

La ingeniería civil y sus aportaciones a la arquitectura contemporánea 2.

Trascendiendo el arco en la obra de Arenas de Pablo y Philippe Block.

Trabajo final de grado.

Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
Universitat Politècnica de València.
Grado en Fundamentos de la Arquitectura.
Curso 2020-2021.

Autor: Pedro Martínez Torrecillas.
Tutor: Juan María Songel González.



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Resumen.

Este trabajo trata de explorar las aportaciones más recientes de los ingenieros contemporáneos que puedan interesar en los debates actuales de la arquitectura moderna. Con este propósito se elige la forma del arco como hilo conductor que une ambas disciplinas y sobre él se exploran las posibilidades que el trabajo de dos figuras como Juan José Arenas de Pablo y Philippe Block ofrecen a los retos a los que se enfrenta la arquitectura en la actualidad.

Abstract.

Exploring the most recent contributions of contemporary engineers that may be of interest to current debates in modern architecture. For this purpose, the shape of the arch is chosen as the common thread that links both disciplines and the possibilities that the work of two personalities such as Juan José Arenas de Pablo and Philippe Block offer to the challenges that architecture faces nowadays.

Resum

Es tracta d'explorar les aportacions més recents dels enginyers contemporanis que puguen interessar en els debats actuals de l'arquitectura moderna. Amb aquest propòsit es tria la forma de l'arc com a fil conductor que uneix totes dues disciplines i sobre ell s'exploren les possibilitats que el treball de dues figures com Juan José Arenas de Pablo i Philippe Block ofereixen als reptes als quals s'enfronta l'arquitectura en l'actualitat.

Palabras clave: Ingeniería Civil, Juan José Arenas de Pablo, Philippe Block, arco, bóveda, hormigón armado.

Keywords: Civil Engineering, Juan José Arenas de Pablo, Philippe Block, arch, vault, reinforced concrete.

Paraules clau: Enginyeria Civil, Juan José Arenas de Pablo, Philippe Block, BRG, arc, volta, formigó armat.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Primera Parte. Introducción..... | 3 |
| 1.1. Estado de la cuestión..... | 3 |
| 1.2. Objetivos..... | 4 |
| 1.3. Metodología..... | 5 |
| 1.4. Objetivos de Desarrollo Sostenible..... | 6 |
| Segunda parte: el arco, unión entre dos puntos..... | 7 |
| 2.1. Puentes en arco de hormigón armado..... | 9 |
| 2.2 Arenas de Pablo, ingeniero y esteta..... | 18 |
| 2.3 El puente de Miraflores..... | 26 |
| Tercera parte: la bóveda, al servicio de la innovación..... | 32 |
| 3.1 La patente Guastavino y la lámina esbelta..... | 33 |
| 3.2. Philippe Block y el grupo BRG..... | 39 |
| 3.3 Prototipo de bóveda rebajada nervada en su parte superior..... | 45 |
| Cuarta parte: conclusión y discusión..... | 50 |
| Bibliografía..... | 55 |
| Índice de ilustraciones..... | 56 |

Anejo I: *Almacenes en el Chiasso: Chiasso Magazzini Generali.*

Anejo II: *El puente del barranco de la Salgina: Salginatobelbrücke.*

Anejo III: *El puente del torrente de Schwand: Schwandbachbrücke.*

Anejo IV: *El puente de Miraflores en Bilbao.*

Anejo V: *Fotografías seleccionadas del Viaducto de Morlans. Realizadas por el autor el día 17 de agosto de 2021.*

Anejo VI: *Fotografías seleccionadas del puente de Miraflores. Realizadas por el autor el día 18 de agosto de 2021.*

Primera Parte. Introducción.

1.1. Estado de la cuestión.

Desde el nacimiento de la ingeniería civil como disciplina técnica se ha producido un intercambio entre ésta y la arquitectura de ideas, métodos, conceptos y formas.

Ambas han estado estrechamente unidas durante la historia sin hacer distinción entre ellas, hasta que se separaron como disciplinas diversas.

Para abordar este trabajo era necesario acotarlo, es decir, centrarlo en una materia específica estudiada por ambas, por lo tanto; dado que la definición de arco es porción curva que une dos puntos en el espacio y tratando estos puntos como la ingeniería civil y la arquitectura obtenemos que el arco será el generador del proyecto.

El arco es un elemento que ha sobrevivido al paso del tiempo, adaptándose a las circunstancias de cada época, es decir, a los materiales y a las técnicas de cada período, aunque manteniendo la capacidad estructural, espacial y expresiva que hace que tanto arquitectos como ingenieros opten por esta forma y sus derivados, incluso para basar toda una vida profesional en ella.

La elección de este nexo formal hace plantearse qué formas específicas se obtienen de él, en este caso se eligen: el puente en arco de hormigón armado como parte de la ingeniería, y en concreto el puente de Miraflores de Bilbao de Juan José Arenas de Pablo, un ingeniero español que supo sintetizar la historia en favor de la mejor expresividad estructural; y por otro lado, en un ámbito más arquitectónico, se elige la bóveda como elemento a analizar y de la mano de Philippe Block y el grupo de investigación que lleva su nombre, se indaga en los conceptos estructurales necesarios para llegar hasta el prototipo de bóveda rebajada nervada en la parte superior que han desarrollado recientemente.

Los dos personajes que sirven para estructurar este trabajo poseen un acercamiento a la práctica diverso, pero con un *leitmotiv* común, la técnica como método proyectual y la renuncia de lo superfluo para crear estructuras gráciles y efectivas. Ambos también han basado la mayor parte de su carrera estudiando las formas funiculares, lo que los hace idóneos para abordar este trabajo siguiendo su obra y lo que han escrito sobre ella.

Este trabajo también nace de una fascinación personal del que escribe por este tipo de construcción, por lo que se afronta de manera que los conocimientos adquiridos sirvan para poder ejecutarlos en el futuro.

1.2. Objetivos.

La intención de este trabajo es observar la ingeniería civil desde el ojo arquitectónico y descubrir qué avances puede ofrecer a la disciplina de la arquitectura. Todo esto a través de la figura del arco como método de desarrollo de estructuras ligeras.

El objetivo será poder entender de una manera profunda las estructuras que obedecen a formas funiculares, centrándonos primero en las obras de ingeniería a gran escala, como son los puentes en arco de hormigón armado, para luego descender la escala hasta la bóveda y qué innovaciones se han acontecido sobre ella.

Otro de los objetivos es la apreciación por la historia, los personajes elegidos para el desarrollo de estas ideas son grandes promulgadores de que sin ella es imposible acercarse a la innovación, esta es otra razón por la que resultan idóneos.

A través del desarrollo histórico se abordarán conceptos que fueron una revolución en su momento o bien sirven para poder entender otros que vinieron después. Todos ellos son pequeños o grandes avances en un transcurso puntual por la historia de la construcción, haciendo hincapié en lo que es útil para este objetivo.

También se pretende con estas palabras realizar una labor divulgativa, la ingeniería civil es una disciplina que los arquitectos tenemos muy cerca y debemos nutrirnos de ella para poder extrapolar ideas y métodos proyectuales o constructivos que puedan ser útiles para los problemas que se enfrenta hoy en día la arquitectura.

En opinión del que suscribe, la práctica arquitectónica tiene, además de otros muchos, un compromiso con la humanidad en el ámbito técnico, y es el de crear edificaciones resilientes y comprometidas, empezando por el sustento de estas, la estructura.

En un contexto de crisis climática, la labor del arquitecto es hoy más que nunca, acercar la técnica a la escala humana, para un desarrollo más amable, ligero y efectivo de la construcción, sin que ello comprometa las cualidades estéticas que la han circundado durante la historia. Es por ello por lo que se debe acercar a otras disciplinas para observarse desde ahí y poder llegar a nuevas conclusiones que hagan que la práctica sea más rica.

Esta es la motivación del trabajo, analizar la obra de dos ingenieros que manejan todos estos conceptos en su práctica profesional, Juan José Arenas de Pablo desde la construcción de grandes puentes, mientras que Philippe Block desde la escala más pequeña, a la vanguardia de los nuevos tipos de estructuras funiculares.

1.3. Metodología.

En un primer momento la obra a estudiar de J.J. Arenas se elige dentro del territorio nacional, donde ha desarrollado la mayoría de sus obras, para poder visitarla, es el caso del Viaducto de Morlans y el Puente de Miraflores en Bilbao, es por ello por lo que las fotos aportadas aquí sobre estas dos obras son propias del autor.

Para el desarrollo de los puentes de hormigón armado y la evolución de ellos a través de la historia se elige seguir los pasos de Arenas de Pablo en el libro *Caminos en el Aire*, ya que se considera importante atender a la labor divulgativa del ingeniero, así como cuáles son sus inspiraciones y, sobre todo, su visión sobre la ingeniería, para posteriormente, enfrentarnos a su obra.

A la hora de afrontar el análisis del Puente de Miraflores, ya que no existen textos sobre él, se hace estudiando los puentes de Arenas de Pablo a través de artículos en revistas como la *Revista de Obras Públicas*, escritos por colaboradores y compañeros de profesión, así como publicaciones de congresos escritos por el ingeniero. También ha sido de gran ayuda las aportaciones del estudio *Arenas & Asociados*, cediendo los planos del proyecto y fotografías durante el proceso de construcción.

Por otro lado, para abordar el trabajo del grupo BRG y Philippe Block, se ha recurrido a la lectura y análisis de las publicaciones de los prototipos que ellos mismos proporcionan en su página web, que son una recopilación de los artículos publicados para diferentes congresos y ponencias. También se ha recurrido a la lectura de *Beyond Bending* como pieza fundamental para enlazar todos los trabajos del grupo, nacido de la exposición para la Bienal de Venecia de 2016.

Como complemento, y para realizar un estudio significativo en cada caso, se han consultado artículos, actas de congresos, trabajos finales de máster y tesis doctorales que pudieran aportar información más desarrollada sobre temas específicos como estática gráfica o métodos numéricos. También se ha recurrido a la lectura de textos desarrollados por figuras reconocidas de la ingeniería de nuestro país, como Carlos Fernández Casado o Leonardo Fernández Troyano, así como internacionales, como David Billington.

Todo el proceso de aprendizaje de la materia de la ingeniería aquí expuesto es el recorrido que ha seguido el autor para poder tener la imagen completa de qué significa esta materia, el recorrido de la mano de la historia es muy fructífero en este caso, para comprender lo que sucede hoy, hay que saber lo que ha sucedido en el pasado.

1.4. Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La motivación última y personal del trabajo es conocer de primera mano un campo distinto a la arquitectura, ya que en opinión del que suscribe, es el arquitecto el responsable de humanizar la técnica, de extrapolar conocimientos de otras artes para canalizarlos en la construcción del hábitat del ser humano, para *'conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles'*.¹

El trabajo analizará en particular dos proyectos estructurales cuyo punto de partida es el deshacerse de lo superfluo de la construcción, el obtener lo sencillo y funcional; en concreto, la obra de Philippe Block, quien junto al grupo de investigación que lleva su nombre, BRG, desarrolló un prototipo de forjado de bóveda rebajada que ahorra un 70% de la masa de hormigón con respecto al forjado tradicional y así *'desarrollar infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación'*.²

La tipología de forjados a analizar en este trabajo no sólo ahorra una gran parte de la masa de hormigón con respecto a su solución habitual, sino que por el sistema que encierra, de bóveda rebajada nervada en su parte superior, es capaz de prescindir la inclusión de barras corrugadas en el interior de la pieza, lo que supone un cambio en la industria y un ahorro considerable en ejecución del forjado, lo que permite *'asegurar el acceso a energías asequibles, fiables, sostenibles y modernas para todos'*.³

A través del estudio de una disciplina como la ingeniería, donde la optimización de las estructuras es uno de los mayores puntos de partida; con técnica como motor de cambio que impulsa nuevas maneras de concebir la industria y los procesos constructivos de la edificación, podremos como arquitectos, desde nuestra pequeña posición en el entramado de la sociedad el *'fomentar el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos'*.⁴

La investigación en nuevos procesos, técnicas y soluciones en la edificación, en particular en la parte que hace posible que se tenga en pie, a través de la reducción de material y el mejor empleo de éste es en opinión de quien escribe, una faceta que tiene que sostener el arquitecto para construir y construirnos como sociedad moderna, resiliente y sostenible de cara al futuro.

¹ Objetivo número 11 de Desarrollo Sostenible.

² Objetivo número 9 de Desarrollo Sostenible.

³ Objetivo número 7 de Desarrollo Sostenible.

⁴ Objetivo número 8 de Desarrollo Sostenible.

Segunda parte: el arco, unión entre dos puntos.

El arco es una estructura resistente gracias a su forma, la geometría de este es la que le otorga su capacidad portante mediante un mecanismo en el que predominan las compresiones. (Fernández Troyano, 1999, pág. 291)

'El arco es el primero y mayor invento del hombre en el campo de las estructuras; se puede objetar que ha habido estructuras anteriores al arco, [...]. Se puede objetar que el puente colgante es un invento análogo y contemporáneo al del arco, pero no es así porque si suspende una cuerda de dos puntos toma espontáneamente la forma de catenaria y es, por tanto, una estructura deducida, no inventada. El arco, en cambio, es un invento humano, la materia nos organiza espontáneamente en forma de arco, hay que construirlo. A partir de la idea de su comportamiento resistente.' (Fernández Troyano, 1999, pág. 291).

Ha sido el elemento resistente por excelencia durante la historia, con una edad de alrededor de seis mil años, nace en la cultura mesopotámica, quienes lo usaban para drenajes y estructuras subterráneas. Se transmite hacia Europa a través del Imperio Romano, quienes fueron los primeros en aplicarlo para edificios monumentales. Éstos construían arcos de forma intuitiva, a través del método de los tercios, el cual dimensiona el estribo con relación a un tercio de la luz que cubre dicha curva. (Fernández Troyano, 1999, págs. 291-293).

Posteriormente, gozará de una época de esplendor alrededor del siglo XVI para la construcción, sobre todo, de iglesias y catedrales y más cercano hasta nuestros días, para la realización de grandes obras de ingeniería en la construcción de puentes.

Viollet le Duc distinguía entre tres tipos principales de arcos, los de *medio punto* (1), formados por un semicírculo, los arcos *rebajados* (2), que estaban formados por media elipse y poseían un gran diámetro en su base y por último los *ojivales* (3), formados por dos arcos de circunferencia que se intersecan generando un ángulo curvilíneo más o menos agudo en su parte superior.

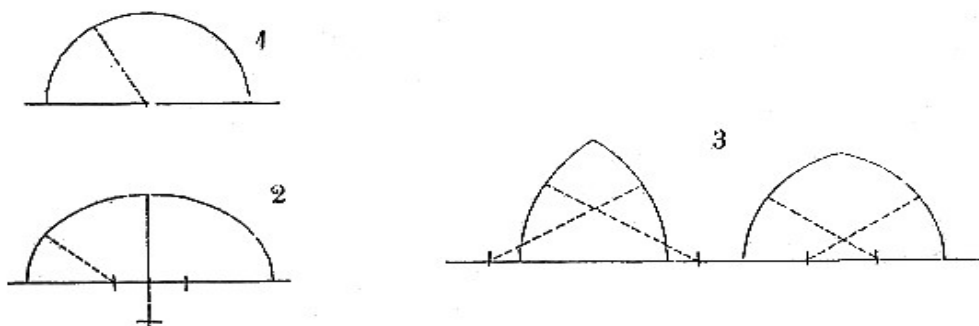


Ilustración 1. Tipos de arco según su generatriz.

De estas tres tipologías aparecen otros, nombrados también por el autor; los arcos de medio punto, elevados, se convierten en arcos *peraltados* (4), o se les llama *de herradura* (5). Otra variante será la inversa, cuando el centro del arco se encuentra por debajo del arranque, y tomará el nombre de *arco rebajado* (6).

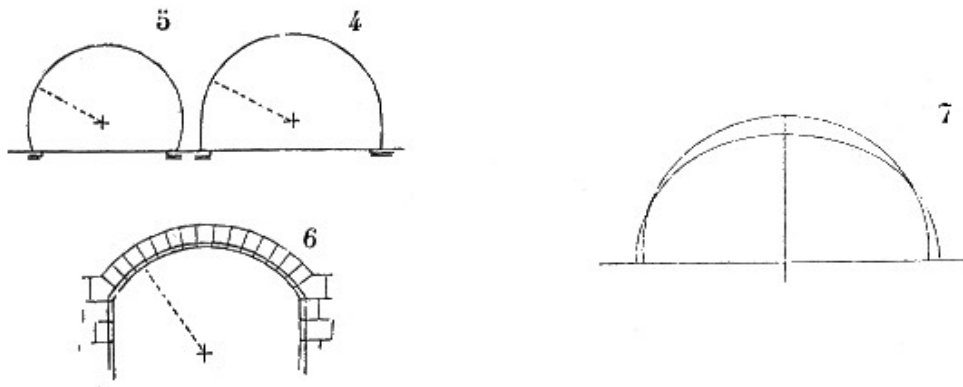


Ilustración 2. Tipos de arco según su generatriz.

Le Duc también apuntará a colación de los arcos rebajados, que la gran mayoría de ellos observables durante el periodo románico serán casi siempre el resultado del espaciamiento de los muros a ambos lados de un arco de medio punto (7). (Viollet-le-Duc, 1854).

El arco en la construcción ha sido un elemento cambiante con los tiempos en cuanto a materialidad, comportamiento y ejecución, pero manteniéndose fiel a la condición que lo caracteriza, su forma. En palabras de Leonardo Da Vinci:

'El arco es una fortaleza causada por dos debilidades..., está compuesto por dos cuartos de círculo, cada uno debilísimo de por sí, que tienden a caerse y de esta forma se oponen a la misma el uno del otro, las dos debilidades se convierten en una única fortaleza'. (Zamattio, 1990).

A la hora de realizar arcos de hormigón, en obra menor, se puede realizar la analogía con una viga de canto, teniendo en cuenta que, según la geometría de la pieza, resistirá mejor a las compresiones, por lo tanto, a modo de ejemplo se presenta un esquema de un arco de medio punto seccionado, donde se aprecian las armaduras longitudinales y los estribos que lo componen. Nótese que presentan armadura mínima ya que el arco sostendrá principalmente los esfuerzos gracias a las compresiones. (García., 2004).

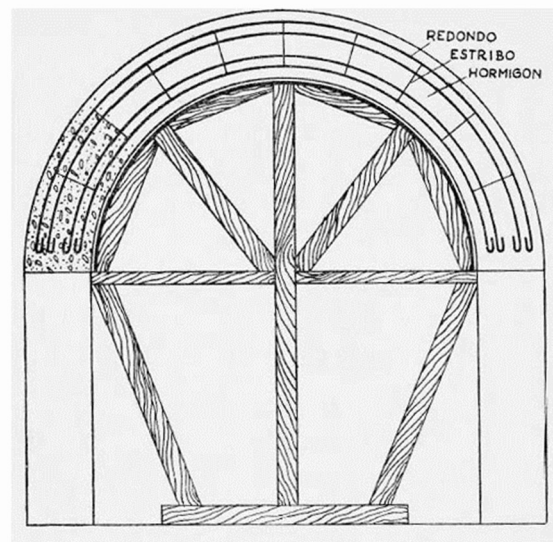


Ilustración 3. Arco de medio punto de hormigón armado.

2.1. Puentes en arco de hormigón armado.

La construcción de estructuras de hormigón le debe su existencia Roma 'y es que Roma dominó la técnica de fabricación de cales hidráulicas' (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, pág. 681). El *opus caementicium* les servía para rellenar los sillares vistos en las grandes obras puente. Es en esta época cuando el hormigón accede al rango de material arquitectónico, en particular en la obra del Panteón de Agripa, donde se deja visto y combinado con un sistema de casetones, aligerado y también formando parte de los grandes muros de carga que soportan la gran cúpula monumental. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, pág. 681).

