies and Design, Architectural Association en la Timber Expo 2015 (Birmingham, U.K.). La instalación en forma de cinta de Möbius se compone de una estructura de bandas de madera de contrachapado, que son las costillas del sistema y tienen un desarrollo lineal. A estas se acoplan simétricamente dos franjas de madera más delgadas que siguen un movimiento curvilíneo sinusoidal. Las tres franjas definen el elemento base (Fig. 18) que se repite en el espacio con variaciones sucesivas para obtener la superficie final. Un sub-sistema perpendicular de peines corre a lo largo de los bordes libres de la superficie articulada bloqueando la geometría. La relación entre las costillas y las alas sinusoidales,

Fig. 19 Twist Pavillon v1.0 realizado por Emergent Technologies and Design, Architectural Association School (AA), para el Timber Expo 2015 (Birmingham, U.K.). ©AA [EmTech]



The TWIST @ Timber EXPO 2015



Fig. 20 Módulo en madera laminar del pabellón del Lincoln Park Zoo South Pond (Chicago, EE. UU.) diseñado por GANG Architects. © Studio Gang 2010

coplanares entre sí, permite el control de las propiedades de la madera sometida a flexión y torsión.

El pabellón del Lincoln Park Zoo South Pond (Chicago, EE. UU.) diseñado por GANG Architects, está construido con elementos prefabricados en madera laminar (Fig. 20) que definen el patrón de la bóveda. Este material permite obtener unos elementos rígidos con una forma curvilínea homogénea y continua. La interconexión entre los elementos se obtiene por medio de ranuras fresadas a control numérico que definen la inclinación y el arco de curvatura de la superficie del pabellón. Este ejemplo, aunque estéticamente es similar a la estructura de madera de cactus está inspirado al caparazón de las tortugas (Gang, 2010). El pabellón del Lincoln Park Zoo South Pond es una estructura rígida formada por agregación de elementos (Fig. 21). Si bien los elementos que componen la coraza no tienen la misma forma que los del pabellón y las superficies curvas son diferentes (el caparazón de la tortuga tiene la doble curvatura de una cúpula rebajada sobre la base de una circunferencia oval y el pabellón consta de una sola curvatura, la del arco de la bóveda), el sistema constructivo y el comportamiento estructural del pabellón responde al organismo de referencia y no al sistema elástico observado en el tejido vivo del cactus.

Fig. 21 (Derecha) Croquis pabellón del Lincoln Park Zoo South Pond (Chicago, EE. UU.) diseñado por GANG Architects, año de construcción 2010. © Ludovica Rossi 2017

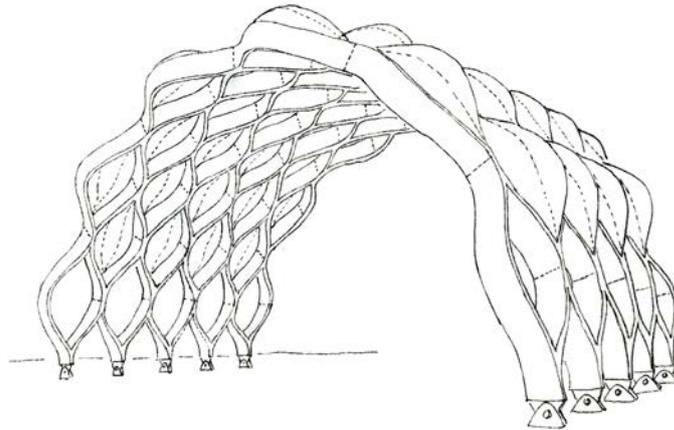


Fig. 22 (Abajo) Modelos en impresión digital en la muestra Full Print 3D, museo Disseny Hub Barcelona 16.06.2010 – 29.05.2011, obra: Cell Cycle [Rings], de J. Rosenkrantz y Jesse Louis-Rosenberg (Nevous System, Massachusetts), producido por Shapeways Holanda 2009. © Ludovica Rossi 2011



2.2.3 Papel y cemento

Otras pruebas se han orientado hacia la construcción de modelos rígidos. En este caso se han realizados algunos ensayos, con poco éxito, a partir de una malla en franjas de papel embebidas en cemento blanco y colgadas para seguir con el proceso de secado (Fig. 23). Si bien las pruebas no apuntan a reproducir el comportamiento del hormigón armado, han buscado la realización de un modelo que al finalizarse la construcción alcanzara una configuración totalmente rígida.

Los modelos han querido emplear la fuerza de gravedad para configurar el sistema de fuerzas internas que hubieran mantenido abierta la malla y dado forma a la estructura, aplicando el sistema funicular utilizado por Gaudí en sus modelos de estudio (Addis, 2013). 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 pruebas realizadas, la deformación excesiva del papel, antes del secado, no ha permitido alcanzar la forma rígida.

Para continuar la investigación sobre la forma rígida, sería necesario reemplazar el papel por otro material capaz de absorber el cemento y mantener la forma durante el proceso de secado. Un ejemplo podrían ser tejidos naturales, como muestran unos experimentos del arquitecto ingeniero Frei Otto de cáscaras livianas a pequeña escala realizados con vendas y yeso (Fig. 24). Por otro lado, sin embargo, las pruebas con cemento acompañan las maquetas del trabajo de investigación como muestra de los posibles caminos que permiten el desarrollo de la forma. Por lo cual no se han realizados otros modelos similares y la construcción de una estructura rígida ha sido descartada debido a que:

- Hace referencia a la bio-inspiración del tejido seco de la planta, no vivo.
- La morfología es estática y prevé una sola configuración posible para un mismo elemento de base.

Existen diversos modelos de estructuras rígidas que se podrían asimilar a la morfología estudiada en el referente natural (Fig. 22). En hormigón hay varios ejemplos de estructuras a trama romboidal a diversas escalas de construcción.

Un ejemplo es el Palazzetto dello Sport (Fig. 25) de Pier Luigi Nervi, construido a Roma en el 1960 para los Juegos de la XVII Olimpiada. Es un caparazón en hormigón compuesto por segmentos prefabricados en forma de diamante, que se reducen en tamaño a partir de la circunferencia de base hacia la parte



Fig. 23 Modelo en franjas de papel embebido en cemento blanco. La malla está colgando para generar la forma por gravedad durante el proceso de secado. ©Ludovica Rossi 2012

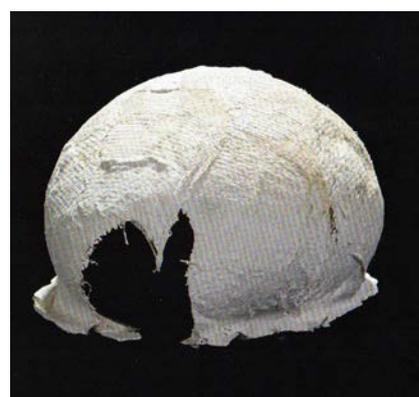


Fig. 24 Egg-shape pneumatic dome-Modelo de cáscara liviana en vendas y yeso del arquitecto Frei Otto, 18x23x16 cm, núm. archivo: FO-M_178. © Bern Seeland



Fig. 25 Interior del Palazzetto dello Sport (1956-57) de Pier Luigi Nervi y Annibale Vitellozzi. La planta circular tiene un diámetro de unos 60 metros. La cúpula ha sido construida en unos 40 días y está compuesta por elementos prefabricados en forma de diamante, Roma. © Ludovica Rossi 2010

superior de la cúpula. Desde el interior, con unos 60 m de diámetro, se aprecian los nervios que se entrecruzan entre sí siguiendo un patrón en espiral. Parece como observar el molde invertido de una flor que sigue la distribución de las semillas en la inflorescencia del girasol o similares (Fig. 26).

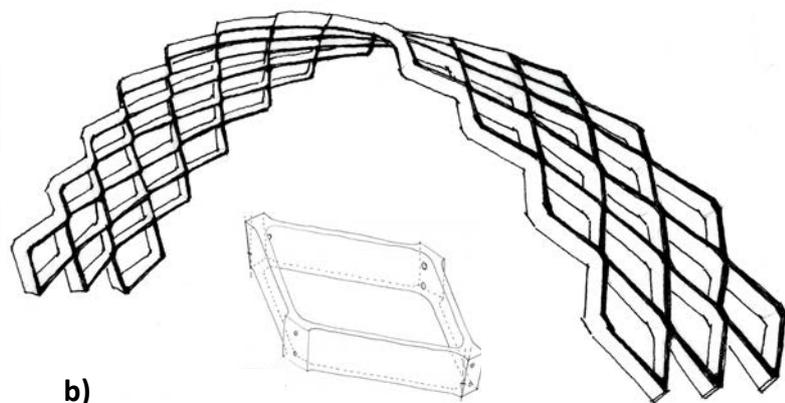
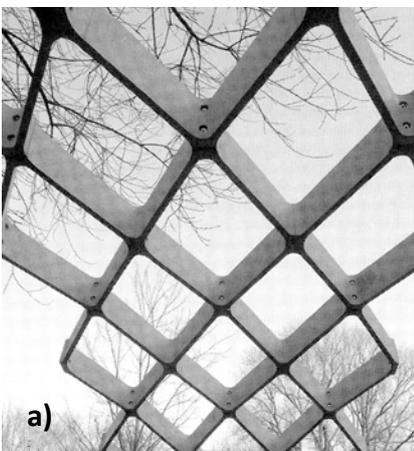
Un segundo ejemplo es el caso de la estructura diseñada por Christian Schätzke, y desarrollada por el centro 532 de la RWTH Aachen University en 2005 (Fig. 28). El prototipo de la bóveda se compone por elementos en forma de diamante en hormigón armado con fibra de carbono. La curvatura del arco de la bóveda está determinada por la forma trapezoidal del alzado del elemento prefabricado (Bechthold, 2008).

Estos son dos ejemplos de estructuras con sistemas rígidos en hormigón armado cuya conformación podríamos asimilar a las formas de la fibra de madera seca de cactus. Se definen a partir de las fibras como elementos rígidos y estáticos. La configuración espacial de la superficie depende del tipo de patrón en la secuencia de unión y del acoplamiento de los componentes: en espiral en el Palazzetto dello Sport, y traslación lineal en la bóveda diseñada por Christian Schätzke. En el Anexo 1 se muestran otros ejemplos de estructuras rígidas (entre otras) que tienen alguna similitud formal con la madera de cactus seca.

Fig. 26 Detalle interior del entramado de la cúpula del Palazzetto dello Sport junto a una fotografía macro de una flor de campo con patrón en espiral de las inflorescencias similar a una flor de girasol, Catalunya. ©Ludovica Rossi 2010, 2017



Fig. 28 Bóveda en hormigón armado con fibra de carbono, diseñada por Christian Schätzke: a) Vista desde abajo ©Martin Bechthold 2008; b) Croquis del prototipo módulo base. © Ludovica Rossi 2017



2.2.4 Neumáticos de bicicletas recuperados

La observación de ejemplos rígidos pone en evidencia la existencia de diferencias con el comportamiento de los modelos flexibles, donde la relación de fuerzas internas sea dinámica y no estática.

Un ejemplo de interés sobre modelos flexibles es la instalación HybGrid (Fig. 30), realizada por S. Felipe y J. Truco, en 2002-3 en la Architectural Association School de Londres (UK), compuesta por un entramado tridimensional en 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 tridimensional 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 propiedades de los materiales plásticos y manteniendo la continuidad de las fibras (Felipe y Truco, 2004).

Este modelo ha sido reproducido con franja de papel (Fig. 29) y de madera (Fig. 31) según la prueba realizada. Las limitaciones de estos materiales, comentadas en los párrafos anteriores, han llevado hacia la búsqueda de otras alternativas: modelos sucesivos han sido realizados en bandas de rodadura de neumáticos de bicicleta reutilizados. El material es compuesto y los tejidos textiles sintéticos internos ofrecen un límite a la deformación elástica del caucho, que constituye la banda neumática, si se compara con la goma que forma la cámara de aire de la bicicleta.



Fig. 29 Modelos en franjas de papel grueso con un doble nivel de urdimbre. La morfología permite generar un elemento dinámico por rotación en las esquinas. ©Ludovica Rossi 2015



Fig. 30 Vista general de la estructura HybGrid, realizada por S. Felipe y J. Truco, en 2002-3 a la Architectural Association School de Londres (UK). © AA Emergent Technologies and Design 2003



Fig. 31 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. © Ludovica Rossi 2011

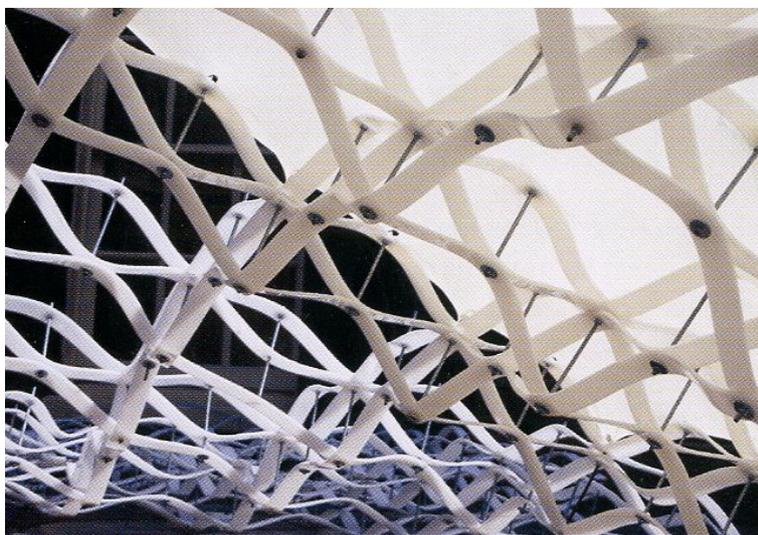


Fig. 32 Vista en detalle, desde abajo, de la estructura HybGrid, realizada por S. Felipe y J. Truco, en 2002-3 a la Architectural Association School de Londres (UK). © AA Emergent Technologies and Design 2003



Fig. 33 Modelos de un nivel de urdimbre en banda separadas por varillas metálicas. Las franjas centrales son en banda de rodadura de bicicletas reutilizadas y las externas en cámara de aire. © Ludovica Rossi 2011

En los experimentos con neumáticos de bicicletas se ha reproducido el ejemplo de la instalación HybGrid (Fig.32). Una primera prueba desarrolla un entramado con un único nivel de urdimbre (Fig. 33). Este está compuesto por una trama plana en bandas de neumáticos interconectadas con varillas metálicas y tornillos. Las varillas trabajan como actuadores externos para la separación de las bandas. Este modelo ofrece una primera aproximación a una malla flexible. En experimentos sucesivos se implementa el doble entramado que genera una malla en el espacio tridimensional (Fig. 34). Para superficies reducidas de la malla los elementos metálicos verticales permiten dar mayor rigidez a la carga vertical (Fig. 35); mientras para mayores extensiones, el comportamiento del entramado es similar a una membrana (Fig. 36). El sistema en su conjunto tiene una fuerza espacial cautivadora, sin embargo no es auto-portante y su realización es lenta por la complejidad de las intersecciones y el proceso manual de montaje.

En las fases sucesivas las pruebas abandonan la tipología del entramado tridimensional, y se desarrollan 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 y no en horizontal como en el caso del entramado tridimensional. Asimismo la configuración de la franja puesta en vertical mantiene también la orientación del canto de la fibra de la madera de cactus: tanto en la forma cilíndrica del esqueleto de cactus como en la forma plana de la pala de Opuntia.

Los modelos sucesivos simplifican el tipo del entramado y vuelven

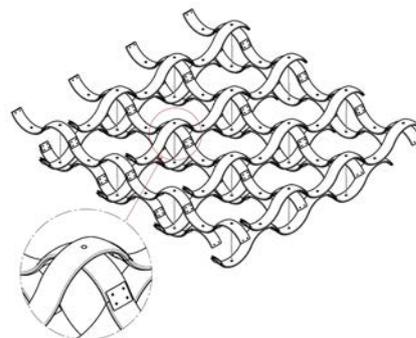


Fig. 34 Simulación de la trama de doble urdimbre (Software CATIA). © Ludovica Rossi 2012



Fig. 35 Modelo en bandas de rodadura de bicicletas con dos niveles de urdimbre y extensión 25x16 cm. ©Ludovica Rossi 2011

Fig. 36 (Adajo) Modelo en bandas de rodadura de bicicletas recuperadas con entramado tridimensional de dos niveles, trenzado en red rectangular y extensión malla 130x130 cm. © Ludovica Rossi 2012



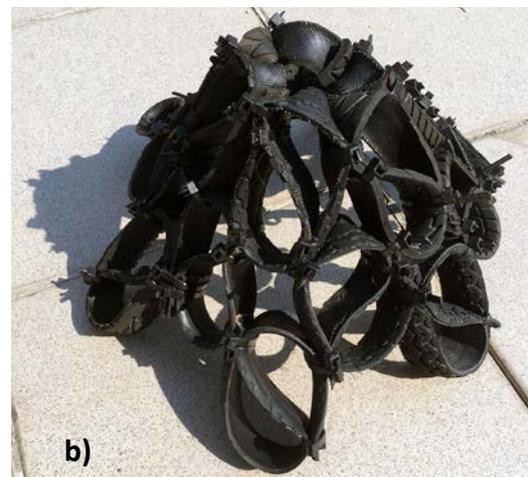
a reproducir los pasos realizados en las primeras pruebas en papel. La comparación entre los diferentes resultados obtenidos pone en evidencia el comportamiento altamente elástico y flexible de las bandas neumáticas. Este ofrece altas prestaciones de flexibilidad que permiten investigar las condiciones de los cambios morfológicos analizados en el tejido vivo del cactus.

En la sucesión de experimentos se define la deformación de las fibras como un elemento activo para determinar la morfológica del sistema. La combinación de las deformaciones asociadas a las franjas unidas entre ellas genera una red de elementos curvilíneos. El conjunto de las franjas, más o menos deformadas, y unidas entre ellas en un ritmo regular o aleatorio, construye una superficie que se extiende en el espacio tridimensional y que es posible definir como una malla o red. El resultado depende de la suma de sus elementos y asume diferentes configuraciones morfológicas según las deformaciones aplicadas a las franjas sean abiertas o cerradas (como se tratará en el capítulo sucesivo). Se individuaron dos tipología espaciales de mallas en flexión activa que varían según las deformaciones aplicada al elemento base: malla sinusoidal regular (Fig. 37) y modelos en franjas pre-deformadas (Fig. 38).

Fig. 37 (Derecha) Modelo de malla sinusoidal regular, puesta en tracción por cables desde sus vértices y en sentido hacia arriba y abajo. La superficie asume la forma de un paraboloido hiperbólico. ©Ludovica Rossi 2013



Fig. 38 (Abajo) Modelos en bandas pre-deformadas y unidas sucesivamente: **a)** Modelo en pétalos alternados y unidos según los paralelos de una cúpula; **b)** Modelo por sumatoria de franjas cortas pre-deformadas en S cerradas, la morfología general es similar a un conoide. © Ludovica Rossi 2015



2.3 SISTEMA DE UNIONES

El sistema de unión empleado incide en la relación entre las partes y en el comportamiento del modelo. El nivel de libertad de las uniones afecta las posibilidades de movimiento de los elementos entre ellos y de la morfología en general.

Valorando los materiales utilizados, la aplicación de diferentes tipos de uniones busca soluciones técnicas estándar, siguiendo los principios *Low Tech* para la aplicación de técnicas constructivas de fácil acceso y reproducción. El trabajo no desarrolla soluciones de encajes a medida y deja abierta, en lo posible, la compatibilidad con otros sistemas constructivos, junto a una relativa facilidad en la técnica de manipulación.

- **Grapas metálicas**

En los modelos de papel las uniones se realizan con grapas metálicas. Esta conexión trabaja como un encaje: las franjas se mueven juntas en el espacio y no hay variación de movimiento entre ellas en el punto de contacto. Esta solución favorece un comportamiento sólido del sistema, ofreciendo mayor rigidez.

- **Tornillos y tuercas**

Con otros materiales se han sustituido las grapas metálicas por tornillos o varillas metálicas y tuercas (Fig. 39), aumentando los grados de libertad del sistema. Este tipo de unión trabaja como una bisagra, permitiendo la rotación en el punto de contacto entre dos franjas, mientras se mueven juntas en el espacio. En los modelos en franjas de madera esta libertad es compensada o incide menos, en relación a la escala, por la rigidez del mismo material. Cuando esta unión se aplica en un material altamente flexible, como las bandas neumáticas, aumentan las deformaciones asumibles por el modelo, reduciendo el control sobre la configuración final. Las rotaciones internas entre los puntos de contacto de las franjas amplifican las posibilidades de movimiento de la franja y no participan en rigidizar el sistema.

- **Brida de plástico**

Para poder obtener una unión con menos posibilidad de movimiento entre las franjas en bandas de neumáticos se sustituyen tuercas y tornillos por bridas de plástico (Fig. 40), facilitando la construcción de los modelos. Estas uniones reproducen las dinámicas de una unión tipo encaje (similar a las grapas metálicas) donde las secciones enteras de las franjas, en el punto de unión, se mueven conjuntamente en el espacio según las deformaciones, pliegues o movimientos que la configuración morfológica esté pidiendo. Desde un cierto punto de vista permite “domar” el material.



Fig. 39 Modelo de una malla sinusoidal regular. Detalle de la unión con tornillos y tuercas que actúa como una bisagra en el punto de fijación entre dos fibras.
©Ludovica Rossi 2013



Fig. 40 Modelo franja pre-deformada en forma de pétalos alternados. Detalle de la unión con bridas de plástico que actúa como un encaje entre las secciones de las dos fibras en la zona de acoplamiento.
©Ludovica Rossi 2015



Fig. 41 Carrusel con caballo es neumático de motocicleta reutilizado, en la Fira de la Terra de Barcelona. © Ludovica Rossi 2012

2.4 LA BANDA NEUMÁTICA

En la búsqueda de que materiales utilizar para la construcción de los modelos, el encuentro con la goma ha sido en parte casual, quizás de forma similar al primer encuentro con la madera de cactus seca. Unos factores incidían previamente: la sostenibilidad implícita en el concepto de biomímesis y el interés en la aplicación de un metabolismo técnico (Fig. 41) como sistema paralelo a los ciclos biológicos (Braungart y McDonough, 2005). Por lo cual la investigación se ha orientado a materiales no biodegradables de la tecnosfera: metales, plásticos, etc.

En este ámbito teórico utilizar un material recuperado para la construcción de los modelos permite reinterpretar el concepto de simbiosis para buscar nuevas interacciones entre arquitectura y otras áreas de la tecnología. La integración de procesos entre ellos supuestamente separados representa una posibilidad de cambio para el desarrollo de nuevos modelos sostenibles. El trabajo participa en la búsqueda de conexiones entre la construcción y la industria de la automoción, evaluando la tecnosfera en forma sistémica (Capra, 2006; Braungart y McDonough, 2005). El uso de la banda neumática de bicicleta ha permitido trabajar con un material flexible de origen recuperado, reduciendo el impacto del material empleado a lo largo de la investigación.

Los modelos a pequeña escala emplean la banda de rodadura de las bicicletas para la reproducción de la fibra elástica. La banda de rodadura se compone por la carcasa construida por diferentes entretejidos sintéticos (nylon) y una mezcla de goma que varía según las prestaciones del neumático en relación al tipo de terreno (Fig. 42). El material en su conjunto es muy flexible por las características de la goma, mientras el tejido textil en su interior proporciona una cierta rigidez. A efecto del comportamiento en los modelos, el material textil ofrece un límite a la deformación elástica de la goma.



Fig. 42 La cubierta de una bicicleta para neumáticos con cámara de aire se compone principalmente de las siguientes capas: **a)** la carcasa compuesta por diferentes tejidos recubiertos de goma; **b)** los flacos laterales con una capa extra reforzada, **c)** la banda de rodadura; **d)** según el modelo puede tener una capa adicional de protección antipinchazos, **e)** los aros del borde que aseguran el ajuste del neumático a la llanta. © Bike 2018

A una mayor escala de aplicación, el uso de la banda de bicicleta permite formular la hipótesis de utilizar neumáticos de otros tipos de vehículos (moto, auto, camión, etc.). El tejido interno textil de las bandas de rodadura de las bicicletas, que en el caso de los coches es en material metálico y sintético, es un componente importante que permite aumentar la rigidez de la goma. Se examinan unas propiedades del Neumático Fuera de Uso (NFU) de los vehículos turísticos para verificar su aplicación a una escala mayor.

La composición de los neumáticos es compleja y está diseñada de acuerdo con los altos requisitos técnicos de adhesión,

flexibilidad, fuerzas y presiones, que son necesarios para su funcionamiento. La estructura química reticulada del caucho, la gran cantidad de estabilizadores y otros aditivos presentes en las formulaciones de neumáticos, los convierten en un material no biodegradable, no respetuoso con el medio ambiente (Cañavate at all, 2011). Por ser un material obtenido principalmente como derivado del petróleo, por su proceso de fabricación y por su difícil reciclaje, los neumáticos son residuos con legislación específica de los cuales hay que garantizar su recogida y gestión (Real Decreto 1619/2005, del 30 de diciembre). Los neumáticos tienen una vida útil limitada debido a su uso, donde su reciclaje y/o recupero permiten un ahorro de emisiones contaminantes a la atmósfera en cantidades significativas (Tablas 2.3, 2.4).

El caucho de los neumáticos es una goma que une esencialmente el Caucho Natural (NR) con el Caucho Estireno Butadieno (SBR) junto a otros aditivos que modifican sus características y comportamiento. El caucho natural es un material termoplástico que se ablanda al calentarse y que vuelven a endurecer al enfriarse y que puede ser reciclado. El caucho es fácil de estirar, lo que significa que tiene baja rigidez. En el mismo caucho, una tensión de 1 MN/m² dividida por una deformación de 0,1 da una rigidez de 10 MN/m² (Vogel, 2000). Esto indica que la baja resistencia a la tracción del caucho lo hace inadecuado para aplicaciones estructurales flexibles, aunque su naturaleza obediente haría esperar que sea apropiado. En comparación, el acero es más fuerte y ofrece una alta resistencia a la tracción, pero también es comparablemente rígido. Es más difícil de estirar en proporciones similares y ciertos tipos de acero necesitan una tensión de hasta 20.000 MN/m² para un alargamiento del 10%, lo que significa una rigidez de 200.000 MN/m² (Vogel, 2000). Como resultado, ninguno de estos dos materiales (caucho y acero) de forma individual puede ser realmente considerado como una opción favorable para el diseño en flexión activa (Lienhard at all, 2014).

A continuación se tratan algunas características generales del neumático como material intentando especificar en lo posible las propiedades mecánicas de la banda de rodadura de un neumático de turismo. Por otra parte cabe aclarar que otros aspectos característicos de los neumáticos no son tratados por la naturaleza del presente trabajo que no investiga sus prestaciones en el ámbito automotriz.

2.4.1 Propiedades elastómeros (caucho natural y sintético)

El neumático es un componente de la rueda de un vehículo. Este está compuesto de partes realizadas con diferentes materiales que cumplen diferentes funciones (Tabla 2.5). La banda de rodadura es la parte plana que entra en contacto con la

Estimación Impacto Ambiental Neumáticos Nuevos (turismo)		
Gasto energético por unidad		
	MJ/ud	L petróleo
materiales	560,3	15,52
fabricación	287,66	7,98
Total Gasto	847,96	15,52
Emisiones CO ₂ por unidad		
	Kg/CO ₂ /ud	
materiales	40,89	
fabricación	22,75	
Total Emisiones	63,64	

Tabla 2.3 Estimación del impacto ambiental por unidad neumático nuevo tipo turismo. Fuente: Sánchez y Guzmán, 2013.

Intensidad energética materiales	
Componentes	Energía Primaria MJ/Kg
Caucho Natural	9,30
SBR	87,20 - 119,80
Polibutadieno (BR)	55,63 - 86,70
Carbón Black	99,50 - 126,80
Aceite Plastificante	42,0
Sílice y Otros	0,38
Acero	25,0
Textiles	43,5
Otros	49,6
Emisión de CO ₂ fabricación	
Materiales	Emisiones Kg CO ₂ /Kg
Caucho Natural	0,4
Caucho Sintético	5,0
Carbón Black	5,7
Otros Aditivos	8,2
Acero	3,2
Textiles	2,1

Tabla 2.4 Impacto ambiental de los materiales que componen un neumático nuevo tipo turismo. Fuente: Sánchez y Guzmán, 2013.

Composición	Función
Caucho (natural y sintético) 45÷47 %	Tensión estructural
Negro de humo (carbono) 21,5÷22 %	Propiedades físicas mejoradas
Acero (tejido y anillo) 16,5÷25 %	Esqueleto estructural
Textil (vehículos turismo) 5,5%	Esqueleto estructural
Óxido de zinc 1÷2%	Catalizador
Azufre 1%	Agente de vulcanización
Adictivos 5÷7,5%	

Tabla 2.5 Composición de un neumático tipo turismo en porcentaje sobre el peso (valores medios) y sus funciones. Fuente: Ramos et al, 2011

superficie y, por tanto, es la zona que más desgaste sufre de todo el neumático (Tabla 2.6, 2.7). Esta se define como un material no homogéneo, compuesto por fibras de acero y textiles dentro de una mezcla de caucho (natural y sintético) y otras partículas entre las cuales las más relevantes son el azufre y el negro de humo. En este aspecto las bandas de neumáticos, desplegadas y conectadas, constituyen una faja con una cantidad importante de acero protegido por un revestimiento suficiente de caucho que evita su oxidación (Mañà, 1993).

Una característica en los neumáticos es su estructura molecular ligeramente entrecruzada, donde la deformación causada por la aplicación de un esfuerzo de tracción origina el enderezamiento, desplegando y alargando las cadenas de polímeros en la dirección del esfuerzo de tracción. Tras eliminar el esfuerzo, las cadenas recuperan la configuración original (Callister, 1996). El proceso de entrecruzamiento se obtiene mediante vulcanización, una reacción química irreversible y que se lleva a cabo en general a temperaturas de unos 150º aprox. Este tratamiento químico aumenta la elasticidad y disminuye la plasticidad. Esto permite experimentar grandes deformaciones bajo esfuerzos y volver a su estado original una vez que este cese (Cruz Cal at. all, 2012). La mezcla de goma se componen también de diferentes aditivos entre los cuales cabe mencionar el azufre, que participa en el proceso de vulcanización, y el negro de humo (formado de partículas muy pequeñas de carbono), que aumenta la tenacidad y la resistencia a la tracción, a la torsión y al desgaste. Las propiedades de la goma en los neumáticos dependen del grado de vulcanización, del tipo y porcentaje de aditivos que componen la mezcla. En cualquier caso, más allá de las características específicas de una mezcla, la goma de los neumáticos es un elastómero: un polímero vulcanizado capaz de recuperar su forma inicial después de haber experimentado deformaciones considerables bajo la acción de fuerzas externas y de temperaturas de trabajo elevadas (Cruz Cal at. all, 2012).

Cuantificación del peso de cada parte en el neumático		
Neumático nuevo turismo modelo: 195/65 R15		
	Kg	%
Carcasa	4,0	53,30
Banda de rodadura	3,5	46,70
Total	7,5	100

Tabla 2.6 Porcentaje sobre el peso de la banda de rodadura y de la carcasa de un neumático radial nuevos tipo turismo modelo 195/65 R15. Fuente: Sánchez y Guzmán, 2013.

Los elastómeros, como el caucho, exhiben un comportamiento no lineal caracterizado por deformabilidad hiperelástica. Normalmente, la extensibilidad máxima del caucho puede alcanzar valores que varían de 500% a 1000% de alargamiento y la curva de tensión-deformación típica en trabajo es marcadamente no lineal, de modo que la ley de Hooke no se puede aplicar y no es posible asignar un valor definido al módulo de Young excepto en la región de pequeñas deformaciones (Z. Guo y L. J. Sluys, 2008). Para los compuestos de la banda de rodadura de los neumáticos, la resistencia a la tracción habitual estará en el intervalo de 17,236 a 27,579 MPa, el módulo de Yuong entre 6,894 y 11,721 MPa en un rango de elongación del 300 % y con un alargamiento de rotura en el rango de entre el

400% y el 600 % (Clark, 1971).

El gráfico 1 muestra la curva esfuerzo-deformación de tres tipos de comportamientos diferentes en los polímeros: la curva A con un comportamiento frágil que se rompe cuando deforma elásticamente y define los plásticos rígidos; la curva B define los plásticos flexibles que tienen un comportamiento más parecido a los metales con una deformación elástica seguida de una deformación plástica; la curva C propia de los elastómeros, como el caucho vulcanizado, muestra un comportamiento totalmente elástico donde por pequeños esfuerzos se obtienen grandes deformaciones recuperables. En este caso el módulo de elasticidad, además de ser pequeño en comparación a otros materiales, varía con la deformación, y la grafica esfuerzo-deformación no es lineal.

En el gráfico 2 se observa la curva de tensión-deformación de una muestra elastomérica definida por magnitudes principales. Los ensayos realizados sobre una probeta normalizada con forma de halterio con un espesor de 2 mm aproximadamente, una longitud de ensayo es de 20 ± 0.5 mm y con una anchura en la sección estrecha de la probeta de 2.0 ± 0.2 mm, de acuerdo con la norma UNE-ISO 37:2011. La velocidad de deformación es de 500 mm/min de manera constante hasta la rotura de la probeta (Alonso Malmierca, 2013). La gráfica correspondiente muestra cómo en las curvas de tracción de materiales elastoméricos no es posible medir un único valor módulo de Young, puesto que la

Composición porcentaje fórmula estándar neumáticos tipo turismo	
Fórmula Goma Banda de Rodadura	
Caucho Natural	8,5
SBR	22,0
Polibutadieno (BR)	11,0
Carbón Black	32,0
Aceite Plastificante	21,0
Otros	5,5
Goma Sintética	91,5
Fórmula Goma Flanco	
Caucho Natural	25,0
Polibutadieno (BR)	35,0
Carbón Black	33,0
Aceite Plastificante	2,0
Otros	5,0
Goma Sintética	75,0

Tabla 2.7 Diferencia entre la composición en porcentaje entre la goma de la banda de rodadura y el flanco del neumático. Fuente: Sánchez y Guzmán, 2013.

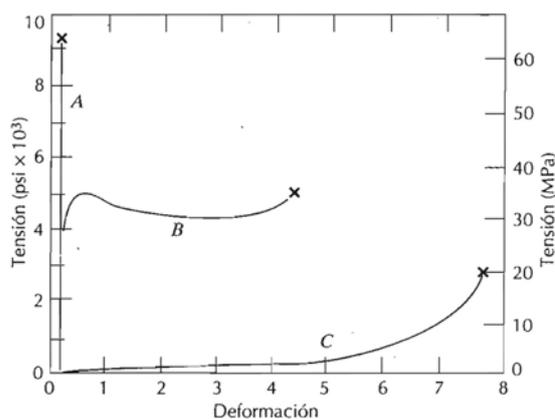


Gráfico 2.1 Curva esfuerzo-deformación de tres tipos de polímeros: A) Comportamiento frágil, se rompe cuando se deforma elásticamente y define los plásticos rígidos; B) Comportamiento parecido a los metales con una deformación elástica seguida de una plástica que define los plásticos flexibles; C) Curvatura elastómeros, comportamiento elástico donde por pequeños esfuerzos se obtienen grandes deformaciones recuperables. Fuente: Callister, 1996

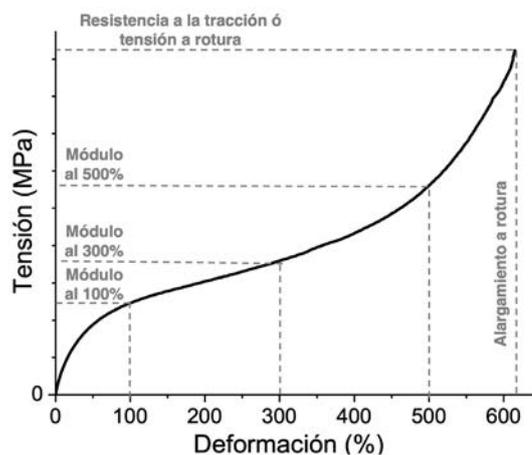


Gráfico 2.2 Curva de tensión-deformación de una muestra elastomérica: ensayos sobre una probeta normalizada con forma de halterio, espesor 2 mm, longitud 20 mm y ancho 2 mm - velocidad deformación constante de 500 mm/min hasta rotura. La pendiente de la curva de tracción varía según la deformación, el material tiene un comportamiento no lineal, y el modulo de Young se define en porcentaje sobre la deformación. Fuente: Alonso Malmierca, 2013

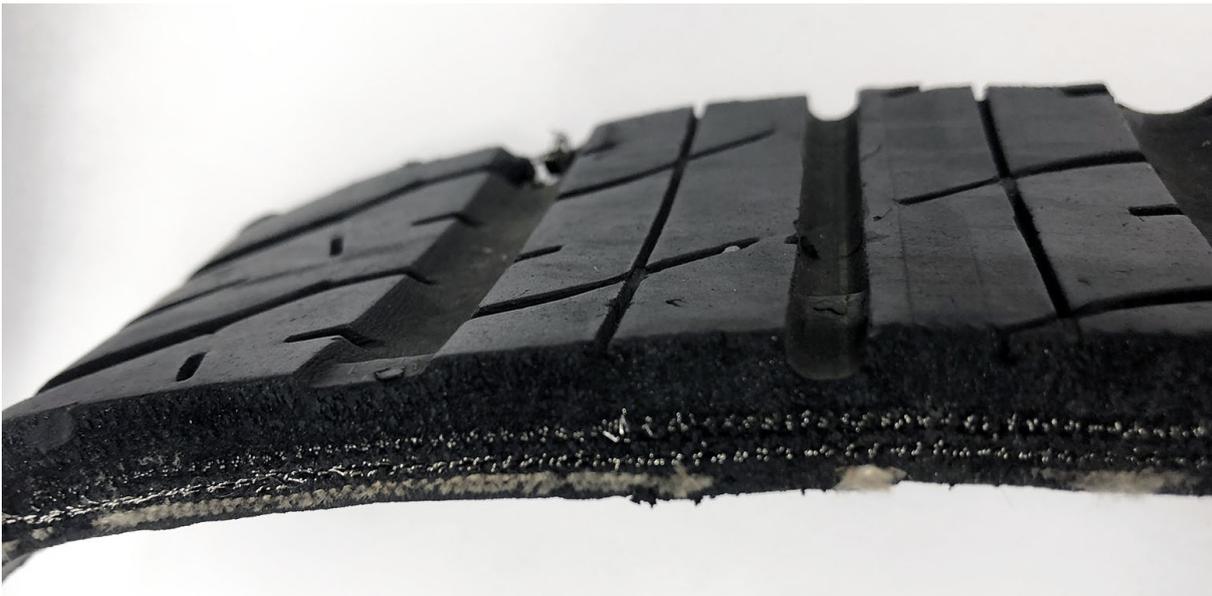
relación esfuerzo-deformación no sigue una relación lineal y por tanto, como se ha comentado antes, no se sigue la ley de Hooke. Por convención se indica el esfuerzo o tensión en determinados porcentajes de deformación longitudinal, como el esfuerzo al 100%, 300% y 500% de alargamiento de la longitud inicial.

2.4.2 Propiedades banda de rodadura (NFU)

La banda de rodadura del neumático es reforzada con fibras textiles y de acero, usualmente en forma de hilos, que aportan resistencia (Fig. 43). La disposición u orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen radicalmente en la resistencia, donde las mejores propiedades se consiguen con la distribución uniforme de las fibras (Callister, 1996). La mayoría de los neumáticos de turismo son radiales (Fig. 44), donde la distribución de las bandas de cables están colocadas en un patrón de forma perpendicular a la dirección de rodamiento y radialmente. Los neumáticos radiales consisten en un mínimo de 4 capas de 2 cinturones de acero o textiles colocados por debajo de la banda de rodadura. Estos cinturones, colocados en la parte superior del neumático, dan estabilidad a la banda de rodadura con una mayor rigidez en esta área (Maña, 1994).

La mezcla de caucho trabaja como fase matriz del material compuesto con fibra (metálicas y sintéticas). Esta, une las fibras y actúa como medio que distribuye y trasmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados. Solo una pequeña fracción del esfuerzo es resistido por la mezcla (Fig. 45). Además, la matriz debe ser dúctil y, por otra parte, el módulo elástico de la fibra debe ser mucho mayor que el de la matriz (Callister, 1996).

Fig. 43 Corte transversal de la banda de rodadura de un neumático fuera de uso para vehículos tipo turismo. © Ludovica Rossi 2018



En la búsqueda de datos relativos a la resistencia y comportamiento de los neumáticos fuera de uso se han analizado 4 estudios diferentes en los cuales se realizaron pruebas a tracción de bandas de rodaduras usadas (más información en el Anexo 2). Estos se han desarrollado con diferentes objetivos, en diferentes zonas geográficas entre el 1993 y el 2011. Los ensayos se realizan sobre banda de rodadura de neumáticos fuera de uso indicando la tensión de tracción máxima alcanzada en los pruebas. Únicamente dos son los estudios más completos en relación a los datos de: las medidas de los testigos, la carga máximas y el módulo de Young en función del alargamiento de la prueba.

Según la investigación “*Caracterització, Propostes d’Utilitzacions i Recomanacions d’Ús per als Pneumàtics Vells com a Material de Construcció*” realizado entre los años 1993/1994 en el Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITeC), responsable proyecto prof. arq. Fructuós Mañà i Reixach, los resultados finales se determinaron por estudio estadístico y se proponen un valor de resistencia a tracción de las bandas de rodadura de neumáticos de 100 Kg/cm² (9,806 N/mm²) como valor característico. El módulo de deformación se ha calculado sobre 5 testigos con un alargamiento del 5% y el valor propuesto para el módulo de Young es de 3.000 kg/cm² (294,20 N/mm²) como valor próximo a la media.

El estudio “*A comparison study on the tensile strength of fibreglass and scrap tire*” realizado por de A. Safari, F. Ahmad y A.S. Yahya en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Sains Malaysia (publicado en World Applied Sciences Journal, volumen 15 núm. 4 en enero 2011), realiza ensayos a tracción de 6 muestras de neumáticos radiales desechados. El modelo del neumático es 175/70 R13. Los resultados de la prueba de tracción de las bandas de rodaduras de los neumáticos muestran un valor medio de carga máxima a tracción de 21,07 kN con una desviación típica de 1,87 kN. El análisis estadístico indica que la probabilidad mayor de rotura es por una carga a tracción de 19,20 kN con una probabilidad del 99,7%. Los valores medios de la tensión de tracción máxima y el módulo de Young (E), resultaron ser respectivamente 19,04 MPa y 165,96 MPa (alargamientos de las muestras entre el 12% y 15%).

Este estudio muestra la curva tensión-deformación (Gráfico 2.3) de la prueba número 3 sujeta a una tensión de tracción a una velocidad de deformación establecida en un 10% por minuto. Se observa que la deformación elástica no es lineal y la curva experimenta un fenómeno de discontinuidad de fluencia. La transición elastoplástica ocurre de forma abrupta superado el 10% de estiramiento aproximadamente y llegando a unos 20



Fig. 44 Elementos neumáticos radial tipo turismo: **1)** Revestimiento de goma interior, capa de caucho sintético estanca al aire; **2)** Carcasa, una estructura flexible formada por hilos (textiles o de acero) embutidos en la mezcla de goma, y un neumático de turismo se compone por unos 1400 cables; **3)** Zona baja; **4)** Aro de talón formado por un cable de acero inextensible; **5)** Flanco; **6)** y **7)** Lonas de cima, están constituidas por cables metálicos revestidos de goma. Se posicionan sobre la carcasa formando un cinturón que garantiza la resistencia mecánica del neumático a la velocidad y a la fuerza centrífuga; **8)** Banda de rodadura, parte en contacto con el suelo formada por una capa de goma. © Michelin 2018

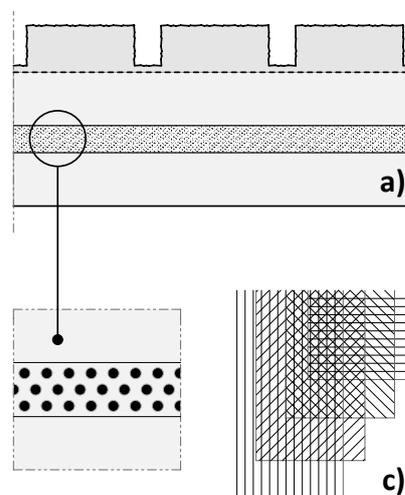
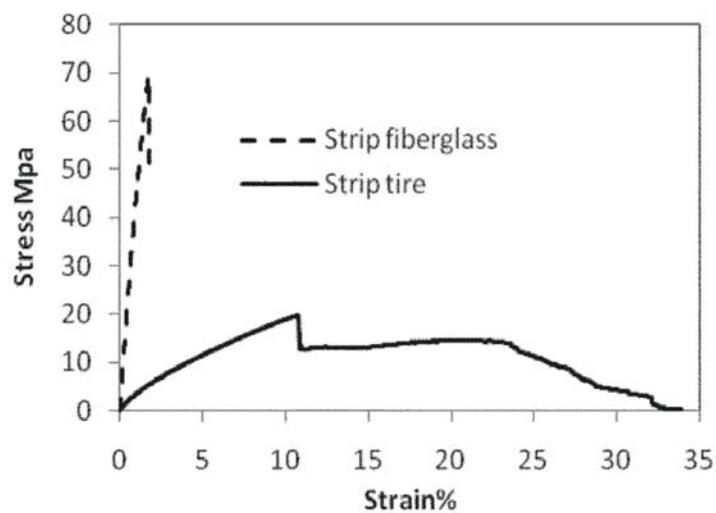


Fig. 45 La banda de rodadura puede ser evaluada como un material compuesto: **a)** De capas paralelas de goma y tejidos metálicos y textiles donde el proceso de vulcanización funde la mezcla de la goma que trabaja como fase matriz; **b)** Las fibras quedan incrustadas en la matriz de goma; **c)** Las tramas de sus hilos, en un neumático tipo radial, se cruzan oblicuamente y el cruce con los de la carcasa forma triángulos indeformables, que garantizan la rigidez de la banda. © Ludovica Rossi 2018

MPa de tensión máxima. Se deduce que la zona de deformación elástica es hasta un 10% del estiramiento. La zona de fluencia se encuentra llegando a unos 20 MPa de tensión y se desarrolla rápidamente (con variación de deformación casi ausente). Luego, el testigo experimenta una deformación superior al 30% de elongación sin aumentar ni superar la tensión máxima previa al punto de fluencia, hasta llegar a la rotura. En la deformación plástica se observa que superado algo más del 10% y hasta superar un 20% de elongación, el material retoma tensión para seguir deformándose. El endurecimiento por deformación de esta fase del gráfico tiene reducida variación de curvatura, y no hay modificaciones significativas de tensión. Al llegar al 35% de estiramiento se produce la rotura del testigo.

Gráfico 2.3 Curva tensión-deformación de una prueba a tracción de banda de rodadura NFU: la deformación elástica no es lineal y la curva experimenta un fenómeno de discontinuidad de fluencia. La transición elastoplástica ocurre de forma abrupta superado el 10% de estiramiento aprox. llegando a una tensión máxima de unos 20 MPa. Luego, el testigo experimenta una deformación superior al 30% de elongación sin aumentar ni superar la tensión máxima previa al punto de fluencia. Llegando aprox. al 35% de estiramiento hay la rotura del testigo. Fuente: Safari at all, 2011



Comparando los gráficos 1 y 2 de la curva tensión-deformación de los elastómeros con el gráfico 3 de la banda de rodadura, hay un incremento de la rigidez con un aumento del módulo de Young, debido a las fibras metálicas y textiles que trabajan como una armadura interior. Por otra parte no hay un aumento significativo de la resistencia a tracción. La mezcla de caucho protege y envuelve las fibras internas determinando el límite del enlace en el compuesto químico. En la valoración de los datos obtenidos, y comparando las pruebas a tracción de los estudios hallados, se observa que:



Fig. 46 Tienda de cestas y cubos de varios tipos obtenidos de neumáticos reutilizados, en la Medina de Marrakech (Marrueco). ©Ludovica Rossi 2018

- Trabajar con materiales recuperados de diferentes origen determina una variación en las medidas y el desgaste del material que incide en la variedad de los resultados.
- Las condiciones de almacenamiento previo inciden en las propiedades del material (Nedal at all, 2006).

- La sección de la banda de rodadura no es homogénea, en general por mayor sección aumenta la resistencia a tracción.
- Hay variaciones significativas en los resultados de la prueba de elongación. Una posible razón es que las secciones transversales de las muestras no son uniformes por los surcos en la banda de rodadura, lo que da como resultado una deformación no uniforme a lo largo de la longitud de las muestras (Nedal at all, 2006).
- Entre los testigos comparados, los coeficientes de variación son elevados con resultados no homogéneos entre ellos.
- Mayores valores de resistencia a tracción no significan un mayor valor del módulo de Young, ya que éste depende también del alargamiento máximo del testigo, previo a la rotura. Quizás esto se deba a una variación en el tiempo de la mezcla de caucho, en el proceso de vulcanización, y en el dibujo de la banda de rodadura que con sus ranuras puede hacer variar el comportamiento de la deformación.



