



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

LAS FORMAS FUNICULARES EN LA HISTORIA DE LA ARQUITECTURA Y EN LA ARQUITECTURA CONTEMPORÁNEA

Grado en Fundamentos de la Arquitectura Curso 2020-2021

Escuela Técnica Superior de Arquitectura UPV

Trabajo Final de Grado. Septiembre 2021

Autor: Vicente Manuel Sáez Sánchez

Tutor: Juan María Songel González

Resumen:

En el presente trabajo se analizan los principales avances sobre las formas funiculares aplicadas a la arquitectura desde que Robert Hooke planteara la catenaria como la forma ideal que debería tener un arco que sustenta su propio peso, así como los factores que motivaron su uso o, por el contrario, el hecho de optar por otras alternativas menos óptimas. Todo esto, apoyándonos en diferentes autores y obras, desde Christopher Wren hasta Heinz Isler pasando por Antonio Gaudí y sus discípulos, como Cèsar Martinell, para finalmente analizar la situación actual, la proyección que tienen estas geometrías a día de hoy y las posibilidades que pueden ofrecernos de cara al futuro de la arquitectura y la relación del ejercicio de esta atendiendo a la delicada situación en la que se encuentra nuestro planeta. Para esto último nos centraremos principalmente en las figuras de Peter Rich, arquitecto de un gran valor social que actúa mayormente en territorio africano, y del Block Research Group, encabezado por el arquitecto Philippe Block, grupo que puede orientar el camino hacia una construcción futura más limpia y eficiente haciendo uso de estas formas.

Palabras clave:

Arco, Formas Funiculares, Catenaria, Equilibrio, Estructuras Ligeras, Arquitectura
Hooke, Wren, Gaudí, Martinell, Saarinen, Isler, Otto, Rich, Block

Abstract:

This paper analyzes the main advances on funicular forms applied to architecture since Robert Hooke proposed the catenary as the ideal form that should have an arch that supports its own weight, as well as the factors that motivated its use or, otherwise, to choose other less optimal alternatives. All this, relying on different authors and works, from Christopher Wren to Heinz Isler through Antonio Gaudí and his disciples, such as Cèsar Martinell, to finally analyze the current situation, the projection that these geometries have today and the possibilities they can bring us for the future of architecture taking into account the delicate situation which our world is suffering. For the latter part we will focus mainly on the figures of Peter Rich, an architect of great social value who works mainly in Africa, and the Block Research Group, led by architect Philippe Block, a group that can guide the way to a cleaner and more efficient future construction using these forms.

Keywords:

Arch, Funicular Forms, Catenary, Equilibrium, Light Structures, Architecture
Hooke, Wren, Gaudí, Martinell, Saarinen, Isler, Otto, Rich, Block

“La catenaria da elegancia y espiritualidad al arco, elegancia y espiritualidad a la construcción entera, evita contrafuertes, el edificio pesa menos, gana una gracia vaporosa y se aguanta sin raros accesorios ortopédicos.” – Antonio Gaudí i Cornet

Índice

1. Introducción	05
1.1. Motivo de la investigación	05
1.2. Objetivos y metodología	06
2. Formas funiculares en la historia de la arquitectura	07
2.1. El principio de la inversión de Robert Hooke	07
2.2. Antecedentes históricos. Arquitecturas orientales previas	11
2.3. Los primeros arcos catenarios en España. Los almacenes de pólvora	13
2.4. El Modernismo catalán de Antonio Gaudí	15
2.5. Las “Catedrales del Vino” de Cèsar Martinell	23
3. Formas funiculares en la arquitectura contemporánea	34
3.1. Nuevas tecnologías. El Gateway Arch de Eero Saarinen	34
3.2. Nuevos materiales. Las inversiones de Heinz Isler	44
3.3. Avances estructurales. Las arquitecturas de mallas	48
3.4. Arquitecturas en desarrollo. La obra de Peter Rich	51
3.5. Proyectando hacia el futuro. Las estructuras de Philippe Block	62
4. Conclusiones	68
4.1. Usos pasados, usos presentes	68
4.2. Posibilidades de futuro	71
5. Bibliografía y relación de figuras	76
5.1. Bibliografía	76
5.2. Relación de figuras	78

1. Introducción

1.1. Motivo de la investigación

Las formas funiculares, aquellas de trazado óptimo para su función estructural, son conocidas desde que el británico Robert Hooke las planteara como diseño ideal que debería darse a un arco que soporte tan solo su propio peso hace ya más de 300 años y, sin embargo, pese a las claras ventajas que presentaría su aplicación en campos como la ingeniería o la arquitectura, apenas fueron utilizadas, salvo de forma discreta por parte de ingenieros británicos o algún colaborador del propio Hooke, hasta decenas de años después cuando fueron recuperadas por arquitectos como Antonio Gaudí, máximo exponente del Modernisme en Cataluña, quien además las ensalzó hasta situarlas en una posición de mayor respeto, eliminando el estigma que sufrían estas geometrías, que venían siendo tachadas en tiempos anteriores de poco estéticas, retrasando, aún más, que se desarrollase una arquitectura en torno a ellas, traspasando la barrera del uso exclusivo por necesidad estricta debido a las limitaciones económicas o materiales para alcanzar una dignidad y un valor por sí mismas, siendo una alternativa perfectamente válida y planteada desde el inicio de proyecto como base para desarrollarlo.

Tras unos años de uso en los que el Modernisme tuvo mucho que ver en su expansión, este tipo de geometrías fueron dejando de trabajarse de manera regular, el ahorro material que suponían debido a su optimización dejó de traducirse en un beneficio económico real. La arquitectura basada en arcos y geometrías equilibradas daba paso al planteamiento de soluciones estructuradas a base de losas y pilares, el ladrillo que había sido explotado junto con las formas funiculares, suponiendo el continuar una misma filosofía de optimización y ahorro que estas, pasó a un segundo plano en favor de los nuevos materiales como el hormigón y el acero en medio de momentos de gran esplendor del Movimiento Moderno, el racionalismo más marcado. Sin embargo, ciertos autores volvieron a recuperar aquellas geometrías que décadas atrás se habían empleado con motivo de su perfeccionamiento estructural, resistente, pudiendo abrir el camino a una nueva etapa de la arquitectura, una evolución del Movimiento Moderno más clásico o miesiano en el que pudiese darse cabida a obras que naciesen de la aplicación de una lógica racionalista y funcional pero que trabajasen otras cualidades como la expresividad o la creatividad individual.

El presente trabajo tiene como objetivo hacer un recorrido histórico por los diferentes avances, aplicaciones y descubrimientos en torno a estas geometrías, estudiando los autores que con sus obras apoyaron y permitieron continuar la evolución de estos sistemas, tratando de determinar los condicionantes que definieron su uso, o desuso, hasta llegar a la actualidad, estudiando a través de casos concretos los aspectos y sistemas que pueden marcar el camino sobre cómo plantear estas formas en la arquitectura venidera para lograr que esta sea estable, óptima y respetuosa con el medio ambiente, siendo creativa y expresiva, aprovechando los avances técnicos, tecnológicos y del conocimiento, pero sin dejar de verse sensibilizada por la situación acuciante en la que nos encontramos y para la que la arquitectura tiene un importante papel a desempeñar.

1.2. Objetivos y metodología

Como se ha comentado, el objetivo de este trabajo consiste en realizar un estudio desde antiguo analizando todas las aportaciones referentes a las formas funiculares en la arquitectura para comprender qué aspectos motivaron su uso, cuáles condicionaron las diferentes etapas en las que aparecieron, bien por necesidad bien como planteamiento base y protagonista de la obra, y su posterior declive, llegando finalmente a la situación actual, un momento de recuperación de estos elementos que comparte algunas características de las épocas anteriores, pero adquiriendo nuevos significados, desarrollando arquitecturas novedosas en base a planteamientos y mentalidades diferentes, siendo también consciente del punto de la historia en el que nos encontramos, para hacer tras ello una mirada al futuro, a las posibilidades que se atisban sobre esta cuestión.

Se ha estructurado el trabajo en dos grandes bloques, tomando como referencia el título original propuesto para el mismo, "Las Formas Funiculares en la Historia de la Arquitectura y en la Arquitectura Contemporánea". Así, en una primera parte, se han recorrido todas las etapas desde que en la segunda mitad del siglo XVII el polifacético Robert Hooke propusiese el modelo del arco catenario para aquel que debe sostener su propio peso, pasando por la arquitectura de Gaudí y sus discípulos, quienes tomaron unos conocimientos que apenas habían sido aplicados en la obra real, y quienes además dignificaron el uso de estas geometrías, construyendo un lenguaje en torno a ellas y el uso intensivo de materiales como el ladrillo, material económico y versátil en la línea del conjunto de ideas que subyace bajo estas estructuras, las cuales adquieren una identidad propia. Para ello, se han analizado los diferentes estados y concepciones sociales y del gremio respecto a estas formas, realizando principalmente, en una primera instancia, una tarea de unificación de las diferentes fuentes bibliográficas consultadas para lograr configurar una historia completa y lógica que dé respuesta a los motivos que definieron las diferentes situaciones que se han dado a lo largo del tiempo, atendiendo a los contextos que justificaron la explotación o el abandono de las geometrías óptimas y que nos permiten entender su evolución de manera más clara.

En una segunda parte avanzaremos hasta el pasado más reciente y la actualidad, estudiando una segunda recuperación de estas geometrías, quizá incluso de mayor relevancia debido al abandono que sufrieron en favor de los nuevos lenguajes, propiciados por movimientos arquitectónicos que llegaron en especial con la introducción y estandarización de los nuevos materiales, buscando plantear geometrías que se consideraron más racionales y puras. Para este nuevo tiempo se han analizado las posibilidades que estas formas presentan de cara al futuro de la arquitectura y qué aportes pueden ofrecer a una sociedad y un planeta tan dañados, requiriendo del desarrollo de soluciones que respondan a esta cuestión, esto apoyándonos principalmente en la aparición de personajes como Peter Rich, con su obra del Centro de Interpretación de Mapungubwe, atendiendo a una importante cuestión social que ejemplifica algunas de las condiciones más importantes que se deben de dar para aprovechar las bondades de estas geometrías, o la figura de Philippe Block, miembro del Block Research Group, el cual investiga de forma constante sobre estas y otras cuestiones para llegar a plantear sistemas novedosos, aunque muchos de ellos fuertemente influenciados por la tradición, que pueden marcar el futuro próximo que debe seguir la arquitectura, una arquitectura que ha de ser más limpia y eficiente.

2. Las formas funiculares en la historia de la arquitectura

2.1. El principio de la inversión de Robert Hooke

En la arquitectura tradicional occidental el trazado de arco más habitual ha sido el de medio punto. Esto se debe a que es una geometría sencilla de dibujar con herramientas comunes como el compás, y de construir posteriormente con materiales como la piedra o el ladrillo. Sin embargo, no es un arco que funcione de forma óptima desde un punto de vista estructural, y las luces que pueden salvar se han ido ajustando con la experiencia adquirida en los éxitos y fracasos pasados.

Las curvas que se forman de manera natural al colgar un material uniforme y flexible de dos puntos fueron analizadas desde antiguo por grandes mentes como Leonardo da Vinci debido al interés que suscitaban, pero nunca se relacionaron con la estabilidad de los arcos. De hecho, hasta 1669 se pensaba que esta geometría era la de una parábola, como así afirmaba el mismo Galileo en su tratado 'Diálogos sobre Dos Nuevas Ciencias' en 1636. Sería el matemático Joachin Jungius quien lo desmintiera, aunque ya en 1646 Huygens afirmó que se trataban de curvas diferentes. Sin embargo, la ecuación de esta curva sería un misterio hasta 1691 cuando el propio Huygens, junto con Bernoulli, la pudo definir como una función hiperbólica, semejante a la parábola, que es cuadrática, variando tan solo en el término de cuarto orden, semejanza que dio pie a esta confusión.¹

Por otro lado, ya en el siglo XVI el ingeniero y matemático neerlandés Simon Stevin había experimentado con modelos en equilibrio obteniendo del cuelgue de estos diferentes formas catenarias, aunque siendo incapaces de relacionar ambos campos, por lo que los descubrimientos en uno no fueron extrapolados al otro.²

No sería hasta la segunda mitad del siglo XVII cuando el científico inglés Robert Hooke planteara en una reunión de la *Royal Society* de Londres la cuestión de cuál podría ser la forma ideal de un arco, pregunta a la que él mismo daría respuesta en 1675 al final de su publicación 'Una descripción de los helioscopios y otros instrumentos', donde enuncia que "de la misma forma que cuelga un hilo flexible, pero inversa, será la geometría de un arco rígido" ("*Ut pendet continuum flexible, sic stabit contiguum rigidum inversum*" en su versión original).³ Con esto afirma que la forma óptima para un arco que sostiene su propio peso será el de una catenaria invertida, término introducido por el físico y matemático neerlandés Christiaan Huygens en una carta destinada a Leibnitz y que define la curva, o la familia de curvas, que adopta una cadena, de donde adquiere su raíz morfológica latina, flexible y de densidad uniforme al ser colgada por sus dos extremos, sometida tan solo a la fuerza de la gravedad.⁴ La curva resultante soporta tan solo esfuerzos axiales de tracción con trayectorias coincidentes con su directriz. Es decir, el esquema de fuerzas es coincidente con la propia curva.

¹ S De Zárraga Mata, "La Catenaria En Arquitectura," 2010.

² Josep Lluís i Ginovart et al., "Layout of Catenary Arches in the Spanish Enlightenment and Modernism," *Nexus Network Journal* 19, no. 1 (2017): 85–99, <https://doi.org/10.1007/s00004-016-0313-9>.

³ Santiago Huerta, "El Cálculo de Estructuras En La Obra de Gaudí," *Ingeniería Civil*, no. 129 (2003): 121–33.

⁴ De Zárraga Mata, "La Catenaria En Arquitectura."

Tras el descubrimiento de Hooke, David Gregory empezó a estudiar dicha curva, publicando en 1691 el primer tratado sobre esta, ensayo que tituló '*Philisophical Transactions of the Royal Society*', donde recogía la teoría de Hooke y las ecuaciones de Huygens y Bernoulli, afirmando que la forma idónea para un arco es la catenaria, resultando un arco sustentado por su propia geometría, equilibrado en su sección, ya que de la misma forma que en modelo colgante las tensiones que aparecen resultan ser axiles de tracción, en el invertido se conservan las propiedades del original y se repiten estas mismas cargas, de compresión en este caso, siguiendo una línea de descarga coincidente con el propio trazado del arco, minimizando los esfuerzos laterales, lo que en su aplicación práctica permitiría reducir o incluso suprimir los elementos de apoyo como los contrafuertes, tan característicos de las arquitecturas anteriores del Románico o el Gótico, que empleaban geometrías no óptimas como el arco de medio punto, el primero, u ojival, el segundo, debiendo compensar los empujes horizontales que tienden a abrir el arco, resolviéndolo con muros contrafuerte y pináculos, pesos dispuestos con el objetivo de verticalizar en la medida de lo posible la dirección de la fuerza.⁵

En 1744 Euler hace rotar la catenaria sobre un eje obteniendo el catenoide, la primera superficie mínima desarrollada. Además, añadiría un matiz muy interesante, y es que el motivo por el que ejemplos de otras tipologías de arco no optimizado no han colapsado, como lo han hecho otros, es debido a que en ellos puede trazarse la curva funicular correspondiente, lo que conlleva un gasto extraordinario de material, material que sería ahorrado de haberse resuelto mediante formas equilibradas.⁶

Unos años después, en 1748, Giovanni Poleni, inspirado por la publicación de James Stirling, '*Lineae Tertii Ordinis Neutronianae*', en la que explica los experimentos realizados con modelos catenarios de los que cuelga esferas para estudiar su comportamiento y posibilidades constructivas, procedería a analizar la cúpula de la Basílica de San Pedro en Roma, estudios que publicó en su '*Memorie Istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano*', donde pueden apreciarse hasta 50 secciones de dicho elemento buscando justificar la estabilidad de este al encontrar en cada una de las secciones la catenaria que otorgaría el equilibrio al volumen, empleando un modelo colgante como herramienta auxiliar de trabajo.⁷ A este estudio gráfico le seguirían diferentes análisis de diversos autores que acometieron de la misma manera estas investigaciones estructurales aplicadas sobre las grandes obras de la arquitectura pasada, hasta principios del siglo XIX, cuando las matemáticas comenzaron a aproximarse a las expresiones de las cúpulas equilibradas, como es el caso de Bouguer, iniciando así la teoría de la membrana.⁸

⁵ Huerta, "El Cálculo de Estructuras En La Obra de Gaudí."

⁶ Ibid.

⁷ Lluís i Ginovart et al., "Layout of Catenary Arches in the Spanish Enlightenment and Modernism."

⁸ Huerta, "El Cálculo de Estructuras En La Obra de Gaudí."

Sin embargo, a pesar de no ser empleadas en obra construida, estas geometrías ideales no fueron olvidadas, al contrario, su planteamiento teórico fue citado de forma recurrente en diversos escritos hasta el siglo XIX, cuando se dio un avance en el cálculo de estructuras con la representación precisa de las líneas de empuje y el desarrollo de la estática gráfica, lo que permitió que otros arquitectos e ingenieros recogiesen el testigo de Hooke e implementasen estas geometrías en su obra, como veremos más adelante con autores como Antonio Gaudí.¹¹

¹¹ Ibid.

2.2. Antecedentes históricos. Arquitecturas orientales previas

Aunque en el mundo occidental apenas se hayan visto obras que empleen de manera alguna estas geometrías hasta un tiempo posterior, sí que existen algunos ejemplos concretos en regiones más orientales del globo.

Una aproximación a esta curva, y probablemente la más interesante de la antigüedad por su tamaño y presencia, se encuentra en la actual Iraq, en lo que fue la antigua Persia, con el Gran Arco de Ctesifonte o Taq-I Kisra, arco que fue construido con pequeños bloques disgregados de material cerámico, consiguiendo salvar una luz de casi 50 metros con una altura máxima de unos 30 metros. Este arco, que formaba parte del Palacio Imperial, sufrió junto al resto del conjunto unas fuertes inundaciones que azotaron la zona, derribando parte de las salas laterales, quedando derribada la fachada a la derecha del mismo, pero permaneciendo este arco en pie, prueba de la gran estabilidad de estas geometrías.¹² Desde luego, estas formas no eran conocidas de la manera en que lo son a día de hoy, mucho menos se habían estudiado sus propiedades, por lo que se llegó a ellas de forma intuitiva y, probablemente, tras un proceso de ensayo y error que se apoyaba en la experiencia de los maestros constructores de la época.



Figuras 5 y 6: Arco de Ctesifonte o Taq-i Kisra

Otra de las primeras aproximaciones a las formas equilibradas que podemos encontrar en la zona de Oriente lo tenemos en la Cúpula de la Roca de Jerusalén, la cual logra cubrir un espacio con un volumen realmente similar a una cúpula catenaria que podría realizarse con los avances posteriores de que disponemos.¹³

¹² De Zárraga Mata, "La Catenaria En Arquitectura."

¹³ Ibid.



Figura 7: Cúpula de la Roca de Jerusalén

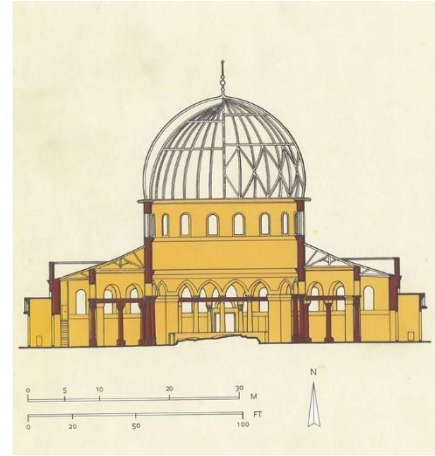


Figura 8: Sección de la Cúpula de la Roca de Jerusalén

Es evidente que, pese a no haber sido perfectamente definida la curvatura ideal de los arcos hasta casi el siglo XVIII, el ser humano ha ido desarrollando formas cada vez más optimizadas y aproximadas a la que habría de ser la idónea a través de la experiencia y la necesidad. Esto se evidencia en los iglús de los esquimales canadienses, cuyas geometrías, a pesar de ser representadas comúnmente como casquetes polares o semiesferas, realmente se aproximan más a los catenoides de revolución, con una relación entre la altura y el diámetro que, si bien no estudiada matemáticamente, ofrece unos resultados muy similares a los que obtendríamos de la aplicación de estas herramientas. También en Sudán, país al Noreste de África, podemos encontrar espacios cubiertos con superficies aproximadamente catenarias de adobe, lo que les ha permitido construir sin entibar debido a la minoración de los empujes horizontales, que se convierten en despreciables, pudiendo así ahorrar en el uso de madera, un material escaso.¹⁴ La ausencia o escasez de materiales como la madera es un factor que ha sido determinante para el uso de estas geometrías óptimas, como veremos más adelante en la obra de Martinell y en la Europa de posguerra.

¹⁴ Ibid.

2.3. Los primeros arcos catenarios en España. Los almacenes de pólvora

En España, el uso más conocido de este tipo de arcos se dio por parte los arquitectos del Modernismo catalán como Gaudí o Martinell, los cuales estudiaremos a continuación, pero anteriormente ya fueron empleados durante el siglo XVIII por parte de los ingenieros militares en la construcción de almacenes de pólvora, arquitecturas introducidas por Bernard Forest de Bélidor.

A nuestro país llegaron los conocimientos de estas geometrías por parte de la Real Academia Militar de Matemáticas, fundada en 1720, de la mano de Bernard Forest de Bélidor con su publicación '*La Science des Ingénieurs dans la Conduite des Travaux de Fortification et Architecture Civile*', donde propone la catenaria como la curva con la que debe proyectarse una bóveda de peso homogéneo para quedar en equilibrio.¹⁵

Podemos comparar los trazados resultantes en estas obras con arcos funiculares ideales gracias a los dibujos que se conservan en la Colección de Mapas, Planos y Dibujos del Archivo General de Simancas.

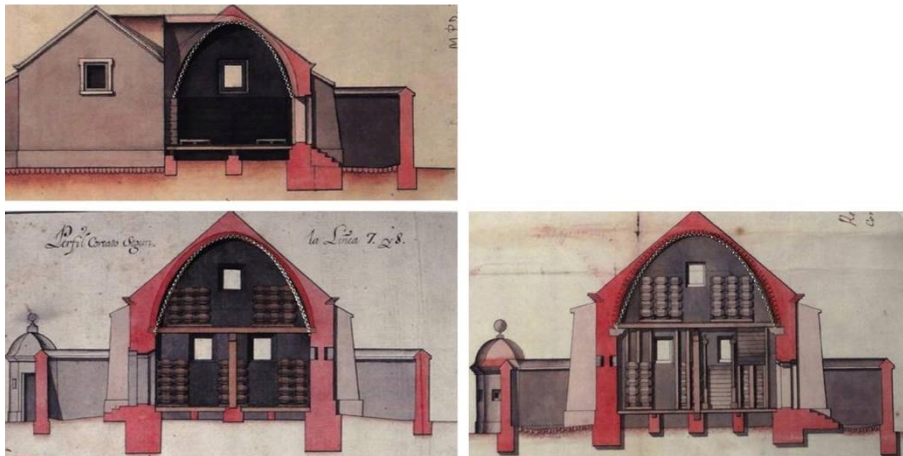


Figura 9: Almacenes de pólvora de Barcelona, Tortosa y A Coruña

Josep Lluís i Ginovart analizó los arcos de los almacenes de pólvora de Barcelona y Tortosa diseñados por Miguel Marín, y el del almacén de A Coruña por Juan de la Ferrière y Valentín, comprobando cuán aproximados son comparados con arcos perfectos en los que se emplean modelos colgantes de referencia de misma luz y altura, tomando como fijos en ambos casos los puntos de imposta y lo que sería la clave del arco, pudiendo medir así la desviación o el error cometido. Al realizar este proceso, se dieron cuenta de que aparecía una variación a la altura de la línea de imposta, deduciendo por ello que no habían sido trazados empleando el principio de la inversión como haría Gaudí más adelante. Estudiando las marcas presentes en el papel, siguiendo las líneas auxiliares y los agujeros que dejó el compás, pudieron saber que se emplearon geometrías ovaladas para trazarlos, pero situando el eje horizontal por debajo de la línea de imposta, evitando así crear una tangente vertical. Es un método más impreciso y complejo que el de la inversión. En concreto, la diferencia que suponía el dibujo de estos arcos respecto a aquellos que podemos trazar con las herramientas

¹⁵ Lluís i Ginovart et al., "Layout of Catenary Arches in the Spanish Enlightenment and Modernism."

actuales, prácticamente perfectos, y teniendo en cuenta que en los planos podría existir una pequeña imprecisión, es de hasta un 8%.¹⁶

Es imposible trazar curvas catenarias con herramientas tradicionales como el compás y las reglas, pero los ingenieros militares del siglo XVIII se aproximaron bastante con un sistema de base ovalada que, si bien no era exacto ni sencillo, resultaba en unos arcos con ciertas propiedades de las curvas funiculares, como que en la imposta no se formase un ángulo recto.

¹⁶ Ibid.

2.4. El Modernismo catalán de Antonio Gaudí

A España llegaron las enseñanzas de Hooke con la creación de las Escuelas de Arquitectura, llegando a tener traducidos a nuestro idioma diversos textos que hablaban de la catenaria y el Teorema de la Inversión. En Barcelona Joan Torras i Guardiola estudiaría estas estructuras llegando a la base de su cálculo. El ingeniero francés Pierre Coupelet amplía este campo añadiendo que, partiendo del modelo colgante para el estudio de los arcos catenarios, se puede añadir pesos sobre este para estudiar la forma adoptada y reproducirla, obteniendo una maqueta que responde de forma inmediata a los datos en forma de cargas que se le aplican.¹⁷

Sin embargo, las formas funiculares, aunque idóneas desde un punto de vista estructural, fueron desestimadas muchas veces por motivos estéticos. Amedée François afirmaría que, pese a ser las geometrías óptimas “no eran bellas”, lo que sumado a la mayor complejidad de su trazado justificaría la predominancia de otros tipos de arcos como el de medio punto durante aún un tiempo más.¹⁸

Gaudí inicia su obra en este contexto, en el que la teoría del arco catenario y la inversión en plano es conocida y se ha extendido, habiendo recibido él además instrucción en estática gráfica por parte de Joan Martorell. Por la difusión comentada de los trabajos relacionados con la estabilidad en base a estructuras funiculares, en especial los análisis gráficos que se extendieron por la década de 1870, es muy probable que Gaudí pudiera acceder a muchos de ellos, como el estudio de Poleni sobre la Cúpula de San Pedro, el de Mohrmann sobre las estructuras góticas o los de Koerner sobre todo tipo de bóvedas, probabilidad más que razonable sabiendo de primera mano por parte de sus alumnos y discípulos que el maestro era un gran entusiasta e investigador de las estructuras, los avances relacionados a estas y la estática gráfica.¹⁹

El catalán no es el primer arquitecto en introducir las formas catenarias o derivadas de esta en su obra, pero sí será quien las ponga en valor, dignificándolas, situándolas en el inicio del proyecto, como base del posterior desarrollo. Gaudí trabaja en sus obras teniendo una concepción global desde el inicio, dando especial importancia al sistema estructural, no realizando tan solo una comprobación de estabilidad al finalizar el diseño como era habitual sino integrándolo desde el principio. Por esto, en sus trabajos emplea modelos colgantes mediante los cuales llega de manera inmediata al arco, sistema que combinará junto con la estática gráfica, llegando a aplicar ambos para un mismo proyecto ya que, como afirmaría su discípulo Cèsar Martinell, el maestro tenía una gran inquietud por comprender al detalle cómo funcionaban estructuralmente sus obras. Daba tal importancia al conjunto unido a la estructura que dibujaba los análisis gráficos de fuerzas en el propio plano, superpuestos, cuando lo común era hacerlo por separado. Así, Gaudí podía identificar los esfuerzos de cada elemento.²⁰

Ya en sus primeras obras vemos este interés por las geometrías estructuralmente eficientes, encontrando la nave de la Cooperativa Obrera

¹⁷ Ibid.

