

Comunicación

CATEGORIAS GEOMÉTRICAS DE UNA BÓVEDA GAUSSA. De la construcción geométrica a la geometría de la construcción

Aresta, Marco

maaresta@mi.unc.edu.ar

Universidad de Buenos Aires. Facultad de Arquitectura, Diseño y
Urbanismo. Instituto de la Espacialidad Humana. Buenos Aires,
Argentina

Línea temática 1. Categorías y enfoques (teoría y praxis)

Palabras clave

Estructuras, Abovedadas, Alabeadas, Geometría,
Gaussa

Resumen

En el contexto de la convocatoria, mi ponencia pretende indagar desde una perspectiva teórica sobre los procesos prácticos que conforman la ejecución de una bóveda Gaussa.

La bóveda Gaussa, es una estructura abovedada que presenta directrices curvas, las cuales surgen de la famosa “curva de Gauss”. De la misma se toma sólo la mitad, a saber, una curva convexa seguida de una curva cóncava.

Un concepto matemático y geométrico, tal como es la “curva de Gauss”, posibilita la conformación de un objeto arquitectónico, lo que determina su diferenciación en relación a otras estructuras abovedadas.

Categorizamos normalmente en base a nuestra práctica constructiva y proyectual, pero también, como en el caso expuesto en el presente artículo, categorizamos una práctica en base a un concepto geométrico.

A lo anterior se suma la interdisciplinariedad de la categorización, es decir, a partir de un concepto de otra disciplina se desarrolla una categoría en un objeto materializado. La geometría con la arquitectura. ¿Podrán estar separadas algún día?

Lo enunciado nos invita a pensar en la propia importancia de la geometría, no solamente en relación a su práctica en la arquitectura, sino también en relación a sus conceptos.

A partir del momento en que un concepto nos sirve para determinar la geometría de un objeto arquitectónico, él mismo sirve a un proceso de interpretación que lo lleva a la diferenciación y al jerarquizar de las prácticas constitutivas.

Las categorías geométricas (que será equivalente a decir, las características geométricas) de la bóveda Gaussa permiten la comunicación en el ejercicio profesional y dan la posibilidad de identificar y expresar una idea de orden proyectual y constructivo.

Concepto Geométrico de una Bóveda Gaussa

Desde antaño, la geometría es útil para estructurar y construir el espacio, llevada al punto de ser una herramienta política en el establecimiento de la justicia. Me refiero a las épocas del antiguo Egipto, donde se dividían los terrenos en el margen del río Nilo para las siembras anuales.

Asimismo, en la cultura griega la geometría constituyó la base de la investigación en disciplinas de la ciencia y de la metafísica. Durante siglos, los *Elementos de Euclides* establecieron los parámetros para la construcción geométrica.

Llegada la Edad Media tardía y el desarrollo de la burguesía y las universidades, junto con el surgimiento de nuevas órdenes eclesiásticas, la geometría acompaña los cambios sociales de esa Europa con su construcción metafórica influenciada por el pensamiento pitagórico, acompañada de realizaciones materiales específicas como el famoso *Numero de Oro*.

En aquella era de *piscis*, el arco gótico - producto de una nueva resolución estructural -, construyó también el simbólico pensamiento eclesiástico en la figura de la *vesica piscis*, producto de la intersección de dos circunferencias con el mismo radio.

Ya en el siglo XX, nuevas geometrías, llamadas de la complejidad, cambiarán la visión que tenemos del mundo, siendo de utilidad para comprender el entorno ambiental y nuestro propio ser. Una vez más la geometría construye la visión del mundo, al mismo tiempo que esa visión nos sirve para construir la geometría de espacios y formas.