Fig. 47 Testigo de banda de neumático fuera de uso (NFU) modelo 175/70 R13 en la prueba de resistencia a tracción. La tensión de tracción es aplicada a una velocidad de deformación establecida en un 10% por minuto hasta la rotura de la prueba. © Safari at all, 2011

Por los resultados obtenidos en los testigos (Fig. 47) de las pruebas a tracción recopiladas se ha calculado la media ponderada para ofrecer unos resultados globales más cercanos a los valores medianos de los resultados. De esta forma los valores propuestos consideran la incidencia de cada testigo sobre el total equilibrando la desviación observada. La carga máxima de rotura se aproxima a los 19,47 kN con un coeficiente de variación del 49%. La media ponderada de la tensión máxima de tracción resultante es de 20,45 MPa, aunque parece excesiva en comparación con los valores propuestos por los estudios recopilados. Un valor medio más probable parecen ser 19,04 MPa según el estudio realizado por A. Safari, F. Ahmad y A.S. Yahya (2011). Este valor es bastante coincidente con la media aritmética de la investigación realizada en los años 1993-1994 por el Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITeC). Por otra parte este estudio aplica una reducción de la resistencia a tracción de los neumáticos proponiendo el valor característicos de 9,80 MPa (100 Kg/cm²). Esta variación es pertinente considerando los resultados muy variables, el comportamiento de deformación no lineal y la discontinuidad de fluencia de este material. El módulo de elasticidad varía según el estiramiento considerado. Los resultados en testigos con un alargamiento de un 14% aprox. proponen un valor medio 165,97 MPa (Safari at all, 2011), valor que aumenta a 329 MPa en alargamientos del 6% (Fructuoso Maña, 1994) y donde el valor propuesto es de 294,20 MPa (3.000 Kg/cm²). En la comparativa de los testigos de los estudios analizados la media ponderada



Fig. 48 Estructura similar a un iglú en neumáticos recuperado, zona de juego para niños en CSOA Forte Prenestino, Roma © Ludovica Rossi 2019

Tabla 2.8 Resumen características de la resistencia a la tracción y elasticidad de la banda neumática (NFU) según los porcentajes de estiramiento. Valores de resistencia a la tracción y módulo de Young de otros materiales como polímeros, metales y fibras naturales. La resistencia a la tracción de la banda está dada por la mezcla de caucho que determina el límite del enlace en el compuesto químico y se observa un incremento del módulo de Young, en comparación a la elasticidad de la goma, por las fibras metálicas y textiles internas que trabajan como una armadura. Para la estructura de flexión activa, un material apropiado debería ofrecer una alta resistencia a la tracción y baja rigidez. La banda de rodadura parece ser suficientemente obediente por la alta flexibilidad pero la resistencia a tracción es muy baja en comparación a otro materiales. Fuentes datos: (1) Ashby, 2005 - (2) Clarck, 1971 - (3) Gengnagel y Hernández, 2014

da un valor de 277,49 MPa con una desviación del 49% entre 11 testigos con alargamiento entre un 5% y un 15%.

Los valores obtenidos se consideran válidos para comprender y comparar el comportamiento de la banda de rodadura de los neumáticos fuera de uso como material no convencionalmente (Fig. 48) utilizado en estructuras arquitectónicas respecto a otro materiales utilizados normalmente. Los valores de resistencia a tracción y módulo de elasticidad obtenido por recopilación y comparativa de estudio bibliográfico son significativamente más bajos de los materiales convencionales (Tabla 2.8). Asimismo dada la falta de homogeneidad de los valores encontrados y el origen de la información sobre las bandas neumáticas utilizadas para las pruebas no se consideran válidos los valores finales propuestos para un estudio de carga de un modelo específico. Por la morfología bio-inspirada desarrollada en este estudio la incidencia de la resistencia obtenida por geometría es mayor que la resistencia mecánica propia del material, como se tratará más en detalle en el próximo capítulo.

Banda Rodadura Neumáticos			
Carga máxima kN	Resistencia a tracción Mpa	Módulo Young (E) Mpa	Elongación
19,47	19,04	294,2	5%
		165,96	12% - 15%

Otros Materiales		Resistencia a tracción Mpa	Módulo Young Mpa
Polímeros Elastómeros	Caucho natural (NR) ¹	22 - 32	1,5 - 2,5
	Caucho sintético ¹	5 - 10	1,0 - 2,0
	Caucho Banda Rodadura ²	17,58 - 27,58	6,89 - 11,72
	Neopreno (CR) ¹	3,4 - 24	0,7 - 2,0
Polímeros Termoplásticos	PVC ¹	40,7 - 65,10	2.140 - 4.140
	Poliestireno (PS) ¹	35,9 - 56,5	2.280 - 3.340
	Nylon (PA) ¹	90 - 165	2.620 - 3.200
Polímeros Reforzados	Fibra de carbono (CFRP) ³	2.070 - 2.800	131.000 - 165.000
Metálicos	Aceros ¹	345 - 580	200.000 - 215.000
	Aluminio ^{1 3}	58 - 550	68.000 - 82.000
Naturales	Bambú 1-5 años ³	119 - 185	8.680 - 13.410
	Bambú Laminado ³	113 - 125	10.899 - 12.145
	Madera (fibra transversal) ¹	60 - 100	6.000 - 20.000

2.5 LA ESCALA DE LOS MODELOS

La escala del modelo, sus dimensiones globales y las proporciones entre las partes inciden en el comportamiento de la forma obtenida. A dimensiones diferentes un mismo modelo puede comportarse de maneras diferentes, por lo cual en el análisis y valoración de los resultados obtenidos hay que evaluar que con un cambio de escala hay factores que inciden diversamente. El efecto de la escala no depende del objeto en sí, sino de su relación con todo el mundo físico que lo rodea. *La naturaleza siempre opera respetando las escalas, y todas las cosas tienen su tamaño adecuado* (Thompson, 1969, 24).

Las bandas en neumáticos reutilizados tienen un altura de entre 2 y 3 cm según que las bicicletas sean de carretera o de montaña. Algunas maquetas se han realizado cortando a la mitad las bandas de rodadura, por lo cual se han empleado fibras con un canto entre un mínimo de 1 cm y un máximo de 3 cm.

En el caso de uno de los modelos en malla regular sinusoidal, la construcción se ha realizado con un total de 16 fibras, de 22 cm de largo, con un canto de 1 cm y con uniones cada 3,5 cm aprox. (Fig. 49). La superficie plana que ocupa la malla no tensada es de 22x11 cm. Al tensar la malla en sus cuatro vértices, aplicando una doble curvatura, ésta asume la configuración de un paraboloides hiperbólico. La superficie cubierta aumenta y

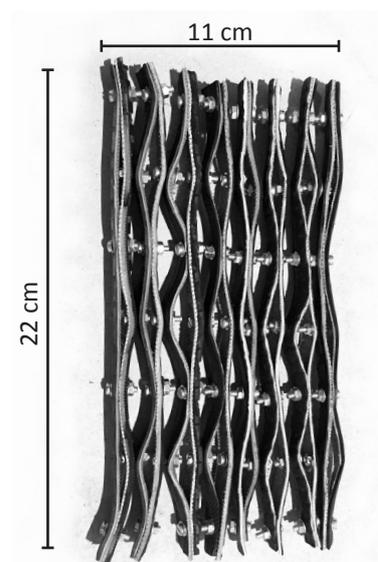


Fig. 49 Malla sinusoidal regular en posición cerrada sin aplicación de esfuerzos de tracción externos: altura de las franjas 1 cm, y núm. total de franjas 16. © Ludovica Rossi 2013/2018

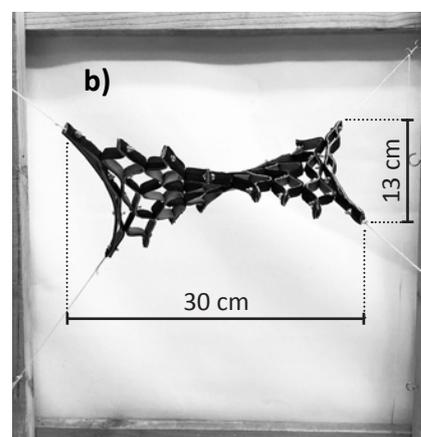
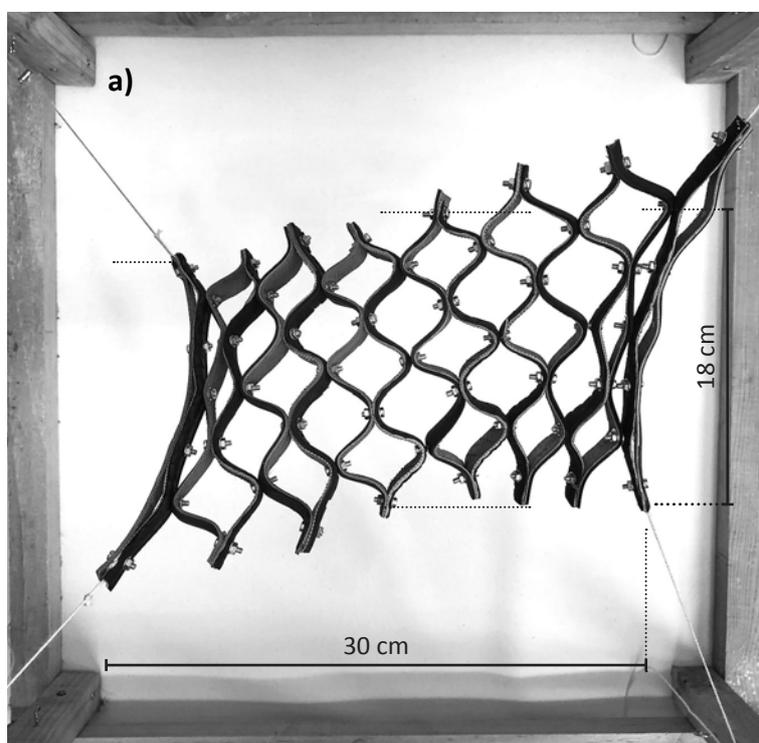


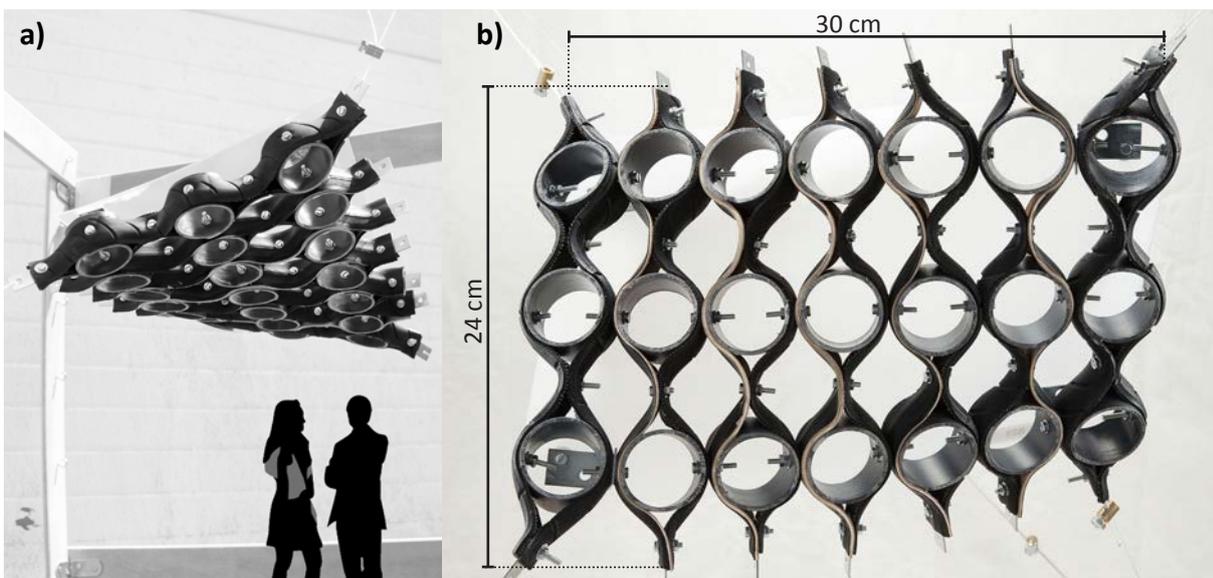
Fig. 50 Malla sinusoidal regular en posición abierta puesta en tracción desde sus cuatro vértices siguiendo la forma de un paraboloides hiperbólico: **a)** Vista en planta desde arriba; **b)** Vista frontal. © Ludovica Rossi 2013/2018

ocupa en el largo unos 30 cm y el ancho es entre un mínimo de 18 cm y un máximo de 20 cm (Fig. 50a). La superficie ocupada por la malla cerrada es de 242 cm², mientras la malla abierta ocupa una superficie de 540 cm², un incremento equivalente a poco más de un 223%. La deformación se produce en el espacio tridimensional, y la altura que ocupa es de unos 13 cm (Fig. 50b) entre el punto inferior y superior del paraboloides hiperbólico (dependiendo de la rotación final aplicada). El modelo es de dimensiones relativamente pequeñas: aplicando una escala de 1:10, las bandas de neumáticos serían de unos 10 cm de alto y se obtendría una superficie mínima cubierta de 3,00x1,80 m, equivalente a 5,40 m².

Otro modelo (Fig. 51a) ha sido construido con franjas de 2 cm de alto, un largo de unos 26 cm y un total de 14 fibras. Manteniendo la hipótesis que la escala de aplicación es 1:10, el neumático a tamaño real sería de unos 20 cm de alto por 2,60 m de largo. La superficie cubierta obtenida sería de 7,20 m² equivalente a la malla abierta de 3,00x2,40 m (Fig. 51b).

En los modelos en mallas regulares sinusoidales, la banda de rodadura de bicicleta está tratada como un elemento resistente a tracción. Al formular la hipótesis de utilizar la banda de rodamiento del neumático de vehículos para la construcción de un prototipo a mayor escala, hay que considerar este material para un sistema tipo membrana. Por la amplia gama de neumáticos existentes y para mantener unos valores coherentes es posible plantear el uso del neumático de turismo 195/65 R15 con un largo total de la banda de rodadura de 1,90 m aprox. y un ancho de unos 20÷25 cm. A mayor extensión de

Fig. 51 Malla sinusoidal regular con actuadores externos cilíndricos, altura de las franjas 2 cm, número total de franjas 14: **a)** Vista frontal malla puesta en tensión según la forma de un paraboloides hiperbólico; **b)** Vista en planta desde abajo de la malla puesta en tracción desde sus cuatros extremos. © Ludovica Rossi 2013

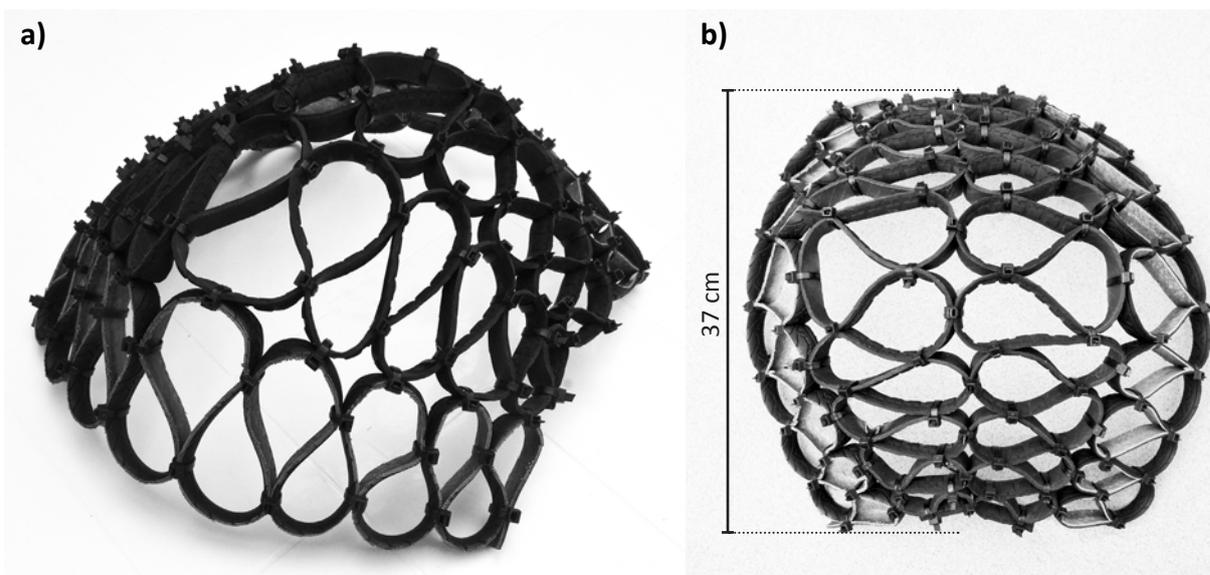


la malla, mayor flexibilidad tendrá el sistema y mayor serán los esfuerzos a aplicar para tensar la superficie de la malla. Por otra parte, el neumático es un material que tiene un peso de aproximadamente entre 7 y 9 kg. Si se evalúa únicamente la banda de rodadura, esta corresponde a un 47% del peso total aproximadamente equivalente a 3,50 y 4,20 Kg. Si se evalúa un largo de 2,00 m aprox. el peso de la banda por metro lineal es de $1,75 \div 2,10$ Kg. Al variar la escala de construcción del modelo el peso del material incidirá de forma diferente. Cuanto más grande es el sistema, más importante es la gravedad en relación con otras fuerzas (Vogel, 2006).

El modelo de la cúpula (Fig. 52a) construida en franjas pre-deformadas tiene una altura de unos 15 cm, la medida mayor de la base llega a unos 37 cm (Fig. 52b) y la franja de neumático tiene un canto de 1,5 cm. En una escala 1:50 la cúpula tendría una altura de 7,50 m y una superficie en planta de unos 230 m². La aplicación directa de una escala mayor para este modelo genera dudas sobre el uso de los neumáticos de vehículos. Por un lado por la relación de escala entre la sección de la franja y las medidas globales del modelo a una escala real, y por otro por la dificultad de manipular el neumático de auto. Cabe aclarar que existen máquinas que cortan la banda, actualmente empleadas en el proceso de troceado de los neumáticos en fase de reciclado, y que permitirían obtener la forma de la fibra.

Con un aumentado de la escala de los modelos la mayor incertidumbre está ligada a la incidencia al peso del material en relación al comportamiento estructural. La influencia de los factores físicos depende en gran medida del tamaño del

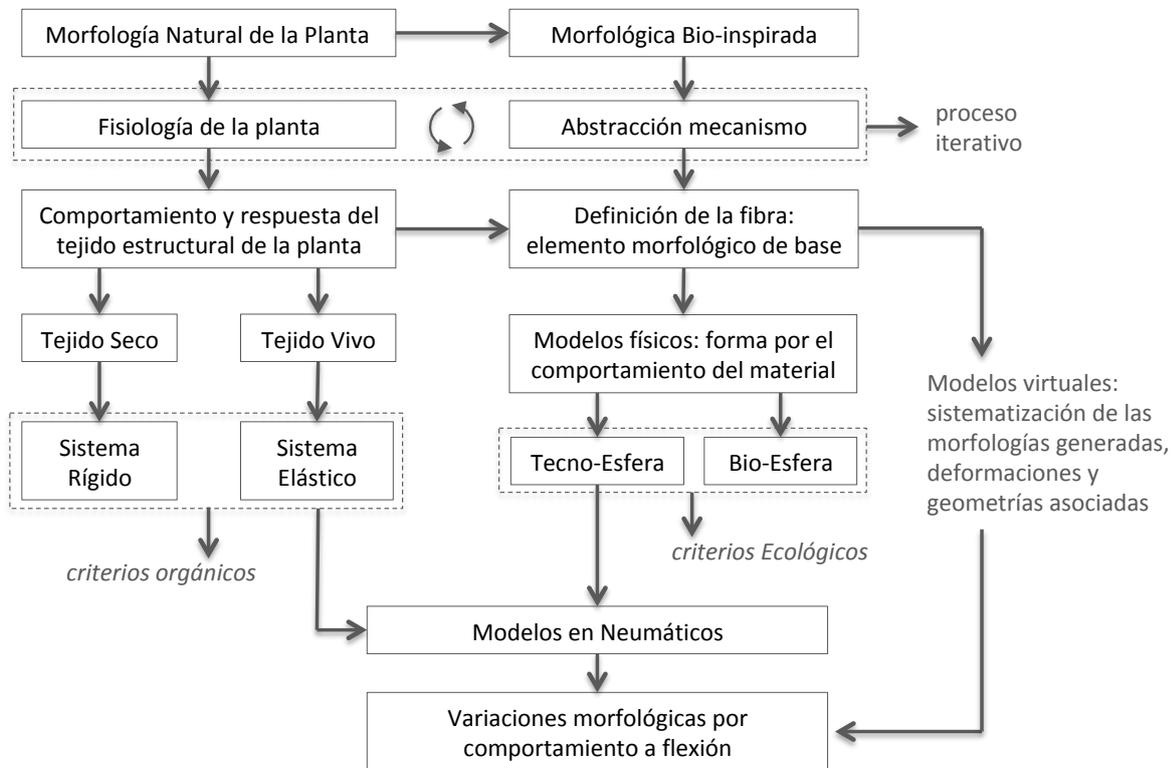
Fig. 52 Modelo cúpula en franjas pre-deformadas, altura de las franjas 1,5 cm: **a)** La cúpula se compone por un total de 4 fibras pre-deformadas en forma de pétalos alternados con una altura total de 15 cm; **b)** Vista en planta desde arriba del modelo con una extensión del diámetro de 37 cm. © Ludovica Rossi 2015



objeto. La realización de los modelos físicos tiene en cuenta que la escala de construcción 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 parecidas.

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 (Addis, 2013), trabajar en el espacio tridimensional y definir un objeto tangible permite observar el comportamiento del material. Utilizando una metodología que desarrolla la forma espacial mediante la construcción de modelos físicos, el material es parte integrante de los resultados (Esquema 2.3). Esto resulta particularmente válido trabajando en el ámbito de la flexibilidad 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 (Esquema 2.4). Este último actúa junto a la geometría y al sistema de uniones para definir la morfología. Un material altamente flexible como la banda neumática ha ofrecido la posibilidad de llevar al límite la morfología bio-inspirada en el tejido vivo del cactus y así verificar la reproducibilidad de las dinámicas naturales.

Esquema 2.3 Proceso de desarrollo de la implementación técnica del mecanismo bio-inspirado que involucra: el análisis del referente natural como generador de concepto; el proceso de iteración entre organismo y abstracción del mecanismo; criterios orgánicos y ecológicos aplicados al diseño; definición de los modelos en banda de neumáticos de bicicletas según deformación por el comportamiento del material y la construcción geométrica. ©Ludovica Rossi 2018



2.6 CONCLUSIONES CAPÍTULO 2

El capítulo describe las pruebas físicas realizadas hasta definir los modelos en bandas flexibles en neumáticos de bicicletas reutilizados como ámbito del desarrollo morfológico. 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. 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. Los neumáticos de vehículos tipo turismo no parecen ofrecer una aplicación directa y/o lineal a una escala humana de la arquitectura, ya que al aumentar el tamaño se abren otras incógnitas a resolver. Asimismo los valores obtenidos del estudio de las características físicas del

Esquema 2.4 Síntesis del desarrollo de los modelos físicos en banda de rodadura de bicicleta y con un único nivel de urdimbre. La morfología del sistema está definida por las uniones y las deformaciones aplicadas junto con la iteración de las franjas. ©Ludovica Rossi 2018

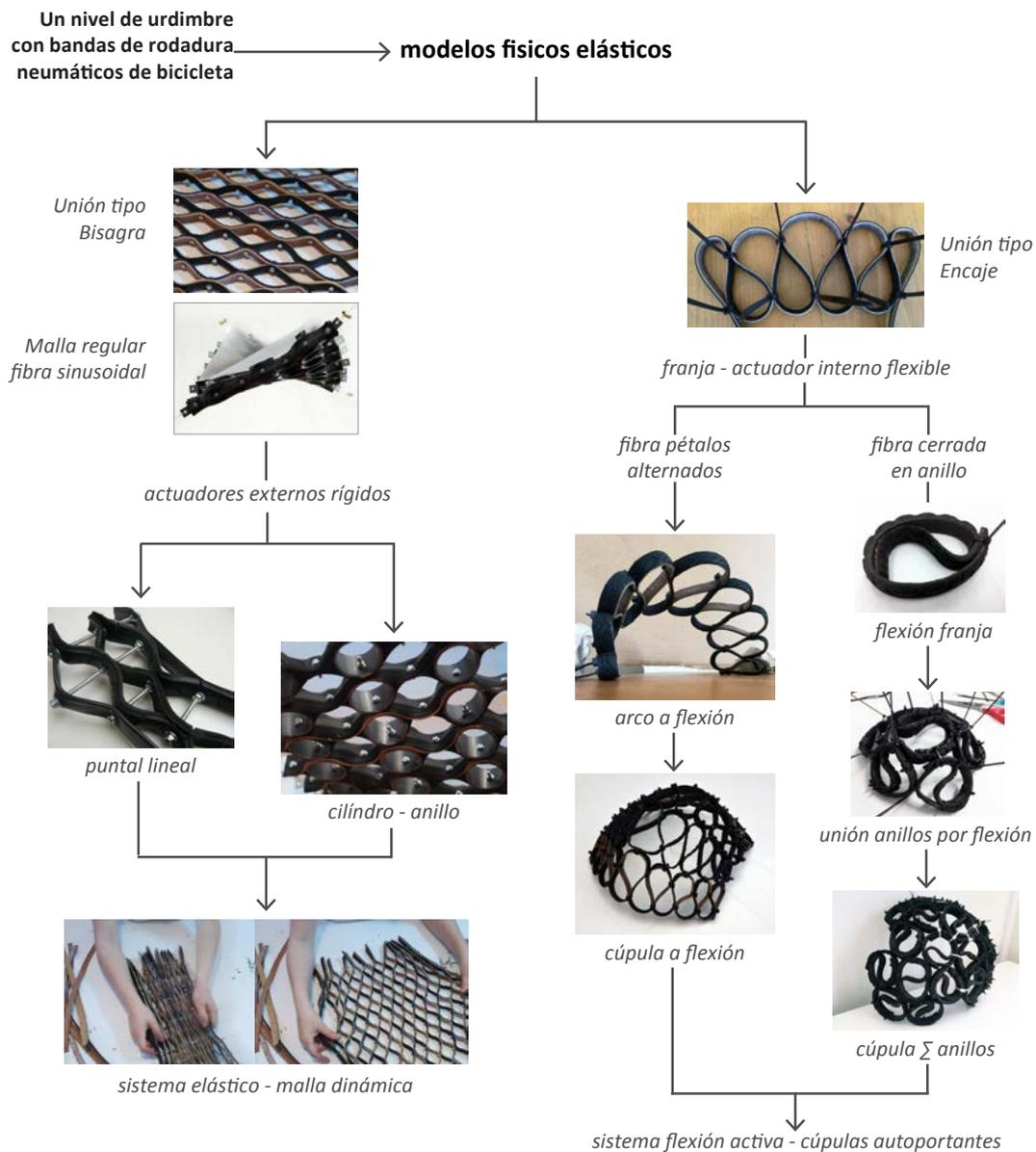




Fig. 52 Tejido de madera seca de cactus *Opuntia*. Fotografía realizada con objetivo macro y fuente de ampliación óptica. ©Ludovica Rossi 2011

material son significativamente más bajos que los materiales normalmente empleado en campo estructural.

Paralelamente, la definición de la franja como elemento base ofrece la posibilidad de estudiar la génesis de la forma de los tejidos orgánicos (Fig.52). Esto junto al uso de un material altamente flexible, como la banda neumática de bicicleta, ha ofrecido la posibilidad de llevar al límite la morfología bio-inspirada en el tejido vivo del cactus y así verificar la reproducibilidad de las dinámicas naturales.

Si bien un modelo funciona como una aproximación, en referencia a la construcción a escala real, está sujeto a las dinámicas físicas según su tamaño, las dimensiones y el comportamiento de los materiales, por ser un objeto tangible. Esto permite verificar cuáles mecanismos morfogenéticos están ligados al prototipo constructivo. Se definen dos mecanismos observables desde los primeros modelos construidos en papel, según se analiza la franja individualmente o el tejido en su conjunto:

- El efecto resorte – la franja ejerce y recibe unos empujes en relación con las franjas circunstantes como se observa en los modelos construidos a partir de uniones irregulares y largos diferentes, y donde el tejido queda abierto por equilibrio de esfuerzos internos.
- El efecto fuelle – el tejido trabaja de forma similar a una esponja que se expande y se contrae. Este comportamiento es visible en las mallas construidas a partir de uniones regulares alternadas donde las fibras se abren y cierran por la acción de esfuerzos de tracción externos y/o por la introducción de actuadores.

Estos dos mecanismos (resorte y fuelle) propios de las fibras orgánicas dependen de la flexibilidad de los modelos. Para su implementación se definen los actuadores como factores de cambio morfológico que participan en las relaciones de esfuerzos de la malla. Se definen los actuadores externos como elementos resistentes a compresión introducidos en la malla y los actuadores internos flexibles materializados por la interrelaciones de las franjas. La malla en su conjunto asume diversas configuraciones dependiendo de la distribución de las franjas en el sistema (Fig. 53). La morfología es definida en parte por el material empleado (según el sistema de uniones implementado y la escala del modelo) que actúa junto a la definición del elemento base (la franja) y a la geometría. En el siguiente capítulo se trata la generación de la forma en relación a sus propiedades geométricas y se analiza el comportamiento de los modelos en banda neumática según los principios de diseño en flexión activa.



Fig. 53 Conjunto de la mayoría de los modelos físicos realizados en banda de rodaduras de los neumáticos de bicicletas recuperados. ©Ludovica Rossi 2011÷2017

2.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Speck O., Speck D., Horn R., Gantner J. y Sedlbauer K. P., 2017, *Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments*, en *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol 12 num. 1, Ed. IOP Publishing Ltd, DOI: 10.1088/1748-3190/12/1/011004
- Lienhard J., Schleicher S., y Knippers J., 2014, *Bio-inspired, flexible structures and materials*, capítulo 11, libro: *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering Edition*, editores: E. Pacheco Torgal et al., Springer Ed., 2015. ISBN: 978-3-319-09287-4, DOI: 10.1007/978-3-319-09287-4_12
- Addis B., 2013, 'Toys that save millions' - a history of using physical models in structural design, pp. 12-27, en *TheStructuralEngineer*, vol. 91 núm. 4, Ed. ELSEVIER, ISSN: 0141-0296
- Sánchez M. y Guzmán M., 2013, *Análisis de la eficiencia medioambiental del recauchutado de neumáticos*, Ed. UMH Editorial Electrónica, Universidad Miguel Hernández (MH), ISBN: 978-84-96297-92-0
- Alonso Malmierca M., 2013, *Elastómeros Iónicos con Memoria de Forma. Estructura, Dinámica Y Propiedades*, Tesis Doctoral, directores: Luis Ibarra Rueda y Juan López Valentín, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de Materiales
- Cruz Cal B. R., Guerra Valdés B. F., Álvarez García E. A. y Blancoc R. A., 2012, *Evaluación de elastómeros vulcanizados*, pp. 131-136, en *AFINIDAD Revista de Química Teórica y Aplicada*, núm. 558, Ed. Asociación de Químicos e Ingenieros Instituto Químico de Sarrià, ISSN 0001 – 9704
- Safari A., Ahmad F. y Yahya A.S., 2011, *A comparison study on the tensile strength of fibreglass and scrap tire*, pp. 483-489, en *World Applied Sciences Journal*, vol. 15 núm. 4, Ed. IDOIS Publications, ISSN: 1818-4952, [https://www.idosi.org/wasj/wasj15\(4\)11/4.pdf](https://www.idosi.org/wasj/wasj15(4)11/4.pdf)
- Gang J., 2010, *The Cook, the Prospector, the Nomad and their Architect*, pp. 163-174, en *Re-inventing Construction*, editores: Ilka & Andreas Ruby, Ed. Ruby Press, Berlín, ISBN: 978-3-9813436-2-5
- Speck T. y Speck O., 2008, *Process sequences in biomimetic research*, pp. 3-11, en *Design and Nature IV Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, Ed. WIT Transactions on Ecology and the Environment, ISBN: 978-1-84564-120-7, DOI: 10.2495/DN080011
- Bechtold M., 2008, *Innovative Surface Structures. Technologies and Applications*, pp. 166, Ed. Taylor & Francis, Oxford, ISBN 10: 0415419662
- Guo Z. y Sluys L. J., 2008, *Constitutive modelling of hyperelastic rubber-like materials*, pp. 109-132, en *Heron*, vol. 53 núm. 3, Ed. TNO Built Environment and Geosciences, Delft, ISSN 0046-7316, http://heronjournal.nl/53-3/2008_3.html
- Vogel S., 2006, *Living in a physical world VI. Gravity and life in the air*, pp. 13-25, en *Journal of Biosciences*, vol. 31 núm. 1, Ed. Indian Academy of Sciences, eISSN: 0973-7138, disponible online en: <https://www.ias.ac.in/describe/article/jbsc/031/01/0013-0025>
- Capra Fritjof, 2006, *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*, 6ª Ed. Anagrama, Barcelona ISBN: 978-84-339-0554
- Nedal T. Ratrouy y Isam A. Mahmoud, 2006, *Adequacy of the tensile/elongation test as a quality control criterion for vehicle tires*, pp. 1-7, en *Polymer Degradation and Stability*, editor: J. L. Gardette, Ed. Elsevier, ISSN: 0141-3910
- Ashby M. F., 2005, *Materials Selection in Mechanical Design*, 3ª edición, Ed. Elsevier, Oxford, UK, ISBN 0 7506 6168 2
- Braungart M. y McBonough W., 2005, *Cradle To Cradle = De La Cuna A La Cuna: Rediseñando la forma en que hacemos las cosas*, 1ª Ed. McGraw-Hill / Interamericana de España S.A.U., Madrid, ISBN: 9788448142957
- Felipe S. y Truco J., 2004, *HYBGRID: Adaptabilitat/Adaptability*, pp. 84-89, en *Quaderns d'arquitectura i urbanisme 242: Q 2.0*, director: Lluís Ortega, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona, ISSN 1133-8849

- Vogel S., 2000, *Anca y palanca: Mecánica natural y mecánica humana*, Ed. Tusquets, Barcelona, ISBN: 9788483106822
- Callister W. D., 1996, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Ed. Reverté S.A., ISBN 10: 842917253X
- Mañà i Reixach F., 1993-1994, *Caracterització, propostes d'utilitzacions i recomanacions d'ús per als pneumàtics vells com a material de construcció*, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITeC), Barcelona
- Clark S. K., 1971, *Mechanics of Pneumatic Tires*, Ed. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, National Bureau of Standards Monograph 122
- Thompson D'Arcy W., 1969, *Crescita e Forma. La geometria della natura*, Ed. Universale Scientifica Boringhieri, Torino, ISBN 10: 8833927954

Capítulo 3

Sistemas de flexión activa

Resumen

En el tercer capítulo se examinan las morfologías generadas por las bandas de neumáticos recuperados de los tres casos: la malla sinusoidal, y las cúpulas en franjas pre-deformadas cerradas en pétalos alternados y en anillos. Los modelos en banda de neumáticos se incluyen en el conjunto de estructuras que utilizan activamente la flexión como un proceso de auto formación. El comportamiento de la estructura en flexión activa es analizado según las propiedades geométricas obtenidas por: deformación y agregación de las franjas. En campo elástico las propiedades del material (analizadas en el capítulo anterior) son un factor para investigar la generación de la forma donde la deformación de las fibras es un elemento activo en la definición morfológica.

La geometría y jerarquía del elemento morfológico de base establecen un orden entre las medidas ($L > H > E$) de la banda. Esta se curva y flexiona a los empujes laterales y se definen dos grupos de configuraciones en base a una deformación abierta o cerrada. Se pone en evidencia que la flexibilidad del sistema es obtenida por geometría y forma del elemento morfológico de base, no únicamente por el comportamiento físico del material.

El análisis de los modelos físicos permite tratar los aspectos de flexibilidad y estiramiento en relación a la estabilidad del conjunto, la baja rigidez del material, la esbeltez de los perfiles y las deformaciones impuestas al sistema. La malla sinusoidal regular es un sistema de flexión activa por las propiedades del material. El modelo necesita de la introducción de actuadores externos para limitar las deformaciones. El objeto parece carecer de independencia respecto al proceso morfogenético que lo genera.

Los modelos en franjas pre-deformadas introducen el control de la deformación de la banda y limitan la extensibilidad del material. Las franjas pre-deformadas son tratadas como elementos planos a flexión activa que unidos entre sí generan superficies de doble curvatura. La estabilidad del sistema es obtenida por rigidez geométrica. El equilibrio de los esfuerzos está garantizado por la forma, la elasticidad del material, la solidaridad de las partes y la adaptabilidad del sistema.

Los modelos mantienen la misma función del modelo biológico y se consideran un producto biomimético funcional. Se verifica la potencialidad del sistema estructural de las cactáceas como generador de conceptos. En la estabilidad del sistema, la imitación de las propiedades del tejido orgánico permite obtener unas morfologías en flexión activa donde la incidencia de la resistencia geométrica es mayor que la resistencia mecánica del material. La deformación controlada es un instrumento del diseño y se convierte en una propiedad arquitectónica. Las configuraciones geométricas obtenidas son auto-organizadas como propiedades emergentes del sistema.

Sommario

Nel terzo capitolo si esaminano le morfologie generate dalle bande in pneumatici recuperate dei tre casi: maglia sinusoidale, la cupola in fasce pre-deformate in petali alternati e anelli chiusi. I modelli in bande di pneumatici sono compresi nel gruppo di strutture che utilizzano attivamente la flessione come processo di auto formazione. Il comportamento della struttura in flessione attiva è analizzato in base alle proprietà meccaniche del materiale e alla geometria ottenuta dalla deformazione e unione delle fasce. Nel campo elastico le proprietà del materiale (trattate nel capitolo precedente) sono un fattore per studiare la generazione della forma e la deformazione delle fibre è un elemento attivo nella definizione morfologica.

La geometria e la gerarchia dell'elemento morfologico di base stabiliscono un ordine tra le misure ($L > H > E$) della banda. Questa si piega e flette alle spinte laterali e vengono definite due serie di configurazioni sulla base di una deformazione aperta o chiusa. Si rende evidente che la flessibilità del sistema si ottiene dalla geometria e dalla forma dell'elemento morfologico di base, non solo dal comportamento fisico del materiale.

L'analisi dei modelli fisici consente di trattare gli aspetti di flessibilità e allungamento in relazione a: la stabilità dell'insieme, la bassa rigidità del materiale, la snellezza dei profili e le deformazioni imposte al sistema. La maglia sinusoidale regolare è un sistema di flessione attiva grazie alle caratteristiche del materiale. Il modello ha bisogno dell'introduzione di attuatori esterni per limitare le deformazioni. L'oggetto sembra privo d'indipendenza rispetto al processo morfogenetico che lo genera.

I modelli in strisce pre-deformate permettono il controllo della deformazione della fascia e limitano l'estensibilità del materiale. Le fasce pre-deformate sono trattate come elementi piatti a flessione attiva che uniti generano superfici a doppia curvatura. La stabilità del sistema è ottenuta per rigidità geometrica. Il bilanciamento degli sforzi è garantito da: la forma, l'elasticità del materiale, la solidarietà delle parti e l'adattabilità del sistema.

I modelli mantengono la stessa funzione del modello biologico e possono essere considerati un prodotto biomimetico funzionale. Viene verificato il potenziale del sistema strutturale di cactus come generatore di concetti. Nella stabilità del sistema, l'imitazione delle proprietà del tessuto organico consente ottenere morfologie in flessione attiva dove l'incidenza della resistenza geometrica è maggiore che la resistenza meccanica del materiale. La deformazione controllata è uno strumento di progettazione e diventa una proprietà architettonica. Le configurazioni geometriche ottenute sono auto-organizzate come proprietà emergenti del sistema.

Abstract

In the third chapter the morphologies generated by the recovered tire bands of the three cases are examined: the sinusoidal mesh, the domes in pre-deformed strips closed in alternating petals and in rings. The tire tread models are included in the group of structures that actively use bending as a form finding process. The behavior of the structure in active bend is analyzed according to the mechanical properties of the material and the geometry obtained by deformation and aggregation of the stripes. In elastic field the properties of the material (analyzed in the previous chapter) are a factor to investigate the generation of the shape and the deformation of the fibers is an active element in the morphological definition.

The geometry and hierarchy of the basic morphological element establish an order between the measurements ($L > H > E$) of the band. This is bent and flexed to the lateral thrusts and two sets of configurations are defined based on an open or closed deformation. It becomes evident that the flexibility of the system is obtained by geometry and shape of the basic morphological element, not just for the physical behavior of the material.

The analysis of the physical models allows to treat the aspects of flexibility and stretching in relation to the stability of the set, the low rigidity of the material, the slenderness of the profiles and the deformations imposed on the system. The regular sinusoidal mesh is a system of active bend due to the properties of the material. The model needs the introduction of external actuators to limit the deformations. The object seems to lack independence with respect to the morphogenetic process that generates it.

The models in pre-deformed strips introduce the control of the deformation of the band and limit the extensibility of the material. The pre-deformed strips are treated as flat elements that in active bend generate double curved surfaces. The stability of the system is obtained by means of geometric rigidity. The balance of the efforts is guaranteed by: the shape, the elasticity of the material, the solidarity of the parties and the adaptability of the system.

The models maintain the same function of the biological model and are considered a functional biomimetic product. The potential of the structural system of cacti as a generator of concepts is verified. The imitation of the properties of the organic tissue allows obtaining active bend morphologies where the incidence of geometric resistance is greater than the mechanical strength of the material, in the stability of the system. Controlled deformation is an instrument of design and becomes an architectural property. Geometric configurations are self-organized, and are emerging properties of the system.

Sistemas de flexión activa

3.1 FORMFINDING

El procedimiento de estudio biomimético empleado en este trabajo parte de la observación del organismo para evaluar sus potencialidades como disparador de conceptos, según un enfoque ascendente (Speck et al., 2017). Desde el inicio de la investigación no se ha planteado una aplicación específica de la morfología orgánica y se ha trabajado manteniendo la misma función estructural que cumple en el referente natural. La motivación de tratar el estudio del comportamiento del tejido vivo (no seco) de la planta, ha llevado al desarrollo de modelos donde el comportamiento elástico del material es dominante en comparación a la implementación de materiales rígidos.

La definición de la geometría de la franja como elemento morfológico base determina que los modelos realizados compartan el enfoque de crear geometrías curvas basadas en elementos de construcción planos o rectos mediante la flexión, dentro del rango elástico de un determinado material (Lienhard et al., 2013). Por lo cual los modelos desarrollados en banda neumática se incluyen en el conjunto de estructuras que utilizan activamente la flexión como un proceso de auto formación.

Implementar un proceso de diseño biomimético ascendente ha llevado al uso de la banda de rodadura de las bicicletas recuperadas para reproducir las dinámicas del tejido vivo de los cactus. A su vez la elección de este material altamente flexible ha permitido incluir el trabajo en la línea de investigación de estructuras o sistemas que implementan la flexión en el proceso de diseño.

Si el objeto es flexible, las fuerzas que actúan sobre él pueden cambiar su forma y es posible que la nueva forma soporte fuerzas diferentes. La flexibilidad es una modalidad para construir estructuras que, bajo una carga, pueden cambiar de forma de manera específica y adecuada (Vogel, 2000). En este entorno se definen las estructuras de flexión activas (Fig. 1) que utilizan la deformación elástica sistematizada, es decir la flexión (Lienhard et al., 2013). Estas estructuras de flexión activa no se basan en tipologías conocidas, sino que lo hacen sobre la forma y la inspiración funcional. En segundo lugar, existe la dificultad

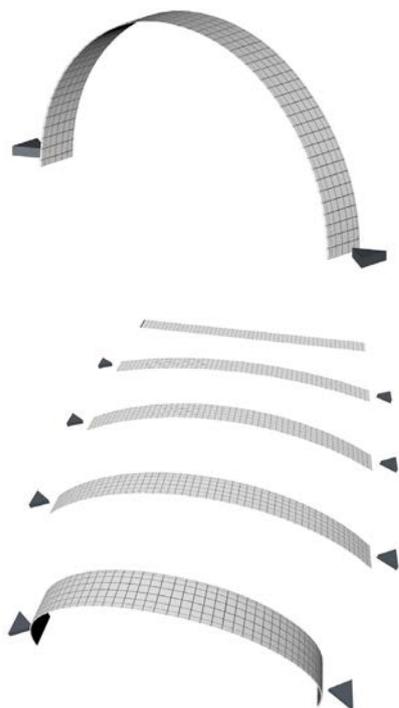


Fig. 1 Representación de un arco como una franja plana sometida a flexión, como si fuese un pandeo controlado. Las estructuras de flexión activa utilizan las propiedades del material para cambiar la forma de sus elementos bajo esfuerzos de compresión. © Ludovica Rossi 2018



Fig. 2 Trabajando en la construcción del modelo en bandas pre-deformadas. Al unir las franjas, en forma de pétalos alternados, se produce el cambio morfológico del sistema. © Ludovica Rossi 2015

de predecir la forma geométrica o el rendimiento estructural del sistema (Lienhard et al., 2014).

Trabajando en campo elástico, no rígido, los modelos construidos permiten observar el comportamiento físico de un material altamente flexible donde la forma varía según el estado de tensiones. Los modelos, aunque a pequeña escala, permiten definir la forma según las deformaciones y el comportamiento del material por ser objetos tangibles. Las propiedades del material son un factor para investigar la generación de la forma, donde la deformación de las fibras es un elemento activo en la definición morfológica del sistema. La modelización y el diseño se basa en un proceso de aproximación a la forma óptima (formfinding) que toma en consideración la variable del flujo natural de las fuerzas en la superficie de la estructura.

Por lo general resulta bastante complejo poder visualizar mentalmente qué geometría asumirá en el espacio un sistema a flexión activa (sea tensado o comprimido). Para definir la superficie se puede partir de una casuística de formas conocidas y previamente codificadas o realizar unos modelos para experimentar la generación de la forma de acuerdo con las interacciones de las tensiones generadas. En el caso de los modelos inspirados en el tejido del cactus, el trabajo ha sido orientado a la construcción de modelos con geometrías esencialmente conocidas (hiperboloides hiperbólicos y/o cúpula) en un contexto de material desconocido (neumáticos recuperados). Los modelos permiten observar la forma que se genera en relación al comportamiento del material y en función del estado de tensiones al cual está sometido (Fig. 2). Los esfuerzos de tensión se generan por la forma que a su vez se construye progresivamente.



Fig. 3 Malla compuesta por franjas unidas de forma regular alternadas, con tuercas y tornillos. Al ser tensada la superficie se curva en forma de paraboloides hiperbólico y las fibras asumen una trayectoria sinusoidal. © Ludovica Rossi 2013

3.2 LA GEOMETRÍA DE LA FRANJA

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, 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 sus tejidos en el espesor aumentando la resistencia de la sección.

En los modelos físicos, la fibra es reproducida por una banda (dejando por un momento de lado el tipo de material) que se define para tener como extensión predominante 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

en la práctica es 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 ($L > H > E$).

La geometría de base es esencialmente la de un rectángulo muy alargado, la longitud es la dimensión predominante y define la forma linear de la franja (Fig. 4). 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. *El modo en que se curva una estructura no sólo depende de la rigidez de su material, sino también de la cantidad de este material y del modo en que está dispuesto* (Vogel, 2000, 110).

En otros términos el elemento de base en los modelos es una franja con las propiedades geométricas de que tiene la longitud (L) dominante respecto a las otras dos dimensiones, y una sección alargada donde la altura (H) predomina sobre la anchura (E). Esta configuración geométrica permite que a mayor longitud de la franja, el elemento será más flexible y deformable a los empujes laterales y a la torsión. Mientras que para segmentos cortos de franja, el sistema tendrá una mayor rigidez a la flexión debido a que el canto de la sección incide mayormente. Análogamente al aumentar la medida transversal de la sección, o sea el espesor de la banda, se reduciría la flexibilidad transversal del elemento.

3.2.1 La deformación de la franja

Definido la forma del rectángulo, cuya longitud es mayor a la altura y el espesor, se sitúa el elemento en el espacio tridimensional con canto puesto en perpendicular 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 sus características geométricas, la franja, así definida, está sujeta a doblarse por los esfuerzos laterales paralelos al plano XZ (Fig. 5).