¹⁸ Ibid.

¹⁹ Huerta, “El Cálculo de Estructuras En La Obra de Gaudí.”

²⁰ Ibid.

Mataronense, la única del que en su día fue un conjunto que permanece en pie a día de hoy, donde ejecuta un arco parabólico de madera que calcula gráficamente.²¹

También en la cascada de la Casa Vicens proyecta un arco cuya forma es obtenida a través de un análisis gráfico del funicular de las cargas, cargas que llegaban a la estructura a través de unos montantes de ladrillo. Este elemento, sin embargo, ha desaparecido actualmente, siendo reconstruido pieza a pieza, poniendo gran detalle basándose en los planos originales, en el Museu de les Aigües de Cornellà del Llobregat.²²

De forma similar actuaría en el Parc Güell, llegando a la forma que finalmente toman los muros de contrafuerte a través de un cálculo funicular que tiene en cuenta tanto las cargas gravitatorias como los empujes del terreno ejercidos a la estructura de contención, análisis que pueden consultarse en los documentos del propio Gaudí y de su ayudante, Joan Rubió i Bellver.²³

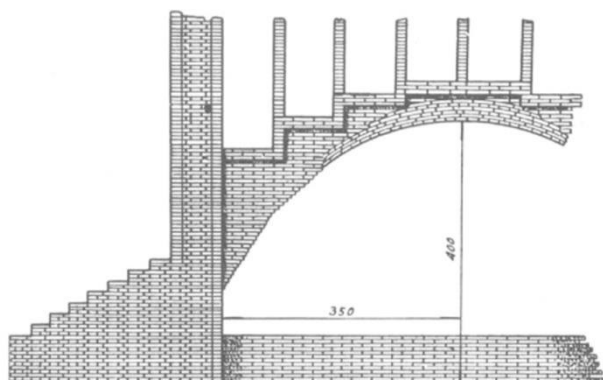


Figura 10: Dibujo de la Cascada de la Casa Vicens

Figura 11: Reproducción de la Cascada de la Casa Vicens

En 1906, en la casa Milà, diseña una galería de arcos catenarios de ladrillo. Esta galería se encuentra en la planta superior, por lo que los arcos tienen que soportar tan solo su propio peso, siendo la geometría óptima en este caso una catenaria. Los modelos que emplea para el trazado de los arcos son a escala real, evitando así el complejo ajuste matemático que supondría el cálculo de esta estructura. Para ello, apoyándose en una pared, colgaba el cable de dos puntos y ajustaba la geometría manteniendo la distancia horizontal fija, modificando la cantidad de cable, que soportaba unas cargas proporcionales a las reales, determinando su altura de este modo. La geometría que adoptaba la curva la reproducía después en ladrillo. Los resultados obtenidos eran casi idénticos a los que proporcionaban los métodos gráficos, y muy similares a los matemáticos.²⁴

²¹ J. Gómez-Serrano, "Arcos Catenarios," in *Giralt-Miracle, Daniel. Gaudí, La Búsqueda de La Forma*, 2002, 96–103.

²² *Ibid.*

²³ *Ibid.*

²⁴ Huerta, "El Cálculo de Estructuras En La Obra de Gaudí."

Ya en 1904 había proyectado en la Casa Batlló otra galería del mismo modo, con arcos ejecutados en ladrillo con modelos catenarios, con la diferencia de que estos fueron posteriormente enlucidos. Pese a no estar situados en la parte más elevada del edificio, la distribución y la sección del mismo hace que no soporten ninguna carga más allá de la propia, por ello la forma escogida de la catenaria.²⁵



Figura 12: Galería de arcos catenarios de la casa Milà



Figura 13: Galería de arcos catenarios de la casa Batlló

La curva catenaria es la forma idónea para un arco que soporta tan solo su propio peso, sin embargo, la arquitectura precisa de estructuras que puedan sustentar otras cargas. Empleando los mismos sistemas de modelos colgantes, se observó que las cuerdas o cadenas biapoyadas adquirirían la forma de una parábola al colgar sobre ellas un tablón de peso homogéneo. Es decir, si para un arco que soporta su peso la geometría óptima es la de una catenaria, para uno que además recibe una carga uniformemente distribuida es una parábola.

Gaudí es conocedor de este fenómeno, tal y como se puede ver en su proyecto del Colegio de las Teresianas de 1890, donde plantea unas galerías de arcos parabólicos, también enlucidos con yeso. El cambio de geometría se debe a que en este caso las galerías se encuentran en plantas intermedias, y sobre sus arcos existen cargas superiores a las propias. Las cargas de las plantas superiores, en general, pueden asumirse como uniformemente distribuidas, por lo que la forma parabólica funciona especialmente bien.²⁶

²⁵ Ibid.

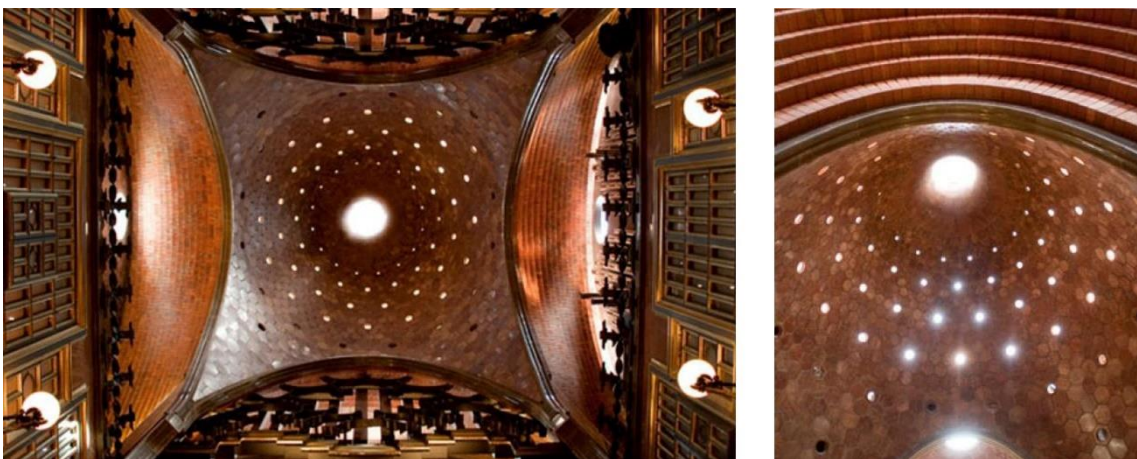
²⁶ Ibid.



Figuras 14 y 15: Galería de arcos parabólicos del Colegio de las Teresianas

A partir de este punto, es muy sencillo experimentar con modelos de forma análoga, colgando cuerdas o cadenas de puntos determinados y variando las cargas en proporción a las que presentaría la obra construida, obteniendo las diferentes geometrías funiculares.

De la misma forma que se puede colgar una cadena de dos puntos y conocer así su geometría catenaria, esto se puede hacer rotar sobre un eje para obtener catenarias cupuliformes, llevando al espacio las ventajas estructurales de los arcos. De la misma forma que sucedía con el sistema bidimensional, cuando las cúpulas debían soportar peso más allá del propio el volumen óptimo surge al hacer rotar una parábola, obteniendo así un paraboloides de revolución. El mismo Hooke ya anticipaba esto en sus escritos al intuir que la geometría óptima para una cúpula debería ser una parábola cúbica.²⁷ Podemos ver la aplicación de todo esto en la obra de Gaudí desde 1890, cuando para cubrir el espacio de la gran sala del Palacio Güell diseña un paraboloides de revolución.



Figuras 16 y 17: Cúpula de la gran sala del Palacio Güell

²⁷ Ibid.

En la Colonia Güell proyecta numerosos elementos con geometrías catenarias y derivadas de estas, empleando tanto modelos colgados como métodos de cálculo gráfico.

Para la Iglesia de la Colonia realiza una maqueta, la que iniciaría su metodología tan conocida y característica, en la que conceptualiza cada carga en pequeños sacos que rellena para hacerla proporcional a la real. Estas cargas deforman las cadenas colgadas que representarían las principales direcciones de los esfuerzos, obteniendo de forma directa el volumen de la obra al invertirla. Aunque finalmente no fue construida, en sus bocetos se pueden encontrar formas que responden a las de los paraboloides de revolución, entre otras geometrías funiculares. En este primer modelo trabaja tan solo con medios volúmenes, significando el eje de simetría con un cable tensado.²⁸

Tras el uso de esta maqueta seguiría empleando modelos inversos utilizando cadenas colgadas y pequeños sacos de perdigones, diferenciando cada carga que habría de existir en la obra. Esto le brindaba un elemento dinámico que respondía a las diferentes hipótesis de cargas de forma inmediata y una herramienta mediante la que podía percibir el volumen de forma directa, además de evidenciar el aspecto estructural al formar las cadenas las líneas de carga y descarga de las principales fuerzas. Las maquetas eran tan precisas y recurridas en su método proyectual que incluso podía medir con un dinamómetro las tensiones que soportarían las columnas, representadas como el inicio de los hilos de cuelgue, obteniendo una idea de volumen al completar el espacio interior y exterior con telas y otros elementos superficiales flexibles, o bien tomando fotografías del esqueleto y pintando sobre ellas. Tanto basaba su trabajo en estos modelos que los planos que finalmente trazaba se basaban en mediciones directas sobre ellos. Pese a no ejecutarse, la maqueta de la Iglesia le sirvió para trasladar lo aprendido a su último gran proyecto, la Sagrada Família, repitiendo el esquema de significar las cargas de la cubierta con sacos de arena y los pilares mediante hilos.²⁹



Figura 18: Maqueta colgante de la Iglesia de la Colonia Güell



Figura 19: Volumen obtenido por inversión del modelo

²⁸ Gómez-Serrano, "Arcos Catenarios."

²⁹ Huerta, "El Cálculo de Estructuras En La Obra de Gaudí."

La Cripta de la Colonia Güell sí fue construida, cubriéndola con paraboloides hiperbólicos de ladrillo, una superficie de doble curvatura, con las ventajas estructurales y resistentes que ello supone. Esto implicó un gran avance ya que, aunque son geometrías muy eficientes, construirlas con elementos discretos como el ladrillo supone toda una proeza, siendo superficies que se volvieron mucho más recurrentes con la introducción del hormigón por su sencillez de ejecutarla con un encofrado al ser una superficie reglada. El uso de este tipo de geometrías no fue puntual en la obra del arquitecto, pues su interés por ellas nacía del mismo lugar que el que profesaba por los modelos colgantes, debido a su gran eficiencia estructural, por lo que podemos encontrar paraboloides hiperbólicos o hiperboloides de revolución desde el inicio de su obra.³⁰



Figura 20: Exterior de la Cripta de la Colonia Güell

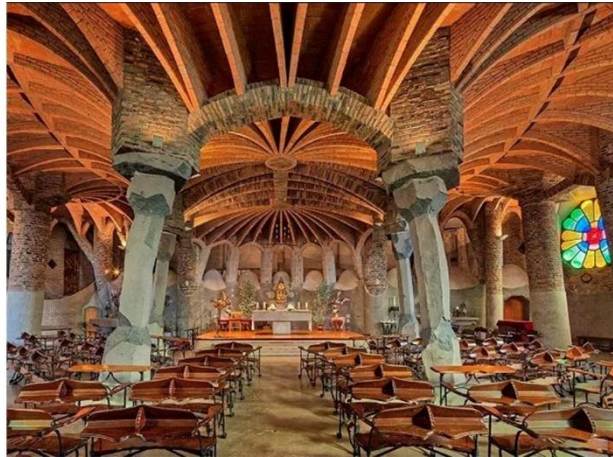


Figura 21: Interior de la Cripta de la Colonia Güell

La Sagrada Familia fue la última gran obra del arquitecto catalán, obra que no pudo ver terminada antes de morir y que, de hecho, sigue sin estar completa. Realiza aquí un ejercicio que se aleja ligeramente de sus trabajos anteriores como los ejecutados en la Colonia Güell, quizá más experimentales, para plantear un proyecto de perfeccionamiento del estilo Gótico.³¹

Pretende verticalizar las cargas, creando unos pilares que no son perfectamente rectos, sino que siguen los trazados estudiados, ramificándose en los extremos superiores para asumir cada carga en su centro de gravedad, llevándolas hasta la base del soporte, a su respectivo centro de gravedad, reduciendo así los empujes horizontales para poder obviar el uso de contrafuertes. El sistema es una búsqueda del equilibrio algo diferente del modelo estrictamente funicular, ya que trabaja las cargas por bloques que divide y asigna a un pilar concreto.³²

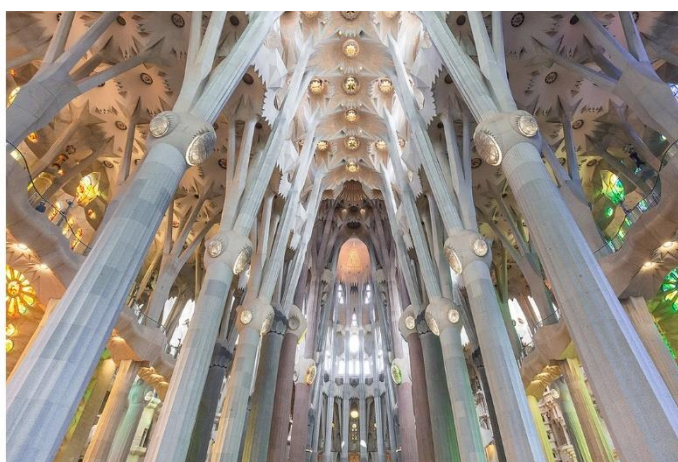
³⁰ Ibid.

³¹ Ibid.

³² Ibid.

Las bóvedas entre arcos quedan resueltas con superficies regladas en las que emplea armadura metálica, la cual sirve además para reducir los empujes horizontales que pese a todo siguen apareciendo.³³

Realmente se puede decir que se trata de un ejercicio de perfeccionamiento del Gótico debido a que el objetivo final es verticalizar las cargas, aunque en este caso trata de hacerlo sin contrafuertes, destacando el uso de la geometría por encima del peso, resultando unos arcos ciertamente apuntados, ya que al incrementar la altura con una luz fija el esfuerzo horizontal es menor. Pese a ello, sí que fue necesario disponer elementos de mayor peso para ayudar a verticalizar las cargas, al igual que sucede en la Catedral de Palma de Mallorca, donde se sobredimensiona el frontón y los ventanales, alteraciones que incluye en sus modelos de maqueta, demostrando que no es una improvisación frente a un problema inesperado, sino algo asumido y tenido en cuenta.³⁴



Figuras 22 y 23: Interior del Templo de la Sagrada Família de Barcelona

Con todo, resta una sensación de ligereza y elegancia arquitectónica, la cual nace de una optimización estructural y supone un ahorro material, en especial si lo comparamos con las arquitecturas de las iglesias y catedrales góticas, con todo el material adicional que precisan para contrarrestar las cargas horizontales construyendo sucesiones de muros, arbotantes y pináculos.

Lamentablemente, el estudio de Gaudí fue destruido en el transcurso de la Guerra Civil Española, perdiéndose en el suceso gran parte de la información de sus últimos proyectos, aunque se ha podido saber la forma de trabajar del maestro gracias a sus obras previas, sus numerosos bocetos y análisis gráficos, sus modelos colgantes y el testimonio de discípulos suyos, como Martinell o Sugrañes, el cual publicó en 1923 el método que siguió para calcular la sección tipo del templo en un artículo titulado 'Disposició estàtica del Temple de la Sagrada Família' en el Anuario de la Asociación de Arquitectos de Cataluña.³⁵

Gaudí buscaba determinar en sus obras sistemas de equilibrio a partir de métodos estáticos, ya fuese mediante el uso de modelos colgantes o de la estática

³³ Ibid.

³⁴ Ibid.

³⁵ Ibid.

gráfica, llegando a ellos sin otros cálculos estructurales que los relacionasen con las ecuaciones materiales o de compatibilidades de esfuerzos, por lo que su teoría se tachó de imprecisa o incluso de incorrecta en algunos casos cuando se fueron dando avances en el cálculo de estructuras. En especial, los herederos de la escuela de la teoría de la elasticidad de Navier tenían una gran inquietud por conocer el comportamiento exacto de las estructuras, por lo que completaban los cálculos definiendo las condiciones de contorno y buscando una solución única, solución teórica que a menudo difería de la realidad. Esta contradicción fue solventada por la teoría de la Plasticidad o de Rotura, el Análisis Límite, conocido también como el Teorema de la Seguridad, el cual plantea que no es necesario encontrar el estado “real” que presentará la estructura, sino que basta con hallar uno, una combinación de esfuerzos, que quede dentro de los límites admisibles para considerarse la estructura en cuestión en equilibrio. Esto se justifica debido a que la estructura, antes de colapsar, adoptaría esa solución, o cualquiera de las otras posibles no determinadas.³⁶

El profesor Heyman explica en su ‘Enfoque del equilibrio’ que, con materiales plásticos, materiales que pueden formar rótulas, se puede trabajar con las ecuaciones del equilibrio y, más tarde, comprobar que no se incumplen las condiciones de cedencia del material. Esto puede aplicarse a estructuras de fábrica siempre que las líneas de empuje se encuentren dentro de la sección material, siendo una condición límite geométrica que depende de la forma de la estructura.³⁷

Sabiendo esto, se puede llegar a entender la estabilidad de la Cripta de la Colonia Güell, planteada en inicio con la idea de soportar una Iglesia sobre ella que jamás se llegó a construir. El esqueleto estructural fue regruessado con material de fábrica, lo que provoca que las compresiones sean mayores, aumentando la seguridad frente a pequeños movimientos o variaciones de carga, y adoptando así una configuración válida, estable y segura de entre todas las posibles, una solución que cumple de forma satisfactoria el Teorema de la Seguridad, de la misma forma que lo hacen el resto de sus obras.³⁸

Gaudí proyectaba poniendo un especial interés en la estructura, integrándola y trabajando en ella desde el inicio, no recurriendo a un cálculo posterior tras diseñar un espacio. Por ello, de entre las infinitas soluciones y modos de trabajo que podría haber escogido, se decanta por la mecánica.

³⁶ Ibid.

³⁷ Ibid.

³⁸ Ibid.

2.5. Las “Catedrales del Vino” de Cèsar Martinell

A principios del siglo XX el sector agrícola catalán se encontraba en una situación precaria. Además de verse tecnológicamente atrasado, una plaga de filoxera, un pulgón que se alimenta de la vid, atacó entre 1877 y 1900, afectando enormemente al sector vinícola de diversas zonas de España, siendo especialmente perjudicial en la zona de Cataluña, donde la vid suponía un alto porcentaje de la agricultura. Esto motivó a los vinicultores a modernizarse e iniciar un desarrollo que había de ser rápido para no desaparecer del mapa productor y económico. Entre las diferentes medidas tomadas, se creó en 1894 en Barberà de la Conca una Cooperativa que permitiese la venta del producto sin intermediarios, sociedad que funcionaba mediante aportes financieros de los agricultores y que contaba con el apoyo y el respaldo económico de la Mancomunitat. Gracias a esto, las cooperativas fueron extendiéndose por el territorio próximo con el objetivo de optimizar los procesos de construcción e industrialización de sus productos.³⁹

Unos años antes del inicio de este fenómeno, en 1888, nace en Valls, Tarragona, el arquitecto Cèsar Martinell i Brunet, el cual se desplazó a Barcelona en 1906, en el momento de mayor esplendor del Modernisme gracias a figuras como Gaudí, para acabar obteniendo el título de arquitectura diez años más tarde. Martinell, además de arquitecto, fue un gran investigador e historiador, además de profesor y secretario en l'Escola d'Art Vell, en Amics de Gaudí o en el Centro de Estudios Gaudinistas, formando parte del Colegio de Arquitectos como miembro senior. Estudió ampliamente sobre la arquitectura medieval y barroca catalana y el trabajo del arquitecto Antonio Gaudí.⁴⁰

Será precisamente a Martinell a quien encarguen las construcciones de los nuevos edificios agrícolas de las diferentes cooperativas que aparecen en la zona del sur de Cataluña. Para abordar estos proyectos no se queda en aspectos meramente funcionales, cumpliendo un programa básico requerido por los vinicultores, sino que integra y da cierta importancia a aspectos como la iluminación, la ventilación, el transporte, el almacenamiento o la distribución y manipulación de los alimentos, mejorando las condiciones de seguridad y salubridad en el trabajo que se practicaría en sus obras, incrementando a su vez la eficiencia, llegando a condicionar el proceso de trabajo al intervenir en cuestiones como las circulaciones, el aislamiento entre los almacenes o la aireación de los silos y las cubas, modificando el proceso de fermentación del vino.⁴¹

Entre 1917 y 1923 llegó a desarrollar alrededor de 50 edificios de características similares pero que pasaron por un proceso de evolución en el cual perfeccionaba la técnica de forma progresiva. Estos edificios se caracterizaron por el uso intensivo del ladrillo y las técnicas tradicionales de construcción, trabajando con él desde las cuestiones materiales hasta las estructurales y formales, adoptando su lenguaje, siendo además un material que permitía una gran versatilidad con un bajo coste económico, uno de los requisitos de estas obras, en especial de las primeras. Como su maestro, realizó una arquitectura en la que todos sus elementos de ladrillo, desde arcos, hasta muros o pilares, trabajaban fundamentalmente a compresión, ahorrando así en

³⁹ Josep Ignasi de Llorens Duran, “Wine Cathedrals: Making the Most of Masonry,” *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials* 166, no. 6 (2013): 329–42, <https://doi.org/10.1680/coma.12.00023>.

⁴⁰ Ibid.

⁴¹ Ibid.

materiales menos asequibles como el acero de las armaduras que se habría de destinar en caso contrario para los refuerzos en flexión.⁴²

La evolución de estas construcciones parte de una forma tipo más convencional, con muros de ladrillo y cubierta a dos aguas sustentada por cerchas, que evolucionará hasta la realización de grandes espacios de tipo eclesial. Las obras más características de esta tipología fueron conocidas como las “Catedrales del Vino”. En esta evolución de las edificaciones agrícolas, partiendo desde la primera tipología a dos aguas hasta llegar al espacio catedralicio final, pueden encontrarse hasta cuatro fases, aunque no siempre siguen una secuencia estrictamente cronológica, retrocediendo a estancias anteriores en ciertos proyectos.

La primera etapa se caracteriza por mantener aún el uso de las cerchas, iniciándola Martinell en 1903 con la construcción de la nave para la Cooperativa conocida como la Societat de Barberà de la Conca, reflejando un modelo todavía clásico, de la época preindustrial, con dos muros de carga extremos entre los que se disponen unos pilares sobre los que apoyan unas cerchas que sustentan la cubierta a dos aguas. El exterior del edificio es austero, evidenciando el limitado presupuesto de que disponían estos proyectos, los cuales eran encargados por terratenientes o incluso los propios aparceros del terreno, personas sin un excesivo poder económico.⁴³

En esta obra da un par de pasos atrás, ya que cronológicamente no será la primera que desarrolle, quedando anclada a la primera de las etapas al dejar de usar bóvedas catalanas y arcos funiculares y empleando en su lugar un entramado de madera y arcos de medio punto respectivamente, aunque más estudiados y equilibrados, que parten de pilares cruciformes que se ramifican en su extremo superior para dar una sensación de transparencia y unidad espacial, algo que sí será característico del arquitecto, al igual que el gran ventanal de ladrillo visto sobre el zócalo de piedra, logrando un elemento monumental que es a su vez funcional y que se integra en el sistema constructivo tradicional de forma orgánica. La fachada es rematada con una cornisa en voladizo, sin emplear elementos como pináculos o sobreelevando volúmenes como sí hizo en ocasiones anteriores. Donde efectivamente aparecen las bóvedas catalanas es en los almacenes subterráneos, y las utiliza de forma vertical, siendo el elemento de contención, ventilando y aislando las cámaras.⁴⁴

Este modelo lo volverá a utilizar Martinell en Cornudella de Montsant y en Falset en 1919, pero modificándolo en este último al diseñar una planta basilical desnivelada, elevando la nave central sobre las laterales para lograr una mejor circulación de aire y una mayor iluminación.

⁴² Ibid.

⁴³ Ibid.

⁴⁴ Ibid.

