

“L'ART DE L'INGÉNIEUR” CONSTRUCTEUR, ENTREPENEUR, INVENTEUR. GRAN EXPOSICIÓN EN EL CENTRO GEORGES POMPIDOU DE PARÍS

José A. Fernández Ordóñez.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Comisario de la Exposición.

José Ramón Navarro Vera.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Juan José Arenas de Pablo.

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

RESUMEN

En el Centro Georges Pompidou de París, el próximo 24 de junio se inaugurará la exposición titulada “L'Art de l'Ingénieur”, probablemente la más importante muestra realizada acerca de la ingeniería civil desde mediados del siglo XIX hasta finales del XX, siendo comisarios de la misma José A. Fernández Ordóñez, de Madrid, y Raymond Guidot y Alain Guiheux, de París.

Entre las aportaciones más interesantes de esta exposición está la publicación de un Diccionario de vocablos relacionados con la ingeniería civil, de 600 páginas. Dado su interés, la ROP publica en este número las voces redactadas por los ingenieros de caminos José A. Fernández Ordóñez, Juan José Arenas de Pablo y José Ramón Navarro Vera. La brevedad de los textos es debida a que el número total de signos del Diccionario estaba estrictamente limitado.

Se celebrará un coloquio internacional sobre el tema del arte de la ingeniería en el Centro Georges Pompidou los días 25 y 26 de septiembre.

ABSTRACT

In the Georges Pompidou Centre in Paris, an exhibition will be opened on June 24 under the title “L'art de l'Ingénieur” probably the most important presentation of civil engineering between the mid-nineteenth century and the end of the twentieth. Acting as committee members José A. Fernández Ordóñez of Madrid and Raymond Guidot and Alan Guiheux of Paris.

Among the most interesting features of the exhibition is the publication of a 600-page dictionary of terms related to civil engineering. In view of the interest of the new publication, this number of the journal is offering the terms defined by the civil engineers José A. Fernández Ordoñez, Juan José Arenas de Pablo and José Ramón Navarro Vera. The brevity of the texts is due to the very limited number of entries allowed in the dictionary.

An international discussion of the art of engineering will be held in the Georges Pompidou Centre on September 25-26.

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
septiembre de 1997.

Recibido en ROP:
junio de 1997

TEORÍA Y PRÁCTICA

Si por un lado la teoría, con contenidos científicos, ha tenido un papel esencial en la configuración del perfil del ingeniero moderno, por otro, grandes ingenieros como Roebling y Freyssinet han construido sus mejores obras guiados más por su intuición y su genio que aplicando argumentos teóricos, a los que, en ocasiones, miraban con desconfianza precisamente por ser demasiado teóricos.

¿Como han sido las relaciones entre la teoría y la práctica en la historia de la ingeniería civil?. Hay que analizar los textos de los ingenieros, lo que predicaban, y contrastarlo con lo que hacen. Y esto es importante no sólo como un ejercicio especulativo, sino por su dimensión ética. En la obra la teoría pierde su carácter ideal para sumirse en lo real. Esta inmersión en la vida toma, de pronto, la forma de un compromiso. Y comprometerse significa pasar de las ideas a los hechos. Y es, bajo esta mirada ética, cuando se puede y se debe analizar la ingeniería del siglo XX, entender lo que es verdadero y separarlo de lo falso.

En este sentido, es admirable con cuanta honestidad Freyssinet abandonó las teorías convencionales para sustituirlas por otras nuevas, y además ¡con qué libertad y valor!. En él no hubo nunca separación entre teoría y práctica. Curiosamente, los ataques e incomprensiones que sufrió fueron los que se dirigen a todos los geniales creadores: que se desvían peligrosamente de lo establecido o que caen hacia lo desconocido.

Si para la ciencia, ante un fenómeno de la naturaleza sólo hay una respuesta que lo explique, la técnica de la ingeniería civil -los saberes constructivos- no tiene una respuesta única ante la resolución de un problema práctico: "lo arbitrario ante lo necesario" escribe Paul Valery. La sabiduría constructiva confiere una dimensión moral a las obras de los ingenieros en la medida que implica una elección, y toda elección supone un dilema ético.

Para Aristóteles el sentido de los actos técnicos no está en su finalidad sino en el camino que se recorre hasta alcanzar ésta. "La flecha del arquero, en la brillante metáfora aristotélica, no es el punto que circula en un espacio vacío y neutro, hasta clavarse en el lejano blanco. La flecha es la vida. El recorrido de la flecha traza también el sentido de una trayectoria. Su objetivo no es, exclusivamente, atinar en el blanco, sino recorrer acertadamente el espacio que los separa. El supuesto telos no es la parte fundamental de ese recorrido, sino un elemento más de él" (Emilio Lledó). Asimismo, el sentido de las obras de los ingenieros civiles no está sólo en su finalidad sino en el recorrido realizado hasta alcanzar el blanco: el proceso constructivo. Los grandes ingenieros han sido también geniales constructores, como Brunelleschi, Eiffel o Freyssinet, para quienes, también era esencial el "recorrido de la flecha".

A finales del siglo XX es difícil encontrar alguna actividad material de la sociedad que no dependa de la producción de conocimientos a través de la investigación científica. Al mismo tiempo estos conocimientos están sometidos a una presión para conseguir objetivos traducibles en artefactos útiles para los ciudadanos, o para satisfacer sus necesidades. La frontera entre ciencia y técnica ahora se diluye en lo que se conoce como "Investigación y Desarrollo", un nuevo concepto que engloba a la ciencia y a la técnica en un fin común. ● José A. Fernández Ordóñez y José Ramón Navarro Vera

MODERNIDAD Y TRADICIÓN

En ingeniería civil es mucho más difícil innovar y romper con la tradición que en el arte. Impone mucho socialmente el peso de los precedentes, la atracción de los ejemplos, los senderos establecidos por una indefinida tradición. Ninguna invención cuaja socialmente si no conecta con su época. Durante el siglo I d.C. Hero de Alejandría inventó la primera máquina de vapor, el *aeropilus*, que pasó desapercibido y se utilizó simplemente como un juguete ingenioso. Freyssinet* inventó el pretensado en 1907 pero no cuajó hasta que socialmente su época lo aceptó y consagró en 1934.