Cuando cayó el Imperio, el desarrollo del cemento se vio afectado, hasta el punto de ser abandonado y olvidado hasta muchos siglos después. Llegados al siglo XVIII, el desarrollo de grandes estructuras, en particular los puentes para dar cabida a un acelerado proceso industrial llevan a los ingenieros civiles a enfrentarse a retos, que, de haber conservado las técnicas durante la historia, no hubieran sido tan laboriosos, conocido es el caso de John Smeaton en el faro de Eddystone.⁵ (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 682-684).

En cuanto a la asociación entre cemento y acero, el antecedente más claro se sitúa en la obra de Perrault en el museo del Louvre, sin olvidar que en este estadio la técnica fallaba, las barras estaban mal aisladas, se oxidaban y terminaban rompiendo la piedra donde se insertaban. Pero todo cambió con la entrada en el juego del cemento Portland; la capacidad de fabricar grandes volúmenes de masa de hormigón, la maleabilidad y la resistencia a compresión muy equiparable a la de la roca, supuso una gran ventaja para la ejecución de grandes obras civiles. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, pág. 685).

Juan José Arenas de Pablo habla de que la idea de la invención del hormigón armado no podría haber nacido de una cabeza teórica como la de un ingeniero, ya que, al ser materiales diferentes, no se sabía cómo se mantendrían en contacto respecto al estirarse uno sobre el otro frente a una variación térmica. Por suerte para Monier, jardinero del Louvre, ambos materiales tienen coeficientes de dilatación bastante parecidos y fue capaz de patentar vigas de hormigón con acero incorporado al final del siglo XIX. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, pág. 687).

El matrimonio acero-hormigón es una unión muy ventajosa a todas luces, el problema de la corrosión del metal que experimentó la solución de Perrault en el Louvre se ve solucionado ya que el hormigón protege a las armaduras contra la corrosión; en palabras de Zafra: *la adherencia es el resultado de la formación alrededor de cada barra de una costra delgada de silicatos y aluminatos de hierro y ferratos cálcicos en íntimo contacto con aquella y es más íntimo aún por la desigualdad de la superficie lateral con el conglomerado. Esa costra formada durante el fraguado y oprimida contra las barras por la contracción*

⁵ En el faro de Eddystone, John Smeaton se enfrenta al problema de durabilidad del mortero frente a las condiciones de oleaje continuado que comprometía la estabilidad de la construcción.

que en general sufre el hormigón durante aquel es química y físicamente estable. Químicamente, preserva el hierro de la herrumbre o, en general, del ataque de los cuerpos que, disueltos en el agua, pueden empapar el hormigón. Extraído del tratado básico de Hormigón Armado de Juan Manuel de Zafra. 1923. pág. 20.

Podemos notar en este texto de 1923, que aún faltaba mucho por descubrir sobre esta combinación de materiales, hoy en día sabemos denominar a estos fenómenos de un modo más acertado. El fenómeno de la corrosión de las armaduras se evita gracias a que el agua de los poros del hormigón es altamente alcalina, se produce sobre la superficie de éstas una capa microscópica de óxido llamada capa *pasivante*, altamente compacta, que evita la disolución del hierro e imposibilita su corrosión.⁶ (CEB Desing Guide, 1992).

La historia del hormigón armado está llena de grandes nombres, de los cuales los estudiantes de arquitectura oyen hablar en las escuelas a través de métodos de cálculo, grandes obras de ingeniería o como en este caso, de sistemas constructivos, como el sistema Hennebique.

François Hennebique aporta a la historia de la construcción la viga en sección 'T', nacida de la asociación de una viga de canto con el solado de la planta que soporta, ésta será 'el primer paso en la dirección de formas nuevas y en el campo de las estructuras monolíticas, potencialidad intrínseca del hormigón que estaba del todo por descubrir' (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 690-699).

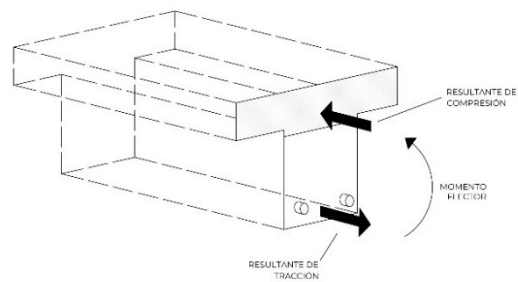


Ilustración 4. Concepto resistente de una viga de canto 'T'.

Conceptualmente el mecanismo resistente es muy sencillo, el momento flector ejercido en el alma de la sección se compensa con un par de fuerzas iguales en módulo, paralelas y de sentido contrario. La fuerza superior somete la pieza a compresión, mientras que la inferior tracciona la pieza, en esta parte inferior de la pieza se habrán colocado convenientemente una serie de armaduras longitudinalmente, a las que se les otorgará el nombre de armadura de flexión.

Este tipo de solución dará cabida a los puentes de tramo recto, por lo que para cubrir grandes luces ya no hará falta la solución del arco y el hormigón posibilita el declive de la utilización de la piedra, sustituida ésta por pilares esbeltos que sólo trabajarán a compresión. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 690-699).

⁷ El análisis del comportamiento mecánico de este tipo de sección se hace fundamental en este recorrido, para posteriormente entender el nacimiento de la sección en forma ' π ' para la resolución del tablero de los puentes en arco de hormigón armado, los cuales se afrontarán posteriormente.

Partiendo de la sección en forma de 'T' aportada por Hennebique, aparecerá en la obra de ingeniería la sección de tipo ' π ', por su parecido con la letra griega se llamará así y su capacidad innovadora reside en que a través de la unión del tablero con dos nervios que recorren el puente longitudinalmente, el tablero, que hasta ahora no había formado parte del mecanismo resistente, ahora sí lo hace, sin olvidar su parte funcional posibilitando el recorrido de personas y vehículos por su parte superior. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 703-705).

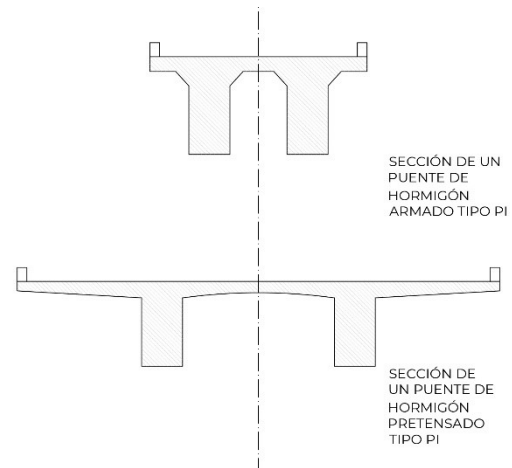


Ilustración 5. Sección arcaica y moderna de un puente tipo ' π '.

Gracias a la inclusión de las barras de acero dentro del hormigón, los ingenieros fueron y son capaces de generar puentes de mayor luz con menos material, siendo más efectivos en sus cálculos y métodos a medida que la técnica iba avanzando.

Uno de los primeros problemas a los que se enfrentan los proyectistas en aquella época, es que, en los tableros armados, además de aparecer momentos positivos en los centros de vano, también aparecerán momentos negativos en la parte superior de la pieza cuando ésta se encuentre con un apoyo intermedio, con la consiguiente disposición de armadura en esta zona.

Arenas de Pablo habla de la belleza invisible de un plano de armadura, ya que es según sus palabras, '*la mejor garantía de calidad de un proyecto*'. Ya sabemos que la redundancia y la simetría son aliados a la hora de construir estructuras fiables que a su vez son elementos que nos apelan de una manera sensible, por lo que le otorgamos el adjetivo de bello.

El desarrollo de las estructuras de hormigón sufre un avance grandísimo gracias a la inclusión del acero en su interior, otro de estos avances se aprecia en la construcción de bóvedas y arcos, estas estructuras se sostenían gracias a su propia forma, la estabilidad de estos elementos dependía hasta ahora de que la línea de presiones circulara dentro del arco o de la bóveda en cuestión, funcionando a compresión y respetando la antifunicularidad. A partir de este momento la antifunicularidad es prescindible, ya que las secciones compuestas por acero-hormigón son capaces de resistir esfuerzos que actúen fuera de los bordes, y esto es una condición muy deseable, señala Arenas, ya que el peso de los arcos de hormigón armado tenderá a ser muy inferior a aquellos compuestos por sillares, con lo que las excentricidades serán mucho mayores en las líneas de presión. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 705-710).

Otros de los grandes nombres que aparecen en este recorrido histórico son los de Emil Mörsch y su colaborador Wilhem Ritter. Mörsch a sus treinta años publica el tratado básico del hormigón armado, financiado por la propia empresa para la que trabaja: *Weiss und Freitag*. En este tratado se analizan diferentes secciones de hormigón armado sometidas a esfuerzos de

compresión, tracción o flexión. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 705-710).

A través de estos estudios en laboratorio, Mörsch es capaz de comprobar la ley de Navier-Bernoulli, la cual establece que dos secciones planas y paralelas, seguirán siendo planas a lo largo del proceso de deformación y por tanto se mantendrán planas después de este proceso, aunque las secciones de hormigón armado se fisuren parcialmente, esta ley se asumirá como correcta. Este hallazgo le permitirá plantear métodos científicos para el dimensionamiento de las barras de acero en el interior de una sección en 'T'. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 710-713).

Para este cometido, Mörsch representa el diagrama para el cálculo de tensiones en las fibras de hormigón como un par de fuerzas que actúan en la sección plana, una de compresión y otra de tracción que serán iguales en valor absoluto de no existir fueras de naturaleza axil actuando sobre ella. Este par de fuerzas equilibra el momento flector que actúan sobre la sección, par de fuerzas que será la fuera de tracción o compresión por su brazo mecánico y que dependerá de la profundidad de la fibra neutra. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 713-716).

Estas investigaciones desenmascararon los errores que había cometido Hennebique en su patente, ignorando las condiciones de equilibrio y cometiendo errores de bulto. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, pág. 712).

Como teórico e investigador, Emil Mörsch destaca mucho más que como ingeniero y proyectista, según señala Arenas de Pablo, ya que le tocó compartir época con dos de las figuras que brillan en la historia de la ingeniería y la construcción con luz propia; ellos son: Eugène Freyssinet y Robert Maillart.

'Porque ocurre que los grandes avances no provienen precisamente de la aplicación cuidadosa de los códigos y reglamentos oficiales sino de la inspiración más libre y basada en el conocimiento profundo de los mecanismos físicos de materiales y estructuras y de la intuición certera que de ese conocimiento deriva.' (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, pág. 716).

Así habla Juan José Arenas de Pablo sobre la figura de Eugène Freyssinet, un hombre de origen campesino, que apoyaba su conocimiento científico en su saber hacer como artesano, ya que durante su vida profesional fue capaz de desarrollar métodos y formas constructivas que lejos estaban de parecerse a lo que en las escuelas se impartía, y más tenía que ver con su temprano acercamiento a los oficios.

De esta índole, encontramos a un arquitecto contemporáneo con el que se puede establecer un paralelismo en la manera de concebir la práctica profesional, éste es Peter Zumthor, cuyo método para acercarse a la arquitectura es a través de su primera formación como ebanista, destacando por su sensibilidad en el manejo de materiales, dada su formación artesanal.

Y es que a veces el trabajo del proyectista puede verse alejado de la realidad, la mesa de dibujo está siempre a kilómetros de donde realmente se hará tangible, y es fácil que en esa distancia se pierda el contacto con la certeza de

la obra. El dibujo es un gran amigo del técnico, es el lenguaje más conciso y plural que conocemos, pero la verdad se encuentra en el barro, cuando se realiza la primera excavación.

Freyssinet, un hombre de carácter muy fuerte, que dedicó su vida a la construcción de grandes obras civiles, intentó que sus obras fueran recordadas como perfectas, sin fallos. Tanto su carácter como su obsesión fueron claves para entender su vida profesional, en la que, convencido de su genio fue capaz de realizar auténticas proezas, como es el caso del puente del Veudre sobre el río Allier, en la que, con el presupuesto para un solo puente, es capaz de resolver los tres que eran necesarios. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 716-719).

El puente se compone de tres bóvedas delgadas, rebajadas y triarticuladas de 72 metros de luz, inspirado en las celosías de acero, pero realizado con hormigón, lo que lo hacía completamente novedoso para su época y, en consecuencia, fuera de cualquier reglamentación. Tanto por la concepción de la celosía de canto variable, como por el espesor tan delgado, 30 centímetros, que poseía la bóveda, este ingeniero da un paso de gigante hacia el futuro del material novedoso que tenía entre manos. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 716-719).

Pasando por encima de los errores de retracción y fluencia que sufrió esta construcción, no debidos al hacer del ingeniero, si no a que estos fenómenos hasta el momento no se conocían, fueron enmascarados por los técnicos encargados de realizar el código francés del hormigón. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 721-722).



Ilustración 6. Puente del Veudre sobre el río Allier. Eugène Freyssinet.

En el código francés se trataba como un cuerpo elástico perfecto, se le suponían deformaciones de manera lineal, cuando en realidad, es un cuerpo viscoelástico que retrae durante el fraguado y que, sometido a una carga continuada de compresión, se acortará durante el transcurso del tiempo del orden de unas tres veces su acortamiento elástico. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 721-722).

Estos problemas fueron los que causaron que poco tiempo después de su descimbrado, las claves de los arcos descendieran unos 15 centímetros, una flecha del todo inadmisibles para una estructura. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002). El propio Freyssinet, solucionó este problema hormigonando las rótulas en la clave de las bóvedas, para este proceso, levantó las dos partes del arco triarticulado usando su sistema de descimbrado activo, otra de las aportaciones de este ingeniero audaz a la historia. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, pág. 723).



Ilustración 7. Hormigonado de la clave en el puente del Veudre.

El descimbrado activo consiste en levantar cada arco, colocando gatos hidráulicos en la clave y separando los dos semiarcos, que giran en la rótula de su arranque y son capaces de despegarse del encofrado, supone un despegue controlado y suave, frente al descimbrado usado hasta la época. Ésta será una más de las aportaciones del ingeniero francés a la historia de la construcción.

Siguiendo con el tema de las innovaciones en las cimbras, no se puede pasar por encima del Viaducto del Plougastel, viaducto de 600 metros de largo, compuesto por tres arcos de 190 metros cada uno. Una auténtica proeza para el momento y que Eugène plantea en hormigón armado, con la consecuente dificultad de su hormigonado debido a las corrientes que pudieran azotar la cimbra.

Para resolver este problema, plantea una cimbra flotante; un arco atirantado de madera que se ajusta a la forma requerida y que puede ser móvil. Con una sola cimbra, resolvió los tres arcos que componían el viaducto. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 727-730).

Hombre cuyo genio y determinación han dejado huella en la historia de la ingeniería civil, cuya intuición llevó la profesión hasta las cotas más altas, y de él podemos tanto ingenieros como arquitectos obtener inspiración para la práctica profesional.

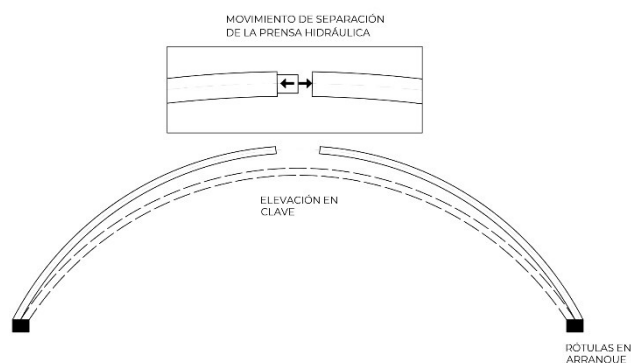


Ilustración 8. Esquema del descimbrado activo.

El último gran nombre, cuyo apellido resuena a la par en la historia de la arquitectura como en el de la ingeniería, de origen suizo y cuya sensibilidad e innovación es alabada sobre manera por Juan José Arenas de Pablo, posiblemente por la gran inspiración que este hombre supuso para su carrera, es Robert Maillart.

Nacido en Berna, Suiza, en 1872, licenciado por el Politécnico Federal de Zúrich en 1894 y discípulo de Ritter, beneficiándose así de tan talentoso profesor. Wilhem Ritter desarrolló métodos de cálculo basado en la estática gráfica a partir del desarrollo académico de Culmann. Esta forma de cálculo estructural, aunque hoy olvidada ya que los métodos analíticos son mucho más precisos, fue clave para el desarrollo estético que llevará a cabo Maillart en su obra.

La estática gráfica es un método por el cual se deducen las resultantes y las direcciones de las fuerzas a través del dibujo, siguiendo las leyes del paralelogramo y el principio de transmisibilidad. Con estos dos preceptos y siguiendo las investigaciones de Culmann, Cremona y el propio Ritter, se pueden plantear las estructuras de un modo iterativo entre diseño, cálculo y construcción, en un ciclo que la que la forma acabará pareciéndose al transcurso de las fuerzas que operan sobre la estructura.

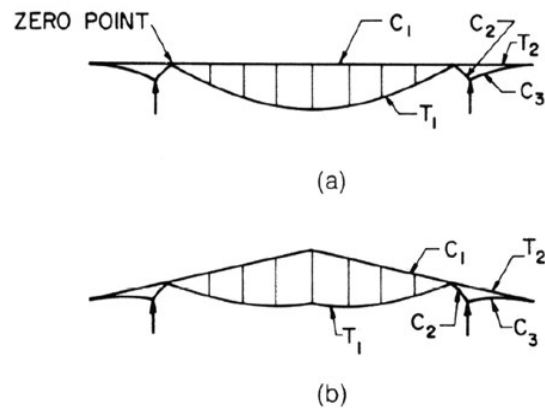


Ilustración 9. Ley de momentos actuantes sobre la fábrica en el Chiasso por Robert Maillart.

Un método que hoy en día sólo se imparte en las escuelas técnicas de manera anecdótica para entender el planteamiento matemático que ingenieros y arquitectos realizamos a la hora de calcular el sustento de la construcción.

La obra de Maillart tiene mucho que ver con esta forma de entender el proceso de creación, un caso muy particular es el de la nave de almacén de aduanas de Chiasso, una ciudad suiza limítrofe con Italia, en la que Robert Maillart plantea una construcción que obedece de tal manera al cauce de las fuerzas actuantes que acaba percibiéndose como una construcción orgánica, sin embargo, la forma es el resultado del equilibrio vectorial aportado por las condiciones de contorno. (Billington D. P., 2003). (Anejo I).

Se observa en la figura como el diagrama de momentos flectores es el generador del diseño. Maillart, a través de la obtención del diagrama y sabiendo las cargas que actuarán sobre una viga virtual, 'levanta' la parte central del dibujo resultante, llevando los momentos máximos a la cota cero, generando así la forma final de la estructura.

Este ingeniero basará su práctica profesional en la limpieza de las formas, apoyado siempre en el cálculo más riguroso de la estructura, lo que se traduce en un lenguaje económico que otorga una relación muy estrecha entre forma y función y en obras integradas en el entorno.

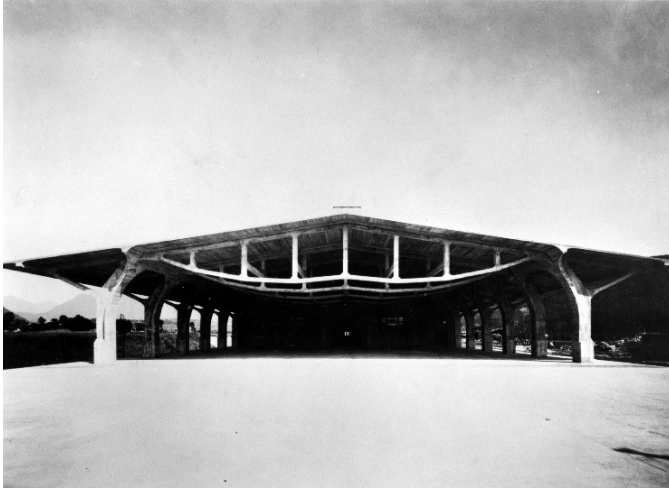


Ilustración 10. Magazzini Generali en el Chiasso.