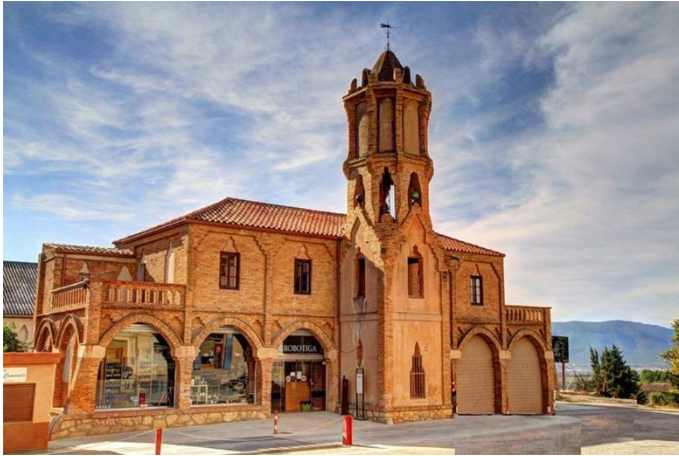


Figura 24: Exterior de la Societat de Barberà de la Conca

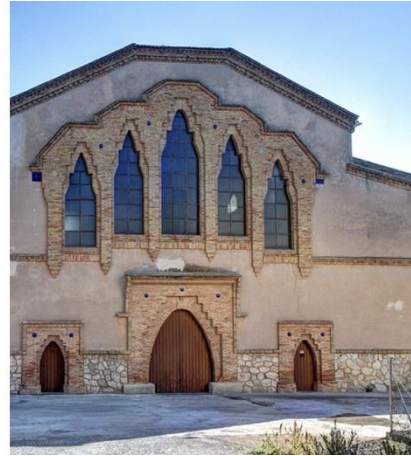


Figura 25: Fachada de la Societat de Barberà de la Conca

Debido a la escasez de materiales como el acero o la madera debido a la demanda con motivo de la Gran Guerra, Martinell decidió emplear un sistema estructural heredado de su maestro, Gaudí, consistente en la sustitución de estas cerchas por arcos de ladrillo con geometrías equilibradas, formas que siguen la trayectoria del funicular de cargas o esfuerzos y que caracterizarán las obras a partir de su segunda etapa. Estas formas son, como hemos visto anteriormente, la catenaria para los arcos que soportan tan solo su propio peso o la parábola para los que soportan una carga uniformemente distribuida además de este, pudiendo adoptar multitud de variaciones para distribuciones concretas de cargas, dando como resultado arcos funiculares óptimos para cada combinación de estas. Martinell empleará en especial la parábola, de mayor sencillez de trazado y con un conocimiento más extendido y asentado que la catenaria pura.⁴⁵

El uso del ladrillo con una disposición estudiada e ideal conlleva un ahorro material lo que, sumado al hecho de que es de por sí un material base económico, de fabricación local, contribuye a favorecer la filosofía de diseño de espacios de calidad con pocos recursos y un presupuesto limitado. El sistema de construcción empleado fue también tradicional, realizando una primera hilada con mortero de yeso o cemento de fraguado rápido y reforzándola con las siguientes hiladas para las que se usaba mortero de cemento.⁴⁶

Con esto, un cambio que viene en cierta manera condicionado por los recursos disponibles provoca que se dé en su obra uno de los puntos más importantes y característicos de la que será su nueva tipología, una tipología en la que destaca el uso de un único material llevado en su lenguaje hasta sus últimas consecuencias, aprovechando su gran versatilidad. El aspecto que suscita más interés es la inteligencia en el uso de este material, adaptando las formas para que trabajen a compresión, no estresando en exceso las piezas de ladrillo ni generando en ellas esfuerzos que no puedan asumir, como los de flexión, lo que permite que las construcciones puedan ser estables con secciones realmente pequeñas y, como hemos visto antes, no precisando de refuerzos metálicos.

⁴⁵ Ibid.

⁴⁶ Ibid.

El uso de arcos en lugar de las cerchas ya se había dado en la zona del Mediterráneo en la Edad Media con la arquitectura gótica civil, creando mercados, almacenes, hospitales o residencias universitarias que se caracterizaban por la introducción de unos arcos sobre pilares que crecen en la terminación de los muros de carga, arcos en los que se eliminan las impostas, rompiendo con la verticalidad de las jambas, dando una sensación más teatral del espacio interior. Podemos encontrar ejemplos de esto en el Monasterio de Poblet y en el Salón de Tinell, en el Palau Reial de Barcelona.⁴⁷

Martinell recoge los conocimientos y usos previos de estos arcos y les introduce modificaciones, como fue la perforación de las enjutas, aligerándolos y consiguiendo una redistribución de los esfuerzos casi perfectamente uniforme a lo largo del arco, haciendo que el modelo real sea prácticamente exacto al teórico. Además, logra, por un medio más, aumentar la transparencia interior y la relación visual.

Existen varios antecedentes a lo que serán las “Catedrales del Vino” de Martinell, siendo quizá el más importante la Sala de Exposiciones de las Bodegas de Codorniu, complejo desarrollado en 1904 por Josep Puig i Cadafalch para la Cooperativa de Sant Sadurní d’Anoia. Aunque la sala principal, el Celler Gran, está resuelta con arcos de medio punto, la Sala de Exposiciones, actual Pabellón de Recepción, sí que queda estructurada mediante arcos parabólicos, equilibrados, cubiertos con bóvedas catalanas entre los arcos laterales, y lunetos con formas catenarias que redundan en la idea de este tipo de arco y que son la forma óptima de abrir huecos en estas superficies, rematando en la parte superior con pináculos de piedra.⁴⁸ Este edificio tiene una gran importancia ya que en él se pueden anticipar algunas de las características principales de los espacios catedralicios de una o dos décadas después, como la sustitución de las cerchas de cubierta por arcos de ladrillo o el uso de las bóvedas catalanas en la cubierta.⁴⁹

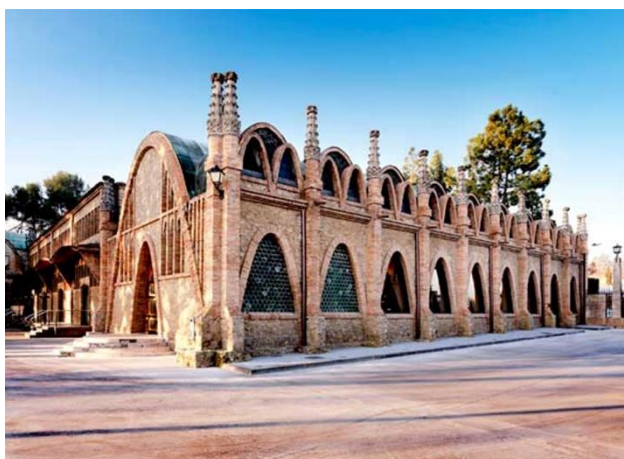


Figura 26: Exterior de la Sala de Exposiciones de las Bodegas de Codorniu

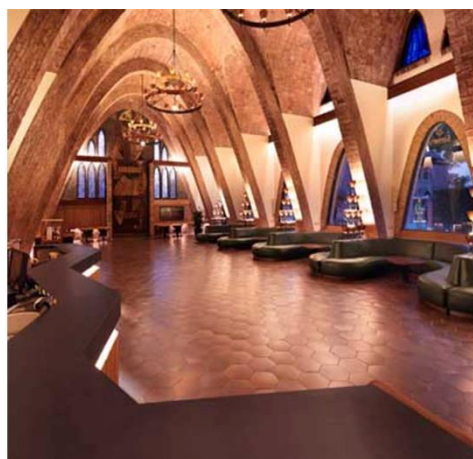


Figura 27: Interior de la Sala de Exposiciones de las Bodegas de Codorniu

⁴⁷ Ibid.

⁴⁸ R. A. Bradley and M. Gohnert, “Three Lessons from the Mapungubwe Shells,” *Journal of the South African Institution of Civil Engineering* 58, no. 3 (2016): 2–12, <https://doi.org/10.17159/2309-8775/2016/v58n3a1>.

⁴⁹ de Llorens Duran, “Wine Cathedrals: Making the Most of Masonry.”

Otro de los proyectos que supuso una referencia para Martinell fue el de la Cooperativa Vinícola de l'Espluga de Francolí, cooperativa fundada en 1902 cuya edificación fue llevada a cabo en 1913 por Pere Domènech. En esta obra se puede destacar la fachada monumental, con grandes ventanales con vidrieras coloridas separados por pilastras de ladrillo, además del uso de grandes arcos de ladrillo en el interior, con enjutas perforadas, que definen espacios de 44 metros por 12 metros sin mayores divisiones intermedias, dando una gran continuidad visual y espacial y marcando una potente direccionalidad longitudinal, aunque esta linealidad queda parcialmente sesgada por los pilares interiores.⁵⁰



Figura 28: Fachada de la Cooperativa Vinícola de l'Espluga de Francolí



Figura 29: Interior de la Cooperativa Vinícola de l'Espluga de Francolí

Martinell inicia esta etapa de su obra para las cooperativas agrícolas en 1918 con un edificio para la Sindicato de Trabajadores Agrícolas de Rocafort de Queralt, en el que define los que serán los elementos comunes en el resto de sus arquitecturas, como las naves con arcos equilibrados y fachadas monumentales resueltas con tres órdenes jerárquicos; base de mampostería con aberturas para ventilar, un paramento superior uniforme y grandes ventanales con estructura de ladrillo para iluminar. Este será un punto importante de inflexión de cara al resto de su trabajo en esta tipología.⁵¹

Aquí las cerchas son sustituidas por finos arcos de ladrillo, cuyas primeras hileras hacen las veces de encofrado para las siguientes, ahorrando material no tan solo en la forma que no genera desperdicios o material redundante como sucedía con los arcos de medio punto sino también en el sistema constructivo, prescindiendo de elementos de soporte intermedios. Esto último lo lleva en este caso al extremo al hacer nacer los arcos del suelo, no iniciándolos desde un punto elevado sobre un pilar, resultando unos arcos parabólicos ligeros que generan un espacio amplio, diáfano y continuo, con una importante relación visual y espacial, característica de sus arquitecturas.

Existen otras aberturas al nivel del suelo que tienen la función de eliminar el ácido carbónico del interior, incidiendo en la idea de mejorar la seguridad e higiene del espacio

⁵⁰ Ibid.

⁵¹ Ibid.

de trabajo, además de su eficiencia, aislando también para ello las diferentes salas de almacenaje.⁵²

Más tarde se construyó un depósito para el agua, depósito cilíndrico apoyado sobre tres pilares que forman un triángulo, transición que se resuelve mediante el uso de paraboloides hiperbólicos de ladrillo, recordando de nuevo al uso de las superficies de doble curvatura del mismo material que ya empleó el maestro, y que ofrece en su conjunto una de las imágenes más características del edificio.⁵³



Figura 30: Interior del Sindicato de Trabajadores Agrícolas de Rocafort de Queralt



Figura 31: Depósito de agua sobre paraboloides hiperbólicos

El cambio que caracteriza a la tercera etapa es el de reemplazar las vigas y viguetas por bóvedas catalanas, elementos más relacionados con la arquitectura local y tradicional que además se relacionan de manera más interesante con la construcción íntegra en ladrillo que propone Martinell, en un conjunto donde la estructura configura el volumen y el espacio. Es también un sistema constructivo que sigue la línea del uso de arcos equilibrados, siendo autoportante, no requiriendo encofrado o cimbras, ahorrando de nuevo en materiales. Por su capacidad estructural los resultados son de bóvedas mucho más delgadas que las construidas de forma más recurrente, como las de crucería, ejecutándose también con una primera hilada con mortero de yeso o cemento de fraguado rápido y doblándola con otra hilada que hace que la estructura entre en carga y sea inmediatamente estable.

Aunque este tipo de bóvedas no siguen las geometrías funiculares son capaces de resistir a tracción debido a la distribución de esfuerzos dentro del sistema monolítico que forman las capas de ladrillo y mortero, pudiendo soportar además los esfuerzos de flexión y cizalladura que se producen al no ser estructuras que trabajan a compresión pura.⁵⁴

Ya antes, Guastavino había empleado estas bóvedas para ejecutar las cubiertas o escaleras de sus arquitecturas, aprovechando y mejorando sus cualidades acústicas, térmicas y artísticas, pero haciendo uso de ellas principalmente como sustituto

⁵² Ibid.

⁵³ Ibid.

⁵⁴ Ibid.

económico de las bóvedas de piedra o bloque de ladrillo más características de la arquitectura norteamericana. No obstante, este fue un punto de partida para que años más tarde arquitectos como Gaudí, Domènech o el propio Martinell las empleasen en su obra asimilando y haciendo uso de sus ventajas constructivas, trabajando sobre ellas hasta sus últimas consecuencias y logrando así estructuras mucho más expresivas que tenían un lenguaje propio.⁵⁵

A finales de la década de 1910 Martinell crea la que puede ser su obra más icónica en esta tipología, la del Sindicato Agrícola de Gandesa, a partir de la cual el uso de arcos de ladrillo y bóvedas haciendo las veces de cerchas y vigas respectivamente será constante. Las bóvedas quedan dispuestas sobre arcos parabólicos, creando diferentes alturas con el fin de producir juegos con la iluminación, además de acortar las luces para evitar fisuras por causas térmicas. El interior es completamente cerámico, destacando la sinceridad constructiva y el uso intensivo del material, dando una gran unidad al conjunto. En la fachada destacan los tanques de agua, que dan la imagen característica de esta obra, al igual que los pináculos lo hacían en la construcción de Josep Puig para Sant Sadurní d'Anoia o el depósito de agua en la edificación del mismo Martinell en Rocafort de Queralt.⁵⁶



Figura 32: Vista exterior del Sindicato Agrícola de Gandesa

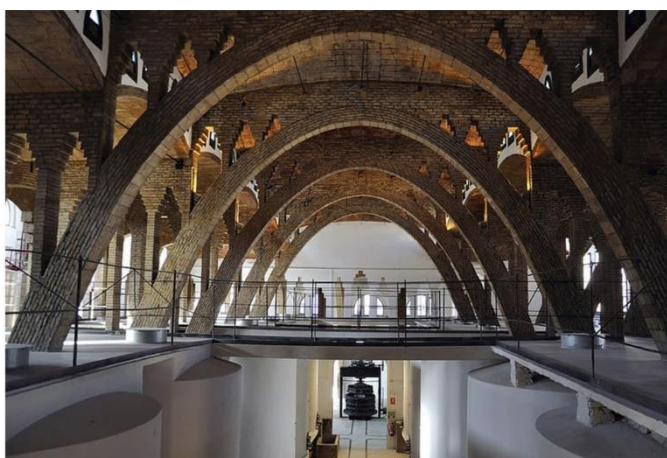


Figura 33: Interior del Sindicato Agrícola de Gandesa

En 1920 lleva a cabo el proyecto del Almacén de grano para el Sindicato Agrícola de Sant Guim, una nave de ladrillo a la que se anexa una crujía con dos plantas destinadas a oficinas y vivienda del encargado, nave que tiene la imagen exterior definida por dos muros de mampostería revocados, resolviéndose estructuralmente con un sistema de arcos parabólicos que marcan las luces en las que se divide la nave. Las bóvedas catalanas tienen sus apoyos en los pequeños pilares que nacen al perforar las enjutas de los arcos, dando una gran unidad constructiva, estética y estructural además de abrir huecos que permiten cruzar ventilaciones.⁵⁷

⁵⁵ Ibid.

⁵⁶ Ibid.

⁵⁷ Ibid.

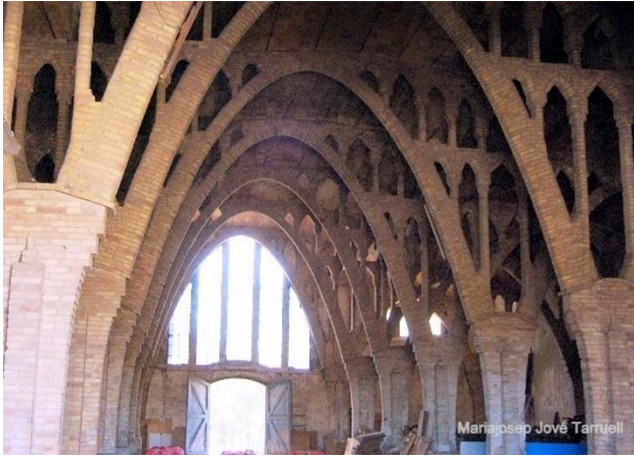


Figura 34: Interior del Sindicato Agrícola de Sant Guim



Figura 35: Detalle de los arcos del Sindicato Agrícola de Sant Guim

Un año después la Cooperativa Vinícola de Sant Cugat del Vallés le encarga el desarrollo de un complejo con el objetivo de optimizar la producción como había logrado con tantas otras asociaciones, aunque por falta de presupuesto finalmente tan solo se construyeron la sala de tratamiento y entrega de la uva, el muelle de carga, las tolvas y las prensas de vino. El edificio principal es de nuevo de planta rectangular, cerrando su parte superior con bóvedas catalanas a diferentes alturas apoyadas sobre arcos equilibrados, similar a la construcción anterior, pero introduciendo un mirador integrado en estas geometrías abovedadas.⁵⁸

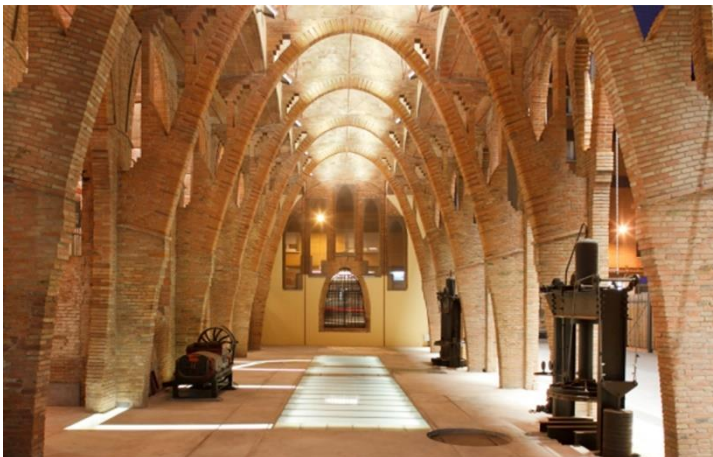


Figura 36: Interior de la nave de la Cooperativa Vinícola de Sant Cugat del Vallés



Figura 37: Exterior de la nave de la Cooperativa Vinícola de Sant Cugat del Vallés

Con los procesos de perfeccionamiento de su tipología, Martinell lograba realizar arquitecturas completas con un uso intensivo de un material básico como es el ladrillo, dejando de precisar elementos ajenos auxiliares en estructura de forma alguna, consiguiendo incluso resolver la parte visual con la unidad presentada en sus obras. No

⁵⁸ Ibid.

obstante, en una última etapa sí que se toma ciertas licencias artísticas para implementar una mayor decoración en sus “catedrales”.

El caso del Sindicato Agrícola de Pinell de Brai es especialmente interesante, ya que en inicio estaba proyectado con el sistema de cubrición de madera sobre muros y pilares de ladrillos, pero se encuentra iniciando la transición en la obra de Gadesa que se realizaba de forma simultánea, obra que vieron los miembros de la primera cooperativa, los cuales demandaron la inclusión de los arcos parabólicos, modificando de este modo la idea inicial, haciéndola más propia de sus arquitecturas posteriores. Al esquema de tres franjas de la fachada sumó un friso con azulejos vidriados ilustrado por el pintor Xavier Nogués, friso que representaba escenas de recolección y tratamiento de la uva, siendo un elemento añadido, ajeno al conjunto armónico de ladrillo, aumentando con él la expresividad y el ornamento de la obra, no considerando suficiente el propio sistema para este fin.⁵⁹

Los arcos de la bodega y prensa de aceite de esta obra fueron estudiados de la misma manera en que se hicieran los de los antiguos almacenes de pólvora del ejército, analizando los dibujos, en los que se ve en segundo plano el entramado previo de vigas de madera que existía en lugar de los arcos en el diseño anterior al cambio. Por el sistema de trazado es probable que se basara en un modelo de catenaria invertida y trasladara los puntos mediante unas coordenadas adoptadas y escaladas, resultando unos arcos que, al compararlos con los ideales de misma luz y altura, encontramos diferencias de tan solo un 1 o 2%. Esto, siendo además un dibujo esquemático, avala el sistema que Martinell empleaba para proyectar estas geometrías, sistema que también habría empleado Gaudí.⁶⁰

Unos años después realizó una de las actuaciones que por su escasez tras la década de 1940 se consideran aisladas, ejecutada concretamente entre 1943 y 1945, diseñando en ella un nuevo volumen junto a la ya existente lechería para la Cooperativa Agrícola y Ganadera de Puigcerdà, volumen destinado a ser la quesería, planta que resuelve como basilical, con pilares cruciformes en la nave central, sosteniendo las laterales con arcos equilibrados, planteando en un nivel intermedio una buhardilla con arcos catalanes sobre vigas que fue demolida tiempo después. En este caso los paramentos fueron enfoscados, destacando los capiteles de los pilares y las hiladas de los arcos, que se dejaron vistos, siendo el elemento decorativo por ocultación del conjunto, perdiendo la unidad en favor de la ornamentación puntual.⁶¹

⁵⁹ Ibid.

⁶⁰ Lluís i Ginovart et al., “Layout of Catenary Arches in the Spanish Enlightenment and Modernism.”

⁶¹ de Llorens Duran, “Wine Cathedrals: Making the Most of Masonry.”

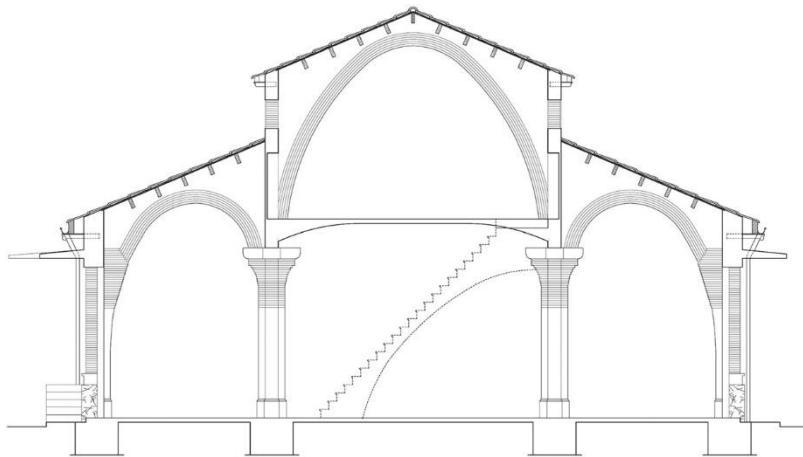


Figura 38: Sección de la nave para la Cooperativa Agrícola y Ganadera de Puigcerdà

Martinell había logrado desarrollar un concepto de arquitectura que hermanaba materiales y técnicas constructivas tradicionales, recuperando el ladrillo en un contexto en el que los nuevos materiales como el hormigón o el acero estaban tan en uso, trabajándolo tanto para las cuestiones estructurales como para las formales e incluso las decorativas, siendo a su vez un material económico, en la línea de la idea principal tras todo este recorrido.

Con el uso del ladrillo para la práctica totalidad de sus obras, Martinell logra resultados con una gran unidad formal, que se potencia en el interior muchas veces gracias a la unidad espacial de la que gozan sus edificaciones, reflejando una sinceridad constructiva y un vínculo con la tradición y el lugar, creando una tipología característica de la región, lo que supone un valor añadido. Todo ello lo consigue creando modelos que trabajan a compresión, entendiendo el lenguaje y las características del ladrillo, siendo todo esto posible gracias a las geometrías equilibradas que siguen los recorridos de las cargas, trabajando de una forma óptima con estas geometrías ideales, como lo haría el maestro Gaudí.

La Mancomunitat y la organización de las cooperativas perduró hasta 1925, año en que el dictador Primo de Rivera las disolvería, desapareciendo la política social y económica que se había iniciado en 1914. La construcción de las denominadas catedrales perduró unos años más hasta la década de 1930, pudiendo encontrarse algunas actuaciones esporádicas en los años 40, dejando como legado arquitecturas que incluso siguen funcionando a día de hoy, aunque muchas de ellas han sido reconvertidas en museos o salas polivalentes precisamente por la grandiosidad de sus espacios.⁶²

Con el tiempo, el sistema que suponía un ahorro material por ser estructuralmente óptimo dejó de ser económicamente rentable debido a que los albañiles capacitados para ejecutarlo disminuyeron en número, lo que conllevaría un coste excesivo pese al ahorro material y el bajo coste que supone el mismo ladrillo.⁶³

Pese a ello, la teoría seguiría siendo válida, pudiendo recuperarse como ya se hizo tras los planteamientos de Robert Hooke, cuando apenas unos pocos ingenieros se aventuraron a ponerlos en práctica, pero quedando preservados los conocimientos

⁶² Ibid.

⁶³ Ibid.

para futuros autores. El sistema funicular es estructuralmente óptimo y supone un ahorro material, por lo que podría ejecutarse bajo determinadas circunstancias, con materiales locales y una mano de obra instruida expresamente para la tarea, siendo especialmente útil para las zonas en desarrollo o con escasez de otros recursos más habituales en la arquitectura contemporánea, como veremos con el Centro de Interpretación de Mapungubwe, la gran obra del arquitecto Peter Rich en Sudáfrica.

3. Formas funiculares en la arquitectura contemporánea

3.1. Nuevas tecnologías. El Gateway Arch

Tras el uso de las geometrías catenarias por arquitectos del Modernisme catalán como Gaudí o las aplicaciones posteriores de Martinell, las formas equilibradas entraron en cierto desuso ya que el ahorro material dejó de significar de manera directa un ahorro en costes de construcción debido al incremento que conllevó su ejecución con motivo de la falta de profesionales especializados. Esta situación cambia cuando se generaliza el uso del hormigón armado en las nuevas arquitecturas, dando lugar a volúmenes catenarios y derivados de otras superficies de doble curvatura que, a diferencia de los creados con materiales disgregados como el ladrillo, con este son mucho más sencillas de erigir.

Tras el auge del Movimiento Moderno muchos autores eran contrarios a la proyección de unas nuevas obras que, además de conservar el carácter racionalista que definía este período, aportasen una visión más expresiva. Autores como Paul Kennon o César Pelli confirmaban el encorsetamiento en el que se encontraban algunos autores, llegando el primero a afirmar que “pensar fuera del marco miesiano era difícil, pensar más allá del Estilo Internacional, imposible”, cita que corroboraría el segundo de ellos al alegar que “sería como estar en contra de la arquitectura”.⁶⁴

Pese a ello, fueron surgiendo nuevas arquitecturas que nacían desde el estudio de la estructura, alejándose del esquema de plantas sucesivas porticadas, ganando mayor expresividad. Uno de los ejemplos más cercanos los encontramos con el arquitecto de origen español y nacionalizado mexicano Félix Candela, que desarrolla su obra en torno a las estructuras de cáscaras, aquellas que aprovechan las cualidades de las superficies de doble curvatura para lograr espacios eficientes y estables, donde se refleja perfectamente desde el exterior el elemento estructural, resistente, pues este es el que crea el volumen.

La Segunda Guerra Mundial supuso un punto de inflexión en todos los aspectos de la vida, y desde luego condicionó la arquitectura y su forma de entenderla. La mentalidad de la sociedad cambió, y lo objetivamente óptimo o correcto perdió peso frente a otras variables, lo que dio pie a otro tipo de soluciones arquitectónicas que contemplasen aspectos como la expresión o el sentimiento, apartándose de un funcionalismo tan estricto, alejándose del ideal de la vivienda como “máquina de habitar”, idealización que, según la arquitecta Elizabeth Mock, alumna de Wright y directora del Departamento de Arquitectura y Diseño del Museo de Arte Moderno, había traído abstracciones demasiado frías, por lo que debería de entenderse la herramienta como un medio para llegar a la arquitectura, y no como el fin de esta.⁶⁵

La nueva sociedad buscaba desarrollar y potenciar una personalidad individual, crítica, alejada de máximas globales y objetivas, pero el trauma de la guerra a su vez propició que estos individuos se agrupasen en comunidades, buscando estrechar lazos y crear una identidad local, nacional e internacional, mostrando este sentimiento de forma pública en el ámbito de la arquitectura con la creación de equipamientos cívicos,

⁶⁴ Mariano Molina Iniesta, “La Catenaria Ponderada de Saint Louis . Ley Universal y Genio Individual En La Evolución Del Movimiento Moderno de Posguerra,” 2016, 110–18.