En ingeniería civil son excepcionales las rupturas con la tradición. La norma es el soporte de unas obras en otras, el continuo aprendizaje de unos ingenieros sobre los hombros de sus antecesores: se transmite todo salvo escasas y geniales creaciones, como pueden ser la invención del arco o la del pretensado*, y casi nada se inventa.

"Nihil per saltus facit natura". Esta convicción de Horacio podría trasladarse a la ingeniería civil. De modo semejante a la naturaleza, tampoco la ingeniería prospera a saltos. Las excepciones en todas las épocas -incluido el siglo XX- son escasas, aunque decisivas. El progreso ha seguido un camino lento, escalonado, y por etapas apenas perceptibles.

En el siglo XX, si comparamos el carácter rápidamente cambiante de las formas de los objetos de la ingeniería industrial (TV, teléfonos, aviones ...) con las obras de ingeniería civil, éstas varían poco a pesar de los continuos avances técnicos producidos. Un puente se parece más a un martillo que a un cohete espacial -cuya forma está más cerca de la moda, como el diseño industrial- o a un vestido, cuya duración normal es una temporada. En un puente, como en un martillo, los cambios son escasos y lo normal son las leves inflexiones: es un objeto de larga duración formal (Kubler). Sin embargo, la ingeniería del siglo XX tiene una nueva y muy fuerte servidumbre que ha conmovido el concepto convencional del proyecto desde una mentalidad tradicional: su relación con la naturaleza, el rechazo que producen las grandes obras, al contrario de lo que sucedía en los siglos pasados.

Aunque la búsqueda de lo económico haya sido esencial para el desarrollo tecnológico, hay en la historia de las estructuras una tendencia permanente a cubrir mayores espacios con menos material. En los años treinta –quizá los más creativos del siglo, con las obras más significativas de Freyssinet*, Ammann*, Torroja*, Nervi* y Maillart*– se introduce lo poético en la ingeniería civil, frente a la dureza de lo estrictamente funcional y la brutalidad de lo económico. En estos años se producen auténticas innovaciones conceptuales como son el pretensado* y las láminas* de hormigón armado, con una inversión técnica radical de la tradición anterior, con la invención de un nuevo material, de nuevas formas y procesos, con unas consecuencias industriales y estéticas enormes. En las estructuras laminares la libertad formal es muy grande y no constreñida como sucede en el funcionalismo. El carácter curvo y la suavidad de sus líneas y superficies se contraponen a las formas funcionalistas geométricas elementales con la aridez de los diedros.

Lo económico –primordial en el funcionalismo desde Loddoli– no es para los ingenieros más creadores lo esencial, es sólo un aspecto secundario. Lo decisivo es el valor –no el precio– de lo estructural y su proceso constructivo. Ejemplo máximo son las extraordinarias bóvedas de Orly* creadas por Freyssinet*, obra que puede considerarse en nuestro siglo equivalente al Cupullone de Brunelleschi, tanto por su formidable innovación estructural y constructiva como por incrementar el récord de luz de su época con mucho menos material, no sólo el definitivo, sino también el auxiliar durante la construcción, siendo además ambas obras resultado de un concurso público.

Es difícil encontrar en ingeniería civil, en los últimos 200 años, obras absolutamente originales, es decir, formas-tipo estructurales que aparezcan como ideas nuevas y que no hayan existido en los siglos pasados. Pero sí hay obras que se acercan a esa extraordinaria originalidad: por ejemplo, las vigas cajón de Puente Britannia de Stephenson, el puente ferroviario y carretero sobre el Niágara de Roebling, las citadas bóvedas de Orly*, la bóveda de Recoletos* de Torroja* o el puente de Luçanzy* de Freyssinet. Con los antecedentes se explica difícilmente su originalidad. Por qué aparecen en un momento determinado es todavía enigmático. Se haga la lista que uno quiera, el número de obras originales de ingeniería civil es sorprendentemente pequeño. Estas geniales innovaciones se convierten en punto de partida para una serie de obras con importantes consecuencias formales, en las cuales se revisan todos los elementos de la tradición a la luz de las posibilidades que abre la innovación.

Lo que hoy conocemos como arte contemporáneo del siglo XX se produjo con un cambio brusco, instantáneo, tanto de contenido como de expresión, sin ligaduras a los sistemas previos. Nada parecido puede decirse de la ingeniería civil del siglo XX. En el arte era indiferente que la mayoría social no comprendiera en absoluto lo sucedido y de hecho su recono-

cimiento fue muy tardío. Por el contrario, en ingeniería civil ha prevalecido el sello de repetir el pasado sobre los impulsos de alejarse de él. Tampoco ha existido un intento de auténticos nuevos lenguajes expresivos, como ha sucedido en el arte del siglo XX con el expresionismo abstracto al margen de lo figurativo, o la música atonal al margen de los intervalos fijos. Por otra parte, no existe el Picasso de la ingeniería civil del siglo XX. No existe quien lo abarque todo en tipologías, materiales, invenciones, procedimiento constructivos, etc; sería la suma de un puñado de hombres.

A lo largo del siglo XX la ingeniería civil nos muestra en un mismo momento supervivencias de antiguas tradiciones y anticipaciones de nuevas técnicas, formas antiguas contemporáneas de otras formas revolucionarias. En los años sesenta, los chinos maoistas construyen –al modo de Sejourné– bóvedas de piedra de 100 m. de luz, al tiempo que Freyssinet está creando ex nihilo sus puentes pretensados y que la gran mayoría de los ingenieros de todo el mundo trabajan convencionalmente con el hormigón y el acero.

En la arquitectura del final del siglo XX, en que lo estructural ha pasado a segundo plano y se ha subordinado a las formas, puede parecer lógico el axioma “primero se proyecta y se ejecuta después”. Pero en ingeniería civil esta concepción es falsa: para los verdaderos ingenieros, aún los más modestos, el trazado de las formas supone el conocimiento previo de los medios de ejecución. De ahí que la utilización hoy día de tipologías y detalles estructurales del siglo XIX, ignorando su origen y su significado, sin otro objetivo que el meramente formal, es puramente comercial y artificioso, y convierten en calderilla técnica lo que hace un siglo fueron obras espléndidas.

