

# PONENCIA (COMUNICACIÓN)

## SUPERFICIES ORGANICAS EN LA CONSTRUCCION NATURAL

ARESTA, Marco & Ecohacer

[Ecohacer@gmail.com](mailto:Ecohacer@gmail.com)

Laboratorio de Matemática y Diseño (LMyD), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo  
Tecnología en Relación

### Resumen

Partiendo de la pregunta: “¿Cuáles son las tecnologías y las formas pertinentes para el territorio?”, inscribimos esta ponencia en el marco de nuestra investigación académica y profesional.

Somos seres vivos que habitamos y conformamos espacialidades tridimensionales. La morfología de estos espacios que habitamos viene dada por la adecuación a nuestros movimientos y conductas orgánicas, como entes biológicos que somos. Así pues, entendemos la forma como el conjunto de morfologías que conforman el espacio tridimensional de la vivienda, siendo las tecnologías las que permiten la ejecución de dicha espacialidad.

Estos espacios están constituidos por superficies que definen volúmenes, superficies que a nivel arquitectónico conforman los pisos, paredes y techos. Nuestra inquietud pasa por pensar el espacio en su totalidad como una espacialidad destinada a un ser vivo, el ser humano. Partimos de la hipótesis de que tanto los techos como las paredes deberán definir espacios orgánicos constituidos por superficies cuya morfología se apoye en los principios de la Naturaleza biológica, proponiendo una adaptación al entorno y abrazando las necesidades espaciales de un determinado ser vivo.

Nuestra investigación se basa en el estudio de los comportamientos estructurales de formas de la Naturaleza biológica y su aplicación a la escala del edificio, resolviendo los problemas constructivos derivados con el menor impacto posible a nivel de recursos económicos, humanos y energéticos. Por tanto, la utilización de tecnologías apropiadas al lugar y de materiales naturales y sanos es premisa fundamental de nuestra investigación, en la cual pondremos el foco de estudio en los techos.

Así pues, la importancia del estudio de las superficies curvas y también de las superficies alabeadas consiste en la posibilidad de construir techos orgánicos proponiendo una espacialidad estudiada tridimensionalmente a nivel de proyecto. Por un lado se investigan las superficies curvas con generatriz curva y/o directriz curva, y por otro las superficies curvas posibles de ser generadas por rectas (alabeadas). La característica de las superficies alabeadas es que al ser regladas, es decir, generadas a partir de rectas, posibilitan un dominio sobre la construcción del techo, puesto que cada viga del techo puede ser una generatriz de dicha superficie.

Por tanto, con el objetivo de generar techos orgánicos, la investigación se centra en el entendimiento de los procesos de generación geométrica y su aplicación como herramienta para proyectar, y en las técnicas de construcción natural para llevar a cabo tanto las superficies curvas (revolución y traslación) como las superficies regladas alabeadas.

### Contexto y Concepto

#### Contexto

Las superficies alabeadas y las superficies curvas han sido sumamente aplicadas en la Arquitectura. Desde mi modesta opinión, esto se debe al hecho de poder “calcularlas” a partir de la forma y también por su estética. En el siglo XX con Antoni Gaudí y luego con Félix Candela o Frei Otto, entre otros muchos, encontramos ejemplos de bóvedas de catenaria o de paraboloides hiperbólicas materializadas en esbeltas estructuras.

Pero si ya desde la antigüedad estas estructuras existían y además sin el cálculo aritmético correspondiente, ¿qué pasó para que las obviásemos o se nos hicieran distantes a nivel conceptual? Es un hecho que con la aportación de Galileo Galilei el paradigma del equilibrio en las estructuras sufre un giro abrupto, imponiéndose la noción de resistencia hasta el siglo pasado. Pero hoy en día hemos vuelto a la noción de equilibrio, el cual permite una aproximación más amplia para entender la generación de las superficies alabeadas y de las superficies curvas.

Esta visión, más cercana a la experimentación empírica, nos sirve a constructores y arquitectos para estudiar y proponer diseños que comiencen con el entendimiento estructural del objeto. Se trata simplemente de diseñar el esqueleto para luego conquistar la superficie de la forma y de ahí obtener el espacio. El esqueleto es lo que le da vida, constituye la forma y a la vez la espacialidad subyacente. Su diseño a nivel de proyecto tiene su punto de partida en la geometría, indispensable a la hora de definir la forma de una estructura como auto-portante. Por tanto, una noción a nivel de diseño se manifiesta a la hora de proyectar, a la cual llamaremos *estructura/esqueleto* (imagen 1).



**Imagen 1. Estructura/esqueleto de las superficies curvas y alabeadas. Cúpula de base cuadrada e hiperboloide parabólica respectivamente.**

No en vano, los arquitectos vinieron del oficio de los carpinteros y albañiles (*archi-tekne*) que ayudaban en las espectaculares construcciones desde la antigüedad hasta el medievo. Estos profundos maestros del ensamble, del canteado, de la maqueta, de la cimbra y de la experimentación formal concluyen en la construcción de espacios esbeltos. Hoy en día en distintos lugares del mundo son los maestros albañiles los principales artistas de la forma y del espacio mediante las cúpulas y bóvedas que construyen. Volver a involucrar al arquitecto profesional en el conocimiento de la *tekne* lleva a la ampliación del diálogo en el oficio del *hacer*. Es menester que los artesanos de la forma sean los mismos profesionales que piensan el espacio: arquitectos, albañiles, etc.