⁶⁵ Ibid.

culturales y deportivos, como la sede de la Organización de las Naciones Unidas, llevada a cabo entre 1948 y 1952, que debía reflejar la idea de paz entre los pueblos, aspecto que se quiso extrapolar al propio proyecto, en el cual participaron numerosos arquitectos de todo el mundo, buscando llegar a una solución global por encima del individuo aislado. Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto muchos de los autores entraron en conflicto, y la falta de un liderazgo se hizo patente cuando se llegó a un resultado que no satisfizo ni a propios ni a ajenos.⁶⁶

En este contexto se convoca, en 1947, un concurso para conmemorar la compra de Luisiana y la expedición de Lewis y Clark hacia el Oeste del continente americano, concurso que fue anunciado en 1933 durante la época de depresión con el objetivo de revitalizar la zona del río y dar un impulso económico a la ciudad, pero finalmente quedó pospuesto por los avatares que hubieron de sufrir unos años después.⁶⁷

La ciudad de San Luis se ha definido siempre como una Puerta de Conexión con el Oeste. En su inicio quedaba formada por unos asentamientos situados próximos a la confluencia de los ríos Missouri y Mississippi, estableciéndose ya en 1764 como un punto de comercio francés que aprovechaba el acantilado natural de piedra que protegía la zona de inundaciones. Con la presidencia de Thomas Jefferson, el territorio de Luisiana fue comprado y desde él se expandió gradualmente el país, siendo siempre un punto clave en esta expansión.⁶⁸

La creación de un Memorial de la Expansión Nacional de Jefferson (JNEM por sus siglas en inglés) tiene su origen en 1933, tan solo 4 años después del desplome de la bolsa nacional conocida como el Crack del 29, aún con el país sumido en la Gran Depresión, cuando Ely Smith propone la creación de un monumento en la zona frente al río con el objetivo de revitalizar el desarrollo económico de la ciudad de San Luis, que llevaba en decadencia desde las últimas décadas. Para organizar las tareas de desarrollo del monumento en honor a Jefferson y los pioneros de la expansión hacia el oeste, así como de Livingston y Monroe, quienes negociaron la compra del territorio, se crea la Asociación del JNEM, la JNEMA.⁶⁹

Apenas un par de años después, ya en el mandato del presidente Franklin D. Roosevelt, una comisión aprueba la viabilidad del monumento y comienza la tarea de aprobar los diversos presupuestos y desarrollar los planes respecto a los terrenos. Para agilizar estos procesos de financiación y facilitar las futuras reparaciones se declara el emplazamiento como "*National Historic Site*". Desde entonces, hasta casi 1940, la actuación se centraría en conseguir el terreno suficiente, para lo cual se compraron y expropiaron numerosas parcelas y bloques de viviendas abandonadas o en decadencia.⁷⁰

Una vez superada esta primera fase se comienza a trabajar sobre el lugar en relación con el proyecto, destacando la existencia del antiguo Palacio de la Justicia, edificio en ruinas de lo que fue una arquitectura de estilo Neogriego construida a principios del siglo XIX cuyas salas albergaron multitud de procesos judiciales de gran relevancia histórica que significaron el avance en la defensa de los Derechos Humanos, por lo cual el Servicio de Parques Nacionales de los Estados Unidos (NPS por sus siglas

⁶⁶ Ibid.

⁶⁷ Ibid.

⁶⁸ Juvinch R. Vicente et al., "The Gateway Arch Conservation Management Plan," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 1–51, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.9b03822>.

⁶⁹ Ibid.

⁷⁰ Ibid.

originales) decidió conservarlo y emplear dicha edificación como museo y oficinas relacionadas con el futuro monumento. Además, había de tenerse muy presente el río Mississippi, uno de los elementos clave en la futura relación con el monumento del memorial y de su integración global, río que tuvo una gran importancia a lo largo de la historia para la ciudad y su desarrollo.⁷¹

Con el tiempo la importancia de los puertos fue quedando atrás dando paso a una época donde ganaba relevancia la expansión del ferrocarril, para la cual la zona se había adaptado creando vías elevadas que discurrían siguiendo el curso del río, zonas que fragmentaban física y visualmente el espacio, separando el propio río del futuro memorial, por lo que se aprobó un plan para su relocalización con el fin de abrir las vistas y dignificar en gran medida el conjunto.⁷²

Durante el año 1942 se completaron los procesos de demolición de las edificaciones, con la salvedad de la Antigua Catedral y un antiguo almacén de piedra construido en torno a 1818 conocido como *Old Rock House*, considerado de interés histórico por ser de la época en que San Luis era un importante punto comercial, aunque finalmente sería derribado junto con las vías del ferrocarril.⁷³

La entidad organizadora, la JNEMA, buscaba una propuesta monumental e imaginativa, inspiradora y espiritual, siguiendo la línea de los “*living memorial*” desarrollados en posguerra, más que resolver un programa tradicional, integrando a su vez las preexistencias respetadas y las nuevas conexiones de vehículos y ferrocarril. El arquitecto estadounidense de origen finlandés Eero Saarinen participaría en este concurso con una obra que buscaba destacar la importancia de las Naciones Unidas y que ponía además en valor la figura del expresidente Thomas Jefferson, iniciador de la expansión norteamericana. Saarinen quería además dar de nuevo vida e importancia al aspecto agrícola de esta zona del estado.⁷⁴

Para la segunda fase del concurso, en la cual Saarinen ya era finalista, propone una reducción de parte del programa, haciendo especial hincapié en trabajar el apartado urbano con la creación de un gran parque, definiendo el elemento que caracterizará su obra, el gran arco, que recibiría el nombre de *Gateway Arch*. La de Saarinen fue la propuesta seleccionada por unanimidad por parte del jurado, admitida además por los ciudadanos de manera muy positiva. Tan solo una sombra oscureció el éxito del proyecto cuando Gilmore D. Clarke, presidente de la Comisión Nacional de Bellas Artes, puntualizó que el proyecto era demasiado similar al arco diseñado para la Exposición Fascista de Roma de 1942 por Adalberto Libera, problema que no residía tanto en el derecho de autoría como en la cuestión de la necesidad de alejarse de celebraciones fascistas. Sin embargo, el arco italiano era semicircular, no parabólico, y la única aproximación a cualquier geometría equilibrada surgía de la perspectiva escogida para representarlo en un cartel que promocionaba dicha exposición.⁷⁵ Estos fueron los argumentos empleados para defender el trabajo de Saarinen, trabajo que defendió

⁷¹ Ibid.

⁷² Ibid.

⁷³ Ibid.

⁷⁴ Iniesta, “La Catenaria Ponderada de Saint Louis . Ley Universal y Genio Individual En La Evolución Del Movimiento Moderno de Posguerra”; Vicente et al., “The Gateway Arch Conservation Management Plan.”

⁷⁵ Iniesta, “La Catenaria Ponderada de Saint Louis . Ley Universal y Genio Individual En La Evolución Del Movimiento Moderno de Posguerra”; Vicente et al., “The Gateway Arch Conservation Management Plan.”

incluso la que se convertiría en su esposa, Aline Louchheim, quien celebraba además que se pudiese construir una arquitectura que nacía de la inspiración, no tan solo del racionalismo más estricto, alejándose de la conocida máxima del arquitecto Louis Sullivan “*form follows function*”, la forma establecida tan solo en base y servicio a la función. El arco recordaba además a uno de los momentos de gran impacto de la arquitectura del siglo XX, cuando el ingeniero Freyssinet diseñó la estructura del hangar para dirigibles en Orly, Francia, allá por 1916, con la imagen de las magníficas costillas parabólicas que había dado la vuelta al mundo, asombrando a aquel que las veía.⁷⁶

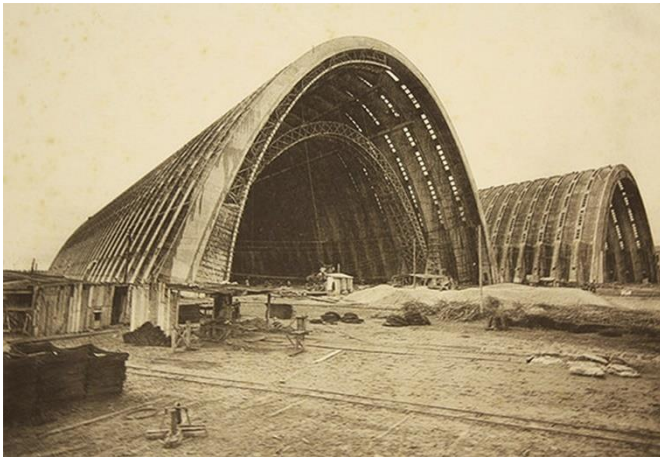


Figura 39: Hangar de dirigibles en Orly



Figura 40: Cartel con el arco de la Exposición Fascista de Roma

El arco finalmente propuesto, evolución de una idea inicial consistente en una estructura de tipo trípode, no es ajeno a su entorno, pese a tener unas grandes dimensiones de 190 metros entre apoyos, 630 pies, y casi 180 de altura, 590 pies, sino que enmarca la cúpula del edificio de los Juzgados, edificio histórico de la ciudad. Su forma catenaria aislada de gran monumentalidad alude a una obra intemporal, pero refleja su tiempo a través de los materiales, reflejando el avance técnico y tecnológico del que ha sido capaz el ser humano, generando un contraste ya desde su primera visualización. Además, esta geometría equilibrada es en sí misma un alarde estructural, alarde que se acentúa por el tamaño de la propia obra. Es casi una escultura, aprovechando Saarinen lo aprendido en París, un gran monumento innovador en cuanto a técnica y acabado, pero evocando al clasicismo más tradicional debido a su dimensión y a sus ejes, generando una línea que lo vincula con el edificio de los Juzgados.⁷⁷

Para trabajar sobre la cuestión del ferrocarril se planteaba la excavación de un túnel que discurriese junto al río, idea que Saarinen rechaza para que no se vea afectada la relación entre su obra y este espacio, por lo que las tres nuevas vías se ubicarían ligeramente alejadas, eliminando las cinco preexistentes junto con, finalmente, el *Old*

⁷⁶ Iniesta, “La Catenaria Ponderada de Saint Louis . Ley Universal y Genio Individual En La Evolución Del Movimiento Moderno de Posguerra.”

⁷⁷ Ibid.; Vicente et al., “The Gateway Arch Conservation Management Plan.”

Rock House. Con esto, hasta bien entrada la década de 1950, ya bajo el mandato de Eisenhower, el principal objetivo fue lograr financiar el proyecto del arco.⁷⁸

El estudio de la curvatura lo aborda junto con el ingeniero Fred Severud, principal de sus colaboradores y pionero en el desarrollo de estructuras sujetas por cables tirantes, trabajando ambos en la búsqueda de una geometría equilibrada pero atractiva desde la perspectiva puramente estética, teniendo en cuenta aspectos técnicos, estructurales y económicos, por lo que tratará de reducir la sección en la medida de lo posible mientras la hace permanecer estable frente a las acciones verticales de su propio peso y horizontales debidas al viento. La estructura planteada en el concurso se habría de construir con hormigón armado formando un núcleo resistente, forrado este con acero inoxidable que actuaría como acabado, pero al aplicar los principios del diseño ortotrópico, novedosos para la época, se llegó a una solución de un arco que apoyaba en su contorno con la combinación de dos catenarias ligeramente diferentes, una de acero al carbono y otra de acero inoxidable, ambas conectadas con placas rigidizadoras y relleno del espacio entre ellas con hormigón postensado en la mitad inferior de la estructura. Acabó empleándose además un encamisado de acero que serviría como andamiaje durante la ejecución, funcionando como armadura con el vertido del hormigón, vertido que finalmente solo se realizaría hasta una altura de aproximadamente 90 metros debido a cuestiones técnicas, por encima de los cuales el arco acabó por ser completamente metálico, por lo que se debieron de comprobar y ajustar los cálculos de estabilidad.⁷⁹

La directriz del arco, aunque equilibrada y estudiada para ser óptima, no se trata de una catenaria ni una parábola perfecta, ya que, al estudiar cómo y cuánto podría reducirse la sección, se encontraron con un esquema de distribución de cargas no uniforme debido a la importancia de la presión del viento. Lejos de suponer un obstáculo, Saarinen aprovechó este suceso para trabajar su geometría con mayor libertad y desde un punto de vista más visual y expresivo. La aproximación a la forma final quedaría relacionada con la inversión de una cadena, como tantas veces atrás, con la diferencia de que la cadena no sería homogénea, sino que tendría los eslabones de diferente densidad o peso, siendo una progresión creciente hacia los extremos, lo que traducido a la realidad resulta en una estructura con una sección variable, metodología a la que le introdujo Bandel, el cual colaboró ajustando los cálculos matemáticos producidos por los diferentes cambios en el modelado del arco. De este modelado surgió la sección final, sección triangular que forma un triángulo equilátero de 54 pies de lado y unos 17 de altura.⁸⁰

La altura de la estructura aumentó hasta los 190 metros, 630 pies, igualándose con la distancia entre los apoyos, resultando un modelo muy próximo a la parábola, más apuntado por una mera cuestión estética condicionada por el crecimiento del skyline de la ciudad, según afirma su colaborador Bruce Detmers.⁸¹

El sistema de trabajo de Saarinen para este proyecto era similar al que empleaba Gaudí en sus obras, con modelos de gran tamaño, sin embargo, invierte el proceso. Si

⁷⁸ Vicente et al., "The Gateway Arch Conservation Management Plan."

⁷⁹ Iniesta, "La Catenaria Ponderada de Saint Louis . Ley Universal y Genio Individual En La Evolución Del Movimiento Moderno de Posguerra"; Vicente et al., "The Gateway Arch Conservation Management Plan."

⁸⁰ Vicente et al., "The Gateway Arch Conservation Management Plan."

⁸¹ Iniesta, "La Catenaria Ponderada de Saint Louis . Ley Universal y Genio Individual En La Evolución Del Movimiento Moderno de Posguerra."

el arquitecto catalán busca llegar a la obtención de una forma a través de una hipótesis de carga que emula con sus maquetas colgantes, el norteamericano busca la hipótesis de carga que proporcionaría de manera equilibrada la forma deseada, algo que por supuesto es solo posible gracias a las herramientas de cálculo de los nuevos tiempos. Resultaría finalmente una solución estable a través de una sección transversal variable, trazando una catenaria ponderada, la inversa de una cadena de densidad variable colgada de dos puntos. Matemáticamente hablando, el objetivo era encontrar la curva cuya segunda derivada es proporcional a la ley de cargas debida al peso del arco, la cual se define por la variación de su sección, la distancia entre los apoyos y la altura en su centro, variables que ajustaba hasta encontrar una geometría satisfactoria.⁸²



Figuras 41 y 42: Maquetas de Saarinen para el Gateway Arch

Debido a la complejidad de la construcción, los dos apoyos debían de aguantar inicialmente como voladizos, ganando mucha más resistencia una vez se uniesen en la parte superior. Hubieron de considerarse las diferentes cargas durante la fase de construcción, así como la sobrecarga de las grúas trepadoras, ya que la envergadura de la estructura impedía ejecutarla con una grúa convencional desde el exterior. Para todo esto, grandes cimientos fueron llevados a cabo bajo los apoyos.⁸³

La NPS quería lograr inaugurar el memorial en 1964, coincidiendo con el bicentenario de la ciudad, lo que suponía unos plazos temporales muy acotados para su ejecución. El control y la gestión de esta ejecución fue encargado a George Hartzog, abogado y director del Servicio de Parques Nacionales. Se dividió el proceso en cuatro fases; la primera con la reubicación del ferrocarril y la construcción del túnel, una segunda para el planeamiento del conjunto y la excavación de los cimientos, la tercera la construcción del arco, museo y centro de visitantes y una cuarta fase con un trabajo de paisajismo. De todo esto Saarinen priorizó el arco, seguido del paisajismo y dejando al final el museo, entrando en disputa con Hertzog, quien defendía que no se podía entender el conjunto sin el museo, siendo para él un elemento principal. Por desgracia, Eero Saarinen fallecería en 1961 a causa de un tumor cerebral, delegando en su estudio la tarea de que su última gran obra fuese completada con éxito.⁸⁴

⁸² Ibid.

⁸³ Vicente et al., "The Gateway Arch Conservation Management Plan."

⁸⁴ Ibid.

Para construir el arco, este fue dividido en 63 segmentos con la doble curvatura enlazada para sostenerse, todo ello sobre una gran cimentación que precisaba de una excavación de 75 por 90 pies en planta y 40 de profundidad en cada apoyo, lo que suponía un tercio del total del hormigón de la obra, que pudo iniciarse en 1962. Los primeros diez metros de la cimentación fueron rellanados con hormigón en masa, a partir de los cuales se dispusieron las barras de acero postensado, barras que por un error de ejecución debieron ajustarse para alinearlas correctamente a la curvatura del arco, lo que supuso un aumento de acero con el fin de evitar una minoración de la resistencia total por el doblado.

Todas estas tareas sobre la estructura de la base finalizaron un año después de su inicio, tras lo cual se comenzaron a levantar los dos arranques del arco de forma simultánea, actuando inicialmente como voladizos, con un sistema de montaje relativamente ágil que consistía en soldar el segmento instalado al anterior, hormigonando tras ello y colocando las barras de acero postensado, cuidando que pudiesen deformar por igual para colaborar en la estabilidad mientras las estructuras fuesen independientes al no estar unidas. Los cuatro primeros segmentos llegaron unidos desde el taller, colocándose como uno solo, los siguientes se fabricaron como tres paneles planos de doble pared y se soldaron en las esquinas y, por encima de los 300 pies, los segmentos se ejecutaron con la soldadura en las caras de tres piezas en L. Tras la colocación de cada uno de los segmentos se dejaba descansar una noche en la que se comprobaba la alineación y la estabilidad antes de soldarlo, soldaduras que a su vez fueron comprobadas de forma recurrente, lo que supuso un trabajo lento y pesado en unas condiciones duras, debiendo de emplear mano de obra muy especializada. Al alcanzar los 60 pies de altura, unos 18 metros, se instalaron las grúas, grúas que eran controladas desde tierra guiadas por torres, trabajando los operarios mediante indicaciones, pero a ciegas, viendo solo a través de los ojos de sus compañeros.⁸⁵



Figuras 43 y 44: Ejecución del arco mediante grúas trepadoras

Hasta el segmento 45, a unos 300 pies de altura, el espacio entre las dos curvaturas se rellenaba con hormigón y acero postensado, refuerzo calculado para resistir también a lo largo de la fase de construcción. En esta cota se percibieron

⁸⁵ Ibid.

ondulaciones en el metal, por lo que se retiró, reparó y reinstaló el segmento, empleando hormigón ligero. Por encima de este punto los alabeos fueron asumidos, siendo estos producidos a la altura de los rigidizadores.⁸⁶

En 1965, habiendo ya pasado el centenario de la ciudad, con sendas estructuras en voladizo alcanzando una altura de 530 pies se instaló un puntal de refuerzo a modo de puente que aseguraba su estabilidad, pues el peso y la propia inclinación de la curva, sumado a la sobrecarga de las grúas, suponía una tensión excesiva para estas semiestructuras.⁸⁷



Figuras 45 y 46: Disposición de la pasarela de refuerzo entre las dos semiestructuras

El punto de mayor complejidad se daba justo al final de la obra, al completar el arco con la pieza de unión de ambas estructuras anteriormente en voladizo, lo que sería la clave en un arco tradicional de ladrillo o piedra. Ambas debían de estar perfectamente alineadas, por eso mismo el cálculo y control de medición fue tan constante, ya que una imprecisión en las soldaduras o en la disposición de los segmentos podría resultar fatal. Sin embargo, el trabajo duro y prolongado dio sus frutos y la desviación de una mitad respecto de la opuesta fue de apenas una pulgada, un par de centímetros. No obstante, estas mediciones se realizaban de noche, durante el día una de las estructuras recibía el sol de manera más directa al encontrarse orientado hacia el sur, dilatando el metal y provocando en este caso diferencias intolerables. Aunque se propuso finalizar el arco instalando la última pieza por la noche, el gobierno de la ciudad pretendía que la conclusión de la obra fuese motivo de celebración local, por lo que, para evitar la dilatación del material, los bomberos rociaron con agua fría la parte afectada, permitiendo así colocar la pieza en un hueco que fue aumentado con unos gatos que ejercían 500 toneladas de presión, presión que fue liberada una vez ajustado y alineado el segmento final. Era un 28 de octubre de 1965 y San Luis pudo recuperar la importancia que gradualmente había perdido desde los Juegos Olímpicos y la Feria Mundial de 1904, evidenciando al país de nuevo como una potencia tecnológica y artística, ya no solo militar y política.⁸⁸

⁸⁶ Ibid.

⁸⁷ Ibid.

⁸⁸ Ibid.



Figuras 47 y 48: Colocación del último segmento del arco

Tras completar satisfactoriamente el arco, en 1966, se comenzaron las tareas de limpieza a mano, complicadas por el frío del invierno que congelaba los productos. Se desmontaron las plataformas y las grúas y se centró la atención en el trabajo que habría de realizarse sobre el centro de visitantes, la zona del tranvía y otras cuestiones menores de jardinería. Para 1968, con el arco completado, se había finalizado también el sistema de transporte interno y el centro de visitantes, dejando para más adelante el museo y la restauración del antiguo Palacio de la Justicia, que deberían esperar mayor financiación ya que los fondos habían sido agotados.⁸⁹

La celebración del acto de conclusión de las obras se realizó el 25 de mayo de 1968, vigésimo aniversario de la aceptación de la Comisión Conmemorativa de la Expansión Territorial de los Estados Unidos, suponiendo dos días de fiestas donde se recordaba la expansión hacia el oeste de los hombres de Jefferson.⁹⁰ El éxito en el desarrollo de esta obra pone de manifiesto la vigencia de este tipo de geometrías, las cuales alcanzan un nuevo grado de perfeccionamiento técnico gracias a las nuevas tecnologías y los materiales de los últimos tiempos, lo que permite trabajar con ellas de forma más libre y expresiva.

El proyecto tuvo firmes detractores entre aquellos defensores del racionalismo más estricto y objetivo, pues veían la curva como un mero capricho estético, poco objetivo y extravagante, además de por aquellos que defendían una aproximación estética, pues para ellos la obra era excesivamente racional al apoyarse en las matemáticas y limitar, según su planteamiento, la creatividad del autor. Sin embargo, tuvo fuertes apoyos entre aquellos que entendían la posibilidad de practicar una arquitectura que supusiera una evolución del Movimiento Moderno, manteniendo la racionalidad del período de entreguerras, pero sin limitarse al funcionalismo más estricto, admitiendo un espectro más amplio de condicionantes de la arquitectura, como las estéticas o emotivas, en una nueva línea en que la objetividad, universal, y la creatividad, individual, pudiesen converger.⁹¹

⁸⁹ Ibid.

⁹⁰ Ibid.

⁹¹ Iniesta, "La Catenaria Ponderada de Saint Louis . Ley Universal y Genio Individual En La Evolución Del Movimiento Moderno de Posguerra."

Debido a las complicaciones durante su ejecución, al interrumpir el hormigonado y proceder a realizar la altura restante metálica, se dudó de que el arco se ajustase de forma perfecta a la geometría matemática calculada, como bien señalaría Osseman.⁹² Sin embargo, pese a no ser una curva funicular pura, sí que logró convertirse en un icono para el país y, en especial, para la ciudad de San Luis, para todos aquellos habitantes que en seguida aceptaron el gran monumento como un signo de victoria y progreso en el que destacaban la unidad formal, la audacia técnica, estructural y tecnológica y, como es evidente, la escala.



Figura 49: Gateway Arch completado

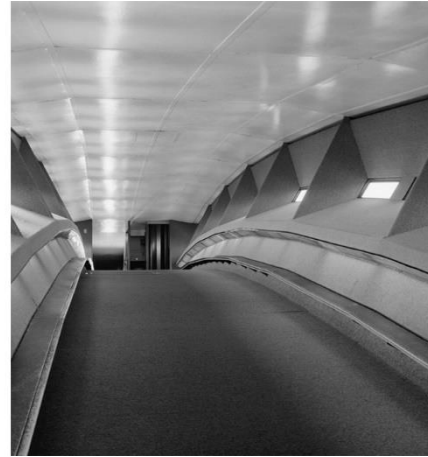


Figura 50: Mirador interior del arco

⁹² Ibid.

3.2. Nuevos materiales. Las inversiones de Heiz Isler

La introducción de nuevos materiales como el hormigón armado propició que, a lo largo del siglo XX, apareciesen numerosas estructuras de poco espesor en su sección conocidas como cáscaras o láminas. Esto fue posible por el diseño de estas mediante la aplicación de geometrías de doble curvatura, aquellas en las que en cualquiera de sus puntos se da el cruce de dos líneas curvas, lo que supone un aumento de la resistencia y la estabilidad. Estas superficies ya eran conocidas, pero la dificultad de ejecución con materiales disgregados impidió su desarrollo y tan solo unos pocos arquitectos como Gaudí optaron por llevarlas a cabo, como hemos podido ver en las bóvedas de la Cripta de la Colonia Güell, donde proyectó paraboloides hiperbólicos de ladrillo. Con el hormigón esto no suponía un problema puesto que se trataba de realizar el vertido en unos encofrados dispuestos para esta tarea, los cuales además solían ser superficies regladas, facilitando aún más su ejecución.

Uno de los arquitectos más importantes de este período es el ya mencionado Félix Candela, del que podemos destacar obras como la Capilla de Palmira, resuelta con un paraboloides hiperbólico, superficie en la que en cada punto cruzan dos parábolas, o el famoso Restaurante Los Manantiales en Xochimilco, México, donde erige una flor artificial en medio de los jardines a partir de la intersección de paraboloides hiperbólicos, edificio que retomaría para plantear en Valencia su última gran obra, el Oceanogràfic.