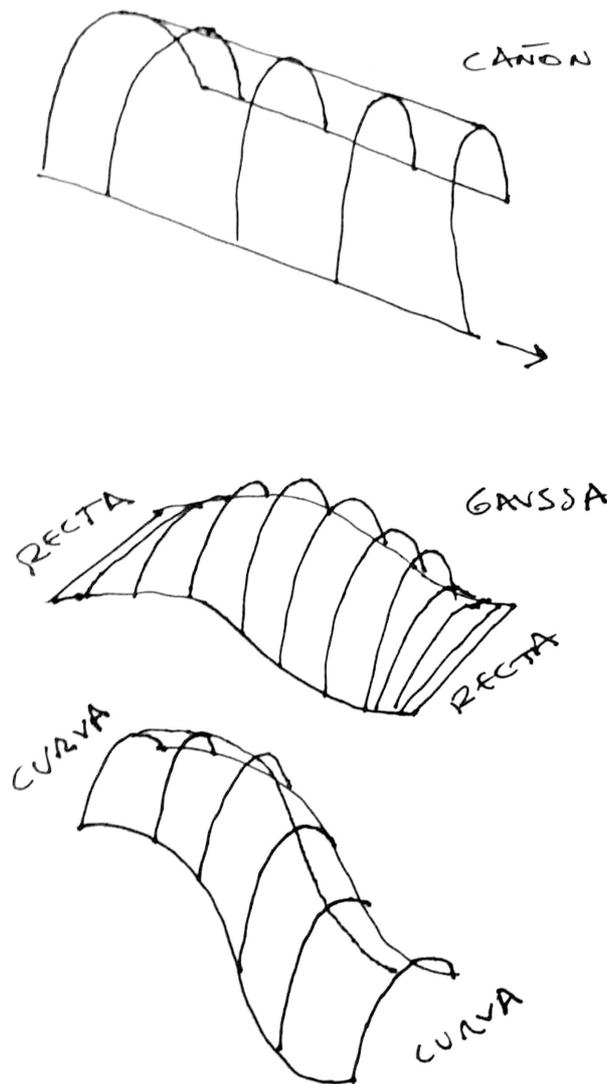
“La necesidad de organizar las construcciones sobre la base de alguna geometría –sea entendida en términos específicos y directos o en términos metafóricos– recorre toda la gama de las producciones humanas, ya se trate de elaboraciones materiales, teóricas, políticas o poéticas”. (Doberti, ????)

La geometría está en todo, tanto como proceso de entendimiento de lo existente en la geometría de las formas, como en la legitimación de los procesos de conformación de lo existente en las formas de la geometría.

Se repite también en la arquitectura donde la geometría se vuelve indisociada de su producción. De manera consciente o inconsciente, racional o intuitiva, la geometría es ineludible en la construcción de las morfologías que conforman los espacios y formas que habitamos.

En cada espacialidad arquitectónica está la presencia - algunas veces fuerte y gritante, otras veces suave y silenciosa - de la geometría. Sirve muchas veces de gramática estructural y, al mismo tiempo, de concepto. Empecemos por describir el concepto geométrico que subyace en el diseño de la bóveda Gaussa y que, como tal, le da sustento físico y legítima su forma.

Figura 1: Croquis de la construcción geométrica de una bóveda de Cañon a una bóveda Gaussa



Autor: Marco Aresta

La bóveda Gaussa se podría incluir dentro de la gran categoría de las bóvedas de cañón, es decir, de las bóvedas que parten de una generatriz de un arco que se traslada por dos directrices paralelas entre sí. La bóveda de cañón, habitualmente conocida por ese nombre, es la bóveda de directrices rectas formada por una alineación de arcos de “medio punto” como generatrices de la

superficie. En términos geométricos consideramos la bóveda de cañón como una superficie de simple curvatura, como si fuera un cilindro cortado por la mitad. Podríamos también definir esta superficie como una superficie reglada, correspondiendo a la categoría de superficies generadas por una recta denominada generatriz al desplazarse sobre una curva, un arco (Figura 1). Es interesante comprender que si cambiamos el proceso generativo de la forma, cambiamos la manera conceptual de abordar la forma desde el diseño hasta lo constructivo y, con eso, su categoría geométrica.

Veamos. La bóveda Gaussa corresponde a una superficie alabeada de doble curvatura, donde sus directrices son dos curvas paralelas entre sí, conocidas por la "curva de Gauss" de la que se toma solo la mitad, es decir, una curva convexa seguida de una curva cóncava.