La ingeniería civil del siglo XIX culminó su sueño de construir la torre de los 1.000 pies. El siglo XX finaliza sin conseguir el suyo de cubrir Manhattan con la visionaria cúpula de Fuller de 3 Km. de diámetro. Si bien es cierto que sin proyectos utópicos no es posible la innovación ni la imaginación creadora, no es menos cierto que, en ingeniería civil, el idealismo malgasta sus fuerzas cuando no reconoce la realidad de las cosas. ● José A. Fernández Ordóñez

FREYSSINET - PRECONTRAIT

De origen aldeano, Eugenio Freyssinet nació el 13 de Julio de 1879 en Objat –en el bajo Limousin (Francia). Es el último de los ingenieros pioneros, capaz de investigar como un científico puro los misterios del hormigón y, al mismo tiempo, resolver como un artesano viejo los más diversos problemas constructivos con soluciones tan definitivas que siguen siendo vigentes pasados ochenta años.

Su genial invento de pretensado le eleva a un primer puesto en la historia de la construcción. Sólo la aparición del arco

es comparable en importancia al invento de Freyssinet, y en cierto modo semejante, ya que ambos son artificios mediante los cuales la materia se vence a si misma (*Ars ubi materia vincitur ipsa iva*).

Alumno de los célebres ingenieros Sejourné (maestro de formas), Résal (pensamientos elegantes) y Rabut (ideas agudas, filósofo de equilibrios), a quienes consideraba sus guías y amigos, obtuvo el título de Ingeniero de Puentes y Caminos en 1905.

En 1907, construye el Puente de Praireal-sur-Berbre, descubre las deformaciones diferidas del hormigón e inventa el descimbramiento de bóvedas por gatos en clave, lo que constituye la revolución de una técnica milenaria, consiguiendo por vez primera regular, previamente a las sobrecargas, la retracción y las deformaciones, eliminando las nocivas. Entre 1907 y 1911 construye tres puentes sobre el río Allier –Veurdre, Châtel de Neuvre y Boutiron*– con bóvedas muy rebajadas (1/15) de 72.50 m. de luz y con un peso propio total de 1.200 Kg/m² incluyendo pavimentos y barandillas. Previamente construye en Moulins un arco de ensayo de 50 m. de luz y 2 m. de flecha, cuyos estribos une Freyssinet con un tirante de hormigón precomprimido, con una fuerza permanente de 2.500 Tn. proporcionada por varios centenares de hilos de 8 mm. tensados por pares y anclados por clavijas. Concebido en 1907 y construido en el verano de 1908, este tirante es el antepasado de todas las obras en hormigón pretensado.

En 1915 construye en Avord (cerca de Bourges) los primeros hangares para aviones en hormigón, con unas bóvedas de cañón de 46 m. de luz, batiendo el récord bimilenario de bóvedas de fábrica que todavía ostentaba el Panteón de Adriano en Roma. Los hangares gemelos de Orly* –88 m. de luz, 50 m. de anchura y 300 m. de longitud– representan en 1921 un salto cualitativo en las cubiertas de fábrica, no sólo por sus enormes dimensiones que son récord mundial indiscutible, sino por el mínimo volumen de hormigón empleado: nadie le ha superado en el principio de hacer más con menos, en la sustitución de la cantidad por la calidad. Entre 1919 y 1925 construye los hangares de Villacoublay con unas bóvedas plegadas laminares de 55 m. de luz, de espesor variable entre 4 y 6 cm. Freyssinet resuelve los problemas resistentes de las cubiertas por la pura forma, dando a las láminas un margen de rigidez a flexión para resistir las cargas variables, además de manipular las acciones previamente a la aparición de las sobrecargas, lo que supone equilibrar tensiones y deformaciones, y aumentar la esbeltez. Además, en todas sus obras, pero especialmente en los hangares de Orly, se hace patente la importancia de la adecuación de unas formas a los medios de ejecución con que se cuenta de antemano. De ahí su íntima relación –como amigo y socio industrial– con dos grandes constructores, Francisco Mercier (1907-1914) y Claudio Limousin (1914-1929). Con una Administración respetuosa y confiada en su genio, Freyssinet es el último ingeniero de la historia que asume en solitario las grandes obras públicas

desde el origen del proyecto hasta el final de la construcción, con una libertad absoluta y con una responsabilidad técnica y económica total. Concibe la obra como una unidad indestructible, dedicando la misma pasión al concepto general del proyecto que a la construcción minuciosa de una pequeña cuña de anclaje.

En 1919 consigue el récord mundial de bóvedas de hormigón en masa con los 100 m. de luz del puente de Villeneuve sur Lot. En 1923, con los 132 m. de luz del puente de St. Pierre du Vauvray, consigue el récord mundial de bóvedas de hormigón armado, sólo superado por su puente de Plougastel* en 1929.

En 1917 idea y aplica por vez primera el que sería decisivo invento de la vibración del hormigón. En la patente escribe que su intención era “utilizar morteros fluidos para hormigonar entre armaduras complicadas, eliminando por vibración el exceso de agua”. Su invento de la vibración –que hoy pertenece al acervo común de todos los ingenieros civiles– fue el resultado de continuos estudios teóricos y rigurosas experiencias, ensayando desde los continuos procedimientos de centrifugación hasta los de las mesas vibrantes y las de vibración neumática o eléctrica.

Otras aportaciones básicas de Freyssinet son: el endurecimiento rápido de los hormigones, alcanzando en los años 30 los 1000 Kg/cm² a los 28 días y los 500 Kg/cm² a las 48 horas; el ripado de cimbras de bóvedas gracias a la introducción de nervios rigidizadores; la aplicación de la prefabricación en combinación con el pretensado; la puesta en tensión de tirantes deformándolos transversalmente; las articulaciones de tipo plástico (empleadas por primera vez en 1911 en el puente Boutiron y llamadas “Freyssinet” desde entonces); haciendo trabajar el hormigón a 2.000 Kg/cm², que no podía romper al estar fuertemente zunchado; el gato plano, simple envoltura plana de chapa, ligero y de una potencia estática ilimitada casi gratuita, que permite utilizar fuerzas de una magnitud incomparablemente superiores a las empleadas jamás por el hombre en toda la historia; el descubrimiento de que el módulo de elasticidad varía con las cargas, la temperatura o la humedad, negándose a reconocer válida –en fecha tan temprana como 1910– la teoría de un módulo de Young constante recogida en la Norma Oficial de 1906.