Figura 51: Capilla de Palmira



Figura 52: Restaurante los Manantiales en Xochimilco

En nuestro territorio tenemos además otras obras del ingeniero Eduardo Torroja, sobresaliendo su cubierta del Mercado de Algeciras, donde logra salvar un diámetro de 50 metros con una lámina de apenas 9 centímetros de espesor, o el Hipódromo de la Zarzuela en Madrid, donde consigue ejecutar esos grandes voladizos gracias al propio diseño, pues se trata de fragmentos de hiperboloide, resultado que no habría podido

conseguir con una estructura de simple curvatura, como el cilindro, precisando de mayor sección y apoyos, perdiendo gran parte del impacto visual y su expresividad.⁹³

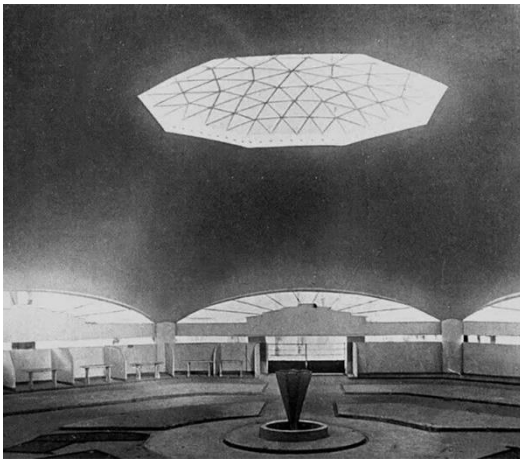


Figura 53: Mercado de Algeciras

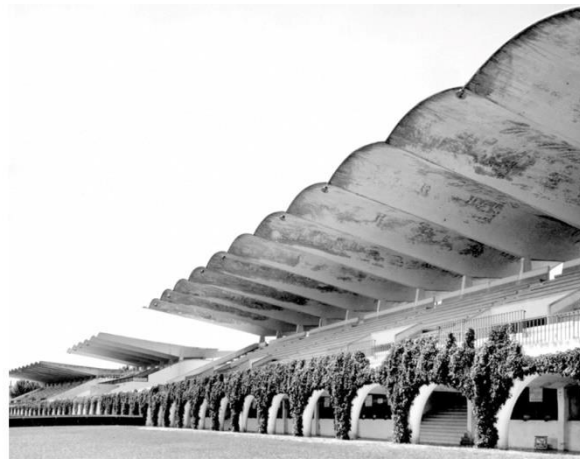


Figura 54: Hipódromo de la Zarzuela en Madrid

Sin embargo, estas geometrías estaban ciertamente acotadas y restringidas a unas formas muy concretas. Esto cambia cuando, en 1959, el ingeniero suizo Heinz Isler presenta en la entonces recién inaugurada Asociación Internacional de Estructuras de Cáscara (IASS por sus siglas en inglés) su texto '*New Shapes for Shells*', donde propone nuevas formas para estas arquitecturas laminares o "cáscaras", propuestas que brindarían una mayor libertad creativa al diseñador. Concretamente introduce tres nuevos grupos, a saber: la colina de forma libre, la membrana bajo presión y la tela colgante invertida. En cada uno de los grupos las soluciones son infinitas y deben adaptarse a las necesidades particulares de cada proyecto, lo que prueba la versatilidad de estas nuevas alternativas.⁹⁴

En su obra destacan los espacios conformados mediante la aplicación de este último grupo. Isler trabajaba, al igual que autores anteriores como Gaudí, con modelos colgantes, disponiendo telas que suspendía de una serie de puntos, pudiendo trabajar sobre las mismas variables que hemos visto anteriormente. Cuando encontraba adecuado el resultado tomaba un modelo de yeso que empleaba para poder medir con precisión y trasladar las cotas escalándolas. Sobre otro modelo de resina aplicaba las pruebas de carga y, una vez superadas, el encofrado a tamaño real era construido en proporción a partir de las maquetas de menor tamaño. El trabajo era manual y experimental, sin apoyarse en soporte informático, pero este modo de trabajo permite un ajuste y control directo sobre la estructura, así como una gran precisión para llevar a cabo posteriormente el modelo real.⁹⁵

⁹³ Chilton, "Heinz Isler's Infinite Spectrum Form-Finding in Design."

⁹⁴ Ibid.

⁹⁵ Ibid.

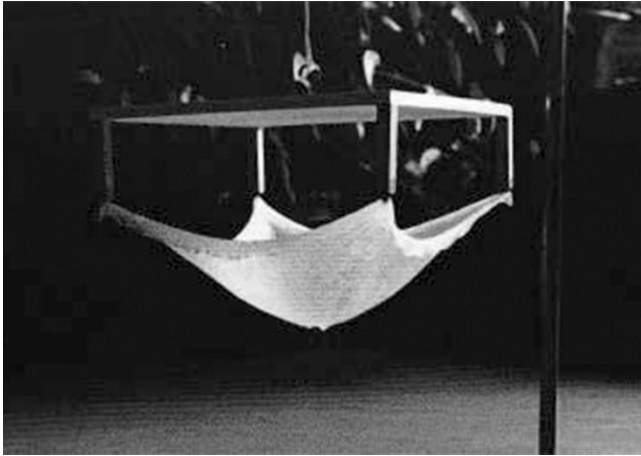


Figura 55: Modelo colgante para la obtención de geometrías equilibradas

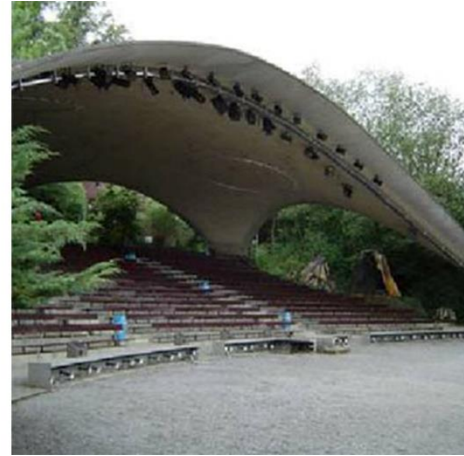


Figura 56: Teatro al aire libre en Grötzingen

Entre los mejores ejemplos de su obra encontramos la Estación de Servicio Deitingen Süd, construida en 1968 a partir de dos caparazones triangulares, o la Fábrica Sicli de Ginebra, un año después, para la que dispone una serie de láminas sobre siete soportes, los puntos de apoyo en la maqueta. También tenemos obras como el Museo del Aire de Dübendorf llevado a cabo en 1987, además de un gran número de cubriciones para pabellones deportivos, piscinas o recintos culturales, como los de los teatros al aire libre de Stetten y Grötzingen, en los que colaboró con el arquitecto Michael Balz.⁹⁶



Figura 57: Estación de Servicio Deitingen Süd



Figura 58: Pabellón de tenis o *tennishalle*

Pese a sus evidentes ventajas, los proyectos desarrollados a partir de modelos invertidos precisaban de encofrados únicos, particularizados para cada una de las obras, lo que suponía un aumento del coste, salvo el caso de los planteados para cubrir algunos pabellones de tenis y piscinas en los que pudieron reciclarse. Esto, sumado a

⁹⁶ Ibid.

que el método de la inversión requería de un gran número de pruebas y ensayos, provocó que apenas fuese aplicado por otros arquitectos de manera generalizada. La libertad creativa que subyace en estos sistemas al poder determinar la cantidad de material, que condiciona la apariencia exterior e interior al controlar la cota vertical se torna en algo negativo a la vista de otros autores que pueden no ver productivo el empleo de tanto tiempo y recursos para hallar un modelo ideal que, además de suponer un ahorro material y ser eficiente desde el punto de vista estructural, sea atractivo desde un punto de vista estético.⁹⁷

Aunque no de manera inmediata, el legado de Isler fue recogido más tarde por arquitectos como Mark West, el cual empleaba un sistema de membranas colgadas para crear encofrados para sus estructuras. También influyó en autores como Peter Rich, como veremos a continuación tomando como ejemplo su Centro de Interpretación en Mapungubwe, Sudáfrica, en el que proyecta bóvedas de mampostería equilibradas.⁹⁸

⁹⁷ Ibid.

⁹⁸ Ibid.

3.3. Avances estructurales. La arquitectura de mallas

Las arquitecturas que trabajan por su forma, como pueden ser las geometrías de doble curvatura, presentan grandes ventajas estructurales al estar sometidas tan solo a esfuerzos axiales, minimizando o eliminando los de corte o flexión, coincidiendo las trayectorias de estas fuerzas con las directrices de los propios elementos resistentes. Esto supone una optimización material, lo que se traduce en un ahorro en los costes de la obra. No obstante, muchas de las geometrías de doble curvatura pueden ser muy rígidas desde el punto de vista del diseño creativo, por lo que un salto en este sentido podría darse con los espacios que se logran mediante modelos invertidos, en los que el arquitecto tiene un mayor grado de control al poder trabajar sobre un mayor número de variables, siguiendo así los pasos de arquitectos como Antonio Gaudí o, más recientemente, Heinz Isler, los cuales trabajaban con maquetas, el primero con cadenas y el segundo con tejidos, que colgaban de un número de puntos. El modelo, que trabaja a tracción, es dado la vuelta para trabajar a compresión pura, conservando las propiedades de las catenarias.

El arquitecto alemán Frei Otto va incluso más allá, buscando una mayor optimización del material con el objetivo de minimizar el impacto energético y lograr una arquitectura más limpia y ecológica, por lo que sustituye las superficies continuas por mallas que trabaja de forma análoga, colgándolas de una serie de puntos que equivalen a los puntos de apoyo estructural en la obra real, a partir de los cuales plantea los diferentes volúmenes hasta llegar a una solución de su agrado.⁹⁹

En 1975 proyecta el *Multihalle* o Sala Polivalente de Mannheim, lo que supone un éxito en la aplicación de los conceptos de las estructuras de malla invertidas. El mismo Otto, como puede recogerse de una entrevista realizada por el arquitecto Juan Songel, se mostraba inquieto ante esta obra, pues era en cierta manera un experimento, aunque cumplió de manera satisfactoria las pruebas de carga. Este espacio fue construido hace ya más de 30 años, lo que es de destacar ya que en primera instancia se planteó para la Exposición Federal de Jardinería como arquitectura efímera.¹⁰⁰

La estructura, que vio la luz gracias a la colaboración de Ove Arup y Ted Happold, quienes asesoraron en esta cuestión a Otto, nace de la inversión de una malla de cuerdas entrecruzadas que trabaja a tracción en el modelo, soportando tan solo su propio peso, resultando al darle la vuelta un complejo volumen en el que aparecen geometrías catenarias y parabólicas trabajando a compresión. Al ser construido con elementos lineales se evidencian las fibras, las cuales representan las trayectorias de las cargas y las dos curvaturas que otorgan semejante resistencia al conjunto, siendo una obra más instructiva que las que se construyen con superficies continuas de hormigón, pues en la de Otto aparecen esas directrices de manera física, además de ahorrar una mayor cantidad de material.¹⁰¹

⁹⁹ Robert Brufau and Joan Ramon Blasco, "El Principi de La Inversió : A Propòsit de La Sala Polivalent de Mannheim," *Quaderns d'arquitectura i Urbanisme* 0, no. 258 (2009): 72–77.

¹⁰⁰ Ibid.

¹⁰¹ Ibid.

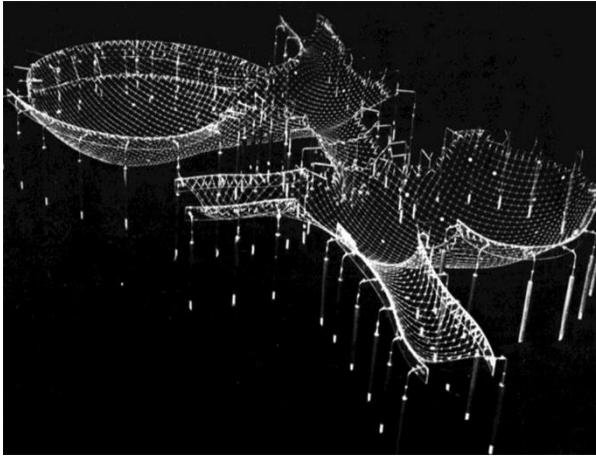


Figura 59: Maqueta invertida del Multihalle

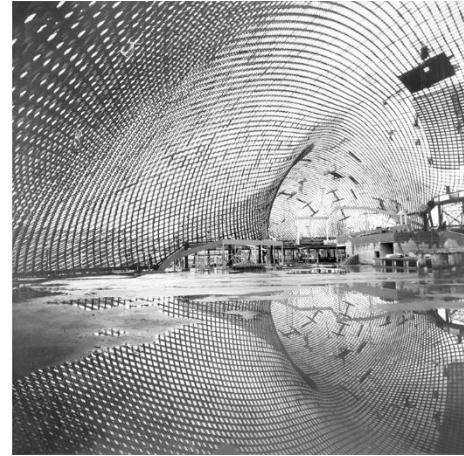


Figura 60: Interior del Multihalle

Este sistema fue continuado por Shigeru Ban, quien siguió un planteamiento muy similar al emplear una estructura de tipo malla, pero empleando tubos de cartón para el Pabellón Japonés de la Expo 2000 de Hannover, obra para la cual pudo contar con el propio Frei Otto, que actuó como consultor estructural.¹⁰²



Figura 61: Exterior del Pabellón Japonés para la Expo 2000 de Hannover



Figura 62: Interior del Pabellón Japonés para la Expo 2000 de Hannover

Las arquitecturas de mallas suponen un avance desde el punto de vista material y estructural ya que ponen de manifiesto el conocimiento del autor de la trayectoria exacta que siguen las cargas. Gracias a esto, el ingeniero alemán Mike Schlaich puede desarrollar obras como el puente TRUMPF, el cual resuelve con una estructura de acero aligerado que forma una malla, llevando la optimización de la geometría al extremo.

¹⁰² Ibid.

En esta obra, la estructura se materializa cuando existen líneas de carga, quedando hueca donde estas se disipan, lo que supone una mayor optimización que en las estructuras equilibradas construidas en hormigón, pues el material en los actuales huecos sería material sobrante, lo que nos remite a la idea original del arco catenario respecto al de medio punto, donde este último puede ser estable al contener el primero en él, pero significando esto que se está empleando material innecesario al no adoptar la geometría ideal.

Así, para diseñar el puente que debe salvar el cruce elevado que conecta la carretera con la fábrica de la empresa que contrató el proyecto, crea un modelo maqueta en el que emplea una malla en lugar de una superficie ligera como una tela, sometiéndola a una hipótesis de carga, lo que provoca que estas fibras trabajen a tracción representando las principales líneas de tensión, propiedades que mantiene la solución inversa real trabajando a compresión, siendo innecesaria la disposición de material en los huecos que deja la maqueta, pues esta representa en sí misma las curvas de la superficie de doble curvatura, pudiendo apreciarse que en cada punto dos de ellas se dan encuentro. En este caso, la fábrica es de corte láser y el puente se dispone completo por comodidad, cortando más tarde con el propio láser los huecos definidos, no suponiendo de esta manera un ahorro material pero sí una demostración y un alarde de conocimiento y eficiencia estructural ya que el propio puente es el esquema de fuerzas sobre él mismo.¹⁰³



Figuras 63 y 64: Puente TRUMPF

La vigencia de este tipo de estructuras, y la cada vez mayor amplitud y precisión de los conocimientos que tenemos de estas, se evidencian en obras como esta, logrando salvar una distancia elevada de casi 30 metros con apenas un par de centímetros de material.¹⁰⁴

¹⁰³ Ter (Ester), "Un Puente Más Fino Que Una Cáscara De Huevo," Youtube, 2019, <https://www.youtube.com/watch?v=VehtDy7n8I>.

¹⁰⁴ Ibid.

3.4. Arquitecturas en desarrollo. La obra de Peter Rich

Uno de los mejores ejemplos del uso que se le puede dar a día de hoy a las geometrías catenarias, uno de los casos en los que se dan algunas de las circunstancias concretas que mencionábamos antes, lo encontramos en la obra del arquitecto sudafricano Peter Rich, en especial con su Centro de Interpretación en Mapungubwe, Sudáfrica.

El territorio de Mapungubwe se encuentra próximo a la frontera de Sudáfrica con Botswana y Zimbabue, donde dan confluencia los ríos Shashe y Limpopo, que modelan este límite al norte del país. Se trata de una zona que ha tenido un desarrollo complejo a lo largo de la historia, siendo entre los siglos XIII y XIV una región próspera al ser uno de los primeros productores de oro, abandonada tras pasar la fiebre de este mineral, dejando la región deshabitada durante alrededor de 700 años, recuperándose en 1933, cuando se redescubre y es ocupada por una sociedad que será una de las primeras de los alrededores en instaurar un sistema de clases.¹⁰⁵

Se trata además de un lugar con una gran variedad de flora y fauna, de la que destacan las aves, con ejemplares milenarios únicos de todo tipo, masas de importante arbolado y montículos pedregosos que se dan encuentro en una constante sucesión de salientes y depresiones del terreno.

En este entorno se enmarca el Parque Nacional de Mapungubwe, declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO gracias a los importantes descubrimientos arqueológicos encontrados en algunos de los montículos, que indican la presencia y ocupación tiempo ha de mercaderes procedentes de lugares como Egipto, Persia, la India, Malasia o China.¹⁰⁶

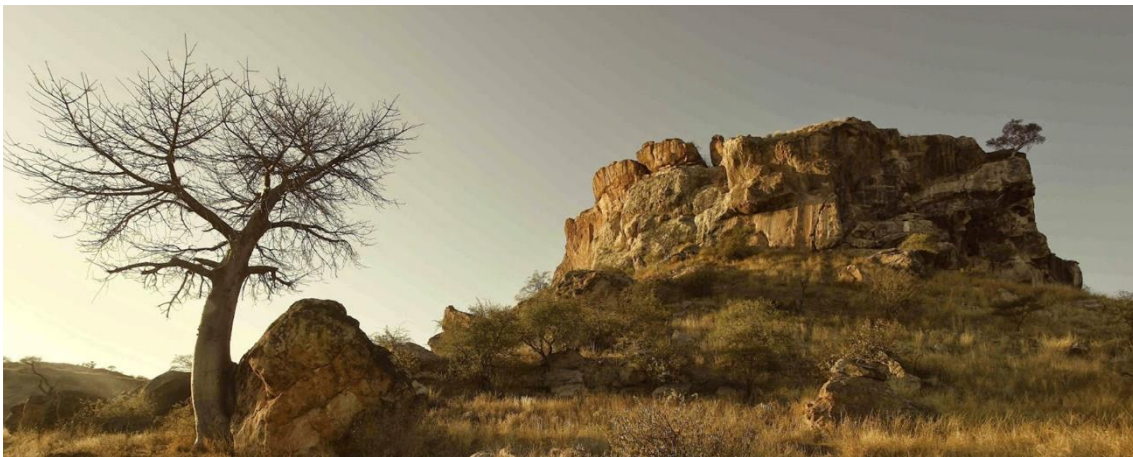


Figura 65: Parque Nacional de Mapungubwe

¹⁰⁵ Michael H. Ramage, John A. Ochsendorf, and Peter Rich, "Sustainable Shells: New African Vaults Built with Soil-Cement Tiles," *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 51, no. 166 (2010): 255–61.

¹⁰⁶ Gabriel Fagan and Obie Oberholzer, "Mapungubwe Interpretation Centre," 2005; Ramage, Ochsendorf, and Rich, "Sustainable Shells: New African Vaults Built with Soil-Cement Tiles."

En el año 2005, un año después de declarar Mapungubwe como Parque Nacional, se convoca un concurso de diseño para realizar en este complejo lugar, lugar en pendiente, rodeado de grupos de arena y árboles, un centro de interpretación. Este concurso lo ganará Peter Rich, arquitecto del propio país y gran apasionado e investigador de las culturas africanas, en especial de las aborígenes, autor que da una gran importancia a la integración de sus obras en el entorno, cuestión de especial interés en este caso.¹⁰⁷

La obra, de más de 1500 metros cuadrados, suponía un auténtico desafío al haber de afrontar una situación llena de contrastes, partiendo del hecho de que se trabajaba sobre un lugar de importancia mundial, pero con una sociedad en situación ciertamente precaria. En este contexto, pese a todo, se propone realizar este centro en el que tienen cabida tanto locales como visitantes, buscando un lugar de turismo, pero a su vez de encuentro.¹⁰⁸

La organización que convocó el concurso fue la Asociación Sudafricana de Parques, la cual buscaba que el proyecto se realizase en un emplazamiento cercano a aquel en que se habían dado los hallazgos arqueológicos. Rich plantea una serie de espacios en los cuales se explicaría la historia del lugar, su evolución desde el pasado próspero hasta su situación actual pasando por el largo período de abandono, todo ello incidiendo especialmente en la cuestión ecológica y medioambiental, destacando la necesidad de proteger el entorno, un entorno importante y vulnerable.¹⁰⁹

Además de las limitaciones de presupuesto y tiempo, se pidió limitar la cantidad de acero necesaria, así como emplear materiales y mano de obra local. Por ello, Rich resuelve el complejo mediante una serie de espacios abovedados, cubriciones que serían realizadas con piedra y teja, sin refuerzos metálicos, disponiendo un encofrado mínimo. La población local fue instruida en la fabricación de los elementos cerámicos, llegando a crear más de 200.000 piezas. Estas baldosas son de tierra compactada y estabilizada con una pequeña cantidad de cemento, lo que supone además de un bajo coste un mínimo impacto ambiental al consumir menos energía, consiguiendo además una mayor integración al reflejar la arquitectura los propios materiales de la zona. Por otro lado, se aprovecha la optimización estructural de las bóvedas para ser ejecutadas con menos soportes auxiliares, ahorrando de nuevo en costes materiales y económicos y generando a su vez menos desperdicios. Esta misma población fue más tarde preparada para llevar a cabo la ejecución de los arcos y las bóvedas, luchando así contra la pobreza al dar trabajo a estas personas, reivindicando la mano de obra propia del lugar, arraigada al entorno, permitiéndoles construir lo que sería uno de los espacios más importantes y emblemáticos de su hogar, el legado para sus familias.¹¹⁰

De este modo deja de ser un problema la búsqueda de albañiles especializados en esta técnica, factor que determinó en gran medida el abandono de estas formas en Europa años atrás. Al formar a nuevos profesionales para esta labor específica vuelve a resultar rentable llevar a cabo geometrías optimizadas con el sistema de construcción tradicional, lo que supone de nuevo un ahorro material, material que ya por sí mismo es económico al ser de tenencia local.

¹⁰⁷ Fagan and Oberholzer, "Mapungubwe Interpretation Centre."

¹⁰⁸ Ibid.

¹⁰⁹ Ibid.

¹¹⁰ Ibid.; Ramage, Ochsendorf, and Rich, "Sustainable Shells: New African Vaults Built with Soil-Cement Tiles."



Figura 66: Construcción de las bóvedas sobre guías



Figura 67: Detalle capas de teja

El proceso de instrucción y formación se dio de forma continua y progresiva, comenzando por la fabricación de las baldosas, para las cuales se empleaba una prensa modificada cubriendo parte del molde con madera contrachapada, obteniendo piezas muy finas, de un par de centímetros de espesor, compuestas por cuatro partes de tierra por cada una de arena de río y cemento, a las que se añadía agua. Estas piezas eran realmente frágiles a la salida de la prensa, por lo que se aprovechaba la madera introducida para su transporte y manipulación.¹¹¹

Posteriormente se montaban las guías y apoyos, los cuales en muchos casos no eran necesarios desde el punto de vista de la estabilidad al ser las bóvedas equilibradas y autoportantes incluso durante su construcción, pero servía de ayuda para que los recién formados operarios pudiesen ver espacialmente el volumen que debían de construir. Estas guías eran ligeras y apenas precisaban de madera, lo que sumado al hecho de que las bóvedas una vez levantadas hacían las veces de encofrados para los elementos sobre ellas, como el hormigón de los suelos, supuso un gran beneficio al ahorrar en el uso de un material escaso y generar menos sobrantes.¹¹²

Para la construcción de las propias bóvedas se seleccionaba a aquellos que mostraban mayores progresos y capacidad en la creación de unas más pequeñas realizadas expresamente para practicar, bóvedas de una sola vuelta y mortero de yeso. Estos albañiles más adelantados se encargaban de crear el intradós de las bóvedas del Centro con mortero de yeso, mientras que aquellos que aún necesitaban prolongar su aprendizaje eran los que habían de colocar las baldosas de las siguientes capas, con mortero de cemento, teniendo ya la primera como encofrado y guía.¹¹³

La obtención de los materiales como la tierra para la creación de las distintas tejas o baldosas se realizó a partir de pequeñas canteras planteadas de forma expresa para el proyecto, las cuales serían tapadas al finalizar la obra para reparar el daño en el entorno, lo que revierte en el ahorro del transporte que, junto a la fabricación manual, eliminando la maquinaria pesada, muestra unos signos de respeto por el medio y la vida en él, expresándolo además de forma física al integrar los elementos de encofrado en

¹¹¹ Ramage, Ochsendorf, and Rich, "Sustainable Shells: New African Vaults Built with Soil-Cement Tiles."

¹¹² Ibid.

¹¹³ Ibid.

la estructura de bóvedas, generando mucho menos residuo y desperdicio al permanecer como primera capa y aumentando la inercia térmica de la cubierta. Por otro lado, el uso de materiales locales en el grueso del complejo supone la reducción del mantenimiento a mínimos, siendo este natural y conocido por los habitantes del lugar, los cuales volverán a trabajar sobre el Centro y su gasto volvería a quedar invertido en la propia población en caso de ser necesarias estas actuaciones.¹¹⁴

El sistema utilizado, con una primera capa unida por mortero de yeso y utilizando mortero de cemento en las posteriores, disponiendo baldosas de poco espesor y apoyado en unas guías que definen su forma es muy similar al empleado por la empresa Guastavino durante los siglos XIX y XX en Norteamérica. Estas estructuras adquieren resistencia a medida que avanza su construcción, lo que agiliza los procesos de ejecución. Este método de construcción puede ser, de acuerdo con la Universidad de Witwatersrand y el Instituto de Tecnología de Massachusetts, el que deba ser empleado por las regiones de África Meridional en sus arquitecturas de desarrollo, pues cuentan con mano de obra más económica que el propio material.¹¹⁵



Figuras 68 y 69: Centro de Interpretación de Mapungubwe

El uso de este tipo de bóvedas nace de una intención de conectar con las formas naturales que pueden encontrarse en todas direcciones desde su emplazamiento, un emplazamiento rodeado por árboles, valles, salientes y entrantes de piedra, elevaciones de diferentes materiales, regulares e irregulares. Además, emplear estas formas repercute de manera positiva al ser estructuralmente eficientes, lo que le permite salvar grandes luces con un grosor mínimo de las cubiertas, suponiendo de nuevo un ahorro material importante, vital en el proyecto en cuestión.¹¹⁶

Las bóvedas funiculares se plantearon muchos siglos atrás, por lo que junto al sistema de construcción evocan a la tradición y la naturaleza al obtenerse de forma orgánica, pero también aportan un aspecto de contemporaneidad al llevarse a cabo el proceso de diseño y optimización empleando las herramientas, en especial las de cálculo, de las que disponemos actualmente. Esta relación, un contraste más en el

¹¹⁴ Ibid.

¹¹⁵ Ibid.