Si el esfuerzo está situado a un lateral de la franja ésta se curva y toma la forma de una C (Fig. 5a). Si se aplican dos fuerzas a una cierta distancia entre ellas y en direcciones opuestas, cada una en cada lateral de la banda, ésta se deforma y se obtiene la forma de una S (Fig. 5b). 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

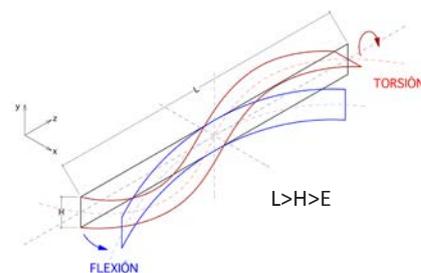


Fig. 4 La geometría de la fibra define un orden jerárquico de las medidas donde la longitud es mayor que el canto, que a su vez es $L > H > E$. Esta forma incide en la predisposición del elemento morfológico a las deformaciones de flexión (azul) y torsión (rojo). © Ludovica Rossi 2017

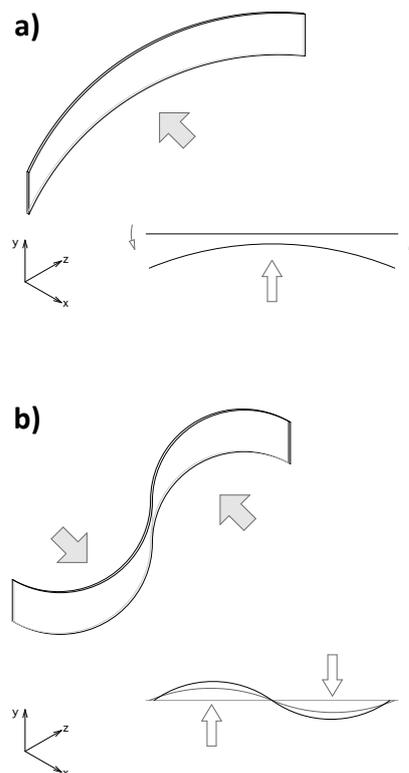


Fig. 5 Deformaciones básicas de la franja abierta según la aplicación de los esfuerzos: **a)** Un solo esfuerzo lateral, la curvatura de la franja es en forma de C; **b)** Dos esfuerzos laterales contrapuestos y aplicados en puntos diferentes de la longitud de la franja, la curvatura es en forma de S. ©Ludovica Rossi 2017

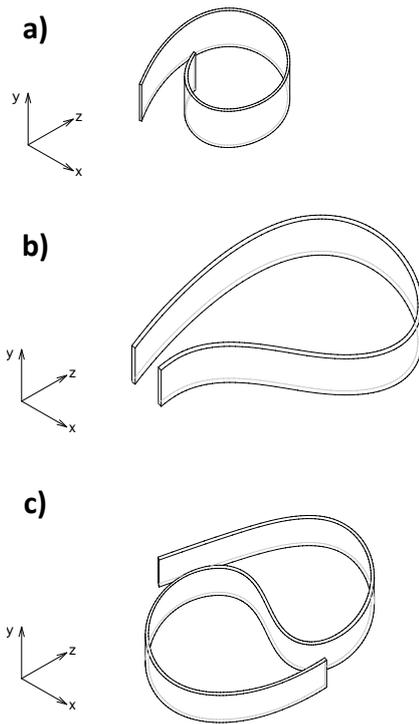


Fig. 6 Por mayores niveles de deformación se obtiene la forma cerrada: **a)** Franja cerrada sobre sí misma en círculo por contacto de las caras externas; **b)** Franja cerrada en forma de pétalo por contacto de las caras internas; **c)** Aumento del número de deformaciones aplicadas a la franja obteniendo una forma en S cerrada sobre sí misma. © Ludovica Rossi 2017

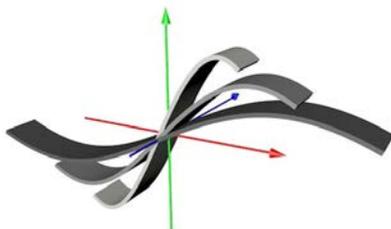


Fig. 7 Estudio de la curvatura de las franjas según la variación del ángulo de apertura entre dos bandas, la periodicidad de la curva a igualdad de desplazamiento y de la amplitud a igualdad de longitud de la curva. © Ludovica Rossi 2013/2018

cerrada. (Fig. 6a) Aplicando una deformación se genera una circunferencia, en forma más o menos circular, ovalada o de pétalo (Fig. 6b). Si se aumenta la deformación en más de una curva se genera una S cerrada sobre sí misma θ (Fig. 6c). 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.

Hasta ahora se ha descrito la variación morfológica de la geometría de la franja observada en la totalidad de los modelos realizados (independientemente del material utilizado para la construcción) y las deformaciones aplicadas de forma individual sobre una sola franja según los diferentes modelos físicos desarrollados. En estos modelos, como en otros tipos de estructuras flexibles, la flexión activa basa su geometría en la deformación elástica desde una configuración inicialmente recta o plana (Lienhard et al., 2014). La operación de acoplamiento de las franjas junto con el tipo de deformación aplicada construye el sistema en flexión e identifica las tipologías: de la malla sinusoidal regular por deformación abierta de la franja y de los modelos en franjas pre-deformadas auto-portantes por deformación cerrada de la franja.

A partir de los resultados obtenidos con los modelos construidos y por medio de un análisis comparativo entre las configuraciones desarrolladas con la deformación abierta (Fig. 7) y cerrada de la franja (Fig. 8), se consigue generar unas mallas con una superficie de doble curvatura (positiva y/o negativa) cuya morfología depende de las reacciones internas que se forman entre los elementos (Esquema 3.1), independientemente del ritmo de las uniones más o menos aleatorias y de la relación longitud-curvatura de las franjas.

Se han obtenido dos configuraciones inspiradas en el tejido del cactus y que investigan la relación entre las fibras elásticas y no rígidas. En el caso de la malla sinusoidal regular el sistema trabaja a tracción de forma similar a una membrana (Fig. 42), y en el caso de la malla con franjas pre-deformadas se obtiene una morfología auto-portante (Fig. 44) tipo caparazón.

La secuencia de las relaciones entre los diferentes aspectos 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 las uniones en relación a las deformaciones aplicadas.

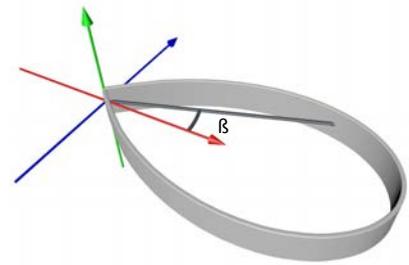


Fig. 8 Trayectoria de un pétalo según la fórmula de la lemniscata de Bernoulli, descrita como el desplazamiento de un punto en el plano xz en función del radio R y el ángulo β . © Ludovica Rossi 2018

Las variaciones aplicadas inciden luego sobre la configuración espacial de la malla, generada por la unión de los elementos de base. En los modelos realizados, según las uniones y las deformaciones aplicadas a las franjas, se han obtenido dos grupos morfológicos:

- Superficie plana deformable en el espacio tridimensional según las fuerzas externas aplicadas y/o la situación de actuadores externos (Fig. 3).
- Superficie curvada (simple y/o doble) por equilibrio de fuerzas internas entre franjas pre-deformadas (Fig. 2).

Franja deformación abierta

<p>2 Fibras: largo iguales Deformación en C y S</p>	<p>3 Fibras: nº 2 iguales + nº 1 más larga Deformación en C y S</p>	<p>2 Fibras: largo diferente Deformación en C</p>
Actuadores internos y/o externos	Fibras como actuadores de cambio morfológico	

Franja deformación cerrada

<p>1 Fibra: pétalos alternados Deformación en S</p> <p>Franjas pre-deformadas continuas</p>	<p>1 Fibra: cerrada en anillo Deformación en S</p> <p>Franjas pre-deformadas cortas</p>
---	---

Esquema 3.1 Tipologías de las configuraciones asumidas por los elementos morfológicos de base (franjas) según tipo de deformación abierta o cerrada y la interacción mínima de las fibras entre sí. © Ludovica Rossi 2018



Fig. 9 Modelo de una malla sinusoidal regular: altura de 1,5 cm, uniones entre dos franjas cada 7 cm, translación de las uniones para obtener la malla romboidal 3,5 cm. © Ludovica Rossi 2013

3.3 MALLA SINUSOIDAL REGULAR

Por medio de la unión de franjas lineales no deformadas se construye una malla que aparece como una red de trama romboidal (Fig. 9), cuya elasticidad dependerá de las características del material utilizado. Asimismo cuanto más regular es el ritmo de las uniones, menos deformaciones internas se generan entre las franjas. En esta configuración regular la malla adquiere las propiedades de una superficie, por lo cual así que cuanto más se extienda la malla, más será deformable en el espacio. Cuando más extensa será la red menos incidirá el canto de la franja en la rigidez del sistema (a paridad de sección) y su comportamiento será semejante al de una membrana (Fig. 10). La malla modifica la curvatura según las tensiones aplicadas y es necesario introducir fuerzas externas para asumir una determinada configuración espacial; por ejemplo de una silla de montar y/o paraboloides.

Las franjas asumen un andamamiento sinusoidal (Fig. 11). La curvatura depende del ángulo de abertura en el punto de unión entre dos franjas (Fig. 12) que está relacionado a la separación

Fig. 10 Modelo de malla sinusoidal regular, puesto en tracción por cables desde sus vértices y en sentido hacia arriba y abajo de forma alternada. La superficie asume la forma de un paraboloides hiperbólico. © Ludovica Rossi 2013

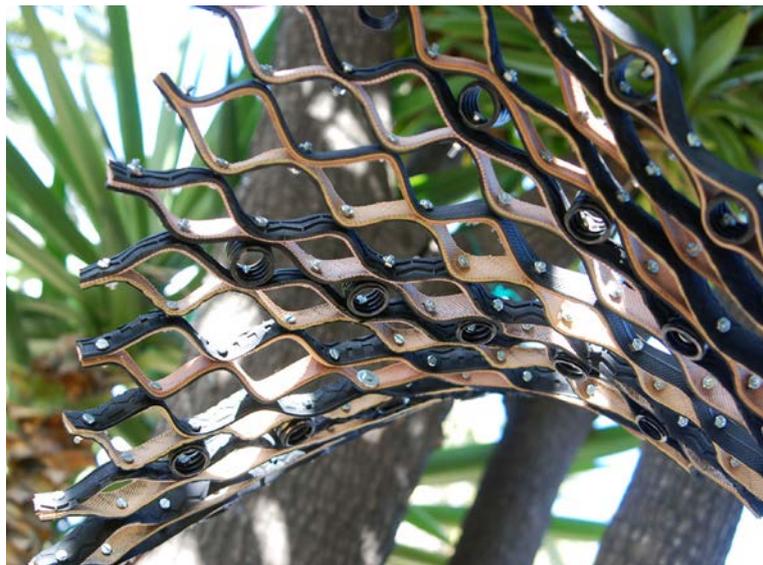
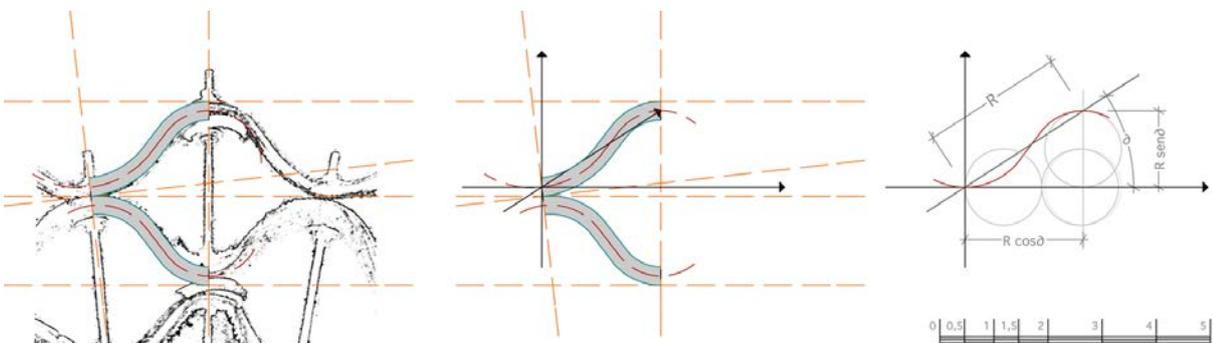
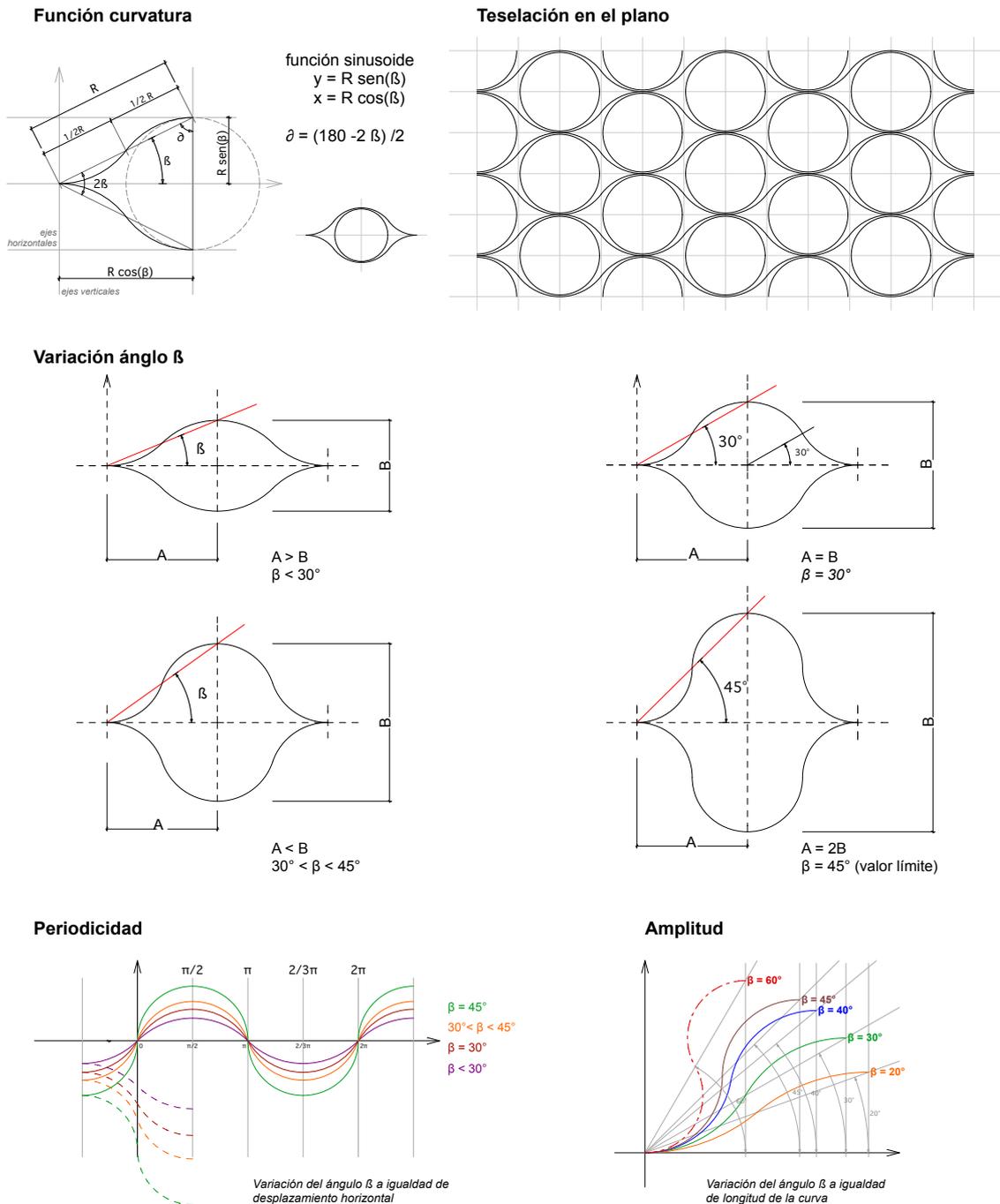


Fig. 11 (Abajo) Definición de las relaciones geométricas entre el modelo físico de la malla regular en banda de neumáticos con actuadores externos (Varillas metálicas) y la directriz de curvatura sinusoidal de la deformación que asume la franja. © Ludovica Rossi 2011



máxima entre las franjas, o sea al esfuerzo de tracción aplicado a la malla. Como en el caso de las membranas, el comportamiento depende esencialmente de las características geométricas de curvatura y distorsión. La malla toma rigidez según el sistema de doble curvatura aplicado. A diferencia de la membrana en el caso de la malla bio-inspirada en la estructura del cactus, el canto de la fibra participa en la deformación general del conjunto. La sección vertical limita la posibilidad de asumir ciertas deformaciones y/o curvaturas.

Fig. 12 Estudio de la curvatura según la variación del ángulo de apertura entre dos bandas, la periodicidad de la curva a igualdad de desplazamiento y de la amplitud a igualdad de longitud de la curva. © Ludovica Rossi 2013/2018



3.3.1 Comparativa entre fibra de papel y banda de neumáticos

En la configuración de la malla sinusoidal regular, los factores evaluados como ventajosos en los primeros modelos de papel no se reproducen en las pruebas realizadas en neumáticos de bicicletas recuperados. Existe la diferencia fundamental ligada al hecho que los neumáticos son más flexibles que el papel. Además el material es extensible, por lo cual los resultados son diferentes.

Utilizando la comparativa del comportamiento entres los dos materiales: en el caso del papel entre una malla construida de forma regular –por bandas de una misma longitud acopladas con un ritmo alternado y ordenado (Fig. 13) –y otra construida de forma aleatoria –con las franjas de largos variables y uniones irregulares (ver capítulo 2, párrafo 2.1.2)–, la primera parecía de mayor coherencia respecto a la segunda. La rigidez del papel se adaptaba a las deformaciones y con un número reducido de puntales la malla asumía la configuración abierta; la regularidad de las uniones parecía más viable en fase de realización. En comparación, los modelos con franjas en papel de largos diferentes unidas de forma casual, no parecían ser igualmente eficientes en términos constructivos por la excesiva aleatoriedad del sistema en su conjunto.

Por otra parte, entre los modelos en papel y en neumáticos se modifican el tipo de uniones: en los neumáticos de bicicleta la fijación está realizada con tuercas y tornillos, no con grapas metálicas como en el caso de los modelos en papel. Esta variación ha modificado el tipo encuentro entre las franjas, y el nudo se ha modificado de empotrado a uno tipo bisagra (ver capítulo 2, párrafo 2.5). El cambio en las uniones modifica el

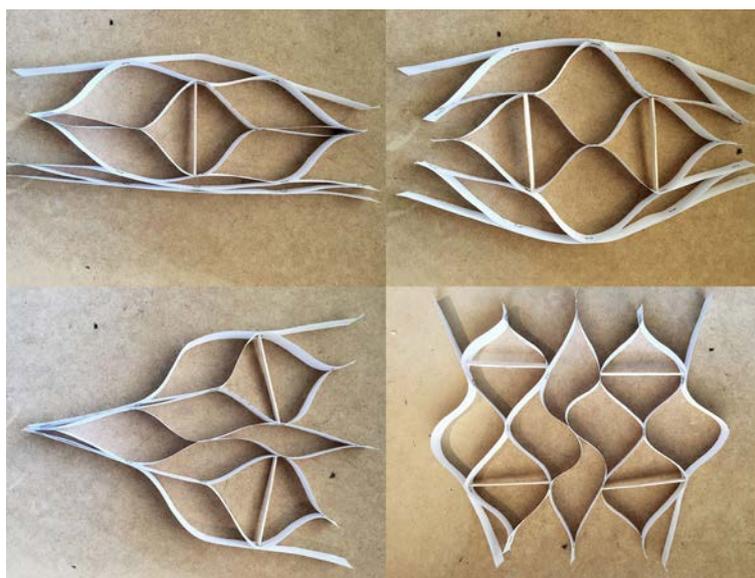


Fig. 13 Modelo en franjas de papel de 1 cm de altura y 28 cm de largo unidas por grapas metálicas de forma alternada y regular cada 7 cm. El sistema se valora como auto-organizado: la malla se abre y las fibras se curvan según los empujes que se generan, dependiendo del número y la posición de los puntales introducidos en la malla. © Ludovica Rossi 2015

comportamiento de la malla aumentando los grados de libertad del sistema. La bisagra permite el movimiento de rotación en el punto de acoplamiento, donde las dos secciones de las franjas se mueven juntas en el espacio y rotan la una respecto a la otra por el eje de la fijación. En otros experimentos sucesivos se han substituido tornillos y tuercas por bridas de plásticos, solución que ha permitido volver a una solución tipo encaje, determinando un grado de vínculo mayor entre las franjas.

La elevada flexibilidad de un material como el neumático hace aumentar la necesidad de introducir factores internos de cambio morfológico (puntales y/o aros), y los actuadores externos a la malla trabajan como controladores de la deformación. Cuando se introduce una barra rígida entre dos fibras (Fig. 14b), ésta abre la malla modificando los equilibrios de las zonas circunstantes (similar a una ola que se propaga en el agua). Al aumentar el número de puntales se observa que la distribución de los actuadores externos genera diferentes condiciones de equilibrio con empujes positivos o negativos entre sí. De una malla cerrada (Fig. 14a), en estado de reposo (sin esfuerzos de tracción y/o actuadores externos aplicados), se introducen cuatro puntales. En un primer caso se colocan de dos en dos (Fig. 14c), situando cada grupo en una pareja de franjas a una distancia igual y omitiendo entre sí una pareja de franjas. Se observa que la malla se abre y que en las dos franjas centrales, entre las líneas donde se han situado los puntales, se generan unos empujes internos opuestos entre ellos. En una segunda prueba se mantiene la continuidad de los actuadores externos a lo largo de un eje perpendicular a la dirección de las franjas, colocando en una misma línea de 4 parejas de franjas los puntales (Fig. 14d). En este caso la malla se abre de forma homogénea y no se generan empujes opuestos entre las franjas. En general

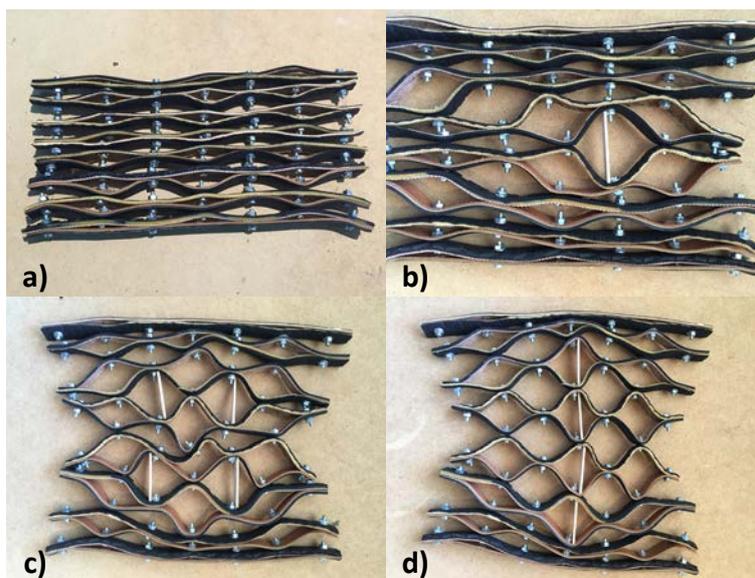


Fig. 14 Modelo en franjas de neumáticos de bicicletas de 1,5 cm de altura y 22 cm de largo, unidas de forma alternada cada 7 cm: **a)** Malla cerrada en reposo; **b)** Malla con la introducción de un actuador externo que abre la malla afectando las fibras circunstantes; **c)** Malla con 4 actuadores externos situados de 2 en 2 que abren la malla generando unos empujes internos opuestos como se observa en la línea de las franjas centrales donde no se han colocados actuadores; **d)** Malla con 4 actuadores externos puesto en una misma línea de 4 parejas de franjas donde la malla se abre de forma homogénea. © Ludovica Rossi 2015



las franjas abiertas, sin ninguna deformación externa aplicada previamente, se adaptan a las acciones internas generadas por la introducción de los elementos rígidos sin ejercer mayor resistencia.

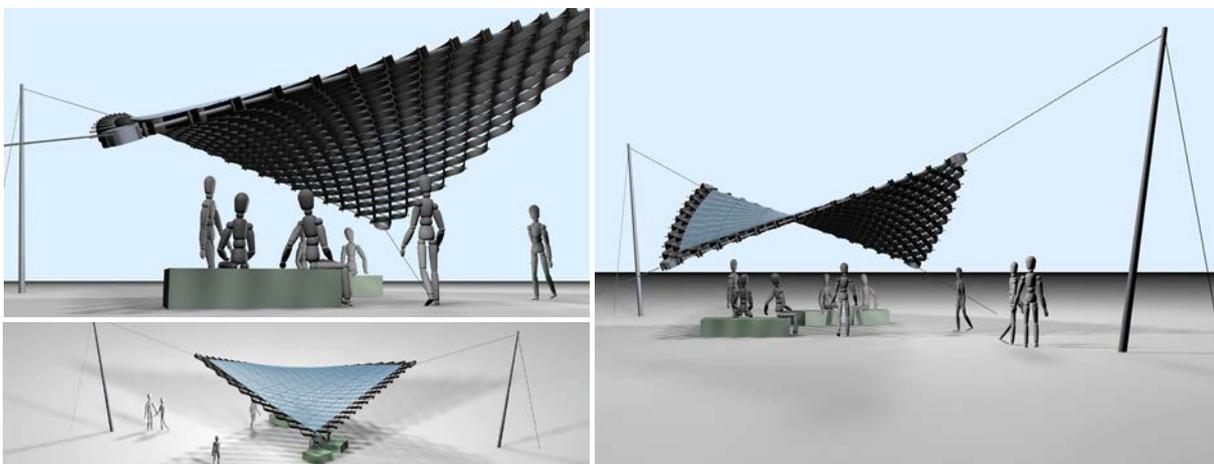
3.3.2 Del puntal al anillo

Evaluando la secuencia en la construcción del modelo (Fig. 15), la necesidad de introducir una barra continua en una misma línea encuentra unos límites técnicos en su realización. Obviamente un elemento continuo lineal infinito no es posible en términos constructivos (Fig. 16, 17), y debería ser dividido en segmentos para su posterior montaje en el urdimbre de la malla. Entonces, en la construcción de los modelos, el cambio desde la forma lineal a la introducción de actuadores externos en forma de anillo (Fig. 18) ha parecido coherente. La forma circular se ha evaluado también adecuada para la morfología curvilínea de las líneas en la malla abierta (Fig. 19). De hecho los vacíos generados en el interior de la estructura de madera del cactus son circulares, por lo cual la sustitución de la barra lineal con elementos cilíndricos, del mismo canto que las franjas, parece ser adecuado tanto para la secuencia constructiva, como en términos morfológicos, por el comportamiento estructural y el aumento de la resistencia general.

Fig. 15 Modelo en bandas separadas por varillas metálicas y comportamiento de la malla según diferentes deformaciones aplicadas. © Ludovica Rossi 2012

Fig. 16 Simulación 3D de una malla en la configuración de paraboloides hiperbólicos y puntales como actuadores externos. Se imagina la aplicación de la malla para una cubierta tensada. © Ludovica Rossi 2013

En la construcción de la malla sinusoidal regular en bandas de neumáticos recuperados, incluso con la introducción de actuadores externos que abren las fibras, la malla no asume rigidez y necesita ser tensada para alcanzar una forma en el espacio tridimensional. La banda de rodadura de los neumáticos de bicicletas tiene una flexibilidad mucho mayor que las franjas de papel empleadas en los primeros experimentos (también a igualdad de modelo físico). Además este material es extensible, o sea que se alarga bajo los esfuerzos de tracción. Estas



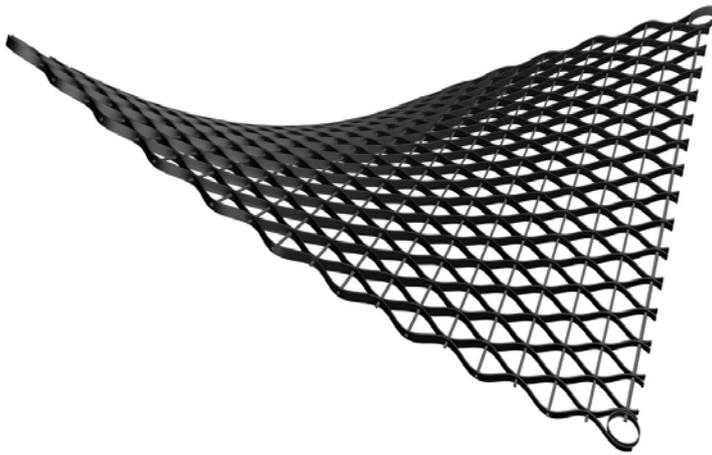


Fig. 17 Simulación 3D de una malla regular en la configuración de paraboloides hiperbólico con la introducción de actuadores lineales. © Ludovica Rossi 2013

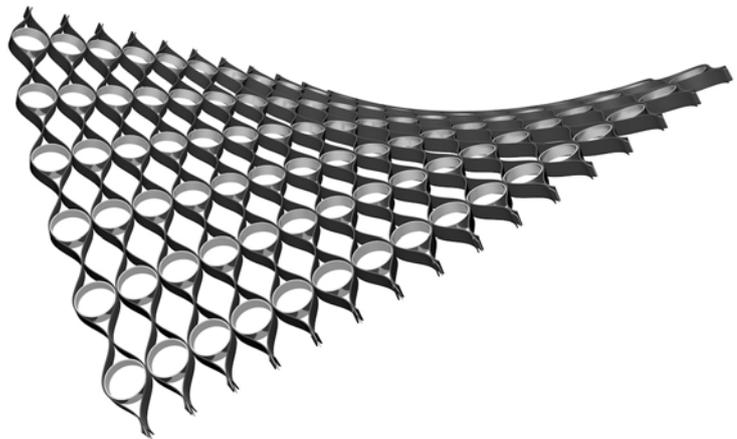


Fig. 18 Simulación 3D de una malla regular en la configuración de paraboloides hiperbólico con la introducción de actuadores cilíndricos por cada par de bandas. © Ludovica Rossi 2013



Fig. 19 Vista frontal de un modelo de malla sinusoidal regular con actuadores externos cilíndricos: altura de las franjas 2 cm, núm. franjas 14. Foto © Ronald Stallard 2014

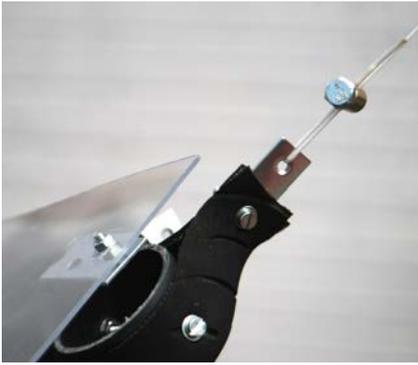


Fig. 20 Detalle modelo de la malla sinusoidal regular con actuadores cilíndricos en uno de sus extremos: el cables pone en tracción la malla y el cilindro limita el estiramiento de la franja. © Ludovica Rossi 2013

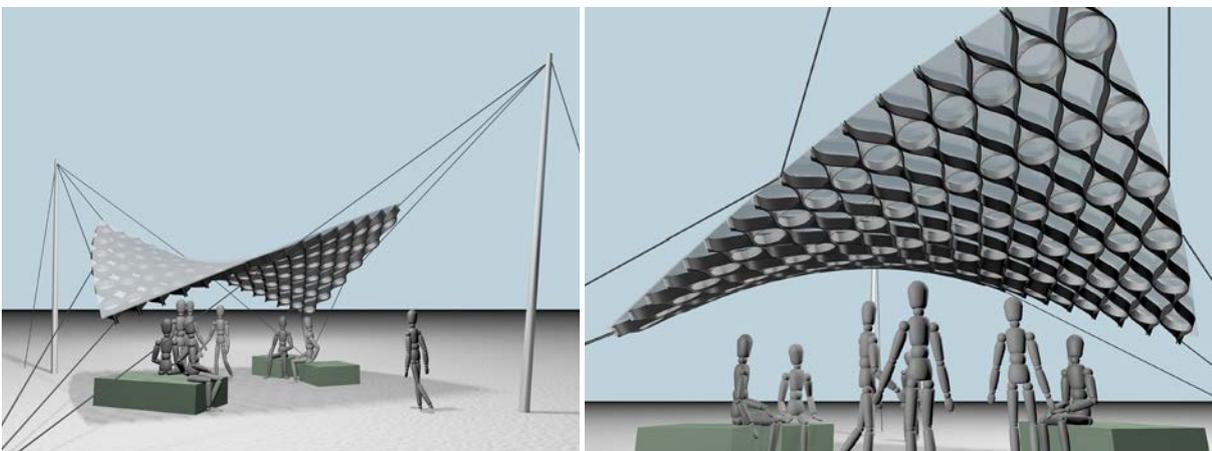
propiedades determinan que los componentes rígidos (puntales y/o cilindros) introducidos para abrir la estructura invierten su función y son necesarios para limitar la deformación de la malla (Fig. 20). Estos modelos no parecen ser autosuficientes en sí mismos. El objeto arquitectónico parece no tener independencia respecto al proceso morfogenético que lo genera.

El modelo de la malla sinusoidal regular (Fig. 21) es comparable a una red elástica y extensible con trama romboidal. Estos modelos emplean la flexión en dos aspectos: desplegar la malla, generando así la red de franjas sinusoidales, y al poner en tracción la malla se dobla la superficie que asume una configuración de doble curvatura. El cambio morfológico en dos etapas, desplegar y curvar, permite que una grilla plana simple adquiriera una forma tridimensional por medio de la deformación. Aunque simplifica el diseño del mecanismo de despliegue y de las conexiones, este tipo de curvatura uniforme requiere suficientes condiciones de contorno o restricciones para mantener la flexión, también bajo carga externa (Brancart et al., 2016).

De la comparación entre los diferentes resultados obtenidos se constata que, para mantener la morfología de la malla regular a una mayor escala, sería necesario un material que mantuviese propiedades elásticas sin la extensibilidad del neumático. Por otra parte, la investigación ha mantenido el mismo material profundizando el concepto de la franja y su respuesta morfológica. El neumático ha parecido ser un material cuyas propiedades de flexibilidad y elasticidad permitían estudiar el comportamiento del tejido vivo de la planta. Entonces era el modelo que debía tener una respuesta de cambio y no modificar el material empleado para su construcción.

Fig. 21 Simulación 3D de una malla regular con actuadores externos en forma de cilindros y puesta en tensión de la malla en forma de paraboloides hiperbólico. Se imagina la aplicación de la malla para una cubierta tensada. © Ludovica Rossi 2013

Con el objetivo de desarrollar una morfología capaz de mantener su propio peso, sin la introducción de esfuerzos o actuadores externos, se ha investigado la deformación a la franja individual



(mayor a la que ha sido aplicada a la franja de papel) de modo que ésta no fuese más un elemento lineal, con la variación de la deformación de abierta a cerrada (ver capítulo 2, párrafo 2.4). El trabajo se encuentra en el campo de la estructura activa donde la forma y la adaptabilidad se basan en la deformación elástica. Son estructuras cuya forma proviene de su comportamiento material en lugar de ser el resultado de una tipología predefinida (Lienhard et al., 2014). El conjunto de las franjas deformadas, y unidas entre ellas con bridas de plástico, permite obtener una forma estable y en equilibrio cuando se implementa una geometría a doble curvatura que favorece la resistencia de la estructura por forma (Fig. 22).

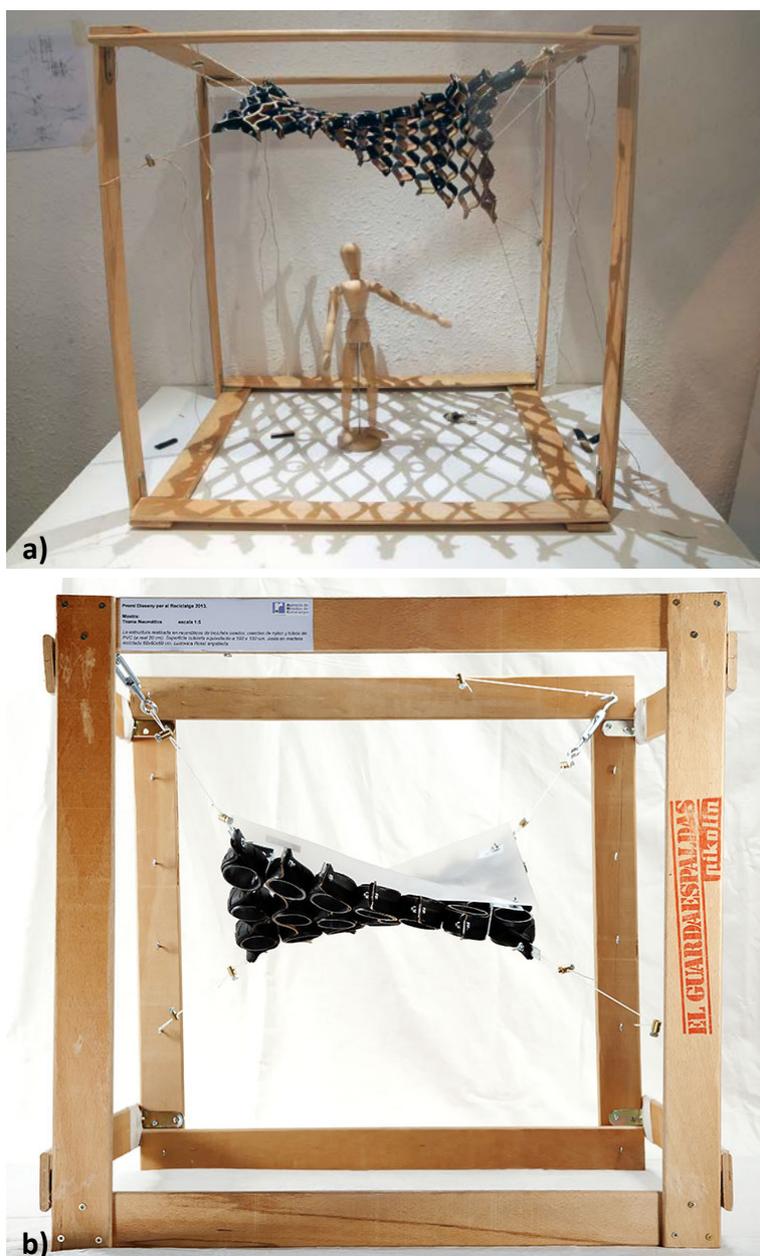


Fig. 22 Comparativa entre dos modelos en malla sinusoidal regular: **a)** Modelo compuesto por 24 franjas, medidas 2 cm de altura por unos 43 cm de largo, con actuadores cilíndricos, de 2 cm de diámetro, situados cada 6 franjas y colocados posteriormente de la unión de las franjas entre sí; **b)** Modelo compuesto por 14 franjas de 2 cm de altura y 26 cm de largo, con actuadores cilíndricos de 4 cm de diámetro, situados cada dos franjas (cómo en el modelo 3D) y colocados durante la unión de las franjas entre sí. El primer modelo es más extenso y más flexible que el segundo. En el segundo modelo, la introducción de los actuadores cilíndricos durante la fase de acoplamiento de la franja (además de la menor extensión lineal de las franjas) ha determinado que el sistema tuviese una mayor rigidez en comparación del primer modelo. a) © Ludovica Rossi 2013; b) Foto © Ronald Stallard 2014



Fig. 23 Modelo de una superficie sinclástica obtenida con una banda continua de neumático doblada sobre si misma, siguiendo curvas invertidas y fijada de forma aleatoria con bridas de plástico. ©Ludovica Rossi 2015



Fig. 24 Simulación 3D de la propiedad de modificación de la franja de plana a curva en la malla regular por las propiedades elásticas intrínsecas del material. ©Ludovica Rossi 2012

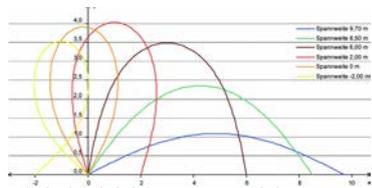


Figure 3 Bending shape of a slender beam on two pin supports by the continuous symmetrical horizontal movement of the supports.

Gráfico 3.1 Formas generadas por flexión elástica de una viga delgada sobre dos soportes de pasadores por un movimiento horizontal simétrico continuo de los soportes. Los diferentes colores indican la variación de la luz entre los extremos: de un máximo de 9,70m, a un mínimo de -2,00 m. El valor 0 m corresponde a la forma del pétalo. Fuente: Gengnagel et al, 2014

3.4 MODELOS EN FRANJAS PRE-DEFORMADAS

Los experimentos con franjas de largo diferente unidas de forma aleatoria ponen en evidencia que las franjas ejercen unos empujes entre sí. La variación de longitud de una banda con las adyacentes es un aspecto a tomar en cuenta y que contribuye a la variación morfológica del sistema. Por ejemplo, en el modelo donde bandas de neumáticos (Fig. 23) se doblan y unen siguiendo longitudes diferentes se obtiene una configuración que mantiene abierto el tejido sin la introducción de actuadores externos. El sistema aumenta su rigidez y sostiene su peso.

La flexibilidad es obtenida por geometría y forma del elemento, y no únicamente por el tipo de material empleado. Las franjas se curvan ejerciendo entre ellas unos empujes recíprocos que mantiene abierta la malla por sí sola, dependiendo de la secuencia de las uniones. Más son irregulares y/o casuales la deformaciones aplicadas, más se genera una dinámica de empujes y fricciones entre las franjas. En esta solución los equilibrios internos del sistema determinan un cambio morfológico a nivel general.

En los modelos en banda neumáticas esta solución brinda un mayor control sobre las propiedades elásticas del material, donde es necesario encontrar los mecanismos adecuados para poder controlar la deformación. Aplicar un cambio de forma previo cerrando a la fibra sobre sí misma significa ejercer una sollicitación que modifica la fibra y la obliga a mantener una configuración determinada. La sumatoria de las fibras pre-deformadas permite obtener una morfología auto-portante. 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 una 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.

La malla sinusoidal (descritas en los párrafos anteriores), se considera un sistema de flexión activa por la secuencia de acoplamiento de las franjas entre sí y las propiedades elásticas intrínsecas del material (Fig. 24). En el modelo de franjas pre-deformadas el sistema a flexión activa se obtiene por construcción geométrica. La configuración, generada por la banda de rodadura curvada sobre sí misma en una secuencia de pétalos alternados y/o en anillo, permite evaluar el elemento obtenido como un componente estructural pretensado. Este se

transforma de un estado plano a uno curvado (Brancart at. all, 2014).

Al evaluar un elemento constructivo plano, éste se dobla cuando sus extremos se acercan entre sí. La curva será simétrica con respecto al eje central si la sección del cuerpo es constante y el material es uniforme (Fig. 25a). La elasticidad básica se puede ver como la curva posterior al pandeo generada entre dos soportes fijados con una fuerza normal aplicada (Gráfico 3.1). A través de una variación de la fuerza de actuación, a igualdad de sección, se logran curvas elásticas con formas diferentes (Brütting at all, 2017). En este esquema el canto de la sección es relativamente pequeño en comparación con el ancho de la sección y la longitud del elemento. En estructuras de flexión activa la anchura no tiene influencia sobre la tensión de flexión (Lienhard at all, 2014).

Si hipotéticamente se aplica una rotación de 90° a las secciones de base del eje z , perpendicular a la dirección de tensión, al eje x , paralelo a la dirección del esfuerzo, el elemento no se curva como antes (Fig. 25 b, c). La altura de la sección, ahora dominante respecto al ancho, limita la posibilidad flexión. En el punto de máxima curvatura la sección gira sus fibras, y se genera una dinámica de torsión a lo largo del eje longitudinal. Esta comparación pone en evidencia cómo la geometría de los elementos planos y su orientación en el espacio inciden en el comportamiento de un sistema sometido a flexión.

Por su analogía con el referente natural, los modelos desarrollados en este trabajo han tratado la franja como un

Fig. 25 Deformación de un elemento plano: a) La curva posterior al pandeo es generada por acercamiento de sus dos extremos, la forma es simétrica al eje central si la sección es constante y el material uniforme; b) Elemento plano es sometido a flexión y uno de los dos extremos es girado de 90° respecto a la orientación inicial de la fibra; c) Caso donde el elemento plano es curvado por la fuerza normal aplicada en la base y donde los dos extremos han sido girados de 90° . En los últimos dos esquemas se muestra como además de la flexión las fibras están sujetas a la torsión. © Ludovica Rossi 2018

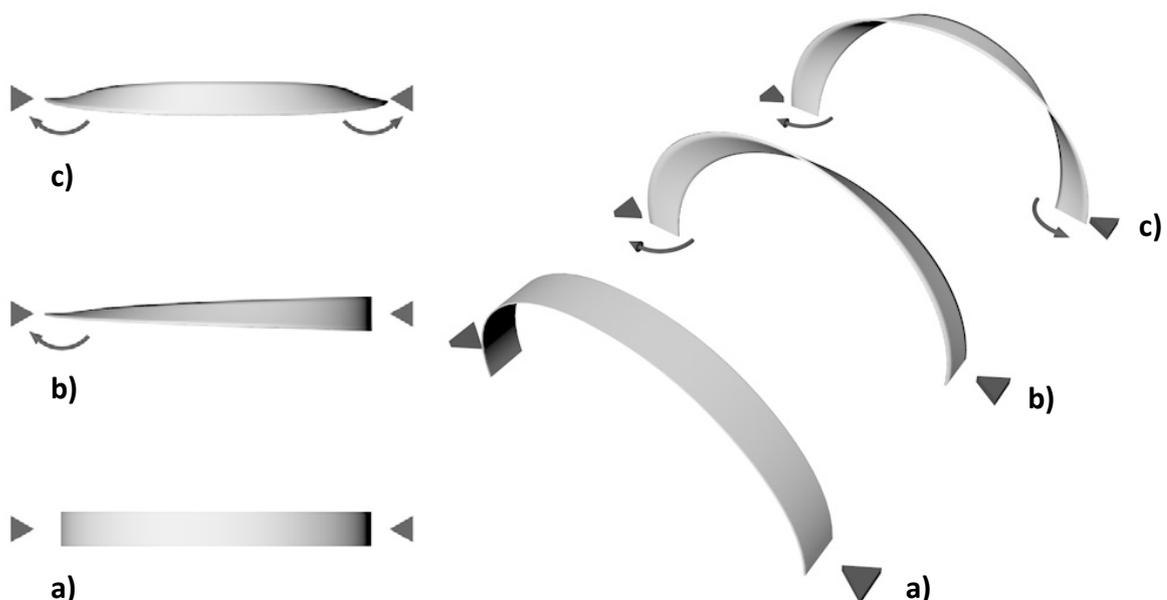




Fig. 26 Secuencia de generación de la forma en un sistema de flexión activa obtenido por geometría. La banda cambia su geometría de un elemento lineal fino a un elemento plano donde el ancho es mayor que el alto. © Ludovica Rossi 2015

elemento geométrico puesto de canto (la altura de la sección es mayor de su ancho). La banda de neumático está doblada y unida generando un elemento que aumenta su superficie en el plano (Fig. 26). Esta configuración depende de la búsqueda para controlar las propiedades de elasticidad y extensibilidad del material.

Para tratar la banda de neumático como un elemento a flexión activa es necesario realizar una operación geométrica. La franja está pre-deformada según la curvatura de una secuencia en pétalos alternados. El resultado es un componente que puede ser tratado como un elemento plano para el desarrollo de superficies curvas (Fig. 27). Mediante un esfuerzo de flexión el componente es pre-curvado y obtiene estabilidad por resistencia geométrica (por forma) y mecánica (por propiedades del material).

El resultado define un modelo que pre-deforma las franjas (primera flexión de las franjas) y sucesivamente dobla el objeto (segunda flexión aplicada a la franja) para utilizarlo en la construcción de estructuras de flexión activa. La banda crece en el plano y puede ser tratada como un nuevo elemento geométrico (Fig. 28), sin variación de las medidas del canto (altura). La tensión inicial aplicada arquea el elemento llevando al estiramiento de las fibras superiores y comprimiendo las fibras inferiores (respecto a la sección transversal). Las tensiones de flexión varían linealmente desde un valor máximo de tracción en la fibra superior hasta un valor máximo de compresión en la inferior, y serán nulas en la fibra del eje neutral (Salvadori, 1992). Esto es válido tanto para la fibra doblada sobre sí misma como para el elemento curvado sucesivamente.

3.4.1 Franjas pre-deformadas en pétalos alternados

Los neumáticos de bicicleta reciclados ofrecen una amplia gama de deformaciones. Como el tejido de la planta, este material elástico se adapta a los estímulos externos aplicados. El 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. Se genera una nueva condición de equilibrio cuyas tensiones internas proporcionan una mayor rigidez. Se puede 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. Las franjas mantienen la flexibilidad por la forma y, dependiendo de la secuencia de las uniones, se curvan ejerciendo entre ellas unos empujes recíprocos. En esta solución los equilibrios internos del sistema determinan un cambio morfológico a nivel general. Las zonas de la franja donde la curvatura es positiva están en tracción mientras las que tienen curvatura negativa están comprimidas.

El desarrollo geométrico de los pétalos alternados determina la deformación de la franja en la extensión longitudinal, y permite obtener diferentes configuraciones. Los factores geométricos determinantes son el eje a lo largo del cual se van generando los pétalos (lineal o curvilíneo) y la variación de dimensión de los pétalos a lo largo del eje (por ej. de más pequeño a más grande y viceversa), y sus diferentes combinaciones pueden dar origen a diferentes configuraciones que responden de forma diferente a la flexión activa y que generan diferentes superficies en el espacio tridimensional.