Gracias a la escasez de hierro, entre 1914 y 1929 Freyssinet pudo mostrar las cualidades universales del hormigón armado. Además de grandes cubiertas y puentes, Freyssinet proyectó y construyó en hormigón fábricas y naves industriales de todas clases, depósitos de agua, silos, garajes, lavadores de carbón, barcos con sus timones, cureñas de cañones y todo lo imaginable, inventando tipologías y procedimientos que serían repetidos durante decenios. Después del pretensado, la difusión internacional del hormigón es el mayor legado que los constructores del siglo XX le adeudan.

Pero las grandes obras no podían ocultar que el hormigón armado era un “very tricky material” (Ove Arup), una “extraña

coyunda” (Torroja), que esta anormal asociación de materiales –hormigón y acero– funcionaba en muy malas condiciones, con graves defectos inherentes a su propia formación, con fisuraciones inevitables y corrosiones consiguientes.

El pretensado fue la consecuencia final e inevitable de un planteamiento riguroso llevado al límite por Freyssinet, tanto en su actividad profesional, como en su propia vida personal. En 1.903 concibe por primera vez la posibilidad de creación de tensiones previas. El 2 de Octubre de 1928 patenta el pretensado. A sus 50 años, en 1929, abandona una posición económica y profesional privilegiada a nivel mundial, para recluírse en solitario con el único objetivo de desarrollar teórica y prácticamente el pretensado, arruinándose y llegando al borde del suicidio.

En 1934 salva la gigantesca Estación marítima de El Havre, base del célebre Normandie, que se hundía sin remedio posible, con el reconocimiento mundial del pretensado, rompiendo el círculo infernal donde se encuentran encerrados todos los innovadores a los que se piden referencias inexistentes. En 1939 inventa el anclaje y el gato para pretensado, pequeño, económico y seguro: una joya de la ingeniería. En 1945 finaliza la construcción del puente de Luçanzý* y en 1950 la de otros cinco puentes sobre el río Marne poniendo a punto todos los medios y detalles para la práctica del pretensado, creando ex nihilo precedentes y modelos en todos los ámbitos estructurales. El hormigón armado, decía Freyssinet, es “el triunfo del absurdo”. El pretensado fue el triunfo de la razón.

El hormigón armado era un material anisótropo, compuesto por dos materiales sin vínculo verdadero. Con el pretensado, la pareja (hormigón-acero) es sustituida por la pareja (hormigón-hormigón), convirtiendo el hormigón en un sólido homogéneo, isótropo, de la misma nobleza que los textiles, vidrios y los metales. Coexisten así dos fuerzas que se equilibran y que no se manifiestan al exterior: una tensión prácticamente constante en las armaduras y una compresión variable en el hormigón que nunca entra en tracción. Freyssinet utiliza, contrapuestas, la fuerza de ambos materiales. Leonardo definía el arco como “due debolze” que se oponen “alla ruina l'uno del altro” y que “se convertano in unica forteza”. Así el concepto del arco y del pretensado se acercan en su origen.

Es un nuevo modo de funcionamiento de asociación acero-hormigón, de modo que las deformaciones del hormigón siempre comprimido, son independientes de las del acero. En lugar de sustituir, como se hace en el hormigón armado, el insuficiente hormigón por armaduras que resisten directamente las sollicitaciones, Freyssinet hizo capaz al propio hormigón de soportarlas por sí mismo, creando, antes de la aplicación

La aparición del pretensado como amplio concepto estructural significaba, por primera vez en la historia, la posibilidad de modificar a voluntad e iniciativa del ingeniero los estados elásticos iniciales de la estructura como si se tratase de un dato más

de las sollicitaciones, tensiones en sentido inverso de la misma magnitud.

Con el pretensado, Freyssinet transformó en construcciones elásticas no fisurables aquellas construcciones constituidas por materiales fisurables como la piedra o el hormigón.

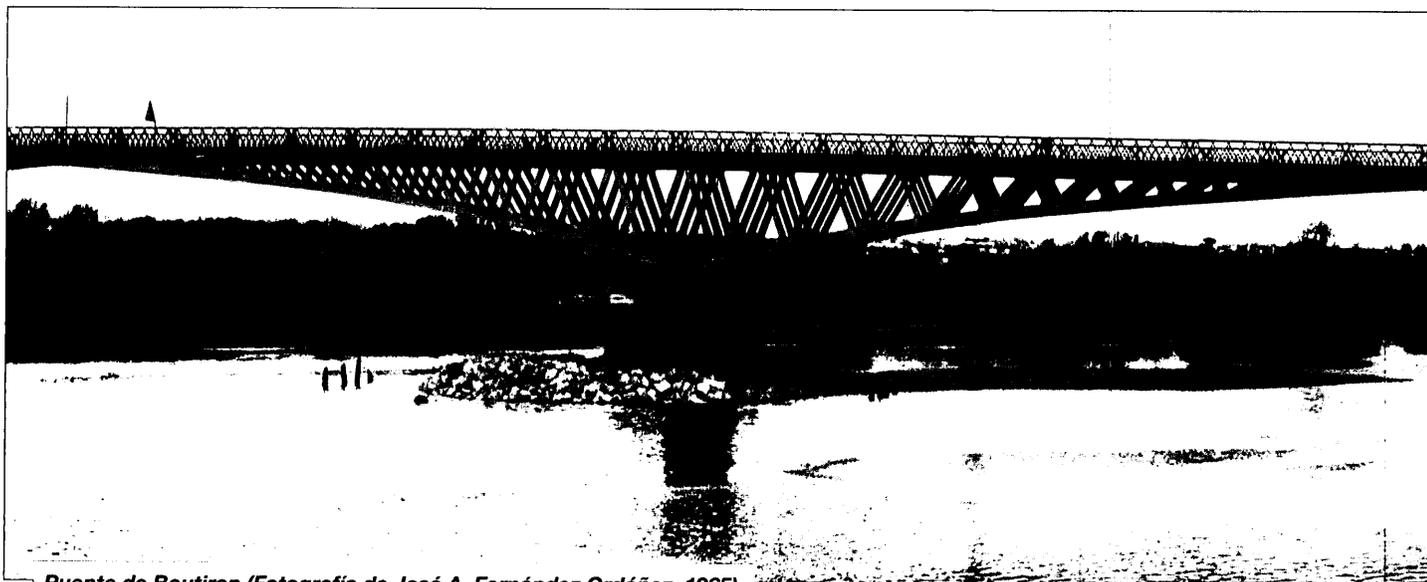
La aparición del pretensado como amplio concepto estructural significaba, por primera vez en la historia, la posibilidad de modificar a voluntad e iniciativa del ingeniero los estados elásticos iniciales de la estructura como si se tratase de un dato más, es decir, la posibilidad de manipular unas fuerzas elegidas –no impuestas por la naturaleza, como es la fuerza de la gravedad– que permitan crear tensiones y deformaciones a voluntad del ingeniero, utilizando reacciones elásticas permanentes, con independencia de las futuras soluciones de utilización. “En adelante –como dijo Freyssinet– en toda construcción, en lugar de atribuir el valor cero a los esfuerzos antes de la carga, se les dará el valor que se considere más favorable para la resistencia de esa construcción”.