Podemos considerar que la superficie curva está generada por arcos alineados que se trasladaran por las directrices curvas. Este proceso geométrico se traslada a la construcción. Pero nos encontramos con otra particularidad en el carácter generativo geométrico. Los vértices de la superficie rectangular (el rectángulo en planta), definen el arranque de la bóveda y corresponden a los puntos de altura nula.

Siendo la anterior una característica que la diferencia plenamente de la bóveda de cañón dado que hay dos lados que no tienen arcos generativos, los llamados "tímpanos". Sin embargo, la generación de la superficie surge de una recta que paulatinamente se transforma en un arco de catenaria (Figura 1).

El procedimiento constructivo deriva en el diseño de una superficie alabeada de doble curvatura, la cual contiene una recta en su punto inferior que se va transformando hacia una curva en su punto superior. Entre la recta y la curva central se suceden un infinito números de arcos, desde los más rebajados a los más peraltados. Una superficie no reglada pero que contempla en su base una recta puede ser vista como la mutación de una forma estructurada, - de planta octogonal rectangular - a una forma curva pasando por una superficie orgánica de arcos que promueven la transformación.

El punto más alto de la bóveda es cuando la directriz central asume su punto de mayor amplitud y se ubica a aproximadamente tres cuartas partes de su claro (Figura 2).

En el centro longitudinal, espina dorsal de la bóveda, surge una curva sinusoidal que determina la tercera directriz de la superficie, la que naturalmente se origina por la sucesión de los arcos generadores. Esta directriz central determina la altura de la bóveda y el desarrollo de la superficie.

Desde lo conceptual, resulta inevitable el surgimiento de metáforas formales.

Cuando interpretamos el paso de la recta a la curva y de la curva a la recta podemos significarla en base a dialécticas que dialogan sin oponerse. Una recta racional que dialoga con la emotiva curva. El silencio que se agita hasta la fervorosa curva del arco.

Figura 2: Imagen del interior de una bóveda Gaussa. Se puede verificar: las directrices curvas que corresponden a la viga de hormigón (trabe), y las sucesivas generatrices que evolucionan desde la recta a las curvas de los arcos de cada hilada.



Autor: Marco Aresta

En términos tipológicos es posible considerar que los arcos que se van alineando son todos arcos de catenaria. Se establece una categoría tipológica que define la superficie como un catenoide.

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.

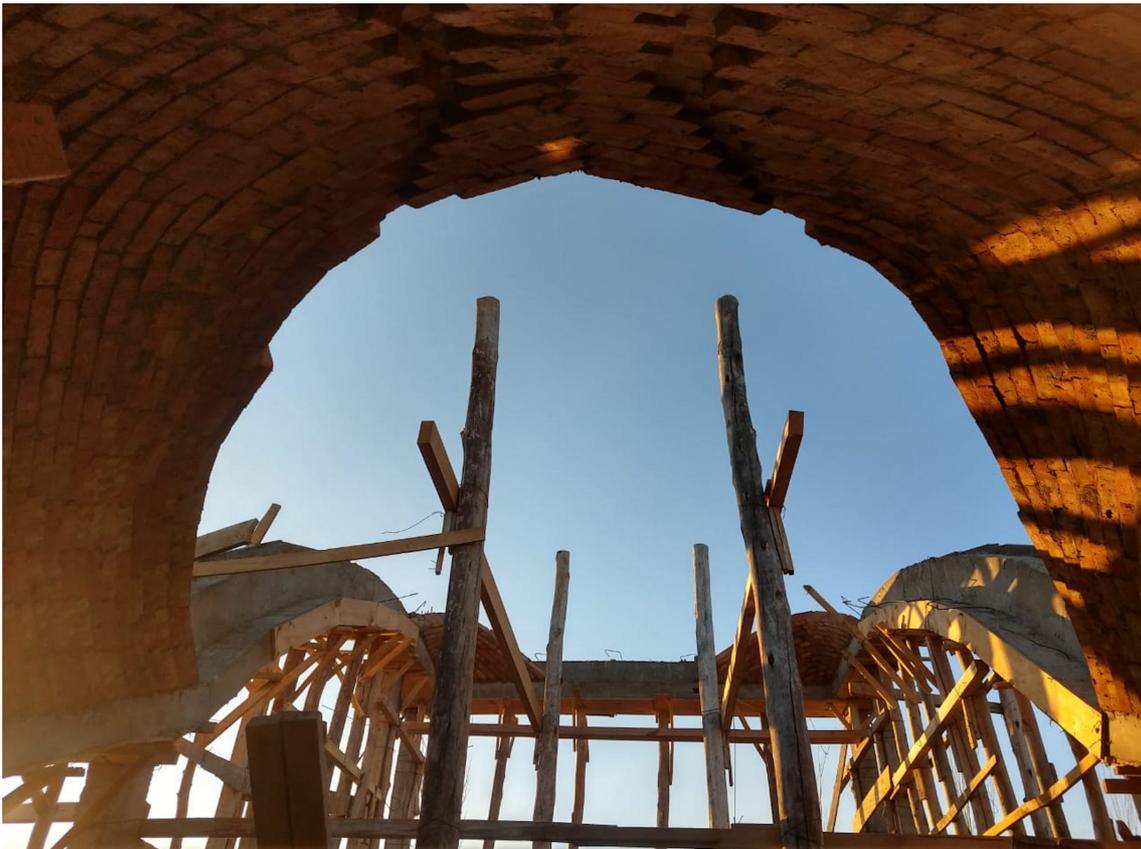
En variados y amplios contextos nos cruzamos, nos apoyamos, interceptamos, miramos, tocamos aquella estable curva. Seguramente sin que la busquemos con demasiado afínco, ella misma nos soporta cuando nos acostamos en una hamaca, cuando miramos una liana en el bosque, una telaraña en una esquina o un cable eléctrico de alta tensión.