Uno de los puentes más laureados y reconocidos de Robert Maillart es el del barranco de la Salgina, en el Cantón de los Grisones, que pasaremos a analizar, no sólo por lo extraordinario del mismo, sino porque tanto de él, como del puente de Schwandbach extraeremos claves importantes para entender la obra del ingeniero que apoya con sus palabras este trabajo y de quien hablaremos más tarde.

El puente de la Salgina, con una luz de 90 metros, una longitud de 113 y una caída de otros 91, fue construido en 1930 atravesando el valle de Schiers, en Suiza. Se trata de un arco triarticulado, muy parecido al que construyó veinticinco años antes en Tavanasa, sobre el río Rin, desgraciadamente destruido por culpa de una avalancha. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 741-748).

A esta plataforma de escasos 3 metros de ancho se llega a través de un camino estrecho por una ladera escarpada, en la que sólo cabe un vehículo a la vez. Entre la naturaleza exuberante aparece un camino en el aire, que salva el vacío con ligereza y comunica la ciudad de Schiers con la localidad de Schuders. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 741-748).

La bóveda, que en su parte más alta posee 3'60 metros de ancho y 20 centímetros de espesor, crece hasta los 6 metros y 40 centímetros en los arranques, un diseño grácil para absorber la acción del viento y las cargas gravitatorias. Los tímpanos, tanto los que componen la sección en π , como los que rigidizan la bóveda, rondan los 20 centímetros. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 741-748). (Anejo II).

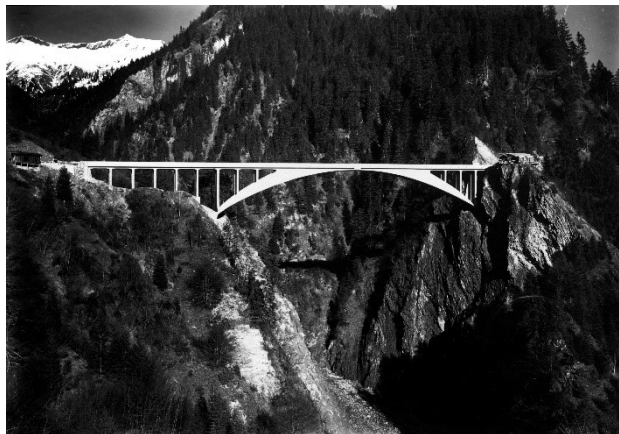


Ilustración 11. Puente de Salginatobel.

Y así, una construcción compuesta por tres elementos individualizables y delgados funcionará como un todo, en el que cada cuerpo aporta rigidez en su plano formando una composición que derrocha fuerza estructural y visual. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 741-748) .

Una composición que, como es habitual en la obra del ingeniero suizo, viene dada por la ley de momentos que actúan sobre la construcción, la forma del arco triarticulado, compuesta por dos triángulos obtusángulos es la transformación del comportamiento de una carga puntual en cada encuentro del tablero con la bóveda, y así las dos situaciones más desfavorables para el cálculo se convierten en la generatriz del proyecto. (Billington D. P., 2003).

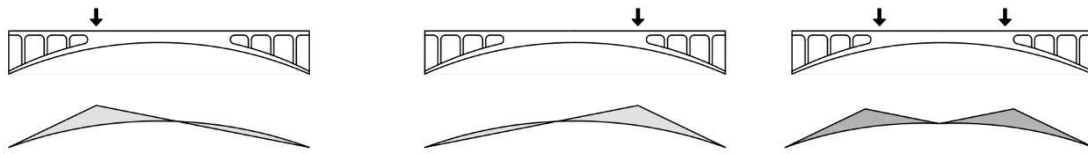


Ilustración 12. Leyes de momentos sobre un puente en arco triarticulado. Combinación de las dos situaciones más desfavorables.

Por último, se darán unas pinceladas sobre el puente del torrente de Schwand, en el cantón de Berna que Robert Maillart realiza en 1933. Una obra que obliga al ingeniero a ser lo más económico en el lenguaje que había sido hasta el momento. Un giro obligado en el camino le otorga la oportunidad de ser sintético y estricto, llevando el hormigón hasta la mínima expresión.

Una luz salvada de 37 metros bajo una construcción muy frágil en cada uno de sus elementos, como el tablero de 15 centímetros de espesor acotado por dos tímpanos continuos de 22 centímetros, aportan rigidez en el plano de flexión. Esta sección en doble T apoya sobre unos tabiques de 16 centímetros que llevarán las cargas hasta una bóveda de 20 centímetros de canto constante, que esta vez sigue las directrices del polígono de fuerzas y no se somete al convencionalismo de hacerla curva. (Arenas de Pablo, Caminos en el aire: Los puentes, 2002, págs. 758-761)

El arco laminar más limpio y riguroso construido por el ingeniero suizo, una pieza mucho más depurada que los puentes de Van Tschiel o Klosters, donde cada elemento es el mínimo necesario para la colaboración conjunta.

Y así es como fue, y así presenta Juan José Arenas de Pablo al ingeniero que tanto lo inspiró e influyó en su hacer como profesional. Un hombre comprometido con la técnica y con otorgar obras de una belleza potente y limpia, llevando el material al límite dadas las condiciones del entorno y el presupuesto, ya que la mayoría de su obra son pequeños puentes que conectan pueblos remotos del país alpino, donde lo primordial era el resolver el encargo de la forma más económica posible.

El legado de Maillart es inconmensurable, inspirando a una gran cantidad de ingenieros e incluso arquitectos, aunque llegar a su obra no es tan fácil. Por un lado, en las escuelas de ingeniería civil no se profundiza en su obra de una



Ilustración 13. Puente de Schwandbach.

manera estética o sensible, mientras que enfrente, su nombre queda ensombrecido por los grandes nombres de la arquitectura a lo largo de la historia. Sin embargo, si miramos su obra con atención podremos ver la belleza de los mecanismos resistentes sin adornos ni abalorios, tal y como lo hacía él y como lo hará nuestro siguiente ingeniero a citar.

'De un arte que no es, [...], más que técnica, llevada a niveles profundos, de bienhacer'.⁸

2.2 Arenas de Pablo, ingeniero y esteta.

En una biblioteca semivacía y por un golpe de destino, un joven estudiante de ingeniería coge un libro que resultó ser un monográfico de Robert Maillart, y allí, en esa misma biblioteca comenzó a brotar una semilla de sensibilidad estética, de depuración formal, de adecuación al paisaje y de ética constructiva. Ese joven resultó ser Juan José Arenas de Pablo.

Nacido en Huesca y formado en Madrid, termina sus estudios en 1963, obteniendo la matrícula de honor y el premio Escalona Fin de Carrera. Ya durante el grado, su deseo de construir le llevó a calcular, aún sin ser graduado, el Instituto de Investigaciones Científicas, de Manuel Fisac, un edificio de 14 plantas, en la empresa en la que realizaba prácticas. (ETSICCPV, 2002).

Desde 1963 a 1968 volverá a residir en su ciudad natal, labrándose un futuro profesional, hasta que vuelve a Madrid. En 1970 comienza su labor docente en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y en 1976 obtiene la plaza de Catedrático de Puentes en la Universidad de Cantabria, donde posteriormente establecerá su labor profesional a principios de los años 80 junto a su compañero Marcos Jesús Pantaleón, fundando *APIA XXI*, que corresponde a *Arenas y Pantaleón, Ingenieros Asociados* (ETSICCPV, 2002).

De esta época destacan puentes como el de la Barqueta de Sevilla y el de las Oblatas de Pamplona. Con especial atención a los puentes en arco de hormigón armado de tablero superior que se atenderán en este recorrido, de los cuales tres de ellos corresponden a este período, que son, en orden

⁸ Arenas de Pablo comenta a través de la obra de Maillart, la capacidad de llegar a las cotas superiores de la técnica, que en griego original (teknés) significa 'el bien hacer' y que el ingeniero suizo domina a la perfección, al llegar de la mano de la técnica y la estética a una depuración formal que servirá de inspiración para futuras generaciones de constructores.

cronológico; el puente en arco de la Regenta, el puente de Miraflores en Bilbao, y el arco del valle de Morlans en San Sebastián.

Este puente será el último junto a Marcos Pantaleón, embarcándose desde el año 1999 en una aventura en solitario en *Arenas y Asociados, Ingeniería de diseño*. Obtiene en el año 2000 el primer premio del Ponte dei Congressi en Roma, superando las propuestas de estudios de ingeniería como Ove Arup o Jörg Schlaich, prueba de que estamos ante un ingeniero de talla mundial. (ETSICCPV, 2002).

En esta nueva etapa cabe destacar el Puente del Tercer Milenio, en Zaragoza, un puente de hormigón armado en arco atirantado por el tablero o tipo *bowstring*, muy similar al puente de la Barqueta de Sevilla, aunque más depurado, consciente y bello, y, por ende, laureado. (ETSICCPV, 2002).

En la tipología que nos ocupa, y construido después del fallecimiento de Arenas destaca el viaducto de Almonte, para la línea de alta velocidad al paso sobre el río Tajo, un puente en arco de hormigón armado de tablero superior de 384 metros salvados, situándose en tercer lugar en los puentes en arco de hormigón más grandes del mundo, y a su vez constatando de que el espíritu del ingeniero oscense sigue vivo en los profesionales que continúan en su estudio.

Un hombre dedicado no sólo a su labor como constructor de puentes, sino también como docente y divulgador, ampliamente laureado por todas estas cualidades. Suyos son premios como la Medalla de Oro Gustave Magnel, I Premio ACHE, la Medalla de Honor al Mérito Profesional del Colegio de Ingenieros de Caminos (1992), el Premio Puente de Alcántara por el Arco de La Regenta (1998), o la Colegiación de Honor del Colegio de Ingenieros de Caminos de Cantabria, entre tantos otros. (ETSICCPV, 2002).

Es necesario dedicar unas palabras a su filosofía proyectual, muchos de los que trabajaron con él lo recuerdan postrado sobre la mesa de dibujo, y posteriormente de cara al ordenador. Dedicaba cuantiosas horas al diseño y a visitar una y otra vez el proyecto. Sostenía que las cosas siempre pueden cambiar para mejor, aunque fuese a última hora y eso significase el tener que rehacer gran parte de lo dibujado hasta el momento. (Aparicio, 2018).

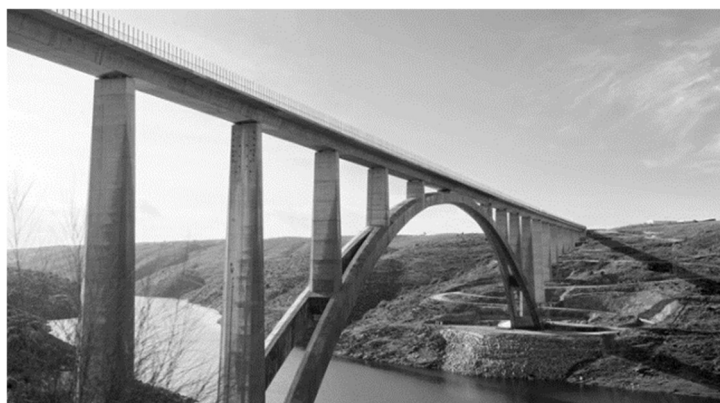


Ilustración 14. Viaducto de Almonte.

La belleza se encuentra en los ritmos y patrones, en el cuidado del detalle, en la expresividad de un plano de armadura, limpio y conciso que vislumbra su hacer como proyectista; *Ars armandi*, lo llamaban de forma cariñosa en su estudio, dado el hacer concienzudo de sus planos.

Su forma de entender la construcción era metódica y bien corroborada, les decía a sus aprendices que, a la hora de realizar la prueba de carga de un puente, ellos se debían colocar encima o debajo del mismo ya que un ingeniero de puentes *'tiene que estar seguro de lo que ha calculado'*. Enseñanzas que no sólo valen para ingenieros de caminos, sino que los arquitectos deberíamos adoptar de una forma activa. (Aparicio, 2018).

El éxito arquitectónico de la ingeniería civil proviene de un trabajo de depuración de la forma, ajustándola a los mecanismos resistentes y dotándola así, de autenticidad, de respeto hacia la materialidad de la construcción y a las respuestas estructurales a las que obedecen en cada tipología. (Arenas de Pablo, El arte y la estética en el diseño de puentes., 1995).

Un gran ingeniero y humanista de los que podemos hoy mirar a su obra y a lo que dejó escrito para nutrirnos como constructores, que, al fin y al cabo, tanto ingenieros como arquitectos, es lo que somos. Lo que nos diferencia es la escala, pero nos unen tantísimas cosas y una de las más importantes es el otorgar espacios fiables y duraderos, comprometidos con el terreno donde se encuentran y con las personas que lo ocupan.

Para entender mejor su forma de proyectar, y siguiendo el hilo llevado en este recorrido, sirvan de ejemplo dos puentes en arco de hormigón armado de tablero superior, construidos en la época de APIA XXI, junto a Marcos Pantaleón. Iguales en tipología, pero con soluciones diferentes, que denotan una de las idiosincrasias de la ingeniería civil; aunque a primera vista un puente es una *'construcción [...] que se realiza sobre ríos, fosos y otros sitios para poder atravesarlos'*⁹, cada proyecto es muy diferente a los anteriores debido a las condiciones de carga, vibraciones, apoyos en el terreno etc. Si a esto le sumamos la preocupación estética y de relación con el entorno que sostenía Arenas, obtenemos piezas que derrochan expresividad estructural.

Los puentes sobre los que se va a apoyar este estudio han sido elegidos por la belleza que emana de la simplicidad de los mecanismos resistentes que los gobiernan, según el propio Arenas, que, aunque sencillos de entender, es difícil llegar a comprender de una forma profunda la naturaleza de un arco. Es por ello por lo que el proyectista los abordó siendo ya un ingeniero consagrado, después de 30 años de profesión.

Los puentes en arco conllevan una naturalidad que los puentes atirantados no tienen, además son autocontenidos, y tienen un apego especial con la sociedad, recordando a los arcos y bóvedas romanas que inundaron el mediterráneo. (Astiz, 2018). Se componen de tres elementos principalmente; un tablero que apoya sobre unas pilas encargadas de llevar las cargas a la forma arqueada, que salva el valle o el río y transporta las cargas hasta los márgenes.

La elección de esta tipología a la hora de afrontar un proyecto puede ser por muchos factores, Juan José Arenas destaca que es la mejor forma para dar

⁹ Definición de puente por la Real Academia Española de la Lengua.

valor al tablero, que es el elemento lineal por el que discurren los vehículos y quedando el arco debajo de él, este transcurre limpio por el paisaje. (Arenas de Pablo, Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros, 1997).

Otra posible elección para esta tipología apuntada también por J.J. Arenas es que el puente se quiera hacer en un valle. Recordando el puente de la Salgina de Robert Maillart, podemos llegar a decir que la tensión que se genera entre el arco con el tablero y el cortado del valle es una melodía entre la naturaleza y la mano del hombre, que en ese momento se miran con ojos desafiantes.

En el caso de los puentes que a continuación sirven de ejemplo, ambos se ubican en un valle, de diferentes dimensiones, eso sí, y con diferentes entornos. El arco de la Regenta se sitúa en un contexto rural montañoso y obedece a unas grandes dimensiones, mientras que el arco de Morlans pertenece a un contexto urbano con una luz mucho más moderada.

En ambos casos la elección es acertada, en la Regenta, el arco salva el valle de 194 metros de una forma grácil, dejando pasar el tablero por encima de él, y continuando de una forma limpia el recorrido del viaducto, que en otros tramos se salvan los desniveles con tablero continuo sobre pilas apoyadas en el terreno directamente, dando importancia a la sinuosidad del trazado de la carretera. En Morlans el contexto urbano hace que el arco se perciba de una manera muy diversa, permite la circulación por su parte superior dejando libre la parte de la carretera inferior, esto es, sin pilas intermedias que corten la visual. Por tanto, el arco enmarca de alguna manera el paisaje urbano que tiene detrás, al aparecer después de una curva creando una puerta al contexto residencial.

En 1996 se inaugura el tramo de la nueva Carretera Nacional 632, que circula entre los municipios de Cudillero y Valdés en la costa de Asturias. Se dispone un nuevo trazado de 12 kilómetros que sustituye al antiguo de 22. El elemento que destacar es el Viaducto del Pintor Fierros de 386,1 metros de longitud, que salva el río Cabo a través del Arco de la Regenta Ana Ozores, de 194 metros de luz y 50 metros de flecha.

Una de las hazañas de este proyecto reside en el proceso constructivo llevado a cabo, avance en voladizo triangulado con tirantes, que aprovecha durante la construcción la propia obra definitiva. En esta época se retomó la construcción de los puentes en esta tipología gracias al método de avance en voladizo, ya que antes, para realizarlos, se sostenía a través de una cimbra, muchas veces costosa de ejecutar. (Arenas de Pablo, Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros, 1997),

Arenas de Pablo empeñó gran parte de su desarrollo en este proyecto al encaje paisajístico, no sólo de la pieza en arco, sino de los 12 kilómetros de carretera nacional. Divulgaba que los técnicos debían construirlas formando parte del paisaje, permitiendo desde ellas, una lectura correcta del entorno. Jugar con la composición y la escala para crear un encaje nuevo en el que la carretera y el paisaje formen partes de un todo nuevo. En sus propias palabras:

[...] las carreteras pueden formar parte del paisaje si se tiene un sentido correcto de la composición, si se comprende, en toda su profundidad, la cultura popular que creó el paisaje europeo y si se olvida, en cambio, la idea de que el paisaje está 'congelado' y que lo nuevo crea un impacto que hay que eliminar o disimular.

(Arenas de Pablo, Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros, 1997).

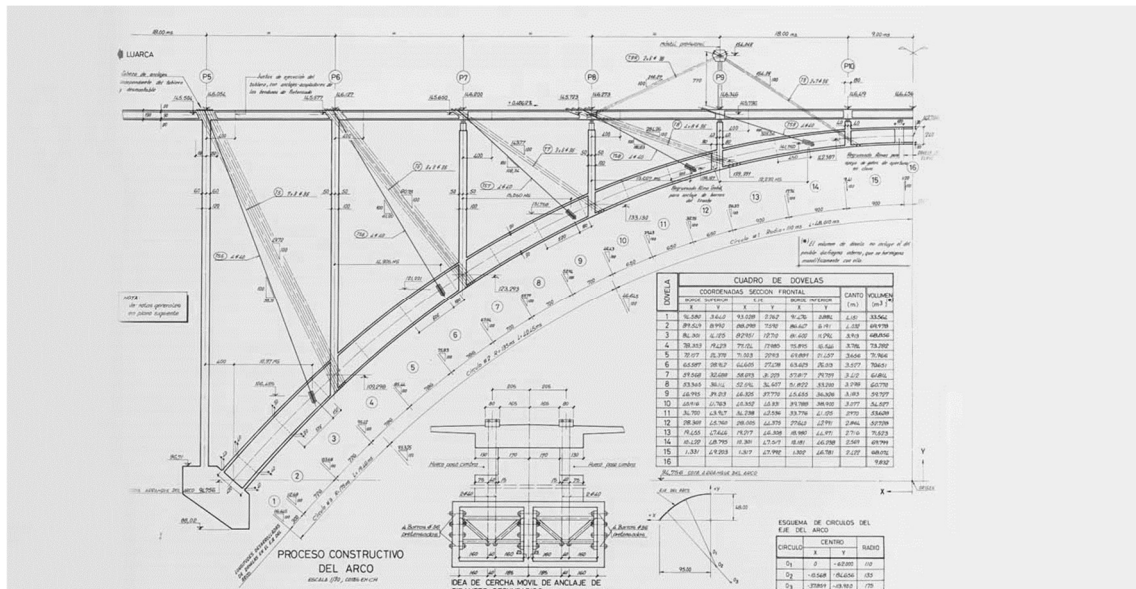


Ilustración 15. Proceso constructivo de avance en voladizo con tirantes en el arco de la Regenta.