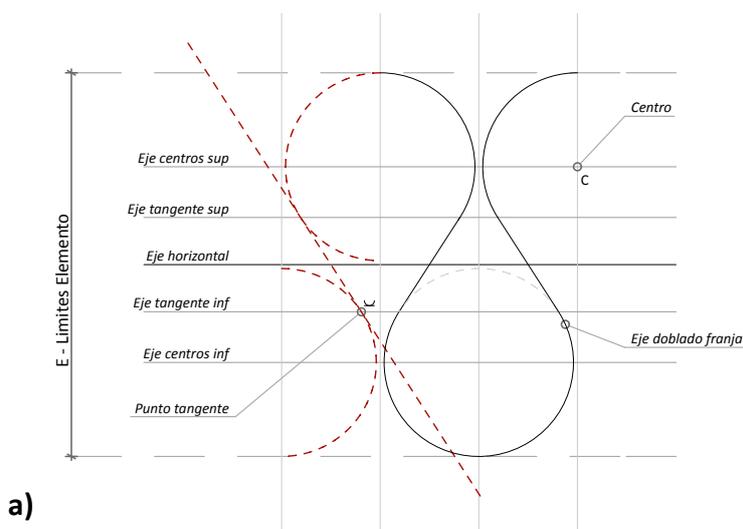
En el caso de un eje lineal del eje de desarrollo y pétalos iguales entre sí (Fig. 29a), la superficie resultante en el plano es la de un rectángulo (Fig. 29b), que puesto en flexión genera un arco. La sumatoria de los arcos genera una superficie de curvatura simple de una bóveda. La forma cilíndrica es obtenida en un caso, por traslación (Fig. 30a), mediante la sumatoria de arcos sucesivos en dirección paralela a sus profundidad. En este caso por cada pétalo hay dos puntos de unión con la fibra pre-deformada adyacente. En un segundo caso la bóveda está generada por traslación y simetría de arcos iguales entre sí (Fig. 30b), donde se modifica el punto de unión entre las fibras. El



Fig. 27 La franja pre-deformada se curva por acercamiento de sus extremos, el comportamiento es similar a un cuerpo plano sometido a flexión que se arquea por pandeo. © Ludovica Rossi 2015

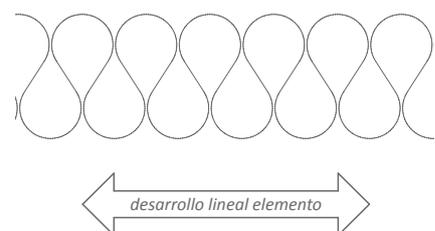


Fig. 28 El acercamiento entre sí de los dos extremos de la franja pre-deformada en pétalos alternados, genera la forma de un arco que soporta su propio peso. Las dos deformaciones generan una configuración autoportante. © Ludovica Rossi 2015



a)

Fig. 29 Franja pre-deformada en pétalos alternados iguales entre sí según un eje de desarrollo lineal: **a)** Relación geométrica de las partes; **b)** Desarrollo lineal del componente plano en forma de rectángulo. © Ludovica Rossi 2018



b)

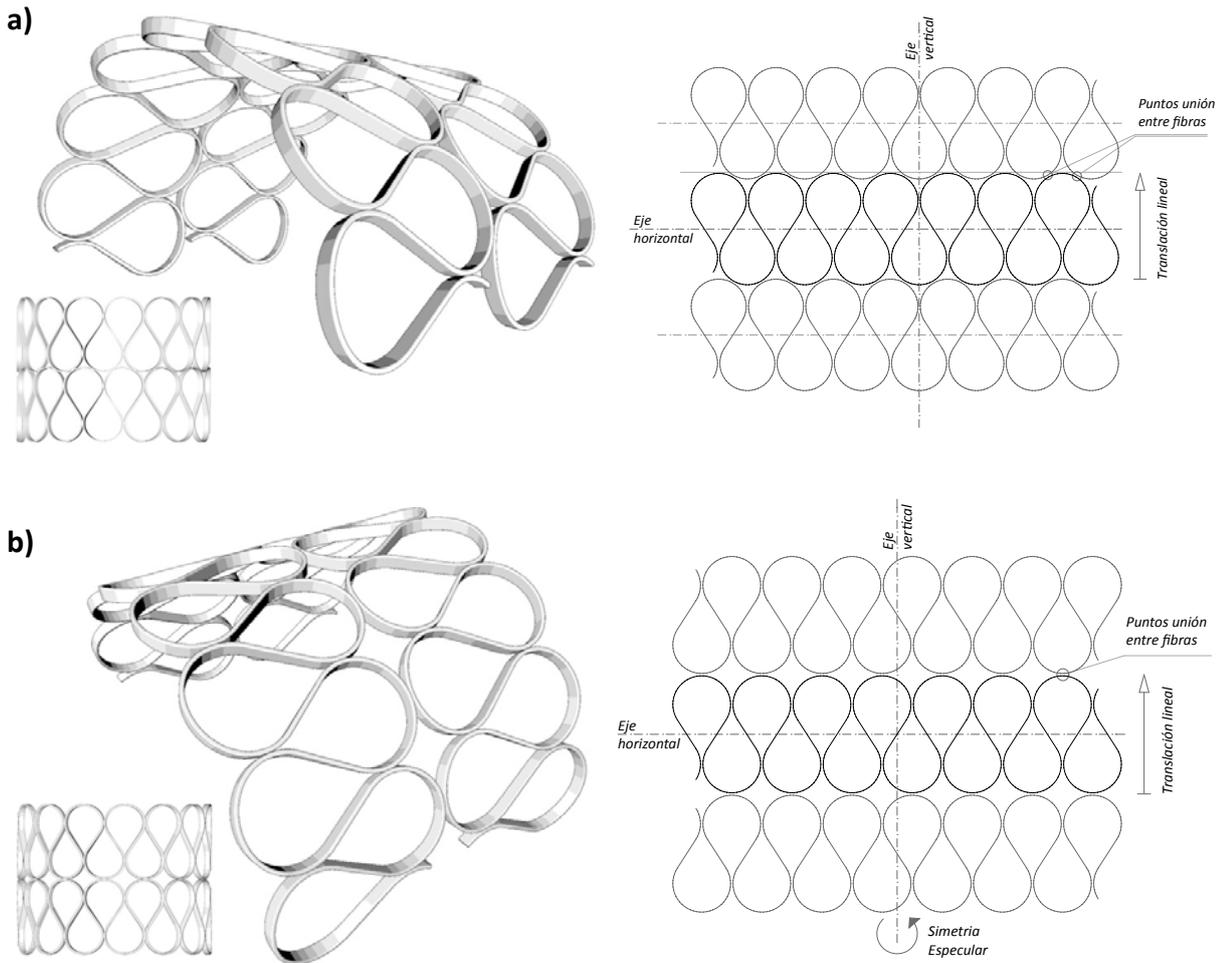


Fig. 30 Sumatoria de los arcos obtenidos por flexión de las franjas pre-deformadas: **a)** La iteración de arcos paralelos por translación lineal en una dirección y donde por cada pétalo hay dos puntos de unión entre los elementos; **b)** La bóveda es obtenida por simetría especular y translación lineal, se invierte la dirección de la curvatura entre arcos adyacentes y la unión se realiza en el punto de máxima curvatura de cada pétalo. © Ludovica Rossi 2018

arco obtenido por flexión de la fibra es rotado respecto al eje vertical que invierte la dirección de la curvatura respecto al arco adyacente. La unión se realiza en el punto de máxima curvatura de cada pétalo. Si bien la configuración global de la superficie no cambia, siempre es un semicilindro, por el cual varía el número y la distribución de las uniones, y por consiguiente el flujo de esfuerzos que siguen la superficie (Esquema 3.2).

Con un procedimiento similar es posible construir la forma de un huso esférico a partir de una configuración plana. En este caso los pétalos alternados varían de dimensión de creciente a decreciente (Fig. 32a). El elemento plano resultante tiene una forma ovalada (Fig. 32b) y al ser flexionado se obtiene un arco cuya superficie no tiene una agregación de tipo lineal, sino curva. La sumatoria de los arcos, así obtenidos, permite la construcción de una superficie de doble curvatura sinclástica de una cúpula y/o esfera (Fig. 31). La superficie es obtenida por rotación de los elementos respecto al eje de giro que pasa por el centro de la esfera (Esquema 3.2). Como en el caso de la bóveda, obtenida únicamente por traslación, aplicando la iteración por

Esquema 3.2 (Página siguiente) Proceso de generación de la forma en estructuras de flexión activa desde la franja lineal, el doblado en pétalos alternados que invierte la relaciones dimensionales, la aplicación de empujes a la base que curvan el elemento, hasta dos posibles agregaciones según las operaciones geométricas aplicadas. ©Ludovica Rossi 2018

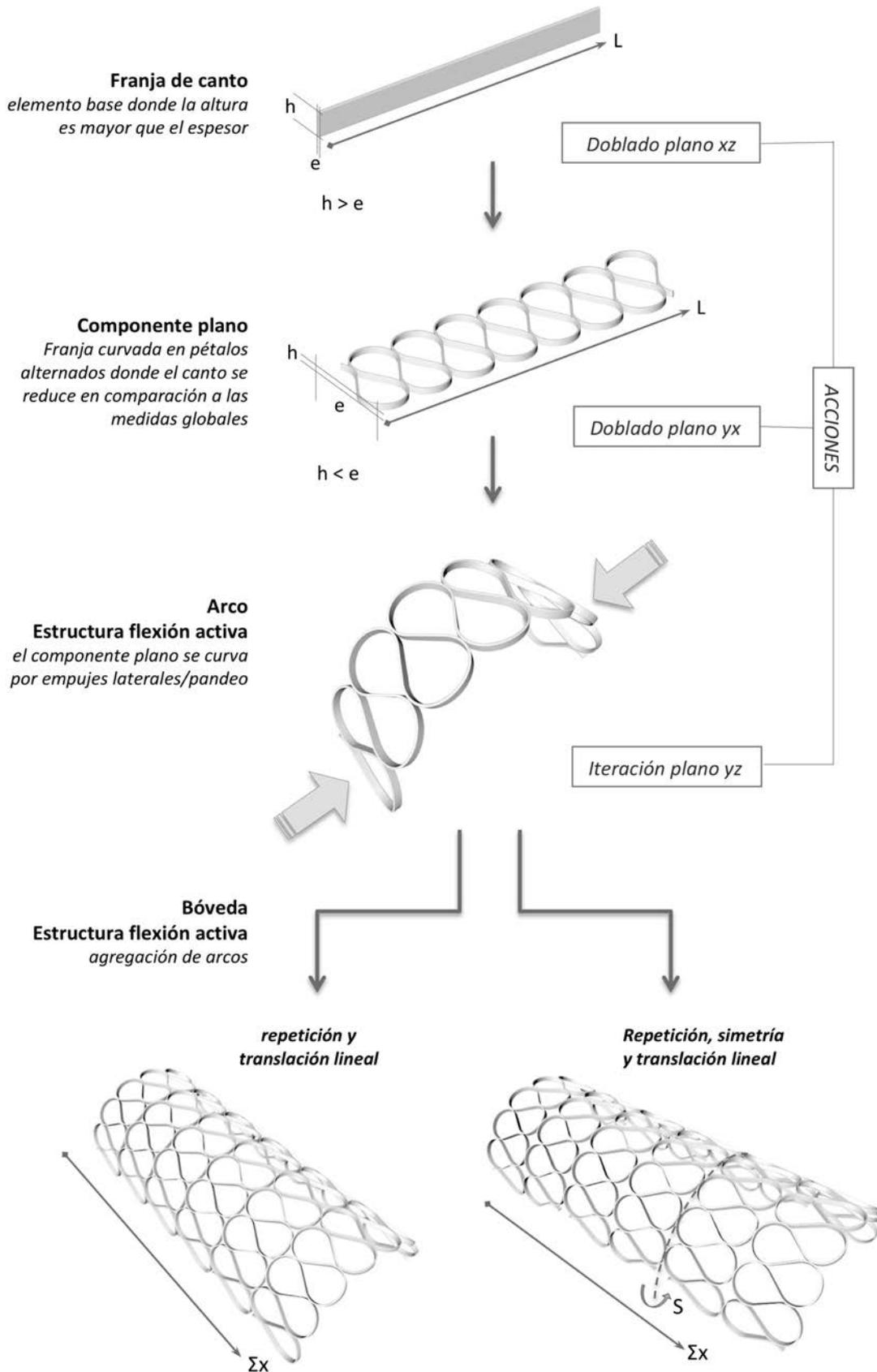




Fig. 31 Modelo donde la agregación de franjas pre-deformadas en pétalos alternados con dimensiones variables permite obtener la morfología de la cúpula, una superficie a doble curvatura positiva que puede soportar su propio peso. Las franjas separadamente son planas, y cuando se unen empiezan a curvarse hasta formar la cúpula. © Ludovica Rossi 2015

rotación del elemento, el punto de la curvatura máxima de un pétalo se corresponde al punto de unión de dos pétalos de la fibra adyacente (Fig. 33). En alternativa, el punto de unión entre husos contiguos coincide en el punto de máxima curvatura de las fibras cuando se aplica además una rotación sobre el eje de desarrollo de los pétalos alternados (Fig. 34). En todo caso se obtiene una superficie sinclástica a partir de elementos planos, curvados y repetidos por rotación en el espacio tridimensional.

Este método permite la construcción de superficies curvas a partir de elementos planos. Las pruebas realizadas han mantenido rectilíneo (o esencialmente lineal) el eje de desarrollo y se han variado las dimensiones de los pétalos entre sí. Las tiras son esencialmente rectas antes de ser curvadas obteniendo una superficie de curvatura simple en la bóveda, o doble de la cúpula (Esquema 3.3). Queda abierto el campo de desarrollo para geometrías de tiras onduladas donde cambia la dirección de flexión predominante. En el caso de sistemas de placas espaciales con tiras de geometrías complejas, las direcciones de actuación no son paralelas y no se alinean con las tiras. Esto modifica la distribución del momento de flexión encontrándose no exactamente alineado ortogonalmente a superficie (Brütting et al, 2017). Por una parte las reglas geométricas del desarrollo según un eje y la variación de las dimensiones de los pétalos permiten definir una amplia variedad de configuraciones planas para ser utilizadas como componentes a flexión activa. Por otra parte en cada configuración habrá una distribución específica

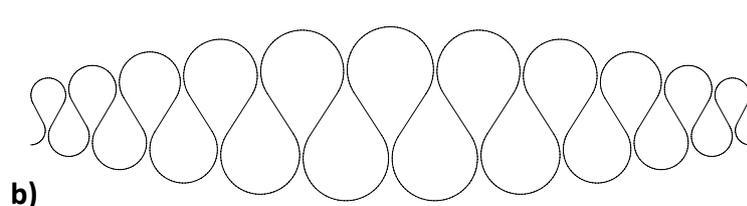
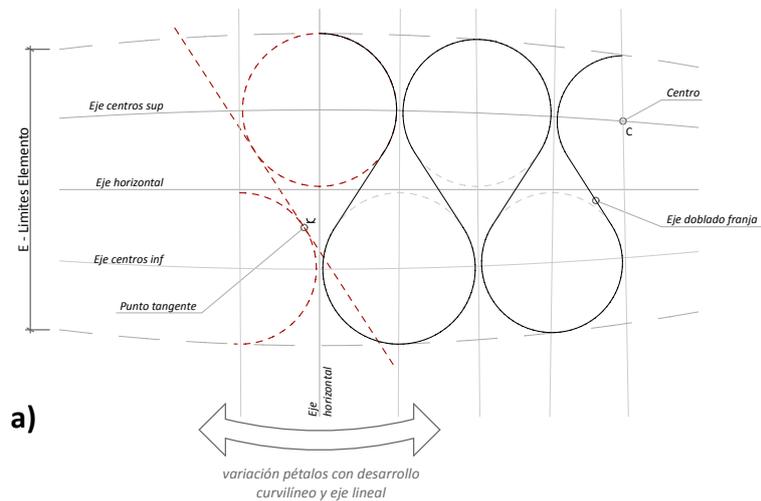


Fig. 32 Franja pre-deformada en pétalos alternados con dimensiones variables, de más grande en el centro a más pequeños en los extremos, y según un eje de desarrollo lineal: **a)** Relación geométrica de las partes; **b)** Desarrollo lineal del componente plano en forma ovalada. © Ludovica Rossi 2018

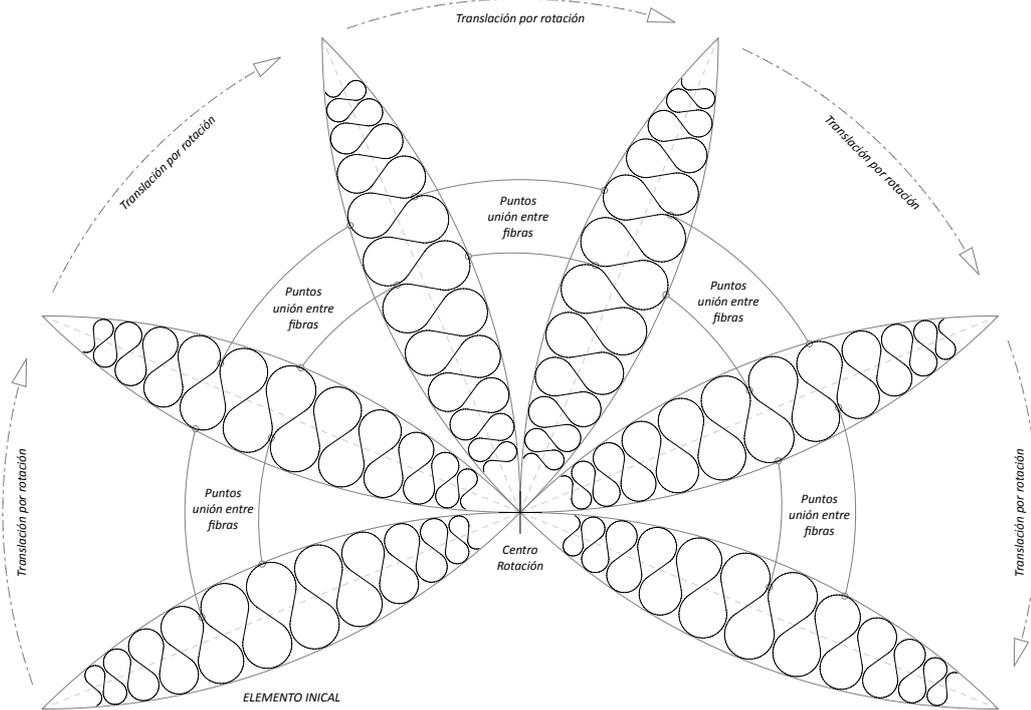


Fig. 33 Desarrollo en planta de una cúpula compuesta por iteración y rotación de franjas pre-deformada, donde el punto de la curvatura máxima de un pétalo corresponde al punto de unión de dos pétalos de la fibra adyacente © Ludovica Rossi 2018

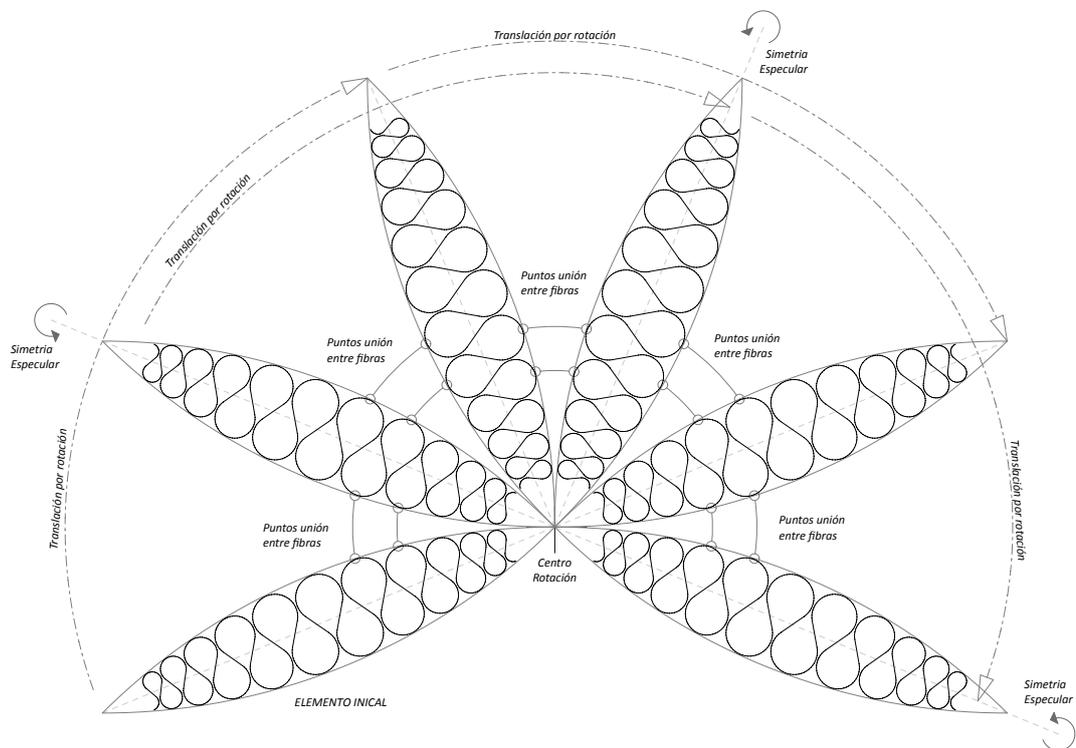
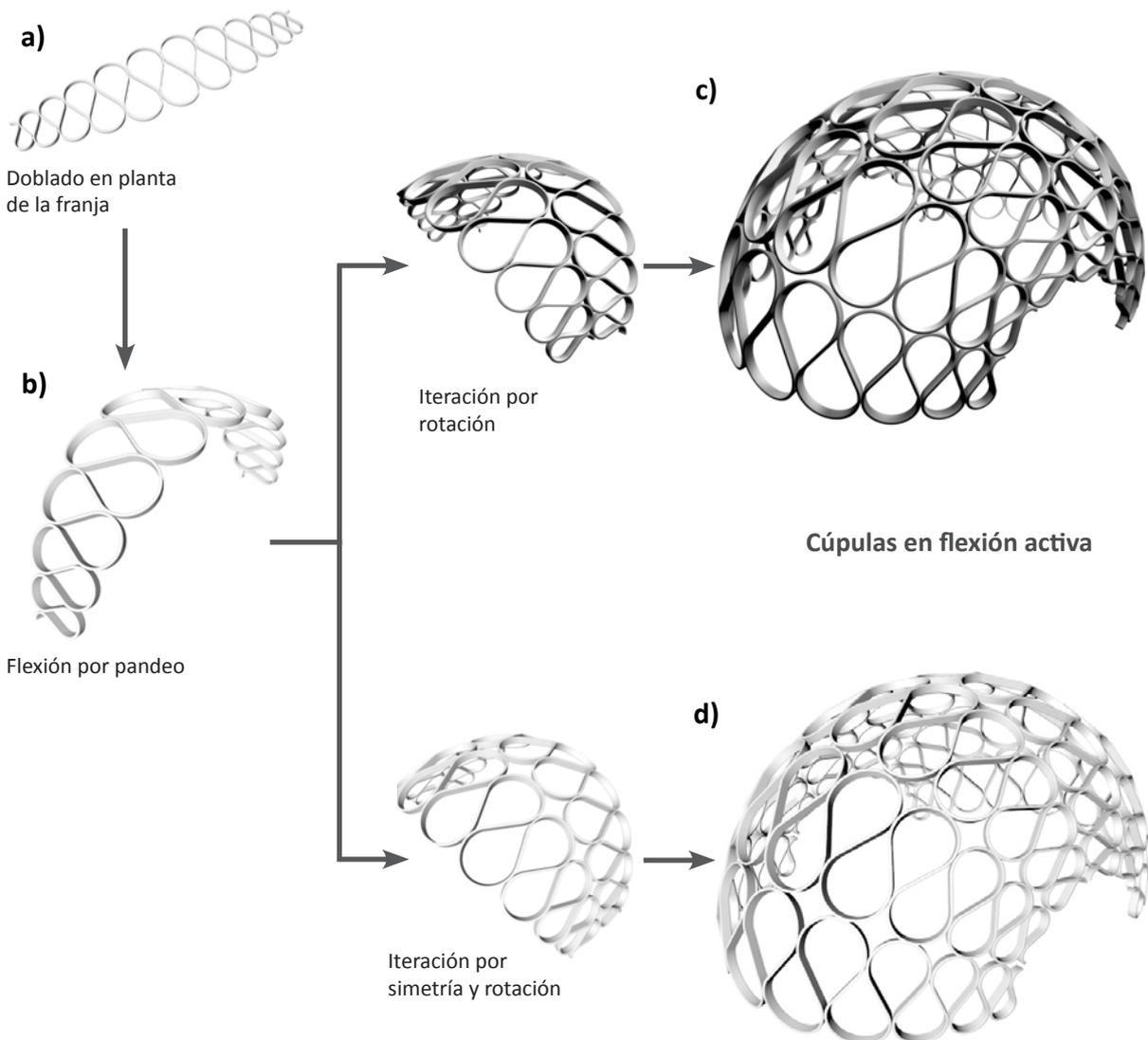


Fig. 34 Desarrollo en planta de una cúpula compuesta por iteración, rotación y simetría de franjas pre-deformadas, donde el punto de unión entre husos contiguos coincide en el punto de máxima curvatura de las fibras. © Ludovica Rossi 2018

Esquema 3.3 Proceso de generación de la forma: **a)** Doblado de la franja en pétalos alternados con dimensiones variables, de más grande en el centro a más pequeños en los extremos con desarrollo según un eje lineal; **b)** Componente individual sometido a flexión por pandeo mediante la aplicación de esfuerzos normales en los extremos; **c)** Formación de una cúpula mediante iteración por rotación de 6 componentes donde cada pétalo de un arco comparte dos puntos de unión con el arco siguiente; **d)** Cúpula obtenida por iteración y rotación de parejas de arcos simétricos, donde entre dos elementos el punto de unión es en la zona de máxima curvatura de cada pétalo. © Ludovica Rossi 2017

de las tensiones superficiales del elemento doblado y de la superficie global que se obtendría.

La unión entre sí de las franjas pre-deformadas configura un sistema que tiene un nivel de rigidez suficiente para obtener una superficie de doble-curvatura. La construcción de la cúpula por segmentos ofrece orientar los elementos a flexión en dirección del eje de rotación horizontal (Fig. 35a), como se ha representado en los dibujos (2d y 3d) o en alternativa siguiendo la dirección de rotación vertical (Fig. 35b, 36). La estructura se levanta del plano de apoyo y toma la forma de una cúpula que sostiene su propio peso. 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.

En el desarrollo de los modelos físicos la voluntad de reproducir, aunque parcialmente, la dinámica natural del tejido vivo de las cactáceas ha determinado la preferencia hacia el uso de materiales con mayores propiedades elásticas y de flexibilidad, de los que se emplean usualmente en la construcción de estructuras arquitectónicas. El uso de materiales deformables permite reproducir la propiedad de adaptabilidad del tejido y representa un punto límite en el control de la forma arquitectónica.

3.4.2 Franjas pre-deformadas cerradas en anillo

En el caso de los modelos descritos anteriormente, en fibras continuas, se ha visto cómo aplicando una fuerza externa se modifica la forma general del elemento: por acercamiento de sus extremos la fibra pre-deformada se levanta del plano y asume la forma del arco. Según como se define la secuencia de las uniones, a lo largo de la franja, cambia la forma que toma el arco. La conexión entre sí de más fibras pre-deformadas genera una superficie de curvatura simple o sinclástica, según modelos realizados.

En la construcción de modelos por elementos agregados y compuestos de fibras de neumáticos cerradas y dobladas sobre

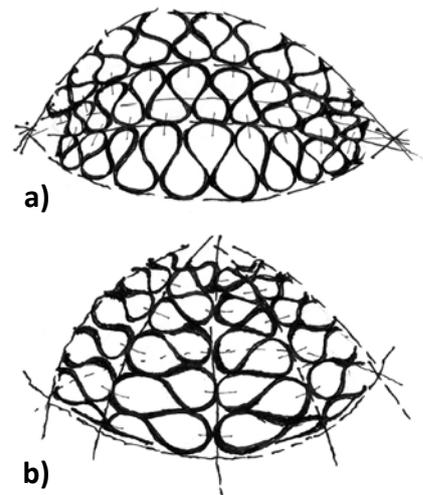


Fig. 35 Orientación de las franjas según: **a)** Eje de rotación horizontal; **b)** Eje de rotación vertical. © Ludovica Rossi 2015

Fig. 36 Modelos en franjas pre-deformadas en pétalos alternados con dimensiones decrecientes, de más grandes en la base a más pequeños en el otro extremo, y según un eje de desarrollo lineal. La unión de cada componente a flexión permite obtener la porción de una cúpula según un eje de rotación vertical. © Ludovica Rossi 2015





Fig. 37 Franja pre-deformada cerrada en forma de anillo. © Ludovica Rossi 2017



Fig. 38 Detalle unión franjas cerradas en anillos. © Ludovica Rossi 2015

Fig. 39 Modelo en forma de una cúspide con una morfología similar a un conoide obtenido por agregación de franjas cerradas sobre sí con forma ovalada iguales entre ellas. El modelo puede ser orientado hacia arriba o abajo. ©Ludovica Rossi 2015



Si mismas el procedimiento inicial es similar: la franja, con una extensión más limitada, es curvada y cerrada para obtener un elemento plano de forma circular u ovalada. Se define un patrón similar a un anillo que puede ser repetido en el espacio (Fig. 37). La forma en S interior aumenta la resistencia a los empujes laterales y la forma circular del exterior representa el criterio de auto-organización que podrá asumir el sistema.

El procedimiento manual de generación de la forma base, utilizado en la construcción de los modelos físicos, cierra la franja sobre sí, fijando un extremo a lo largo de la fibra. La parte restante se curva y dobla en forma de S en el interior del anillo y se aplican los puntos de sujeción a lo largo de la franja para fijar la forma. Al doblar la tira de neumático se aprovecha la flexibilidad del material y el sistema de uniones limita y bloquea las deformaciones aplicadas. Las tensiones internas generan una nueva condición de equilibrio.

En comparación a la franja pre-deformada en pétalos alternados, la variación de este modelo depende del proceso de agregación (Fig. 38). En este sistema de tipo celular la estructura deriva sus propiedades mecánicas de la disposición del material y de sus huecos, por lo tanto la geometría es la principal responsable del comportamiento mecánico (La Magna y Knippers, 2018). Al variar la geometría y la topología del patrón la respuesta mecánica cambia (Fig. 39, 42).

La flexibilidad del material admite la deformación de los anillos que se distorsionan y permiten moldear la superficie. Cada elemento del sistema se organiza únicamente en función de los elementos cercanos, siguiendo el principio base de la auto-organización del tejido celular (Fig. 40). Si las franjas cerradas

fuesen perfectamente circulares y todas iguales entre sí, el resultado sería una superficie plana agujerada. Si los anillos son de diferentes tamaños la superficie tiende a arrugarse y se levanta del plano de apoyo. Entre los modelos físicos realizados se ha trabajado con un patrón hexagonal donde un elemento central está rodeado por 6 anillos de diámetro mayor (Fig. 41), y así se obtiene la porción de la superficie curva de una esfera. Los elementos se repiten por teselación en el espacio y definen la superficie a doble curvatura de la cúpula (Fig. 42). Otro patrón de agregación de franjas pre-deformadas, de forma ovalada e iguales entre sí, ha permitido obtener una cúspide con una morfología similar a un paraboloides hiperbólico (Fig. 39).

Las características geométricas del patrón (que mantiene su topología pero modifica sus dimensiones relativas) y los niveles de tolerancia aplicados a un elevado número de repeticiones participan en la generación del sistema morfológico general. Por otra parte inducir una doble curvatura en patrones inicialmente planos es un subproducto de la flexión activa (La Magna y Knippers, 2018). En el caso específico se aprovecha la deformación elástica del material como estrategia para inducir la doble curvatura. Las fibras cerradas son acopladas y ejercen entre sí unas tensiones recíprocas que participan en la generación de la forma definiendo un mecanismo de deformación intrínseca del patrón individual.

El sistema asume la doble curvatura por agregación de elementos y sostiene su propio peso mientras el equilibrio de los esfuerzos está garantizado por la forma. Estos modelos aunque a pequeña escala, presentan una mayor deformación de la banda neumática y en términos cualitativos son más rígidos que los anteriores.



Fig. 40 Conjunto de franja pre-deformadas en anillos cerrados. © Ludovica Rossi 2015



Fig. 41 Patrón hexagonal de unión con un elemento central rodeado por 6 anillos antes de ser fijados. © Ludovica Rossi 2017

Fig. 42 Dos variantes de colocación en el espacio de la cúpula por agregación del patrón hexagonal. © Ludovica Rossi 2017





Fig. 43 La malla de banda de neumáticos de bicicleta unidas de forma regular y alternada modifica su configuración por las propiedades de elasticidad, flexibilidad y extensibilidad del material. © Ludovica Rossi 2013

3.5 RESISTENCIA POR FORMA

La reproducción del tejido orgánico por medio de los modelos físicos pone en evidencia un momento concreto del referente natural. Éste tiene que resolver en sí mismo las relaciones de fuerzas internas y externas del sistema, para garantizar las condiciones de equilibrio de la estructura. Los modelos realizados con franjas neumáticas unidas de forma regular y alternada (malla sinusoidal regular - Fig. 43), ofrecen soluciones a las condiciones de equilibrio internas con la introducción de elementos rígidos como actuadores externos, que modificando la malla controlan la forma (Fig. 44). Las condiciones de equilibrio externas (la forma general del sistema) son garantizadas por un sistema de esfuerzos aplicados que ponen en tensión la malla en su conjunto.

Los modelos sucesivos han modificado la forma de trabajar la franja (modelos franjas pre-deformadas) para generar diferentes condiciones de equilibrio en el sistema. La franja de neumático doblada sobre sí misma (tanto en los modelos de fibras continuas como por elementos cerrados en anillo) determina un primer nivel de organización de las fuerzas internas que genera una nueva condición de equilibrio respecto a la franja lineal, según la secuencia de las uniones aplicadas (Fig. 45). La agregación de las franjas configura la morfología general en un nivel de organización sucesivo.

Los neumáticos como material pueden ser estirados y se deforman alargándose, pero este alargamiento es de difícil control, como se ha observado en los modelos en franjas sinusoidales. Al mismo tiempo pueden ser comprimidos, arrugados, enrollados y no se fracturan con facilidad por las propiedades de flexibilidad y extensibilidad que ofrecen. El material para poder ser empleado en los modelos ha sido primero comprimido por elementos (fibra girada y cerrada sobre sí misma) y luego tensado en su



Fig. 44 Vista lateral de un modelo de malla sinusoidal regular con actuadores externos cilíndricos, altura de las franjas 2 cm, núm. total de franjas 14. © Ronald Stallard 2014

conjunto (superficie de doble curvatura). Bajo esfuerzos de compresión el material se adapta distorsionándose (Fig. 45). En el caso de tensiones de tracción, el material tiende a alargarse hasta rasgarse. En los modelos físicos las dinámicas propias del material son un factor de generación de la forma. Por lo cual las condiciones de equilibrio de las tensiones del modelo dependen de las variables físicas del mismo.

En el desarrollo de estructuras de flexión activa, el modelo estructural físico recupera importancia como herramienta de búsqueda de formas, donde la estabilidad desempeña un papel decisivo en la integridad estructural (Lienhard et al., 2013). Los modelos físicos, aunque a pequeña escala, se encuentran en el medio del proceso de diseño debido a que la complejidad del sistema necesita incluir el comportamiento de la flexión desde un principio. En este sentido la flexión activa debe considerarse como un principio de diseño estructural, más que como una tipología estructural. En consecuencia, esto implica tener en cuenta la tensión de flexión resultante durante la construcción y la vida útil funcional de la estructura (Brancart et al., 2016).

En la construcción de los modelos las variables de flexibilidad y elasticidad del material principal, utilizado para las bandas, permiten estudiar y reproducir la morfología orgánica. Las fuerzas externas al sistema dependen en gran medida del tamaño, por la fuerza de gravedad y el peso de la estructura. Mientras las internas dependen de la elasticidad del material, la solidaridad de las partes y de la capacidad de adaptación de la estructura que unifican el conjunto. En los modelos construidos la resistencia es obtenida por forma y está determinada cuando las tensiones internas de las franjas y las fuerzas externas de la forma en su conjunto están en equilibrio (balanceadas entre sí).

La flexión activa basa su geometría en la deformación elástica de elementos inicialmente rectos (Fig. 46). El esfuerzo de flexión en los elementos doblados depende del módulo de Young del material, de la altura de la sección transversal y la curvatura. Para lograr una curvatura suficiente, la altura de la sección transversal y el módulo de Young deben ser pequeños. Por lo tanto, la



Fig. 45 El modelo en acoplamiento de franjas deformadas en forma de anillos es obtenido por compresión de la banda neumática. © Ludovica Rossi 2017

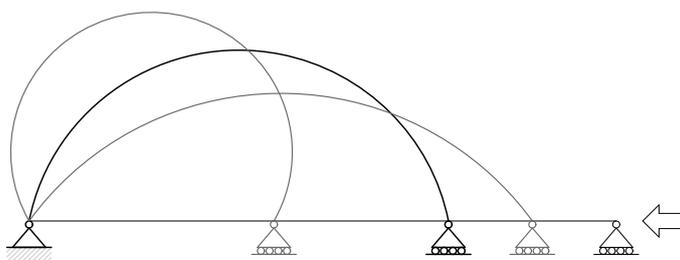


Fig. 46 Esquema de la deformación elástica de un elemento inicialmente recto. El esfuerzo de flexión para doblar el elemento dependerá del módulo de Young del material, de la altura de la sección transversal a igualdad de longitud. Para menores valores del módulo de Young y del canto de la sección se obtiene una mayor curvatura a flexión. © Ludovica Rossi 2018

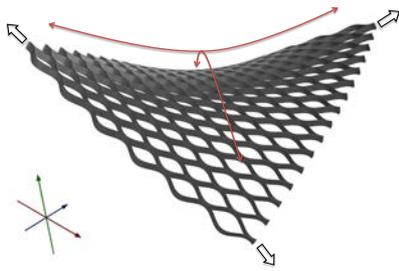


Fig. 47 La malla regular es un sistema a tracción tipo membrana, donde la rigidez geométrica es positiva porque la membrana está bajo fuerzas de tensión axiales. © Ludovica Rossi 2014

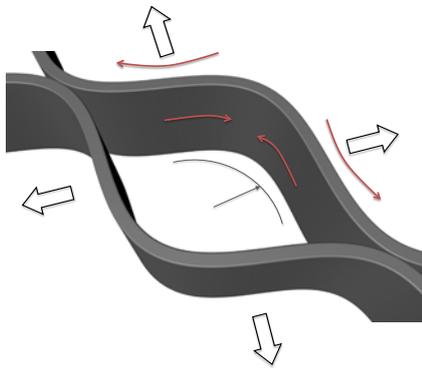


Fig. 48 Relación de esfuerzos de una franja en la malla sinusoidal regular: las fuerzas de tracción aplicadas abren las franjas entre sí, estas asumen la dirección curvilínea donde las fibras internas de la banda están en compresión y las externas en tracción. © Ludovica Rossi 2014

rigidez de los elementos elásticamente curvados es pequeña. Paralelamente la rigidez a flexión del elemento estructural depende de la sección transversal, de las propiedades del material y del sistema estático (Gengnagel et al., 2014). Con la construcción del elemento en banda de rodadura en neumáticos la rigidez del material es muy baja (ver párrafo 2.4.2 - tabla 2.6), por consiguiente la rigidez elástica es muy pequeña y toma relevancia la rigidez geométrica del sistema. Esta característica es relevante para todas las estructuras activas de flexión, ya que la rigidez elástica está limitada por la resistencia del material y el grado de curvatura. Se puede generalizar que la estabilidad juega un papel decisivo en la integridad estructural de todas las estructuras de flexión-actividad (Lienhard, 2013).

La rigidez geométrica depende del sistema estático y de las cargas aplicadas sobre los elementos estructurales. El valor absoluto de la rigidez geométrica aumenta a medida que aumentan las deformaciones. La rigidez geométrica de un elemento es positiva si el elemento está bajo fuerzas de tensión axiales (malla sinusoidal regular - Fig. 47, 48) y negativo si está bajo fuerzas de compresión axiales (cúpula en franjas predeformadas - Fig. 49, 52). La rigidez total es la suma de la rigidez elástica por el material y de la rigidez geométrica (Gengnagel et al., 2014).

Analizando los elementos de una estructura a flexión activa se observa que estos están curvados elásticamente por la aplicación de una tensión inicial de flexión (compresión de los extremos del perfil que curva por pandeo - Fig. 50a). En materiales con baja capacidad de alargamiento y según su rigidez (E), cuanto mayor es la tensión inicial menor será la reserva de tensión bajo una carga externa. Por lo cual, a menor estrés inicial aplicado

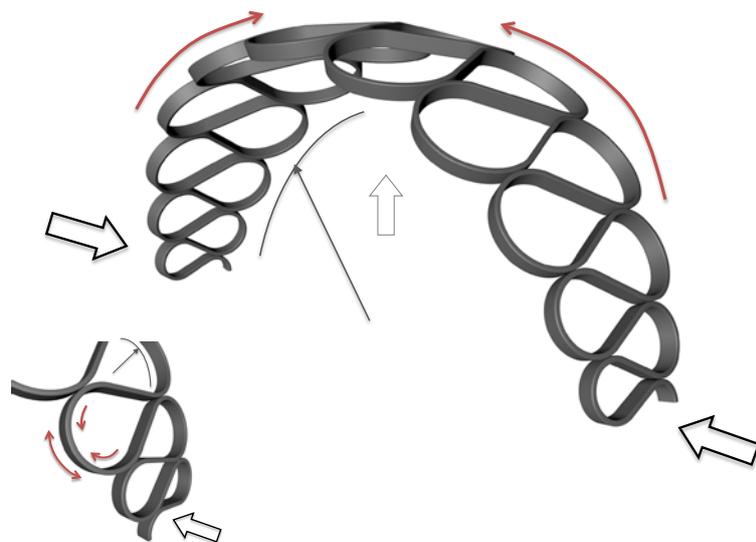


Fig. 49 Las fibras internas están sometidas a compresión y tracción según el radio de curvatura aplicado en la deformación de la franja en pétalos alternados. Cuando la franja es sometida a flexión esta está bajo fuerzas de compresión axiales que la levantan del plano de apoyo y la rigidez geométrica resultante se considera negativa. © Ludovica Rossi 2017

mayor será la respuesta del elemento a las cargas externas. La tensión inicial es directamente proporcional al módulo de Young e inversamente proporcional al radio de curvatura del elemento flexionado (Gengnagel et al., 2014). Esta hipótesis es en general válida para materiales con comportamiento elástico lineal, mientras no es aplicable en caso de utilizar la banda de rodadura de los neumáticos por tener valores bajos de rigidez y un comportamiento elástico no lineal (Fig. 50b).

Analizando el comportamiento de los arcos construidos en banda de neumáticos dobladas, el modelo muestra cómo el elemento asume una forma que puede soportar su propio peso (Fig. 51a). Si se aplica una carga externa el arco se deforma y puede llegar hasta el pavimento, pero no hay un colapso de la estructura (Fig. 51b). Una vez retirada la carga, el elemento vuelve a su estado inicial. Estas dinámicas dependen de las propiedades de tenacidad y resiliencia del material. La tenacidad representa la capacidad del material de absorber energía antes de la fractura y también se expresa como el “trabajo de extensión”. Como se ha comentado anteriormente, esta propiedad se puede modificar en el neumático con una variación del negro de humo en su composición. La resiliencia representa la energía de retorno que es diferente al trabajo necesario para la extensión del material. El trabajo de retroceso dividido por el trabajo de estiramiento es equivalente a la elasticidad del material (Vogel, 2000).

Los elementos planos en bandas pre-deformadas se conectan para formar el sistema estructural de doble curvatura. La cúpula es obtenida por unión de los elementos que, por sus diseños, se curvan mientras se conectan entre sí. Este procedimiento permite construir superficies de doble curvatura a partir de elementos desarrollables de curva simple con un proceso de

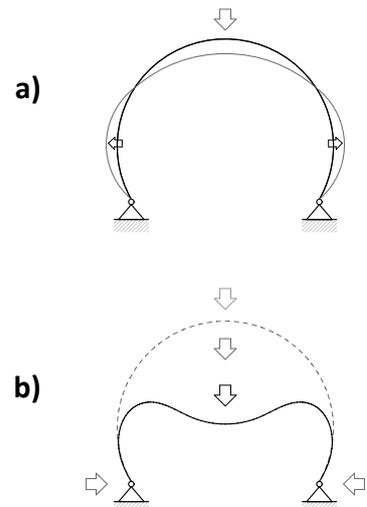


Fig. 50 Relación estructura de flexión activa y carga superior aplicada: **a)** En materiales con bajo nivel de alargamiento, la resistencia total depende de la tensión inicial necesaria para curvar el elemento, a menor estrés inicial más responderá a la carga externa; **b)** En materiales como la banda neumática con baja rigidez y elevado estiramiento, el elemento sometido a flexión activa responde a la carga externa curvándose. © Ludovica Rossi 2018

Fig. 51 Modelo franja pre-deformada en pétalos alternados: **a)** El elemento plano sometido a flexión activa asume la forma de un arco; **b)** El arco bajo carga externa se curva en una nueva condición de equilibrio, al remover la carga externa vuelve a la configuración inicial. ©Ludovica Rossi 2015



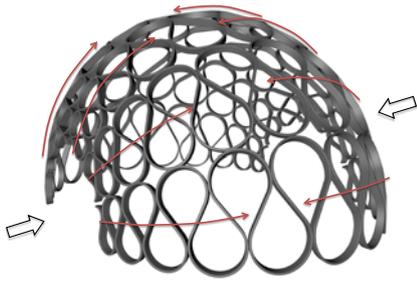
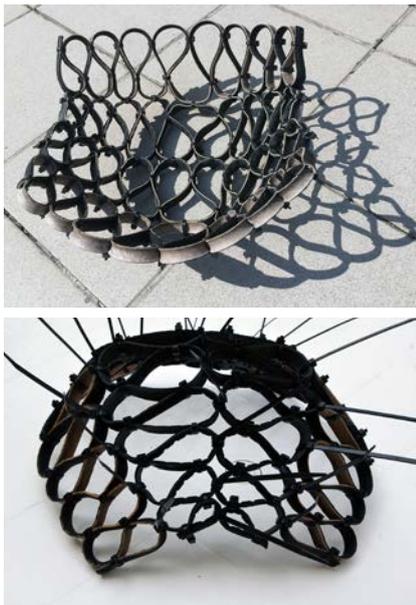


Fig. 52 La cúpula es obtenida por sumatoria de franjas, donde el sistema funciona cómo un caparazón y la curvatura permite establecer una transferencia de carga global por acción de la membrana. ©Ludovica Rossi 2018

construcción por lo general sencillo, y al mismo tiempo se logra la eficiencia estructural de un caparazón (Fig. 52). La conexión de múltiples tiras en una estructura a doble curvatura permite establecer una transferencia de carga global por acción de la membrana (Brütting et al., 2017). Los modelos en forma de cúpula, construidos con franjas pre-deformadas, aumentan su rigidez en comparación al elemento unitario del arco. La resistencia es obtenida por forma, o sea por la geometría de las partes y del sistema en su conjunto (Fig. 53). La cúpula soporta mejor la carga externa respecto al modelo del arco. En todo caso se observa que el sistema sigue teniendo cierta capacidad de deformación y no alcanza un nivel de rigidez que impide los movimientos de la trama en neumáticos. En una prueba se ha dejado caer la cúpula desde una altura de unos 60 cm, que, al llegar al suelo, ha rebotado unas veces dejando visibles las oscilaciones de la membrana hasta estabilizarse.

Fig. 53 El modelo en forma de cúpula, construidos con franjas pre-deformadas, tiene una mayor rigidez en comparación al elemento unitario, y gana en independencia respecto al medio, donde la doble curvatura se mantiene orientando el modelo hacia arriba y hacia abajo. ©Ludovica Rossi 2018

En esta circunstancia la estructura así definida necesitaría los elementos adicionales que ofrecen la oportunidad de crear una estructura híbrida (Fig. 54), cuya rigidez es significativamente mayor que la rigidez de los elementos elásticamente curvados (Gengnagel et al., 2014). Paralelamente sigue estando abierta la investigación bio-inspirada. A cada avance en la comprensión de la morfogenética del tejido estructural, el referente natural puede ofrecer nuevas variables para progresar en la complejidad del sistema. En los ejemplos de plantas observados el tejido orgánico se estratifica sobre sí mismo al crecer la planta. De forma similar se abren nuevos espacios de investigación al imaginar la estructura en neumático compuesta por capas superpuestas de franjas pre-deformadas (Fig. 55).



3.6 CONCLUSIONES CAPÍTULO 3

El análisis del sistema estructural portante de las cactáceas permite obtener dos principales configuraciones geométricas (sinclástica y anticlástica) como sistemas auto-organizados. El comportamiento estructural se centra en los aspectos de flexibilidad y estiramiento puestos en relación con la estabilidad del conjunto. Trabajando en campo elástico, no rígido, los modelos físicos permiten una inversión del 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. En un sistema flexible, las fuerzas que actúan sobre él pueden cambiar su forma y la nueva configuración soporta las fuerzas diferentemente. En este proceso la forma es el resultado del auto-equilibrio de los esfuerzos y no tiene una tipología definida previamente.

La flexibilidad de los modelos es obtenida por geometría y forma, además de las propiedades del material. Por sus características geométricas, la franja está sujeta a doblarse por los esfuerzos laterales. La capacidad de adaptación del sistema está dada por las propiedades de deformación de la morfología, que dependen de la baja rigidez del material, la esbeltez de los perfiles y las deformaciones impuestas al sistema. Los modelos construidos se han ido definiendo según la fibra abierta, tratada como activa por la extensibilidad de la goma, y la fibra cerrada pre-deformada, que trabaja como elementos planos a flexión activa. La franjas dobladas permiten el control de la deformación de la banda y limitan la extensibilidad del material. El desarrollo del trabajo muestra cómo las actuaciones geométricas realizadas sobre banda neumática permiten obtener un sistema de flexión activa capaz de soportar su propio peso. Se obtienen sistemas auto-portantes con un bajo módulo de rigidez y elevadas propiedades de elasticidad, extensibilidad y resiliencia.