A partir de 1939, Freyssinet sabe que su obra le sobrevivirá, que el pretensado es inmortal, que el término *precontraint* pertenece ya a todas las lenguas. A sus ochenta años proyecta su obra póstuma, el puente de Saint Michel en Toulouse, donde siente nostalgia del puente de Tonneins, una de sus obras más queridas, también sobre el río Garona construido en 1919. Freyssinet murió el 7 de Junio de 1962. ● José A. Fernández Ordóñez

PUENTE DE BOUTIRON (VICHY)

Cerca de Vichy, es el único existente en pie de la serie de los tres bellísimos puentes de hormigón armado sobre el río Allier, propuestos en 1907 por el constructor Mercier por el precio cerrado de sólo el puente del Veudre –proyectado por la Administración con una solución convencional de mampostería–, con la única condición de que se realizasen bajo la dirección y el proyecto de Freyssinet*.

Consta de tres bóvedas triangulares con luces de 72.50 m. la central y 67.50 m. las laterales, con rebajamientos muy fuertes de 1/15 y 1/16. La losa del tablero, aligerada por case-tones en rincón de claustro, se une a las bóvedas por medio de tímpanos triangulares. Las pilas, muy ligeras, se calculan para resistir únicamente las diferencias de los empujes debi-



Puente de Boutiron (Fotografía de José A. Fernández Ordóñez, 1965)

dos a las sobrecargas. El peso total, incluyendo las barandillas, es de 1.200 Kg./m² y la cuantía del acero de 30 Kg/m², cifras increíblemente reducidas para estas luces y que no podrán nunca igualarse dado el carácter cada vez más conservador de los Reglamentos.

Con estos puentes, Freyssinet pasó repentinamente de ser un desconocido ingeniero provinciano a obtener el premio Caméré, uno de los más importantes de Francia. El original descimbramiento por gatos y el nunca visto ajuste final de las bóvedas fue presenciado por los célebres ingenieros Rabut y Mesnager, acompañados de los alumnos de la Escuela de Puentes y Caminos.

Tanto el Veudre como Boutiron fueron para el joven Freyssinet "prueba de una audacia llevada hasta el desprecio de los más grandes riesgos" quien, ya anciano, escribiría: "de 1907 a 1991 el puente de Veudre había ocupado mi pensamiento continuamente. Lo he amado más que a ningún otro de mis puentes. Y de todos los que la guerra ha destruido, es el único cuya ruina me ha causado una verdadera pesadumbre". ● José A. Fernández Ordóñez

HANGARES DE ORLY (PARIS)

Construidos entre 1921 y 1923 por E. Freyssinet*, estos hangares significaron para los constructores de hormigón armado lo que la Galería de Máquinas, treinta y cinco años antes, para los constructores metálicos. Sólo Le Corbusier –quien publicó en "Esprit Nouveau" dos fotografías de los hangares de Orly en construcción, haciendo un panegirico de exaltación maquinista– supo apreciar en su tiempo la extraordinaria calidad plástica y constructiva de estos hangares, hoy reconocidos como una de las indiscutibles obras maestras de la arquitectura del siglo XX.

La estructura es una gran bóveda formada por una lámina plegada constituida por 40 ondas de 7.5 m. de anchura y 86 m. de luz para cada hangar. La directriz de cada onda es parabólica y el canto de la sección varía de 3 m. en clave a 5.40 m. en la base. El espesor de las almas es de tan sólo 9 mm. Las ondas estaban arriostradas por tirantes de hormigón de sección de 0,14 m. x 0,14 m. colocadas a 10 m. entre ejes. Las ondas se apoyan sobre una losa de hormigón de un metro de espesor situada dos metros por debajo de la solera del hangar. Los medios de ejecución fueron determinantes de las formas adoptadas. Esta preocupación por los sistemas constructivos que alcanzará su clímax en Plougastel*, intentando una perfecta adecuación entre los medios disponibles y las formas diseñadas, es característica de toda su obra. Tal como escribió Freyssinet al finalizar la construcción de los hangares, "la novedad del programa de Orly es la consecuencia de colocar los medios de ejecución como centro de nuestras preocupaciones. De hecho, las formas de los hangares fueron deducidas de los medios de ejecución elegidos, cuyo estudio ha constituido el objetivo principal de nuestras investigaciones".

Dado el pequeñísimo espesor de los elementos, fue necesario obtener un hormigón con la suficiente compacidad para garantizar una impermeabilización real, junto a una gran fluidez para poder llenar el espacio entre unos moldes muy próximos, todo ello unido a un endurecimiento del hormigón lo suficientemente rápido para reutilizarlos más veces. Los moldes estaban constituidos por planchas de madera de pino de 35 mm. de espesor fijados sobre marcos espaciados cada 0.80 m.