La carretera se proyectó cómo una banda desenrollada sobre las laderas, armonizando con los ritmos, secuencias y curvaturas de la montaña; aquí vemos el sentido poético que el ingeniero le da a todo su trabajo, componiendo una melodía que sólo se escuchará si se pone atención al tempo suave que le impone. Su condición más humanista se percibe en cómo esas curvas, que respetan el terreno y el movimiento de la ladera, con absoluta naturalidad se acercan a los pueblos colindantes, revitalizándolos como áreas de servicio en los enlaces y el área de descanso del puente. (Arenas de Pablo, Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros, 1997),

Siguiendo con la línea de proyecto, en la que la importancia se le otorga a la carretera como elemento serpenteante, dará lugar a que, cuando aparezca un puente, éste será guiado por el tablero, formando puentes de vano recto apoyados sobre pilas. Esta filosofía rige el proyecto, hasta llegar al valle del río Cabo, en la que el cortado en forma de V invita a imaginar una nueva solución, llevada por la naturalidad de la mano a dibujar un arco de lado a lado imaginando que ese arco es el propio terreno estirándose para posibilitar la continuación de la calzada. (Arenas de Pablo, Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros, 1997).

La intención del arco es que rimase con los puentes de tablero recto anteriores. Arenas sostiene que tanto el arco de 194 metros de luz, como la flecha de 50,3 metros, su altura al fondo de 103 metros y los semiarcos de 110, 135 y 175 metros que componen la forma final estaban ya presentes en la naturaleza del lugar.

El viaducto se resuelve de forma similar al resto de los puentes, aunque con luces más cortas adecuándose a la naturaleza del arco, sin apoyar ninguna pila en su clave y separándose de él lo necesario para que se perciban como elementos independientes acentuando la limpieza del tablero. Las pilas mantendrán la forma durante todo el recorrido, de las cuales, 12 apoyan en el arco. (Arenas de Pablo, Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros, 1997).

Los materiales; hormigón para las pilas, la losa del tablero y el arco de sección alveolar y acero para la sección de tipo cajón del tablero, que continúa así con la misma sección constructiva que el resto de los puentes del trazado.

El tablero es de sección mixta y consta de 12 metros de anchura y 2,20 de canto. Se compone de un cajón metálico de acero autooxidable y autoprotector de 6,5 metros de ancho por un canto de 1,40 metros y una losa de hormigón armado con un voladizo de 2,85 metros de espesor variable entre 0,4 metros y 0,2 metros. Las pilas son macizas en sección recta para alturas de hasta 30 metros o de canto variable con sección hueca para alturas superiores. La cimentación es directa sobre zapatas en la mayoría del trazado, excepto en contadas ocasiones, así como en los estribos, que se realizan en forma curva para favorecer la transición entre la ladera y el viaducto. (Arenas de Pablo, Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros, 1997).



Ilustración 16. Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros.

La elección de la solución del arco, como ya se ha comentado antes, a parte de la potencia visual en alzado con el valle en V, viene dada por varios factores, cuando se tiene que salvar una luz importante son sustancialmente más ventajosos que los de tramo recto, obligados a soportar grandes flexiones.

Por su parte, un arco planteado como antifunicular de las cargas permanentes es una pieza de hormigón armado flexocomprimida muy poco fisurable, otorgando ventajas tanto deformacionales como de durabilidad y estéticas. Un arco constituye una pieza que deforma muy poco, cuyo comportamiento ante cargas vibratorias por el paso de vehículos es excelente y que no experimentará grandes deformaciones a largo plazo a causa de fluencia. (Arenas de Pablo, Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros, 1997).

El arco está compuesto por una sección tipo cajón bicelular de hormigón armado, formada por tres almas, más las tablas superior e inferior que encierran el conjunto. El ancho es uniforme de 10,5 metros, y a su vez, el canto varía desde los 4,20 metros a los 2,40 metros. En la clave la sección posee un alma de 40 centímetros y las tablas varían entre 30 y 24 centímetros, realizada así para su mejor comportamiento mecánico y ligereza.

La directriz del arco se compone de 5 círculos, es decir que, en cada semiarco, desde la clave hasta el arranque aparecen radios de 110, 135, y 175 metros.

Dada la visión del conjunto, las pilas fueron proyectadas de sección rectangular y maciza, con una dimensión de 6,5 metros en el sentido transversal del puente, mientras que en el alzado era necesario el canto mínimo, teniendo en cuenta el peso de las pilas sobre el arco, y que la flexibilidad en estas piezas minimiza los esfuerzos causados por el acortamiento del tablero. Todo esto apoya la intención de reducir el espesor de las pilas al máximo, sin caer en piezas demasiado esbeltas, se realizarán con un espesor de 80 centímetros para las cuatro pilas centrales, 1 metro para las siguientes y 1,20 metros para las de los extremos. (Arenas de Pablo, Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros, 1997).

Este proyecto fue el primer puente relevante realizado en arco de hormigón armado con tablero superior proyectado en el estudio APIA XXI, formado por Pantaleón y Arenas, viajando incluso a Austria para ver las innovaciones en esta tipología de cerca. Un puente que sentaría las bases para proyectos siguientes como el arco del valle de Morlans o el puente de Miraflores. (Pantaleón, 2018).



Ilustración 17. Viaducto de Morlans, San Sebastián.

Para Arenas de Pablo, el paisaje y la orografía tenían mucho que decir a la hora de proyectar una pieza, y a veces la personalidad de esta era posible gracias a el nacimiento del proyecto desde el propio terreno, esto ocurrió en el valle de Morlans en San Sebastián, donde un puente modesto y sencillo llama la atención de quien lo atraviesa. (Astiz, 2018).

Obra urbana que conecta el ensanche de Amara con los barrios residenciales en las colinas de Ayete, el puente está enclavado en un embudo natural, el Valle de Morlans. El reto del proyecto reside en realizar la comunicación necesaria para vehículos, sabiendo que, entre ambos lados del valle existe un desnivel del 8,6% y respetando la comunicación inferior, para lo cual se plantea un arco de hormigón con tablero superior, opción casi obligada dados los condicionantes. (Puente urbano de Morlans en San Sebastián., 2001).

Los puentes en arco de hormigón, aparte de ser una garantía de longevidad del proyecto, son soluciones que encajan con la forma del terreno, al aparecer la bóveda de forma natural de la ladera, crecer hasta recoger las cargas transmitidas por el tablero y descansar en el lado opuesto del valle. Cuando en un proyecto aparecen las laderas rocosas, es decir que son capaces de soportar las cargas oblicuas, es de obligado cumplimiento optar por la solución arqueada. (Puente urbano de Morlans en San Sebastián., 2001).

Arenas y Pantaleón plantearán un viaducto de 176 metros, salvando una distancia de 25 metros sobre el suelo. Compuesto por una bóveda flexible de 90 metros de luz y 1 metro de canto, cuyo espesor crece desde la clave hacia los arranques. Las pilas son de tipo pantalla esbelta y dan apoyo al tablero de sección trapezoidal de canto 1,50 metros y a diferencia de otros muchos puentes de esta tipología, es constante en todo su recorrido. (Arenas de Pablo, *Puente en arco del valle de Morlans en San Sebastián.*, 1999).

El tablero es pretensado y de sección tetracelular, consta de 3 almas verticales de 50 centímetros, entre ellas, los dos aligeramientos centrales, de forma octogonal alargada y los dos extremos de forma trapezoidal. Esta forma será la encargada de dar rigidez a flexión al conjunto. Posee un ancho de 7,20 metros y dos vuelos de 6,20 metros. Consta de vanos de 2,90 metros de luz, siendo 7 los que apoyan en el arco. La plataforma del tablero es de 19,6 metros en la cual se sitúan dos carriles para el tráfico en cada sentido, una mediana y una acera. (*Puente urbano de Morlans en San Sebastián.*, 2001).

La bóveda bajo las pilas, por su parte, es de sección maciza, y tan esbelta que resulta laminar, por lo que es incapaz de resistir flexiones importantes. La directriz de la forma es el antifunicular de las cargas permanentes que actúan sobre la construcción, de este hecho se obtiene que la bóveda tenga un alzado poligonal. Arenas de Pablo quiso darle cierta personalidad a esta pieza o 'aumentar su interés visual', para ello la bóveda la divide en dos, mediante una llaga que nace en los arranques y termina en la clave, para reducir la esbeltez lateral de las semibóvedas. (Arenas de Pablo, *Puente en arco del valle de Morlans en San Sebastián.*, 1999).

El puente del valle de Morlans obedece a una tipología nacida de las manos de Robert Maillart (recordando el puente del barranco del Schwanbach). Un arco laminar rigidizado por el tablero es una estructura de tres partes fundamentales que se necesitan entre sí para sostenerse. Por un lado, el arco anula las flexiones del tablero que crearía en él una carga repartida, mientras que el tablero filtra esas flexiones para que el arco trabaje a compresión. El vuelo del tablero es suficientemente extenso para que las bóvedas y las pantallas se encuentren cubiertas, dando proporción de formas en el sentido transversal. Mientras que el ritmo de las pantallas integra el conjunto escultórico. (*Puente urbano de Morlans en San Sebastián.*, 2001).



Ilustración 18. Vista del tablero, pilas y arco.

Las formas elegidas son cómplices de darnos a entender su funcionamiento; la ligereza de la bóveda dividida en dos acentúa pureza estructural, además del alzado poligonal que le otorga veracidad constructiva. Todos estos factores integran la obra en el paisaje urbano, en un enclave residencial, para convertirse en un objeto que, por la expresividad de los mecanismos resistentes, es digno de parar el coche para admirar.

2.3 El puente de Miraflores.

Si se estudia la obra de Juan José Arenas de Pablo con atención, y dado su carácter tanto innovador como docente, se encuentran artículos, actas de congresos y diversos textos sobre su obra, suyos como de compañeros de profesión al respecto de su *bienhacer* como ingeniero.

Las grandes obras de Arenas están documentadas y premiadas, y al respecto de los puentes en arco de hormigón armado con tablero superior, tanto el arco de la Regenta como el de Morlans gozan de unas palabras de su autor; este no es el caso del puente de Miraflores en la ría de Bilbao.

Se elige esta pieza para su análisis de forma detenida por varias razones, como el valor escultórico del mismo, su altura y situación en un contexto urbano, su enclave como puente que finaliza de alguna manera la concatenación de puentes en la ría y por último una labor académica de reconocimiento y documentación a una obra que navega de alguna manera entre las citadas anteriormente de forma muy capaz.

A través de la lectura de la historia de este tipo de puentes según los ojos del autor, los diferentes artículos al respecto de su propia obra y su visión de la ingeniería, apoyado por otros autores se procederá al análisis de la obra como pieza arquitectónica.

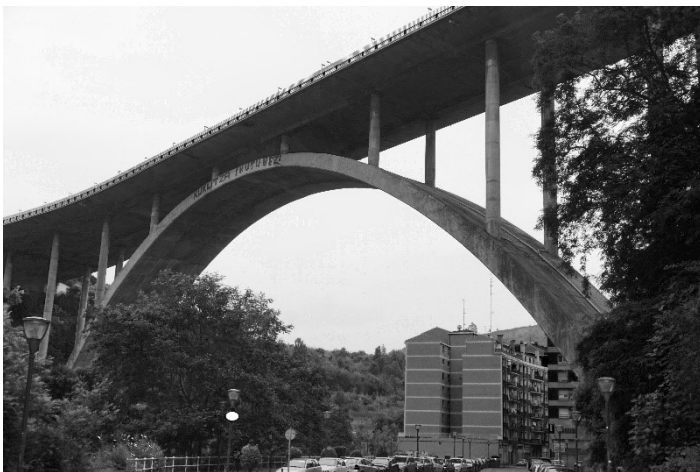


Ilustración 19. Puente de Miraflores en Bilbao.

A la hora de realizar este estudio, se contactó con Arenas y Asociados, que amablemente cedieron los planos y las fotos del proceso constructivo que apoyarán las palabras del que escribe. (Se extraen imágenes de los planos originales para ayudar a la comprensión del puente y se recopilan completos en Anejo IV).

Inaugurado en 1995 y realizado por Marcos Pantaleón y Juan José Arenas de Pablo al frente de APIA XXI, se plantea como entrada desde la A-8 hacia Bilbao a través del barrio de Bolueta, dejando bajo de sí el barrio de La Peña. Se instaurará como el segundo paso elevado sobre el Nervión después del puente de la Salve y su altitud de 45 metros lo coloca en segunda posición en los puentes más altos de la ciudad. (TurismoVasco, 2021).

Su nombre se le otorga gracias a una antigua pérgola que se situaba en el mismo punto donde se encuentra hoy este puente, que como en Morlans, tendrá dos formas de transitarlo, una por el tablero, y otra atravesándolo por debajo.

Enclavado en un valle a las afueras de la ciudad, este arco no obedece a las reglas impuestas por Arenas anteriormente, nace desde el suelo a un lado de la ría y acaba en el lado opuesto, dejando las laderas limpias, solo atravesadas por las pilas esbeltas que soportan el tablero.

Presumiblemente esto ocurre de tal manera por la naturaleza de las laderas, son terrenos muy cercanos a la ría, y por lo tanto se puede pensar que son suelos que no soportarían el empuje oblicuo de los semiarcos.

La construcción es individualizable en los tres elementos típicos, tablero que apoya sobre pilas descansando sobre un arco que salva la ría. Este efecto se aprecia en la separación del tablero sobre el arco, también habitual en los puentes de esta índole que ha realizado el autor.

El viaducto tiene una longitud de 319,5 metros divididos en luces entre pilas, desde la clave hacia los extremos, de 21 metros la luz central, las siguientes tres luces a ambos lados de 22 metros y a partir de este punto, las luces se hacen irregulares a ambos lados del eje de simetría. Más extensas en dirección a San Sebastián mientras que en dirección a Bilbao se reducen. Posee 15 pilas en total, de las cuales 6 apoyan en el arco, dos de ellas en el arranque de este, esto es, comparten zapata, y el resto apoya sobre el terreno.

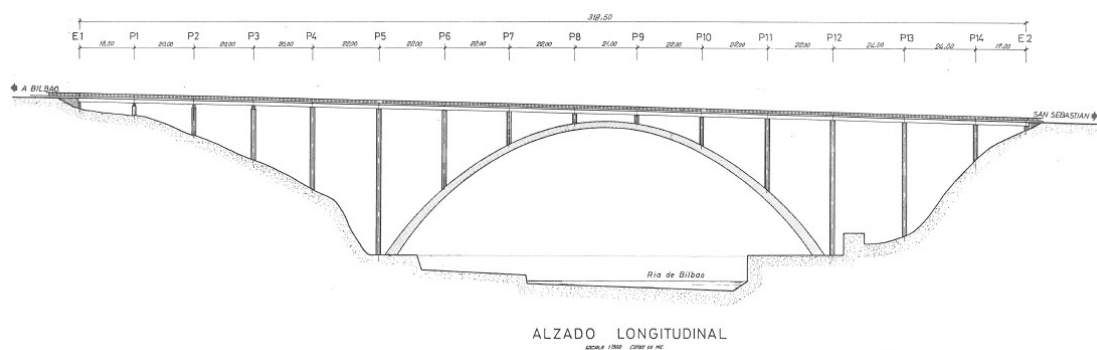


Ilustración 20. Alzado del puente de Miraflores.

El tablero es de tipo π alargada o moderna, con una pendiente del 2,5 %, de sección variable en su recorrido para posibilitar los distintos carriles para vehículos, así como su encaje viario con el resto de las calzadas que llegan a él. Este hecho es muy habitual en los puentes de esta tipología. Por otro lado, sí que mantiene ciertas medidas para el desarrollo correcto de la comunicación. La mediana tiene una longitud total de 2,80 metros, los carriles para vehículos 3,50 metros, el arcén también será constante de 1,50 metros y las aceras dependen del lado de la calzada, de 3,50 y 2 metros respectivamente.

El proceso constructivo obedece a la misma técnica aplicada en el arco de la Regenta, novedoso en aquella época y efectivo para aprovechar la propia construcción ejecutada para desarrollar la siguiente, el avance en voladizo con tirantes. Para realizarlo, es necesario el hecho de atirantar las pilas; el proceso se realiza en dos o tres partes, según la altura del tablero sobre el plano del suelo con cuatro cables tensados 8 toneladas. El atado de tirantes se realiza desde la zapata hasta la parte inferior del encofrado del tablero.

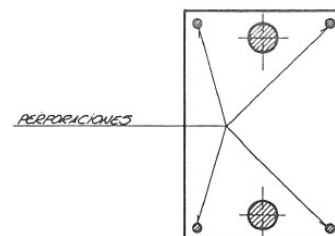
En cuanto a las zapatas, se realizan de forma directa en todo el recorrido del viaducto, apuntado un proceso previo a su ejecución. A través del sondeo se descubren cavernas bajo el plano de cimentación, así como pequeñas juntas rellenas de arcilla. Para evaluar la efectividad del terreno se ejecutan 4 perforaciones a destroza en las cuatro esquinas de las zapatas del arco. Estas perforaciones tendrán una longitud de 1,5 veces la dimensión en planta de la cimentación.

A la hora de entender la obra como un conjunto, es una pieza que navega entre dos mundos, por un lado, intenta hacerse desaparecer, prueba de ello es la separación entre elementos y la tipología de las pilas, individuales en vez de apantalladas y realizadas de forma cilíndrica, por lo que la luz cuando índice en ellas no crea aristas en sombra y tiende a desaparecer en el alzado.

La elección de realizar dos pilas sin arriostramientos entre ellas va en la dirección de hacer que la construcción sea lo más liviana posible a su paso por debajo. Así como su altura, además de ser la requerida para realizar de una forma eficiente el paso de vehículos por el tablero, el arco es lo suficientemente alto como para que las personas que lo transitan por su parte inferior tengan una visual limpia de lo que ocurre frente a ellos.

Sin embargo, esta altura también juega en contra de sí mismo, los requerimientos de proyecto hacen que el arco sea una pieza colosal. La bóveda es constante, de 15 metros en arranque crecen hasta la clave a 45 metros sobre la cota suelo y este hecho hace que la pieza se perciba como monumental.

En esta obra, Arenas consigue una pieza didáctica, en la que enseña cómo se comporta la construcción a través de la forma. El tablero transmite los esfuerzos a los nervios que recorren individualmente cada pila hacia cada semiarco de sección alveolar que muere en el suelo. Por lo tanto, podemos hablar de dos semiarcos que funcionan por sí mismos, pero que están unidos por su parte inferior y superior, completando un todo.



ESQUEMA DE DISPOSICION DE LAS PERFORACIONES

Ilustración 23. Perforaciones a destroza.

El ritmo de las pilas es interesante de destacar, desde Bilbao empieza con luces de 16 metros, hasta llegar a 22 en el arco, para luego volver a ampliarlas hasta 24 en dirección a San Sebastián, como un redoble de tambor que se va destensando a medida que se aleja del golpe inicial.

Este puente fue proyectado como la entrada a Bilbao desde la autovía, por su tablero, mientras que, por la parte inferior, el arco colosal también marca el primer puente de los tantos y tan variopintos que surcan el Nervión. Del otro lado, como ocurre en Morlans, crea una puerta al contexto residencial del barrio de La Peña.

Todo en esta pieza está hecho por una razón; el hormigón visto encofrado con tabla es la elección más acertada, cualquier otro color que se hubiese elegido para el puente hubiera sido un error. Tanto por el matrimonio tan efectivo que hacen el gris robusto del cemento con el verde vibrante de las laderas del norte de España, como el propio color del hormigón que difumina la pieza en el cielo bilbaíno.

Hay que decir, que este puente no tiene la pureza escultórica que tienen otras construcciones del ingeniero oscense, aunque aun así encierra valores que el autor ha intentado transmitir durante su carrera profesional; la belleza de los mecanismos resistentes llevada a cabo por la veracidad constructiva, la adecuación al paisaje como pieza arquitectónica que se relaciona con las personas que la utilizan y una estética limpia y concisa proporcionada por el estudio de la historia y el conocimiento profundo de las tipologías.