Los modelos mantienen la misma función del modelo biológico y son un producto biomimético funcional. Se verifica la potencialidad del sistema estructural de las cactáceas como generador de conceptos. La incidencia de la flexibilidad y estiramiento de la goma reforzada con fibras textiles, del neumático de bicicleta, ofrece la posibilidad de experimentar diferentes configuraciones geométricas, donde la resistencia del sistema es obtenida por geometría, más que por rigidez del material. La deformación es una propiedad arquitectónica que permite alcanzar mejoras en la condiciones de equilibrio (Esquema 3.4). En el próximo capítulo se trata la sistematización de los procesos implícitos y explícitos por medio de la simulación digital, sin los cuales no hubiera sido posible definir la resistencia descripta en el presente capítulo.

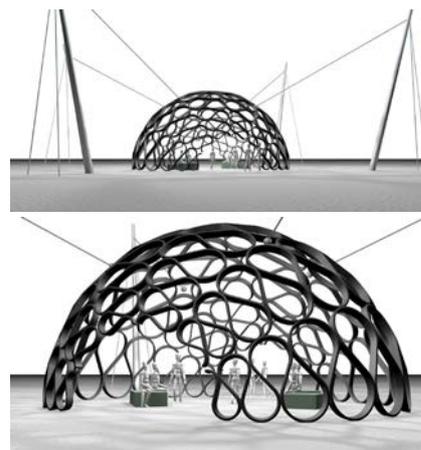
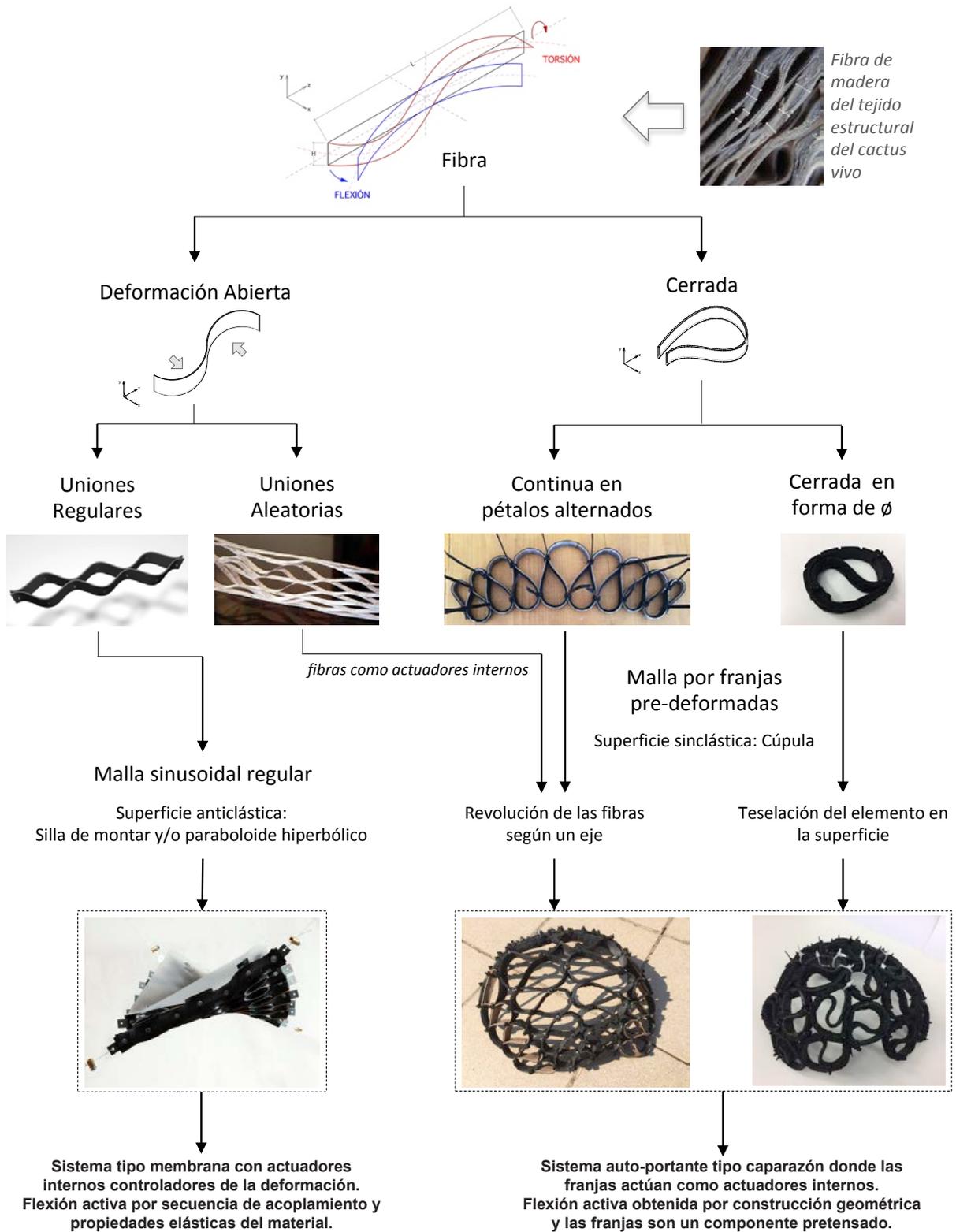


Fig. 54 Hipótesis de una estructura híbrida que une la malla en franjas pre-deformadas en neumáticos con elementos adicionales para aumentar la rigidez del sistema. ©Ludovica Rossi 2017



Fig. 55 Hipótesis de una estructura en neumático compuesta por capas sobrepuestas de franjas pre-deformadas. ©Ludovica Rossi 2017



Esquema 3.4 Secuencia del desarrollo de los modelos en flexión activa con banda de neumáticos de bicicletas en relación a la geometría de la fibra, tipo de deformaciones aplicadas al elemento de base y secuencia de acoplamiento en la generación de la morfología global. © Ludovica Rossi 2017

3.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- La Magna R. y Knippers J., 2018, *Tailoring the Bending Behaviour of Material Patterns for the Induction of Double Curvature*, en *Humanizing Digital Reality. Design Modelling Symposium Paris 2017*, editores: K. De Rycke et al., Ed. Springer Nature Singapur Pte Ltd, DOI: 10.1007/978-981-10-6611-5_38
- Brütting J., Körner A., Sonntag D. y Knippers J., 2017, *Bending-Active Segmented Shells*, Conference: IASS Annual Symposium 2017, *Interfaces: architecture, engineering, science*, 25/28 Septiembre 2017, Hamburgo, German, Ed. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)
- Speck O., Speck D., Horn R., Gantner J. y Sedlbauer K. P., 2017, *Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments*, en *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol 12 num. 1, Ed. IOP Publishing Ltd, DOI: 10.1088/1748-3190/12/1/011004
- Brancart S., De Laet L. y De Temmerman N., 2016, *Transformable bending-active structures: Manipulating elastic deformation in kinetic and rapidly assembled structures*, pp. 275-282, en *Structures and Architecture*, Ed. Cruz, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02651-3
- Brancart S., De Laet L. y De Temmerman N., 2014, *Transformable Active Bending: Elastic deformation as component transformation in transformable structures*, pp. 275-282, Conference: IASS-SLTE 2014 Symposium, *Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints*, 15/19 Septiembre 2014, Brasilia, Brasil, Ed. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)
- Gengnagel C., Alpermann H. y Lafuente E., 2014, *Active Bending in Hybrid Structures*, Conference: *FORM - RULE | RULE – FORM 2013*, editores: G. H. Filz, R. Maleczek, C. Scheiber, Ed. Innsbruck University, ISBN: 978-3-902936-23-3
- Lienhard J., Schleicher S., y Knippers J., 2014, *Bio-inspired, flexible structures and materials*, capítulo 11, libro: *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering Edition*, editores: E. Pacheco Torgal et al., Springer Ed., 2015. ISBN: 978-3-319-09287-4, DOI: 10.1007/978-3-319-09287-4_12
- Lienhard J. 2013, *Bending-Active Structures*, Tesis Doctoral, director: Jan Knippers, Universidad de Stuttgart, Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), ISBN 978-3-922302-36-0
- Lienhard J., Alpermann H., Gengnagel C. y Knippers J., 2013, *Active Bending, A Review on Structures where Bending is used as a Self-Formation Process*, pp. 187-196, en *International Journal of Space Structures*, vol. 28 núm. 3-4, Ed. Multi-Science Publishing Co. Ltd., DOI: 10.1260/0266-3511.28.3-4.187
- Vogel S., 2000, *Anca y palanca: Mecánica natural y mecánica humana*, Ed. Tusquets, Barcelona, ISBN: 9788483106822
- Roland C., 1973, *Frei Otto: Estructuras*, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, ISBN-10: 842520772X
- Salvadori M. y Heller R., 1972, *Le strutture in architettura*, 3ª ed., ampliada Nervi Pier Luigi (prol.), Ed. Etaslibri, Milano, ISBN 88-453-0502-

Capítulo 4

Simulación digital

Resumen

El cuarto capítulo trata la representación de las deformaciones observadas en el comportamiento de los modelos físicos. Este es un procedimiento necesario para sistematizar las dinámicas de equilibrio del sistema bio-inspirado. Se describe el proceso de simulación digital para representar la morfología en el espacio geométrico abstracto, utilizando el software Cinema4D. El procedimiento de representación sigue los pasos de la construcción física para definir las interacciones que generan la forma. La representación digital es consecuencia de las condiciones materiales de los modelos elásticos.

La digitalización de la información se desarrolla a partir de un diseño que permite combinar procesos implícitos y explícitos. Las estrategias de simulación utilizan la búsqueda de patrones repetitivos para explorar procesos generativos y simular fenómenos complejos. La falta de materialidad libera la forma y el espacio se construye a través del modelo geométrico. Se describen los procedimientos de simulación realizados para definir las leyes de transformación que permiten generar la forma. Y se discuten los procesos de diseño de los tres casos de modelos físicos: malla sinusoidal, cúpulas en franjas pre-deformadas en forma de pétalos alternados y cerradas en anillos.

Todos los modelos comparten la representación del arquetipo como transformación de la figura base del rectángulo extruido según una directriz diferencial. El objeto geométrico resultante es la unidad base de la representación y caracteriza las propiedades topología del modelo. Las acciones sucesivas tratan la iteración del arquetipo en el espacio y la aplicación de objetos deformadores para llegar a la configuración general. El proceso de repetición agregativo permite al sistema crecer. La iteración es una transformación de crecimiento diferencial del sistema y es una alteración que se basa en el comportamiento en lugar de la forma. La introducción de factores de variación (en diferentes fases del modelo) definen la deformación como capacidad de adaptación del tejido. Las variaciones de la forma son cambios relativos de un estado inicial e implican los atributos de elasticidad y flexibilidad como propiedades intrínsecas de la morfología.

En los modelos virtuales se establecen las leyes de transformación. Dependiendo del modelo se obtienen configuraciones dinámicas que introducen la línea temporal en la variación de la forma de rectilínea a sinusoidal, y variaciones morfológicas debidas a la deformación de mallas planas y por teselación de superficies.

La representación digital de la morfología conduce a sistematizar las acciones que generan la forma y los procesos asociados. La definición del orden, secuencia y jerarquía de las operaciones gráficas de representación son factores que integran y completan las informaciones generadas en el modelo físico, donde las acciones se desarrollan conjuntamente y se sobreponen. El diseño se entiende como un mapa genético donde los datos primitivos se van conectando unos con otros aumentando el nivel de jerarquía estructural. La sistematización de los modelos respecto a la dimensión de los procesos permite explicitar la diferencia entre lo que se hace y lo que ocurre.

Sommario

Il quarto capitolo tratta della rappresentazione delle deformazioni osservate nel comportamento dei modelli fisici. Questo è un metodo necessario per sistematizzare le dinamiche di equilibrio del sistema bio-ispirato. Si descrive il processo di simulazione digitale per rappresentare la morfologia nello spazio geometrico astratto, utilizzando il software Cinema4D. La procedura di rappresentazione segue i passaggi della costruzione fisica per definire le interazioni che generano la forma. La rappresentazione digitale è una conseguenza delle condizioni materiali dei modelli elastici.

La digitalizzazione delle informazioni è sviluppata per mezzo di un disegno che consente di combinare processi impliciti ed espliciti. Le strategie di simulazione usano la ricerca di schemi ripetitivi per esplorare i processi generativi e simulare fenomeni complessi. La mancanza di materialità libera la forma e lo spazio è costruito attraverso il modello geometrico. Si descrivono le procedure di simulazione eseguite per definire le leggi di trasformazione che consentono di generare la forma. E si esaminano i processi di disegno dei tre casi dei modelli fisici: reti sinusoidali, cupole in strisce pre-deformate in forma di petali alternati e chiuse in anelli.

Tutti i modelli condividono la rappresentazione dell'archetipo come una trasformazione della figura di base di un rettangolo estruso lungo una direttiva differenziale. L'oggetto geometrico risultante è l'unità di base della rappresentazione e caratterizza le proprietà topologiche del modello. Le seguenti azioni trattano l'iterazione dell'archetipo nello spazio e l'applicazione di oggetti deformanti per arrivare alla configurazione generale. Il processo di ripetizione aggregativa consente al sistema di crescere. L'iterazione è una trasformazione per la crescita differenziale del sistema ed è un'alterazione basata sul comportamento anziché sulla forma. L'introduzione di fattori di variazione (in diverse fasi del modello) definisce la deformazione come capacità di adattamento del tessuto. Le variazioni della forma sono cambiamenti relativi di uno stato iniziale e implicano gli attributi di elasticità e flessibilità come proprietà intrinseche della morfologia.

Nei modelli virtuali si stabiliscono le leggi della trasformazione. Secondo il modello si ottengono: configurazioni dinamiche che introducono la linea del tempo nella variazione della forma, da rettilinea a sinusoidale, e morfologie dovute alla deformazione di maglie piatte e alla tassellatura di superfici.

La rappresentazione digitale della morfologia porta a sistematizzare le azioni che generano la forma e i processi associati. La definizione dell'ordine, della sequenza e della gerarchia delle operazioni di rappresentazione grafica sono fattori che integrano e completano le informazioni generate nel modello fisico, dove le azioni si sviluppano congiuntamente e si sovrappongono. Il disegno è inteso come una mappa genetica, in cui i dati primitivi si connettono tra loro aumentando il livello della gerarchia strutturale. La sistematizzazione dei modelli rispetto alla dimensione dei processi consente di rendere esplicita la differenza tra ciò che viene fatto e ciò che accade.

Abstract

The fourth chapter deals with the representation of the deformations observed in the behavior of physical models. This is a necessary method to systematize the equilibrium dynamics of the bio-inspired system. The digital simulation process to represent morphology in abstract geometric space, is described, using Cinema4D software. The representation procedure follows the steps of the physical construction to define the interactions that generate the form. The digital representation is a consequence of the material conditions of the elastic models.

The digitization of information is developed by means of a design that allows to combine implicit and explicit processes. Simulation strategies use the search for repetitive patterns to explore generative processes and simulate complex phenomena. The lack of materiality liberates the form and the space is constructed through the geometric model. The simulation procedures performed to define the laws of transformation that allow generating the form are described. And the design processes of the three cases of physical models are discussed: sinusoidal mesh, domes in pre-deformed strips in the form of alternating petals and closed in rings.

All models share the representation of the archetype as a transformation of the basic figure of a rectangle extruded along a differential directive. The resulting geometric object is the base unit of the representation and characterizes the topology properties of the model. The following actions deal with the iteration of the archetype in space and the application of deforming objects to arrive at the general configuration. The process of aggregative repetition allows the system to grow. Iteration is a transformation for the differential growth of the system and it is an alteration that is based on behavior instead of form. The introduction of variation factors (in different phases of the model) defines the deformation as tissue adaptation capacity. The variations of the form are relative changes of an initial state and imply the attributes of elasticity and flexibility as intrinsic properties of the morphology.

In the virtual models the laws of transformation are established. Depending on the model, are obtained: dynamic configurations that introduce the time line in the variation of the shape, from rectilinear to sinusoidal, and morphological variations due to deformation of flat meshes and by tessellation of surfaces.

The digital representation of morphology leads to systematize the actions that generate the form and associated processes. The definition of the order, sequence and hierarchy of graphic representation operations are factors that integrate and complete the information generated in the physical model, where actions are overlap and are developed jointly. The design is understood as a genetic map where the primitive data are connecting with each other increasing the level of structural hierarchy. The systematization of the models with respect to the dimension of the processes makes it possible to make explicit the difference between what is done and what happens.

Capítulo 4

Simulación digital

4.1 MODELOS FÍSICOS Y VIRTUALES

El estudio morfológico ha sido definido en relación a la capacidad de adaptación que tiene el tejido orgánico vivo en su crecimiento. La interpretación realizada sobre la fibra del cactus ha priorizado una visión lineal de la misma (Fig. 1). Al evaluar el tejido como una suma de células, que se agregan progresivamente en la dirección del crecimiento de la planta, se interpreta que la fibra se extiende en una dirección principal respecto a las otras dos (Fig. 2). Este marco define el ámbito geométrico del trabajo.

A lo largo de la investigación se han realizado diferentes simulaciones virtuales. Éstas se han desarrollado en paralelo a la construcción de los modelos físicos analizados en los capítulos anteriores. La totalidad de los modelos virtuales está recompilada de manera temporal en el apéndice 3. En los apartados siguientes se describe el procedimiento de simulación general realizado para definir las leyes de transformación que permiten generar la forma. Y se detallan los procesos de diseño, desde la definición del elemento base hasta las transformaciones aplicadas para llegar a la sistema general, de los tres casos tratados en el capítulo tres: malla sinusoidal regular, franjas pre-deformadas en pétalos alternados y cerradas en anillo.

La morfología orgánica ha sido desarrollada a partir de las dinámicas de deformación de los materiales utilizados en los modelos físicos. Los resultados obtenidos han sido reproducidos en los modelos virtuales, utilizando sobretodo el software Cinema4D, para el diseño gráfico en 3D. Esta es una premisa necesaria para valorar las diferencias más significativas entre la construcción de los modelos físicos y virtuales, independientemente a estar relacionados a procesos y técnicas diferentes. El principio de deformación es una propiedad intrínseca de la morfología, y es parte de la investigación sobre la generación en la construcción de los modelos físicos y en la representación de los modelos virtuales. En el presente trabajo, la definición de la forma y sus propiedades emergentes tienen origen en la relación entre geometría y materialidad. La morfología se define inicialmente por medio de los modelos físicos y posteriormente por los modelos virtuales, por consecuencia, estos últimos están más condicionados a los primeros que viceversa.



Fig. 1 Simulación 3D del sistema de sostén interior de un cactus columnar © Ludovica Rossi 2016



Fig. 2 Fotografía macro con fuente de ampliación óptico del tejido de madera seco de una pala del cactus Opuntia con la morfología ondulada de sus fibras. © Ludovica Rossi 2011

4.1.1 Entornos de trabajo

La metodología aplicada empieza por definir la morfología mediante la construcción de modelos físicos. La realización de prototipos a pequeña escala permite verificar cuales mecanismos morfológicos están ligados al sistema constructivo. Este entorno de trabajo se caracteriza por la relación que existe entre objeto y materia; donde por un mayor tamaño del objeto habrá mayor incidencia del peso en la construcción. El factor de escala es un aspecto determinante en la construcción de los modelos físicos, porque éstos están sujetos a la fuerza de gravedad del espacio físico real (Addis, 2013). A diferencia los modelos virtuales están representados en un espacio geométrico abstracto.

La construcción del modelo físico con sus irregularidades, que dependen de la repetición manual, se liga al comportamiento del material empleado y define un contexto de descubrimiento e investigación diferente al que puede ofrecer el modelo virtual. En la realización de los modelos físicos en bandas neumáticas las características de flexibilidad y elasticidad contribuyen a implementar los mecanismos de adaptabilidad, propios del tejido vivo del cactus. En algunos casos deviene implícito y resulta difícil separar entre sí causa y efecto. En otros el exceso de deformación del material no ha permitido un control suficiente de la morfología.

En los modelos físicos la secuencia de las acciones manuales durante la construcción se sobreponen y se mezclan entre ellas. En el modelo virtual las operaciones de representación se desarrollan en modo más bien lineal una después de la otra o una entre otra. Por ejemplo, el modelo de franja neumática en pétalos alternados la unión de los elementos genera la curvatura de la superficie, mientras que en el modelo virtual, como se describe más adelante, las operaciones de unir y doblar están separadas entre sí. En ambos casos, el orden de los gestos o comandos realizados incide en el resultado del modelo obtenido en su conjunto.

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 (Fig. 3).

El entorno virtual no tiene materialidad por lo cual la impostación inicial para la construcción del modelo es diferente. Se podría afirmar casi inversa. En el espacio virtual los objetos se intersecan y sobreponen; los cuerpos no intercambian fuerzas de equilibrio

entre sí y no se adaptan el uno al otro. En los dibujos en 3D, por convención, estamos acostumbrados a 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. En el espacio físico asume importancia la relación de escala dimensional entre nosotros y el modelo construido y el procedimiento realizado en los dibujos virtuales aspira ser una aproximación a la realidad (Fig. 4). La simulación digital sigue, en la mayoría de los casos, los pasos de la construcción del modelo físico para definir las interacciones que generan la forma.

El modelo tridimensional virtual representa un alto nivel de abstracción de la realidad. Su entorno de partida es un espacio "vacío" en el cual no existe la fuerza de gravedad, un plano de apoyo, una escala dimensional, etc. Cuando se construye el modelo virtual las diversas operaciones que llevan a su construcción son más separadas y pautadas en comparación a los modelos físicos donde más operaciones se desarrollan conjuntamente. En el modelo virtual las herramientas disponibles ordenan las informaciones y dividen las acciones realizadas manualmente en los modelos físicos. En estos últimos las operaciones aparecen sobrepuestas entre sí, por las variaciones debidas a la manualidad, la fuerza de gravedad, el comportamiento del material, etc.

El modelo virtual se construye en un espacio geométrico en el cual el origen (0;0;0) y los ejes de coordenadas (x,y,z) son las referencias de partida que permiten poner en relación entre ellos un objeto geométrico con otros en el espacio 3D: grande/pequeño; cerca/lejos; izquierda/derecha; simetrías/rotación/traslación; arriba/abajo; etc. El espacio está concebido como un infinito donde hay que definir los límites (físicos y conceptuales) en los cuales trabajar. Sin ellos el dibujo de una esfera podría representar un átomo como un planeta. La falta de materialidad



Fig. 3 Simulación 3D modelo en franjas sinusoidales con actuadores externos en forma cilíndrica, la deformación general de la malla en forma de silla de montar. ©Ludovica Rossi 2013

Fig. 4 Simulación 3D de la variación en la forma de dos franjas, de la trayectoria lineal a curvilínea, con la introducción de los actuadores externos cilíndricos. La malla, resultante por la unión de franjas lineales, reduce su extensión en horizontal y se extiende en la dirección vertical por la introducción de los actuadores circulares, reproduciendo el efecto del estiramiento. © Ludovica Rossi 2013

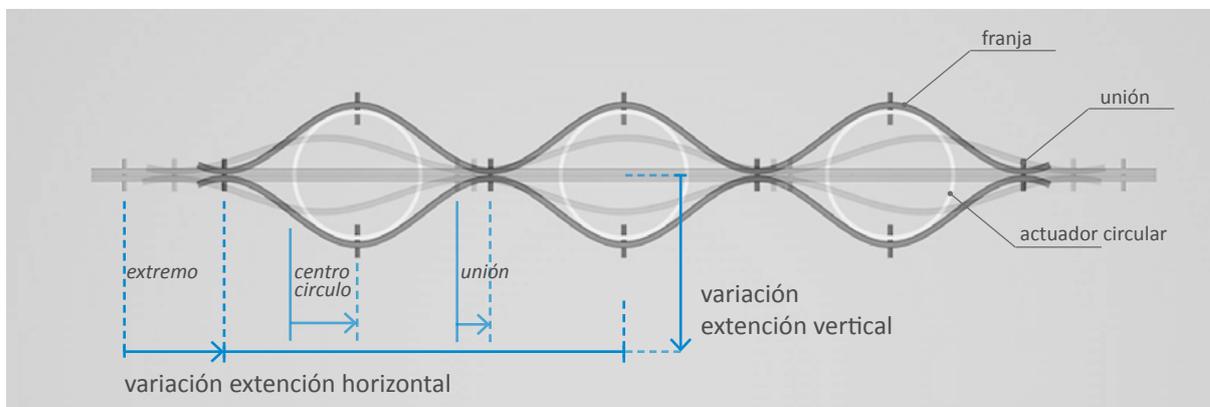




Fig. 5 Cactus del género *Opuntia* donde se observa la capacidad de modificación de la planta para seguir creciendo más allá de una red metálica. La configuración morfológica de la madera interna de sostén depende de la acumulación del tejido resistente según ha ido creciendo el organismo. Estas deformaciones no son regresivas. La planta crece dentro los espacios disponibles de la valla, doblando y girando sus tejidos. Vilassar de Mar ©Ludovica Rossi 2015

libera la forma de sus limitaciones y el espacio se construye a través de un modelo geométrico. Éste define las relaciones geométricas entre las figuras, y la unión de las cualidades tangibles limita el comportamiento de la forma (Terzidis, 2003).

4.1.2 Límites orgánicos, físicos y virtuales

La representación del tejido orgánico como un sistema compuesto por elementos finitos es una ejemplificación del modelo real. En la planta viva el tejido se comporta de manera continua y la repetición 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.

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 dependen de las condiciones climáticas favorables y/o adversas. Además de estas variaciones internas, cómo deformaciones elásticas donde el tejido se modifica pero vuelve a un estado anterior, se identifican unas deformaciones morfológicas generales que dependen de la acumulación de tejido resistente según va creciendo el organismo y que no son regresivas. Un ejemplo descrito en Capítulo 1 es la capacidad de adaptación que tiene la pala del cactus *Opuntia* (nombre vulgar chumbera y/o tuna) que se deforma para superar el obstáculo de una valla metálica (Fig. 5) y la planta crece dentro los espacios disponibles de la malla. El tejido vivo altera su forma, adentro de unos márgenes morfogenéticos definidos para responder a las necesidades fisiológicas del organismo, cuyo objetivo es seguir creciendo.



Fig. 6 Modelo físico realizado en bandas de neumáticos de bicicletas unidas de forma alternada y regular. © Ludovica Rossi 2012

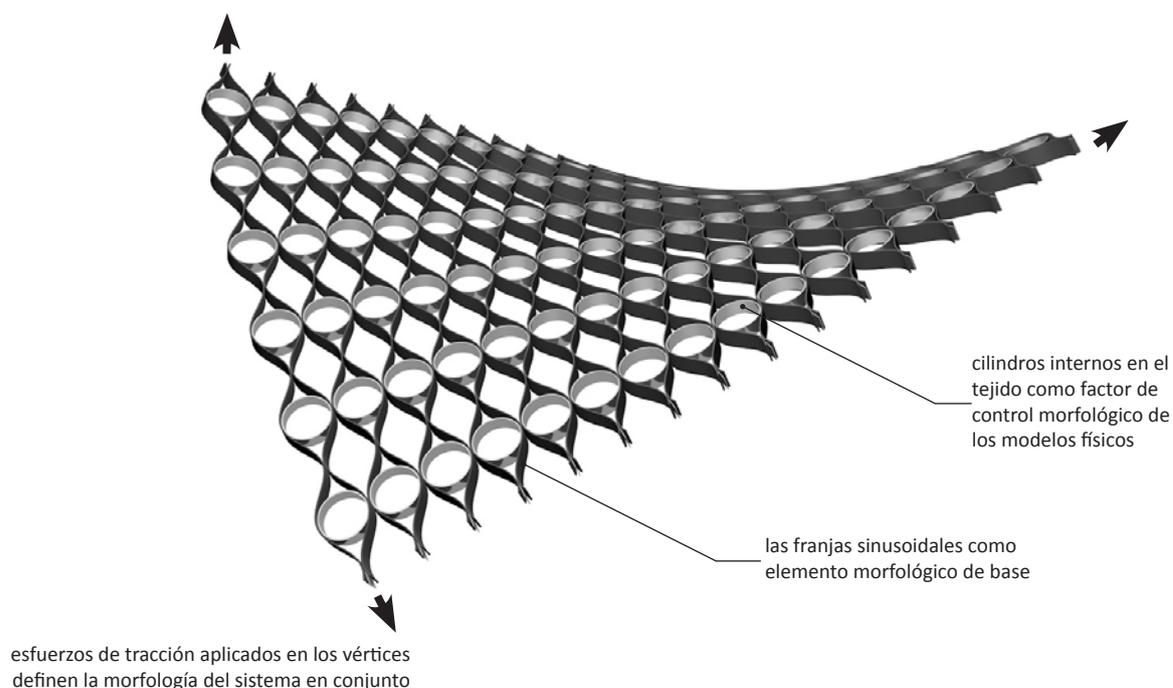
En los modelos físicos (Fig. 6) las variaciones del tejido están introducidas por las imperfecciones de los procedimientos manuales en la construcción. Estas imperfecciones en la realización hacen que el modelo físico se presente más dinámico. La repetición del elemento finito, que lo compone, no es siempre igual a si misma. Al mismo tiempo, los límites físicos que la fuerza de gravedad ejerce sobre el modelo no permiten una repetición infinita del elemento de base. Una misma malla compuesta por pocos elementos, por lo cual con una extensión más limitada, se comportará en su conjunto de forma más rígida que la misma malla construida por más elementos y con una mayor extensión en el espacio.

El análisis visual del comportamiento de los modelos físicos permite definir los límites espaciales y dimensionales en los

cuales construir el modelo virtual. Por la morfología elástica desarrollada, en este estudio, la limitación del modelo virtual está en el hecho de 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 y/o torcer la malla. En estos modelos la sección vertical de la franja pierde relevancia en las dinámicas de equilibrio que generan la forma auto-organizada, mientras que los cuerpos geométrico podrían entrecruzar sus volúmenes.

El control de la morfología en la simulación virtual se desarrolla de forma interactiva con el interfaz del software utilizado. Normalmente los modelos de simulación se enfocan en cáscaras inextensibles que se caracterizan por deformaciones casi isométricas donde no se producen variaciones dimensionales significativas, y posiblemente las deformaciones por flexión son imperceptible en los modos de membrana. La simulación de la membrana se realiza con mallas triangulares que satisfacen la suposición de una tensión pequeña con coeficiente de rigidez adecuadamente grande (Grinspun y Secord, 2008). A diferencia los modelos en materiales extensibles, como el caucho o la banda de rodadura, sufren deformaciones significativas con variaciones dimensionales por las propiedades elásticas de elongación. En este contexto los modelos físicos en banda neumáticas determinan la geometría de equilibrio de la estructura, y en los modelos virtuales se aplica una deformación similar en términos cualitativos. El acto de deformar implica los atributos de elasticidad y flexibilidad (entre otros), y la semejanza geométrica entre los modelos establece su interacción y reciprocidad.

Fig. 7 Simulación virtual del modelo de una malla con entramado sinusoidal y actuadores externos cilíndricos. La morfología de la silla de montar es obtenida por esfuerzos de tracción aplicados en sus cuatros vértices. © Ludovica Rossi 2013



4.2 ANÁLISIS GEOMÉTRICO

Como se ha tratado en los capítulos anteriores el presente estudio ha sido motivado por la capacidad de adaptación que tiene el tejido orgánico vivo en su crecimiento. La búsqueda de una aproximación hacia la morfología orgánica para la construcción de una estructura bio-inspirada se valora que tiene sentido si realmente existe una semejanza geométrica [1] entre los mecanismos que se comparan (Hossdorf & Hernández, 1972). La deformación es considerada una propiedad morfológica de los modelos. Valorando sus características, se busca la similitud geométrica entre el referente natural y los modelos, que está vinculada a la interpretación del tejido y el crecimiento de las fibras orgánicas. Mientras paralelamente se establece una semejanza geométrica entre objeto físico y virtual para definir una correspondencia entre los experimentos.

La representación digital es consecuencia de las condiciones materiales y no viceversa. El diseño aplica las herramientas disponibles en los programas para la generación de la forma, quedando sujeto a los resultados obtenidos en los prototipos en banda de neumáticos recuperados.

La digitalización (Computing) de la información, obtenida en las maquetas materiales, lleva a la acción de implementar un procedimiento de codificación de las formas desde los procesos analógicos a los digitales. Las condiciones del procedimiento son determinadas mediante métodos matemáticos o lógicos (Computation) seleccionados e implementados desde la modelación gráfica. La forma bio-inspirada se desarrolla a partir del diseño que permite combinar procesos implícitos y procesos explícitos. Las estrategias de simulación utilizan la búsqueda de patrones repetitivos para explorar procesos generativos o simular fenómenos complejos (Castro Henriques at all, 2017 - Terzidis, 2003).

El procedimiento computacional utilizada el algoritmo para abordar un problema en un número finito de pasos. En la simulación digital el uso del algoritmo se convierten en un medio para explorar posibles caminos que pueden conducir a posibles soluciones (Terzidis, 2017). El diseño implementa los procesos algorítmicos, implícitos del software Cinema 4D, para generar entidades capaces de variar manteniendo sus propiedades geométricas. Esto implica un gran potencial de aquellos elementos capaces de adaptarse sin perder su naturaleza (Frogheri at all, 2017). Se entiende el diseño como un mapa genético donde las partes individuales son conjuntos de informaciones que se conectan entre sí, según unos parámetros establecidos, y dependiendo de la trama de relaciones

[1] Semejanza geométrica existe entre dos figuras cuando todas las correspondientes dimensiones lineales son proporcionales. Se puede expresar como una composición de rotaciones, traslaciones, reflexiones y homotecias. En el espacio euclidiano las figuras son semejantes entre sí, cuando tienen la misma forma sin importar los tamaños entre ellas. En las geometrías no-euclídeas la relación de semejanza entre dos figuras no es idéntica, donde la variación del tamaño puede generar un cambio de forma.

[2] Topología: rama de las matemáticas que trata especialmente la continuidad y otros conceptos generales originados de ella, como las propiedades de las figuras con independencia de su tamaño o forma (fuente RAE). Esta se distingue de las superficies curvas ya que implica simplemente el estudio de aquellas relaciones que permanecen invariables bajo transformaciones y deformaciones (Terzidis, 2003).

establecidas en el sistema va emergiendo una nueva forma que es a su vez adaptable a los factores o parámetros que inciden sobre él. Esta metodología empieza por definir sus partes y desde sus interacciones emerge la morfología general.

La problemática es representar el producto final en términos de los procesos que lo generan, como una secuencia de operaciones bien definidas, y donde el modelo virtual debe estar dotado de puntos de mutación en los lugares correctos (De Landa, 2002). Esto implica implementar un análisis topológico [2] para la génesis de la forma. “Los espacios topológicos son espacios abstractos en los que las nociones habituales de longitud, área y volumen no tienen sentido alguno” (De Landa, 2009, 10). La forma es el resultado de una conexión de datos abstractos en un sistema primario y los diseños realizados se estructuran de manera que siempre respetarán ciertas invariantes topológicas (Esquema 4.1), como la trayectoria curvilínea de la fibra o la conectividad entre las franjas de los modelos realizados.

En los modelos virtuales se establecen cuales son las leyes de transformación que se aplican. En cada caso se definen las propiedades geométricas de las fibras (arquetipo inicial) que incide en el resultado morfológico global. Estudiando la forma

Esquema 4.1 Proceso del diseño generativo donde se explicitan los factores iniciales que plantean la cuestión morfológica y las restricciones geométricas para definir la topología de los modelos virtuales. ©Ludovica Rossi 2018

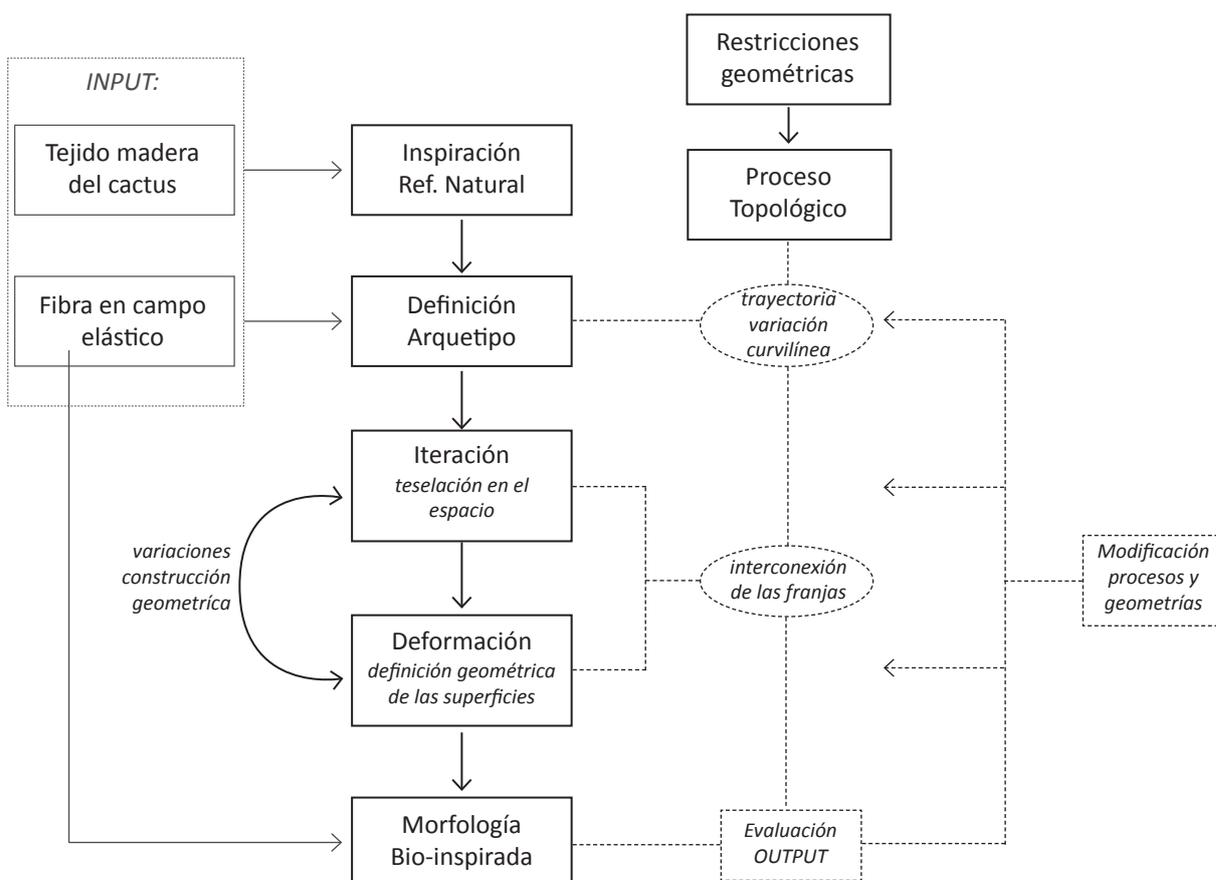




Fig. 8 Construcción de elemento base de la franja con una deformación abierta y donde su trayectoria cambia de una generatriz lineal a una sinusoidal según la variación de los parámetros de la fórmula que define la curva. © Ludovica Rossi 2018

[3] En los modelos se ha experimentado con diferentes geometrías algunas de las cuales se han descartado por no encontrar coincidencia con el comportamiento de los cuerpos sólidos. Las variaciones generaban cruces entre los cuerpos o no respetaba las dinámicas de equilibrio analizadas.

[4] Según de las operación implementadas, el arquetipo puede ser el objeto de la variación (es el caso de la representación de las franjas de los modelos virtuales), o puede ser un elemento que permite la variación (es el caso de las Spline aplicadas a la variación de forma de la malla Fig. 11).

se establecen las relaciones entre las variaciones aplicadas (extrusión, iteración, deformación). Este proceso implica cambios que extienden las propiedades geométricas de un objeto mientras se preserva su topología (Terzidis, 2003).

El diseño se entiende como un mapa genético donde se parte de datos o valores primitivos que se irán conectando unos con otros aumentando de nivel en su jerarquía estructural. Es decir, la información primaria irá evolucionando conforme se conecta con otros conjuntos de información y de ese proceso nacerá un nuevo conjunto de datos que llevará la información heredada de los pasados. La simulación virtual se compone de una serie de procesos que generarán el último componente del sistema como resultado final del diseño (Frogheri at all, 2017).

Las operaciones geométricas implementadas para generar la forma orgánica se dividen en tres grupos principales: representación del elemento de base (arquetipo de la morfología), las operaciones de iteración y la aplicación de las deformaciones como procedimiento de variación de la forma. La introducción de los factores de transformación (en diferentes fases del diseño según caso) permite definir la deformación como la capacidad de adaptación del tejido orgánico.

Si por una parte la definición de los parámetros, que permiten la construcción de los modelos virtuales, por lo general no varía entre los experimentos propuestos [3], por otra el procedimiento paramétrico puede generar variaciones en los resultados, dependiendo del orden en el cual se explicitan los parámetros. En la descripción de los casos de estudio se observa cómo la variación en el orden de unas operaciones geométrica lleva a obtener diferentes resultados morfológicos en el espacio digital.

4.2.1 Definición del arquetipo

La construcción en el espacio virtual de los diferentes modelos físicos realizados ha llevado a diferentes procedimientos de representación. Todos los modelos se basan en el diseño algorítmico y comparten la acción de iterar el elemento de base (la franja) en el espacio, para llegar al sistema general. La franja deviene entonces al arquetipo [4] de los modelos virtuales. Este es el patrón inicial del cual deriva la generación de formas complejas en el desarrollo del diseño paramétrico.

La representación del modelo virtual empieza por definir cómo representar la franja: la fibra se codifica por la transformación de un figura base que sigue un crecimiento lineal o diferencial en dos direcciones (Patiño Mazo at all, 2017). La figura inicial,

de un rectángulo, es extruida (SweepNURBS) según una directriz que define la topología del modelo. En la representación inicial de la franja se determina diferentes ordenes de deformación del modelo. La variación se define si la construcción del elemento morfológico de base está representado a partir de la generatriz con una trayectoria lineal o curvilínea.

- El primer caso se aplica a la simulación de la malla sinusoidal con una deformación abierta de la franja que permite una representación dinámica de las variaciones de forma de modelo (Fig. 9). La franja es representada según un desarrollo lineal para ser doblada (o sea deformada) en una operación sucesiva.
- El segundo caso representa la franja a partir de una trayectoria curvilínea, por lo cual un primer orden de la variación de la forma está representado implícitamente en el arquetipo (Fig. 10). Es el caso de la malla sinusoidal estática y de los modelos en franjas pre-deformadas donde la operación de deformación de la franja es independiente de la construcción morfológica general (o sea de la interacción entre las franjas).

4.2.2 Iteración del arquetipo

Definida la unidad base, el elemento individual de la fibra, se aplica un proceso de repetición agregativo que permite al sistema crecer. La iteración (Cloner) de la fibra en el espacio es una transformación con diferentes niveles de complejidad y, dependiendo del modelo, se basa en las operaciones de traslación, simetría o rotación. La operación de iteración representa un crecimiento diferencial del sistema (Patiño Mazo et al., 2017).

La clonación [5] de un elemento (o más de uno) implica que las copias están todas vinculadas al objeto inicial dibujado y a sus posibles variaciones (Fig. 10). Modificando el objeto originario cambian todos los demás. El espacio virtual ofrece un número infinito de repeticiones y la forma final define sus límites. Clonación es un término utilizado para expresar una forma que se copia o se asemeja mucho a otra en apariencia o función. Se basa en la interpretación y, como tal, debe estar asociada a un arquetipo (la franja). Es un método implícito de alteración que se basa en el comportamiento en lugar de la forma. (Terzidis, 2003).

4.2.3 La deformación

En las simulaciones realizadas se distinguen el proceso de deformación como construcción geométrica del diseño implícita

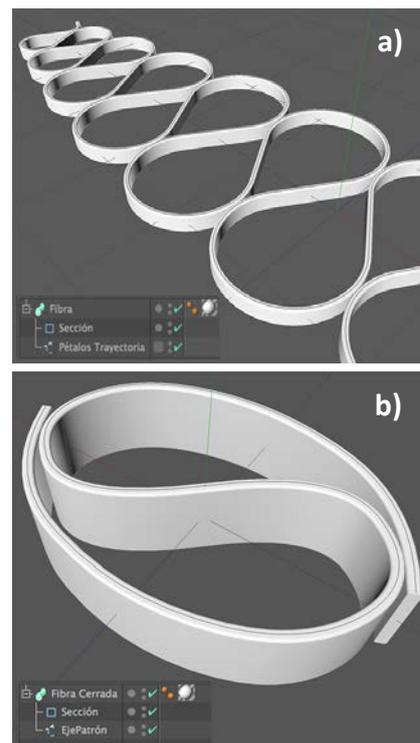


Fig. 9 Construcción virtual del arquetipo de la franja. Esta es representada por una sección rectangular extruida según una línea generatriz: **a)** Franja cerrada según una generatriz de pétalos alternados; **b)** Franja cerrada sobre si misma. © Ludovica Rossi 2017

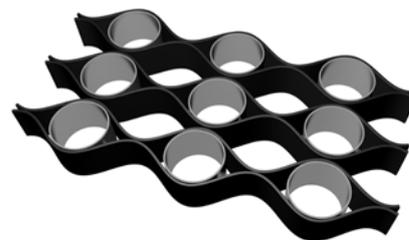


Fig. 10 Modelo en franjas sinusoidales generado a partir de una simetría especular de la franja arquetipo y de la iteración o clonación de las dos franjas por traslación lineal en el plano xz. © Ludovica Rossi 2013

[5] Cloner es una operación que permite la repetición n° veces de un objeto en el espacio. Su dominio pueden ser las operaciones básicas de iteración por traslación y rotación o, en alternativa, una función diferencial en referida a un objeto geométrico de referencia con una trayectoria lineal y/o una superficie.

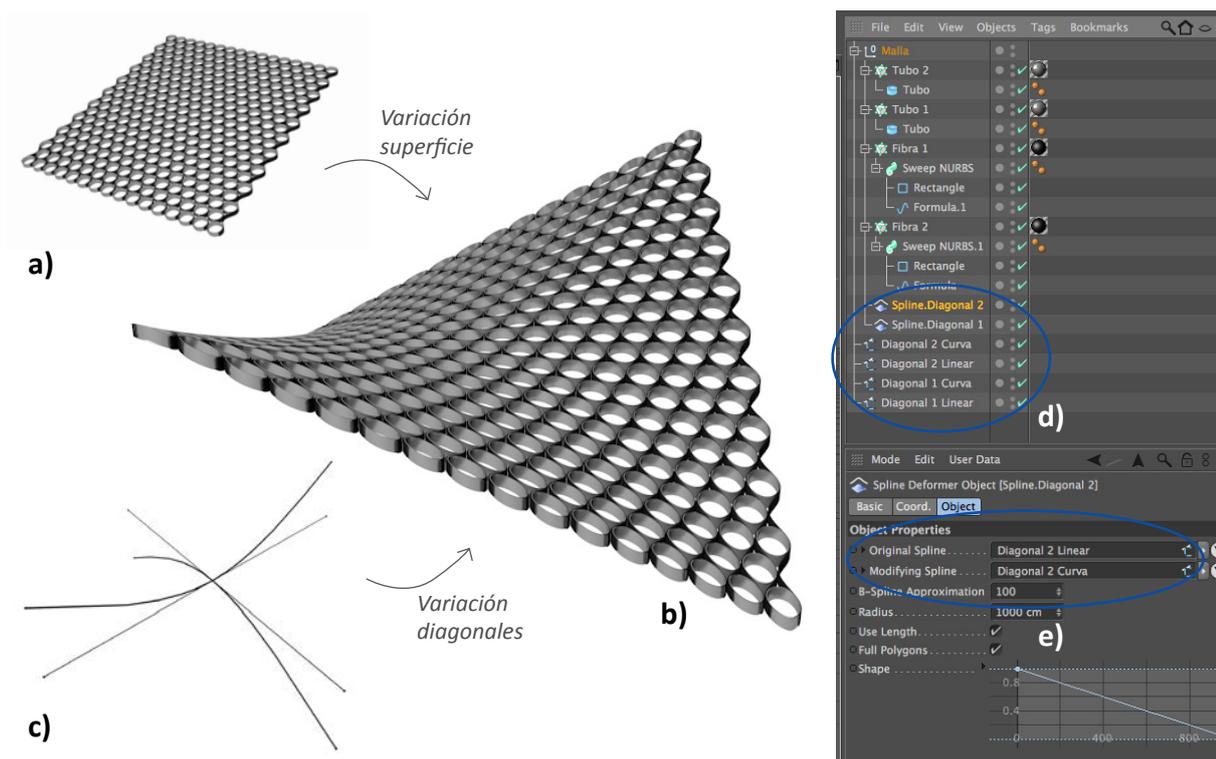


Fig. 11 Modelo de la malla en bandas sinusoidales con elementos cilíndricos entre las franjas. El cambio de forma de la superficie plana (a) a la superficie anticlástica (b) es obtenida por variación de las directrices diagonales de rectilíneas a curvilíneas (c). Las deformación es expresada como variación de la curvatura (positiva y negativa) de las líneas (Spline), que son el arquetipo necesario para el cambio morfológico. En azul se marcan las operaciones de deformación aplicada: d) Elementos geométricos de las curvas y los objetos de variación de forma; e) Objeto de variación de la forma que pone en relación la trayectoria inicial plana con la línea curvilínea. © Ludovica Rossi 2013-2018

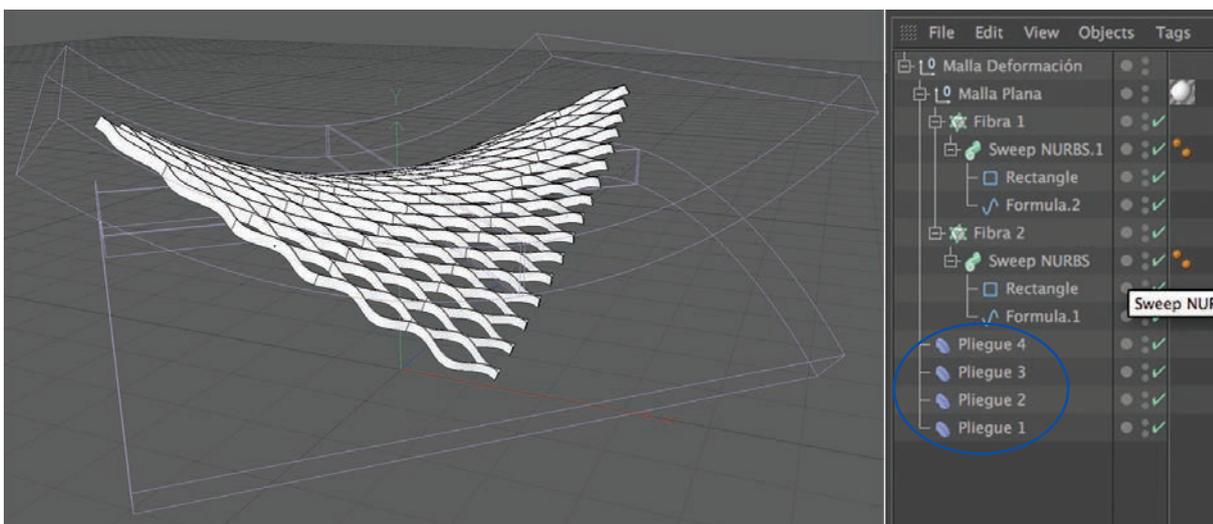


Fig. 12 Para obtener la variación de forma de la superficie de plana a anticlástica se aplican unos objetos deformadores que curvan el conjunto de las franjas iteradas en el espacio virtual. En azul se marcan los objetos deformadores situado según las dos diagonales respectivamente con una curvatura positiva y negativa para obtener la configuración del paraboloido hiperbólico. © Ludovica Rossi 2013

en la representación del arquetipo, y la deformación aplicada como cambio morfológico. En este segundo caso la deformación es un parámetro abstracto que se aplica al diseño para obtener el conjunto de las variaciones de la forma necesarias para reproducir un efecto similar al observado en el comportamiento físico del material.