Sin embargo, sabemos que la era de la máquina y la industrialización desplazó al ser humano como artesano y maestro de oficios, deshumanizando su saber hacer. Los arquitectos también han sufrido este mismo proceso, dado que han quedado relegados al conocimiento de postulados estéticos y filosóficos derivados de códigos visuales sin sustento en un oficio o conocimiento aplicado, tal como puede ser la física estructural o la física ambiental.

A nivel conceptual, intentamos entonces rescatar un camino empírico para el diseño de estructuras sostenibles donde podamos ofrecer respuestas a los requerimientos estéticos en base a un oficio, vinculando directamente el conocimiento científico con el conocimiento popular, sin depender totalmente de las tecnologías informáticas y de sistemas industrializados.

Para ello, disponemos de ciencias que en los últimos años nos han dotado de herramientas de conocimiento en relación a formas estructurales de los elementos de la Naturaleza, como es el caso de la Biónica. Esta ciencia es útil a la hora de reproducir diseños biológicos fundamentados en una sostenibilidad estructural, puesto que permite analizar las estructuras de la Naturaleza para luego, utilizando el diseño como herramienta traductora, poder incorporarlas en el proyecto arquitectónico. Este proceso se puede dar por mimesis o por analogías puntuales, aunque, desde mi punto de vista, es importante el máximo criterio a la hora de transferir el análisis del mundo natural a la producción morfológica arquitectónica.

Pero, ¿por qué hacer estas estructuras?, ¿para qué aplicarlas en el ámbito de la morfología arquitectónica? Exactamente por su elevada eficiencia estructural, como es el caso de la doble curvatura, a menudo inversa (paraboloide hiperbólico), o del arco funicular inscrito en el natural surgir de la catenaria; estas estructuras proporcionan una gran rigidez por su gran capacidad de transmisión de las acciones mecánicas hacia los bordes y puntos de apoyo. No hay que olvidar el hecho de que estas estructuras están presentes de manera aproximada en la Naturaleza biológica.

## Concepto

Es importante antes que nada definir lo que son superficies alabeadas, superficies curvas y arco de catenaria para una más fácil comprensión de sus procesos generativos y de sus dispositivos proyectivos a tener presentes a la hora de diseñar y construir.

El propio término “alabeo” viene a significar “comba de cualquier cuerpo o superficie” (Real Academia Española, 2014). Desde el punto de vista de la geometría estamos hablando de superficies de curvatura generada por la traslación de una línea (generatriz) a lo largo de otra línea (directriz) de tal modo que la superficie que se produce de esas infinitas líneas es una superficie con curvatura.

Una de las características es que las generatrices de las superficies alabeadas deben apoyarse siempre sobre dos o tres directrices. Con esto tenemos una categorización en función de las directrices:

- 1- Las generatrices que se apoyan sobre tres directrices sin perder en ningún momento el contacto sobre ellas:
  - a) construidas sobre tres líneas rectas como el hiperboloide elíptico;
  - b) construidas con dos líneas rectas y una línea curva;
  - c) construidas con una línea recta y dos curvas como el ejemplo del “cuerno de vaca”;
  - d) construidas con tres líneas curvas.
  
- 2- Las generatrices que se apoyan en dos líneas directrices y siempre están paralelas a un plano director:
  - a) construidas sobre dos líneas rectas tenemos el paraboloide hiperbólico;
  - b) construidas sobre una línea recta y una curva tenemos el conoide y el helicoide recto;
  - c) construidas sobre dos líneas curvas tenemos el cilindroide.
  
- 3- Las generatrices que se apoyan en dos líneas directrices y forma la generatriz siempre un mismo ángulo con algún plano:
  - a) apoyado en dos líneas rectas tenemos el hiperboloide conoide;
  - b) apoyado en una línea recta y una curva tenemos el helicoide oblicuo.
  - c) apoyado en dos líneas curvas tenemos el helicoide oblicuo con un núcleo.

GRUPO	FAMILIA	CLASE	SUPERFICIE
REGLADAS	Desarrollables	Planas	Plano
		Poliédricas	Regulares, semi-regulares y irregulares
		Radiales	Cilíndricas y cónicas
	ALABEADAS	Paraboloide Hiperbólico, Hiperboloide, Conoide, Biconoide, Helicoides, Sinusoidales, etc.	
CURVAS	2º Grado	Esfera, elipsoide, ovoide, paraboloide elíptico, etc.	
	TRASLACIÓN / EVOLUCIÓN	Directrices curvas y/o rectas	
	ROTACIÓN / REVOLUCIÓN	Catenoide, paraboloide, Toro, toroide, sinusoidales, bases poligonales (cúpulas)	