¹¹⁶ Fagan and Oberholzer, "Mapungubwe Interpretation Centre."

proyecto, la consigue entrelazar de forma armónica, por lo que casa de manera casi natural a la perfección.

Con el arquitecto sudafricano colaboraron dos ingenieros especializados en estructuras, John Ochsendorf, del MIT, y Michael Ramage, de Cambridge, junto a los cuales desarrolló un sistema de diferentes tipologías de bóveda, en las cuales se tenían en cuenta los esfuerzos de compresión para lograr resultados equilibrados. Estas sucesiones y conexiones de espacios abovedados remiten a las cuevas, tan socorridas por las culturas pasadas, no tan solo para buscar refugio y protección de las inclemencias climatológicas, sino que se convirtieron en los primeros hogares y fueron incluso empleadas para realizar ritos y ceremonias, adquiriendo una importancia similar a la que gozan a día de hoy los templos de las diferentes confesiones religiosas.¹¹⁷ Estas formas evitan la aparición de esfuerzos de corte o flexión, siendo suficiente su ejecución con piezas de tierra local estabilizada con cemento en 7 capas, la suma de las cuales apenas llega a generar una sección de unos 20 centímetros, siguiendo un método similar al empleado por el arquitecto Rafael Guastavino, herencia de las arquitecturas valencianas y catalanas.¹¹⁸

A estas bóvedas equilibradas, parabólicas, de doble curvatura, se llega a través de un proceso de aplicación de la estática gráfica, obteniendo resultados que trabajan tan solo a compresión por su forma, evolucionando de los primeros planteamientos de bóvedas de cañón de simple curvatura, lo que permite salvar mayores distancias, de hasta 14.50 metros, con un espesor mínimo. Donde sí se emplean las bóvedas de cañón, entre otras tipologías de cúpula, es para el encofrado de algunos techos.¹¹⁹

Lo que busca el arquitecto es una solución a compresión simple cuyas tensiones se encontrasen dentro de la propia sección de material, como ya indicaba Heyman en su Teorema de la Seguridad, llegando a una de las potencialmente infinitas hipótesis de carga válidas. Para verticalizar las cargas, minorando la componente horizontal debida al viento, se disponen unas cubriciones de material local, lo cual añade masa y por tanto peso al elemento resistente y potencia la relación de este Centro con su entorno.¹²⁰

El recorrido del Centro de Peter Rich se inicia con el acceso desde el valle, desde donde pueden apreciarse los volúmenes de las bóvedas que se entrelazan con los propios de la ladera en un paso más hacia la integración de la obra con su entorno. Desde este punto ya puede comenzar a atisbarse la colina por la que comenzó todo, aquella que alberga el yacimiento, y todo el proyecto discurre desde aquí en relación con este hasta desembocar en una meseta de 14 metros de altura en la que se ofrece una amplia vista que nos sitúa en contexto. El arquitecto aprovecha la gran presencia del lugar para introducir una arquitectura cargada de contrastes en la cual varía las direcciones, juega con las orientaciones y muestra diferentes estructuras y volúmenes, como las pasarelas cubiertas que discurren conectando los espacios abovedados o los vacíos entre estos en los que crea patios con elementos naturales autóctonos o incluso artificiales, como algunos estanques.¹²¹

¹¹⁷ Ibid.

¹¹⁸ Bradley and Gohnert, "Three Lessons from the Mapungubwe Shells."

¹¹⁹ Ramage, Ochsendorf, and Rich, "Sustainable Shells: New African Vaults Built with Soil-Cement Tiles."

¹²⁰ Ibid.

¹²¹ Fagan and Oberholzer, "Mapungubwe Interpretation Centre."



Figuras 70 y 71: Centro de Interpretación de Mapungubwe

Para evidenciar la relación del Centro con el yacimiento dispone una serie de triángulos equiláteros a lo largo de un eje que conecta ambos puntos, un recurso algo abstracto pero que aprovecha para ordenar los espacios, agrupar o separar volúmenes y vacíos y marcar los espacios interiores y exteriores, así como para destacar puntos de especial interés. La geometría del triángulo alude a la cultura Venda, sociedad local que acostumbraba a disponer sus viviendas en grupos de tres, formando también un triángulo equilátero, el cual era cerrado con muros de poca altura, formando pequeñas comunidades dentro de otras mayores. La forma del triángulo, además, recuerda al propio yacimiento, puesto que en él se encontraron diversas tallas con esta geometría.¹²²

Desde el acceso que se da en el aparcamiento, parcialmente en penumbra, semioculto, comienza el recorrido de una exposición al aire libre que pone en contexto al visitante, el cual se magnifica con las vistas de la ladera. Desde ahí se llega a la recepción a través de un puente inclinado, recepción que es perforada para ser bañada por la luz del sol. A partir de este punto puede accederse a la zona de restaurante, transición parcialmente cubierta con una gran bóveda que protege este espacio exterior. En caso contrario, puede continuarse el recorrido a través de un oscuro pasillo que desemboca en una pasarela inclinada, la cual finaliza en el umbral de las zonas de exposición de la cripta, unos espacios abovedados decorados con cerámica ilustrada con los más grandes e importantes personajes de la historia de Mapungubwe, quedando un lugar casi ceremonial, con una gran carga expresiva y sentimental que es intensificada por el propio recorrido realizado en instancias anteriores, el cual te aísla del resto de sensaciones y prepara para la que produce la cripta, acrecentándola.¹²³

La disposición de las bóvedas a alturas no muy elevadas permite crear zonas en sombra, la cual se transforma en penumbra al dejar penetrar ligeramente la luz a través de pequeñas rasgaduras, lo que vuelve a generar ambientes casi religiosos en los cuales se ubican la mayoría de exposiciones interiores. Las aberturas se protegen con policarbonato y tallos de eucalipto de una luz demasiado potente y directa, y se añaden rejillas de hierro para preservar el espacio del paso de animales como los babuinos,

¹²² Ibid.

¹²³ Ibid.

rejillas que forman un patrón floral reproduciendo la forma de la planta *kanniedood*, planta característica de la flora autóctona y que recupera en los patios interiores.¹²⁴

Para dar cierta sombra sobre los espacios de reposo y encuentro exteriores, como las terrazas, se disponen una serie de listones de madera, logrando espacios que recuerdan a los de reunión de las tribus y sociedades tradicionales africanas, conocidos como los *kgotla*.¹²⁵

El recorrido finaliza al llegar a la zona superior, también abovedada, la cual se curva hacia las zonas elevadas y presenta ondulaciones en los laterales, donde apoya de forma vertical en sendos muros. En esta sala se encuentra uno de los tesoros del pueblo de Mapungubwe, un rinoceronte dorado, el cual es iluminado a través de un vidrio coloreado, volviendo a presentar un efecto que alude a la tradición y a lo espiritual. Es un espacio en el que conviven el pasado, la historia y el futuro a través del legado de un pueblo que quiere renacer y desarrollarse sin olvidar de dónde viene.¹²⁶



Figuras 72 y 73: Centro de Interpretación de Mapungubwe

Con este proyecto Peter Rich consigue crear una arquitectura representativa de una sociedad, la cual a su vez se ve beneficiada de ella en muchos aspectos, en especial y el más evidente, el económico, haciendo que la economía crezca y pueda prosperar con el uso de materias y trabajadores locales, todo ello desarrollando una gran obra que supone un pequeño impacto ambiental y energético en la línea de pensamiento del arquitecto, lo que resulta muy adecuado tratándose de un lugar que es Patrimonio de la Humanidad declarado por la UNESCO y al que se debe un especial respeto.

Comparando el coste económico de las baldosas empleadas con soluciones que actualmente son más habituales, como el hormigón armado, obtenemos un 30% de rentabilidad añadida, pudiendo aumentar en los casos en los que no fuesen fabricadas con una productividad tan baja como fue el caso de este proyecto debido a los medios disponibles. Además, hay que destacar que gran parte de este presupuesto queda en

¹²⁴ Ibid.

¹²⁵ Ibid.

¹²⁶ “Centro de Interpretación Mapungubwe / Peter Rich Architects | Plataforma Arquitectura,” from <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/767264/centro-de-interpretacion-mapungubwe-peter-rich-architects>.

las comunidades locales, mejorando su economía, por lo que puede entenderse incluso como una inversión. Por otro lado, al emplear materiales próximos se da un ahorro en combustible al minimizar los transportes, sobre todo si tenemos en cuenta la situación aislada de Mapungubwe. Esta inclinación por lograr una arquitectura ecológica y eficiente puede verse incluso en el uso de las herramientas manuales propias de la localidad, las cuales contaminan menos al precisar de menor cantidad de energía, generan menos residuo y respetan en mayor medida la flora y fauna.¹²⁷

Sin embargo, aún con todo esto, la mayor virtud de Rich se da en su forma de trabajar y relacionarse con aquellos que van a vivir su arquitectura, una arquitectura que nace y se cimienta en la comprensión y el diálogo. El autor sudafricano tiene en cuenta el lugar, pero no tan solo desde un punto de vista material o paisajista, sino también social, abordando aspectos que en primera instancia pueden parecer más alejados de la arquitectura, pero que realmente la condicionan y definen. Rich habla y se relaciona con las comunidades allí presentes, se interesa por la cultura, la historia, las familias, animales... todo para conocer y comprender las inquietudes de los que precisan de sus conocimientos y solventar sus necesidades, no tan solo desde un programa definido por una entidad organizadora, no siendo ajeno a todos ellos ni desentendiéndose una vez acabada la fase de proyecto, sino en constante diálogo y comunión con aquellos sin los que el levantamiento de estas arquitecturas no tendría sentido alguno.

En el libro escrito por su compatriota Jonathan Noble, '*Conversations with Africa*', explica cómo surge la idea de proyecto, justifica el uso de estas formas catenarias, recordando a autores desde Wren hasta Gaudí, aquellos que en épocas pasadas emplearon de forma pionera estas geometrías y que han servido de estudio e inspiración, habla sobre los materiales y la mano de obra local y el sentimiento de arraigo a un lugar, el cual puede verse fortalecido al hacer a la población partícipe de la obra, logrando un Centro que se integra en el entorno ya no solo desde un punto de vista físico, arquitectónico o estético, sino también social y personal.¹²⁸

Rich trabaja su arquitectura, y en especial el Centro de Interpretación, desde su relación y raíces africanas, investigando en este caso la arquitectura del pueblo Ndebele, aplicando el "espacio análogo" y social africano a sus viviendas y espacios públicos. Detrás de sus arcos y la unidad interior de su obra se encuentra una arquitectura modernista inspirada por su maestro, Pancho Guedes.¹²⁹

Como el profesor que es, logra ejecutar un proyecto que instruye al resto de profesionales y a la sociedad en general, combinando la parte estética con la funcional mediante un sistema de espacios abovedados y caminos que los recorren integrándose en el paisaje, poniendo en valor el trabajo tradicional y recuperando conceptos y conocimientos que ya fueron aplicados, dando imagen a las personas, enseñando que para lograr una buena arquitectura social es muy necesario el diálogo con aquellos que la han de vivir.¹³⁰

¹²⁷ Ramage, Ochsendorf, and Rich, "Sustainable Shells: New African Vaults Built with Soil-Cement Tiles."

¹²⁸ Lund Humphries, "The Architecture of Peter Rich: Conversations with Africa, Jonathan Noble," 2021, 90–92.

¹²⁹ Ibid.

¹³⁰ Ibid.

Rich toma apuntes, dibuja y aprende de todos los lugares del mundo, incluso de aquellos edificados por gente humilde, sin estudios de arquitectura, pero con la experiencia del lugar y la vida, aplicando lo aprendido posteriormente a su obra.¹³¹



Figuras 74 y 75: Centro de Interpretación de Mapungubwe

Con el tiempo han ido evidenciándose ciertos desperfectos en estas estructuras, fruto en muchos casos de decisiones que hubieron de tomarse para poder completar la obra sujetos a un presupuesto tan bajo, provocando la aparición de grietas, principalmente en la zona de las aberturas, donde se concentran las tensiones.

Aunque las bóvedas trabajan fundamentalmente a compresión, viéndose sometidas a esfuerzos axiales inscritos en su sección, algo característico de las estructuras que trabajan por su forma, es cierto que aparecen otros esfuerzos en determinados puntos, esfuerzos que incrementan su daño al no existir en la mayoría de casos refuerzos de acero que los palien. Pese a ser unas superficies estudiadas para ser equilibradas e idóneas desde el punto de vista de la estabilidad, pequeñas imperfecciones pueden provocar en estos casos que estas concentraciones de tensiones se muestren de forma física.¹³²

Una de las zonas donde más se han mostrado estos desperfectos es en los labios o cejas que generan las aberturas, concretamente en la línea que marca el cambio de curvatura, donde se producen unos incrementos tensionales. Esto se produce por la aplicación directa del principio de inversión cuando se cuelgan elementos como las telas, donde aparecen estos labios que, aunque de geometría catenaria, no colaboran de forma proporcional en favor de la estabilidad. No sucede así con los modelos de idénticas proporciones planteados con cadenas, resultando las mismas soluciones que los anteriores, pero sin estos añadidos, lo que indica que estas subestructuras son prescindibles.¹³³ No obstante, el equipo de diseño y cálculo muestra ser consciente de este posible problema ya que en esos puntos sí que disponen tirantes de acero, material de uso muy restringido en la obra por su escasez y costo.¹³⁴

¹³¹ Ibid.

¹³² Bradley and Gohnert, "Three Lessons from the Mapungubwe Shells."

¹³³ Ibid.

¹³⁴ Ramage, Ochsendorf, and Rich, "Sustainable Shells: New African Vaults Built with Soil-Cement Tiles."

Otro de los puntos donde se han encontrado mayores daños superficiales es en el encuentro con los muros verticales, donde se han formado enlaces solidarios que han impedido la dilatación o contracción del ladrillo, en especial en aquellos próximos a carpinterías o cambios de material, dándose encuentro elementos con diferentes propiedades y respuestas térmicas, algo sencillo de resolver con juntas de dilatación en torno a los huecos y muros de cierre, sin ser mayor problema al tratarse de un sistema constructivo bastante homogéneo por lo general.¹³⁵

Una de las principales zonas de conflicto en cualquier tipo de arquitectura se da en torno a los huecos, pues estos suelen alterar la distribución de tensiones en mayor o menor medida. En estas geometrías, en especial, la forma óptima de abrirlos es con geometrías catenarias, algo que Rich lleva a la práctica de manera correcta en su Centro. Sin embargo, por una cuestión económica, las guías para realizar las bóvedas y los huecos fueron reutilizadas, lo que supone que no todos los huecos tienen las proporciones óptimas, resultando en la aparición de pequeñas grietas, las cuales adoptaban a su vez una forma catenaria.¹³⁶ Como ocurría con las estructuras de Heinz Isler, el encofrado debía ser creado para cada proyecto de forma única y particular, algo que simplemente no pudo asumirse en este caso por la humildad del mismo. Aun así, Rich minimizó este daño al crear una serie de módulos de forma que, pese a no ser siempre las subestructuras de apoyo las ideales, se pudiese minimizar esta desviación y el daño producido.



Figura 76: Reparación en el cambio de curvatura



Figura 77: Grietas próximas a la abertura catenaria

Pese a todo esto, Peter Rich logra crear una gran arquitectura que tiene muy presente la cuestión social, fruto de un profundo interés por mejorar con su trabajo la situación de aquellos a los que va a influir de forma directa o indirecta. De hecho, su obra no se limita a sí misma, sino que al enseñar a la población local nuevos métodos de trabajo esta los hace suyos y los aplica en sus propias viviendas, sustituyendo las cubiertas que acostumbraban a rematar con un sistema de chapa metálica por las bóvedas equilibradas de teja, ganando en eficiencia térmica, manteniendo el espacio fresco de día e introduciendo el calor acumulado de noche, favoreciendo la ventilación

¹³⁵ Bradley and Gohnert, "Three Lessons from the Mapungubwe Shells."

¹³⁶ Ibid.

natural por su forma, y ganando en vinculación con su territorio por el propio uso del material local.¹³⁷ Estos pequeños desperfectos, superficiales en su mayoría, pueden entenderse como un reflejo de esta cuestión, una muestra de lo que se ha logrado partiendo desde la humildad más absoluta, pues ha sido capaz de levantar un complejo que se integra en su particular entorno, beneficia a una sociedad precaria y en desarrollo y emerge con unas formas óptimas, evidenciando de nuevo la vigencia de estas, mostrando de lo que son capaces al cumplir las condiciones ya mencionadas en diferentes ocasiones, teniendo en cuenta aquellas que propiciaron su desuso.

El propio arquitecto es consciente de las posibilidades que ofrece el uso de estas geometrías equilibradas, pudiendo encontrarlas en su obra, especialmente en el continente africano, con arquitecturas como la Reserva Privada Leopard's Den o la Boutique de Gheralta Lodge al norte de Etiopía, para la que repite el sistema y acabado del Centro de Interpretación de Mapungubwe, introduciendo de nuevo unas geometrías optimizadas que se relacionan excepcionalmente con su entorno, pero también podemos verlas en su proyecto del Earth Pavilion, expuesto en Londres en 2010, en el que muestra las bondades de estas estructuras, permitiendo darlas a conocer a más personas al situar el prototipo en el jardín del príncipe de Gales, presentándolas e iniciando a mayor población en la arquitectura ecológica y eficiente y llamando la atención sobre la situación en los países en desarrollo, utilizando como reclamo el hecho de que emplea tierra de la zona, tierra común aunque rica en arcilla, para construir baldosas especialmente frágiles al utilizar poco cemento, cuando lo habitual suele ser buscar una solución que presente una resistencia superior, probando así la eficiencia del sistema y concienciando sobre las posibilidades de este y la necesidad de la aplicación en los lugares en crisis.¹³⁸



Figura 78: Gueralta Lodge's Boutique



Figura 79: Earth Pavilion

¹³⁷ Ramage, Ochsendorf, and Rich, "Sustainable Shells: New African Vaults Built with Soil-Cement Tiles."

¹³⁸ Rob Gregory, "Earth Pavilion by Peter Rich Architects and Michael Ramage, London, UK," *The Architectural Review*, <https://www.architectural-review.com/buildings/earth-pavilion-by-peter-rich-architects-and-michael-ramage-london-uk>.

3.5. Proyectando hacia el futuro. Las estructuras de Philippe Block

Las arquitecturas de arco o derivadas de estos, empleadas desde antiguo por múltiples civilizaciones como la romana, son estables por la suma de sus elementos, pudiendo colapsar por la ausencia de tan solo uno de ellos, como ha sucedido en múltiples ocasiones debido a desplazamientos o movimientos diferenciales.¹³⁹ El empleo actualizado de estas geometrías permite aprovechar sus propiedades para producir espacios en los que pueda reducirse el uso de cimbras y materiales de unión, trabajando por fricción y, sobre todo, compresión, creando una serie de secciones estables sobre las que apoyen el resto de elementos, siendo posible que la estructura sea autoportante incluso mientras es construida.¹⁴⁰

La evolución de estas formas atendiendo a sus propiedades da pie a la introducción de materiales ligeros, abriendo la puerta a incorporar tecnologías novedosas como la impresión 3D, lo cual abarataría los costes y supondría un ahorro de energía, recuperando la tradición y aplicando los procesos tecnológicos actuales para lograr su optimización.¹⁴¹ Un ejemplo de esto es presentado por el Block Research Group con su obra “*Armadillo Vault*” para la exhibición *Beyond Bending* de la Biennale de Venecia de 2016, logrando crear una bóveda sin mortero de tipo alguno, desafiando los métodos tradicionales de construcción y albañilería, pero por el contrario precisando de una importante cimbra.¹⁴²



Figuras 80 y 81: Armadillo Vault en la Biennale de Venecia de 2016

Precisamente este grupo, encabezado por Philippe Block, en colaboración con el ETH de Zúrich, busca optimizar los métodos de construcción consiguiendo desarrollar estructuras de tipo “cáscara” empleando tan solo dos brazos robóticos que varían su posición conforme avanza el proceso de ejecución. Su inspiración puede encontrarse

¹³⁹ Philippe Block, Tom Van Mele, and Matthias Rippmann, “New Compression Shells Inspired by the Past,” *Architectural Design*, 2015, 74–80.

¹⁴⁰ Philippe Block, Matthias Rippmann, and Tom Van Mele, “Compressive Assemblies,” *Architectural Design - Autonomous Assembly* 87 (2017): 104–9.

¹⁴¹ Block, Van Mele, and Rippmann, “New Compression Shells Inspired by the Past.”

¹⁴² Block, Rippmann, and Mele, “Compressive Assemblies.”

en obras como la cúpula del Palacio de Deportes en Tiflis, Georgia, para la que se necesitaron un par de grúas en el interior, prescindiendo de cimbras. Aunque es una forma mucho más simple que las arquitecturas a las que aspira este grupo, se debe tener en cuenta que se trata de un proyecto llevado a cabo en 1961, el cual pudo ya entonces salvar una luz de 75 metros con este sistema, marcando un hito y suponiendo una guía sobre la que apoyarse para trabajar en esta línea mirando hacia adelante.¹⁴³



Figuras 82: Palacio de Deportes en Tiflis, Georgia

En la búsqueda de poder desarrollar formas complejas que supongan estructuras estables por la suma de sus piezas se ha llegado a la necesidad de mejorar las técnicas de estereotomía, optimizar y afinar los sistemas de corte y despiece, ya que los sistemas actuales son insuficientes, evitando así que la propia fabricación y construcción suponga el límite para el diseño de este tipo de estructuras.¹⁴⁴

Trabajar con estructuras que por su forma trabajan a compresión pura permite emplear materiales que no sean resistentes a otros esfuerzos, tales como los de flexión o cizalladura, pudiendo realizar arquitecturas en ladrillo, hormigón o piedra, incluso tratar con aquellos reciclados o locales en lugares donde no sea posible o rentable acceder a los de mejores prestaciones. Además, permite prescindir del uso de refuerzos metálicos, lo que supone un ahorro económico, pero también mejora las propiedades de resistencia al fuego.¹⁴⁵ Todo esto puede verse en la ya analizada obra de Peter Rich para Mapungubwe.

El grupo de Block ha trabajado en el desarrollo de herramientas específicas para estas estructuras, como el Análisis de Redes de Empuje (TNA por sus siglas en inglés), que parte del Teorema de la Seguridad de Heyman para hallar una de las múltiples condiciones de equilibrio buscando una red de fuerzas contenida en la estructura que confirme su estabilidad, obteniendo a través de un software que contiene de forma implícita la estática gráfica diferentes formas de equilibrio para unas condiciones de entrada, pudiendo el proyectista ajustar el resultado o incluso manipular las condiciones iniciales hasta llegar al resultado deseado, siendo un proceso mucho más ágil y dinámico que los que han sido posibles hasta la fecha. Además, retoman la metodología

¹⁴³ Ibid.

¹⁴⁴ Block, Van Mele, and Rippmann, "New Compression Shells Inspired by the Past."

¹⁴⁵ Ibid.

de tantos autores anteriores al emplear modelos a escala para comprobar las estructuras diseñadas, en especial utilizando maquetas invertidas para buscar estructuras que trabajen a compresión, cuyo resultado es realmente similar al real.¹⁴⁶ Este tipo de modelos a día de hoy son más sencillos de obtener gracias a la impresión 3D, pero deben su inspiración a los desarrollados por arquitectos anteriores como Antonio Gaudí, Heinz Isler o Frei Otto, cada uno con sus respectivos materiales y posibilidades tecnológicas dependientes de su tiempo. El avance de estas herramientas permite vincular la resistencia y estabilidad de la obra, factores objetivos y necesarios, con la expresividad fruto de la creatividad del diseñador, de carácter subjetivo.¹⁴⁷

Aplicando estos avances al amplio conocimiento sobre obras con bóvedas de material disgregado como el ladrillo carentes de refuerzo pudieron llevar a cabo el proyecto del Prototipo de Unidad de Vivienda Urbana Sostenible o SUDU en Addis Abeba, Etiopía, salvando un gran espacio con una estructura que no se ve sometida a esfuerzos de flexión, pudiendo prescindir por tanto del uso de acero de refuerzo, empleando para construirla materiales locales, lo que supuso finalmente un coste menor a 60 euros por unidad de superficie, inferior al umbral de bajos ingresos definido por el país, dando un mayor significado a la construcción de “bajo coste” en zonas en desarrollo o en situación precaria, donde hasta el momento era común encontrar proyectos que empleaban materiales convencionales como el hormigón, agravando el absurdo de algunas de estas prácticas cuando además se debía de importar este material, incrementando el precio de la obra, una obra en teoría social y eficiente.¹⁴⁸



Figura 83: Exterior del proyecto SUDU



Figura 84: Interior del proyecto SUDU

Una de las obras más impresionantes que demuestra hasta dónde es capaz de llegar este tipo de estructuras se encuentra en el parque MLK Jr. en Austin, Texas, donde se dispone una bóveda de piedra, sin refuerzos y colocada en seco, que logra

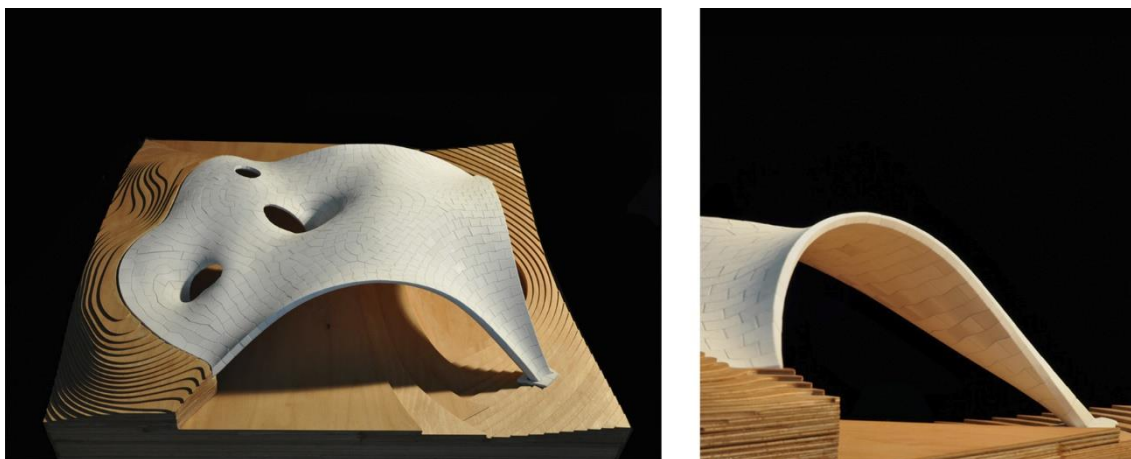
¹⁴⁶ Ibid.

¹⁴⁷ Philippe Block, “Parametricism’s Structural Congeniality,” *Architectural Design - Parametricism* 86, no. 2 (2016): 68–75.