Cada onda o anillo parabólico se construía en cinco fases. Sobre unos arranques de 2 m. de altura se construían unos elementos en voladizo de 17 m. de altura. Sobre estos voladizos se ejecutaba una bóveda de 75 m. de luz., 144 m. de desarrollo y 7.50 m. de anchura empleando 150 m₃ de hormigón

mediante una cimbra regable de madera, formada por una sola pieza.

El arco de la cimbra funcionaba como articulado, pero desde el comienzo del hormigonado actuaba como empotrado en sus apoyos, que estaban formados por una estructura mixta de madera-hormigón y arriostrados por dos haces de cables provistos de unos dispositivos para regular su longitud.

La cimbra –cuyo peso total era de 130 Tn– se trasladaba horizontalmente 7,50 m. sobre railes, bajando 11 m. para librar la onda ya hormigonada, y a continuación se fijaba en su nueva posición. Todos los elementos de madera estaban unidos con clavos, como siempre hacía Freyssinet. Con ellos llegó a revitalizar el empleo de la madera “que posee, a igualdad de peso, más del doble de resistencia a tracción o a compresión del acero, con menos problemas de pandeo, mitad de precio y facilidad de empleo incomparablemente mayor”, convirtiéndolo en un verdadero arte gracias al cuidadoso estudio de las uniones, siempre realizadas con clavos.

Cada onda se descimbraba un lunes por la mañana. Por la tarde los moldes ya estaban limpios y colocados para hormigonar la siguiente onda. El martes se colocaba la armadura, después los encofrados y se comenzaba a hormigonar, lo que duraba hasta el jueves. Durante el fraguado se bajaba el molde exterior, se limpiaba y se colocaban los marcos para la iluminación, cerrándose de nuevo el ciclo el lunes por la mañana.

Tal como ocurrió con muchas de las construcciones de Maillart, Nervi y Torroja, la adjudicación de la obra a la Sociedad Limousin, de la que era socio de Freyssinet, fue el resultado de un concurso entre empresas constructoras, donde el presupuesto y el plazo ofrecidos fueron determinantes.

Con una concepción estructural anticipada que todavía causa admiración, los hangares de Orly fueron un récord mundial no sólo en sus dimensiones, sino en los mínimos metros cúbicos de hormigón empleados por volumen útil de construcción, así como en una mano de obra muy reducida y en la gran velocidad de ejecución, inusual hasta entonces en obras de hormigón armado. Fueron además un ejemplo pionero de estructuras mixtas madera-hormigón, una reacción contra la sistematización de las dosificaciones, una utilización racional de los cementos de endurecimiento rápido y una novedosa práctica industrial de encofrado y desencofrado.

“¿Quién no recuerda haber perdido el habla entrando bajo los hangares de Orly?” se preguntaba Urbain Cassan. Desde el punto de vista de la relación entre lo funcional y lo estético, conviene recordar que Freyssinet repetía que “es en los hangares de Orly donde un acercamiento entre la ausencia de intenciones artísticas y la potencia de efectos obtenidos es más chocante”.

Los dos hangares de Orly fueron destruidos por la aviación americana en 1944. ● José A. Fernández Ordóñez

PUENTE DE ALBERT LOUPE (PLOUGASTEL-BREST)

En Plougastel, con una gran audacia técnica y un coste mínimo, Freyssinet* alcanzó con hormigón luces hasta entonces inaccesibles, lo que le dio fama universal.

Inaugurado el 9 de Octubre de 1930 por el Presidente de la República, sería la culminación de su obra realizada en hormigón armado. En el estuario del río Elorn (Brest) el puente salva los 560 m. de su anchura con tres extraordinarias bóvedas de 188 m. de luz entre ejes de pilas que constituirían un nuevo récord del mundo.

El problema técnico había atraído a numerosos ingenieros, como Harel de la Noé, Pigeaud y Considère, quien en 1904 había ya propuesto una solución de tres tramos, dos laterales bow-string y el central levadizo. En 1913 Arnodin ganó un primer concurso con una solución de tres tramos, los dos laterales tipo colgante rígido (sistema Gisclard) y el central levadizo. En 1922 Freyssinet –con la sociedad Limousin– ganó el definitivo concurso de proyecto y obra con un presupuesto mitad de las restantes soluciones metálicas convencionales que competían con él.

Las bóvedas tienen 9,50 m. de anchura y 5 m. de canto medio. La sección está aligerada con tres células, una central cuadrada de 4,50 m. de lado y dos laterales de 1,95 x 4,5 m. Se trata de un tablero doble con la vía de ferrocarril colocada bajo la carretera, con una sección en cajón con almas en celosía de hormigón.

Así como Freyssinet no duda en eliminar, como hizo ya en Villeneuve sur Lot, las armaduras longitudinales de la bóveda –cuyas tensiones están perfectamente controladas con el trazado y la inercia de la sección– no escatima en las armaduras transversales y en el refuerzo de las zonas conflictivas.

El utillaje y los métodos constructivos empleados en Plougastel son verdaderas obras maestras de ingeniería que han llegado a formar escuela.

La cimbra –utilizada para el hormigonado de las tres bóvedas y desplazada sobre 2 barcasas de 35 m. x 8 m., también de hormigón armado–, es la estructura de madera más grande, atrevida y extraordinaria de la historia de la construcción. Inmensa bóveda de 170 m. de luz, y 10 m. de anchura, reglada en cualquier dirección con centenares de hilos de acero tensados, fue realizada con simples tablonces de 4 cm. de espesor de madera de pino, clavados entre sí al tresbolillo de dos en dos con simples clavos.