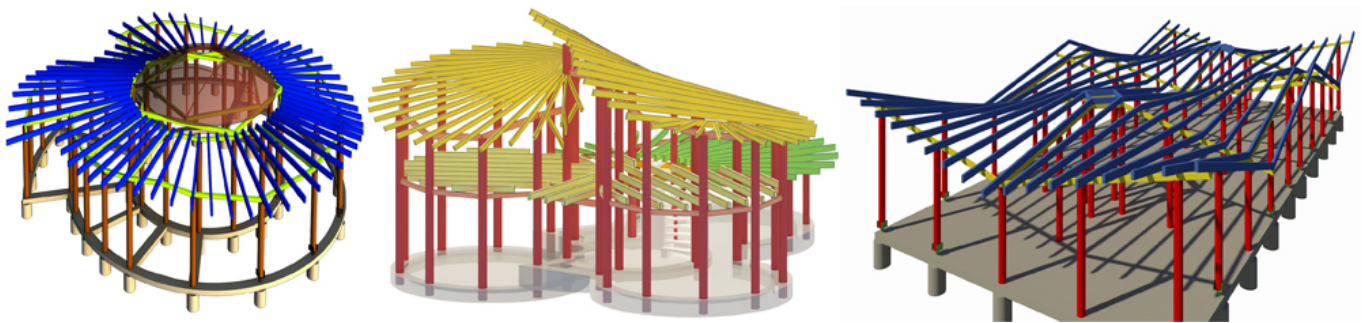
**Imagen 2. Cuadro de clasificación de las superficies generadoras de volúmenes posibles de ser aplicados en el diseño de espacios arquitectónicos. Se resaltan las superficies regladas alabeadas y las superficies curvas de revolución.**

En relación a las generatrices, las superficies analizadas en esta investigación se pueden categorizar de distinta manera. Consideramos que las superficies pueden ser: de rotación, como es el caso de las cúpulas



(catenoide, hiperboloides y paraboloides), si las generatrices rotan en función de un eje de rotación; de traslación, tal como el conjunto de bóvedas, si las generatrices se trasladan a lo largo de una o más directrices; y regladas, si la superficie es generada por rectas que se desplazan a lo largo de directrices.

Al contrario de las dos primeras, las superficies regladas solo se pueden generar con una línea recta como generatriz. Estas superficies son, como indica su nombre, superficies que contienen rectas, o mejor dicho, que se pueden generar mediante el movimiento de una recta que sigue un recorrido determinado (directriz). Por ejemplo, si una recta se mueve siguiendo una circunferencia situada en un plano perpendicular, genera la superficie de un cilindro, que es una superficie reglada. Igualmente lo sería un cono o simplemente un plano, pero el interés de las superficies regladas no reside en estas superficies sencillas, sino en las superficies regladas alabeadas, es decir, las superficies que tienen doble curvatura, o dicho de otro modo, las superficies en las que un plano tangente también es secante y la intersección entre el plano y la superficie es justamente la recta o las rectas generatrices de la misma superficie. Si en un punto de una superficie reglada sólo se puede trazar una única línea recta tangente se dice que la superficie reglada es simple, también denominada de simple curvatura, como es el caso de los cilindros. Si se pueden trazar dos líneas rectas son superficies de doble reglaje, como el caso del hiperboloide elíptico y el paraboloides hiperbólico.



**Imagen 3. Techo con superficie alabeada reglada: conoide (a la izquierda); techo con superficie alabeada reglada: helicoides (al centro); techo con 8 superficies alabeadas de doble reglaje: paraboloides hiperbólico (a la derecha). Viviendas Ecohacer.**

Con el uso de estas superficies regladas alabeadas (hiperboloides, paraboloides, helicoides y conoides), además de crear una arquitectura rica y una plasticidad característica y expresiva, gracias a su doble curvatura se consigue una elevada eficacia estructural. De esto trata precisamente el objetivo de nuestra investigación. Al mismo tiempo que se generan espacios atractivos, se pretende no perder de vista las ventajas estructurales y también económicas, justificando así su aplicación futura a la vivienda de interés social. Conviene recordar que la propia investigación deriva de la puesta en práctica de techos con superficies alabeadas regladas y también curvas, como el ejemplo del conoide o del cilindroide (imagen 3).

## Sostenibilidad Estructural

A menudo se habla de la conquista de una estética en base a determinados valores conceptuales que interfieren en gran medida en la concepción del proyecto arquitectónico, influenciando claramente en el diseño. Sin embargo, estos valores pueden resultar cuestionables a la hora de diseñar una forma y un espacio. No quiero decir que la búsqueda de una estética no sea importante, pero sí que la estética no es un factor a priori para el proyecto sino que deriva de distintos factores que la condicionan, y si están bien pensados garantizan un ambiente armónico, bello, equilibrado, etc. Así que en nuestro caso la estética deriva de la ética del proyecto.

Lo que llamo la ética del proyecto y sus adjetivos derivan de diversas ciencias, no solo de la estética. Una de ellas es la física y el estudio de estructuras eficientes a nivel de equilibrio de fuerzas, o sea, eficientes a nivel estructural. Esta eficiencia queda expresada en las geometrías y formas de la naturaleza que conforman sistemas auto-portantes, y esto nos relaciona directamente con el ahorro de recursos, puesto que dichos sistemas se constituyen con una extrema eficiencia estructural al no depender de agentes externos. La relación aquí entre la materia, la geometría y la forma es perfecta y solo podría existir con esa misma configuración. Por consiguiente, lo estéticamente bello y agradable viene de la sostenibilidad estructural que no es más que su eficiencia, dado que el equilibrio que subyace en las estructuras (esqueletos de la forma) es expresión visual de armonía, proporción y de una belleza que confirma lo estable y duradero.