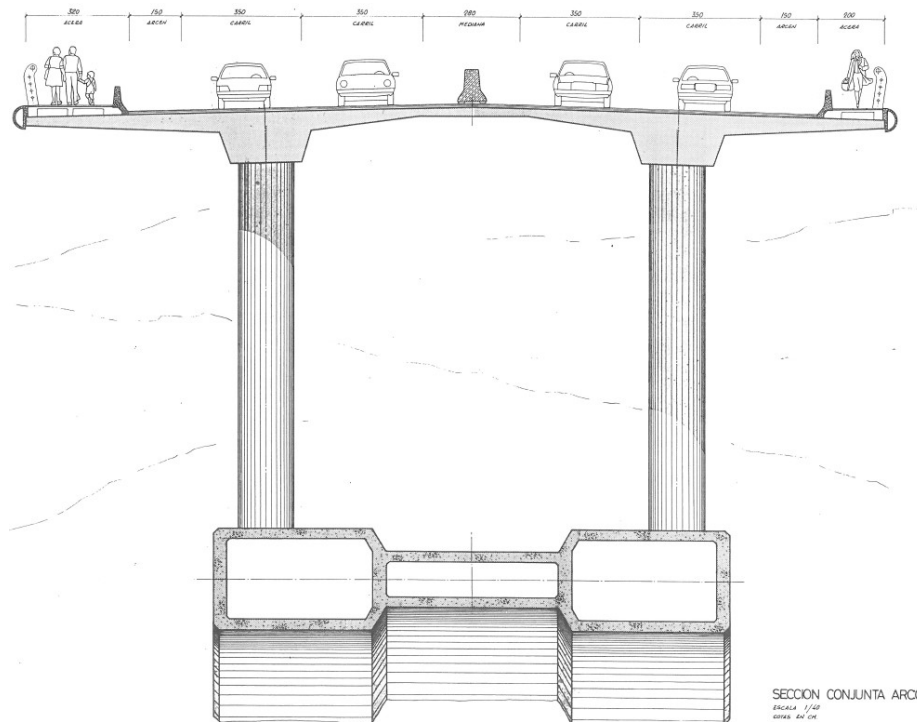


Ilustración 24. Sección transversal, arco y tablero.

Una pieza que en opinión del que escribe, no se le han dedicado las palabras que merece, hasta día de hoy.

En este modesto acercamiento a los puentes en arco de hormigón armado con tablero superior realizados por Juan José Arenas de Pablo podemos extraer varias claves que nos acercan a su obra.

La elección de esta tipología viene dada por la simplicidad de los mecanismos resistentes que posee; componiéndose de tres elementos: un tablero donde se realiza la actividad, unas pilas que transportan el peso de la misma hacia un arco que salva un accidente geográfico. Sin embargo hemos visto que depende de las condiciones del entorno, las cargas, las vibraciones del paso de los automóviles, la luz a salvar, la naturaleza de las laderas, etc. En cada ocasión utiliza soluciones diferentes.

Para luces grandes como en la Regenta o Miraflores, el arco es el encargado de asumir las flexiones, siendo éste de sección alveolar, mientras que en Morlans, la luz es moderada, y es el tablero quien asume las flexiones para dejar la bóveda maciza moverse en el antifunicular de las cargas. El arco intentará ser lo más esbelto posible siempre condicionado por la esbeltez lateral de las piezas.

La tipología de las pilas depende en parte de cómo se perciben en su alzado, como también dependen de la resistencia a los esfuerzos transversales, así aparecerán soluciones apantalladas, como en el arco de la Regenta o Morlans, mientras que en Bilbao corresponden a pilas pareadas de sección circular. Sabiendo que este tipo de sección posee la ventaja de asumir esfuerzos de corte en cabeza en todas las direcciones.

En cualquier caso, en el sentido longitudinal del puente, interesan pilas esbeltas, delgadas y flexibles, capaces de soportar los acortamientos del tablero por dilatación y contracción térmica. Así lo expresa Arenas en las palabras que le dedica al viaducto Pintor Fierros y al arco de Morlans, y observando el arco de Miraflores podemos concluir que sucede de la misma manera.



Ilustración 25. Vista del Arco de Miraflores.

Tres piezas de diferente escala que se mueven en contextos parecidos, con una tipología igual, pero que en cada caso el ingeniero ofrece una variante para construir obras óptimas que riman con el entorno y con su propio comportamiento físico.

Entendiendo esta forma de construir puentes en arco de hormigón armado, podremos dar el salto hacia una escala más pequeña, esto es, la escala que manejamos los arquitectos, uniendo los conceptos resistentes analizados en la obra de ingeniería.

Tercera parte: la bóveda, al servicio de la innovación.

El arco es la forma básica en dos dimensiones, y para cubrir espacios, aparecen en tres dimensiones, dos formas que desde Roma han sobrevivido hasta nuestros días; conceptualmente la cúpula se obtiene de la revolución del arco, mientras que la bóveda de su extrusión. En este recorrido haremos hincapié sobre esta última estructura, para llegar a comprender los últimos avances en edificación y así poder rimar los conceptos de ingeniería civil aplicables a la arquitectura de la mano de Philippe Block.

A la hora de proyectar bóvedas y construirlas, ya los romanos se preocupaban por la economía de las mismas, para cubrir grandes espacios como los de la Basílica de Majencio, se puede llegar a pensar que las cimbras para ejecutar las obras serían lo más costoso del proceso. Sin embargo, tras una mirada más profunda, se pueden descubrir los nervios de ladrillo que sirven de esqueleto a estas obras titánicas. (Viollet-le-Duc, 1854).

Como es de esperar, Roma sienta las bases de cualquier forma imaginable, pero es la tradición constructiva de cada lugar la que le da personalidad a la construcción. Así podemos distinguir tres formas diferentes de entender la ejecución de bóvedas en el territorio europeo según Billington:

Una es la tradición alemana, que tiende a racionalizar y a construir lo que puede desarrollar matemáticamente, como bóvedas y esferas, también mucho más arraigados al gótico. Por otro lado, está la tradición italiana, cuyo máximo exponente es Nervi, que tiende a ser historicista, es decir, reinterpretar las bóvedas romanas. Y, por otro lado, está la tradición española; estimulada por una concepción artesanal de la construcción. Todas estas líneas de pensamiento se desarrollaron en el periodo de entreguerras, aunque no vieron su apogeo hasta la década de 1950. (Billington D. , 1983).

La comprensión de la historia es el cajón al que hay que acudir cuando el desarrollo necesita de nuevas ideas para su avance, tomando conceptos o métodos aplicables a las nuevas tecnologías o tendencias.

Estudiar la historia de la ingeniería civil significa centrarse en dos aspectos; el primero significa mirar con atención lo que ha sido conseguido en el pasado, cuando se eligen unas formas concretas que han sido corroboradas por la tradición o el hacer constructivo de un de un pueblo concreto, y no utilizar aquellas que han resultado defectuosas. El segundo se centra en estudiar figuras concretas de la ingeniería, las cuales han aportado algo singular a la historia o han supuesto un avance en la materia. (Billington D. P., 1965).

Es decir, para Billington hay dos formas de entender el avance, uno es el de la propia profesión, a través de la forma y la experiencia se desarrollan técnicas y métodos nuevos que suponen la expansión de la materia, mientras que el otro es a través de los estilos personales que cada autor le imprime a su obra. (Billington D. P., 1965).

3.1 La patente Guastavino y la lámina esbelta.

Si bien la obra de Guastavino se centró principalmente en el desarrollo de estructuras hechas de fábrica de ladrillo, los sistemas estructurales que manejó son clave y sirven de inspiración para Philippe Block. Debido a esto, resulta necesario comprender la obra del maestro de obras valenciano, que llegó a América con un sistema extraído de la tradición mediterránea.

Rafael Guastavino Moreno nació en Valencia en 1842, llegó a Barcelona en 1861 para matricularse en la escuela de maestros de obras. No terminó sus enseñanzas aunque sí obtuvo el título respaldado por el Real decreto de 1871 que otorgaba la licencia a todos los matriculados al fundarse la escuela de arquitectura ese mismo año. (Redondo Martínez, 2000).

Comenzó sus trabajos en la propia Barcelona en 1866, suyas son varias viviendas en el Ensanche barcelonés y obras industriales como es la fábrica textil para los hermanos Batlló, la cual incluía una chimenea de fábrica de ladrillo de sección octogonal que aún hoy surca el cielo de la Ciudad Condal, además de otros tantos espacios abovedados usando la técnica de bóveda tabicada. (Piqueras, 2013).

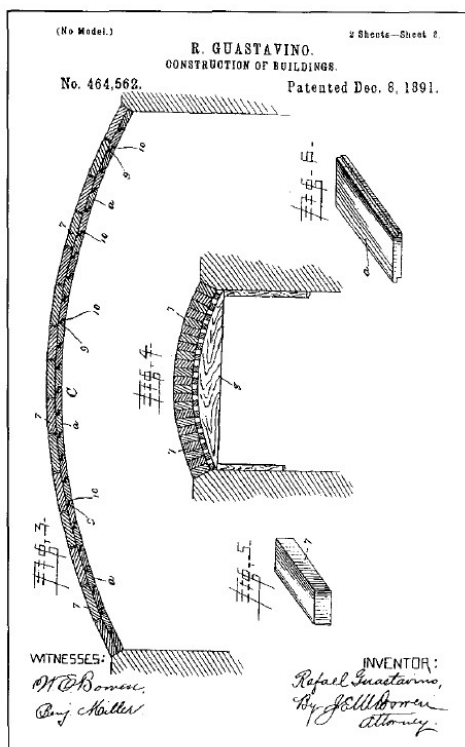


Ilustración 26. Patente de bóveda tabicada. Rafael Guastavino.

La bóveda tabicada o *a la catalana* es un sistema tradicional del levante español el cual se construye intercalando piezas esbeltas de fábrica de ladrillo o rasillas macizas, unidas con mortero.¹⁰

Entre las obras de Guastavino en el territorio nacional también destacan el monumento a La Gloriosa y el Teatro de La Massa.

Tras una conferencia en Filadelfia a propósito del centenario de la independencia de Estados Unidos, en la que el maestro de obras presentó un proyecto para mejorar la sanidad en las ciudades industriales, el cual fue premiado por el sorprendido público que la atendió debido a las capacidades frente al fuego que presentaba la cerámica con respecto a los sistemas americanos de construcción como el *balloon frame*, emigró a aquel país aprovechando la oportunidad de mercado. (Piqueras, 2013).

¹⁰ Guastavino argumentaba en este caso que él simplemente no patentó un sistema tradicional, sino que los maestros de obras fuera de Cataluña no conocían este sistema y que propuso innovaciones en sus patentes.

Las primeras patentes no distaban demasiado de lo que se había construido en España durante siglos, es el caso de la patente para escaleras tabicadas, sin embargo a partir de la entrada de su hijo en la empresa *Guastavino & Co.* el desarrollo fue muy significativo, llegando a cotas jamás imaginadas por los métodos tradicionales. (Ochsendorf, 2005).

La diferencia fundamental entre el sistema Guastavino y lo que se entendía como parte de la tradición constructiva del levante es que fue él quien lo trató como un sistema propio de ingeniería, aportando especificaciones, innovando en materiales, detallando minuciosamente el proceso de construcción e incorporando nuevos métodos para el cálculo estructural. (Ochsendorf, 2005).

De las innovaciones que introdujeron, son las más destacables; las pruebas de carga de las bóvedas de la biblioteca de Boston, que servirán para aumentar la confianza en el sistema del público estadounidense o la inclusión de refuerzos metálicos como parte fundamental del sistema. Los refuerzos metálicos se introducían entre las capas de ladrillo para arcos, muros y bóvedas. Estos sistemas serán los predecesores de las cáscaras construidas posteriormente en hormigón armado. (Ochsendorf, 2005).

En este recorrido y para hacer más comprensible la influencia que tiene Rafael Guastavino sobre Philippe Block se exponen dos de las patentes de bóveda tabicada, firmadas en 1886 y 1891.

Para la patente n° 464.562 se describe la construcción de bóvedas tabicadas en un contexto general, tanto para realizar escaleras como forjado. La gran ventaja de este tipo de forjado es que no se necesita de una cimbra para su construcción, será la primera capa de rasillas la que actúe como tal. Para esta primera cáscara se usarán ladrillos de junta machihembrada, que queda protegida con mortero de yeso en su parte superior y con mortero de cemento en su parte inferior. (Redondo Martínez, 2000). Sobre la primera capa se colocará una segunda, y esta vez sí podrá ser de fábrica de ladrillo ordinario con la especificación de que tienen que colocarse contrapeado, es decir, a 45 grados con respecto a la dirección de la capa inferior y protegido con mortero de cemento para completar el sistema que bautizó como *construcción cohesiva*. (Redondo Martínez, 2000).

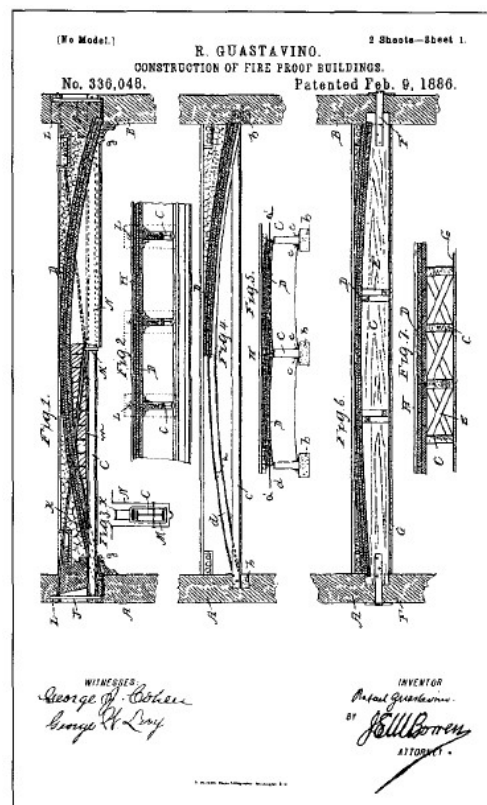


Ilustración 27. Patente de forjado resistente al fuego.

La otra patente digna de mención es la nº 336.048. Se trata de un forjado compuesto por una bóveda de cañón reforzada con tirantes de acero, se especifican en el documento también las respectivas variantes del mismo dependiendo de las cargas que tenga que soportar. (Redondo Martínez, 2000).

La construcción es similar en todos los casos. Se trata de una bóveda de cañón muy rebajada, formada por dos o más capas de ladrillo que apoya en dos muros paralelos. Los empujes de la bóveda en los muros se contrarrestan gracias a unos tirantes de acero anclados a una placa encima del muro. De esta forma, Guastavino consigue optimizar cada material apelando a su propia naturaleza; la cerámica, trabajando compresión, mientras que el acero trabaja a tracción. Por encima de esta capa se vierte un relleno para colocar el pavimento y se protegen las piezas de metal para no comprometer la resistencia al fuego del sistema. (Redondo Martínez, 2000).

Más de 600 bóvedas y cúpulas y alrededor de 1000 edificios repartidos entre 40 estados, la compañía Guastavino dominó la ejecución de grandes espacios, desde estaciones a bibliotecas, centros de reunión y lugares de culto. Su éxito no radicaba solamente en la resistencia al fuego que proporcionaba la fábrica con respecto a los sistemas con madera o acero, sino también aportar veracidad a la construcción, dado que anteriormente las cúpulas y bóvedas en este país se realizaban de cartón yeso.

Entre las grandes obras del maestro valenciano destacan: La Biblioteca Pública de Boston, El edificio de Registro de la Isla de Ellis, el Instituto de Artes y Ciencias y la Universidad de Columbia en Nueva York, el Banco de Montreal y el Museo Smithsonian en Washington D.C., obras que aún hoy en día podemos reconocer en numerosas películas y forman parte de la historia del cine. (Piqueras, 2013).

Buscando el mejor bien hacer, Rafael Guastavino supo elevar al grado de ingeniería una técnica probada durante la historia a la que le imprimió su propio sello, mejorándola y dándola a conocer en una tierra donde la necesidad acogió la experiencia mediterránea a través del buen criterio del maestro de obras valenciano.

Avanzando en el camino de la historia de la ingeniería, se requiere de especial atención a una tendencia acontecida hacia la mitad del siglo pasado que adquirió por muchos, entre ellos David Billington, la condición de arte estructural. Este es el desarrollo de la lámina esbelta de hormigón, que se abordará de la mano de Félix Candela y Heinz Isler.

No hay y nunca existirá algo como un método exacto de análisis estructural. La aproximación de cualquier cálculo es cuestión del juicio personal de cada técnico. Esta circunstancia fortuita permite la ingeniería de llegar a veces a la mayor calidad de arte, a pesar de los de los ingenieros inflexibles y aburridos. (Billington D. , 1983).

Así habla Félix Candela al respecto de la belleza estructural, un arquitecto que, como Arenas de Pablo, se vería maravillado por la obra de Robert Maillart.

No existe ningún otro técnico que haya dedicado más tiempo y esfuerzo al desarrollo de las láminas de hormigón o *cáscaras* que Félix Candela. Nacido en Madrid, y graduado en arquitectura en 1935, tuvo que exiliarse Méjico después de la guerra. (Cassinello, 2010).

Desarrolló gran parte de su obra en el país norteamericano, que le dio la posibilidad de construir un gran número de este tipo de estructuras, debido al bajo salario de los operarios en aquel momento y al clima apacible que allí se encuentra. Convencido de que el modelo a escala era la mejor manera de alcanzar un conocimiento profundo y a través de estudiar las leyes básicas de estática y resistencia de materiales, consiguió una maestría que no hubiera podido alcanzar de haber cumplido con su beca en Alemania. En 1949, construye su primera *cáscara* de hormigón, la *Bóveda de Ctesiphon*, en San Bartolo de Naucalpan, cuya forma obedece a la de un cañón funicular con directriz catenaria. (Cassinello, 2010).

Es en el año 1950, junto a sus hermanos y demás colaboradores, fundará *Cubiertas Ala*, cuya finalidad era la construcción de *cáscaras* de hormigón armado para edificios industriales, aunque en poco tiempo, las láminas de hormigón se popularizaron de tal manera que acabaron por idear y construir todo tipo de edificios. (Cassinello, 2010).

Una de las razones del éxito que obtuvo el arquitecto español, a parte de lo novedoso de la forma y la economía de la construcción entre otras, será el hecho de que Candela era además de proyectista el propio constructor. La ideación y la ejecución formaban parte de un paquete indivisible. Para él la economía de la construcción era uno de los aspectos más importantes de esta, no solo en el ámbito de la obra, sino también en el cálculo de la estructura. Este sentimiento le llevó a idear métodos y procedimientos sencillos para el cálculo de estructuras laminares, fomentando el progreso internacional de éste nuevo tipo de construcciones. (Cassinello, 2010).

Suyas son publicaciones como '*Simple Concrete Shell Structures*' o '*Hacia una Nueva Filosofía en las Estructuras*'. Una nueva filosofía que trataba de ser lo más conciso a la hora de proyectar una estructura limpia y continua, que en sí misma encerraba todo el programa del edificio.

Entre las claves de este tipo de construcciones, se encuentra una fundamental, el principio de doble curvatura, esta forma confiere a la construcción de la rigidez suficiente sin variar el espesor en toda la sección, un principio básico de la resistencia de materiales. Todos podemos llegar a comprender que una hoja de papel curvada adquiere una tensión que hace exponencial su resistencia. (del Cueto Ruiz Funes, 1992).

Félix Candela, de acuerdo con estos principios, fue capaz de construir innumerables formas que obedecían a principios matemáticos en dos dimensiones; paraboloides e hiperboloides e intersecciones entre ellos, así como conoides, cúpulas esféricas y cilindros de directriz catenaria.

Una carrera con más de 800 construcciones que lo sitúan como el autor más prolífico de este tipo de estructuras. (Cassinello, 2010).

Entre sus obras cumbre, podemos destacar el Pabellón de los Rayos Cósmicos en Méjico D.F. en 1951, generado por dos paraboloides hiperbólicos. La Planta Embotelladora de Bacardí en Cautitlán, en 1960, constituida por bóvedas de arista de borde libre, esta forma se obtiene intersecando dos bóvedas de cañón, pero en este caso de directriz catenaria. O l'Oceanografic de la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia en 1997, formado por tres paraboloides hiperbólicos girados 120 grados.