Estas deformaciones son variaciones sobre el objeto representado inicialmente, y dependiendo del modelo se aplican diferentes procedimientos para llegar a la configuración final. Se diferencia la forma inicial (el elemento de la franja) que topológicamente es la misma, pero que adquiere diferentes valores según determinados parámetros (Castro Henriques et al, 2017), por experimento realizado.

En el espacio de diseño virtual, la deformación se concibe como una redistribución proporcional de puntos a lo largo de una dirección. Las nociones de “redistribución” y “dirección” implican la existencia del tiempo como una medida de comparación. Para concebir el cambio dictado por la deformación, se reconoce el estado previo de la forma, antes de que se produzca la deformación. La deformación se entiende, entonces, como un cambio relativo de un estado inicial, y como punto de referencia se necesita un arquetipo (de forma análoga pero diferente a la clonación) para evaluar el grado de deformación (Terzidis, 2003).

En el procedimiento de aplicación de la variación de la forma (antes y después de la deformación) los modelos implementan diferentes herramientas. En el caso de la malla sinusoidal, con la franja abierta, el desarrollo de la forma varía de una superficie plana que cambia a curva (Fig. 11 a, b). Para generar la deformación en doble curvatura es posible aplicar una variación de forma en un objeto de referencia inicial como una línea recta que cambia en un objeto curvilíneo (Fig. 11 c, d). Aplicando el arquetipo de la línea (Spline de lineal a curvilínea) a las dos diagonales de la malla plana, esta última se deforma en una superficie de doble curvatura similar a una silla de montar.

Un procedimiento alternativo que se puede realizar sobre la malla en franjas sinusoidales es la aplicación de uno o más deformadores (Fig. 12). Estos doblan el objeto y generan la variación de la forma inicial. En el caso de los modelos con franjas en pétalos alternados y/o cerradas sobre sí misma, la variación de la forma se ha realizado únicamente mediante la aplicación de deformadores aplicados a la franja (Fig. 13). En estos casos la deformación es previa a la iteración del arquetipo de la franja, como se detalla más adelante.

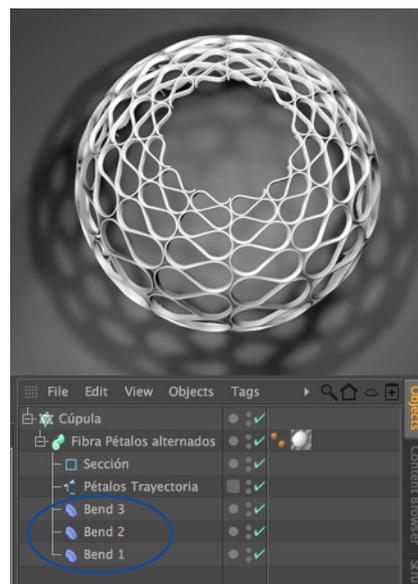


Fig. 13 Cúpula obtenida por franjas según una generatriz en pétalos alternados, a las cuales se les ha aplicado diferentes pliegues de deformación y luego una clonación por rotación según el eje vertical. En el algoritmo generativo se marca en azul las operaciones de deformación aplicadas a la franja. © Ludovica Rossi 2017

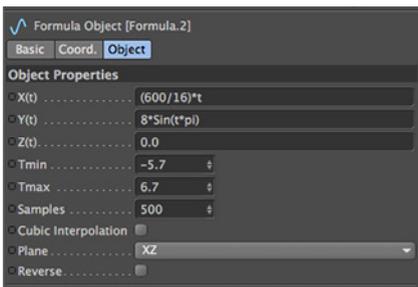


Fig. 14 El Objeto Fórmula del software Cinema 4D es una curva geométrica basada en una fórmula matemática. En su versión de base, gestiona los parámetros del periodo de la senoide $X(t)$ y de la amplitud de la curva $Y(t)$, según la variable es t , que se extiende desde 0 (inicio de secuencia) a 1 (fin de secuencia) y a π (π) que expresa la función trigonométrica en radianes. Otros parámetros actúan en las variables: de inicio y final de la curva, la aproximación más o menos lisa y/o la orientación en el espacio cartesiano. ©Ludovica Rossi 2018

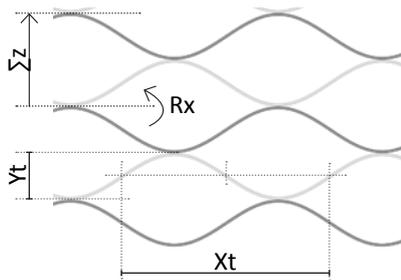


Fig. 15 Relación de parámetro en la construcción de la malla regular sinusoidal plana: amplitud (Y_t) y periodo (X_t) de la curva; traslación lineal según el eje z (ΣZ) y simetría especular entre franjas según el eje x (R_x). © Ludovica Rossi 2018

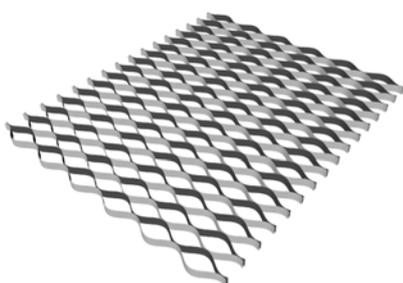


Fig. 16 Configuración de la malla plana en franjas sinusoidales. © Ludovica Rossi 2013

4.3 MODELOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS

4.3.1 Malla sinusoidal estática

Para la construcción de los modelos virtuales que representan la malla de bandas unidas entre sí con un ritmo alternado y regular, un primer paso es definir la curva senoide a lo largo de la cual es extruida la figura de base de un rectángulo. La fibra se representa por su sección rectangular alargada (donde la altura es mayor que el espesor) con un crecimiento diferencial local en dos direcciones. La curva plana describe la oscilación repetitiva mediante la fórmula de una senoide (Fig. 14) poniendo en relación los parámetros de la amplitud (Y_t) y el periodo (X_t). La trayectoria curvilínea, así definida, simula la franja deformada y no la configuración lineal previa al estiramiento de la malla en el modelo físico.

La operación siguiente itera la fibra tanta veces en el plano hasta obtener la extensión necesaria para describir una malla plana con sus fibras abiertas (Fig. 15). Para la repetición de la fibra se distinguen dos tipos de transformaciones. La primera operación genera un elemento especular de la fibra, definiendo una pareja de franjas simétricas en base a la cual se procede a la construcción de la malla abierta. El modelo virtual permite una representación estática de las franjas. En esta fase son datos por implícitas las acciones de fuerza entre los elementos en una representación parcial, que en los modelos físico no sería posible. La segunda transformación es lineal e itera las franjas de forma regular en el plano XZ, definiendo la malla plana por parejas de franjas repetidas n^o veces (Fig. 16). El crecimiento en el plano es sencillo, la franja crece en dirección al eje X (según una línea generatriz sinusoidal) y para su clonación se aplican las transformaciones de simetría (R_x) respecto al plano XY y de traslación lineal respecto al eje Z (ΣZ).

Definida la superficie plana (Fig. 16) es posible aplicar las deformaciones que modifican la malla asumiendo diferentes configuraciones en el espacio tridimensional. En los modelos físicos se ha evaluado como forma más adecuada por el tipo de trama que compone el tejido la forma de la silla de montar (paraboloide hiperbólico) que ha sido simulada en los modelos virtuales (Fig. 17). Por otra parte la simulación virtual, a diferencia de los modelos físicos, permite experimentar con diferentes variaciones morfológicas aplicando distintas deformaciones al mismo tejido plano (Fig. 18 - 19).

Para generar una superficie de doble curvatura a partir de la malla plana en fibras sinusoidales iteradas en el espacio, se ha trabajado con dos procedimientos de deformación. En

un primer caso se aplica un deformador que considera las diferencias en posición y forma de dos splines [6] y deforma el objeto en consecuencia (Fig 12). Para definir la configuración del paraboloides hiperbólico se representan dos parejas de splines en las dos diagonales de la malla plana. Cada una consta de una línea recta plana y su correspondiente con curvatura positiva y/o negativa. Se implementa un procedimiento de *morphing* en el cual un objeto (spline lineal) cambia su forma gradualmente para obtener otra forma (spline curva) (Terzidis, 2003). El arquetipo del deformador es la línea plana que se dobla según la trayectoria de la curva diferencial. El proceso del objeto deformador (Spline Deformer Object) es transpolar la variación del objeto diseñado, en este caso la malla compuesta por las franjas sinusoidales, obteniendo la doble curvatura.

Un segundo procedimiento, para deformar la malla de fibras sinusoidales en un paraboloides hiperbólico, aplica otros tipos de objetos deformadores según la necesidad de la simulación (Fig. 13). Para hacer asumir a la malla plana la configuración tridimensional se aplica el deformador de curvado o pliegue (Bend Object) con el objetivo de reproducir la dinámica morfológica que asume la estructura tensada realizada en los modelos físicos (Fig. 9). Los pliegues, de unos 50°, son aplicados a las directrices diagonales de la malla, una con curvatura positiva y otra con curvatura negativa, para hacer asumir al modelo virtual la forma de la superficie anticlástica, propia de la silla de montar.

Ambos procesos de deformación separan la transformación de la malla en dos partes distintas: la abertura de las fibras y el doblado de la malla. En el modelo físico este proceso es unido: al tensar la malla esta se abre y asume la configuración curvilínea de las fibras, mientras la superficie asume la geometría de doble curvatura (deformación de la malla). En estos dibujos (independientemente del tipo de deformador aplicado), la distribución de las deformaciones es homogénea y no representa una distribución de las tensiones según las fuerzas externas aplicadas. Los modelos virtuales muestran el procedimiento morfológico por fases de comportamiento separadas, desde la franja lineal hasta la doble curvatura de la malla en su conjunto. A diferencia el modelos físicos, muestran una configuración según la distribución de los esfuerzos por las tensiones externas aplicadas mientras cambios morfológicos se superponen y se mezclan entre sí.

4.3.2 Malla sinusoidal dinámica

El diseño desarrolla una secuencia para generar una superficie en el espacio tridimensional de la malla compuesta por

[6] Spline: en el campo matemático del análisis numérico, un spline es una curva diferenciable definida en porciones mediante expresiones algebraicas constituidas por una suma finita de productos entre variables y constantes (fuente Wikipedia). Una spline está formada por vértices y porciones de curvas. La más simple es la spline lineal que conecta con líneas rectas los vértices directamente. Otras spline tienen rutas curvilíneas y varían los parámetros de suavidad de la curva entre los vértices de su trayectoria.

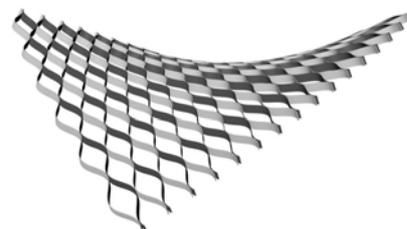


Fig. 17 Configuración de la malla en franjas sinusoidales en la configuración de la doble curvatura de la superficie anticlástica, propia de la silla de montar. © Ludovica Rossi 2013

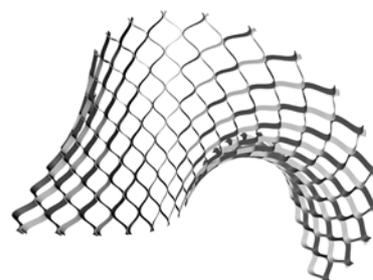


Fig. 18 Configuración de la malla en franjas sinusoidales deformada por torsión y pliegue. © Ludovica Rossi 2018

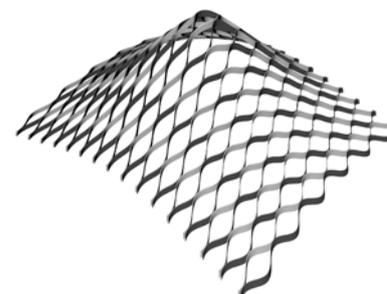


Fig. 19 Configuración de la malla en franjas sinusoidales deformada por variación diferencial y pandeo. © Ludovica Rossi 2018

[7] Le fotograma (frame) es cada imagen que compone la representación dinámica. Mayor es el número de fotogramas en una misma secuencia más lento aparecerá movimiento y viceversa.

franjas sinusoidales. La simulación virtual permite modificar el arquetipo estático en dinámico, introduciendo una línea temporal (Timeline) en el proceso de generación de la forma. El objeto se modifica para representar la deformación de la franja y el modelo en general en forma dinámica.

El concepto que la forma puede deformarse selectivamente en el espacio de diseño, es radicalmente diferente de la idea de un arquetipo rígido. La forma es el resultado de un continuo infinito de posibles variaciones. La asignación de variables particulares rigiere su estructura interna. El verdadero valor de una deformación no está en el resultado final sino en el segmento de tiempo infinitesimal donde el pasado y el presente se superponen dentro de la misma forma. (Terzidis, 2003). La *timeline* es la herramienta que permite controlar, editar y reproducir animaciones (Fig. 20). El elemento base para todas las animaciones es el fotograma (KeyFrame) [7] que contiene la información de movimiento (y otra) perteneciente a un objeto en ese momento particular de la animación. Al activar determinadas propiedades de un objeto se gestiona la información de movimiento, de un estado a otro.

Aplicar la dinámica del movimiento reproduce la capacidad de cambio de la morfología visible en el modelo físico. En los primeros experimentos, donde se activa el movimiento por un solo pliegue, la fibra lineal es representada como una sección

Fig. 20 (Izquierda) Ventana Timeline en el software Cinema 4D con 240 frame y donde los objetos deformadores de doblar (Bend) varían el parámetro de fuerza de curvatura de 0º en el frame cero inicial a 45º en el frame 240 final. © Ludovica Rossi 2013

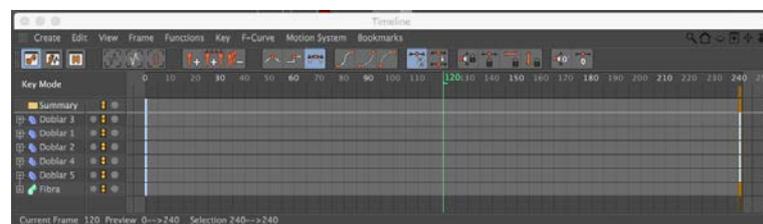
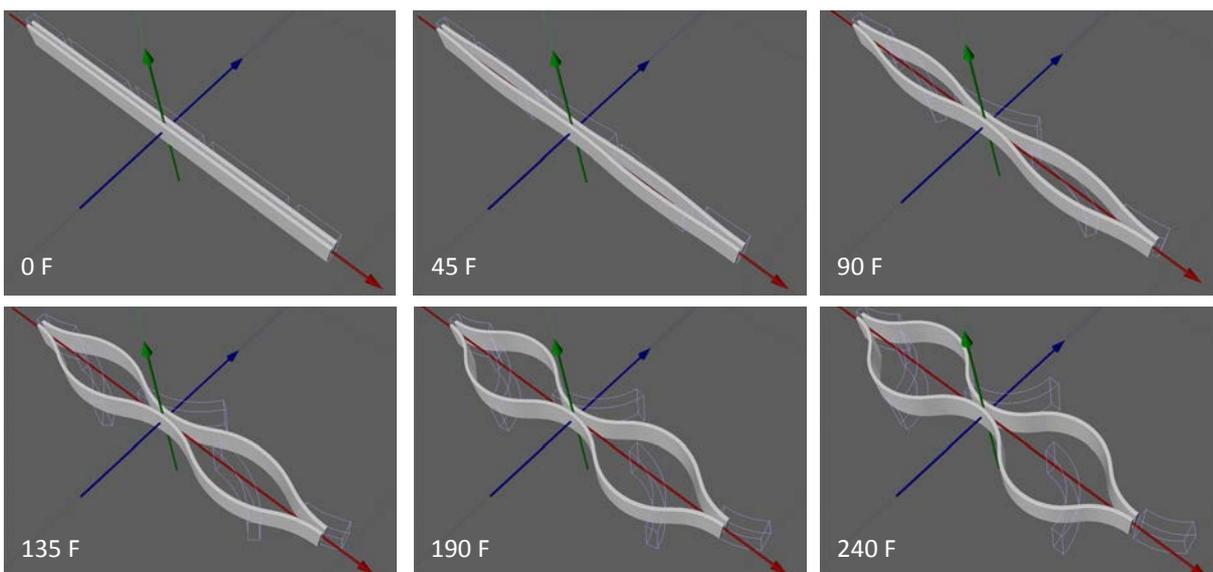


Fig. 21 (Abajo) Secuencia de variación de la curvatura de una pareja de franjas y número de frame correspondiente. © Ludovica Rossi 2013



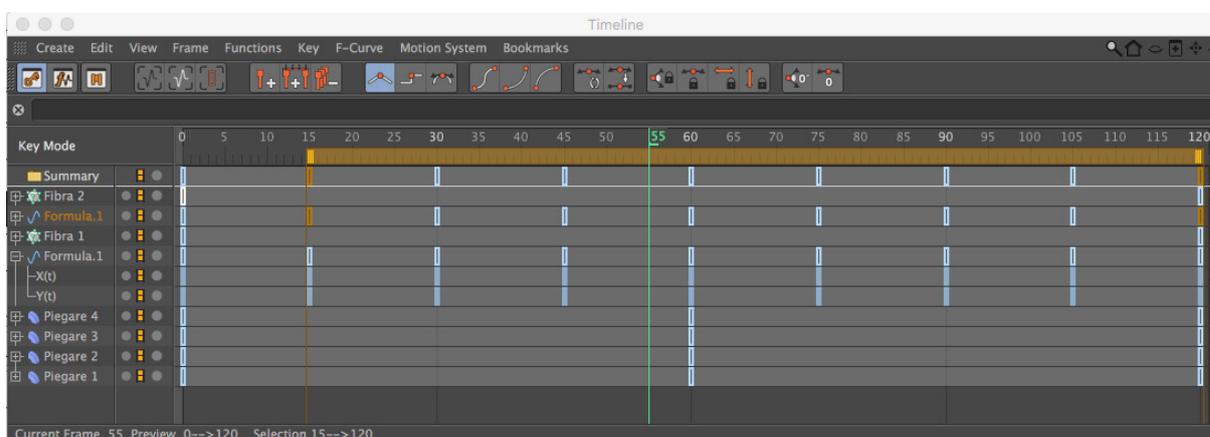
rectangular extruida a lo largo de una línea recta (Fig. 21). Mediante la aplicación de deformadores de curvado (Bend) se modifica el arquetipo de la línea de lineal a curvilínea, y por consiguiente se va transformando la franja en una estructura dinámica.

Cuando la representación del elemento base aumenta su extensión y el número de pliegues, la aplicación de un deformador para cada pliegue no se considera eficiente. Se aplica la transformación dinámica a la fórmula de la senoide modificando los parámetros de amplitud (A) y del periodo (T), y desde un desarrollo lineal la directriz de la franja se transforma en curvilínea. Este procedimiento pone en evidencia la variación de la forma cuando se aplica una tensión externa a la malla. En la iteración de la franja en el espacio para simular la malla hay que tener en cuenta como la translación de los elementos se aplica también en forma dinámica. Como la amplitud de las franja varía con el tiempo, también variará su posición relativa en el espacio.

Un procedimiento similar se aplica en la deformación de la malla en su conjunto de plana a paraboloides hiperbólicos (u otra superficie de doble curvatura). Para simular la transformación en doble curvatura de la malla se aplica el parámetro temporal a la variación de forma tanto que el objeto transformador sea una deformación por splines o unos pliegues aplicados al arquetipo malla; el proceso es similar al que se ha aplicado a la sola fibra. En la construcción de la línea temporal (Fig. 22), que define la animación en general, se superponen las deformaciones dinámicas para simular el procedimiento de los modelos físicos.

En el modelo virtual estático la franja está representada ya abierta a diferencia del modelo físico donde las franjas no asumen la forma ondulada si no están sometidas a esfuerzos de tracción. En la representación de la malla dinámica compuesta por tiras sinusoidales, el mecanismo de apertura de las franjas

Fig. 22 Ventana de la línea temporal (TimeLine) en la simulación de una malla sinusoidal regular, donde las franjas se abren mientras se deforma la malla en su conjunto. Lo parámetros modifican: la longitud y curvatura de la generatriz de la franja; la iteración de los objetos en la posición relativa de cada franja en el espacio mientras la malla se abre; la variación de la fuerza de los pliegues de 0º a 40º que deformar la superficie para definir la configuración de una silla de montar. © Ludovica Rossi 2018

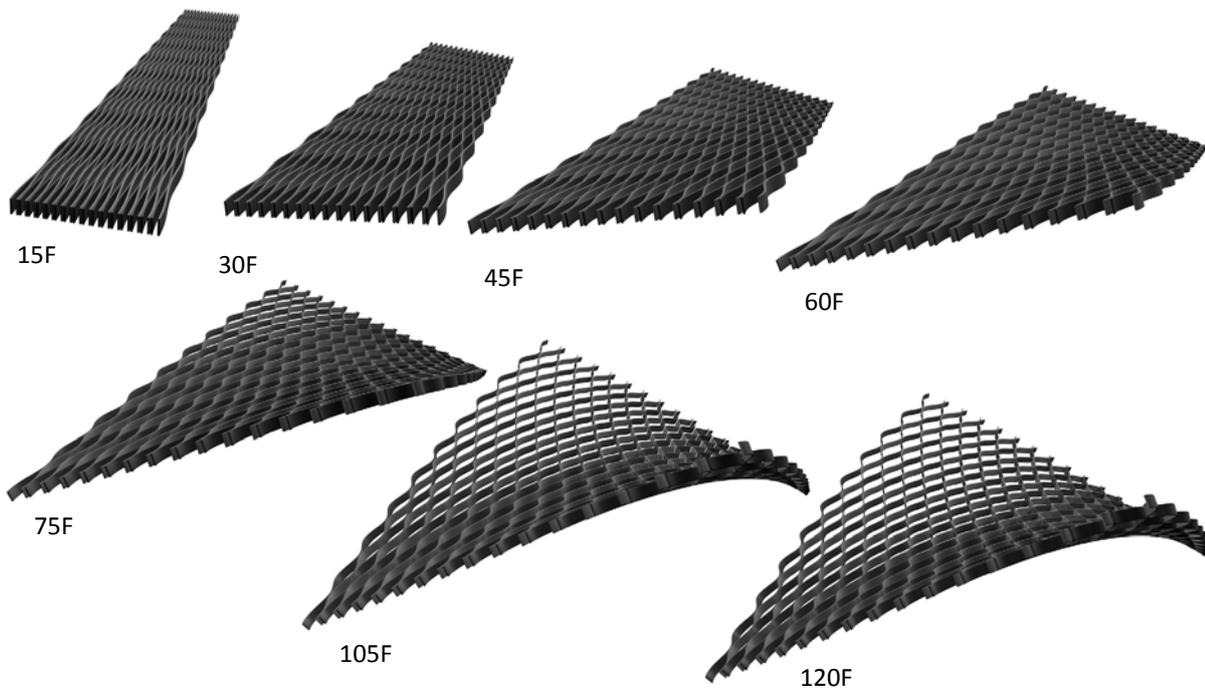


está representado por la transformación de la línea generatriz de rectilínea a curvilínea mientras se sincroniza el doblado del sistema en su conjunto.

Cuando construimos el modelo virtual las diversas operaciones que llevan a su representación son más separadas y pautadas en comparación a los modelos físicos donde las acciones se desarrollan conjuntamente. Cuando introducimos el parámetro temporal en el modelo virtual podemos sobreponer las operaciones antes separadas entre sí y las dinámicas de cambio morfológico de los dos modelos (virtual y físico) son más similares entre sí. Los modelos virtuales ofrecen otro instrumento de representación. Por medio de la introducción del parámetro temporal se pueden reproducir los mecanismos dinámicos del proceso constructivo observados en el modelo físico. Estos comprenden la variación de forma de la fibra por las características de flexibilidad del material.

En la simulación virtual dinámica la representación de las variaciones morfológicas de la franja está descrita por el cambio geométrico de la línea generatriz (de la línea recta a la sinusoidal), y por consecuencia cambia la morfología de la franja. De forma similar se representa el cambio de forma de la superficie del tejido compuesto por franjas de la configuración plana a curvilínea, dependiendo del tipo de deformaciones y/o variaciones aplicadas al modelo. En este caso la representación evalúa el cambio morfológico que puede asumir el sistema en las diversas fases de puesta en tensión de la malla (Fig. 23).

Fig. 23 Diferentes fases de la deformación de una malla sinusoidal regular dinámica. Dependiendo del número del fotograma la malla se va abriendo modificando la curvatura de la línea generatriz de las franjas y asumiendo en su conjunto la morfología de una superficie sinclástica de un paraboloides hiperbólico. © Ludovica Rossi 2015



4.4 EL MODELO EN FRANJAS PRE-DEFORMADAS

4.4.1 Cúpula en fibras continuas

Por las características constructivas de este prototipo el interés de la simulación virtual está en la subdivisión de 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 la sección rectangular según la trayectoria en pétalos alternados de dimensiones variables define el elemento de base. El sistema paramétrico del diseño es similar a la construcción de los modelos estáticos que se han descrito anteriormente. La primera deformación aplicada a la franja en los modelos físicos queda implícita en la representación del objeto base (Fig. 24a). Se define el patrón de partida de este modelo virtual.

El arquetipo del espacio virtual está representado como la franja pre-deformada del objeto material. El elemento así dibujado es plano y para generar la forma en arco se aplica una deformación con un pliegue de 180° (Fig. 24b). Esta fase es similar al arco del modelo físico, obtenido por acercamiento entre sí de los dos extremos de las bases. Se ha aplicado el objeto deformador doblar (Ben Object) para curvar la franja en forma de arco.

Es necesario agregar otro nivel de deformación en la franja, para obtener la doble curvatura generada en la morfología de la cúpula. En el modelo físico a la vez que se unen las franjas pre-deformadas se van generando las deformaciones que permiten al sistema asumir la forma esférica. En el modelo virtual, una vez dibujada la franja, se aplican dos deformaciones según dos directrices perpendiculares entre sí, para luego clonar el elemento en el espacio y obtener la configuración final de una semiesfera.

La doble curvatura de la cúpula se obtiene aplicando dos diferentes deformaciones. La primera, comentada anteriormente, permite proporcionar la forma en arco aplicando la variación de la forma respecto al eje de desarrollo longitudinal (z). El segundo nivel de curvatura (Fig. 24c) se implementa aplicando el mismo tipo de deformador "pliegue" según el eje transversal (x) de forma simétrica. Esta deformación permite obtener el efecto inflado, que en los modelos físicos se genera con la construcción de la cúpula.

Para obtener el conjunto de las variaciones de la forma que ofrece el modelo físico es necesario aplicar conjuntamente los dos tipos de deformaciones (Fig. 24d - 25) en la simulación digital para reproducir un efecto similar. Sucesivamente, por medio de

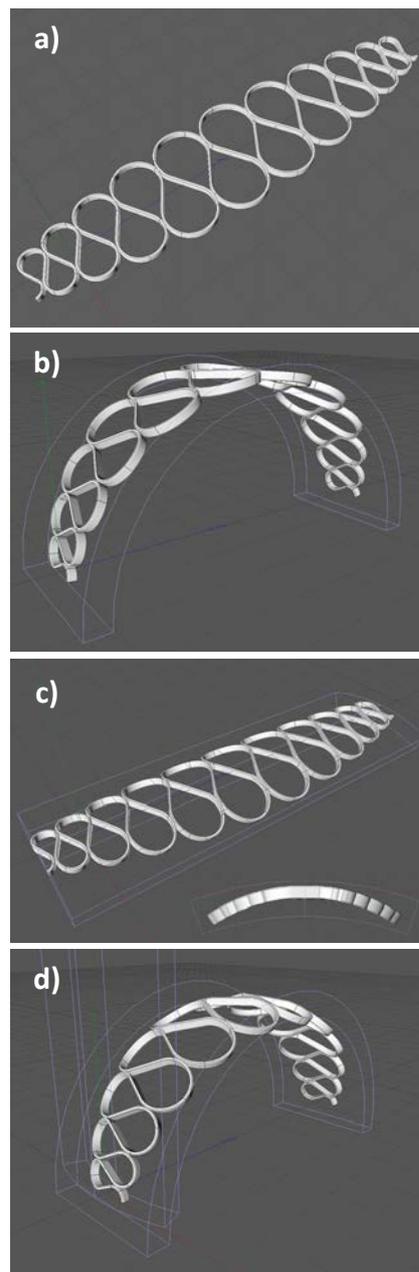


Fig. 24 Secuencia en el proceso de generación y variación de la forma de la franja en pétalos alternados para la morfología final de la cúpula: **a)** Patrón inicial plano; **b)** Aplicación del deformador "pliegue" en 180° en la dirección longitudinal para obtener la variación de forma de plana a un arco; **c)** Aplicación del deformador "pliegue" en 20° en la dirección transversal para obtener el efecto inflado de la doble curvatura de la cúpula; **d)** Variación de forma de la franja plana con la aplicación de los dos niveles de deformación. © Ludovica Rossi 2017

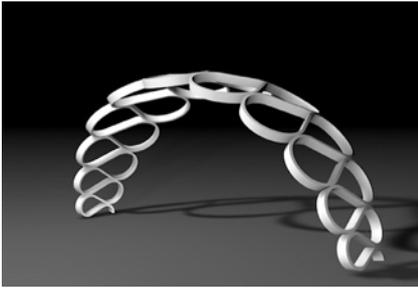


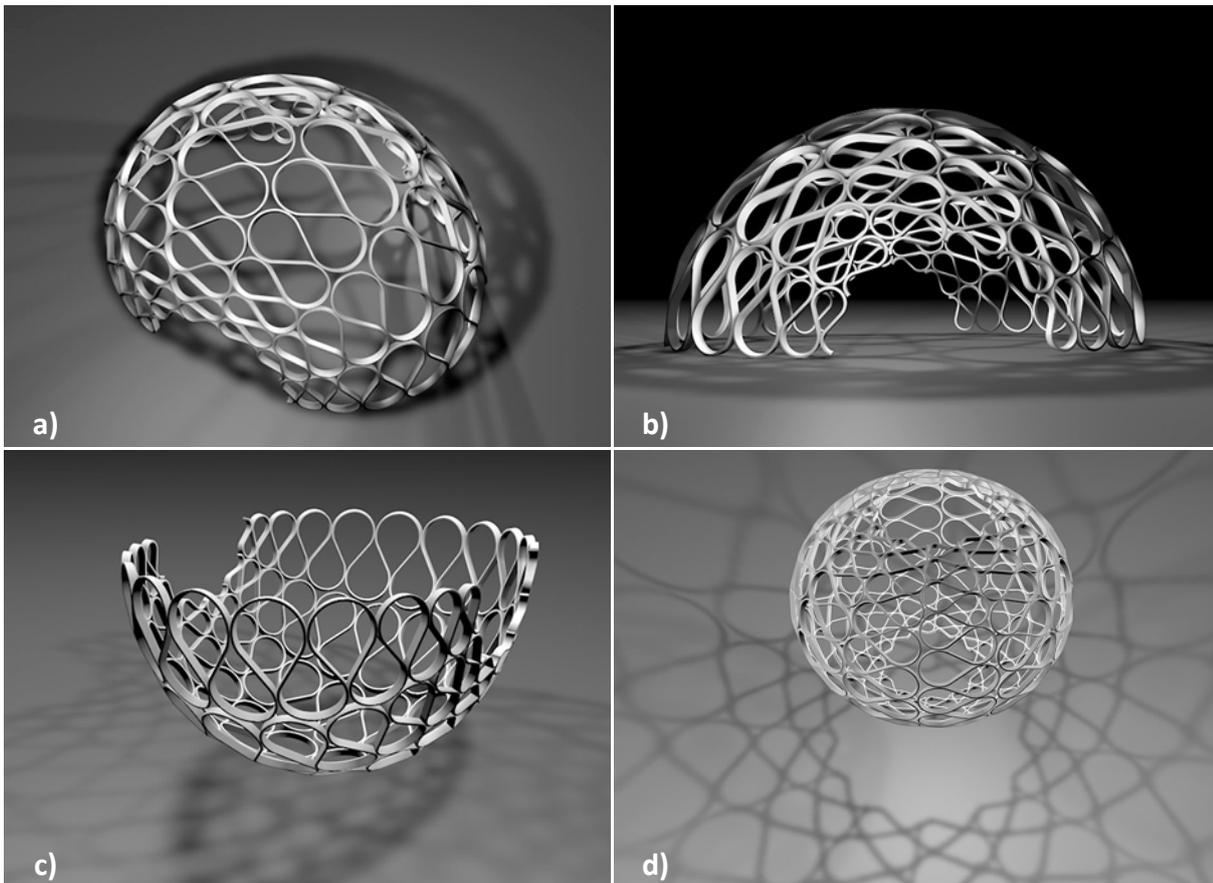
Fig. 25 Transformación del arquetipo de la franja previo a la iteración para obtener la superficie de doble curvatura. © Ludovica Rossi 2017

una operación de repetición del elementos, se reproduce el acoplamiento de los elementos en arco que forman la cúpula del modelo físico.

La iteración por rotación del elemento deformado según las dos curvaturas (ejes longitudinal y transversal) completa las operaciones geométricas que definen la configuración de la cúpula (Fig. 26a, b). La operación de reiteración (Cloner) indica el número de fibras y sus posiciones en el espacio de representación. Por medio de una 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) está 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.

Fig. 26 Configuración final de sistema por clonación de la franja: **a)** y **b)** Aplicación de la iteración por rotación de 6 elementos respecto al eje zy con un ángulo de 180° para obtener la morfología de una semiesfera; **c)** Forma de la cúpula invertida; **d)** Rotación de 12 elementos con un ángulo de 360° . © Ludovica Rossi 2017

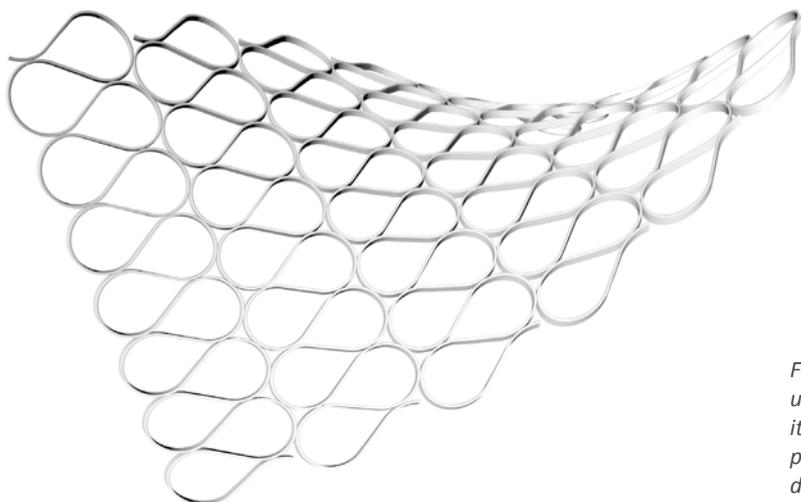
El objeto así representado puede variar su orientación en el espacio (Fig. 26c) y permite verificar otras configuraciones espaciales, cómo: variar la orientación de las fibras entre meridiano y paralelos (Fig. 13) o aumentar el número de



iteración para representar una esfera (Fig. 26d).

En la definición del algoritmo generativo de este modelo virtual el primer nivel de deformación es la geometría de base para dibujar la franja. A esta se aplican en paralelo dos deformaciones de curvatura, según diferentes ejes de referencia. Por medio de la reiteración radial [8] del elemento deformado se define la morfología general. La simulación del modelo se ha estudiado únicamente en una fase estática. Por las propiedades geométricas obtenidas en los modelos físicos la capacidad activa de las fibras reside en la capacidad de asumir una forma autoportante y no en la elasticidad y extensibilidad de la malla del modelo descrito anteriormente. En la simulación de la cúpula en franjas continuas pre-deformadas los objetos deformadores del arquetipo inicial (la franja) se aplican antes de su iteración; la transformación de la franja individual lleva la auto-organización [9] del tejido en su conjunto para alcanzar la forma final de la cúpula.

Paralelamente el patrón de la franja en pétalos alternados puede ser interpretado como una malla para obtener superficies de doble curvatura complejas. A partir del arquetipo de la franja en pétalos iguales (Fig. 27) la aplicación del objeto deformador de plegado junto a la iteración lineal permiten obtener el paraboloides hiperbólico (Fig. 28). En el caso de una malla más extensa y agregando la deformación del giro se obtiene una cinta de Moëbius (Fig. 29). Mientras trabajando con fuerzas de deformación aplicadas en diferentes fases del algoritmo generativo (una al solo arquetipo y otra al objeto resultante de la clonación) se obtiene la morfología de un toroide (Fig. 30). En todo caso la experimentación de las deformaciones en nuevas configuraciones morfológicas en el entorno virtual necesitarán la comprobación del comportamiento del objeto material del entorno físico.



[8] En el capítulo 3 al párrafo 3.4.1 se han explorado las iteraciones por rotación y simetría especular para verificar la variación de los puntos de unión entre franjas pre-deformadas en pétalos alternados.

[9] La auto-organización es un proceso en el cual el patrón a nivel global de un sistema surge únicamente de varias interacciones entre los componentes de nivel inferior del sistema. Las reglas que especifican interacciones entre los componentes del sistema se ejecutan usando solo información local, sin referencia al patrón global. En resumen, los patrones son una propiedad emergente del sistema, más que la propiedad impuesta al sistema por una influencia de orden externa (Camazine et al., 2003).

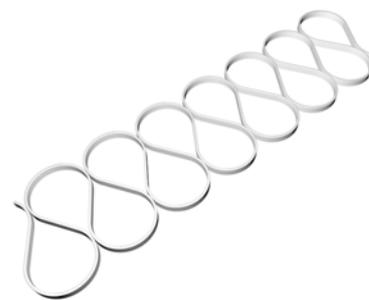


Fig. 27 Arquetipo de la franja en pétalos alternados iguales entre sí. © Ludovica Rossi 2018

Fig. 28 Variación morfología del sistema en un paraboloides hiperbólico obtenido por iteración lineal y variaciones de la forma por pliegues positivo y negativo según las diagonales. © Ludovica Rossi 2018

Fig. 29 Variación morfología del sistema según iteración lineal y variaciones de la forma por pliegue y torsión de la malla hasta asumir la forma de una cinta de Moëbius. © Ludovica Rossi 2018

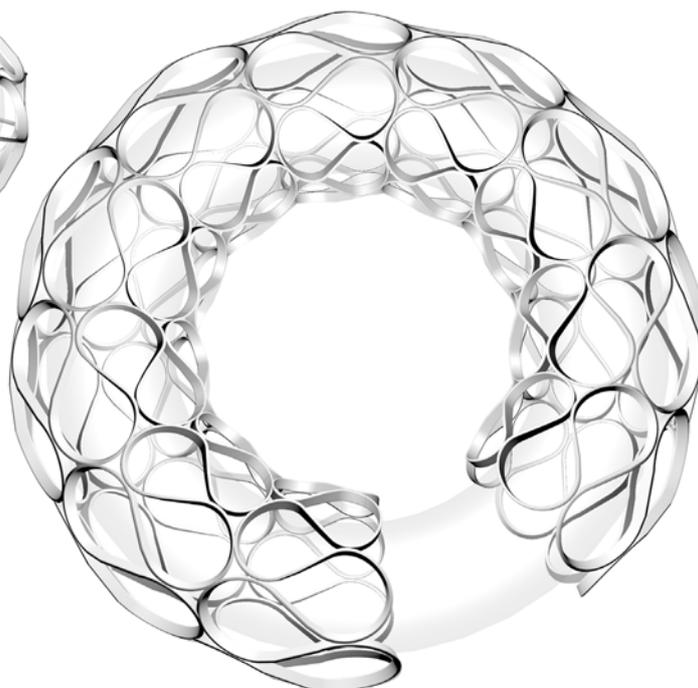
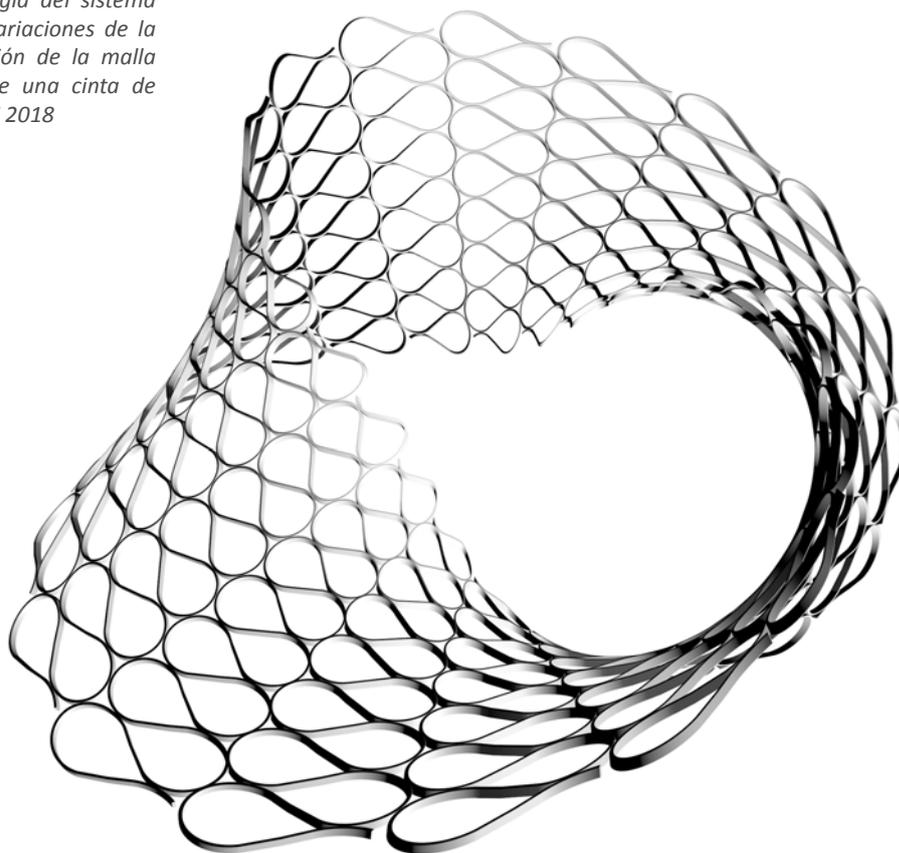


Fig. 30 Variación morfología del sistema en la forma de un toroide obtenida según iteración lineal y variaciones de la forma por pliegues introducidos en diferentes momento del algoritmo generativo. En el entorno físico la construcción de partida de la franja en banda neumática partiría de pétalos de forma variable como en el caso de la construcción de la cúpula. © Ludovica Rossi 2018

4.4.2 Cúpula por teselación de la superficie

En el caso de la construcción de la cúpula con franjas cerradas sobre sí mismas en anillos, la simulación se ha orientado a observar la iteración del objeto inicial en el espacio tridimensional. En este caso, donde la deformación de la fibra es representada a priori en el elemento base (la franja), la herramienta digital permite hacer diferentes pruebas reduciendo significativamente el tiempo de elaboración. La simulación virtual ha permitido comprobar la factibilidad y viabilidad de una repetición de la franja respecto a otra para obtener la forma final de la cúpula.

Este grupo de modelos mantiene el arquetipo de una sección rectangular vertical extruida según una línea curva generatriz (Fig. 9b, 31). A partir de este objeto se han realizado diferentes pruebas. Entre las problemáticas principales se encuentra como adaptar la sección de la franja a la superficie de doble curvatura, manteniendo la continuidad entre los anillos que no deberían entrecruzarse entre sí. Esto implica que el elemento debe adaptarse según las diferentes dinámicas de fuerzas de la morfología (mayor o menor curvatura).

Una primera prueba empieza por clonar las franjas separadamente, según diferentes anillos concéntricos, buscando una aproximación a la morfología esférica (Fig. 32). Desde el extremo superior con un menor número de elementos hasta la circunferencia inferior de mayor diámetro, se modifica progresivamente la inclinación de las franjas cerradas por aproximación a la tangente de la cúpula. Paralelamente se adaptan las dimensiones evaluando que los elementos superiores tenderán a ser comprimidos reduciendo sus proporciones, mientras en la base de la cúpula los elementos se alargan, aumentando la superficie esférica que ocupan. En la dirección del espesor del elemento se aplica una deformación con efecto cónico (Fig. 31). La franja pierde la forma cilíndrica por la compresión generada al asumir la superficie esférica, como se ha observado en el modelo físico. Se adaptan los patrones que componen la cúpula en el espacio virtual aplicando un objeto deformador que estrecha hacia el extremo interno y ensancha la fibra hacia el externo de la superficie. Cada anillo de la semiesfera está formado por la clonación radial del mismo elemento repetido igual a todos los demás (Fig. 33), aunque cada anillo es definido independientemente a los demás. En paralelo se introducen las informaciones de deformación para adaptar la franja a la superficie sinclástica.

El procedimiento descrito aplica las siguientes transformaciones: variación de la inclinación respecto a la tangente de la cúpula, variación de proporciones y escala (de más pequeño a más

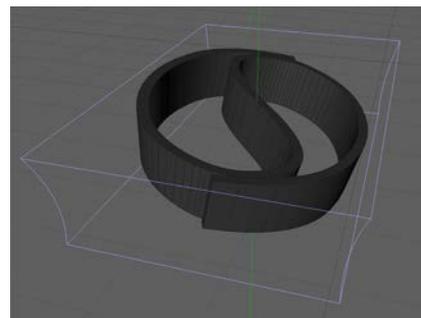


Fig. 31 Construcción del modelo a partir del arquetipo de la fibra cerrada. A la franja inicial se aplica una deformación cónica en su espesor para reproducir las dinámicas de compresión de las fibras inferiores y de tracción de las fibras superiores en asumir la curvatura. © Ludovica Rossi 2016



Fig. 32 Modelo compuesto por 9 anillos concéntricos cuyos elementos base varían de un mínimo de 5 a un máximo de 28, radio de la cúpula 320 cm. © Ludovica Rossi 2016



Fig. 33 Construcción del primer anillo que compone la cúpula por medio de la iteración por rotación e inclinación según la tangente en la porción de esfera correspondiente. © Ludovica Rossi 2016



Fig. 34 Pruebas de modelos esféricos obtenidos por clonación del arquetipo según un objeto esfera. La iteración no permite adaptar las franjas a la porción de curvatura de la superficie, donde los cuerpos se entrecruzan y sobreponen entre sí. © Ludovica Rossi 2016

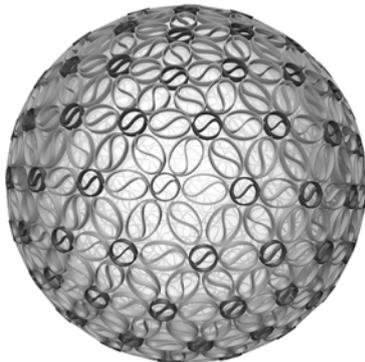


Fig. 35 Superficie sinclástica de una esfera obtenida por un patrón de clonación hexagonal compuesto por dos franjas cerradas, una iterada según los vértices representada en color gris oscuro y otra según las aristas representada en color gris claro. © Ludovica Rossi 2016

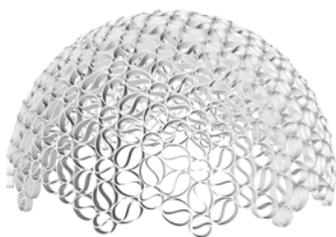


Fig. 36 Superficie sinclástica de una semiesfera obtenida por un patrón de clonación hexagonal e iteración por aproximación de la esfera a un icosaedro. © Ludovica Rossi 2016

grande). Para reproducir las relaciones de fuerza que ejercen los elementos entre sí aplica el deformador cónico en la sección vertical del elemento en relación a las directrices radiales hacia el centro de la esfera. Las deformaciones de inclinación y adelgazamiento del elemento responden a los parámetros geométricos de la morfología general de la esfera. Mientras las variaciones de escala reproducidas cualitativamente en el modelo virtual quieren aproximarse al comportamiento del material observado en los modelos físicos.