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.

Cabe aclarar que en el caso de la bóveda Gaussa el arco de catenaria no corresponde exactamente a los arcos de las hiladas que se alinean en el proceso constructivo, sino que está naturalmente presente en la superficie catenoide que se forma en la totalidad de la construcción (Figura 3).

Figura 3: Imagen del interior de una bóveda Gaussa en su proceso constructivo. Formación de una superficie catenoide y el surgimiento del arco por el encuentro de las hiladas de ladrillo



Autor: Marco Aresta

Materialización de una Bóveda Gaussa

En el ejercicio profesional de la construcción, la albañilería jugó siempre un papel clave. Arquitectos y albañiles no se distinguían, dado que el grado máximo del albañil era aquel que dominaba la técnica, o sea, el maestro albañil, el “archi” “tector”.

Al día de hoy, seguimos por el camino de aproximación a los saberes que se vinculan y los conocimientos que se relacionan en una suerte de indisciplina expresada en el acto del “saber hacer” de cada persona.

Hablando de categorías del saber en el ejercicio de la construcción, en lo que respecta a las bóvedas, una nueva categoría se suma y amplía a las dos demás ya citadas, la del bovedero.

El maestro bovedero, como se suele llamar, más allá de sus conocimientos en el diseño y proyecto de la forma de una estructura abovedada, acarrea consigo el manejo ancestral del conocimiento de las fuerzas que subyace en la forma y que condicionan la materia y el diseño de lo constructivo.

En las estructuras abovedadas, el arquitecto se encuentra con su albañil, práctica y teoría se unen en una simbiosis perfecta relacionando lo conceptual de la geometría, la eficiencia estructural de la forma y la poética de la espacialidad.

En especial en la categoría morfológica que se insiere la bóveda Gauss, la de estructuras abovedadas sin cimbra, el proceder práctico requiere una ejecución basada en la experiencia, en la intuición y en la sensibilidad del bovedero. Se encuentra relacionado a la técnica constructiva de subir una bóveda sin cimbra, es decir, cada pieza se va colocando formando cada arco que a su vez se van sucediendo en una alineación continua hasta el cierre de la superficie con la última pieza o clave.

Todo el acto de subir una bóveda es absolutamente original, dado que es imposible que se repitan. Cada bóveda tiene como base el atento escrutinio del bovedero en la determinación de la forma de la superficie.