Este último ejemplo es muy similar en forma al restaurante *Los Manantiales*, que él mismo proyectó y construyó 40 años antes en Lomas de Cuernavaca, Méjico, haciendo patente una característica muy particular del arquitecto; la reutilización de la misma forma en diferentes obras, con la salvedad de pequeñas modificaciones en los espesores y tipos de agregación entre curvas para así adaptar la obra a su contexto específico. (Cassinello, 2010).

Una vez analizado las claves que llevaron a Candela a situarse como el mayor exponente este tipo de construcción, podemos a bordar al siguiente ingeniero que llevará un método radicalmente distinto, aunque llegó a unas conclusiones muy parecidas las del arquitecto español.

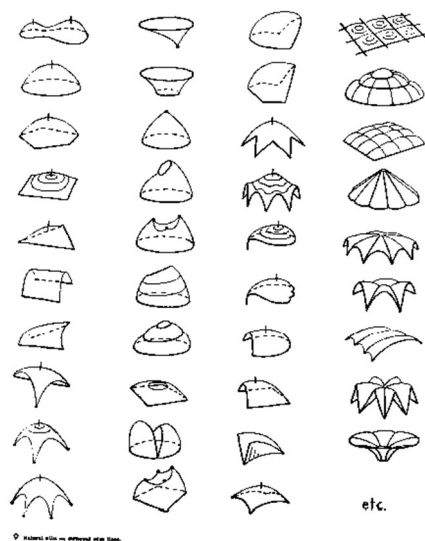


Ilustración 28. Dibujos aportados por Isler en 'New shapes of shell forms'.

Heinz Isler fue un rebelde, y así lo demostró en el primer congreso de la IASS, *International Asociation for Shell and Spatial Structures*, esta asociación fue fundada por el ingeniero español Eduardo Torroja para la difusión y la catalogación de estructuras laminares de hormigón armado. En un primer momento, sólo se centraría en estructuras tipo cascarón, aunque debido al abandono por parte de los técnicos de este tipo de construcción, admitió a partir de los años 70, también cualquier tipo de estructura aérea, tales como: las estructuras de membrana textil, de cables y en tensegridad, estructuras de barras de acero y nudos, estructuras de madera, las desplegadas, de vidrio y otras tantas estructuras ligeras. (Astudillo, 2014).

'*Nuevas Formas para Cáscaras*', así llamó Isler a su presentación en el congreso de la IASS, un enfoque muy diferente a todos los participantes. El discurso, de una página escasa seguida de nueve ilustraciones contemplaba las tres maneras de idear nuevas formas que el ingeniero proponía: la primera, *la forma de colina*, una forma que pudiera haber creado la propia tierra; la segunda, *la membrana bajo presión*, donde la forma se obtiene a través de una membrana hinchada; y la última, *un tejido en suspensión* al que se le da la vuelta, así como Gaudí definía la línea funicular a través de cables, para una piel

de hormigón bastaba con una tela. Anunciaba que las posibilidades eran ilimitadas, presentando, además, 39 bocetos que corroboraban sus palabras. (Billington D. , 1983).

Con la salvedad del método, podemos llegar a decir que Candela e Isler llegaron a las mismas conclusiones para el desarrollo de láminas esbeltas de hormigón; el modelo a escala y la experimentación son claves, siempre basándose en el conocimiento empírico y en las fuerzas físicas que afectan a la construcción.



Ilustración 29. Modelo colgado de Heinz Isler.

Isler defendía la idea del juego, poniendo las reglas de la naturaleza al servicio del diseño, se encontraba en un lugar en el que las posibilidades eran infinitas. Siguiendo las reglas de la naturaleza, sostenía que el diseñador podría recorrer un camino que jamás se hubiera imaginado. Formas libres, sólo limitadas por dos factores: la gravedad y el coste de ejecutar la construcción. (Billington D. , 1983).

La urgencia de aprender y de experimentar le llevó a comprender la naturaleza del hormigón de una manera muy profunda. El hormigón, material pétreo, es susceptible de romper en partes delgadas, pero siguiendo la línea funicular y manteniéndola dentro del espesor de la lámina, es capaz de llegar a esbelteces mínimas para introducir la armadura.

Las construcciones de Isler, están tan cuidadosamente ejecutadas que, lejos de sufrir roturas, no son necesarias techumbre o canalizaciones para la lluvia, lo único, que el ingeniero también tiene en cuenta, es el aislamiento térmico de fibra de madera. (Billington D. , 1983).

Entre las obras más representativas del ingeniero suizo se encuentran: el techo del Wyss Garden Center, en Solothurn, construida en 1961, una bóveda rigidizada en sus extremos usando el principio de doble curvatura, levantando los voladizos; el techo del Bürgi Garden Center, Camorino, ejecutada en 1971, es una lámina de 7 centímetros que no varía en sección; o el Indoor Tennis Center en Heimberg, en 1979, cuatro bóvedas rigidizadas en las uniones, salvando una luz de 60 metros. Una construcción a la que llegó a través de la experimentación cuidadosa con la técnica antes mencionada de membrana invertida. (Billington D. , 1983).

Una figura necesaria para el avance de la ingeniería, rompiendo patrones y aportando una visión más terrenal de la profesión. Y así como Maillart, sus figuras todavía surcan limpias sobre el paisaje el paisaje suizo.

3.2. Philippe Block y el grupo BRG.

Los temas abordados en este transcurso tales como: la comprensión histórica de la ingeniería civil y la tecnología en edificación, el acercamiento a la tipología de puente en arco de tablero superior, la belleza que reside en los mecanismos resistentes y su manifestación en formas precisas y limpias, la tradición constructiva del mediterráneo y sus innovaciones y la comprensión hormigón hasta tal punto de reducir su sección hasta espesores imposibles de imaginar son necesarios para comprender la importancia que las investigaciones del grupo BRG, está llevando a cabo desde la Universidad de Zúrich.

El Dr. Philip Block es un profesor de Arquitectura y Estructura en el Instituto Tecnológico de Arquitectura (ITA), en el Politécnico de Zúrich, donde dirige el *Block Research Group*, junto al Dr. Tom Van Mele. Graduado en arquitectura e ingeniería estructural en la Universidad de Bruselas en Bélgica y el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), en Estados Unidos. Su investigación y su labor como profesor se sitúan en ambos mundos. Obtuvo su doctorado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts bajo la tutorización del Dr. John Ochsendorf desarrollando el *Thrust Network Analysis*, un acercamiento innovador para asegurar la estabilidad de bóvedas históricas, con el propósito de diseñar estructuras funiculares que se comporten fundamentalmente a compresión. (People. BRG, 2021).

Philippe Block ha recibido numerosos premios y reconocimientos por su trabajo y por su investigación; incluido el premio Hangai en 2007 y el premio Tsuboi en 2010 de la IASS. El premio Eduardo Benvenuto en 2012 y el Berlín Art Prize en 2018. Por otro lado, su trabajo ha sido exhibido en la trienal de diseño de 2009 en Nueva York, así como en 2012 y 2016 en la Bienal de Arquitectura de Venecia. Su labor como divulgador queda reflejada en el *International Journal of Space Structures* y *Journal of IASS*, un miembro valorado de esta asociación formando parte del consejo ejecutivo. (People. BRG, 2021).

El de Block es un acercamiento multidisciplinar a la práctica; desde la estática gráfica a técnicas de análisis computacional para la optimización del diseño, así como análisis geométrico y fabricación digital. Junto con Ochsendorf y Mathew DeJong es fundador de *ODB Engineering*, una consultoría de ingeniería estructural que se centra en la preservación de estructuras de mampostería existentes y el desarrollo de nuevas construcciones que puedan suponer un avance en las obras albañilería, haciéndolas más económicas, sostenibles y relevantes en la práctica actual. (Company. ODB, 2021).

Esta compañía nace de dar salida a las investigaciones en el campo de las estructuras funiculares, para aportar al mundo una parte del avance científico desde tres universidades de renombre. Han recibido encargos desde distintas partes del mundo, a modo de ejemplo: el análisis estructural de las bóvedas de la estación en la calle 181 del metro de Nueva York, E.E.U.U, para su posterior restauración o el Teatro Orange en Vacluse, Francia, un teatro romano del siglo primero, de los mejor conservados en el mundo. (Projects. ODB, 2021).

BRG es un conglomerado de técnicos en edificación y estructuras, compuesto por personas que han alcanzado la excelencia en este campo, llegados de todas las partes del mundo para formar grupos de investigación en la eficiencia en la construcción. El éxito de este grupo reside en la variedad de personas que lo componen; por este hecho es necesario darles el reconocimiento que merecen y entre ellos, al codirector del grupo, el Dr. Tom Van Mele.

Científico e investigador, es el encargado de liderar la parte más técnica y computacional de las investigaciones, es así el director de COMPAS, un software para la investigación y el desarrollo en el campo arquitectónico a través de métodos computacionales. (People. BRG, 2021).

Tom se graduó en arquitectura e ingeniería de la construcción de la Universidad de Bruselas, Bélgica en 2008. Tras una etapa en América como arquitecto freelance, se unió al grupo BRG para desarrollar *eQUILIBRIUM*, una plataforma para la enseñanza de la estática gráfica aplicada al diseño estructural. (People. BRG, 2021).

Las contribuciones de Van Mele han sido cruciales para el desarrollo de los proyectos del Grupo BRG, desde el conocimiento y la aplicación de la estática gráfica hasta métodos de optimización de la forma por computación han sido claves para la ejecución de obras como La Bóveda Armadillo o el proyecto NEST Hi-Lo, que pasaremos a continuación a observar de cerca. (People. BRG, 2021)

Los ingenieros y arquitectos antes mencionados, cada uno en su campo específico, han ayudado de una u otra manera al desarrollo del conocimiento en estructuras de edificación, proveyendo de construcciones y planteamientos innovadores, motivados por lo que David Billington catalogaba como las tres E: *Eficiencia, Economía y Elegancia*, y dada la situación de crisis medioambiental en la que nos encontramos, desde el grupo BRG añaden dos planteamientos más: *Ecológico y Ético*. (Block, y otros, *Redefining structural art: strategies, necessities and opportunities*, 2020).

El contexto global es crítico: el sector de la construcción es el mayor contribuyente en emisiones de efecto invernadero; el 60% de la electricidad que se consume en el mundo viene directamente de las residencias y edificios comerciales y según las estimaciones, para el año 2050, habrá una crecida significativa de población, sobre todo en las ciudades. (UN Environment., 2017).

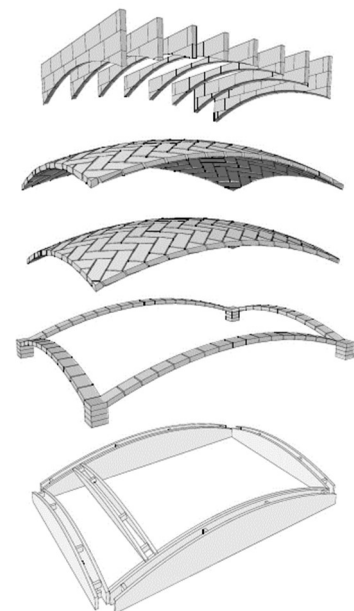


Ilustración 30. Esquema de bóveda tabicada para el proyecto SUDU.

Para este respecto, BRG se propone diseñar estructuras con luces más grandes que soporten cargas mayores y que puedan ser adaptables a cualquier condición. Proyectar de una forma resiliente, flexible y evitar, sobre todo, la obsolescencia; su cometido es el desarrollo de estructuras que utilicen menos materiales y que los materiales que usen sean más sostenibles y fáciles de reciclar. (Block, y otros, *Redefining structural art: strategies, necessities and opportunities*, 2020).

La línea de trabajo para lograr este objetivo es obtener '*la resistencia a través de la geometría y la efectividad del material*'. Elegir esquemas estructurales eficientes, como las cáscaras de hormigón o las bóvedas, éstas requieren de un volumen de material mucho menor que los elementos lineales y estudiándolas según el sentido de las fuerzas que actúan sobre ellas, reducen la respuesta estructural debido a la habilidad que tienen de distribuir las cargas uniformemente. En particular se centra en el uso de la funicularidad, es decir, el comportamiento único a compresión. (Block, y otros, *Redefining structural art: strategies, necessities and opportunities*, 2020).

Todo esto se logra a través de que el diseñador tenga un mayor control sobre la estructura y sobre el curso de las fuerzas que actúan sobre ella, basándose en los principios de estática gráfica y llevando estos principios a métodos computacionales, son capaces de plantear formas con un grado de aproximación a la realidad muy exacto. (Block, y otros, *Redefining structural art: strategies, necessities and opportunities*, 2020).

Es decir, el ordenador es una herramienta precisa y certera, pero sin los conocimientos gráficos y geométricos de un diseñador experimentado, esta herramienta no sirve de mucho, lo útil de los cálculos por ordenador son la variedad de soluciones en poco tiempo, variando las condiciones de contorno y obteniendo diferentes resultados que puedan ser más favorables que las respuestas a priori.

Además de la implementación de métodos de cálculo y diseño por ordenador, todo esto tomando inspiración de la historia y del profundo conocimiento de ella, son promotores de construcciones en zonas de desarrollo, como el proyecto llevado a cabo en *Sustainable Urban Dwelling Unit (SUDU)*, en Addis Ababa, Etiopía para una vivienda en 2010, optimizando la bóveda Guastavino. Con este método consiguieron un menor impacto ambiental no llevando piezas industrializadas desde Europa, así como la creación de empleo local. Siguiendo la patente de bóveda a la catalana, no fue necesaria una cimbra para realizar las bóvedas; para la construcción de las fábricas de ladrillo se utilizaron las tierras del propio solar y una cantidad de cemento mínima, el 7% del total de la edificación. (Block, y otros, *Redefining structural art: strategies, necessities and opportunities*, 2020).

En BRG tienen muy presente la historia de la construcción, la mayoría de proyectos, por innovadores que parezcan, siempre tienen que ver con alguna tipología o solución ya acontecida en el pasado. Conociendo el pasado, son capaces de extraer lo que es útil hoy y proponer formas óptimas para el presente que vivimos; es el caso de *La Bóveda Armadillo* que bebe de las formas de los arcos góticos.

‘Esta construcción no es un intento de revivir el Gótico, es una crítica que alaba la forma libre en la arquitectura.’ (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, *Beyond Bending*, 2017).

Compuesta de 399 dovelas de piedra caliza apeadas sin necesidad de mortero, la bóveda es capaz de albergar una luz de 16 metros con un espesor de 5 centímetros. Esta forma es posible que exista gracias a los métodos computacionales aplicados a la cáscara discretizada, la tensión entre dovelas es la que resulta que en el conjunto sólo existan esfuerzos de compresión. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, *Beyond Bending*, 2017).



Ilustración 31. Bóveda Armadillo, Bienal de Venecia.

Cada pieza está tallada de forma que es única, aunque para simplificar el proceso de ensamblaje, las piezas son lisas en el exterior, mientras que en el interior se dejaron las muescas del corte de la piedra, efecto que le da una expresividad particular al conjunto. Además, existe la posibilidad de, con este método, poder desmontar la pieza y construirla en otro lugar. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, *Beyond Bending*, 2017).

Proyectada para el interior del *Cordiere dell’Arsenalle* en Venecia, para la Bienal de 2016, la construcción se vio condicionada por el hecho de que el edificio que la iba a contener está protegido, por tanto, el peso, la forma y el tiempo de ejecución reducido a dos semanas de ensamblaje son específicos para el contexto en el que se construyó. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, *Beyond Bending*, 2017).

El proceso de diseño fue iterativo, usando diagramas de esfuerzos para comprender el transcurso de las fuerzas, después se generaba un paso de control en el que, por elementos finitos se refinaba la forma de cada dovela, para así tener las mayores superficies de doble curvatura, y por último se daban los últimos detalles para que el anterior paso no comprometiera el comportamiento general de compresiones únicamente. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, *Beyond Bending*, 2017).

Una construcción que, como veremos en próximos proyectos de este conglomerado, es capaz de navegar entre la técnica más antigua de construcción, la ejecución de obras que se comportan a compresión pura sin necesidad de mortero, junto con las técnicas más innovadoras de cálculo estructural.

Otro tipo de investigaciones no se centran en la propia construcción, sino en la parte previa. Como ya se ha visto, a veces la cimbra necesaria para llevar a cabo grandes obras civiles puede llegar a ser la parte más costosa. Desde BRG proponen varios métodos para evitar o disminuir el volumen de esta.

Uno de sus acercamientos, por ejemplo, contemplado para la Bóveda Armadillo, pero no ejecutado, es construir una cúpula como se realizan los iglús; si se plantea que las piezas vayan colocadas en forma de espiral es posible la eliminación total de una cimbra en el proceso constructivo. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, *Beyond Bending*, 2017).

Con el planteamiento de reducir al máximo la ejecución de una cimbra, tanto por temas económicos como de utilización de materiales y puesta en obra, se desarrolló un prototipo de cimbrado tejido no recuperable para la construcción de un puente de hormigón de tipo cáscara. (Popescu, y otros, 2018).

A la hora de realizar una lámina de hormigón, es necesario el estudio cuidadoso del encofrado. Normalmente para este tipo de construcciones, se suelen realizar de madera o bien de espuma de poliuretano, materiales que, por procesos de sustracción son fáciles de amoldar a las formas que requieren las cáscaras, la doble curvatura. Este tipo de encofrado no responde a los problemas a los que se enfrenta la construcción hoy en día, resultando un añadido del 50 al 75% sobre el coste de ejecución del hormigón, así como una gran cantidad de material que sólo se ha utilizado una vez. (Popescu, y otros, 2018, págs. 1-2).

Abordando esta problemática, desde BRG, junto con la Cátedra de Física y Química de Materiales de Construcción del Politécnico Federal de Zúrich, han desarrollado y construido un pequeño puente que pretende hacer mucho más económica la ejecución de cáscaras de hormigón.

El encofrado se compone de un tejido de punto con una serie de canales para la inserción de varillas y cintas que las tensan hasta conseguir la forma deseada. Una vez el tejido se encuentra tensionado, se aplican sobre él una capa de cemento de alta resistencia y otra de mortero de reparaciones comercial. Endurecidas estas capas, se extiende sobre el conjunto la capa de hormigón reforzado con fibras de acero. (Popescu, y otros, 2018, pág. 3).



Ilustración 32. Tejido usado para la cimbra perdida del puente.

Esta obra también ha sido condicionada por su entorno, como la anterior mencionada, era necesario que tuviera la dimensión de dos pallets para su transporte. Por tanto, el puente tiene una luz de 2,16 metros, en los apoyos tiene una dimensión de 1,17 metros, y a medida que va creciendo, se estrecha hasta los 60 centímetros. (Popescu, y otros, 2018, pág. 3).

El resultado es un puente de hormigón de tipo cáscara capaz de soportar una tensión de compresión, manifestada en los extremos, de hasta 5,6 MPa, con una sección variable de 5 a 10 centímetros, teniendo en cuenta que el resto de los elementos son autoportantes. (Popescu, y otros, 2018, pág. 6).

En este proyecto podemos ver la influencia de Heinz Isler, tomando la analogía de la membrana en tensión, son capaces de desarrollar una construcción muy liviana de tipo cáscara, en este caso, la membrana sí forma parte del proyecto ejecutado, ya no es la manera de alcanzar la forma ideal.

La técnica de construcción usada en este caso nos sirve de introducción para mencionar otro proyecto realizado por parte del grupo BRG, la cubierta del edificio Hi-Lo, parte del proyecto NEST.

NEST, *Next Evolution for Sustainable building Technologies*, es un complejo de edificios cuya finalidad es conciliar en un mismo sistema la vida laboral y personal, sirve principalmente para testar materiales y técnicas antes de poder llevarlas al mercado en unas condiciones parecidas a la realidad. (Block, y otros, 2017).