Un claro ejemplo sobre sostenibilidad constructiva lo encontramos en el arco de catenaria, el más eficiente a nivel estructural por encontrarse “naturalmente” diseñado. Con esta premisa hemos elegido la elaboración de las superficies alabeadas y curvas tomando como generatrices arcos de catenaria.

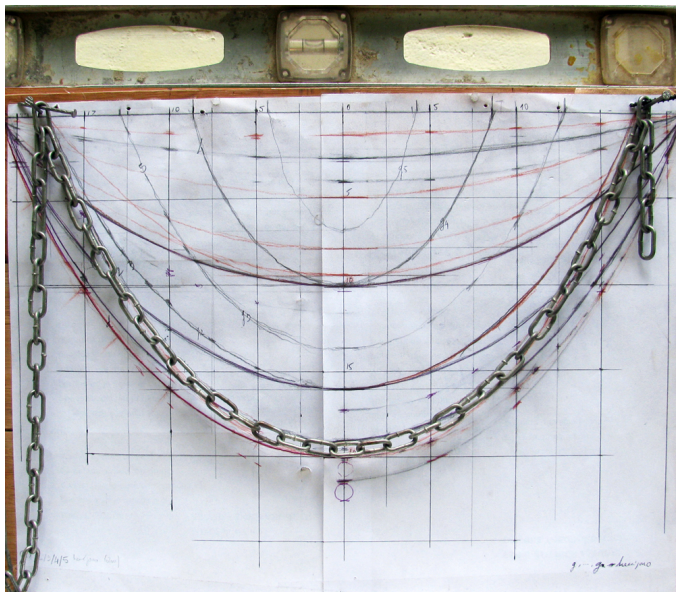
Estructuralmente las superficies alabeadas y curvas trabajan de manera más óptima cuando la fuerza o cargas que la afectan son verticales, o sea, perpendiculares a las generatrices que actúan como ejes centrales de la superficie. Por lo cual, es importante que en la construcción se cubra el esqueleto poco a poco y radialmente, aplicando siempre la misma carga simétricamente, impidiendo así el debilitamiento o colapso de la estructura antes de su cerramiento.

El empleo del arco de catenaria en los procesos generativos de las superficies orgánicas nos lleva a un cambio tanto a nivel conceptual como estructural. En el caso del paraboloides hiperbólico, al sustituir sus generatrices rectas por arcos de catenaria, entraría en el grupo de las superficies curvas y no en el de las superficies alabeadas regladas. Igualmente ocurriría con la superficie de doble reglaje del hiperboloides elíptico, puesto que las generatrices hipérbolas pasarían a ser arcos de catenaria. (Imagen 1).

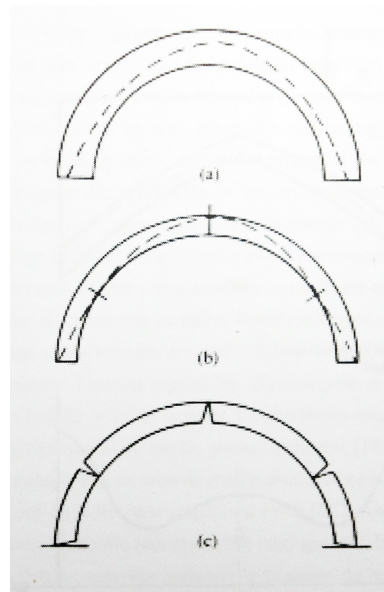
## Arco de Catenaria

La catenaria es la elegante curva que naturalmente adopta una cadena bajo una carga uniformemente distribuida, como lo es su propio peso. Cada eslabón (punto de la curva) representa un determinado trío de fuerzas, dos ejercidas en un ángulo obtuso a tracción por los dos eslabones adyacentes y la tercera ejercida hacia abajo por el peso del propio eslabón. Todo el tiempo en nuestro entorno encontramos esta curva: cuando nos acostamos en una hamaca, cuando miramos una liana en el bosque o un cable eléctrico de alta tensión, etc. (imagen 4).

Invirtiendo esta curva obtenemos el arco de catenaria, el cual trabaja estructuralmente a compresión, transmitiendo verticalmente su peso propio y sus cargas aplicadas sobre sus puntos de apoyo. Los puntos pertenecientes a la superficie generada por estos arcos trabajan igualmente en equilibrio de compresión.