Como se trata de una superficie alabeada con directrices curvas es normal que, a medida que se vaya subiendo la estructura, la misma sufra ajustes en su forma. Para tal el bovedero decide cuándo hacerlos y de qué manera, con el objetivo que no se perca la estética del objeto ni se comprometa la eficiencia estructural de la curva.

La curva de la cadena que define el arco de catenaria puede cambiar su diseño en función del vano y la flecha que vaya asumiendo la superficie. Sin embargo, el espesor de la bóveda 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" (en Lafarga, 2011).

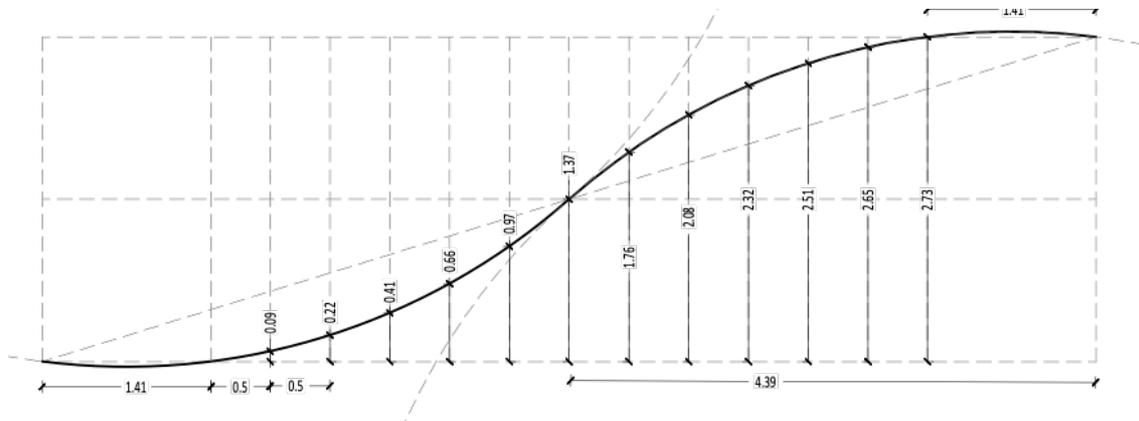
El diseño del espacio y su morfología acompaña el propio diseño estructural y van de manos dadas en su conquista de la espacialidad.

Para el correcto trazado de las directrices, se dibuja un corte con la curva dividida en segmentos horizontales a los que corresponden distancias verticales. Esto permite ir trazando la línea curva de Gauss en obra de manera a construir la cimbra de madera que sirve de encofrado a la viga de hormigón armado (Figura 4).

En lo estructural, las dos directrices corresponden a dos vigas del encadenado superior de las paredes y sirven de base de sostén a la bóveda. Ambas vigas permiten absorber las cargas transmitidas al final de la línea de fuerzas de la bóveda, es decir, en sus apoyos. Cuanto más rebajado es el arco (con poca flecha), mayor es el empuje horizontal de la bóveda sobre sus bases laterales. Con lo cual es importante prever que haya un cinturón de compresión (trabe) y/

o un volumen (estribo) que permitan absorber los empujes laterales del arco (Figura 2).

Figura 4: Curva sinusoidal, la mitad de la curva de Gauss. Plano en corte para la ejecución de la cimbra de madera de la viga trabe.



Autor: Marco Aresta

Para garantizar la correcta labor de los traveses, dada la imposibilidad de que su espesor contuviese la línea de empujes para que la misma se alejara del borde de la estructura, se optó por un cinturón de compresión resistente a las fuerzas de tracción, es decir, una viga de hormigón armado que soporta las cargas en los bordes de las bases.

En conclusión, el trabe de la bóveda, es viga de solera que hace de base o capitel de las estructura abovedada y que la contiene, evitando que se desplace.

Lo anterior descrito es una de las tres condiciones *sine qua non* para la exitosa construcción de una bóveda, esto es, que bajo ninguna condición los apoyos se desplacen, lo que provocaría fisuras en la bóveda y la posible rotura y colapso.