Como parte de este complejo, en 2018 comenzó la construcción del módulo Hi-Lo, *High performance, Low energy*, un apartamento de dos habitaciones planeado para hospedar a conferenciantes visitantes. Está proyectado con los principios de ligereza y sistemas adaptativos, dos de los grandes bloques que se abordan desde BRG. (Block, y otros, 2017).

Ilustración 33. Construcción de la cubierta de HiLo.

El diseño del edificio establece la tensión entre dos partes de la vida, la privada e individual frente a la comunidad y el trabajo a través de dos tipos de espacios; por un lado, los módulos habitacionales y por otro, la cubierta de cáscara de hormigón que obedece a una curva doble. (Block, y otros, 2017).

La cubierta es una lámina de hormigón que integra un sistema sándwich para, en la misma construcción, resolver el acondicionamiento higrotérmico, ésta descende en cuatro puntos, manifestando los apoyos. Se trata de una lámina de pequeñas dimensiones, dada su función residencial. Requerida de un control exhaustivo, ya que la forma está optimizada para obtener el mejor

rendimiento del hormigón, necesita de un mallazo con una serie de puntos de control de tensado. Incluye también una lámina de poliuretano como aislante para completar el sistema. (Block, y otros, 2017).

Con este proyecto se abren las puertas de una nueva generación de cáscaras de hormigón que pueden contener en sí mismas los sistemas de acondicionamiento, a través de los métodos informáticos que promulga este grupo de investigación y la capacidad industrial de hoy en día, es posible llevar esta tipología de cubierta al ámbito residencial, adaptando, en cada caso y como ha sucedido en este proyecto, el diseño de la cubierta al mejor rendimiento en temas de ganancias energéticas solares y necesidades de ventilación. (Block, y otros, 2017).

3.3 Prototipo de bóveda rebajada nervada en su parte superior.

En el proyecto Hi-Lo, como parte de una construcción dedicada a probar los avances que se realizan en un entorno real, están presentes varios sistemas, entre los cuales aparece uno que tiene que ver con un entendimiento profundo de la historia de la construcción y que bebe de varios referentes. Este es el proyecto de una bóveda rebajada y nervada en su parte superior.

Es una bóveda que obedece los principios de la patente Guastavino, pero es de hormigón y optimizada para llegar a los espesores mínimos como una cáscara que sigue principios matemáticos simples como haría Félix Candela, pero más allá; podemos retomar el puente de hormigón armado con tablero superior y ver que, si un a un puente de estas características le aplicamos una revolución, se obtiene algo muy parecido a la bóveda que vamos a estudiar con detenimiento.

Estos hechos no son casualidad, lo que hace que esta construcción sea fácilmente asimilable a otras acontecidas en la historia no es la intención de los proyectistas de revivir viejos mitos, sino que las reglas del juego están claras; tal y como decía Isler. El objetivo de BRG es la optimización y la economía y por ello es por lo que se manifiesta en la mejor combinación de formas para este cometido. Una pieza radicalmente moderna, síntesis de la historia.

Hoy en día, la mayoría de las construcciones, sobre todo las contempladas por la arquitectura; la pequeña escala, se realizan con elementos estructurales lineales, debido a la facilidad de encofrado de los mismos, siendo reutilizables. De este hecho resulta que los elementos horizontales, es decir, las vigas, tengan una sección suficiente para albergar los momentos flectores que derivan de cargas puntuales y repartidas. Todo esto añadido a los espesores de los recubrimientos requeridos por los códigos de edificación, resulta en pesos innecesarios que no contribuyen estructuralmente. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, Beyond Bending, 2017).

Si imaginamos una viga de hormigón armado sometida a una carga repartida y una carga puntual, sabemos que la parte superior está comprimida y la parte inferior traccionada. La armadura inferior solo entrará en carga cuando el hormigón de esa parte llega a su estado límite. Existen métodos como el pretesado y el postesado, que sirven para precargar estos elementos y que sean más eficientes en su comportamiento a tracción. Desde BRG, plantean externalizar estos procesos. Si se deja el cable postesado en el exterior, todo el interior de la pieza de hormigón puede comportarse a compresión pura y no necesitar de barras de acero en su interior. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, Beyond Bending, 2017).

Esta es la idea motriz del proyecto de la bóveda nervada, en la que conviven dos elementos resistentes: una lámina de hormigón abovedada que actúa a compresión de las cargas permanentes, siguiendo una trayectoria funicular y una serie de nervios también de hormigón en la parte superior, capaces de transmitir, también por compresión las cargas no permanentes a los extremos. Por otro lado, se atan los extremos de la pieza con tirantes de acero, que absorben los esfuerzos horizontales a los que se pueda ver sometido. Además, este sistema ofrece la ventaja de que las barras de acero sean mucho más accesibles en temas de mantenimiento por corrosión, no comprometiendo la durabilidad del hormigón en este caso. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, Beyond Bending, 2017).

Los mecanismos resistentes están separados, la bóveda se comporta a compresión, mientras que los cables a tracción, resultando en una estructura mucho más comprensible y didáctica.

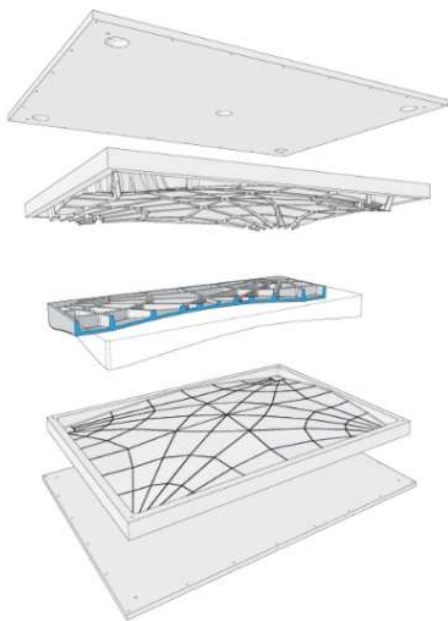


Ilustración 34. Esquema de cimbrado.

Pero, sobre todo, con esta nueva forma de concebir un forjado, son capaces de reducir la masa de hormigón en un 70% con respecto a un forjado convencional, un resultado muy esperanzador dados los condicionantes en los que se encuentra la sociedad actual. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, Beyond Bending, 2017).

De otra parte, las consecuencias de construir esta pieza, también afecta al resto de la construcción; si el forjado pesa un 70% menos, este hecho significa que el resto de la estructura puede ser calculada para cargas mucho menores, los pilares se pueden liberar de los grandes pesos que conlleva la ejecución de una losa, por ejemplo. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, Beyond Bending, 2017).

Ultra-thin, concrete vaulted floor system, es el nombre original que le dan desde BRG al prototipo presentado en el congreso internacional de la IASS, celebrado en 2014 en Brasilia, una pieza rectangular de 2,75 metros de luz en la que la lámina abovedada, de 2 centímetros de espesor se levanta 13 centímetros, los nervios superiores poseen una altura de 14 centímetros, resultando un total de 16 centímetros de canto. (López López, Veenendaal, Akbarzadeh, & Block, 2014).

Una reducción de hasta la mitad del canto habitual de un forjado, con las implicaciones que eso supone para los futuros problemas en cuanto a vivienda en altura. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, *Beyond Bending*, 2017).

El diseño de la bóveda fue un proceso iterativo con la ayuda del programa RhinoVAULT, el cual permite la formación de una estructura que se comporte a compresión pura. En primer lugar, la bóveda fue calculada para su peso propio y después se toman en cuenta el peso de los nervios y el solado. A continuación, se vuelve a comprobar la forma añadiéndole esos parámetros. Y, por último, se calcula el espesor de la bóveda y los nervios a través de elementos finitos. El objetivo principal es la optimización de la forma hasta el mínimo espesor, admitiendo unas deformaciones no mayores de 1/500. (López López, Veenendaal, Akbarzadeh, & Block, 2014).

Para el análisis estructural, se utiliza el código de edificación suizo. Se aplica una carga permanente de 1 KN/m² y una carga no permanente de 2KN/m². Además de una serie de cargas puntuales en las intersecciones de los nervios. Para el cálculo se utilizó la combinación característica de acciones de 1,35 para cargas permanentes y 1,5 para cargas no permanentes. También se verificó el comportamiento de la bóveda y los nervios por separado, resultando favorables las condiciones para cargas permanentes, aunque las cargas puntuales, el comportamiento era insatisfactorio. Sin embargo, para las cargas permanentes como puntuales, el sistema conjunto reduce las tensiones significativamente. (López López, Veenendaal, Akbarzadeh, & Block, 2014).

El prototipo se compone de un hormigón de alta resistencia autocompactante reforzado con fibras de acero cuya fluidez es muy alta. Esta característica es necesaria para llenar de una forma óptima el encofrado ya que no es posible la inserción de un vibrador. Resultando que para cubrir un área de 2,67 m² se reportan una tensión de compresión de 144 MPa y una tensión de tracción de 16,4 MPa. (López López, Veenendaal, Akbarzadeh, & Block, 2014).

Desde BRG se ha desarrollado un prototipo similar, pero construido a través de impresión 3D; con la salvedad de que los resultados en cuanto a las cargas admisibles pueden variar, ya que la dosificación del hormigón no sería la misma. Para la impresión en 3D, no es posible la inserción en la mezcla de fibras de acero. Este modelo se imprime en cuatro partes por separado para, posteriormente ensamblarlo. (Block, Van Mele, Rippmann, & Paulson, *Beyond Bending*, 2017).

Una vez comprendidas las características del modelo., podemos verlo aplicado en el proyecto Hi-Lo, que como ya hemos comentado, es el espacio donde se testean los prototipos para su mejora y desarrollo.

En el caso de los espacios a cubrir en el proyecto, son irregulares, lo que resulta que los forjados tienen que ser modelados, calculados y comprobados uno a uno, esto sucede de tal manera para comprobar la adaptabilidad del modelo y los procesos llevados a cabo para concebirlo.

Se trata de 4 forjados, dos para cubrir los módulos habitacionales, y otros dos para los respectivos baños, la geometría de los mismos es trapezoidal, con una carga máxima transmitida a uno de sus laterales de 7,6 kN. En este caso, ya que los espacios a cubrir son sustancialmente mayores que en el prototipo, se propone como condición que la bóveda tenga de espesor 40 centímetros en los apoyos y 30 en el centro geométrico. (Block, y otros, 2017).

Una de las características de la aplicación práctica de este tipo de forjados, es la integración de un sistema de acondicionamiento higrotérmico dentro de la propia estructura, los casetones de poliestireno expandido usados para dar la forma a los nervios no se recuperan y sirven para proporcionar aislamiento térmico y acústico, mientras que, recorriendo la bóveda, se integra un sistema de radiante de tuberías frío-calor en forma de espiral. (Block, y otros, 2017).

Este edificio además de un laboratorio de pruebas será un escaparate tanto para conocer los numerosos avances que este equipo de investigación lleva a cabo, como para inspirar a arquitectos e ingenieros a repensar la forma en la que construimos.

La filosofía y los proyectos de BRG, son en sí mismos, una síntesis de todo lo acontecido, pero aún más si cabe, este proyecto puede ser un resumen de lo que se ha hablado en este trabajo. Proyectos como este son prueba de que aún queda mucho camino por andar, y que el pasado sirve de inspiración para la innovación.

Testigo de esto es que ellos mismos ponen de ejemplo el puente de Salginatobel de Robert Maillart, para hacer ver que las articulaciones en sistemas nervados como este son algo deseable, *pre-romper*, o proyectar los puntos de momento nulo es algo que interesa, ya que de otra forma el proyectista tiene un grado de incertidumbre alto en estructuras demasiado rígidas. (Block, Rippmann, & Van Mele, Compressive Assemblies, 2017).

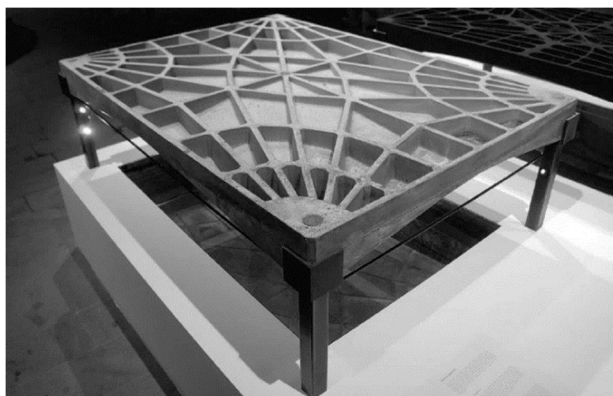


Ilustración 35. Prototipo construido.

Este hecho lo cumple la bóveda nervada, como cumple con las ideas de la patente de bóveda a la catalana de Guastavino.

En un sentido más estético, la pieza presenta una serie de estrías en su parte inferior, hecho que le da una cierta personalidad a cada espacio que pueda cubrir, ya que, como hemos visto, si cada espacio tiene unas dimensiones, cada sistema de estrías será diferente. En ese caso, situándote debajo de ella y recorriendo las estrías, puedes saber de un vistazo el camino recorrido por las fuerzas, hasta llegar a los apoyos.

Las geometrías que se expresan en el techo hacen que éste deje de ser un plano blanco en una habitación blanca, la pieza puede ofrecer otro tipo de experiencias, más abiertas a la percepción del espacio como un juego, el *comfort mitigante*¹¹ se olvida y el espacio empieza a ser estimulante, todo ello a través de la economía de un lenguaje que obedece al recorrido más limpio de la gravedad sobre la construcción. (Moreno Moreno, 2020).

Las implicaciones de este proyecto son muchas, así como las posibilidades, desde el grupo de investigación sugieren que, si el prototipo desarrollado puede tener un canto del orden de hasta la mitad de uno convencional, esto resultaría que, en la misma altura, pueden caber más viviendas. La posibilidad que aquí se apunta es que esos 15 o 20 centímetros de ganancia puedan conservarse dentro de la propia vivienda, proveyendo de un espacio más agradable, con más entrada de luz y mejor ventilado.

Este es el último proyecto que aquí se expone. A través del recorrido realizado se han abordado las aportaciones de la ingeniería civil, enmarcadas dentro de la forma en arco, que de manera más o menos palpable han sido necesarias para comprender lo que supone Philippe Block y BRG para la historia de la ingeniería, de la arquitectura y, en definitiva, de la construcción.



Ilustración 36. Vista de la bóveda desde el interior.

¹¹ Bruno Zevi defiende la salida del espacio cartesiano e invita la catalización del hombre a través de espacios no cúbicos. El *comfort mitigante* son aquellos espacios que le conducen a la muerte mental, a no ser consciente de lo que existe a su alrededor.

Cuarta parte: conclusión y discusión.

Atravesando el arco a través de la historia se pueden observar las posibilidades que ofrece una forma tan pura como efectiva a la hora de construir. El entendimiento de la historia, su apreciación y extracción de ideas es clave para el avance de la arquitectura como de la ingeniería civil. Todas las figuras abordadas en el trabajo comprendían este hecho y es así como pudieron aportar algo nuevo; un sistema, una forma, una patente o una manera de acercarse a la práctica.

Vale la pena contemplar el recorrido de esta forma a lo largo del tiempo; desde la unión de piezas apeadas sin necesidad de mortero, pasando por los primeros puentes en hormigón y su avance mejorando en las técnicas de construcción (tipos de cimbra y descimbrados), cálculo (las aportaciones de Mörsch y Ritter), hasta la constatación de que este tipo de obra a gran escala es susceptible de ser bella y de rimar con el paisaje que las circunda (los puentes de Robert Maillart). Se ha abordado también la tradición mediterránea y las posibilidades que ofrece (las bóvedas de Rafael Guastavino) y como a partir del siglo XX, la influencia de la ingeniería civil a la arquitectura hace que aparezcan espacios cubiertos con la mínima cantidad de hormigón posible (las cáscaras de Félix Candela y Heinz Isler).

Tanto los nombres aquí mencionados, como los del resto de este texto, son necesarios para acercarnos de una forma consciente a la obra de los técnicos que dan el peso a este trabajo.

Sin Maillart no hay Arenas de Pablo y sin Guastavino no existiría Block, una coincidencia curiosa dada la nacionalidad de los mencionados, aunque no casual; sin la tradición constructiva española, basada en el conocimiento profundo de la materialidad con la que se construye, la síntesis suiza se encontraría coja, y sin ella, la tradición se convertiría en fósil, admirada y reconocida, pero inservible.

Ambos, antes que grandes proyectistas e investigadores son conocedores de la historia, y de ella, extraen lo necesario para tratar de hacer obras consecuentes con su tiempo. En cada artículo firmado por Block o por su grupo de investigación hay una referencia al pasado constructivo de la humanidad, como Arenas de Pablo sintetizó a través de sus ojos la historia de la construcción en *Caminos en el Aire*, que ha apoyado con sus palabras este trabajo.

Nunca ha existido un catálogo de soluciones, tipologías y estilos tan amplio como hoy a la hora de enfrentarse a un proyecto de arquitectura, es cierto que todos estos tienen que pasar por el filtro de la técnica para adaptarlos a la forma de vivir de hoy, pero eso nos da pie a idear y construir formas radicalmente novedosas que tengan el apego emocional de la historia, como es el caso del arco y de las figuras que derivan de él.

Se eligieron a tratar estas dos figuras por varias razones, una de ellas es la anterior mencionada, otra es el trabajo de ambos en la funicularidad, que los une de forma geométrica, pero la fundamental y que hace que rimen tan bien entre ellos es que ambos tienen la amplitud de miras suficiente como para mirar a su vecino y poder extraer algo de él.

Arenas de Pablo es un ingeniero con alma de poeta, a la hora de hablar de su obra o de proyectarla maneja muchos conceptos arquitectónicos, tales como la adecuación al paisaje, el cuidado por la limpieza de formas, el aspecto social de la construcción, las sensaciones que pueden provocar sus puentes a la hora de transitarlos por el tablero como por debajo del arco; es una figura transversal a ambas disciplinas.

Tan transversal como Philippe Block, un arquitecto e ingeniero que utiliza toda la historia de la construcción para proveer de nuevas miradas a la arquitectura. Su acercamiento a la práctica reside en el conocimiento profundo de la técnica, y, desde la ingeniería estructural, proponer nuevas formas más éticas, ecológicas y económicas.

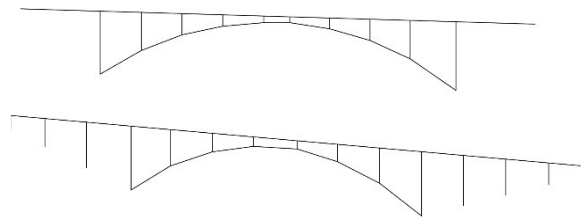


Ilustración 37. Esquema resistente del puente de Schwandbach (arriba) y el de Morlans (abajo).

A la hora de analizar la obra de los ingenieros mencionados, podemos observar las similitudes que hacen palpable que la historia es una fuente de conocimiento corroborado por ella misma; los conceptos resistentes que utilizaba Robert Maillart en el Puente de Schwandbach, es decir, que el tablero sea capaz de resistir las flexiones, para que el arco se comporte en la directriz antifunicular de las cargas permanentes, es el mismo que utiliza Arenas de Pablo en el Puente de Morlans, esto se traduce en que la lámina en arco reduce su sección hasta la mínima posible, que las pilas serán todo lo esbeltas que el proyectista se atreva y que esta esbeltez es necesaria para que sean lo suficientemente flexibles para adaptarse al acortamiento del tablero por contracción térmica.

Los factores antes mencionados nos dan alzados muy similares, con la salvedad de la escala (el Puente de Morlans es de mayor tamaño que el de Schwandbach), como ocurre con el prototipo de lámina esbelta desarrollado por BRG; si vemos su sección, veremos que también es muy similar a los puentes mencionados, unos nervios esbeltas que transmiten los momentos a los apoyos, mientras que la lámina que los une por su parte inferior resiste las cargas permanentes, todo ello liberando a la construcción de pesos innecesarios proporcionados por ella misma.

Por lo que podemos concluir que, conceptualmente, la bóveda nervada de Philippe Block es una revolución de los conceptos resistentes puros que manejaba Robert Maillart.