**Imagen 4 (izquierda).** Cadena colgada que define el arco funicular de fuerzas.



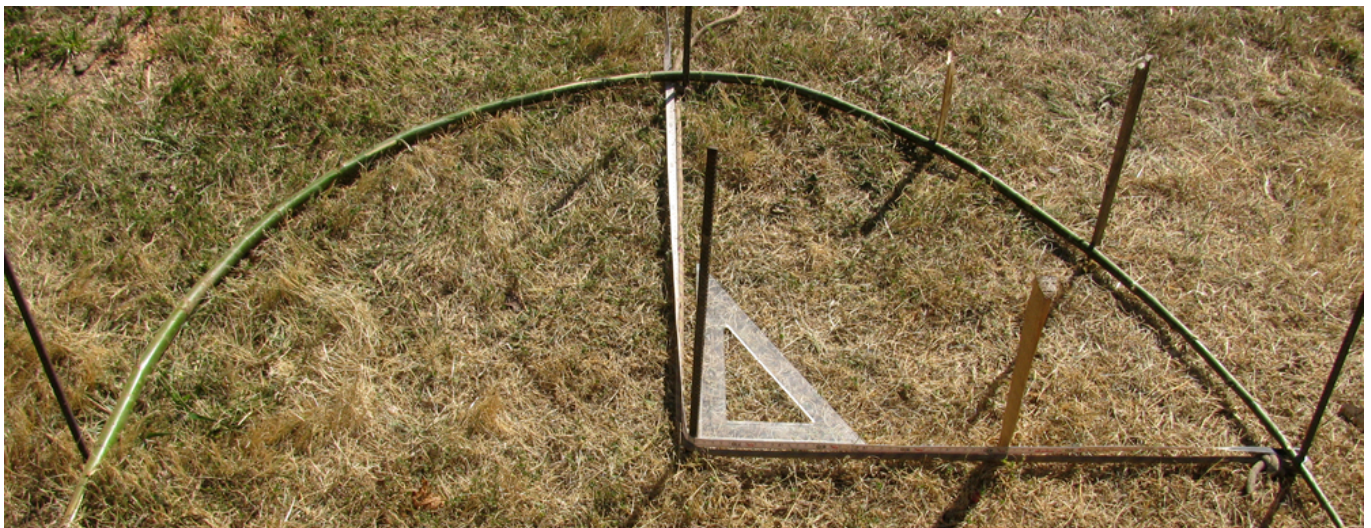
**Imagen 5 (derecha).** Definición del coeficiente geométrico de seguridad: a) arco de medio punto estable; b) arco con el mínimo de espesor con la línea de empujes tangente al perímetro del arco; c) colapso de arco límite en los puntos de tangencia o intercepción de la línea de empujes.

La curva de la cadena que define el arco de catenaria puede cambiar su diseño en función del peso que tenga que soportar como carga puntual. De la misma manera el arco que se diseñe a nivel arquitectónico no necesariamente tiene que tener la forma exacta del arco naturalmente definido (la catenaria). Sin embargo, en su espesor debe contener el arco de catenaria garantizando la eficiencia a nivel de resistencia a las cargas aplicadas. El matemático Robert Hooke contestó en 1676 a su propia pregunta planteada pocos años atrás en la Royal Society de Londres sobre cuál sería la forma ideal de un arco, señalando que el arco ideal es el que tiene forma de catenaria invertida. En 1697 Gregory amplió: “si arcos de otras formas se sostienen es porque hay un arco de catenaria en su interior”.

Se entiende así que el espesor de un arco, cúpula o bóveda no puede ser tan delgado como una cadena puesto que son elementos rígidos y además no podrían adaptarse a cargas puntuales. Al estar a compresión, una cúpula o bóveda con cualquier sección puede colapsar a causa de su doblamiento, a menos que contenga un arco de catenaria inscrito en su sección. Los agrietamientos o articulaciones aparecen cuando la línea de empujes toca el borde del arco. Una de las formas de encontrar el coeficiente geométrico de seguridad del arco es dividiendo su espesor por el del arco límite (imagen 5).

Otra característica estructural con que nos encontramos a la hora de proyectar con estos arcos son sus cargas transmitidas al final de la línea de fuerzas, es decir, en sus apoyos. Cuando más rebajado es el arco (con poca flecha), mayor es el empuje horizontal de la catenaria. Con lo cual es importante prever que haya un cinturón de compresión y/o un volumen (estribo) que permitan absorber los empujes laterales del arco. Esta es la mayor dificultad que encontramos a la hora de diseñar estructuras curvas en arco. Se puede dimensionar mediante un método de cálculo en base a leyes mecánicas y resistencia de materiales, y/o por geometría que contemple la eficiencia formal. Este último es el método que utilizamos y cuenta con un rigor empírico que solo se puede resolver por experiencia y por el estudio y observación de estructuras construidas. Para ello contamos con milenios de historia de construcciones de fábrica. Entiéndase que los modelos de cálculo aritmético son excelentes herramientas de descripción y análisis de fenómenos ya existentes, por lo que su poder de creación es limitado, pudiendo solamente servir de comparación a modelos ya creados, llevando a la aceptación o negación de algo ya concebido. Los modelos matemáticos son posteriores al acto creativo, para el cual es importante conocer los fenómenos de equilibrio y estabilidad de una estructura a nivel geométrico, actuando como herramienta del proyecto creativo.

Para el cálculo de nuestras estructuras hemos aplicado el método de Heyman (1969) empleando su *coeficiente geométrico de seguridad* para determinar el espesor de los arcos de sección de las superficies curvas. Este coeficiente de seguridad determina el espesor del arco y es el resultado de dividir el espesor del arco real por el del arco límite. Como se puede ver en la imagen 6, el arco propuesto tiene un coeficiente de seguridad de 2, pues su espesor es el doble del arco límite. No obstante este factor puede no ser suficiente para garantizar la seguridad de un arco, por lo cual, para los arcos que determinan la sección de las superficies orgánicas construidas hemos sumado otros arcos de catenaria que determinan esfuerzos variables en el interior de la estructura, provenientes de sobrecargas distintas.