Otras pruebas buscan sistematizar la repetición del elemento según patrones de clonación más eficientes respecto a un diseño paramétrico. Manteniendo la morfología final de la cúpula la iteración del arquetipo se realiza según un objeto esférico, de referencia. Este define la geometría en base a la cual realizar la iteración del elemento base y por el cual es posible generar una teselación de la superficie curva. En esta simulación la deformación elástica de la franja pierde relevancia respecto a su variación en el espacio.

En unas de las pruebas la iteración no permite adaptar el arquetipo a la porción de curvatura de la superficie esférica: los cuerpos se entrecruzan y sobreponen entre sí (Fig. 34). Un buen nivel de aproximación es ofrecido por la aproximación de la esfera en icosaedro que parece tener un correcto equilibrio entre repetición y densidad del tejido. La iteración de la franja cerrada se obtiene según un patrón de teselación hexagonal, que permite recubrir la totalidad de superficie de la esfera (Fig. 35) o parte de ella (Fig. 36). La cúpula geométrica es tratada como un prisma y la iteración se realiza según sus vértices y aristas. Se definen dos tipos de objeto franja, uno más pequeño con una forma más circular que se sitúa en los vértices y otro más grande con una forma más bien ovalada que sigue las aristas del polígono. Si bien esta configuración se aproxima al modelo físico las franjas no se adaptan entre ellas y no se aplica deformación por compresión en la sección del elemento.

De forma similar a casos anteriores, si se consideran la iteración del arquetipo según un patrón de clonación en el plano es posible aplicar fuerzas deformadoras que curvan la superficies adaptando la también el espesor a los cambios de curvatura. Desde cierto punto el software reproduce el efecto de Poisson que influencia directamente la flexión de los cuerpos. Considerando el material como isotrópico, el elemento sometido a flexión varía su volumen dependiendo de los esfuerzos de compresión o tracción. En un elemento lineal sometido a flexión la sección transversal presentará una distribución típica de mariposa de las tensiones normales donde la mitad superior estará bajo compresión y la mitad inferior bajo tensión, con la superficie

neutral corriendo a lo largo del centro de masa de la viga. Como la mitad superior está sujeta a fuerzas de compresión, se expandirá lateralmente para compensar el cambio de volumen que sigue al efecto de Poisson descrito. Lo mismo es válido para la mitad inferior que se contraerá lateralmente porque está bajo tensión. Este cambio diferencial de longitud sobre la sección transversal del haz es responsable de inducir la curvatura en la dirección transversal de la deformación por flexión (La Magna y Knippers, 2018).

La definición del patrón repetido en el plano define las propiedades de teselación. La repetición del elemento según una retícula ortogonal (Fig. 37) se adaptará sobre una superficie sinclástica de forma diferente que un patrón hexagonal (Fig. 38d, 39a). Esta última se compone por la construcción de un grupo de 7 franjas (Fig. 38a) que forma un patrón de repetición hexagonal en el plano xz (Fig. 38b). La deformación esférica aplicada al conjunto de elemento adapta el tejido a la doble curvatura positiva de la superficie (Fig. 38c, d).

Una de las ventajas de la simulación por medio de modelos virtuales es poder reducir el tiempo de experimentación en la generación de superficies complejas (Fig. 39). Igualmente la comprobación de las dinámicas de reciprocidad entre los esfuerzos y la deformación en el ámbito de materiales flexibles, como las bandas en neumáticos, es necesaria para verificar las efectivas dinámicas de equilibrio que se generan. Estas son determinantes en la definición de la geometría y en la repetición del arquetipo para determinar una configuración morfología auto-organizada.

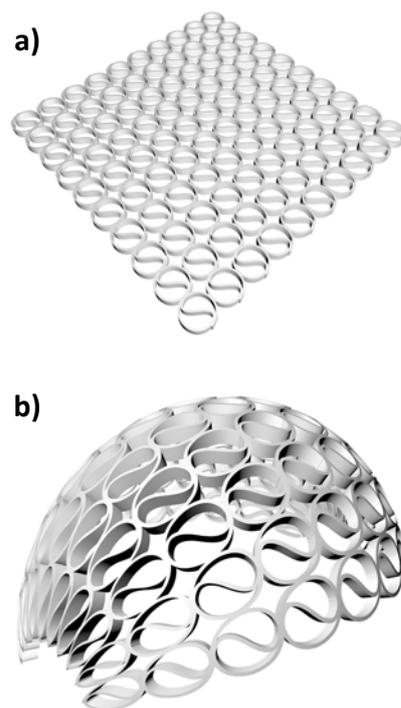


Fig. 37 Modelo de una superficie sinclástica obtenida por deformación del arquetipo de la franja cerrada repetida en el espacio según una retícula ortogonal: **a)** Conjunto iterado en el espacio plano; **b)** Reticula plana es deformada siguiendo el criterio de envolver una esfera. © Ludovica Rossi 2018

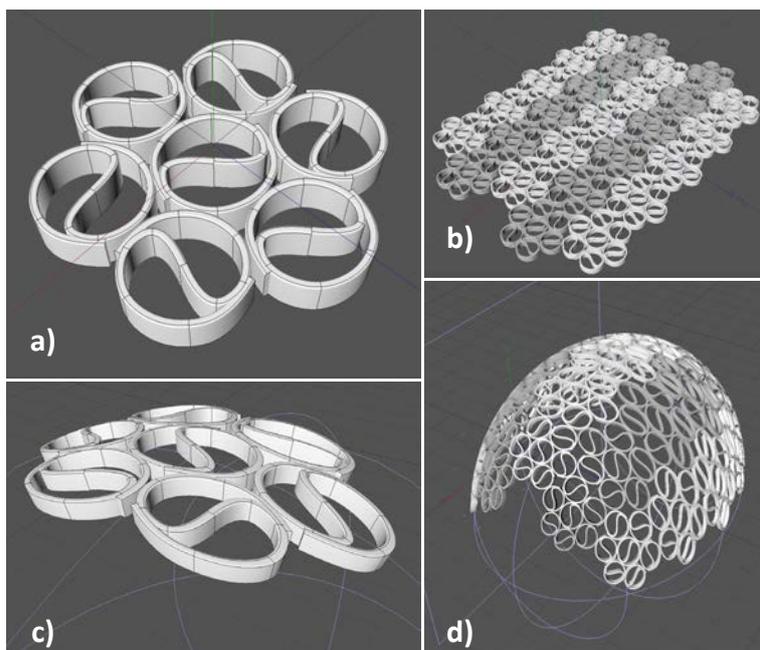
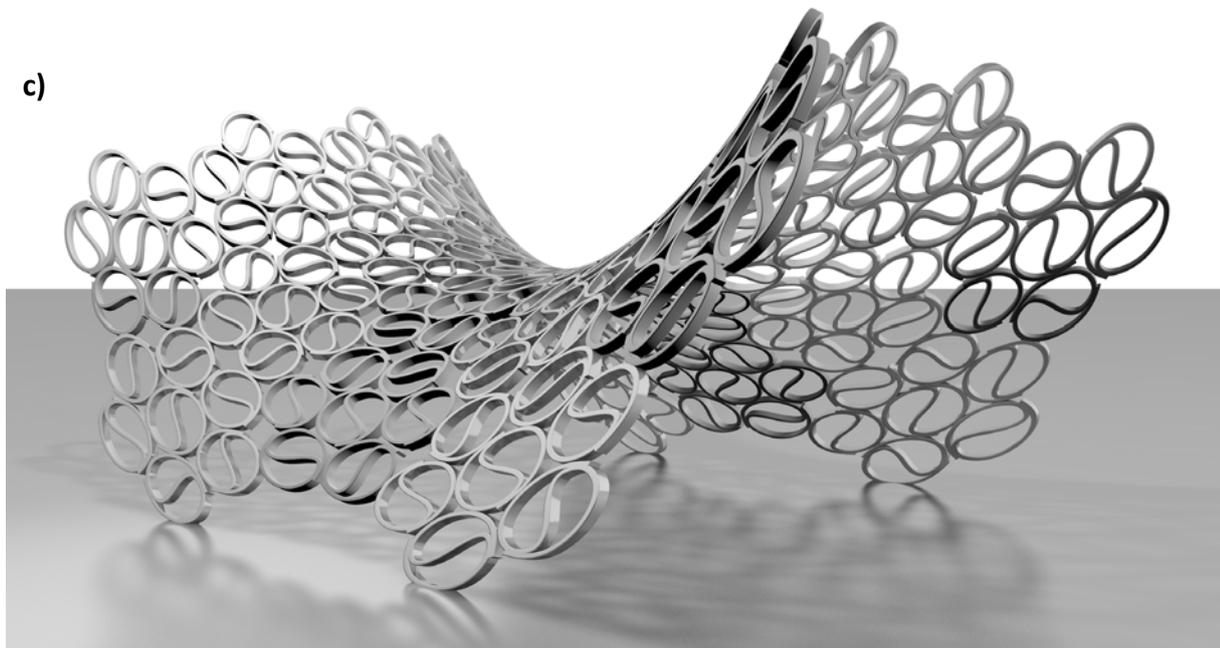
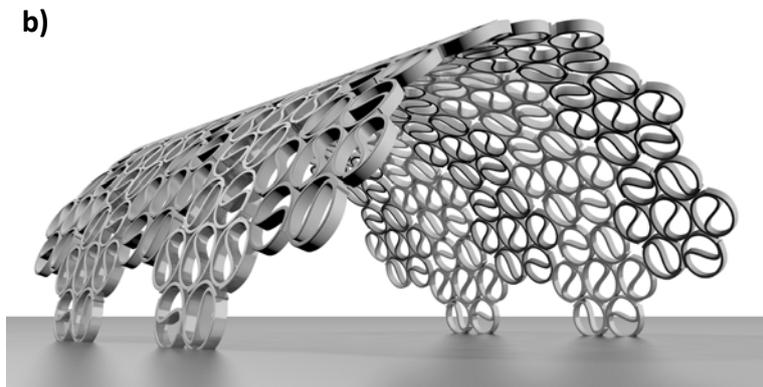
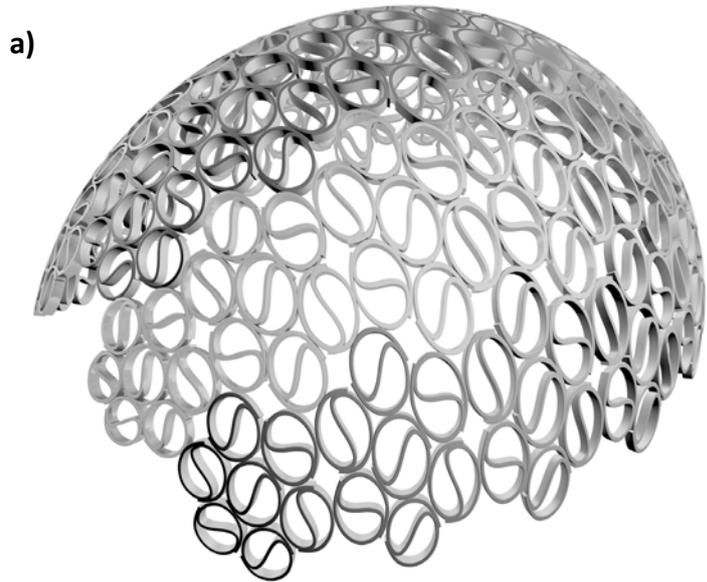


Fig. 38 Proceso de la definición del modelo: **a)** Grupo de 7 franjas en el plano distribuida de forma hexagonal; **b)** Iteración de las franjas según una teselación hexagonal en el espacio plano; **c)** Deformación en doble curvatura positiva del grupo inicial de 7 franjas; **d)** Deformación general de la superficie plana en una superficie sinclástica. © Ludovica Rossi 2018

Fig. 39 Modelos que muestran los efectos de la flexión en la curvatura de Gauss: **a)** Curvatura sinclástica; **b)** Superficie cilíndrica; **c)** Curvatura anticlástica.
©Ludovica Rossi 2018



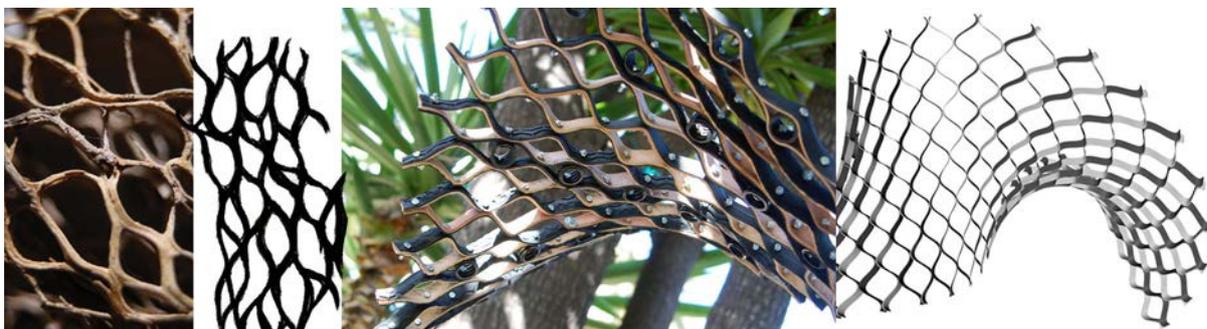
4.5 PROCESOS MORFOLÓGICOS

La planta tiene un crecimiento continuo y adapta sus condiciones fisiológicas a cada instante. Las condiciones de equilibrio del organismo son constantes pero siempre mutables. El tejido vivo se modifica continuamente para responder a los equilibrios de presión internos (derivados por el intercambios de líquidos entre las células de los tejidos internos) y responden a una determinada necesidad fisiológica: transporte y/o almacenamiento de nutrientes, líquido, etc. Exteriormente el organismo no parece modificarse, mientras en su interior los equilibrios varían constantemente. Si observamos el crecimiento de la planta la variación morfológica se hace evidente. El tejido creciendo se modifica y al deformarse genera nuevas formas. Las condiciones de equilibrio del organismo vegetal son constantes pero en continua mutación.

Las condiciones de equilibrio en el modelo virtual responden a los parámetros de coherencia que pueden ser aplicados respecto a criterios fijados previamente. La construcción en el modelo físico conlleva un tiempo de ejecución que no se observa en el objeto una vez terminado. El modelo virtual puede 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. Asimismo, definido el arquetipo de la franja, el entorno virtual permite experimentar la variación de la forma en diferentes superficies y curvaturas reduciendo los tiempos de trabajo (Fig. 41).

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. En paralelo la configuración en el espacio de representación conduce a sistematizar las acciones que generan la forma y los procesos a esta asociados. En este marco la definición del orden, secuencia y jerarquía de las operaciones gráficas de representación en el modelo virtual son factores que integran y completan las

Fig. 41 Proceso de definición de la morfología desde la observación del tejido seco de la madera del cactus, pasando por el proceso de conceptualización, la producción de modelos físicos para comprender el comportamiento del tejido elástico y flexible, hasta su simulación digital para la comprensión y sistematización de los procesos de deformación asociados a la generación de la morfología. © Ludovica Rossi 2018

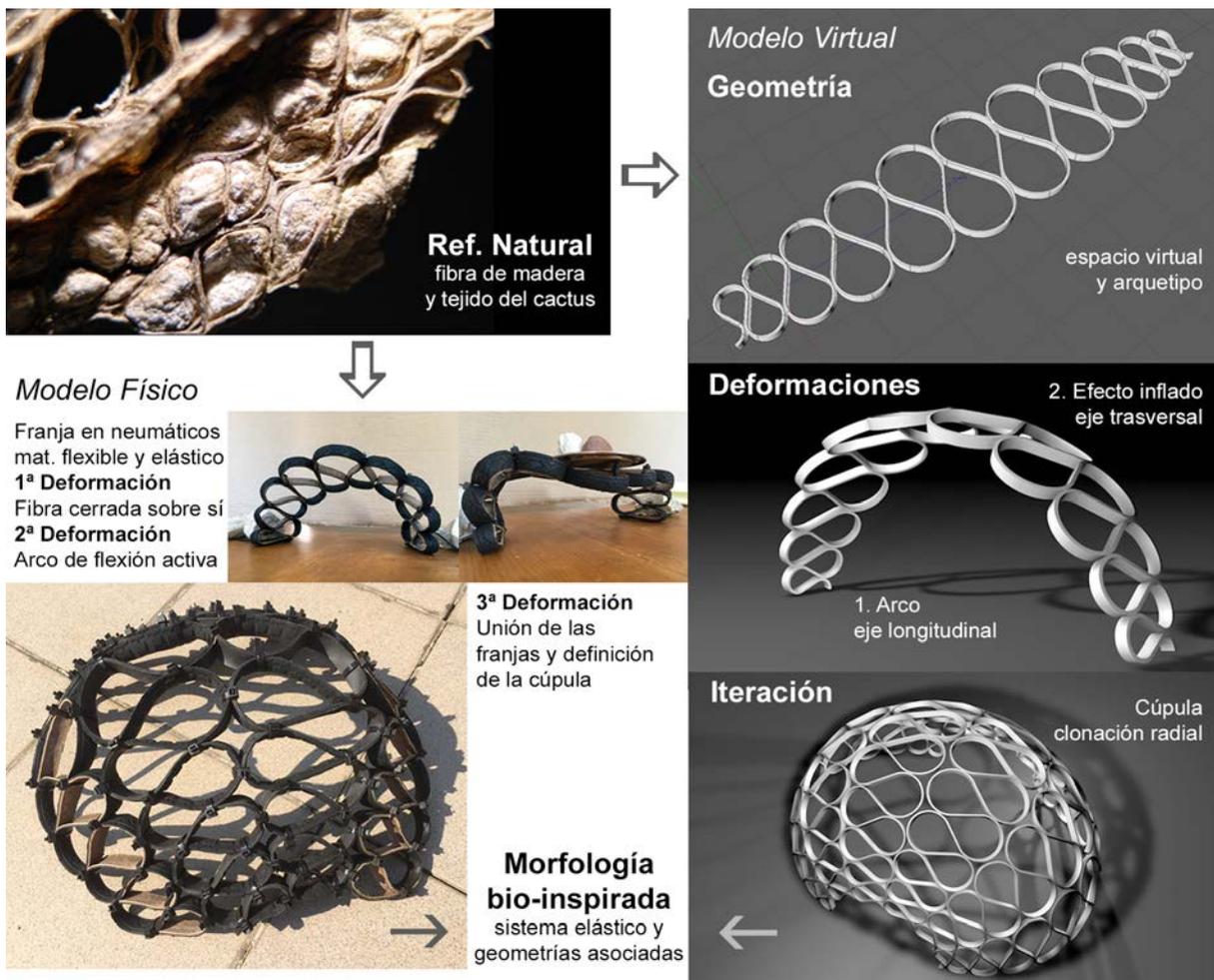


informaciones generadas en el modelo físico.

En la simulación virtual se han aplicado dos tipos de variaciones de forma: una mediante el procedimiento de transformación del objeto de referencia splines de plana a curva, y otra por la aplicación de objetos deformadores que actúan como fuerza de cambio sobre el objeto geométrico (plegar, girar, curvar, etc.). En todos los modelos la franja ha sido representada como el crecimiento de la forma base de un rectángulo extruida a lo largo de una generatriz curvilínea. En los modelos dinámicos de la malla sinusoidal, el cambio de forma de la franja se obtiene por la variación de la línea generatriz de una trayectoria lineal a sinusoidal. En estos modelos la deformación toma una dimensión variable en la línea temporal. La iteración de la franja es parte del proceso de definición de la forma final. Dependiendo del modelo, la clonación del elemento se realiza antes o después de haber aplicado la deformación.

Esquema 4.2 Modelo en franjas pre-deformadas en pétalos alternado de dimensión variable. Esquema de las relaciones entre la secuencia en que se genera la morfología en los modelos físicos y aplicación las geometrías y deformaciones para generar la forma en el modelos virtual. © Ludovica Rossi 2017

En los modelos con franjas en forma de pétalos alternados (Esquema 4.2) los objetos deformadores se aplican antes de



la iteración, mientras en el modelo físico el sistema se auto-organiza mientras se unen las franjas (Fig. 42). En los modelos con la franja cerrada sobre sí en anillo la iteración es la principal herramienta de definición de la morfología, y la variación de forma de la franja por estiramiento pierde relevancia en el proceso de simulación. Estos procedimientos de definición del modelo apuntan a reproducir la franja pre-deformada como en la construcción física de la misma. Por otra parte, tomando el arquetipo de la franja pre-deformada de forma similar a la franja sinusoidal, la iteración del arquetipo conforma una malla deformable en el espacio. Se obtienen entonces configuraciones que permiten experimentar con diferentes variaciones de curvatura (Esquema 4.3). En paralelo, estas morfologías necesitan ser comprobadas en el entorno físico ya que el proceso de auto-organización de la fibra flexible tiene un nivel de complejidad no siempre previsible.

4.6 CONCLUSIONES CAPÍTULO

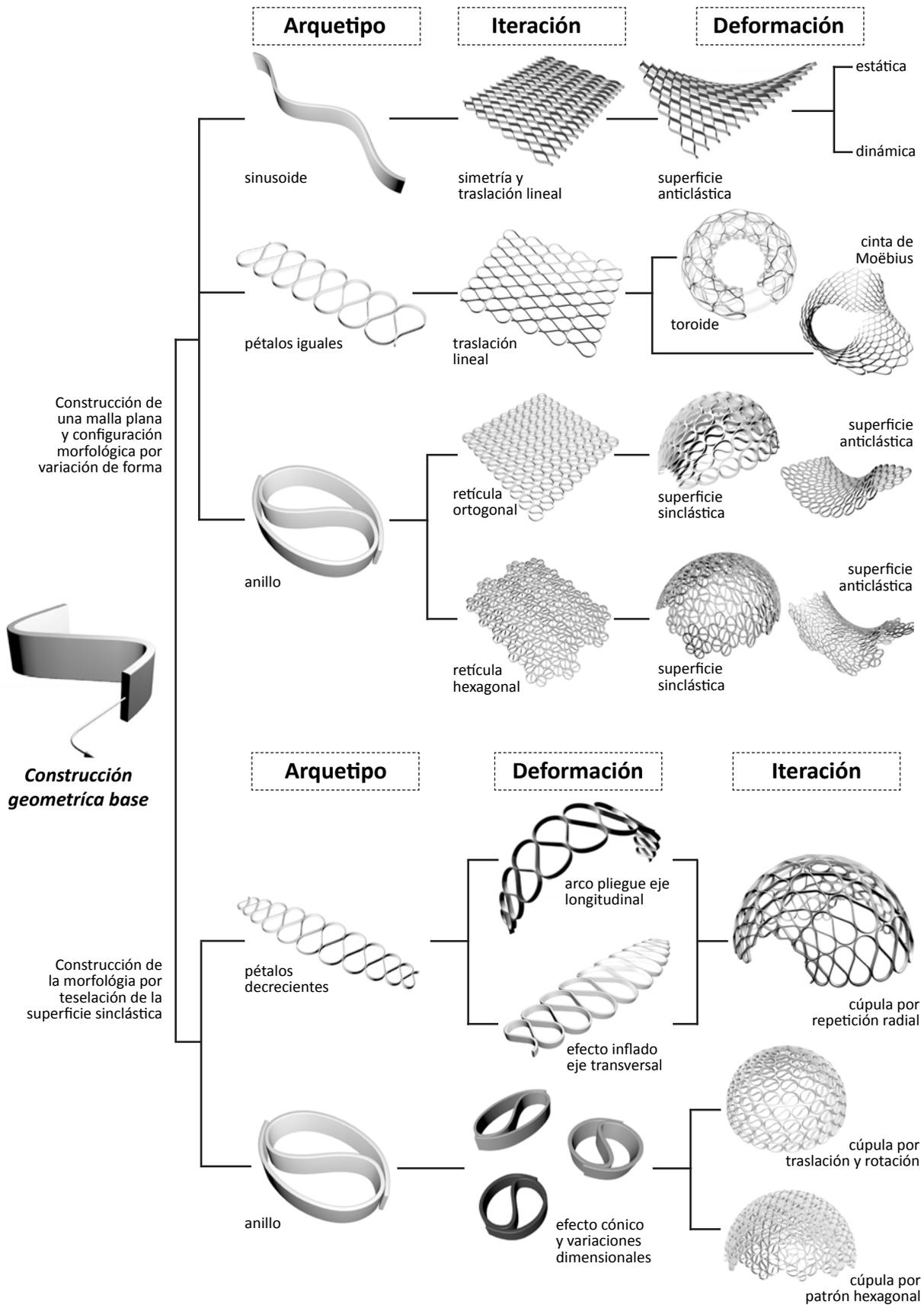
En este cuarto capítulo se explicita como el proceso de digitalización de la información es un pasaje necesario para comprender cómo funciona la morfología generada en los modelos físicos, codificando y definiendo las geometrías y deformaciones asociadas. La separación de los procesos, para llegar a la representación abstracta del objeto tridimensional, pone en evidencia las geometrías necesarias en 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 qué plano orientarla, cuáles deformaciones aplicar y cómo repetir los elementos, son las informaciones que permiten la representación del modelo.

El espacio abstracto permite introducir el parámetro temporal que reproduce los mecanismos dinámicos del proceso constructivo del modelo físico. Estos comprenden por un lado la variación de forma de la fibra, es el caso de la malla que trabaja a tracción donde se observa como esta se abre y cierra; y por otro la codificación de las deformaciones que permiten obtener el efecto inflado en la forma del domo (sean por fibra continuas o por sumatoria de elementos). La sistematización de los modelos respecto a la dimensión de los procesos a ellos asociados, implica evaluar la técnica utilizada desde una dimensión temporal progresiva, no solo funcional sino también evolutiva. Esto implementa una visión dinámica que incluye el parámetro del tiempo en una secuencia hacia adelante, explicitando la diferencia entre lo que se hace y lo que ocurre. Donde el primero hace referencia a la ejecución y el segundo a la secuencia de acontecimientos que determinan o permiten llegar a una cierta configuración espacial.



Fig. 42 Aplicación del modelo en franjas pre-deformadas en anillos cerrados como pantalla para una lámpara de pared. ©Ludovica Rossi 2017

Esquema 4.3 (Página siguiente) Síntesis de los procesos generativos implementados en la construcción de los modelos virtuales. Los resultados morfológicos varían según el orden de las operaciones aplicadas. Si una vez definido el arquetipo geométrico se aplica su iteración en el espacio se obtiene una superficie que puede ser deformada en el espacio de forma homogénea. Si la deformación es aplicada al arquetipo individualmente la iteración en el espacio deberá tener en cuenta las informaciones geométricas de la porción morfológica general que ocupará cada elemento. ©Ludovica Rossi 2018



4.7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- La Magna R. y Knippers J., 2018, *Tailoring the Bending Behaviour of Material Patterns for the Induction of Double Curvature*, en *Humanizing Digital Reality. Design Modelling Symposium Paris 2017*, editores: K. De Rycke et al, Ed. Springer Nature Singapur Pte Ltd, DOI: 10.1007/978-981-10-6611-5_38
- Frogheri D., Estévez A. T. y Meneses-Carlos F., 2017, *Morfologías resilientes: Desde lo digital a la materia*, en actas congreso SIGraDi 2017, XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital, 22 - 24 Noviembre, 2017, Concepción, Chile, DOI: 10.5151/sigradi2017-049
- Patiño Mazo E., Valencia-Escobar A., Torreblanca Díaz D. A. y Zuleta Gil A., 2017, *Proceso Generativo de Texturas Paramétricas Bioinspiradas: Modelo Metodológico de Experimentación*, en actas congreso SIGraDi 2017, XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital, 22 - 24 Noviembre, 2017, Concepción, Chile, DOI: 10.5151/sigradi2017-080
- Castro Henriques G., Nóbrega G. y Passaro A., 2017, *Tentáculos: Recriando criaturas híbridas, analógico-digitais*, en actas congreso SIGraDi 2017, XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital, 22 - 24 Noviembre, 2017, Concepción, Chile, DOI: 10.5151/sigradi2017-082
- Terzidis K., 2017, *The Intricacy of the Otherness*, pp. 11-27, en *archi DOCT - Algorithmic Thinking*, vol. 4 núm. 2, Ed. www.enhsa.net/archidoct, ISSN 2309-0103
- Addis B., 2013, *In Search of Some Principles of Bio-mimetics in Structural Engineering*, capítulo 5, libro: *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction. Biological Design and Integrative Structures*, editores: Knippers J., Nickel K.G. y Speck T., Ed. Springer, Suiza, ISBN 978-3-319-46374-2
- De Landa M., 2009, *Emergencia, causalidad y realismo*, pp. 4-14, en *Artnodes*, revista núm. 9, Ed. Universitat Oberta de Catalunya, ISSN 1695-5951
- Grinspun E. y Secord A., 2006, *Introduction to Discrete Differential Geometry: The Geometry of Plane Curves*, capítulo 1, en *Discrete Differential Geometry: An Applied Introduction, SIGGRAPH 2006 - COURSE NOTES*, The 33rd International Conference and Exhibition on Computer and Interactive Techniques, DOI: 10.1145/1508044.1508053
- Terzidis K., 2003, *Expressive Form. A conceptual approach to computational design*, Ed. Spon Press Taylor & Francis Group, London y New York, ISBN 0-203-58689-1
- De Landa M., 2002, *Deleuze and the use of the genetic algorithm in architecture*, pp. 9-12, en *Architectural Design*, vol. 72 núm. 1, Ed. John Wiley & Sons Ltd, ISSN:1554-2769
- Hosdorf H. y Hernández C. B., 1972, *Modelos reducidos. Método de cálculo*, Ed. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento (IETcc), Madrid, ISBN 0644

Capítulo 5

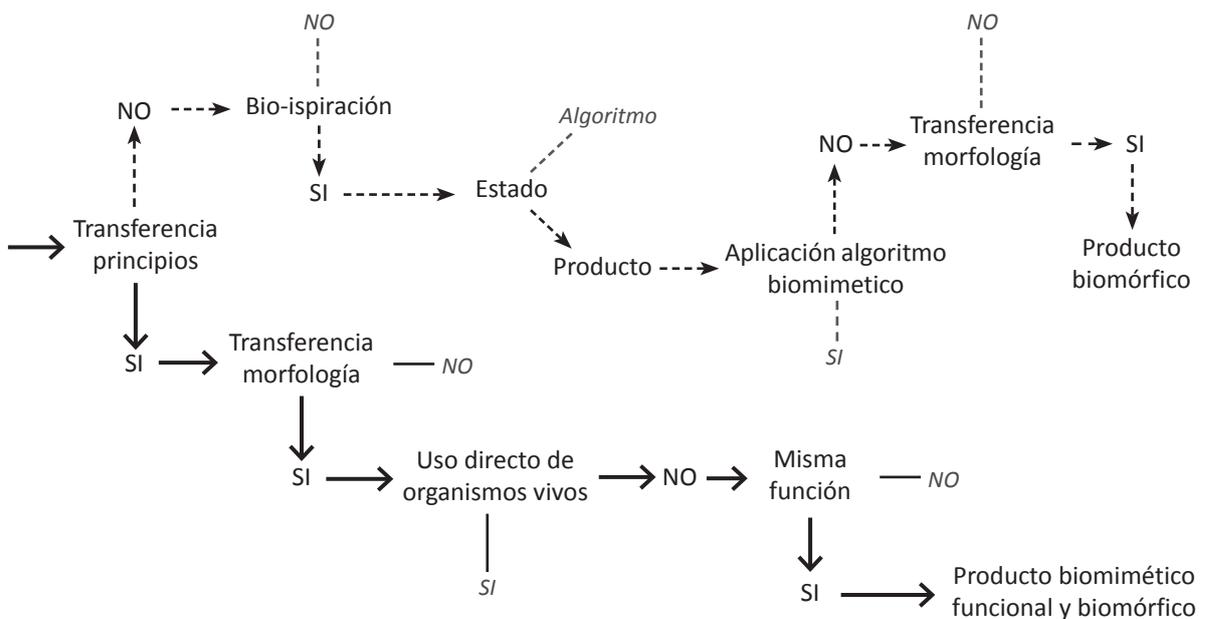
Conclusiones

5.1 CONCLUSIONES GENERALES

La tesis cumple el objetivo general de vivenciar el proceso de diseño bio-inspirado. Aplicando la herramienta del árbol de decisiones del proyecto CRC-Transregio 141 *“Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture”* (ver Introducción, párrafo 0.6) es posible considerar los modelos realizados como productos biomiméticos funcionales y/o biomórficos. Se valora de manera afirmativa que el diseño desarrollado en el trabajo permite la transferencia de los principios biológicos. La transferencia de la morfología, preservando la misma función del modelo biológico, permite definir los modelos como un producto funcional (Esquema 5.1 línea continua).

La aplicación del concepto de mimesis tiene unos límites en la posibilidad de transferir los principios biológicos a la forma construida debido a la diferencia de escala de observación y aplicación del mecanismo y a la variación del material utilizado. Es entonces posible valorar los modelos desarrollados, también, como unos productos biomórficos, donde la secuencia de

Esquema 5.1 Secuencia del árbol de decisiones como una herramienta de análisis (Speck at all, 2017) para identificar los resultados de los modelos físicos y virtuales desarrollados. Empezando por en el nodo raíz de la “transferencia de principio”, se identifica con la línea continua el desarrollo en biomimésis y con la línea discontinua el proceso bio-inspirado.



decisiones aplicadas define el proceso bio-inspirado (Esquema 5.1 línea discontinua).

Por consecuencia es posible afirmar que las morfologías desarrolladas en el trabajo de tesis verifican que el referente orgánico de la estructura portante de las plantas cactáceas ha sido fuente válida como generador de conceptos. El proceso de diseño alcanza el objetivo de implementar los mecanismos biológicos más allá de la mímica directa, o sea poner en práctica de forma abstracta y creativa los principios biológicos de adaptabilidad y crecimiento. Se destacan tres aspectos del proceso de diseño que inciden en los resultados obtenidos:

- El método y la escala de observación inciden en la interpretación del organismo. Esta se realiza según un planteamiento arquitectónico que permite la compresión sistémica de las partes con una perspectiva complementaria al análisis fisiológico.
- El proceso de abstracción del mecanismo biológico es el paso que define el ámbito técnico de la estructura bio-inspirada. Al variar la conceptualización varía el funcionamiento morfológico.
- Para seguir con el estudio en campo arquitectónico es necesario dejar de lado el referente orgánico. Este paso ha conllevado cierta dificultad por idealizar el modelo biológico.

Los resultados están condicionados a la definición del marco teórico de la biomimesis con los conceptos de sostenibilidad y evolución. Si por una parte la investigación ha sido enfocada hacia unos aspectos específicos del organismo, por otra tener conciencia de la más amplia red de interacciones propia de la naturaleza define el cambio de un enfoque mecanicista a un planteamiento holístico del proyecto.

La visión holística extiende sus ramas más allá del referente natural. Entorno y referente natural no son separables en dos aspectos diferentes, sino que el uno está conectado al otro y viceversa. De forma análoga el trabajo de tesis sigue el ejemplo de los sistemas en simbiosis, donde las interacciones biológicas que emplean la cooperación son parte de las estrategias evolutivas. El uso de materiales recuperados como los neumáticos fuera de uso participa en la casuística de las interacciones posibles entre las industrias automotriz y de la construcción. El uso de un material no convencional para aplicaciones en estructuras arquitectónicas plantea la visión de un metabolismo técnico donde un material no es producido únicamente para su primer uso. En estos términos el desarrollo tecnológico representa una

gran potencialidad para ofrecer nuevas respuestas a los desafíos medioambientales; y los sistemas biológicos son una fuente de estudio válida para la implementación de una tecnología creativa que permita aumentar la complejidad de gestión del sistema productivo.

Por los datos recopilados en la tesis se puede concluir que la banda de rodadura de neumáticos fuera de uso, en los vehículos tipo turismo, no puede ser aplicada directamente para la construcción de prototipos a escala humana de la arquitectura. En todo caso se puede concluir que la banda de rodadura de bicicletas recuperadas:

- Es válida como material de estudio para los procesos de diseño en biomímesis;
- Su uso ha permitido trabajar con un material de origen recuperado, reduciendo el impacto ambiental de la tesis a lo largo de la investigación;
- Por sus propiedades elásticas y de extensibilidad este material ha determinado un desafío en el control de la forma arquitectónica;
- El material compuesto de goma y fibras sintéticas es apto para investigar los procesos de generación de la forma y permite reproducir las propiedades de auto-organización y adaptabilidad.

La aplicación del referente natural permite extrapolar los aspectos generales de un procedimiento de diseño bio-inspirado. A las conclusiones generales se acompañan los resultados específicos obtenidos de los modelos elásticos en bandas neumáticas recuperadas.

5.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

La tesis implementa el uso de un material elástico para experimentar sistemas bio-inspirados en el tejido de madera de las cactáceas para seguir los principios de generación de las formas, su agregación y crecimiento. A partir de la metodología botton-up, la observación del tejido vivo de la planta ha permitido llegar a la definición de estructuras a flexión activa cuya forma es resultado de los equilibrios de esfuerzos internos y externos aplicados. El análisis de la morfología funcional del sistema biológico determina que:

- La definición de la franja como elemento morfológico base independiza el mecanismo del referente natural, permitiendo establecer las normas geométricas para el desarrollo de la morfología bio-inspirada.

El tejido de sostén de la planta viva y los modelos comparten los dos mecanismos morfogenéticos:

- El efecto fuelle de la malla con uniones regulares que se abre y cierra tanto por la acción de esfuerzos de tracción externos como por la introducción de actuadores;
- El efecto resorte que ejercen las franjas entre sí en los modelos con franjas pre-deformadas, donde el tejido queda abierto por equilibrio de esfuerzos internos.

Los experimentos demuestran cómo el cambio de forma aplicando a las fibras individuales, mediante el curvado en una secuencia de pétalos alternados, modifica la relación jerárquica entre sus dimensiones. Inicialmente el alto de la sección es predominante frente al ancho, aplicando la deformación se invierte la relación entre las magnitudes. Esta condición es una propiedad morfológica, mediante la cual se obtiene un componente pretensado plano que puede asumir configuraciones curvas por pandeo. La unión de fibras pre-deformadas conforma un caparazón donde la transferencia de carga global, por acción de la membrana, garantiza la solidez del sistema.

- La observación e inspiración de la naturaleza permite comprender las dinámicas subyacentes a los sistemas complejos para avanzar en la definición de estructuras en campo elástico donde:
- La deformación controlada es una propiedad geométrica que permite obtener formas auto-organizadas, convirtiéndose en una herramienta de diseño;
- En el diseño en flexión activa la aplicación de un doble pliegue permite controlar la extensibilidad del material y alcanzar formas auto-portantes;
- La rigidez estructural del sistema es obtenida por las propiedades geométricas, no únicamente por propiedades mecánicas;
- La definición del modelo geométrico explicita la topología y establece las leyes de transformación que generan la forma;
- La deformación, que normalmente en la arquitectura tiene una acepción negativa, en el ámbito del diseño en flexión activa deviene una modalidad alternativa para generar forma (o sea espacio).

La interacción entre las franjas genera nuevos fenómenos, como propiedades emergentes donde el todo es diferente de la suma de las partes. Los modelos muestran que, aunque a

pequeña escala, la morfología funciona y podría ser empleada para objetos de uso cotidiano. Se demuestra que la incidencia de la rigidez geométrica en las estructuras a flexión permite obtener formas estables que auto-equilibran los esfuerzos (por medio del pretensado y pandeo). Juntamente la codificación de la morfología utiliza la búsqueda de patrones repetitivos para definir procesos generativos, simulando fenómenos complejos.

5.3 PERSPECTIVAS FUTURAS

La presente tesis ha llegado a definir la implementación técnica de los mecanismos del tejido vivo elástico para el desarrollo de estructuras de flexión activa. La tesis deja abierta la aplicación en campo estructural de la morfología. El aumento de escala de los modelos es un interrogante que abre nuevas vías de investigación.

- **Implementaciones futuras para el desarrollo de los modelos bio-inspirados.**

Las estructuras a flexión activas son abundantes en la naturaleza, y se encuentran muchos ejemplos en los movimientos de las plantas. Éstas permiten obtener superficies complejas a partir de elementos planos, donde la potencialidad de estos sistemas radica en las ventajas de transporte y proceso de ensamblaje, así como el rendimiento y la adaptabilidad de la estructura. Al inicio del siglo pasado, la implementación del hormigón ha permitido el desarrollo de sistema de cáscaras livianas bio-inspirados en los esqueletos de los radiolarios. En la actualidad los avances en la producción de fibras naturales y sintéticas permiten plantear nuevas morfologías bio-inspiradas en los movimientos de las plantas (entre las cuales los cactus). El ámbito de trabajo acepta la hipótesis experimental que la forma es obtenida integrando la geometría con el comportamiento del material.

La aplicación de la banda de rodadura recuperada de vehículos para la construcción de modelos a mayor escala no es lineal. Es necesario implementar estrategias que tengan en consideración la variación del tamaño y cómo este influye en las dinámicas en las cuales actúan las fuerzas físicas, en relación con su entorno. A igualdad de material la investigación puede orientarse hacia estructuras híbridas que integran el caparazón en franjas de neumáticos recuperados con elementos estructurales cuya rigidez es significativamente superior y que permitan obtener una cúpula suficientemente rígida para soportar tanto su propio peso como cargas externas permanentes y dinámicas.

El uso de la banda neumática ha comportado un desafío en el control de la forma arquitectónica, donde la elección del

material ha sido motivada por sus propiedades elásticas que han permitido verificar la aplicación morfológica del mecanismo orgánico. Se considera que la banda de rodadura ha cumplido la función necesaria del estudio propuesto. Definidos los principios morfológicos y su pertenencia a las estructuras de flexión activa, el aumento de escala abre el campo para investigar la aplicación a cuáles materiales pueden ofrecer mejores prestaciones. Estos tienen que tomar en cuenta que el pretensado de la fibra juega un papel importante en la rigidez del sistema, entonces un material como la madera presentaría ciertas limitaciones como se ha podido observar en algunos de los experimentos realizados. Mientras tanto queda abierto el campo a la aplicación de polímeros reforzados con fibras con mejores prestaciones que las bandas de neumáticos o determinados metales, teniendo en cuenta el comportamiento a largo plazo.

El valor simbólico-medioambiental que se obtiene utilizando un material recuperado del sector industrial automotriz, mantiene abierto el interés personal en un aumento de escala de un modelo construido en banda neumática. La biomimética es una disciplina de investigación interdisciplinaria y los resultados obtenidos abren la reflexión sobre diferentes caminos de investigación, no únicamente en el campo de la arquitectura. Esto ha sido, en paralelo, un estímulo motivador y una limitación para el desarrollo de la investigación. Además de la arquitectura y la biología se deberán involucrar otros campos científicos como la ciencia de los materiales, la ingeniería y/o la matemática. Sería necesario ampliar los datos sobre las propiedades mecánicas del material, además de los recopilados en el presente trabajo, a integrar con otros aun por determinar, cómo el coeficiente de Poisson o la resistencia a flexión de la banda de rodadura. Asimismo los modelos numéricos para el cálculo estructural y la representación digital deberían extenderse al comportamiento elástico no lineal del material, donde la sección vertical de la franja participa en la rigidez del sistema.

- **Comprensión del referente orgánico para mecanismos bio-inspirados.**

La característica iterativa del proceso de diseño bio-inspirado también abre camino para investigaciones futuras. Desde la implementación técnica de principios o mecanismos biológicos surgen nuevos descubrimientos que, a su vez, contribuyen a una mejor comprensión del funcionamiento de los generadores de conceptos biológicos. Los procesos biomiméticos permiten mejorar la comprensión del referente orgánico. Se activa una dinámica en espiral que permite seguir investigando y buscar mejoras en las aplicaciones técnicas desarrolladas.

Asimismo los organismos son sistemas complejos; se podrían estudiar otros aspectos fisiológicos de las plantas cactáceas que integren y amplíen el conocimiento obtenido sobre la estructura portante. Las espinas de estas plantas según el ambiente en el cual se desarrollan cumplen diferentes e importantes funciones. Ofrecen un control sobre los efectos de la radiación solar en la epidermis de la planta y al mismo tiempo atrapan la humedad y conducen el contenido de agua en el aire hacia el terreno para su absorción. La morfología y distribución de las costillas de los cactus columnares son objetos de estudio por su respuesta a la reducción del efecto del viento sobre la planta. La investigación de estas y otras características de la planta, desde la mirada de la arquitectura, permitiría codificar sus comportamientos y verificar la aplicación de los mecanismos bio-inspirado al entorno construido.

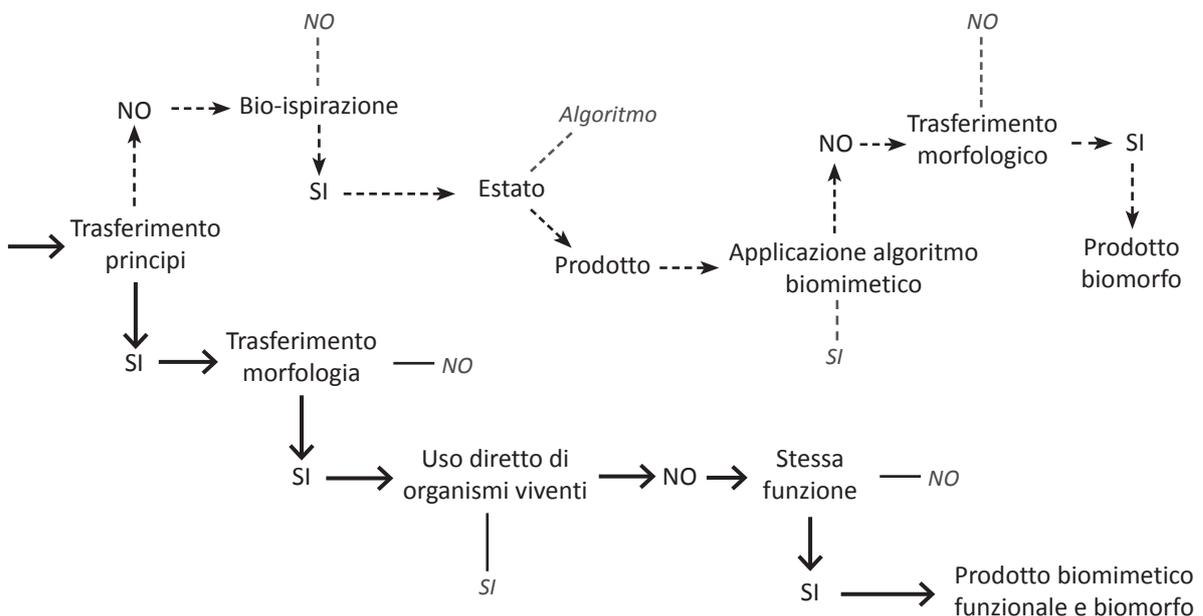
En un campo tan heterogéneo y multifacético, la esperanza de esta tesis es que sea de utilidad a otros investigadores para el desarrollo de sistemas bio-inspirados con el fin de generar alternativas sostenibles y respetuosas del medioambiente.

Conclusioni

5.1 CONCLUSIONI GENERALI

La tesi soddisfa l'obiettivo generale di sperimentare il processo di design bio-ispirato. Applicando lo strumento del progetto dell'albero decisionale CRC-Transregio 141 *"Biological Design and Integrative Structures - Analysis, Simulation and Implementation in Architecture"* (vedi Introduzione, paragrafo 0.6) è possibile prendere in considerazione i modelli realizzati come prodotti biomimetici funzionali e/o biomorfi. Si valuta in modo affermativo che il progetto sviluppato nella tesi consente il trasferimento dei principi biologici. Il trasferimento della morfologia, mantenendo la stessa funzione del modello biologico, consente di definire i modelli come un prodotto funzionale (Schema 5.1 linea continua). L'applicazione del concetto di mimesi trova dei limiti per la possibilità di trasferire i principi biologici alla forma costruita a causa della differenza di scala dell'osservazione e dell'applicazione del meccanismo, insieme alla variazione del materiale utilizzato. È quindi possibile valutare i modelli sviluppati, anche, come prodotti biomorfi, in cui la sequenza delle decisioni applicate definisce il processo bio-ispirato (Schema 5.1 linea tratteggiata).