Otros aparejos genialmente resueltos por Freyssinet fueron el inmenso andarivel de 800 m. de luz entre apoyos con el conductor en la cabina junto a los materiales transportados, y los gigantes cabrios de 55 m. de altura donde inventa el anclaje por adherencia dentro del hormigón. Además, en Plougastel aplica por vez primera en el mundo la técnica de voladizos sucesivos de hormigón, intuye de un modo genial la construc-

ción mixta acero estructural-hormigón y madera-hormigón, y construye las cimentaciones de los dos estribos dentro de ataguías cilíndricas laminares de hormigón armado. Como dijo Seáilles en 1929 el puente de Plougastel significa “un cambio profundo en el equilibrio, necesario hasta ahora, entre medios y resultado; y si con medios tan simples se construye sin dificultades un puente como éste, el empleo de medios más potentes permitirá realizaciones asombrosas”.

“Plougastel –dijo Freyssinet– es el más conseguido de mis puentes. Pero el puente está a la escala, no de los hechos humanos, sino de la naturaleza”. Plougastel es la consagración definitiva del hormigón armado y al mismo tiempo el punto final de su utilización exclusiva en las grandes obras de ingeniería civil. Un nuevo material –el hormigón pretensado– inventado y puesto en práctica por Freyssinet tomará el relevo de forma indiscutible. ● José A. Fernández Ordóñez

PUENTE DE LUÇANZY (PARÍS)

En 1941 comienza Freyssinet la construcción del Puente de Lucanzy sobre el río Marne, no muy lejos de París. Detenida su construcción por los alemanes aquel mismo año, se continúan y finalizan las obras en 1946. Este puente es la expresión más rotunda y esencial de un concepto tan rico y complejo como es el pretensado. Lucanzy es una de esas escasas formas de la Ingeniería Civil del siglo XX que tiene el impacto de lo inequívoco, de lo auténtico.

Después de visitarlo en 1947, Torroja escribió que “de entre las obras que la destacada personalidad de Freyssinet ha lanzado, como piedras miliarenses en el camino evolutivo de la técnica del hormigón armado, ninguna de ellas presenta la novedad y valentía del nuevo puente de Lucanzy”.

El puente tiene 8 m. de anchura y 55 m. de luz con sólo 1,22 m. de canto en clave. El tablero se forma con tres vigas cajón de sección hueca rectangular con una suave variación en su canto, llegando hasta 1,75 m. en los arranques, donde los esfuerzos se canalizan hacia los apoyos por medio de unas células triangulares de gran sencillez.

Lucanzy es además una obra fundamental en la historia de la prefabricación. Todo estaba previamente hormigonado en pequeños elementos para después encajarse con perfección en fases sucesivas y formar finalmente una única y sólida estructura pretensada en las tres direcciones ortogonales. Cada viga cajón se constituía por medio de 22 dovelas prefabricadas, agrupadas en 3 piezas. Los 1.016 elementos del puente eran prefabricados, a excepción de las células de apoyo, que Freyssinet también prefabricaría en los 5 puentes similares sobre el Marne construidos en 1951. Las uniones entre estos elementos se efectuaban en su totalidad por un pretensado que se efectuaba con gran sencillez, corrigiendo los movimientos elásticos y levantando el puente según se iban añadiendo nuevos ele-

mentos.”Veréis mañana –decía en 1949 Freyssinet a 500 ingenieros venidos de todo el mundo para visitar sus puentes del Marne– obras construidas sin cimbras ni encofrados, sin retraso por el endurecimiento de las juntas, con elementos prefabricados en taller. La rotura sin aviso de un elemento pretensado es imposible”. Para Freyssinet, la prefabricación era una vieja compañera de trabajo, un método de construcción que había utilizado ya en los años veinte en los puentes de Laon y St. Pierre de Vauvray, y a lo largo de los años treinta en la fabricación industrial de vigas, postes, tubos y traviesas. Pero es en Lucanzy donde Freyssinet eleva la prefabricación al primer plano de los métodos de construcción de puentes, donde todavía permanece.

En Lucanzy, Freyssinet ya no lucha desesperadamente con la materia como en su juventud, sino que la domina y la modela con elegancia, la eleva venciendo a las fuerzas de gravedad y consigue el milagro de un arco plano. Utiliza pretensados en todos los sentidos, formando lo que para Freyssinet era una estructura perfecta, es decir, elástica en todo el sentido de la palabra, una estructura noble, de primera categoría, donde en ningún punto aparece tracción en el hormigón. Gracias al pretensado los espesores se adelgazan, los cantos disminuyen, toda la estructura se aligera, vuela, como si la gravedad no existiera.

Hasta Lucanzy nunca el hombre había conseguido una esbeltez tan extraordinaria. Sin embargo no hay “tours de force” ni esfuerzos sobrehumanos, sino la intensa emoción contenida de una obra de arte, el misterio de lo ingrátido, de lo oculto revelado.

Freyssinet tiene 67 años cuando finaliza el puente. Sólo entonces se atreve a afirmar respecto al pretensado: “tengo la certeza de que mi obra está viva y me sobrevivirá”. ● José A. Fernández Ordóñez

PRETENSADO

Es la acción de presolicitar una estructura creando en ella esfuerzos previos de signo contrario a los que van a producir las cargas que soporta. Se realiza mediante armaduras situadas dentro de vainas en el interior (o en el exterior) del hormigón, que se ponen en carga mediante gatos hidráulicos.

Frente a la actitud pasiva que supone el hormigón armado, donde el acero se estira igual que el hormigón que lo envuelve y sólo puede trabajar si éste se fisura, la idea de pretensar supone una postura activa del ingeniero que busca compensar los efectos de las cargas. Además, al preestirar la armadura se logra aprovechar la capacidad resistente de aceros de alta calidad. Lo que supone estructuras más ligeras que las de hormigón armado, que abarcan luces muy superiores y con mayor durabilidad. La estética y la limpieza de ella derivadas es la manifestación clara de una técnica nueva y poderosa.

El ingeniero alemán Dischinger* sueña en 1936 con que una pieza de hormigón pretensada (y sin tracciones) será eterna, “como la de un puente romano”. Cuando en 1937 construye con la empresa Dywidag el puente de Aue, tramo de 69 metros de luz, con vigas atirantadas exteriormente mediante cables poligonales, se sitúa en el polo opuesto: Cables desnudos al aire, de muy fácil corrosión. Sin embargo, esa primera aplicación de “pretensado exterior” mostró un camino prometedor que hoy se utiliza con frecuencia creciente.