*Imagen 6. Arco de catenaria construido con un varejón de sauce. Directriz de la superficie curva de revolución.*

Para el coeficiente de seguridad de los estribos, hemos determinado un cinturón de compresión que disminuye las fuerzas de empuje, y para garantizar el correcto dimensionado de los estribos, es importante que su espesor contenga la línea de empujes y que ésta se aleje del borde de la estructura.

## Estructura/esqueleto

Las estructuras tratadas aquí tienen muchos puntos en común con la construcción de fábrica (de piedra, ladrillo o adobe), dado que comparten sus sistemas de diseño y su eficiencia estructural; pero también se distinguen en que los arcos, bóvedas y cúpulas que hemos construido no necesitan de una cimbra auxiliar ni se constituyen por un conjunto de dovelas (piedras, adobes) sino por una o más directrices que actúan de guía para las demás curvas generatrices, definiendo la trama de la superficie curva. En definitiva, en nuestras estructuras no existe una estructura o una forma independiente, dado que la forma es en sí misma la estructura. En este sentido la forma no puede ser cualquiera, ni tampoco la estructura; la estructura es como un esqueleto que siempre tiene



que estar adentro de la forma construida para que soporte las fuerzas implícitas. Como en la Naturaleza, la forma contiene a la estructura.

Así pues, nuestras estructuras investigadas se componen a nivel constructivo por un esqueleto armado con varejones de sauce o caña, seguido de un recubrimiento de fibra larga con arcilla, de manera que cubra todo el esqueleto y armar un cascaron unitario que trabaje fundamentalmente con materiales resistente a los esfuerzos de flexión. (imagen 7) El esqueleto de la estructura (varejones de sauce y caña) descargan sus esfuerzos de tracción en un encadenado de madera que funciona como base de la estructura y cinturón a compresión



**Imagen 7. Construcción de las superficies curvas de revolución y traslación. Se puede verificar la trama de la estructura/esqueleto y el primer cubrimiento de fibra y arcilla.**

Este sistema se conforma como analogía a los organismos vivos cuyos esqueletos estructuran su morfología; se trata de configurar la forma a partir del esqueleto que la define. La estructura configura la espacialidad, como se manifiesta por ejemplo en los techos de las viviendas. Aplicado a la arquitectura, el esqueleto se va moldeando a partir de las exigencias del entorno que determinan las necesidades de la morfología del organismo vivo (la vivienda). Tal como dijo el biólogo y matemático D'Arcy Thompson (1961): "...una estructura es a la vez estimulada por fuerzas mecánicas para llegar a existir y está presente en el embrión antes de que los factores mecánicos puedan posiblemente haber operado." De ahí la importancia de la estructura en el armado del esqueleto que soportará la piel de la superficie, determinando los espacios proyectados.

Es innegable la analogía con la Naturaleza biológica cuando asistimos al crecimiento y desarrollo de estructuras eficientes para las funciones que permiten que el organismo vivo se adapte a su entorno. Los puentes son un ejemplo de la historia de la mimesis del ser humano con respecto a la estructuras de la Naturaleza: el puente pórtico que forma un árbol que se desplomó quedando apoyado en las dos márgenes de un rio; el puente arco a partir de una roca erosionada por el agua; o el puente colgante como las enredaderas, lianas o parras. Cualquiera de estas estructuras contienen los cinco tipos básicos de esfuerzos a los cuales tienen que resistir, a saber: compresión, tracción, flexión, cortante y torsión. Las estructuras más eficientes son las que presentan la máxima resistencia con el mínimo material posible, como por ejemplo una tela de araña. Si a esto le adicionamos la flexibilidad del material aumentamos su resistencia. Uno de los ejemplos ya descritos es exactamente el arco de catenaria, con el cual se puede configurar una trama que funcione como esqueleto de superficies orgánicas, consiguiendo una estructura resistente a cargas con diversas procedencias.



## Superficies Orgánicas - producción morfológica

Conviene ahora el análisis de los procesos generativos de las superficies curvas y alabeadas y su aplicación en la construcción de cubiertas y techos. En nuestras maquetas realizadas, los materiales empleados fueron una estructura de encadenado de madera, una trama de varejones de sauce, fibra larga (alfalfa y trigo), arcilla, arena como materiales de cubrición y aceite de lino como material hidrófugo.

### Ejemplo 1: superficie curva de revolución (cúpula hexagonal)

La superficie está generada por una directriz de base que es un hexágono y por líneas de arcos de catenaria como generatrices. A las generatrices se aplica un movimiento simétrico de rotación a  $60^\circ$ . El resultado es una trama tridimensional de generatrices que tienen su punto de apoyo en los lados del hexágono de base y definen la superficie curva. El primer conjunto de generatrices perpendiculares a dos de los lados del hexágono sirven de directrices a las próximas generatrices que se suman en una trama que define la superficie curva de revolución.

Las secciones obtenidas por planos paralelos al plano de la base van desde el hexágono (sección coincidente con la base) y tienden a un círculo (secciones próximas al punto central de la superficie curva). En el punto de tangencia del plano de sección con la superficie curva se origina un punto. Las secciones producidas por los planos perpendiculares a la base son líneas curvas, segmentos de arcos de catenaria.

La dialéctica entre la sostenibilidad estructural dada por las líneas curvas que coinciden con las líneas de fuerza y la sostenibilidad estética/espacial de la forma esférica de base hexagonal queda patente ante la opción de poder hacer experimentos a partir de diferentes variables, a saber: el polígono regular de la base, la altura central de la superficie o flecha de la cúpula, o elegir como generatrices los arcos que corresponden en plano a las diagonales internas de los polígonos.