¹⁴⁸ Block, Van Mele, and Rippmann, “New Compression Shells Inspired by the Past.”

cubrir un área de unos nada despreciables 600 metros cuadrados con una altura máxima de 30 metros.¹⁴⁹

La resolución de estos espacios con este tipo de superficies, además, supone un ejercicio de sinceridad constructiva, como bien abandera el propio grupo con el eslogan “la mampostería no miente”, ya que el correcto funcionamiento de la estructura se debe a un óptimo diseño estructural al trabajar por su forma a compresión, sin existir armaduras al no darse fenómenos de flexión, colapsando esta en caso de un planteamiento o ejecución erróneo.¹⁵⁰



Figuras 85 y 86: Propuesta de estructura en el Parque MLK Jr. en Austin, Texas

El Block Research Group, en colaboración con el grupo BRG y la Cátedra de Arquitectura y Sistemas Constructivos de Zúrich, junto con Zwarts and Jansma Architects, ha destacado recientemente por desarrollar un proyecto de estructura laminar que integra, además del elemento resistente, la fachada, aislamiento, refrigeración y producción de energía, contando con una cubierta ligera, panel sándwich, con doble curvatura y poca sección, llevando a nuevos niveles el trabajo del hormigón, conteniendo a su vez un sistema de calefacción y refrigeración hidrónico que aprovecha su gran superficie de transferencia. Aunque se ha prestado gran atención a optimizar todos los elementos como las células fotovoltaicas o el encuentro de la superficie con los huecos, lo más revolucionario de la obra es sin duda el sistema de forjado funicular de hormigón sin refuerzos de acero, presentado por primera vez para el proyecto NEST-HiLo en Dübendorf, Suiza.¹⁵¹ La ejecución se lleva a cabo mediante piezas con un armazón de tan solo 2 centímetros de grosor, lo que supone un ahorro del 70% del material comparado a métodos más habituales de construcción, lo que a su vez repercute en una minoración del peso sobre la estructura principal. Las cavidades que restan quedan habilitadas para resolver en ellas el paso de instalaciones, resultando un sistema que además de ligero resulta compacto y eficiente al aunar todos los elementos necesarios, simplificando la sección. Esta sección desde luego es mucho menor que las presentes en la arquitectura actual, por lo que permite conseguir encajar una planta extra cada tres o cuatro habituales, obteniendo así un incremento de aproximadamente

¹⁴⁹ Ibid.

¹⁵⁰ Ibid.

¹⁵¹ Block, “Parametricism’s Structural Congeniality.”

un 25% de edificabilidad respecto a los sistemas habituales de ejecución de la obra. Su principal inconveniente reside en el hecho de que precisa de moldes de doble cara, lo que restringe su uso, pero sin menoscabar las óptimas cualidades que presenta y la arquitectura que puede desarrollarse alrededor de esta solución e ideas similares.¹⁵²



Figura 87: Proyecto NEST-HiLo



Figura 88: Módulo de forjado funicular

Las nuevas técnicas de impresión 3D pueden suponer el futuro incluso próximo de la arquitectura, permitiendo crear, o imprimir, formas complejas con gran precisión sin necesidad de molde, tan solo introduciendo la información en la impresora. La principal limitación de esta opción se da en las dimensiones con las que, por ahora, puede trabajarse, siendo estas aún insuficientes en muchos casos, algo que puede variar fácilmente con el tiempo y el desarrollo tecnológico, especialmente si la evolución se da de la mano de los procesos constructivos. Otro inconveniente reside en que los materiales que se emplean no son resistentes a la flexión, problema que deja de ser tal en caso de emplearse estructuras con geometrías funiculares.¹⁵³ A pesar de ser una propuesta aún demasiado primigenia, augura un futuro próspero y prometedor en la búsqueda de una arquitectura más limpia y eficiente, pues no solo se pueden imprimir estructuras completamente desarrolladas y finalizadas sino también procesos intermedios de estas como encofrados autoportantes, abaratando y agilizando la ejecución al prescindir de andamiaje y otros elementos.

Por otro lado, el grupo ha trabajado en la línea del Parametricismo, buscando soluciones óptimas que respondan a un lenguaje arquitectónico contemporáneo. Las arquitecturas de tipo “cáscara” sufrieron un declive en los años 60 debido a una suma de factores, entre los que destaca el ya comentado coste de los encofrados particularizados, las formas limitadas que se conocían y que podían ser ejecutadas y, en especial, la complejidad de integrar un programa en estos volúmenes y dotarlos de todo lo necesario para hacerlos habitables, como aislamientos, instalaciones o particiones. Con este problema se encuentra Félix Candela, pues puede verse cómo en

¹⁵² Block, Rippmann, and Mele, “Compressive Assemblies.”

¹⁵³ Ibid.

el Oceanogràfic de Valencia se pierde parte de la potencia que ofrece el volumen, la cáscara en sí misma, al incorporar los sistemas necesarios para que pueda ser vivida.¹⁵⁴

El Parametricismo busca facilitar la elaboración de arquitecturas con formas complejas, formas que no nazcan del capricho arquitectónico, algo en lo que a día de hoy es fácil caer debido a la facilidad de generar geometrías independientes de la estructura con software de modelado 3D, centrándose tan solo en el diseño estético, pudiendo inferir en problemas como los que se derivaron del proyecto de la Sala de Conciertos de Walt Disney de Los Ángeles, diseñada por el arquitecto canadiense Frank Gehry en 2003, que tuvo que ser intervenida por ingenieros para hallar una solución estructural que sustentase su modelo. Al contrario, el Parametricismo busca que estructuras de estas características puedan expresar todo su potencial, aunando de manera armoniosa el diseño con la estabilidad, el programa con lo estético, no entendiendo las arquitecturas laminares como meros decorados que serán soportados por una estructura subyacente, sino trabajando en una unidad proyectual que recoja todos los aspectos necesarios de una buena arquitectura.¹⁵⁵

El Block Research Group ha seguido esta línea de trabajo para crear una nueva tipología de “cáscaras” eficientes mediante sistemas prefabricados y de ahorro de costes y material, optimizando estos, siendo conscientes de que los recursos son limitados y haciéndose sensibles ante su escasez de una forma especial ante los complicados tiempos que vivimos. Estas nuevas y potencialmente infinitas tipologías recogen el testigo de Heiz Isler, quien en 1959 ya dejó marcado un “etc” junto a las curvaturas óptimas y equilibradas que planteaba, volviéndose más real que nunca gracias a las posibilidades actuales.¹⁵⁶

Una de las aportaciones de este grupo en relación con este tema puede encontrarse en Barranquilla, Colombia, con la obra de la Fábrica de la Cultura, donde colaboraron en el diseño de una cubierta para un proyecto con unos fuertes condicionantes acústicos, espaciales y económicos, bóveda que cubría un espacio de 20 por 40 metros cuadrados, pensada para trabajar a compresión y ser ejecutada con materiales y mano de obra local, recordando al Centro de Interpretación de Peter Rich en Mapungubwe.¹⁵⁷

El proyecto de Barranquilla fue también estudiado con el análisis de redes de empuje, buscando un modelo paramétrico que trabajase a compresión simple para las condiciones de carga planteadas. Como encofrado de esta bóveda se utilizó otra de teja cerámica y mortero de fraguado rápido, autoportante debido a la geometría equilibrada, que repercute en un ahorro en encofrados y subestructuras, además de agilizar tiempos, y con ello costes, de ejecución al permitir trabajar en el interior mientras fragua el hormigón sobre las tejas. Esta obra logra una gran expresividad y un gran aprovechamiento de los materiales, reduciendo los residuos, integrando todos los sistemas y fases de construcción, certificando de nuevo estas geometrías como, ya no solo viables, sino increíblemente útiles y prometedores, capaces de hacer frente a la arquitectura que esté por venir.¹⁵⁸

¹⁵⁴ Block, “Parametricim’s Structural Congeniality.”

¹⁵⁵ Ibid.

¹⁵⁶ Ibid.

¹⁵⁷ Ibid.

¹⁵⁸ Ibid.

4. Conclusiones

4.1. Usos pasados, usos presentes

Es posible que el inicio de la investigación de las formas funiculares, y más aún la aplicación real de estos conocimientos, los cuales fueron incrementando gradualmente con el paso del tiempo, se haya dado en un momento avanzado de la historia, cuando ya habían sido ejecutados muchos de los grandes arcos y estructuras con bóvedas por diversas civilizaciones a lo largo y ancho del mundo, en especial en obras de arquitecturas como la romana o medieval, donde el uso de los arcos de medio punto había sido tan recurrido. Sin embargo, sería injusto decir que llegaron tarde. En el, en comparación con el inmenso espacio anterior, poco tiempo que han ido trabajándose y avanzando en su investigación y desarrollo, desde que Robert Hooke lo plantease por primera vez hace ya más de tres siglos en el contexto de la *Royal Society*, estas geometrías han experimentado una gran evolución y han permitido la creación de grandes arquitecturas y obras de ingeniería, desde las primeras aplicaciones más discretas por parte de los ingenieros británicos, como en los puentes de Young, utilizando el modelo invertido confiando y entendiendo el gran avance y beneficio que suponían estos planteamientos pioneros, hasta llegar a los grandes espacios abovedados conseguidos mediante estructuras equilibradas tridimensionales, como es el caso del templo de la Sagrada Familia de Barcelona.

Entre todas las aportaciones mencionadas me gustaría destacar una vez más las del arquitecto catalán Antonio Gaudí, arquitecto que es cierto que no fue el primero en llevarlas a cabo, sino que se sitúa en un contexto en el que los planteamientos y teorías catenarias han sido ampliamente difundidos, llegando incluso a España, teniendo ejemplos en nuestro país de épocas algo anteriores con las obras introducidas por Bernard Forest de Bélidor. Sin embargo, fue el arquitecto catalán quien las dignificó pues, aunque sabemos que en su época la cuestión funicular era algo conocido, se la seguía dejando de lado, optando por continuar con el uso de arcos de medio punto. Si bien esto puede justificarse en cierta manera debido a la facilidad de su trazado, la sencillez de su dibujo en plano y su posterior construcción, ejercicio tan socorrido desde centenares de años atrás, el hecho de no considerarse estéticas podría haber lastrado durante más tiempo la aparición de estas formas de una manera más habitual, incluso haberlas abandonado, condenadas al olvido o a una mera cuestión teórica, tan solo aplicada en casos de gran necesidad material para arquitecturas estrictamente funcionales, pero no en arquitecturas regulares u obras mayores donde se busque ir más allá y abordar el apartado expresivo o estético, algo que palió Gaudí al incorporarlas en su obra, dando una gran importancia al aspecto estructural en sus proyectos cuando no era lo habitual en ese momento, tratando la arquitectura en su conjunto, poniendo el aspecto resistente como base del posterior desarrollo de sus arquitecturas.

Gaudí recupera así un sistema estructural que fue utilizado anteriormente en momentos en los que el material era escaso y no había un gran presupuesto, en obras humildes y fundamentalmente funcionales, ahorro que se debe a la optimización material por la idoneidad de la forma al trabajar a compresión simple y contener las trayectorias de las fuerzas que sufre en su propia sección, cumpliendo el nombrado Teorema de la Seguridad de Heyman. Gaudí logra resolver estos espacios con superficies equilibradas haciendo uso de modelos invertidos que serán los que den forma a sus obras. Estos modelos parten del principio de la inversión propuesto por el

propio Hook tanto tiempo atrás, en ocasiones de aplicación bidimensional directa incluso a escala natural, como es el caso de la galería de arcos parabólicos de arquitecturas como la Casa Milà, pero también llevando el problema a la tridimensionalidad con maquetas que toman ese legado y lo reproducen para conseguir generar grandes volúmenes estables por sí mismos, por su forma, maquetas tan precisas que de ellas puede medirse para obtener el plano y obtenerse incluso el trabajo de sus elementos de soporte, demostrando las grandes posibilidades que ofrecen estas curvas y cómo cada vez, con el progreso y apoyándonos en conocimientos previos de aquellos que nos precedieron, podemos llegar a lograr cosas más grandes, dejando un legado para aquellos que vengan más adelante. Si Robert Hooke no hubiese planteado ese primer arco, la Sagrada Familia no sería hoy como la conocemos.

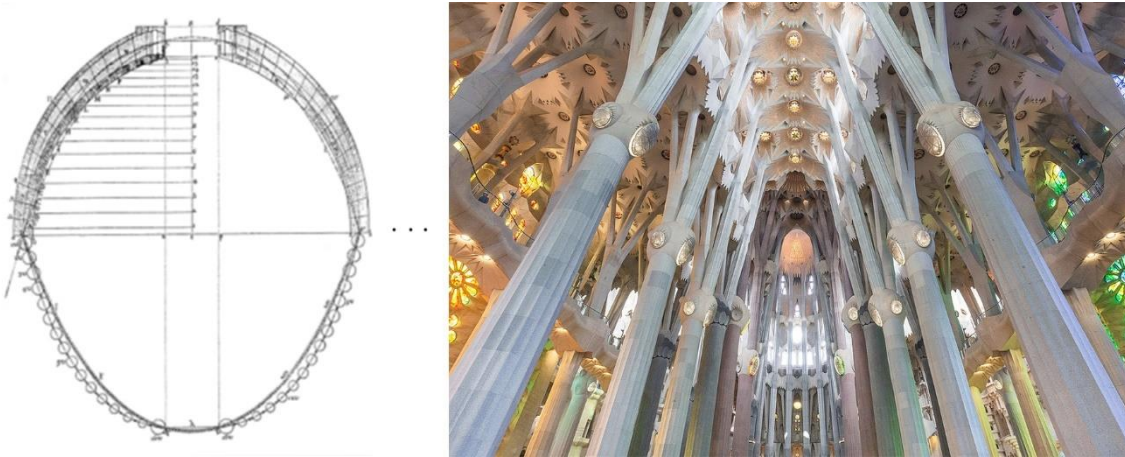


Figura 89: Evolución de la catenaria y las formas funiculares. Desde Hook hasta Gaudí. Desde el arco simple (dibujo de Poleni buscando la geometría de San Pedro) hasta la Sagrada Familia

A Gaudí debemos agradecerle además legar a sus discípulos el interés por las arquitecturas equilibradas basadas en la identificación de los funículos de fuerzas, logrando obras que trabajan a compresión simple, sin requerir refuerzos ya que no se daban esfuerzos de flexión. El mejor ejemplo de esto lo encontramos con el arquitecto Cèsar Martinell, artífice de las denominadas “Catedrales del Vino”, obras equilibradas en las que explotaba el uso del ladrillo, un material barato, buscando geometrías a su vez optimizadas de modo que el material necesario fuese menor. Es cierto que el inicio de su trayectoria en esta línea fue condicionado por la dura situación que sufrió el sector agrícola catalán, el cual tuvo que requerir de obras humildes, en especial en la época en la que trataban de iniciar la recuperación y remontar esta difícil situación, forzando en cierta manera el desarrollo de unas arquitecturas ideales en cuanto a la estructura, sobrias en cuanto a ornamento. Así, Martinell iniciaba un largo camino durante el que haría evolucionar una tipología que daría identidad a una región que lo había pasado tan mal, en consonancia con el uso social que adquieren cada vez más los resultados obtenidos mediante la aplicación de estas formas, logrando desarrollar un lenguaje propio mediante el uso intensivo del ladrillo, material escogido por ser económico pero que ofrece grandes ventajas, como su gran versatilidad y trabajo a compresión, no precisando de otro elemento que funcione a flexión al configurar volúmenes que se ven sometidos tan solo a esfuerzos axiales.

El que fuera el discípulo conseguiría levantar grandes espacios catedralicios dignos del maestro, resultado de hacer suyo su legado, dejando así mismo la impronta que otros habrían de recoger más adelante. Lograba así erigir grandes templos laicos, monumentos en los que no se daba culto, sino que se trabajaba, en los cuales incluso a día de hoy se reconoce su magnificencia y se rescatan tras el abandono de las tareas que tenían lugar en ellos como museos o espacios polivalentes, continuando con su existencia y siendo prueba construida de las posibilidades que ofrecen estas geometrías incluso con materiales económicos y simples.

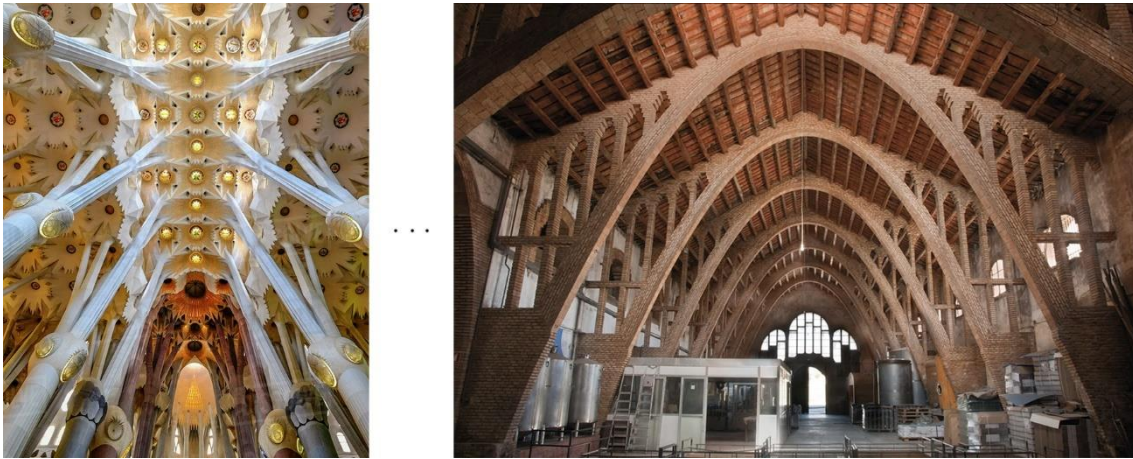


Figura 90: Desde Gaudí hasta Martinell. Del maestro al discípulo. Desde el Templo Cristiano a la Catedral del Vino

El uso de este sistema siguió vigente y fue fructífero durante unos años más, pero con el tiempo fue dejando de ser rentable. Una práctica que ahorraba en costes materiales y que suponía una ejecución manual económica dejó de serlo al carecer el grueso de los albañiles de las habilidades y la técnica constructiva necesarias para llevarlas a cabo, lo que repercutió en un aumento del precio que supondría contratar a aquellos pocos que fuesen capaces de realizarlas. El ahorro material sigue vigente, es algo objetivo que se debe a la idoneidad de la forma funicular como elemento estructural, pero se ha llegado a un punto en el que esto ya no compensa el gasto que supone la construcción con esta técnica, la diferencia no es favorable, al menos hablando desde el punto de vista estrictamente económico.

Sin embargo, hay opciones, hay contextos y condiciones en los que sí se pueden plantear estas geometrías, situaciones en las que el ahorro material es fundamental, suponiendo un regreso al inicio, a las humildes obras funcionales de aquellos que no pueden permitirse grandes lujos, pero con la ventaja de que se arrastra todo el conocimiento que separa ambos puntos de la historia. Hay esperanza.

4.2. Posibilidades de futuro

Los nuevos materiales, como el hormigón, y los avances tecnológicos reavivaron la llama de las estructuras funiculares, además de abrir el camino a otras formas basadas en diferentes superficies de doble curvatura, propiciando la aparición de numerosas estructuras de tipo “cáscara” a lo largo del siglo XX, como hemos podido ver al recorrer algunas de las obras de Félix Candela o, más próximo a nosotros, Eduardo Torroja. Sin embargo, las formas funiculares tenían más posibilidades que estas últimas, siendo menos restrictivas en volumen y forma, brindando mayor libertad creativa a los diseñadores. Aunque criticadas en un contexto cultural en el que dominaban las formas puramente racionalistas o miesianas propias del Movimiento Moderno más estricto, estas arquitecturas equilibradas pudieron integrarse y lograr su espacio gracias al interés de arquitectos como Eero Saarinen o Heinz Isler, quienes trabajaron con ellas y supieron aprovechar las posibilidades que ofrecían los nuevos tiempos.

Con Saarinen se da un punto de inflexión especialmente interesante, posible gracias al avance técnico, matemático y de cálculo de los últimos tiempos, siendo capaz de ajustar las condiciones de carga para obtener la geometría deseada, invirtiendo el proceso de trabajo de Gaudí pero resultando de la misma manera formas equilibradas, estables, permitiendo priorizar la cuestión visual, estética o monumental sobre la definición precisa de las fuerzas, no siendo la forma final un resultado estricto de la hipótesis de carga planteada sino dando un grado más de libertad e incidencia del diseñador al brindarle la oportunidad de ajustar estas modificando otras variables como la masa o la sección material, plasmando toda esta evolución con el icónico *Gateway Arch* para la ciudad de San Luis en Misuri, símbolo de la misma con un trasfondo emocional pero también cargado de contenido y expresión estructural, siendo un alarde constructivo además de teórico debido a la complejidad de la ejecución, mostrando además una capacidad de respuesta y la adaptación de la que hubieron de hacer gala al encontrarse con ciertas dificultades.

En este mismo tiempo de cambios, desarrollo y evolución, Isler recuperaba los modelos invertidos de Gaudí, a su vez herederos de la teoría de la inversión original de Hooke y las diferentes aplicaciones mediante cables colgantes que se habían dado a lo largo de la historia, adaptando estas superficies resultantes y aprovechando los nuevos materiales como el hormigón, trabajando con estructuras que trabajan a axil sin padecer flexión y sin verse tan limitado por otras superficies de doble curvatura más extendidas durante esos años, gozando de mayor libertad creativa y un mayor grado de control sobre el proyecto que alguno de sus coetáneos, haciendo los proyectos más propios.

Otros autores como Frei Otto, Shigeru Ban o, más recientemente, Mike Schlaich, irán un paso más allá en la precisión estructural sobre este tipo de obras, trabajando con modelos invertidos de tipo malla, sustituyendo las telas ligeras que empleaba el mismo Isler para obtener los volúmenes aplicando de la misma forma la inversión de la maqueta, resultando esto en arquitecturas que evidenciaban las trayectorias de las fuerzas, dejando de existir material allá donde no era necesario, significando un ahorro material máximo y una pulcritud estructural que probaba el gran conocimiento que se tenía de los estados de carga de estos espacios, recordando a los planteamientos originales que justificaron la aparición de los primeros arcos catenarios por encima de aquellos no optimizados, como los de medio punto.

En el presente volvemos a encontrar la utilidad de estas formas óptimas, pudiendo volver a suponer un ahorro y una opción en aquellos lugares en desarrollo, con recursos escasos. El arquitecto sudafricano Peter Rich da una lección en este aspecto con el proyecto del Centro de Interpretación de Mapungubwe, solucionando el problema de la mano de obra no instruida al educar a la población local en la tarea de fabricación y ejecución de estas bóvedas, resultando además de en un ahorro económico en un beneficio del mismo tipo al tratarse tanto de materias como de trabajadores de la zona. Este problema había significado el declive de este tipo de arquitecturas tras el auge percibido en pleno Modernisme, el motivo de su desuso, motivo que deja de existir al enseñar a los habitantes de la zona el sistema desde el principio, desde la creación misma de las piezas que formarán el conjunto, hasta la disposición de las mismas formando los diferentes espacios abovedados que constituyen el Centro. Rich logra unificar la tradición de la ejecución y el material con la tecnología y los avances informáticos y de cálculo más recientes para proyectar geometrías equilibradas evitando los esfuerzos de flexión o cizalladura, pudiendo hacer uso de materiales locales, de menores prestaciones que los que podrían emplearse en una obra de mayor presupuesto, sin precisar de estas mejores características al hacer trabajar los volúmenes por su forma tan solo a axil. La calidad de esta arquitectura, capaz de solucionar una obra en un lugar humilde, pero de relevancia mundial al ser Patrimonio de la Humanidad declarado por la UNESCO, se hace patente cuando la población la hace propia, siendo un signo identitario de la zona, pero además legando ese conocimiento, empleándolo para mejorar las condiciones de sus propias viviendas al replicar el sistema en las cubiertas.

También el Block Research Group, encabezado por el arquitecto Philippe Block, ha hecho grandes avances en este tipo de estructuras, introduciendo en ellas las nuevas tecnologías como la robotización o la impresión 3D, retomando el concepto tomado en la obra del Mapungubwe de la posibilidad de crear obras con material con bajas prestaciones al hacer trabajar las superficies por su forma. El uso de estas geometrías de forma conjunta con los avances técnicos y tecnológicos supone llevar la albañilería a un nuevo punto, pudiendo realizar arquitecturas realmente eficientes, ahorrando material como ya hemos visto pero también energía, generando menos residuo y siendo más sensibles con el medio ambiente al reducir con todo esto la huella de carbono, algo de especial importancia debido a la nefasta, y cada vez peor, situación en que se encuentra nuestro planeta en lo relativo a este tema. El grupo toma el testigo de Rich al desarrollar proyectos sociales en los que priman la eficiencia máxima, “cáscaras” optimizadas al extremo a nivel material, estructural y energético, entre otros, desarrolladas para zonas en situación precaria, como es el caso de la unidad de vivienda urbana y sostenible, SUDU, planteado para Etiopía, pero extrapolable para el resto de zonas que precisen de estas arquitecturas.

Abordar la cuestión social es una consecuencia lógica nacida de la aplicación de este tipo de formas funiculares, formas pensadas expresamente para lograr una eficiencia estructural y optimizar así los recursos, los cuales por la forma de trabajo de estas además permiten ser locales, lo que está estrechamente ligado con las ideas que subyacen en este tipo de obras. No obstante, esta escasez se hace cada vez más evidente en diferentes zonas del mundo, dejando de ser un problema que afecte tan solo a países menos desarrollados o con una situación precaria. Los recursos son limitados, nuestro planeta no se encuentra en la mejor de las situaciones y la construcción puede tener un gran impacto en él, por lo que es necesario sensibilizarse y trabajar en esta línea, evitando producir un malgasto o un gasto innecesario de los recursos. Por ello, surgen proyectos como el Nest-HiLo, de nuevo una superficie de

cubierta optimizada hasta ser sumamente eficiente, con todas las propiedades anteriormente mencionadas e introduciendo sistemas, nuevos o tradicionales trabajados para funcionar de manera ideal, suponiendo como siempre un ahorro de coste, de energía, recursos y desperdicios. Este proyecto es el ejemplo perfecto de obra estudiada al detalle para optimizar cualquier aspecto en favor de la eficiencia, habiéndose de tomar de ejemplo de partida para las arquitecturas venideras, cada vez, por suerte, más exigentes en los diferentes apartados de ahorro energético.