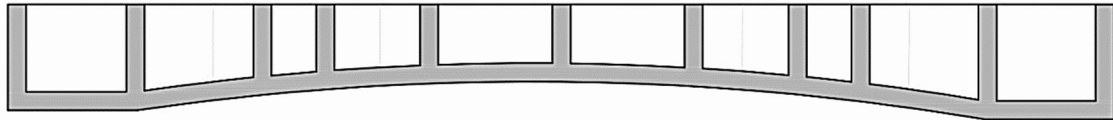


Ilustración 38. Sección de la bóveda nervada de BRG.

Y es que Philippe Block, para el proyecto nombrado, se nutre de una gran cantidad de formas y avances que han sucedido a lo largo de la historia. Como antes se ha mencionado, los nervios de la bóveda están ejecutados de modo articulado, es decir, proyectando los puntos de momento nulo, el ingeniero tiene muchas más certezas a la hora de asegurar la estabilidad de una construcción.

Las láminas esbeltas de hormigón armado son también un avance crucial para este respecto. Candela proyectaba formas extraídas de la matemática, corroborándolas, utilizando modelos a escala, el método de trabajo de Isler estaba basado en la ley universal de la gravedad, utilizando también modelos a escala. Block podría ser la síntesis de dos estos métodos de trabajo, utilizando la estática gráfica como primera parte del desarrollo del proyecto y su traslación a métodos computacionales de cálculo, es capaz obedecer a ambas corrientes; un método matemático y analítico que se basa en el camino más fácil en el que las fuerzas recorren la construcción.

La similitud más palpable que podemos establecer con la bóveda nervada, que desde BRG se apunta como antecedente del proyecto, es la bóveda tabicada desarrollada por Rafael Guastavino, en concreto la patente en la que la bóveda de ladrillo se comporta totalmente a compresión, mientras que los perfiles laminados que unen los apoyos coartan que la bóveda se desplace de su eje. Como se ha visto, este es el concepto resistente que utiliza Block en el proyecto.

Se muestra (Ilustración 40), el diagrama que usa Philippe Block para el proyecto de bóveda nervada, en los que aplica una carga puntual y una repartida sobre una viga de hormigón, obteniendo un dibujo de compresiones que se asemeja al diagrama de momentos flectores utilizado por Maillart para diseñar el Salginatobel.

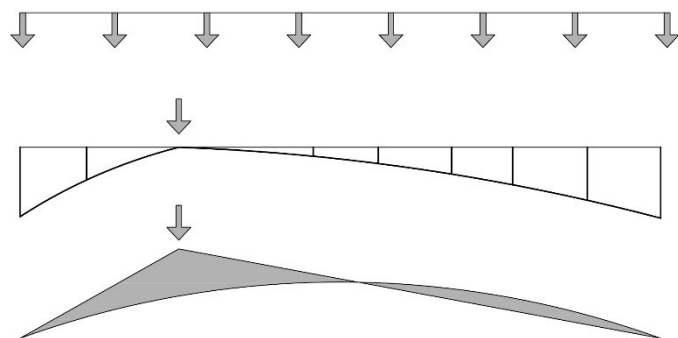


Ilustración 39. Diagramas resistentes de la bóveda nervada de BRG y el Puente de la Salgina de Robert Maillart.

Prueba de que el diseñar acorde a las fuerzas que actúan sobre la construcción es una garantía para obtener formas limpias que sean capaces de resolver el problema con la menor cantidad de material posible.

Para finalizar este pequeño análisis comparativo, valga la pena destacar una vez más la figura de Juan José Arenas de Pablo en su trabajo en el Puente de Miraflores, en la que el arco es la gran pieza que soporta el conjunto. Aunque en el esquema estructural no se parezcan, guarda una gran similitud en este sentido con el Puente de la Salgina de Maillart; un arco triarticulado frente al biarticulado de Arenas, pero ambos confían toda la potencia visual y resistente a la forma arqueada que surca de una ladera a otra.

Es importante también hablar de la materialidad, y el conocimiento del proyectista sobre ella. La técnica de bóveda a la catalana nace de la tradición artesana del levante y funcionaba gracias a su condición discreta, la tensión entre rasillas hace que el conjunto funcione como un todo, como sucede en roma y sucede con la Bóveda Armadillo de BRG, llevando estos conceptos al límite de lo posible, probando que, gracias a mecanismos resistentes fiables, los elementos más frágiles son capaces de componer arquitecturas.

Tan frágil es la piedra como es el hormigón. Durante la historia de este material ha existido una lucha de los técnicos en deshacerse del arco, y debido a que no es capaz de soportar flexiones se le han insertado acero en secciones sobredimensionadas, para volver hoy, con la vanguardia en ingeniería a recoger una forma que no sólo es pura y resistente en sí misma, sino que también otorga de una espacialidad que el plano recto no posee. Porque el arco de hormigón es capaz de, tanto salvar 384 metros en el viaducto de Almonte, soportando las vibraciones de una línea de alta velocidad, como de volver a inundar los techos de las viviendas.

La ética constructiva es algo que también se aborda de forma colindante en este trabajo, ambos técnicos son ejemplos de ello. Arenas de Pablo sostenía en una época en la que la ecología era algo ajeno a la sociedad de a pie, su discurso del *bienhacer*, que implicaba lo que hoy se fomenta desde las escuelas técnicas; el ser económico en la forma y ético en la responsabilidad como proyectista, sabiendo el entorno en el que estamos y como se encuentra éste. Para él, en esto consistía la técnica, tener en cuenta todo que circunda a un proyecto y responder a cada pregunta con una solución simple y efectiva.

*La técnica es el motor con el que avanza la sociedad, pero siempre hacen falta poetas que señalen el camino*¹². (Blake, 1966, pág. 11).

¹² A propósito de Le Corbusier. Texto extraído y traducido por el autor. La cita podrá no corresponder con el texto original.

Con este trabajo, también podemos llegar a la conclusión de que la belleza de la forma libre e innovadora, si no está apoyada en un conocimiento extenso de los mecanismos resistentes que la hacen posible, no puede ser un motor de cambio, porque no es repetible ni adaptable a distintos casos.

Es en la dualidad donde puede estar la virtud, en el conocimiento de cómo se comportan las cosas y en el juego libre bajo la ley universal que nos empuja hacia el centro de la tierra. Para ello, conocimientos como el de la estática gráfica, el modelo a escala y la experimentación se vuelven cruciales; sin ellos, la tarea del proyectista se convierte en incertidumbre y en estructuras que no innovan por desconocimiento. Y ahora, aún más si cabe, con la utilización de las herramientas informáticas como regla general. Por ello es necesario mirar hacia atrás para mirar qué hicieron los que marcaron el camino, y, sobre todo, como lo hicieron.

Sirvan estas palabras para acabar el recorrido '*trascendiendo el arco en la obra de Arenas de Pablo y Philippe Block*', en el que, a través de esta forma, hemos podido extraer numerosas lecciones, desde su concepto a su evolución, los materiales con los que se ha construido y las formas a priori imposibles que derivan de él. Hasta detenernos frente al futuro, con la forma más antigua de construir y con sus posibilidades en el horizonte. Posibilidades que recaen en el estudio cuidadoso de las estructuras de edificación, mirando muy de cerca los mecanismos más simples que recaen sobre ellas, para así poder diseñar construcciones más económicas, eficientes y elegantes.

Bibliografía

- Aparicio, Á. C. (2018). Recordando a Juan José Arenas, mi maestro. *ROP 3594*, 11-17.
- Arenas de Pablo, J. J. (1995). El arte y la estética en el diseño de puentes. *ROP 3344*, 27-34.
- Arenas de Pablo, J. J. (1997). Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros. *ROP 3363*, 17-43.
- Arenas de Pablo, J. J. (1999). Puente en arco del valle de Morlans en San Sebastián. *I Congreso de Puentes y Estructuras* (pág. 2). Sevilla: ACHE GEHO-ATEP.
- Arenas de Pablo, J. J. (2002). *Caminos en el aire: Los puentes*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Astiz, M. A. (2018). Los puentes den arco de Juan José Arenas. *ROP 3594*, 40-50.
- Astudillo, R. (2014). Eduardo Torroja y la International Association for Shell and Spatial Structures (IASS). *Informes de la Construcción, Vol 66, (n°536)*, 1-6.
- Billington, D. (1983). *The Tower and the Brigde*. Nueva York: Basic Books.
- Billington, D. P. (1965). *Thin Shell Concrete Structures*. Nueva York: McGraw- Hill Book Company.
- Billington, D. P. (2003). *The art of structural design. A swiss legacy*. Princeton, New Jersey: Princeton University Art Museum.
- Blake, P. (1966). *Le Corbusier: Architecture and form*. Hammondsworth: Penguin.
- Block, P., Rippmann, M., & Van Mele, T. (2017). *Compressive Assemblies*. Chicago: University of Chicago Press.
- Block, P., Schlueter, A., Veenendaal, D., Bakker, J., Begle, M., Hischier, I., & Hofer, J. (2017). *NEST HiLo: Investigating lightweight construction and adaptive energy systems*. Ámsterdam: Eselvier.
- Block, P., Van Mele, T., Rippmann, M., & Paulson, N. (2017). *Beyond Bending*. Munich: Detail.
- Block, P., Van Mele, T., Rippmann, M., Ranaudo, F., Calvo, C., & Paulson, N. (2020). Redefining structural art: strategies, necessities and opportunities. *Sustainability. Disruptive change*, 67-72.
- Cassinello, P. S. (2010). Félix Candela. In memorian. (1910-1997). *Informes de la Construcción. Vol 62, n° 519*, 5-26.
- CEB Desing Guide. (1992). Durable concrete structures. Design guide. No 180. *CEB Bull. d'Information*, 0-120.
- Company. ODB. (29 de Agosto de 2021). Obtenido de Ochsendorf DeJong & Block, LLC: <https://odb-engineering.com/company>
- de Zafra y Estevan, J. M. (1923). *Tratado de hormigón armado*. Madrid: Voluntad.
- del Cueto Ruiz Funes, J. I. (1992). Félix Candela, el mago de los cascarones de concreto. *Arquine*, 33-39.
- ETSICCPV. (2002). *1963-2002 Juan José Arenas*. Valencia.

- Fernández Troyano, L. (1999). *Tierra sobre el agua*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- García, F. M. (2004). *Arcos y bóvedas*. Barcelona: Planeta DeAgostini.
- López López, D., Veenendaal, D., Akbarzadeh, M., & Block, P. (2014). Prototype of an ultra-thin, concrete vaulted floor system. *Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium. "Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints"* (pág. 8). Brasilia: Reyolando M.L.R.F. BRASIL and Ruy M.O. PAULETTI.
- Moreno Moreno, M. P. (2020). La Fonction Oblique como ritual doméstico: habitar en la utopía de la inestabilidad. *BAC Boletín Académico. Revista de investigación y arquitectura contemporánea*, n° 10., 24-25.
- Ochsendorf, J. (2005). Los Guastavino y la Bóveda tabicada en América. *Informes de la Construcción*, 58-65.
- Pantaleón, M. J. (2018). Juan José Arenas y APIAXXI. *ROP3594*, 20-25.
- People. BRG. (29 de Agosto de 2021). Obtenido de BRG: <https://block.arch.ethz.ch/brg/people/philippe-block>
- Piqueras, M. (2013). The American Dream of Rafael Guastavino. *Contributions to Science*, 109 - 112.
- Popescu, M., Reiter, L., Liew, A., Van Mele, T., FLatt, R., & Block, P. (2018). *Building in concrete with an ultra-lightweight knitted stay-in-place formwork: Prototype of a concrete shell bridge*. Ámsterdam: Eselvier.
- Projects. ODB. (29 de 08 de 2021). Obtenido de Ochsendorf DeJong & Block, LLC: <https://odb-engineering.com/projects>
- Puente urbano de Morlans en San Sebastián. (2001). *ROP*, 82-85.
- Redondo Martínez, E. (2000). Las patentes de Guastavino & Co. en Estados Unidos. . *Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, (pág. 11). Sevilla.
- TurismoVasco. (11 de Agosto de 2021). Obtenido de <https://turismovasco.com/bizkaia/que-ver-bizkaia/puentes-de-bilbao/>
- UN Environment. (2017). Global Status Report. *Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector*. Paris, Francia: UNEP. Division of Technology Industry and Economics.
- Viollet-le-Duc, E. (1854). *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*. Paris: B. Bance.
- Zamattio, C. (1990). *The mechanics of water and stone*. Nueva York: Abradale press.

-

Índice de ilustraciones.

Ilustración 1. Tipos de arco según su generatriz. Viollet-le-Duc, E. (1854). Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle. Paris: B. Bance.....7

- Ilustración 2. Tipos de arco según su generatriz. Viollet-le-Duc, E. (1854). *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*. Paris: B. Bance..... 8
- Ilustración 3. Arco de medio punto de hormigón armado. García., F. M. (2004). *Arcos y bóvedas*. Barcelona: Planeta DeAgostini..... 8
- Ilustración 4. Concepto resistente de una viga de canto 'T'. Arenas de Pablo, J. J. (2002). *Caminos en el aire: Los puentes*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (Redibujado por el autor)..... 10
- Ilustración 5. Sección arcaica y moderna de un puente tipo 'π' Arenas de Pablo, J. J. (2002). *Caminos en el aire: Los puentes*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (Redibujado por el autor)..... 11
- Ilustración 6. Puente del Veudre sobre el río Allier. Eugène Freyssinet. Arenas de Pablo, J. J. (2002). *Caminos en el aire: Los puentes*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos..... 13
- Ilustración 7. Hormigonado de la clave en el puente del Veudre. Extraído de <https://esenciaestructural.wordpress.com>..... 14
- Ilustración 8. Esquema del descimbrado activo. Arenas de Pablo, J. J. (2002). *Caminos en el aire: Los puentes*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. (Redibujado por el autor)..... 14
- Ilustración 9. Ley de momentos actuantes sobre la fábrica en el Chiasso por Robert Maillart. Extraído de la biblioteca del Politécnico Federal de Zúrich a través de la web de acceso público: www.atlasofplaces.com..... 15
- Ilustración 10. Magazzini Generali en el Chiasso Extraído de la biblioteca del Politécnico Federal de Zúrich a través de la web de acceso público: www.atlasofplaces.com..... 16
- Ilustración 11. Puente de Salginatobel. Extraído de la biblioteca del Politécnico Federal de Zúrich a través de la web de acceso público: www.atlasofplaces.com..... 16
- Ilustración 12. Leyes de momentos sobre un puente en arco triarticulado. Combinación de las dos situaciones más desfavorables. Billington, D. P. (2003). *The art of structural design. A swiss legacy*. Princeton, New Jersey: Princeton University Art Museum 17
- Ilustración 13. Puente de Schwandbach. Extraído de la biblioteca del Politécnico Federal de Zúrich a través de la web de acceso público: www.atlasofplaces.com..... 18

| | |
|--|----|
| <i>Ilustración 14. Viaducto de Almonte. Extraído de Arenas&Asociados www.arenasing.com</i> | 19 |
| <i>Ilustración 15. Proceso constructivo de avance en voladizo con tirantes en el arco de la Regenta. Extraído de Arenas&Asociados www.arenasing.com</i> | 22 |
| <i>Ilustración 16. Arco de la Regenta, Viaducto Pintor Fierros. Extraído de Arenas&Asociados www.arenasing.com</i> | 23 |
| <i>Ilustración 17. Viaducto de Morlans, San Sebastián. Fotografía tomada por el autor.</i> | 24 |
| <i>Ilustración 18. Vista del tablero, pilas y arco. Fotografía tomada por el autor.</i> | 25 |
| <i>Ilustración 19. Puente de Miraflores en Bilbao. Fotografía tomada por el autor.</i> | 26 |
| <i>Ilustración 20. Alzado del puente de Miraflores. Planos cedidos por Arenas&Asociados</i> | 27 |
| <i>Ilustración 21. Sección transversal del tablero. Planos cedidos por Arenas&Asociados.</i> | 28 |
| <i>Ilustración 22. Vista del puente de Miraflores desde el barrio de La Peña. Fotografía tomada por el autor.</i> | 28 |
| <i>Ilustración 23. Perforaciones a destroza. Planos cedidos por Arenas&Asociados.</i> | 29 |
| <i>Ilustración 24. Sección transversal, arco y tablero. Planos cedidos por Arenas&Asociados.</i> | 30 |
| <i>Ilustración 25. Vista del Arco de Miraflores. Fotografía tomada por el autor</i> | 31 |
| <i>Ilustración 26. Patente de bóveda tabicada. Rafael Guastavino. Redondo Martínez, E. (2000). Las patentes de Guastavino & Co. en Estados Unidos. . Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, (pág. 11). Sevilla</i> | 33 |
| <i>Ilustración 27. Patente de forjado resistente al fuego. Redondo Martínez, E. (2000). Las patentes de Guastavino & Co. en Estados Unidos. . Actas del Tercer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, (pág. 11). Sevilla</i> | 34 |
| <i>Ilustración 28. Dibujos aportados por Isler en 'New shapes of shell forms'. Archivo de la IASS. Heinz Isler.</i> | 37 |

| | |
|---|----|
| Ilustración 29. Modelo colgado de Heinz Isler. Extraído de la biblioteca del Politécnico Federal de Zúrich a través de su web: https://schwartz.arch.ethz.ch/Forschung/islerthemodelasaworkingmethod.php | 38 |
| Ilustración 30. Esquema de bóveda tabicada para el proyecto SUDU. Block, P., Van Mele, T., Rippmann, M., & Paulson, N. (2017). <i>Beyond Bending</i> . Munich: Detail..... | 40 |
| Ilustración 31. Bóveda Armadillo, Bienal de Venecia. Block, P., Van Mele, T., Rippmann, M., & Paulson, N. (2017). <i>Beyond Bending</i> . Munich: Detail..... | 42 |
| Ilustración 32. Tejido usado para la cimbra perdida del puente. Popescu, M., Reiter, L., Liew, A., Van Mele, T., FLatt, R., & Block, P. (2018). <i>Building in concrete with an ultra-lightweight knitted stay-in-place formwork: Prototype of a concrete shell bridge</i> . Amsterdam: Eselvier..... | 43 |
| Ilustración 33. Construcción de la cubierta de HiLo. Extraído de la biblioteca del Politécnico Federal de Zúrich a través de su web: https://block.arch.ethz.ch/brg/project/nest-hilo-roof-final-construction-duebendorf-ch-2019-2020 | 44 |
| Ilustración 34. Esquema de cimbrado. Block, P., Van Mele, T., Rippmann, M., & Paulson, N. (2017). <i>Beyond Bending</i> . Munich: Detail..... | 46 |
| Ilustración 35. Prototipo construido. Block, P., Van Mele, T., Rippmann, M., & Paulson, N. (2017). <i>Beyond Bending</i> . Munich: Detail..... | 48 |
| Ilustración 36. Vista de la bóveda desde el interior. Block, P., Van Mele, T., Rippmann, M., & Paulson, N. (2017). <i>Beyond Bending</i> . Munich: Detail..... | 49 |
| Ilustración 37. Esquema resistente del puente de Schwandbach (arriba) y el de Morlans (abajo). Dibujado por el autor..... | 51 |
| Ilustración 38. Sección de la bóveda nervada de BRG. Dibujado por el autor..... | 52 |
| Ilustración 39. Diagramas resistentes de la bóveda nervada de BRG y el Puente de la Salgina de Robert Maillart. Block, P., Van Mele, T., Rippmann, M., & Paulson, N. (2017). <i>Beyond Bending</i> . Munich: Detail. Billington, D. P. (2003). <i>The art of structural design. A swiss legacy</i> . Princeton, New Jersey: Princeton University Art Museum. Redibujado por el autor..... | 52 |



'Porque, llevado ese bienhacer al más alto nivel del espíritu, ¿no incluye en su misma esencia valores morales como el orden, la relación armoniosa, la pureza de formas, la autenticidad, la belleza?'

Juan José Arenas de Pablo. Caminos en el Aire: Los puentes.