*Imagen 8. Superficie curva de revolución (cúpula cuadrada) con arcos de catenaria como generatrices.*

### Ejemplo 2: superficie curva de revolución (cúpula cuadrada)

Al igual que el ejemplo anterior, la cúpula cuadrada también se inscribe dentro del grupo de las superficies curvas de rotación. En este caso la superficie está generada por una directriz de base cuadrada y una curva de arco de catenaria. Las generatrices también corresponden a arcos de catenaria y se trasladan por la directriz curva y por dos líneas rectas que corresponden a dos lados del cuadrado. Una vez concluida esta operación geométrica se procede a un movimiento de rotación igual a  $\pi/2$  aplicado a todas las generatrices, originando así una trama de curvas que definen la superficie curva de revolución (imagen 8).

Las secciones producidas por planos paralelos al plano de la base van desde el cuadrado (sección coincidente con la base) y tienden a un círculo (secciones próximas al punto central de la superficie curva). Por otro lado, las secciones perpendiculares al plano de la base evolucionan desde la recta coincidente con el lado del cuadrado hasta la curva de catenaria con mayor flecha que se encuentra al eje central de la estructura.

A partir de la experimentación comentada en el ejemplo 1 se reprodujeron distintas estructuras con superficies curvas de revolución con cada una de las variables comentadas. Así pues, proponemos la cúpula de base cuadrada por su grado estético, siendo el resultado del cambio en dos de las variables a nivel generativo, a saber: el polígono pasó a ser un cuadrado, y la flecha de la cúpula aumentó de un 25% del vano hasta el 50% del mismo.

A nivel estructural, hemos podido comprobar el aumento de la resistencia a esfuerzos de compresión de la superficie con la reducción de la flecha en relación al vano. Esto se debe a que las cargas puntuales se reparten más rápida y homogéneamente a todos los puntos de la estructura, haciendo actuar de manera más unitaria a todas las catenarias que la determinan sin producir disimetrías pronunciadas en la estructura. Hemos podido constatar además que a partir de una carga aplicada verticalmente en el centro de la superficie se originan fuerzas de tracción aproximadamente a  $\frac{1}{4}$  de la catenaria medida desde arriba. Esto deriva en la flexión de los arcos de catenaria en una curva hacia fuera de los límites de seguridad. Por otro lado, los esfuerzos de tracción también aumentan en la parte cercana a la base del arco exigiendo mayor resistencia al encadenado de compresión de la base.

### Ejemplo 3: superficie curva de traslación (bóveda)

En este caso, la doble curvatura de la superficie se genera a partir de la directriz sinusoidal conformada por dos arcos de catenaria unidos en un punto de tangencia que determina la continuidad de una superficie convexa con una cóncava. A esta directriz sinusoidal, se suman otras dos rectas correspondientes a los lados de la base. Las generatrices también son curvas de catenaria que se trasladan por las directrices enunciadas.

Es muy interesante observar en esta superficie la evolución en las secciones producidas por sucesivos planos perpendiculares a la base y paralelos a la directriz. Estas evolucionan desde la recta (lado del rectángulo) hasta la senoide (doble catenaria), pasando por un infinito número de senoideas que disminuyen su amplitud paulatinamente hasta la base pero con un periodo constante.

A nivel estructural, la superficie denota una resistencia sustancialmente superior cuando son exigidas las generatrices (arcos de catenaria), o sea con cargas puestas perpendiculares al lado menor de la base, al revés de lo que sucede cuando las cargas son perpendiculares a las generatrices en el sentido de la directriz.



*Imagen 9. Superficies curvas de revolución y traslación con la primera cubierta de fibra y arcilla.*

### Ejemplo 4: superficie alabeada (paraboloide hiperbólica)

Teóricamente la paraboloide hiperbólica se inscribe dentro del grupo de superficies alabeadas regladas; pero en este ejemplo expuesto la superficie está generada y concretada por una directriz curva (arco de catenaria) y dos rectas paralelas no coplanarias. Las generatrices son también arcos de catenaria. Por ello, resultaría



redundante ponerle otro nombre a la superficie, aunque no dejaría de ser más justo, por su identidad, llamarle “catenoide catenódico”.

Esto derivó de la necesidad de aplicar arcos de catenaria por su sustentabilidad estructural y conservar así el mismo principio en la producción de todas las superficies orgánicas: que sus generatrices sean líneas curvas catenarias. Con esto garantizamos de antemano, por hipótesis, una mayor resistencia estructural a esfuerzos exigidos a la estructura.

El paraboloides hiperbólico tiene su reconocimiento en la historia de la arquitectura; además cabe reconocer su importancia como arquetipo espacial de la humanidad, fruto de la observación de innumerables estructuras en la naturaleza biológica. Como ejemplo encontramos las hojas de las plantas que por un principio de resistencia a las cargas de peso propio y sobrecargas que se producen en la superficie adoptan la forma del hiperboloides parabólico. Esta superficie habitualmente es generada por una hipérbola como directriz y parábolas como generatrices, aunque en nuestro caso la superficie fue originada por generatrices de arcos de catenaria y no por rectas como correspondería según la definición de superficie alabeada reglada; por lo cual, esta superficie se inscribiría en el grupo de las superficies curvas.