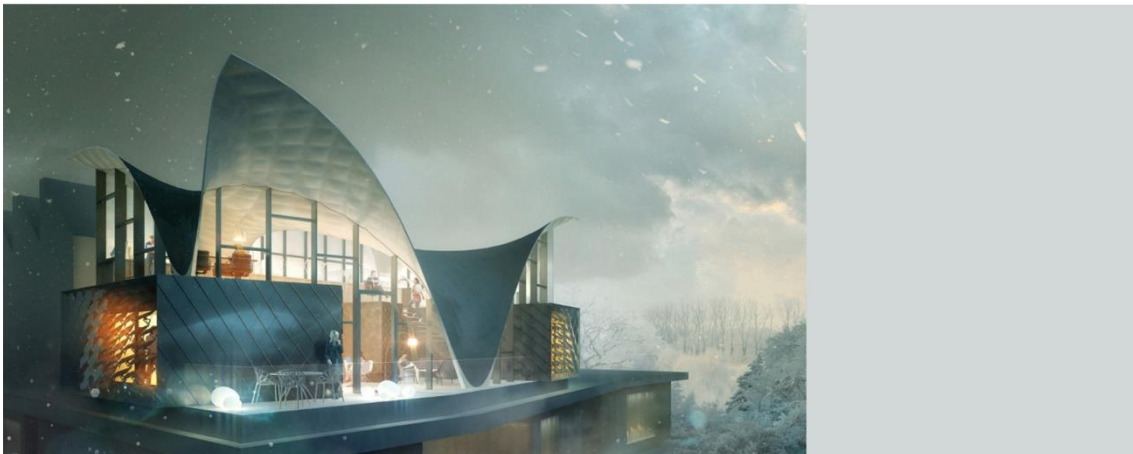
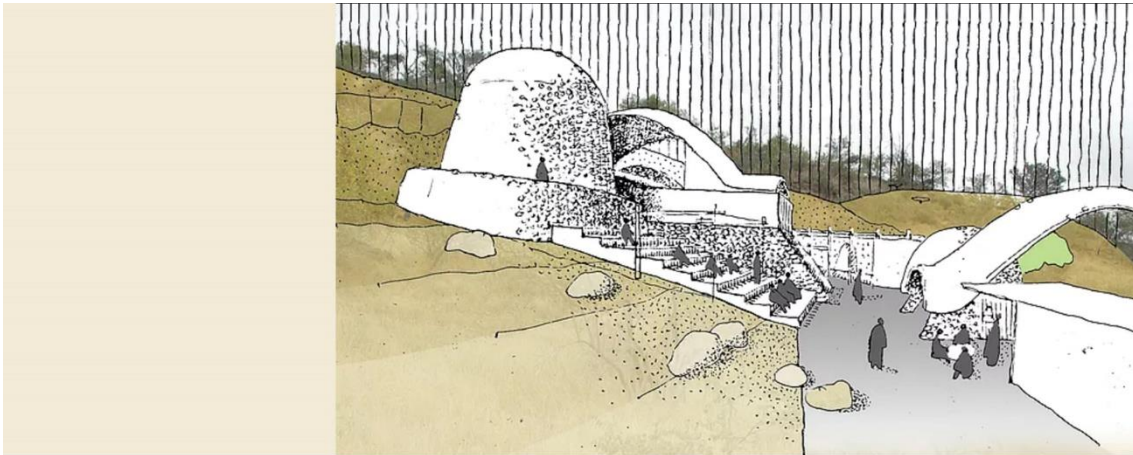


Figura 91: Proyecto del Centro de Interpretación de Mapungubwe, Peter Rich

Figura 92: Proyecto Nest-HiLo, Block Research Group

Quizá las formas de tipo arco o bóveda no sean tan habituales hoy en día, siendo más común encontrar obras levantadas a base de pilares y losas, sin embargo este grupo no se detiene ni se da por vencido y crea propuestas como los módulos de solado funicular, presentados en la misma obra del Nest-HiLo, ahorrando una gran cantidad de material debido a su estructura alveolar interna con geometría funicular, lo que supone que adquiere todas las ventajas anteriormente desarrolladas, pudiendo además integrar los sistemas de instalaciones, instalaciones que por supuesto seguirán la filosofía del conjunto, guiando de esta manera el camino hacia una construcción uniforme que abrace la sostenibilidad y la ecología.

Las técnicas empleadas tanto por Rich como por el Block Research Group son herederas de la tradición catalana, a su vez sucesoras de las primeras bóvedas tabicadas empleadas desde finales del siglo XIII o principios del XIV, trabajadas con el objetivo de mejorar y explotar sus posibilidades por el propio Guastavino, el cual las llevó al continente Norteamericano, en el cual supieron también apreciar las bondades de un sistema que permitía cubrir grandes espacios sin necesidad de disponer una cimbra, siendo en todo momento autoportantes pese a no seguir de forma exacta los trazados funiculares, justificando su resistencia según el propio arquitecto mediante su Teoría de la Cohesión, logrando espacios abovedados sin apenas apoyos, permitiendo ejecutarlos de forma ágil y consiguiendo que estos fuesen especialmente resistentes al fuego, algo que preocupaba a la sociedad estadounidense debido a los trágicos incendios que habían arrasado Chicago unos años atrás.¹⁵⁹ Esta técnica tradicional no es abandonada, sino que se recupera por parte de esta nueva generación de arquitectos, quienes aprovechan los nuevos materiales y tecnologías para optimizar sus prestaciones y afinar su cálculo, quedando en el trasfondo de grandes proyectos como los que hemos visto en esta última época, junto al resto de conocimiento aportado y recogido a lo largo del camino. El ladrillo y el sistema de bóveda tabicada tradicional no se ha perdido, de hecho ha percibido un auge en los últimos tiempos, dándose a conocer a las futuras generaciones de arquitectos en las diferentes universidades a través de enseñanza teórica y talleres en los que demuestran sus capacidades, volviéndose a encontrar en arquitecturas contemporáneas, apareciendo recientemente en obras como el panteón dedicado a unos de los fundadores del grupo Porcelanosa, adquiriendo en este caso concreto la geometría de paraboloides hiperbólicos, construido con unas guías que permiten mantener la curvatura pero prescindiendo de cimbra alguna. Estas nuevas obras llegan para volver a mostrarnos, además de su evidente estabilidad estructural lograda con una muy pequeña sección y materiales sencillos, la gran expresividad de que son capaces, recordando las formas pasadas e introduciendo las que aún están por llegar.

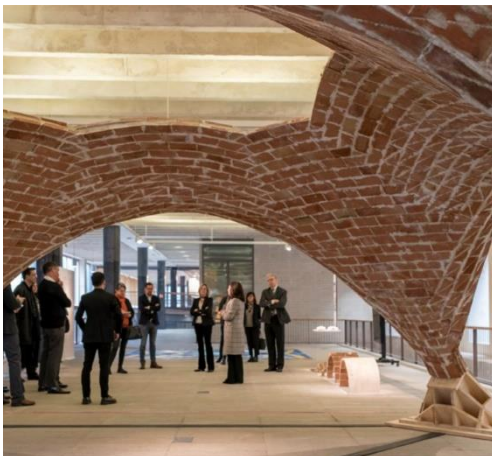


Figura 93: Bóveda tabicada realizada en el Taller organizado por la Universidad de Alcalá y SOM

Figura 94: Panteón dedicado a José Antonio Soriano, cofundador de Porcelanosa, 2015

¹⁵⁹ David López López, “Análisis estructural de bóvedas tabicadas: estudio histórico, analítico y experimental para la determinación de la influencia en la resistencia y estabilidad de bóvedas tabicadas de diferentes variables constructivas” (dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya, 2012).

Se ha demostrado diversas veces a lo largo de la historia, desde los primeros planteamientos hasta las últimas actuaciones, la viabilidad de emplear las formas funiculares en la arquitectura, y estos nuevos progresos e innovaciones no hacen más que reafirmar este hecho. Desde que Hooke las plantease los avances han sido constantes, cada uno evidenciando en mayor medida las posibilidades que ofrecía en cada momento su aplicación, permitiendo imaginar las que podrían deparar en el futuro, futuro que se presenta prometedor gracias al continuo trabajo y estudio de grupos como el Block Research Group, que nos permiten anticipar el siguiente paso que dará la arquitectura en su construcción mediante sistemas robóticos o inteligentes, mediante impresión o brazos mecánicos, sin cimbras ni estructuras auxiliares, apareciendo estructuras autoportantes que van creciendo de una forma que en primera instancia pudiera parecer carente de toda lógica e imposible, siendo estable en todo momento de su progresión, trabajando bajo ellas al mismo ritmo que estas avanzan hasta quedar completas, estructuras tecnológicas, novedosas, eficientes, ágiles, expresivas, limpias. Tal vez estas geometrías hayan sido algo tardías, pero más que útiles puede que lo que sigan siendo a día de hoy sea necesarias.

5. Bibliografía y relación de figuras

5.1. Bibliografía

- Block, Philippe. "Parametricism's Structural Congeniality." *Architectural Design - Parametricism* 86, no. 2 (2016): 68–75.
- Block, Philippe, Tom Van Mele, and Matthias Rippmann. "New Compression Shells Inspired by the Past." *Architectural Design*, 2015, 74–80.
- Block, Philippe, Matthias Rippmann, and Tom Van Mele. "Compressive Assemblies." *Architectural Design - Autonomous Assembly* 87 (2017): 104–109.
- Bradley, R. A., and M. Gohnert. "Three Lessons from the Mapungubwe Shells." *Journal of the South African Institution of Civil Engineering* 58, no. 3 (2016): 2–12.
<https://doi.org/10.17159/2309-8775/2016/v58n3a1>.
- Brufau, Robert, and Joan Ramon Blasco. "El Principi de La Inversió : A Propòsit de La Sala Polivalent de Mannheim." *Quaderns d'arquitectura i Urbanisme* 0, no. 258 (2009): 72–77.
- Plataforma Arquitectura. "Centro de Interpretación Mapungubwe / Peter Rich Architects." Accessed September 4, 2021.
<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/767264/centro-de-interpretacion-mapungubwe-peter-rich-architects>.
- Chilton, John. "Heinz Isler's Infinite Spectrum Form-Finding in Design." *Architectural Design* 80, no. 4 (2010): 64–71.
- De Zárraga Mata, S. "La Catenaria En Arquitectura." *UPM. ETSI Caminos, Canales y Puentes*, 2010.
- Fagan, Gabriel, and Obie Oberholzer. "Mapungubwe Interpretation Centre," 2005.
- Gómez-Serrano, J. "Arcos Catenarios." In Giralt-Miracle, Daniel. "Gaudí, La Búsqueda de La Forma", 96–103, 2002.

- Gregory, Rob. "Earth Pavilion by Peter Rich Architects and Michael Ramage, London, UK." *The Architectural Review*. Accessed September 6, 2021. <https://www.architectural-review.com/buildings/earth-pavilion-by-peter-rich-architects-and-michael-ramage-london-uk>.
- Huerta, Santiago. "El Cálculo de Estructuras En La Obra de Gaudí." *Ingeniería Civil*, no. 129 (2003): 121–133.
- Humphries, Lund. "The Architecture of Peter Rich: Conversations with Africa, Jonathan Noble," 2021, 90–92.
- Iniesta, Mariano Molina. "La Catenaria Ponderada de Saint Louis . Ley Universal y Genio Individual En La Evolución Del Movimiento Moderno de Posguerra," 2016, 110–118.
- Llorens Duran, Josep Ignasi de. "Wine Cathedrals: Making the Most of Masonry." *Proceedings of Institution of Civil Engineers: Construction Materials* 166, no. 6 (2013): 329–342. <https://doi.org/10.1680/coma.12.00023>.
- Lluís i Ginovart, Josep, Agustí Costa-Jover, Sergio Coll-Pla, and Mónica López Piquer. "Layout of Catenary Arches in the Spanish Enlightenment and Modernism." *Nexus Network Journal* 19, no. 1 (2017): 85–99. <https://doi.org/10.1007/s00004-016-0313-9>.
- López López, David. "Análisis estructural de bóvedas tabicadas: estudio histórico, analítico y experimental para la determinación de la influencia en la resistencia y estabilidad de bóvedas tabicadas de diferentes variables constructivas." *Dissertation, Universitat Politècnica de Catalunya*, 2012.
- Ramage, Michael H., John A. Ochsendorf, and Peter Rich. "Sustainable Shells: New African Vaults Built with Soil-Cement Tiles." *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures* 51, no. 166 (2010): 255–261.
- Ter (Ester). "Un Puente Más Flino Que Una Cáscara De Huevo." Youtube, 2019. Accessed September 6, 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=VeahDy7n8l>.
- Vicente, Juvinch R., Ali Rafiei Miandashti, Kurt Waldo E. Sy Piecco, Joseph R. Pyle, Martin E. Kordesch, Jixin Chen, and Lattice Basis. "The Gateway Arch Conservation Management Plan." *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 1–51. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsami.9b03822>.

5.2. Relación de figuras

2.1. El principio de la inversión de Robert Hooke:

Figura 1: Anagrama mediante el que Robert Hooke plantea la catenaria como la curva que debe tener un arco que soporta su propio peso, publicado en 'Una descripción de los helioscopios y otros instrumentos' en 1675. Imagen tomada de la web "Scientia potentia est".

Figura 2: Dibujo en sección de Poleni para comprobar la estabilidad de la Cúpula de la Basílica de San Pedro, 1748. Imagen tomada de la web "Informes de la Construcción".

Figura 3: Diseño de un puente empleando el modelo colgante, Young, 1845. Imagen tomada del documento "El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí", Santiago Huerta.

Figura 4: Trazados funiculares óptimos para algunas distribuciones de cargas. Imagen tomada de la web "Cables Suspendidos".

2.2. Antecedentes históricos. Arquitecturas orientales previas:

Figura 5: Arco de Ctesifonte o Tak-i Kista en la actual Iraq. Fotografía de Artemy Lebedev tomada de la web "lookphotos".

Figura 6: Arco de Ctesifonte o Tak-i Kista en la actual Iraq. Fotografía de roberharding tomada de la web "lookphotos".

Figura 7: Cúpula de la Roca de Jerusalén. Fotografía de roberharding tomada de "lookohotos".

Figura 8: Sección vertical de la Cúpula de la Roca de Jerusalén. Plano original de H. Stierlig coloreado, imagen tomada de la web "Edificios de Culto Islámico".

2.3. Los primeros arcos catenarios en España. Los almacenes de pólvora:

Figura 9: Secciones de las naves de los almacenes de pólvora de Barcelona y Tortosa diseñados por Miguel Marín y de A Coruña por Juan de la Ferrière y Valentín para estudiar sus arcos. Imágenes del Archivo general de Simancas en Colecciones de Mapas, Planos y Dibujos, tomada del documento "Layout of the Catenary Arches in the Spanish Enlightenment and Modernism", por Josep Lluís i Ginovart et al.

2.4. El Modernismo catalán de Antonio Gaudí:

Figura 10: Dibujo de la fuente de la cascada de la Casa Vicens. Dibujo original de Bergós, en 1953, imagen tomada del documento "El cálculo de estructuras en la obra de Gaudí", por Santiago Huerta.

Figura 11: Reproducción de la cascada de la Casa Vicens, desaparecida en 1945, ubicada para el Museu de les Aigües de Cornellà del Llobregat. Fotografía de AGBAR tomada de la web "EINacional.CAT".

Figura 12: Galería de arcos funiculares de la Casa Milà. Imagen tomada de la web "dosde".

Figura 13: Galería de arcos funiculares de la Casa Batlló. Imagen tomada de la web "dosde".

Figura 14: Galería de arcos parabólicos del Colegio de las Teresianas. Imagen tomada de la web "Las Piedras de Barcelona".

Figura 15: Detalle de la galería de arcos parabólicos del Colegio de las Teresianas. Imagen tomada de la web "Architectural Visits" de Helena Ariza.

Figuras 16 y 17: Cúpula del salón principal del Palacio Güell. Fotografía tomada de la web "Palau Güell".

Figura 18: Modelo colgante funicular empleando la teoría de la inversión de la Iglesia de la Colonia Güell. Imagen tomada de la web "BCNsmartours".

Figura 19: Volumen obtenido a partir del modelo colgante anterior. Imagen tomada del documento "Antonio Gaudí, precursor de la sostenibilidad y la biomimética en la arquitectura, con 100 años de antelación" por Carlos Salas, César Bedoya y José María Adell.

Figura 20: Exterior de la Cripta de la Colonia Güell, donde pueden verse los paraboloides hiperbólicos de ladrillo. Fotografía tomada de la web "dosde".

Figura 21: Interior de la Cripta de la Colonia Güell, mostrando la geometría que adoptan los pilares y el arco. Fotografía tomada de la web "Casa Batlló".

Figuras 22 y 23: Interior del Templo de la Sagrada Família de Barcelona. Fotografías de Manuel Bischof tomadas de la web "lookphotos".

2.5. Las "Catedrales del Vino" de César Martinell:

Figuras 24 y 25: Exterior y detalle de fachada fachada de la Societat de Barberà de la Conca. Fotografías tomadas de la web "Federació de Cooperatives Agràries de Catalunya".

Figuras 26 y 27: Exterior e interior de la Sala de Exposiciones de la Bodega de Codorniu. Fotografías tomadas de la web "evadium".

Figura 28: Fachada de la Cooperativa Vinícola de l'Espluga del Francolí. Fotografía tomada de la web "Enoguia".

Figura 29: Interior de la Cooperativa Vinícola de l'Espluga del Francolí. Fotografía tomada de la web "Catalunya".

Figura 30: Interior del Sindicato de Trabajadores Agrícolas de Rocafort de Queralt. Imagen tomada de la web del grupo "César Martinell & Associates"

Figura 32: Depósito de agua del Sindicato de Trabajadores Agrícolas de Rocafort de Queralt, posterior a la construcción principal. Fotografía tomada de la web César Martinell & Associates"

Figura 33: Interior del Sindicato Agrícola de Gandesa. Imagen obtenida de la web "FemTurisme.CAT".

Figuras 34 y 35: Interior y detalle de los arcos del Sindicato Agrícola de Sant Guim. Fotografías de Mariajosep Jové Tarruell tomadas de la web "Turisme de la Segarra".

Figura 36: Interior de la nave para la Cooperativa Vinícola de Sant Cugat del Vallés. Imagen tomada de la web "VisitSantCugat".

Figura 37: Exterior de la nave para la Cooperativa Vinícola de Sant Cugat del Vallés. Imagen tomada de la web "UAB".

Figura 38: Sección de la nave para la Cooperativa Agrícola y Ganadera de Puigcerdà. Imagen tomada del documento "Wine cathedrals: Making the most of masonry", por Josep Llorens

3.1. Nuevas tecnologías. El Gateway Arch de Eero Saarinen:

Figura 39: Hangar para dirigibles en Orly, Francia, proyecto de Freyssinet realizado en 1923. Fotografía tomada de la web "arquiscopio".

Figura 40: Cartel anunciando la Exposición Universal de Roma de 1942 en la Italia fascista. Imagen tomada de la web "¡Es la Guerra!".

Figura 41: Maqueta del Gateway Arch por Eero Saarinen. Imagen tomada de la web "José Miguel Hernández Hernández | jmhdzhdez".

Figura 42: Maqueta del Gateway Arch por Eero Saarinen. Imagen tomada de la web "La Percha del Arquitecto".

Figura 43: Construcción del Gateway Arch de San Luis mediante grúas trepadoras. Fotografía tomada de la web "Gateway Arch".

Figura 44: Construcción del Gateway Arch de San Luis mediante grúas trepadoras. Fotografía tomada de la web "History Things".

Figura 45: Disposición de la pasarela de refuerzo entre las dos semiestructuras en voladizo durante la construcción del Gateway Arch. Fotografía tomada de la web "Collins Cooper Carusi".

Figura 46: Disposición de la pasarela de refuerzo entre las dos semiestructuras en voladizo durante la construcción del Gateway Arch. Fotografía tomada de la web "vaumm".

Figura 47: Elevación del último segmento del Gateway Arch. Fotografía tomada de la web "vaumm".

Figura 48: Colocación del último segmento del Gateway Arch. Fotografía tomada de la web "Wikiarquitectura".

Figura 49: Gateway Arch de Eero Saarinen, estado actual finalizado. Fotografía tomada de la web "G-Switch.org".

Figura 50: Mirador en el interior del Gateway Arch. Imagen tomada de la web "Toky".

3.2. Nuevos materiales. Las inversiones de Heinz Isler:

Figura 51: Capilla de Palmira en Cuernavaca, México, por Félix Candela. Fotografía de A. Salas Portugal tomada de la web "Arteinformado".

Figura 52: Restaurante los Manantiales en Xochimilco, México, por Félix Candela. Fotografía tomada de la web "UrbiPediA".

Figura 53: Interior del Mercado de Algeciras, obra de Eduardo Torroja. Fotografía tomada del documento "El Mercado de Abastos de Algeciras, Una relectura de la Obra de Eduardo Torroja y Manuel Sánchez Arcas", por Carlos Quevedo.

Figura 54: Hipódromo de la Zarzuela, Madrid, obra de Eduardo Torroja. Fotografía tomada de la web "tiovivo".

Figura 55: Modelo colgante para la obtención de geometrías equilibradas por parte de Heinz Isler. Imagen obtenida del documento "Del Empirismo a la Invención, cálculo y proyecto en la arquitectura moderna", tesis doctoral por Ausías González Lisorge, fuente original "The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture", Heinz Isler.

Figura 56: Cubierta para el teatro al aire libre de Grötzingen, Alemania, obra de Heinz Isler. Fotografía obtenida de la web "ResearchGate".

Figura 57: Cubierta para la estación de servicio en Deitingen, Suiza, obra de Heinz Isler. Fotografía obtenida de la web "ResearchGate".

Figura 58: Heinz Isler fotografiado en el exterior de su obra para el pabellón de tenis o *Tennishalle*. Imagen tomada de la web "Subtilitas".

3.3. Avances estructurales. La arquitectura de mallas:

Figura 59: Maqueta invertida del Centro Multifuncional o *Multihalle* de Mannheim, Alemania, obra de Frei Otto. Imagen obtenida del documento "Centro Multiusos en Mannheim. Frei Otto. Doblando la malla hasta hacer una concha", por Fernando G. Pino, fuente original "Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal", Frei Otto.

Figura 60: Interior del Centro Multifuncional o *Multihalle* de Mannheim, Alemania, obra de Frei Otto. Fotografía tomada de la web "archdaily".

Figuras 61 y 62: Exterior e interior del Pabellón Japonés para la Expo 2000 de Hannover, obra de Shigeru Ban con la colaboración de Frei Otto. Fotografías tomadas de la web "Wikiarquitectura".

Figuras 63 y 64: Puente TRUMPF en Ditzingen, Alemania, obra de Mike Schlaich. Fotografías tomadas de la web "structurae".

3.4. Arquitecturas en desarrollo. La obra de Peter Rich:

Figura 65: Vistas de la colina del Parque Nacional de Mapungubwe, Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Fotografía tomada de la web “Patrimonio de la Humanidadporanka”.

Figuras 66 y 67: Construcción de las bóvedas sobre guías de madera y detalle de las sucesivas capas de teja. Fotografías tomadas de la web “arq.com.mx”.

Figura 68: Conjunto del Centro de Interpretación de Mapungubwe, obra de Peter Rich. Fotografía tomada de la web “uriji”.

Figura 69: Centro de Interpretación de Mapungubwe, Sudáfrica, obra de Peter Rich, 2009. Fotografía tomada de la web “The Architectural Review”.

Figuras 70 a 75: Vistas interiores y exteriores del Centro de Interpretación de Mapungubwe, Sudáfrica, obra de Peter Rich, 2009. Fotografías de Iwan Baan tomadas de la web “archdaily”.

Figura 76: Reparación de la línea de cambio de curvatura catenaria. Imagen tomada del documento “Three lessons from the Mapungubwe shells”, por R. A. Bradley y M. Gohnert.

Figura 77: Grietas próximas a las aberturas de geometría catenarias. Imagen tomada del documento “Three lessons from the Mapungubwe shells”, por R. A. Bradley y M. Gohnert.

Figura 78: Gheralta Tadeos Lodge en Etiopía, obra de Peter Rich, 2010. Fotografía tomada de la web “Peter Rich Architects”.

Figura 79: Earth Pavilion expuesto, obra de Peter Rich. Fotografía tomada de la web “The Architectural Review”.

3.5. Proyectando hacia el futuro. Las estructuras de Philippe Block:

Figuras 80 y 81: Armadillo Vault en la exposición de la Biennale de Venecia de 2016, obra del Block Research Group. Fotografías de Iwan Baan tomadas de la web “dezeen”.

Figura 82: Volumen exterior del Palacio de Deportes de Tiflis, Georgia, del que destaca la solución de cubierta, obra de 1961. Fotografía tomada de la web “Conexión Deportiva”.

Figuras 83 y 84: Exterior e interior del proyecto de vivienda social SUDU (Sustainable Urban Dwelling Unit) en Etiopía, obra del Block Research Group. Fotografías tomadas de la web “Architecture and Interior Design Trends”.

Figuras 85 y 86: Propuesta de la estructura abovedada para cubrir el Parque MLK Jr. en Austin, Texas, EE.UU., obra del Block Research Group. Imágenes tomadas de la web del propio estudio “BRG”.

Figura 87: Proyecto Nest-HiLo para Dübendorf, Suiza, obra del Block Research Group. Imágenes tomadas de la web del propio estudio “BRG”.

Figura 88: Unidad de suelo funicular, obra del Block Research Group. Imágenes tomadas de la web del propio estudio “BRG”.

4.1. Usos pasados, usos presentes:

Figura 89: Contraste de elementos, evolución de la catenaria y las formas funiculares desde el concepto de Hook hasta la obra de Gaudí, desde el arco hasta la Sagrada Familia. Imágenes de Poleni y Manuel Bischof ya referenciadas.

Figura 90: Nuevo contraste, desde Gaudí hasta Martinell, del maestro al discípulo, desde el templo de la Sagrada Familia a la “Catedral del Vino” de Rocafort. Imágenes anteriormente referenciadas.

4.2. Posibilidades hacia el futuro:

Figura 91: Sección del proyecto del Centro de Interpretación de Mapungubwe. Imagen obtenida de la web del propio estudio “Peter Rich Architects”.

Figura 92: Volumetría del proyecto Nest-HiLo. Imagen obtenida del propio estudio “BRG”.

Figura 93: Bóveda tabicada realizada en el VII Taller de Bóvedas Tabicadas organizado por SOM y la Universidad de Alcalá junto al propio Taller de Bóvedas, expuesto en la Sala Gutiérrez-Soto y Mercadal del COAM. Fotografía tomada de la web “MUPAAC, Máster Universitario en Proyecto Avanzado de Arquitectura y Ciudad”.

Figura 94: Panteón dedicado a José Soriano, uno de los fundadores del Grupo Porcelanosa, trabajo de los profesores de la UPV Fernando Vegas y Camila Mileto, proyecto completado por Enric Mestre, volumen obtenido mediante paraboloides hiperbólicos de ladrillo, 2015. Fotografía obtenida de la web “Bóveda Catalana”.