Otra de las condiciones es que cada pieza, en este caso los ladrillos, puedan resistir a las fuerzas de compresión provenientes de las cargas propias de la bóveda.

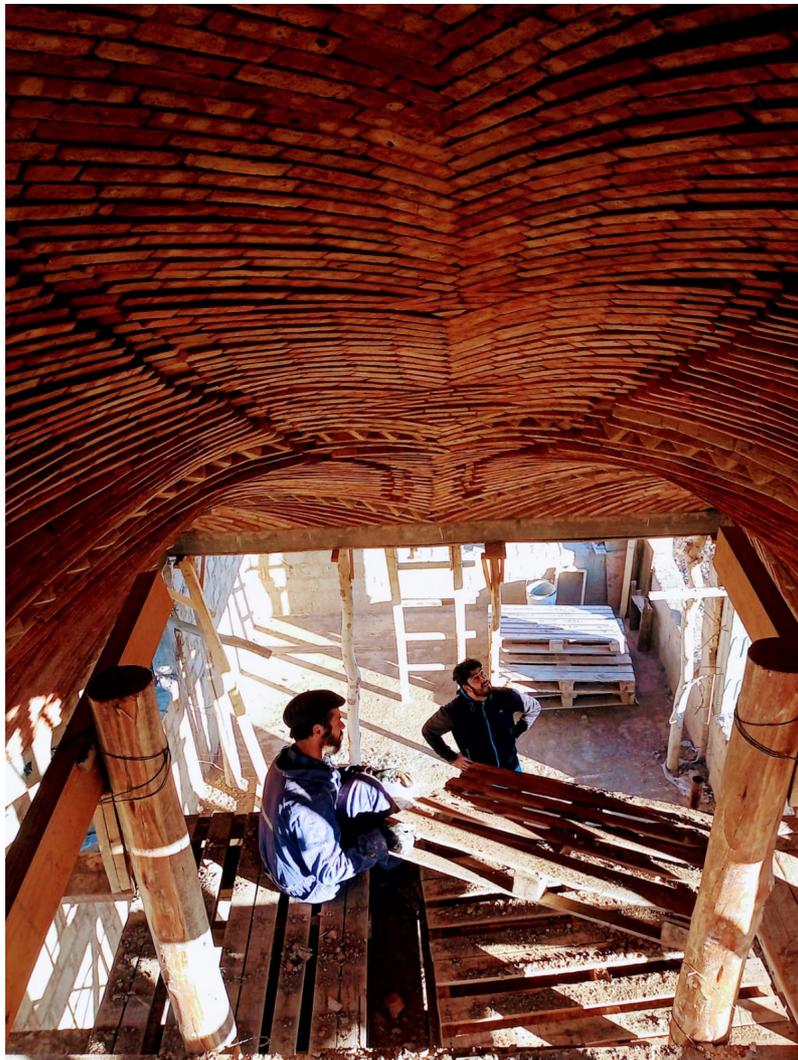
La tercera condición debe garantizar la capacidad del mortero en fijar cada pieza a las demás imposibilitando un deslizamiento o desprendimiento. Para tal, la mezcla debe ser bastante fina y aglutinante. Se puede hacer un mortero a base de barbotina (tierra arcillosa hidratada) y arena fina. Esta mezcla sirve para pegar los ladrillos y los adobes.

El uso de adobes, se debe a cuestiones estéticas, dado que la bóveda es una estructura de ladrillos. Sin embargo, en otros casos se utilizó el adobe como pieza principal.

Conclusión

La consciente utilización de la geometría en la construcción de formas y espacios arquitectónicos deriva en una herramienta de amplio espectro. Tal herramienta establece categorías que pueden ser aprovechadas para el diseño de techos en la arquitectura. Las categorías geométricas permiten estudiar la construcción de las formas y espacios que se desarrollan de manera sistemática. Esta utilización establece vínculos disciplinarios que nos llevan al proyecto de espacialidades basadas en el estudio de superficies de simple y doble curvatura.

Figura 5: Imagen del interior de una bóveda Gauss ya terminada su construcción. Momento de contemplación y disfrute de la espacialidad dada por la forma alabeada.