*Imagen 10. Superficie curva “Catenoide Catenódico”.*

## Conclusión

Con estas primeras experiencias en la aplicación de morfologías de la Naturaleza biológica a la construcción de techos, podemos verificar su impacto espacial, además de su resistencia estructural y su facilidad constructiva, lo cual repercute en una economía más accesible. Por lo tanto, esta investigación incide directamente en las áreas de la sostenibilidad económica, estructural, energética/ambiental, estética/formal y espacial.

Con el uso de materiales locales y naturales, y por ello accesibles, hemos constatado una reducción del costo por m<sup>2</sup> de techo con una ganancia entre materiales y mano de obra de cerca del 20% en relación a la construcción con materiales industrializados (hierro y cemento). Si bien es más rápido construir con hierro y cemento, el empleo de materiales locales y naturales es innegablemente más económico, equilibrando la cuenta final entre mano de obra y materiales.

A nivel estructural hemos visto durante toda la práctica un ahorro de materiales en relación a la resistencia requerida. El espesor y la cantidad de los materiales aplicados se ven optimizados dado el diseño del vano, la forma curva de catenaria que conquistan todas las superficies. No negamos la tecnología actual y el cálculo



racional impuesto a partir del siglo XVIII, solamente rescatamos la importancia para nuestros proyectos de la relación de la materia con su forma y geometría con los sistemas de diseño, razón de la existencia de cualquier objeto proyectado y construido. Esto nos da más herramientas a la hora de pensar y diseñar la estructura, trabajando con el compromiso espacial a favor de las exigencias estructurales.

Por otro lado el uso de materiales no impactantes a nivel ambiental y también para salud, hace que no haya peligro para el ser humano, tanto en la puesta manual en obra de los materiales como en la vida útil del edificio hasta su degradación.

El punto destacadamente más subjetivo de la investigación es la componente espacial que deriva directamente de morfologías tridimensionales que conquistan espacios, en nuestra opinión, más acordes a los movimientos naturalmente biológicos del ser humano y, como tal, determina una espacialidad más cercana a nuestro imaginario, simbolismo y adaptación física del espacio. No interesa por el momento indagar en este punto, puesto que la presente investigación se centra más en el aspecto tecnológico; simplemente dejarlo como un apunte para futuras investigaciones paralelas en el ámbito de lo espacial.

En la continuidad de la investigación se propone el análisis riguroso de la eficiencia estructural, así como otros análisis a nivel de economía de construcción y a nivel espacial. Esto se dará cuando apliquemos el estudio sobre maquetas a escala 1:1.

Por fin, estamos ahora más cerca de poder, por lo menos arriesgar, a contestar a la pregunta inicialmente planteada: “¿Cuáles son las tecnologías y las formas pertinentes para el territorio?”. En nuestra opinión, el ejercicio profesional de diseñadores, arquitectos, urbanistas, albañiles, artesanos, etc., tiene una responsabilidad y una carga ética imposible de menospreciar. Esa misma responsabilidad debe ser transmitida a un nivel educativo encargado de aleccionar dentro de una base ideológicamente comprometida y de un ejercicio ético de la profesión.

Esta actitud dirige nuestra atención al contestar a la pregunta planteada, no en el ámbito de lo físico concretado por la construcción de cualquier objeto y/o equipamiento, pero sí en el ámbito de la educación; una educación con objetivos ideológicamente comprometidos con las necesidades del ser humano a la hora de Habitar. Digamos que las tecnologías, sistemas, formas, etc. que planteamos son consecuencias del ejercicio éticamente evaluado. Siendo así, las tecnologías y las formas pertinentes para el territorio dependen obviamente del contexto físico (lugar y clima), del contexto socio-económico pero fundamentalmente de un contexto global de articular formas y estrategias de Habitar más sanas y humanizadas. En definitiva, se trata de involucrar al ser humano tomándolo como eje axial de esas mismas estrategias pero también englobándolo dentro de un sistema vivo que lo condiciona al mismo tiempo que es condicionado por aquel. Las acciones éticamente comprometidas que deriven de nuestro ejercicio profesional llevarán a que nos mantengamos por más tiempo como residentes faustos o nefastos del planeta que compartimos.

## Bibliografía

1. ARESTA, Marco. *Arquitectura Biológica: la vivienda como organismo vivo*. Buenos Aires: Diseño, 2014
2. ALEXANDER, Christopher. *Ensayo sobre la síntesis de la forma*. Buenos Aires: Infinito, 1973
3. HUERTA, Santiago. *Arcos, Bóvedas y Cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2004
4. LAFARGA, Antonio. *Mecánica de las estructuras antiguas. O cuando las estructuras no se calculaban*. Madrid: Munilla-Lería, 2011
5. MORAIS, Antonio. *A Morfologia das Estruturas na Concepção Arquitectónica*. Lisboa: Ecosoluções, 1997
6. SPINADEL, Vera W. de; PERERA, Jorge G.; PERERA, Jorge H. *Geometría Fractal*. Buenos Aires: Nueva Librería S.R.L., 2007
7. THOMPSON, D'Arcy. *Sobre el Crecimiento y la Forma*. Madrid: Akal, 2003