Di conseguenza, è possibile affermare che le morfologie sviluppate nel lavoro di tesi verificano che il riferimento organico della struttura portante delle piante cactacee sia stato una valida fonte come un



Schema 5.1 Sequenza dell'albero decisionale come strumento di analisi (Speck del 2017) per identificare i risultati dei modelli fisici e virtuali sviluppati. A partire dal nodo radice del "trasferimento dei principi", lo sviluppo della biomimetica viene identificato con la linea continua e il processo bio-ispirato con la linea tratteggiata.

generatore di concetti. Il processo progettuale raggiunge l'obiettivo di implementare i meccanismi biologici oltre la mimesi diretta, cioè di mettere in pratica in modo astratto e creativo i principi biologici dell'adattabilità e della crescita. Sono evidenziati tre aspetti del processo di progettazione che influenzano i risultati ottenuti:

- Il metodo e la scala di osservazione influenzano l'interpretazione dell'organismo. Questa si sviluppa secondo un approccio architettonico che consente la compressione sistemica delle parti, come una prospettiva complementare all'analisi fisiologica.
- Il processo di astrazione del meccanismo biologico è il passo che definisce l'ambito tecnico della struttura bio-ispirata. Al cambiare la concettualizzazione varia il funzionamento morfologico.
- Per continuare con lo studio in campo architettonico è necessario mettere da parte il riferimento organico. Questo passaggio ha comportato alcune difficoltà a causa dell'idealizzazione del modello biologico.

I risultati sono condizionati alla definizione del contesto teorico della biomimetica con i concetti di sostenibilità ed evoluzione. Se da una parte la ricerca è stata focalizzata su aspetti specifici dell'organismo, dall'altra, essere consapevoli della più ampia rete d'interazioni propria della natura definisce il passaggio da un approccio meccanicistico a un approccio olistico al progetto.

La visione olistica estende i suoi rami oltre il referente naturale. Ambiente e referente naturale non sono separabili in due diversi aspetti, l'uno è connesso all'altro e viceversa. Analogamente, il lavoro di tesi segue l'esempio di sistemi in simbiosi, in cui le interazioni biologiche che impiegano la cooperazione fanno parte delle strategie evolutive. L'uso di materiali di recupero, come gli pneumatici usati, partecipa alla casistica di possibili interazioni tra l'industria automobilistica e l'edilizia. L'applicazione di un materiale non convenzionale per strutture architettoniche pone la questione della visione di un metabolismo tecnico in cui un materiale non è prodotto solo per il suo primo utilizzo. In questi termini, lo sviluppo tecnologico rappresenta un grande potenziale per offrire nuove risposte alle sfide ambientali; e i sistemi biologici sono una valida fonte di studio per l'implementazione di una tecnologia creativa che consente di aumentare la complessità della gestione del sistema produttivo.

Dai dati raccolti nella tesi si può concludere che il battistrada di pneumatici fuori uso, dei veicoli di tipo turistico, non può essere applicato direttamente per la costruzione di prototipi sulla scala umana dell'architettura. In ogni caso si può concludere che il battistrada delle biciclette recuperate:

- È valido come materiale di studio per i processi di progettazione in biomimetica,
- Il suo uso ha permesso di lavorare con un materiale di origine recuperato, riducendo l'impatto ambientale della tesi durante la ricerca,
- Grazie alle sue proprietà elastiche ed estensibili, questo materiale ha rappresentato una sfida nel controllo della forma architettonica,
- Il materiale composto di gomma e fibre sintetiche è adatto a indagare i processi di generazione della forma e consente di riprodurre le proprietà di auto-organizzazione e adattabilità.

L'applicazione del referente naturale consente di estrapolare gli aspetti generali di un processo di progettazione bio-ispirato. Le conclusioni generali sono accompagnate dai risultati specifici ottenuti dai modelli elastici in bande di pneumatici recuperati.

5.2 CONCLUSIONI SPECIFICHE

La tesi implementa l'uso di un materiale elastico per sperimentare sistemi bio-ispirati nel tessuto di legno di cactus seguendo i principi di generazione delle forme, la loro aggregazione e crescita. Iniziando dalla

metodologia bottom-up, l'osservazione del tessuto vegetale vivo ha consentito la definizione di strutture flessione attiva la cui forma è il risultato di equilibri sollecitazioni interne ed esterne applicate. L'analisi della morfologia funzionale del sistema biologico determina che:

- La definizione della frangia come elemento morfologico di base rende indipendente il meccanismo dal referente naturale, permettendo stabilire le regole geometriche per sviluppare la morfologia bio-ispirata.

Il tessuto di supporto della pianta vivente e i modelli condividono i due meccanismi morfogenetici:

- L'effetto a soffietto della maglia con unioni regolari che si apre e si chiude sia per l'azione delle forze di trazione esterne che per l'introduzione di attuatori;
- L'effetto molla che esercitano le strisce tra loro, nei modelli con le strisce pre-deformate dove il tessuto è aperto per equilibrio degli sforzi interni.

Gli esperimenti hanno dimostrato come il cambiamento della forma applicato alla fibra individualmente, mediante la flessione in una sequenza di petali alternati, permette di modificare la relazione gerarchica tra le dimensioni. Inizialmente l'altezza della sezione è predominante rispetto alla larghezza, applicando la deformazione s'inverte il rapporto tra le grandezze. Questa condizione è una proprietà morfologica per mezzo della quale si ottiene un componente piano precompressso che può assumere configurazioni curve per instabilità. Le unioni delle strisce pre-deformate da forma a un guscio dove il trasferimento dei carichi complessivi, per azione della membrana, assicura la solidità del sistema.

L'osservazione e l'ispirazione della natura permettono di comprendere le dinamiche alla base dei sistemi complessi per avanzare nella definizione di strutture di campo elastico dove:

- La deformazione controllata è una proprietà geometrica che consente di ottenere forme auto-organizzate, diventando uno strumento di progettazione;
- Nella progettazione in flessione attiva l'applicazione di una doppia piegatura consente di controllare l'estensibilità del materiale e raggiungere forme autoportanti;
- La rigidità strutturale del sistema è ottenuta dalle proprietà geometriche, non solo dalle proprietà meccaniche;
- La definizione del modello geometrico rende esplicita la topologia e stabilisce le leggi di trasformazione che generano la forma;
- La deformazione, che normalmente in architettura ha un significato negativo, nel campo del design in flessione attiva diventa un modo alternativo di generare forma (cioè spazio).

L'interazione tra le fasce genera nuovi fenomeni, come proprietà emergenti in cui il tutto è diverso dalla somma delle parti. I modelli mostrano che, anche se su piccola scala, la morfologia funziona e potrebbe essere utilizzata per oggetti di uso quotidiano. È dimostrato che l'incidenza della rigidità geometrica nelle strutture di flessione consente di ottenere forme stabili dove le sollecitazioni si equilibrano tra loro (mediante precompressione e instabilità). Contemporaneamente, la codifica della morfologia utilizza la ricerca patterns ripetitivi per esplorare i processi generativi della forma, simulando fenomeni complessi.

5.3 PROSPETTIVE FUTURE

La presente tesi è arrivata a definire l'implementazione tecnica dei meccanismi elastici del tessuto vivente per lo sviluppo di strutture in flessione attive. La tesi lascia aperta l'applicazione della morfologia in campo strutturale. L'aumento di scala dei modelli è un quesito che apre a nuove vie di ricerca.

- **Implementazioni future per lo sviluppo del modello bio-ispirato.**

Le strutture in flessione attive sono abbondanti in natura e si possono trovare molti esempi nei movimenti delle piante. Queste strutture generano superfici complesse a partire da elementi piani. Il potenziale di questi sistemi risiede in vantaggi per il trasporto e per il processo assemblaggio, nonché per le prestazioni e l'adattabilità della struttura. All'inizio del secolo scorso, le ricerche sperimentali con il calcestruzzo hanno permesso lo sviluppo del sistema di gusci leggeri bio-ispirati agli scheletri dei radiolari. Nell'attualità, i progressi nella produzione di fibre naturali e sintetiche ci permettono di proporre nuove morfologie bio-ispirate ai movimenti delle piante (tra cui il cactus). Il campo di lavoro accetta l'ipotesi sperimentale che la forma si ottiene integrando la geometria con il comportamento del materiale.

L'uso del battistrada degli pneumatici recuperati dei veicoli per la costruzione di modelli su scala maggiore non è lineare. È necessario attuare strategie che tengano conto della variazione dimensionale e di come questa possa influenzare le dinamiche in cui agiscono le forze fisiche in relazione al contesto. A parità di materiale, la ricerca può essere orientata verso strutture ibride che integrano il guscio in strisce di pneumatici recuperati con elementi strutturali la cui rigidità è significativamente maggiore e che possano permettere di ottenere una cupola sufficientemente rigida per supportare sia il proprio peso sia carichi esterni permanenti e dinamici.

L'utilizzo della banda di pneumatico ha significato una sfida nel controllo della forma architettonica, la scelta del materiale è stata motivata dalle sue proprietà elastiche che hanno permesso di verificare l'applicazione morfologica del meccanismo biologico. Si valuta che il battistrada abbia svolto la funzione necessaria nello studio proposto. Definiti i principi morfologici e la loro appartenenza alle strutture in flessione attiva, l'aumento di scala apre il campo per sperimentare le applicazioni rispetto ai materiali che possano offrire le migliori prestazioni. Questi devono prendere in considerazione che la precompressione della fibra gioca un ruolo importante nella rigidità/stabilità del sistema, quindi un materiale come il legno presenterebbe alcune limitazioni, come si è osservato in alcuni degli esperimenti realizzati. Parallelamente, si mantiene aperto il campo d'applicazione dei polimeri rinforzati con fibre con migliori prestazioni rispetto alle fasce di pneumatici o di alcuni metalli, considerando il comportamento a lungo termine.

Il valore simbolico-ambientale ottenuto utilizzando un materiale recuperato dal settore industriale automobilistico, mantiene aperto l'interesse personale nell'uso della banda del battistrada per costruire un modello a una scala maggiore.

La biomimetica è una disciplina di ricerca interdisciplinare e i risultati ottenuti aprono la riflessione su ulteriori percorsi di ricerca possibili, non solo nel campo dell'architettura. Questo è stato nello stesso tempo, uno stimolo che ha motivato e limitato lo sviluppo della ricerca. Oltre all'architettura e alla biologia, devono essere coinvolti altri campi scientifici, come la scienza dei materiali, l'ingegneria e/o la matematica. Si valuta necessario ampliare i dati sulle proprietà meccaniche del materiale, oltre a quelli compilati nel presente lavoro, per la loro integrazione con altri da determinare, come il coefficiente di Poisson o la resistenza alla flessione della fascia del battistrada. Allo stesso modo, i modelli numerici per il calcolo strutturale e la rappresentazione digitale dovrebbero essere estesi al comportamento elastico non lineare del materiale, in cui la sezione verticale della striscia partecipa alla rigidità del sistema.

- **Comprensione del modello organico per i meccanismi bio-ispirati.**

Il carattere iterativo del processo di design bio-ispirato apre inoltre la strada per ricerche future. Dall'implementazione tecnica dei principi o meccanismi biologici emergono nuove scoperte che, a loro volta, contribuiscono a una migliore comprensione del funzionamento dell'organismo come generatore di concetti biologici. I processi biomimetici consentono di migliorare la comprensione del referente organico. Si attiva una spirale dinamica che consente di continuare l'indagine e cercare miglioramenti nelle applicazioni delle tecniche sviluppate.

Analogamente, gli organismi sono sistemi complessi, si potrebbero studiare altri aspetti fisiologici delle piante cactacee che integrano ed estendono le conoscenze ottenute sulla struttura portante. Le spine di queste piante,

dipendendo dall'ecosistema in cui si trovano, svolgono funzioni diverse e importanti. Forniscono un controllo sugli effetti della radiazione solare nell'epidermide della pianta e allo stesso tempo intrappolano l'umidità e conducono il contenuto d'acqua nell'aria verso il suolo per il suo assorbimento. La morfologia e la distribuzione delle costole dei cactus colonnari sono oggetto di studio per la loro risposta nella riduzione dell'effetto del vento sulla pianta. L'indagine di queste e di altre caratteristiche della pianta, dal punto di vista dell'architettura, permetterebbe di codificarne il comportamento e verificare l'applicazione dei meccanismi bio-ispirati all'ambiente costruito.

In un campo così eterogeneo e poliedrico, la speranza di questa tesi è che sia di utilità ad altri ricercatori per lo sviluppo di sistemi bio-ispirati al fine di generare alternative sostenibili capaci di rispettare l'ambiente.

Bibliografía

Libros

- Petra Gruber, Julian Vincent, Angelo Vermeulen y Thomas Speck, 2016, *Aspects of Life*, capítulo 1, libro: *Built to Grow: Blending Architecture and Biology*, editores: B. Imhof y P. Gruber, Ed. Angewandte, Birkhäuser Verlag, ISBN: 978-3-0356-0920-2
- Philippe Block, Jan Knippers, Niloy J. Mitra, Wenping Wang (Eds.), 2015, *Advances in Architectural Geometry 2014*, Ed. Springer, Reino Unido, ISBN 978-3-319-11418-7
- Rodrigo Velasco Gómez, Diego Chavarro Ayala y Paul Brakke Aaron, 2015, *Diseño digital: uso de las herramientas digitales en la arquitectura*, Ed. Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, ISBN: 978-958-8957-32-6
- E. N. Armendáriz Míreles, P. C. Carbo Vela, C. A. Hernández Bocanegra, et al., 2014, *Ingeniería bioinspirada*, Universidad Politécnica de Victoria, Ed. Omnia Publisher SL, ISBN: 978-84-942118-4-3
- Simon Schleicher y Jan Knippers, 2014, *Bio-inspired, flexible structures and materials*, capítulo 11, libro: *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering Edition*, editores: E. Pacheco Torgal et al., Ed. Springer, ISBN: 978-3-319-09287-4, DOI: 10.1007/978-3-319-09287-4_12
- Roberto Bermejo Gómez de Segura, 2014, *Del desarrollo sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como biomimesis*, Ed. Hegoa UPV/EHU, Bilbao, ISBN: 978-84-89916-92-0
- Jan Knippers, Klaus G. Nickel y Thomas Speck (Eds.), 2013, *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction. Biological Design and Integrative Structures*, Biologically-Inspired Systems vol. 9, Ed. Springer, Suiza, ISBN 978-3-319-46374-2
- Miguel Sánchez Lozano y Marta Guzmán García, 2013, *Análisis de la Eficiencia Medioambiental de Reacondicionado de Neumáticos*, Ed. UMH, Universidad Miguel Hernández, ISBN: 978-84-96297-92-0
- Santiago Huerta, 2013, *El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí*, pp. 133-162, aportación en el libro *Miscel·lània*, Salvador Tarragó (autor), Ed. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, ISBN: 978-84-7653-984-2, <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36585>
- Janine M. Benyus, 2012, *Biomimesis. Innovaciones inspiradas por la naturaleza*, García Leal A. (trad.), Ed. Tusquets S.A. Barcelona, ISBN: 978-84-8383-399-5
- Xavier Colom, Xavier Cañavate, Pilar Casas y Fernando Carrillo, 2011, *New Routes to Recycle Scrap Tyres*, pp. 293-316, capítulo 15, en *Nanocomposites with Unique Properties and Applications in Medicine and Industry*, editor: John Cuppoletti, Ed. INTECH Open Access, ISBN: 978-953-307-351-4, DOI: 10.5772/1549
- Petra Gruber, 2011, *Biomimetics in Architecture: Architecture of Life and Buildings*, Ed. Springer-Verlag/Wien, impreso en Alemania, ISBN: 978-3-7091-0331-9
- Manuel Gausa Navarro, 2010, *Open: espacio tiempo información. Arquitectura, vivienda y ciudad contemporánea. Teoría e historia de un cambio*, Ed. ACTAR, Barcelona/New York, ISBN: 8496954862
- Michael Weinstock, 2010, *The architecture of emergence: the evolution of form in nature and civilisation*, Ed. Wiley, ISBN-13: 978-0470066331
- Janne Gang, 2010, *The Cook, the Prospector, the Nomad and their Architect*, pp. 163-174, en *Re-inventing Construction*, editores: Ilka & Andreas Ruby, Ed. Ruby Press, Berlín, ISBN: 978-3-9813436-2-5
- Ricard Solé, 2009, *Redes Complejas. Del genoma a Internet*, Ed. Tusquets S.A. Barcelona, ISBN: 978-84-8383-117-5
- Thomas N. Taylor, Edith L. Taylor y Michael Krings, 2008, *Introduction to Vascular Plant Morphology and Anatomy*, pp. 201-222, capítulo 7, *Paleobotany. The Biology and Evolution of Fossil Plants*, Ed. Academic Press, 2ª ed., ISBN: 9780080557830

- Martin Bechthold, 2008, *Innovative Surface Structures. Technologies and Applications*, Ed. Taylor & Francis, Oxford, ISBN 10: 0415419662
- Alejandro Bahamón y María Camila Sanjinés, 2008, *Rematerial. Del desecho a la arquitectura*, Ed. Parramón S.A., Barcelona, ISBN: 978-84-342-3365-2
- Maria Teresa Della Beffa, 2008, *Piante grasse: Conoscere, riconoscere e coltivare tutte le cactacee e le succulente più diffuse (Guide compact)*, Ed. De Agostini, Milano, ISBN: 978-88-418-4757-2
- Juan María Songel, 2008, *Frei Otto. Conversación con Juan María Songel*, Ed. Gustavo Gili, Barcelona, ISBN-13: 9788425222054
- Fritjof Capra, 2006, *La trama de la vida. Una nueva perspectiva de los sistemas vivos*, 6ª Ed. Anagrama, Barcelona ISBN: 978-84-339-0554
- Janice Glimn-Lacy y Peter B. Kaufman, 2006, *Botany Illustrated. Introduction to Plants, Major Group, Flowering Plant Families*, Ed. Springer, New York, 2ª edición, ISBN-10: 0-387-28870-8
- Michael Braungart y William McBonoug, 2005, *Cradle To Cradle = De La Cuna A La Cuna: Rediseñando la forma en que hacemos las cosas*, 1ª Ed. McGraw-Hill / Interamericana de España S.A.U., Madrid, ISBN: 9788448142957
- Kevin Lynch, 2005, *Echar a Perder. Un análisis del deterioro*, editor: Southworth Michael, 1ª Ed. Gustavo Gili SA, Barcelona, ISBN: 84-252-2044-0
- Jorge Wagensberg, 2005, *La rebelión de las formas. O como preservar cuando la incertidumbre aprieta*, 2ª Ed. Tusquets S.A. Barcelona, ISBN: 84-8310-975-1
- A Michael F.shby, 2005, *Materials Selection in Mechanical Design*, 3ª edición, Ed. Elsevier, Oxford, UK, ISBN 0 7506 6168 2
- Carles Saura, 2003, *Arquitectura y Medio Ambiente*, núm. monográfico *Revista Architectonics. Mind, Land & Society*, Edicions UPC, Barcelona ISBN: 84-8301-718-0
- Kostas Terzidis, 2003, *Expressive Form. A conceptual approach to computational design*, Ed. Spon Press Taylor & Francis Group, London y New York, ISBN 0-203-58689-1
- Scott Camazine, Jean-Louis Deneubourg, Nigel R.Franks, James Sneyd, Guy Theraulaz y Eric Bonabeau, 2003, *Self-Organization in Biological Systems*, Ed. Princeton University, Prinseton y Oxford, 2a edición, ISBN-10: 0-691-11624-5
- Steven Vogel, 2000, *Anca y palanca: Mecánica natural y mecánica humana*, Ed. Tusquets, Barcelona, ISBN: 9788483106822
- Autores Varios, 2000, *Cactus y Otras Plantas Crasas: Identificación y Cultivo*, Ed. Susaeta S.A., Madrid, ISBN: 9788430595723
- Eugene Tsui, 1999, *Evolutionary architecture: nature as a basis for design*, Ed. John Wiley, New York, ISBN-13: 9780471117261.
- Ken Yeang, 1999, *Proyectar con la naturaleza. Bases ecológicas para el proyecto arquitectónico*, C. Sáenz de Valicourt (trad.), Ed. Gustavo Gili S.A., Barcelona, ISBN: 84-252-1763-6
- Michael Weinstock, 1998, *TS: artefacts and instruments: material forms and formulation of thoughts*, Ed. London Architectural Association, ISBN: 1870890876
- Richard Rogers y Philip Gumuchdjian, 1997, *Città per un Piccolo pianeta*, D'Ayala Valva L. (trad.), Ed. KAPPA, Roma, ISBN: 8865142332
- John Brockman, 1996, *La Tercera Cultura*, Ed. Tusquets S.A., Barcelona, ISBN: 84-7223-954-3
- William D. Callister, 1996, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Ed. Reverté S.A., ISBN 10: 842917253X
- Jorge Wagensberg, 1994, *Ideas sobre la complejidad del mundo*, 3ª ed., Ed. Tusquets S.A., Barcelona, ISBN:

84-7223-453-3

- Fructuoso Mañà i Reixach (responsable proyecto), 1993-1994, *Caracterització, propostes d'utilitzacions i recomanacions d'ús per als pneumàtics vells com a material de construcció*, tomo I: *El pneumàtic usat. Caracterització y el mercat català*, tomo II: *Utilització de pneumàtics com a element estabilizador de talussos, terraplenats, desmunts i reblerts*, equipo de trabajo: Castellví i Coromina M., Clot i Ruiz C. at all, Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (ITeC)
- George B. Thomas y Ross L. Finney, 1986, *Análisi matemática*, Ed. Zanichelli, Bologna, ISBN: 8808051501
- Frei Otto, 1985, *Architecture et Bionique Constructions Naturelles*, D. Grélot y P. Soubeyrand (trad.), Ed. Delta & Spes S.A., ISBN-13: 978-2881610240
- Philip Steadman, 1982, *Arquitectura y Naturaleza: Las Analogías Biológicas en el Diseño*, F. Corral (trad.), Ed. Blumes, Madrid, ISBN: 84-7214-252-3
- Helia Bravo-Hollis, 1978, *Las Cactáceas de México*, vol. 1, Ed. Universidad Nacional Autónoma de México, 2ª edición, ISBN-10: 9683617581
- Roland C., 1973, *Frei Otto: Estructuras. Estudios y trabajos sobre la construcción ligera*, F. Albardané (trad.), Ed. Gustavo Gili, Barcelona, ISBN-10: 84-252-0772-X
- Salvadori Mario y Heller Robert, 1972, *Le strutture in architettura*, 3ª ed., ampliada Nervi Pier Luigi (prol.), Ed. Etaslibri, Milano, ISBN 88-453-0502-3
- Hossdorf Heinz y Hernández C. B., 1972, *Modelos Reducidos. Método de Cálculo*, Ed. Instituto Eduardo Torroja, Madrid, ISBN: 9788472920644
- Clark Samuel K., 1971, *Mechanics of Pneumatic Tires*, Ed. U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, National Bureau of Standards Monograph 122
- Thompson D'Arcy W., 1969, *Crescita e Forma. La geometria della natura*, Ed. Universale Scientifica Boringhieri, Torino, ISBN 10: 8833927954
- Feininger Andreas, 1962, *Anatomía de la Naturaleza. De como la función crea la forma en las estructuras animadas e inanimadas del entero universo*, Ed. Jano, Barcelona, ISBN: mkt0004586129

Revistas y Artículos

- Riccardo La Magna y Jan Knippers, 2018, *Tailoring the Bending Behaviour of Material Patterns for the Induction of Double Curvature*, en *Humanizing Digital Reality. Design Modelling Symposium Paris 2017*, editores: K. De Rycke et all, Ed. Springer Nature Singapur Pte Ltd, DOI: 10.1007/978-981-10-6611-5_38
- National Geographic España, junio 2018, *Un Mar de Plástico*, Revista Oficial de National Geographic Society, vol. 42, núm. 6
- Olga Speck, David Speck, Rafael Horn, Johannes Gantner y Klaus Peter Sedlbauer, 2017, *Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments*, en *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol 12 núm. 1, Ed. IOP Publishing Ltd, DOI: 10.1088/1748-3190/12/1/011004
- Ramón Sastre y Ana Cocho-Bermejo (Eds), 2017, *Algorithmic Thinking, archiDOCT: The e-journal for the dissemination of doctoral research in architecture*, vol. 8, Ed. ENHSA Network, ISSN 2309-0103
- Jan Brütting, Axel Körner, Daniel Sonntag y Jan Knippers, 2017, *Bending-Active Segmented Shells*, Conference: *IASS Annual Symposium 2017, Interfaces: Architecture Engineering Science*, 25/28 Septiembre 2017, Hamburgo, German, Ed. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)
- Daniela Frogheri, Alberto T. Estévez y Fernando Meneses-Carlos, 2017, *Morfologías resilientes: Desde lo digital a la materia*, en *Actas Congreso SIGraDi 2017, XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital*, 22 - 24 Noviembre, 2017, Concepción, Chile, DOI: 10.5151/sigradi2017-049
- Ever Patiño Mazo, Andrés Valencia-Escobar, David Andrés Torreblanca Díaz y Alejandro Zuleta Gil, 2017,

- Proceso Generativo de Texturas Paramétricas Bioinspiradas: Modelo Metodológico de Experimentación*, en Actas Congreso SIGraDi 2017, XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital, 22 - 24 Noviembre, 2017, Concepción, Chile, DOI: 10.5151/sigradi2017-080
- Gonçalo Castro Henriques, Guto Nóbrega y Andrés Passaro, 2017, *Tentáculos: Recriando criaturas híbridas, analógico- digitais*, en Actas Congreso SIGraDi 2017, XXI Congreso de la Sociedad Ibero-americana de Gráfica Digital, 22 - 24 Noviembre, 2017, Concepción, Chile, DOI: 10.5151/sigradi2017-082
 - Stijn Brancart, Lars De Laet y Niels De Temmerman, 2016, *Transformable bending-active structures: Manipulating elastic deformation in kinetic and rapidly assembled structures*, pp. 275-282, en *Structures and Architecture*, Ed. Cruz, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02651-3
 - Justin McGuirk, 2015, *Entrevista a Frei Otto*, publicada en ICON 023, Mayo 2015, (ultima visita 08/2018) online: <https://www.iconeye.com/design/item/2627-frei-otto-%7C-icon-023-%7C-may-2005>
 - Simon Schleicher, Andrew Rastetter, Riccardo La Magna, Andreas Schönbrunner, Nicola Haberbosch y Jan Knippers, 2015, *Form-Finding and Design Potentials of Bending-Active Plate Structures*, pp.53-63, en *Iterating Towards Affordability*, editores: M. Remsgard Thomsen at all, Ed. Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-319-24208-8_5
 - George M. Whitesides, 2015, *Bioinspiration: something for everyone*, en *Interface Focus - Bioinspiration: something for everyone*, Vol 5 num. 4, Ed. The Royal Society, DOI: 10.1098/rsfs.2015.0031
 - Stijn Brancart, Lars De Laet y Niels De Temmerman, 2014, *Transformable Active Bending: Elastic deformation as component transformation in transformable structures*, pp. 275-282, Conference: *IASS-SLTE 2014 Symposium, Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints*, 15/19 Septiembre 2014, Brasilia, Brasil, Ed. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)
 - Christoph Gengnagel, Holger Alpermann y Elisa Lafuent, 2014, *Active Bending in Hybrid Structures*, Conference: *FORM - RULE | RULE – FORM 2013*, editores: G. H. Filz, R. Maleczek, C. Scheiber, Ed. Innsbruck University, ISBN: 978-3-902936-23-3
 - Florian Antony, Rainer Griebshammer, Thomas Speck y Olga Speck, 2014, *Sustainability assessment of a lightweight biomimetic ceiling structure*, en *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 9, núm. 1, Ed. IOP Science, UK, ISSN: 1748-3190, DOI:10.1088/1748-3182/9/1/016013
 - Simon Schleicher, Julian Lienhard, Simon Poppinga, Thomas Speck y Jan Knippers, 2014, *A methodology for transferring principles of plant movements to elastic systems in architecture*, pp. 105-117, en *Computer-Aided Design*, vol. 60, Ed. Elsevier Ltd., ISSN: 0010-4485, DOI: 10.1016/j.cad.2014.01.005.
 - Julian Lienhard, Holger Alpermann, Christoph Gengnagel y Jan Knippers, 2013, *Active Bending, A Review on Structures where Bending is used as a Self-Formation Process*, pp. 187-196, en *International Journal of Space Structures*, vol. 28 núm. 3-4, Ed. Multi-Science Publishing Co. Ltd., DOI: 10.1260/0266-3511.28.3-4.187
 - Julian Lienhard y Jan Knippers, 2013, *Considerations on the Scaling of Bending-Active Structures*, pp. 137-148, en *International Journal of Space Structures*, vol. 28, núm. 3&4, Ed. Multi-Science Publishing CO. LTD., DOI: 10.1260/0266-3511.28.3-4.137
 - Adelheid Fischer, 2013, *The Science of Seeing. Jewels of the Desert*, pp. 27-39, en *Zygote Quarterly*: zq07, núm. 07, zqjournal.org, ISSN 1927-8314
 - Addis B., 2013, *'Toys that save millions' - a history of using physical models in structural design*, pp. 12-27, en *TheStructuralEngineer*, vol. 91 núm. 4, Ed. ELSEVIER, ISSN: 0141-0296
 - Blanca Rosa Cruz Cal, Belkis F. Guerra Valdés, Emilio A. Álvarez García y Ricardo Alfonso Blanco, 2012, *Evaluación de elastómeros vulcanizados*, pp. 131-136, en *AFINIDAD Revista de Química Teórica y Aplicada*, núm. 558, Ed. Asociación de Químicos e Ingenieros Instituto Químico de Sarrià, ISSN 0001 – 9704
 - Gruber Petra y Jeronimidis George, 2012, *Has biomimetics arrived in architecture?*, editorial en *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 7, Ed. IOP Publishing Ltd, Inglaterra, doi:10.1088/1748-3182/7/1/010201
 - Eran Pichersky y Tom Gerats, 2011, *The plant genome: an evolutionary perspective on structure and function*,

- pp. 1-3, editorial en *The Plant Journal*, SEB Society for Experimental Biology, vol. 66, Ed. Blackwell Ltd., DOI: 10.1111/j.1365-313X.2011.04564.x
- A. Safari, Faizan Ahmad y A. S. Yahya, 2011, *A comparison study on the tensile strength of fibreglass and scrap tire*, pp. 483-489, en *World Applied Sciences Journal*, vol. 15 núm. 4, Ed. IDOIS Publications, ISSN: 1818-4952
 - G. Ramos, F. J. Alguacil y F. A. López, 2011, *The recycling of end-of-life tyres. Technological review*, pp. 273-284, en *Revista de Metalurgia*, vol. 47 núm. 3, Ed. Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), ISSN: 0034-8570, DOI: 10.3989/revmetalm.1052
 - Wadel Gerardo, Avellaneda Jaume y Cuchí Albert, 2010, *La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales*, pp. 37-51, en *Informes de la Construcción*, vol. 62, núm. 517, eISSN: 1988-3234, doi: 10.3989/ic.09.067
 - Odair José Garcia de Almeida, Adelita Aparecida Sartori-Paoli y Luiz Antonio de Souza, 2010, *Flower morphology in Epiphyllum phyllanthus (Cactaceae)*, pp. 65-80, en *Revista Mexicana de Biodiversidad*, vol. 81, núm. 1, Eds. Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Biología (IBUNAM), ISSN-e 2007-8706,
 - Mohd Bijarimi, H. Zulkafli y M. D.H. Beg, 2010, *Mechanical Properties of Industrial Tyre Rubber Compounds*, pp. 1345-1348, en *Journal of Applied Sciences*, vol. 10 núm. 13, Ed. Asian Network for Scientific Information, ISSN 1812-5654, DOI: 10.3923/jas.2010.1345.1348
 - Stefano Mancuso, 2010, *Federico Delpino and the foundation of plant biology*, pp. 1067-1071, en *Plant Signaling & Behavior*, vol. 5, núm. 9, Ed. Landes Bioscience, DOI: 10.4161/psb.5.9.12102, disponible online en: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.4161/psb.5.9.12102>
 - Petra Gruber, 2009, *Biomimetics in architecture - inspiration from plants*, pp. 412-419, actas congreso: 6ª *Plant Biomechanics Conference*, 16-21 Noviembre 2009, Cayena (Guayana Francesa), Ed. UMR EcoFoG, ISSN 2105-1089, disponible online en: <http://www.ecofog.gf/Docs/PBM2009Proceedings.pdf>
 - Manuel De Landa, 2009, *Emergencia causalidad y realismo*, pp. 4-14, en *Artnodes*, revista núm. 9, Ed. Universitat Oberta de Catalunya, ISSN 1695-5951
 - Josep Ignasi Llorens Durán, 2008, *Zoomorfismo y bio-arquitectura. Entre la analogía formal y la aplicación de los principios de la naturaleza*, Conference report: *II Jornadas de investigación en construcción: Actas de las Jornadas*. Madrid: Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, España. <http://hdl.handle.net/2117/2156>
 - Thomas Speck y Olga Speck, 2008, *Process sequences in biomimetic research*, pp. 3-11, en *Design and Nature IV Comparing Design in Nature with Science and Engineering*, Ed. WIT Transactions on Ecology and the Environment, ISBN: 978-1-84564-120-7, DOI: 10.2495/DN080011
 - Z. Guo y L. J. Sluys, 2008, *Constitutive modelling of hyperelastic rubber-like materials*, pp. 109-132, en *Heron*, vol. 53 núm. 3, Ed. TNO Built Environment and Geosciences, Delft, ISSN 0046-7316, http://heronjournal.nl/53-3/2008_3.html
 - Bujang B. K. Huat, Azlan A. Aziz y Loh Wooi Chuan, 2008, *Application of Scrap Tires as Earth Reinforcement for Repair of Tropical Residual Soil Slope*, en *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 13 B, Ed. EJGE iGEM, ISSN: 1089-3032
 - Álvarez-Ríos Y., 2007, *La Geometría de las Formas de la Naturaleza*, pp. 103-136, en *Revista Tecnológica*, núm. 18, Ed. Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, ISSN 0123-7799
 - Eitan Grinspun y Adrian Secord, 2006, *Introduction to Discrete Differential Geometry: The Geometry of Plane Curves*, capítulo 1, en *Discrete Differential Geometry: An Applied Introduction, SIGGRAPH 2006 - COURSE NOTES, The 33rd International Conference and Exhibition on Computer and Interactive Techniques*, DOI: 10.1145/1508044.1508053
 - Nedal T. Ratrouy y Isam A. Mahmoud, 2006, *Adequacy of the tensile/elongation test as a quality control criterion for vehicle tires*, pp. 1-7, en *Polymer Degradation and Stability*, editor: J. L. Gardette, Ed. Elsevier, ISSN: 0141-3910

- Vogel S., 2006, *Living in a physical world VI. Gravity and life in the air*, pp. 13-25, en *Journal of Biosciences*, vol. 31 núm. 1, Ed. Indian Academy of Sciences, eISSN: 0973-7138, <https://www.ias.ac.in/describe/article/jbsc/031/01/0013-0025>
- Stefano Mancuso, 2006, *Alcuni Aspetti di Neurobiologia Vegetale*, pp. 239-251, en *SILVAE Rivista Tecnico-Scientifica*, Ed. Corpo Forestale dello Stato, año II, núm. 4, Italia, ISBN: 88-901825-3-9
- James D. Mauseth, 2006, *Structure-Function Relationships in Highly Modified Shoots of Cactaceae*, pp. 901-926, en *Annals of Botany*, vol. 98, núm. 5, Ed. Oxford Academic, ISSN 0305-7364 DOI:10.1093/aob/mcl133 disponible online en: www.aob.oxfordjournals.org
- Godfaurd John, D. J. Clements-Croome y George Jeronimidis, 2005, *Sustainable building solutions: a review of lessons from the natural world*, pp. 319-328, en *Building and Environment*, vol. 40 núm. 3, Ed. Elsevier, ISSN: 0360-1323
- Sylvia Felipe y Jordi Truco, 2004, *HYBGRID: Adaptabilitat/Adaptability*, pp. 84-89, en *Quaderns d'arquitectura i urbanisme 242: Q 2.0*, director: Lluís Ortega, Col·legi d'Arquitectes de Catalunya, Barcelona, ISSN 1133-8849
- Joshua J. Stevenson y James D. Mauseth, 2004, *Effects of Environment on Vessel Characters in Cactus Wood*, pp. 347-357, en *International Journal of Plant Sciences*, vol. 165, núm. 3, Ed. The University of Chicago Press, DOI: 10.1086/382807
- Jorge Riechmann, 2003, *Biomímesis: Un concepto clave para pensar la sustentabilidad*, publicado en la revista *El Ecologista*, núm. 36, pp. 28-31, ISSN: 0211-6472
- A. Altesor y E. Ezcurrawz, 2003, *Functional morphology and evolution of stem succulence in cacti*, pp. 557-567, en *Journal of Arid Environments*, vol. 53, núm. 4, Ed. Elsevier Ltd., ISSN: 0140-1963, DOI: 10.1006/jare.2002.1059
- Manuel De Landa, 2002, *Deleuze and the use of the genetic algorithm in architecture*, pp. 9-12, en *Architectural Design*, vol. 72 núm. 1, Ed. John Wiley & Sons Ltd, ISSN:1554-2769

Tesis doctorales

- Riccardo La Magna, 2017, *Bending-Active Plates. Strategies for the Induction of Curvature through the Means of Elastic Bending of Plate-based Structures*, director: Jan Knippers, Universidad de Stuttgart, Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), ISBN 978-3-922302-43-8
- Simon Schleicher, 2016, *Bio-inspired Compliant Mechanisms for Architectural Design*, director: Jan Knippers, Universidad de Stuttgart, Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), ISBN 978-3-922302-407
- Emilia María Benito Roldán, 2016, *La geometría como lenguaje de las formas*, directores: José Luis García Grinda y M. Dolores Sánchez Moya, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Departamento de composición Arquitectónica.
- Ignacio López Forniés, 2014, *Modelo metodológico de diseño conceptual con enfoque biomimético*, director: Luis Berges Muro, Universidad de Zaragoza, Ingeniería de Diseño y Fabricación, ISSN 2254-7606, <https://zaguan.unizar.es/record/13523/?ln=es>
- Juan Gómez Acosta, 2013, *La estática gráfica. Instrumento para el conocimiento estructural intuitivo y el diseño de los arquitectos*, Universitat Politècnica de València, Departament de Construccions Arquitectòniques, ISBN: 978-84-9048-039-7, DOI:10.4995/Thesis/10251/27552
- Julian Lienhard, 2013, *Bending-Active Structures*, director: Jan Knippers, Universidad de Stuttgart, Institute of Building Structures and Structural Design (ITKE), ISBN 978-3-922302-36-0
- Marta Alonso Malmierca, 2013, *Elastómeros Iónicos con Memoria de Forma. Estructura, Dinámica Y Propiedades*, directores: Luis Ibarra Rueda y Juan López Valentín, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de Materiales, <https://eprints.ucm.es/24038/>
- Diana Maritza Peña Villamil, 2012, *Aplicación de los Principios del Tensegrity a las Construcciones Textiles*

Atirantadas, directores: Josep Ignasi de Llorens y Ramon Sastre, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, Departamento de Construcciones Arquitectónicas I, <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/94685?locale-attribute=es>

- Miquel Lacasta Codorniu, 2010, *Geometría y Complejidad. La irrupción de un paradigma entre 1960 y 1973*, director: Alberto T. Estévez, Universitat Internacional de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura, programa de doctorado Arquitecturas Genéticas, <https://www.tdx.cat/handle/10803/77786>
- Mauro Costa Couceiro, 2008, *Analogías Biológicas en la Arquitectura. Del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital*, director: Alberto T. Estévez, Universitat Internacional de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura, programa de doctorado Arquitecturas Genéticas, <https://www.tesisenred.net/handle/10803/9329>
- Neal Panchuk, 2006, *An Exploration into Biomimicry and its Application in Digital & Parametric [Architectural] Design*, University of Waterloo, School of Architecture, <https://uwspace.uwaterloo.ca/handle/10012/2876>

Normativa

- ISO 18458:2015 (en) Biomimetics - Terminology, concepts and methodology, Online Browsing Platform (OBP): <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:18458:ed-1:v1:en>
- Real Decreto 1619/2005, de 30 de diciembre, sobre la gestión de neumáticos fuera de uso

WEB

- Nature-Based Solutions, Comisión Europea, WebSite (visitas: 2017÷2018): <https://ec.europa.eu/research/environment/index.cfm?pg=nbs#>
- BLOKON La red de competencia biónica - WebSite (vistas 2015-2018) <http://www.biokon.de/>
- The Biomimicry Institute – Inspiring Sustainable Innovation - WebSite (visitas: 2010÷2018) <https://biomimicry.org/>
- AskNature - WebSite (visitas: 2010÷2018) <https://asknature.org/>
- Angiosperm Phylogeny Grup, 2017, versión 14, WebSite (ultima visita: 08/2018): <http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>
- Mauseth Research: Cacti, James D. Mauseth, 1988÷2004, WebSite (visitas: 2016÷2018): <http://www.sbs.utexas.edu/mauseth/ResearchOnCacti/index.htm>
- Orto Botanico di Catania, Sicilia Italia, WebSite (visitas 2011÷2018): <http://www.dipbot.unict.it/orto-botanico/>
- BioDic - Diccionario de Biología - WebSite (vistas 2015-2018) <https://www.biodic.net/>
- SIGNUS Ecovalor - WebSite (visitas: 2010÷2018) <https://www.signus.es/>
- Rubber Manufacture Association, Scrap Tire Management Council - WebSite (visitas: 2015÷2018) <http://www.energyjustice.net/files/tires/files/scrapchn.html>

Referencias de las imágenes

No se incluye la documentación gráfica producida por la autora del trabajo de tesis

Introducción

Fig. 4, 5, 6 - Autor: Equalogical Lab - Fecha 2015/2016 - WebSite: www.equalogicallab.com

Fig. 7 - Allison B. Halpern, David P. Billington y Sigrid Adriaenssens, 2013, *The Ribbed Floor Slab Systems of Pier Luigi Nervi*, en Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2013 "BEYOND THE LIMITS OF MAN", editores J.B. Obrębski y R. Tarczewski, 23-27 September, Wrocław University of Technology, Poland.

Fig. 9 - *Popular Mechanics* vol. 109 núm. 1, Enero 1958, ISSN 0032-4558 - Visita 04/2019 - Link: <http://blog.modernmechanix.com/plywood-dome-will-serve-as-church-in-korea/>

Fig. 10 - Julian Lienhard, Holger Alpermann, Christoph Gengnagel y Jan Knippers, 2013, *Active Bending, A Review on Structures where Bending is used as a Self-Formation Process*, pp. 187-196, en *International Journal of Space Structures*, vol. 28 núm. 3-4, Ed. Multi-Science Publishing Co. Ltd., DOI: 10.1260/0266-3511.28.3-4.187

Fig. 11 - Autor: ICD University of Stuttgart - Fecha 2010 - Fotografía: Roland Halbe: Fuente: Menges Scheffler Architects web site - Visita: 04/2019 - Link: <http://www.achimmenges.net/?p=4443>

Fig. 13 - Enrique Soriano, 2017, *Low-Tech Geodesic Gridshell: Almond Pavilion*, en *Algorithmic Thinking, archiDOCT: The e-journal for the dissemination of doctoral research in architecture*, vol. 8, editores Ramón Sastre y Ana Cocho-Bermejo, Ed. ENHSA Network, ISSN 2309-0103

Fig. 14 - Roberto Narvárez-Rodríguez, Andrés Martín-Pastor y María Aguilar-Alejandro, 2015, *The Caterpillar Gallery: Quadratic surface theorems, parametric design and digital fabrication*, en *Advances in Architectural Geometry 2014*, editores P. Block, J. Knippers, N. J. Mitra, W. Wang, Ed. Springer, Reino Unido, ISBN 978-3-319-11418-7

Fig. 15 - Pontificia Universidad Católica del Perú - Fecha 2015 - Fuente: Archdaily México - Visita 04/2019 - Link: <https://www.archdaily.mx/mx/783308/la-matriz-modulo-desplegable-de-emergencia-creado-por-estudiantes-peruanos>

Fig. 16 - Autor: Charles Darwin - Fecha 1837 - Fuente: Darwin Online- Visita: 08/2018 - Link: <http://darwin-online.org.uk/content/frameset?viewtype=side&itemID=CUL-DAR121.&pageseq=38>

Fig. 17 - Autor: iTOL: Interactive Tree Of Life - Publicado por Mariana Ruiz Villarreal - Fecha 29/02/2008 - Fuente: Wikimedia - Nombre archivo: Tree of life SVG.svg - Visita: 08/2018 - Link: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Tree_of_life_SVG.svg

Fig. 19 - Autor: National Geographic - Fecha 06/2018 - Fuente: National Geographic España - Visita: 08/2018 - Link: <https://www.nationalgeographic.com/magazine/2018/06/>

Fig. 21 - Yoshida S. at all, 2016, *A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate)*, pp. 1196-1199, en *Science* vol. 351 núm. 6278, Ed. AAAS, ISSN 1095-9203

Fig. 23 - Autor: Refu - Fecha 2005 - Fuente: Bahamón, A. y Sanjinés M. C., 2008, *Rematerial. Del desecho a la Arquitectura*, 1ª Ed. Parramón S.A., Barcelona, ISBN: 9788434233652

Fig. 24 - Autor: ONG CEVE (Centro Experimental de la Vivienda Económica) - Fecha 2015 - Fuente: WEB ONG CEVE - Visita: 08/2018 - Link: <http://www.ceve.org.ar/materiales-3.php>

Fig. 25 - Speck O., Speck D., Horn R., Gantner J. y Sedlbauer K. P., 2017, *Biomimetic bio-inspired biomorph sustainable? An attempt to classify and clarify biology-derived technical developments*, en *Bioinspiration & Biomimetics*, Vol 12 num. 1, Ed. IOP Publishing Ltd, DOI: 10.1088/1748-3190/12/1/011004

Capítulo 2

Fig. 19 - Autor: AA [EmTech] - Emergent Technologies and Design, Architectural Association School - Fecha 2015 - Visita: 06/2017 - Fuente: Facebook EmTech - Link: <https://www.facebook.com/EmtechStudio/>

Fig. 20 - Autor: Studio GANG - Nature Boardwalk at Lincoln Park Zoo - Fecha 2010 - Fuente: Oficial WebSite - Visita: 08/2018 - Link: <http://studiogang.com/project/nature-boardwalk-at-lincoln-park-zoo>

Fig. 24 - Autor: Bern Seeland Fotowerkstatt KIT-Fakultät für Architektur - Fuente: Georg Vrachliotis at all (Eds), 2017, Frei Otto: Thinking by Modeling, Ed. Spector Books, Alemania, ISBN: 9783959050890, pp. 72

Fig. 28a - Martin Bechthold, 2008, *Innovative Surface Structures. Technologies and Applications*, Ed. Taylor & Francis, ISBN 10: 0415419662, pp. 166

Fig. 30, 32 - Autores: Sylvia Felipe and Jordi Truco - AA [EmTech], en *AD 169: Emergence: Morphogenetic Design Strategies*, editores: Michael Hensel, Achim Menges y Michael Weinstock, Ed. John Wiley & Sons Ltd, 2004, ISBN: 978-0-470-86688-7

Fig. 42 - Autor: André Schmidt - Fecha 01/2018 - Fuente: Bike Revista de la bici de montaña - Visita: 03/2019 - Link: <https://www.mountainbike.es/consejos-de-compra/articulo/asi-son-capas-neumatico-cubierta-bici>

Fig. 44 - Autor: Michelin - Fecha 2018 - Fuente: *Todo sobre el neumático: las apariencias engañan* - Visita: 08/2018 - Link: <https://www.michelin.es/neumaticos/consejos/todo-sobre-el-neumatico/como-es-un-neumatico>

Fig. 47 - Safari A., Ahmad F. y Yahya A.S., 2011, *A comparison study on the tensile strength of fibreglass and scrap tire*, pp. 483-489, en *World Applied Sciences Journal*, vol. 15 núm. 4, Ed. IDOIS Publications, ISSN: 1818-4952, [https://www.idosi.org/wasj/wasj15\(4\)11/4.pdf](https://www.idosi.org/wasj/wasj15(4)11/4.pdf)

Gráfico 2.1 - Callister W. D., 1996, *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, Ed. Reverté S.A., ISBN 10: 842917253X

Gráfico 2.2 - Alonso Malmierca M., 2013, *Elastómeros Iónicos con Memoria de Forma. Estructura, Dinámica Y Propiedades*, Tesis Doctoral, directores: Luis Ibarra Rueda y Juan López Valentín, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Físicas, Departamento de Física de Materiales

Gráfico 3.3 - Safari A., Ahmad F. y Yahya A.S., 2011, *A comparison study on the tensile strength of fibreglass and scrap tire*, pp. 483-489, en *World Applied Sciences Journal*, vol. 15 núm. 4, Ed. IDOIS Publications, ISSN: 1818-4952, [https://www.idosi.org/wasj/wasj15\(4\)11/4.pdf](https://www.idosi.org/wasj/wasj15(4)11/4.pdf)

Capítulo 3

Fig. 19, 22b - Autor: Ludovica Rossi - Fotografía: Ronald Stallard Photography & Filmmaking - Fecha 2014 - WebSite: www.ronaldstallard.com

Gráfico 3.1 - Gengnagel C., Alpermann H. y Lafuente E., 2014, *Active Bending in Hybrid Structures*, Conference: *FORM - RULE | RULE – FORM 2013*, editores: G. H. Filz, R. Maleczek, C. Scheiber, Ed. Innsbruck University, ISBN: 978-3-902936-23-3