Autora: Natalia A. Hernandez

En el caso del presente artículo, la categoría de superficies de doble curvatura alabeadas logró conceptualizar la bóveda ejecutada, al mismo tiempo que la curva de Gauss determinó las directrices que le dan nombre a la bóveda. Concomitante con el análisis geométrico que derivó en el diseño y construcción del espacio a que nos propusimos, la geometría acarrea consigo otros deslumbramientos. Me refiero al estudio de los carotenoides como principio estructural de amplia eficiencia dada por la forma. Forma de gran amplitud que se sustenta a sí mismo sin apoyos intermedios. La construcción de la geometría se plasma en la geometría de los elementos estructurales que componen la construcción. En este caso el esqueleto estructural y la piel de cerramiento es un solo elemento que se complace de surgir al unísono labor de la cuchara del bovedero. Pero la herramienta de la geometría trasciende su apariencia en lo concreto para deleitarnos con sus bordes que dejan respirar los significados que transporta. Hablo del sentido y significado dado por las prácticas del ser humano que queda plasmado en la geometría como residuo simbólico de la arquitectura (Figura 5).

Por último me gustaría compartir un análisis por observación que pude constatar con regularidad, en estos años, dedicados al cruce de las disciplinas de la geometría, la arquitectura, la albañilería y, más actualmente, de la semiótica.

Verifiqué en obra la sorprendente admiración relativa a los espacios y formas con estructuras abovedadas alabeadas. Estas estructuras nos conectan, de manera más o menos consciente, con otros imaginarios espaciales.

Protegido del viento y del agua, a la luz del día y bajo el resplandor del fuego (suponiendo que ya lo ha descubierto) nuestro hombre observa la caverna que lo cojiba. Se da cuenta de la amplitud de la bóveda y de que es el límite de un espacio externo, *que ha quedado fuera* (con el agua y el viento), a la vez que es el *comienzo de un espacio interno*, que puede evocarle de una manera confusa nostalgias uterinas, infundirle sensaciones de protección, aparecérselo aún como impreciso y ambiguo, con su contorno de luces y sombras (Eco, [1968] 2013).

Tanto el que construyó, como todo aquel que se aproxima a mirar, para no hablar de los propietarios, transmiten un inevitable deslumbramiento al entrar bajo un techo de una estructura abovedada. “Es evidente que aquél que entra a una estructura abovedada, el cuerpo se le paraliza aguzando sus sentidos y, particularmente la mirada, se detiene en la más absoluta contemplación y disfrute del espacio” (Aresta, 2019). Justificar algo tan visceral me parece carente de sustento teórico o, simplemente, es que hay cosas que no se explican y solamente se sienten. Aún así, dado que irrefutablemente se siente, propongo su análisis e investigación a través de la mirada agudo e incisiva de la semiótica. Pero esto quedará para un próximo artículo.

Por lo pronto, solamente les podré invitar al fondo de los espacios que nos llevan a conectar con algo más ancestral que nos objetiva y nos reúne. Espacios uterinos, espacios de cuevas, espacios de manos, hojas y mantas que nos cobijan.

Bibliografía

- Aguirre, R. (2016). *Bóvedas Mexicanas de Adobe y ladrillo*. Oaxaca: Carteles editores
- Aresta, M. (2019). *Arquitecturas Biológicas, La Pasión por la Forma*. Buenos Aires: Diseño.
- Doberti, R. (2005). *Construcción de la Geometría y Geometría de la Construcción*. in Journal of Mathematics and Design. Proceedings de las segundas jornadas de MyD.P
- Eco, Umberto (1968). *La estructura ausente*. Buenos Aires: Debolsillo. 2013
- Lafarga, A. (2011). *Mecánica de las Estructuras Antiguas – ó cuando las estructuras no se calculaban*. Madrid: ed. Munilla-Lería

Agradecimientos

Agradezco la gentil y criteriosa corrección de Juan Guevara al texto y agradezco a todas las personas que en estos años han permitido e incentivado la investigación de la geometría como herramienta en el ejercicio del diseño en el proyecto y construcción de viviendas.