En 1938 Finterwalder* construye el puente de Wieden y un año después, la empresa Wayss und Freitag, con patente de Freyssinet*, levanta el puente de Oelde, de unos 35 metros, sobre una autopista alemana. Resulta así que el primer puente de sistema Freyssinet* se construye en Alemania, en vísperas de la Segunda Guerra Mundial. Que no detiene del todo el avance en el pretensado, y que, con su masiva destrucción de puentes, va a impulsarlo decisivamente. Hacia 1947 aparecen en Bélgica los puentes de Scalyn y Dinnant, del Prof. Magnel*, con pretensado exterior recto y directriz del hormigón arqueada, de modo que el esquema conjunto tiene mucho que ver con un arco (bow-string), atirantado eficazmente.

Desde 1940 existe el anclaje de alambres de conos para alambres de Freyssinet. Pero la empresa Dywidag trabaja en otra dirección: barras de acero especial, roscadas, que se tensan y anclan mediante tuerca. Es un sistema que resuelve bien los problemas de empalmes entre barras sucesivas y que se presta a la construcción de puentes por ménsulas sucesivas, componiendo vuelos que crecen a partir de las pilas. Construir en vuelo libre supone la ventaja de eliminar todo tipo de cimbras de apoyo sobre los ríos, valles o vías de comunicación. El pretensado, al ejercer una fuerza de compresión de una dovela respecto de la contigua, soluciona limpiamente la unión entre segmentos, incluso prefabricados. En 1952, Finsterwalder y Dywidag construyen por el sistema de libre voladizo el Puente de los Nibelungos en Worms con 114 metros de abertura, que es un avance histórico. Hoy hay varios puentes en el mundo, contruidos en voladizo, que superan los 250 mts. de luz.

El sistema de empuje, que consiste en fabricar un tablero continuo de gran longitud sobre un acceso, por segmentos sucesivos, que se empuja progresivamente y desliza sobre el conjunto de pilas, es otro resultado de la idea de pretensar. Nacido de la mano del Prof. Leonhardt*, con el puente Ager en Austria (1962), ha permitido construir tableros de hasta 2 km. de longitud y más de 30.000 toneladas de peso.

El ingeniero italiano Morandi* se asocia a la historia de los puentes atirantados, cuyo tablero de hormigón queda suspendido de un conjunto de tirantes oblicuos que nacen a un lado y otro de una torre o mástil vertical. El del Lago de Maracaibo, con vanos de hasta 235 m., compuso en 1962 un avance espectacular. La idea ha evolucionado hacia los puentes-arpa, donde el tablero está suspendido de numerosos tirantes, muy próximos y transparentes. El Puente de Normandía sobre el Se-

na, con un vano de 850 m. (1995) marca el límite alcanzado hasta este momento en puentes pretensados.

El pretensado se ha utilizado también para grandes cubiertas, para la construcción de recintos estancos de centrales nucleares y hasta para anclar al terreno algunas presas, al igual que para reparar estructuras dañadas. La idea de actuar voluntariamente sobre una estructura ha sido tan fecunda que hoy pertenece al sustrato de la cultura de los ingenieros. ● Juan J. Arenas de Pablo

EDUARDO TORROJA

Eduardo Torroja nació en Madrid en 1899. Estudió en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos –fundada por Agustín de Betancourt en 1799 a semejanza de la Ecole des Ponts et Chaussées– y se licenció en 1923.

Conjuntamente con Freyssinet, Maillart y Nervi contribuye decisivamente a la popularización mundial del hormigón armado, que de no ser aceptado a principios de siglo técnica y estéticamente, pasó, a finales de los años 20, a su reconocimiento universal como material tan noble y digno como la piedra y el hierro. De todas aquellas grandes figuras de la ingeniería civil europea, Torroja destaca por la visión estética que tuvo del hecho tensional que no sólo expresó en sus obras sino que desarrolló teóricamente en un texto que es, sin duda, la única y más completa aportación teórica del siglo XX a la creación de formas técnicas.

“Maestro de construcciones originales”, como le llamaba Freyssinet, Torroja venía de una familia de tradición científica y técnica que sin duda influyó en su obra. Su padre, Eduardo Torroja y Caballé, Arquitecto y Catedrático de Geometría, fue el introductor en España de las líneas alabeadas y las superficies desarrollables, formas que fascinarían a su hijo quien proyectó y construyó con esos principios geométricos delgadas láminas de hormigón armado que se han convertido en emblemas del racionalismo arquitectónico.

Torroja tuvo dos épocas perfectamente diferenciadas en su actividad profesional: Una primera como proyectista, desde que terminó sus estudios hasta la Guerra Civil, y otra orientada a la enseñanza en la Escuela de Ingenieros de Caminos y a la investigación en el Instituto Técnico de la Construcción y Edificación que él fundó, y donde le sorprendió la muerte en 1961.

En su época de proyectista que duró apenas una docena de años, fue sin embargo la más fecunda como creador de formas nuevas. Entre 1933 y 1935 proyectó y construyó sus mejores obras: El mercado de Algeciras (1933), el frontón Recoletos* (1935), y las tribunas del hipódromo de la Zarzuela* (1935), todas ellas resueltas con cubiertas laminares de hormigón armado con espesores entre 5 cm. y 9 cm., y con luces como los 47,80 m. de diámetro de la lámina de revolución del mercado de Algeciras. Después de la Guerra Civil desempeñó una tarea

relevante en la reconstrucción del país desde la Jefatura de Puentes del Ministerio de Obras Públicas donde destaca la construcción del viaducto "Martín Gil" (1939) que había quedado sin terminar al inicio de la guerra, para el que proyectó y construyó una gran bóveda de hormigón de 209 m. de luz que durante años fue récord mundial de este tipo de puentes, superando a Plougastel y a Trannenberg.

Ya en su época de proyectista y constructor, Torroja había manifestado su faceta de investigador de las propiedades de los materiales, así como de los complejos métodos de cálculos que requerían sus audaces estructuras. Además, estudiaba su comportamiento aplicando métodos experimentales mediante ensayos en modelo reducido. Pero fue en la última etapa de su actividad profesional donde, con dedicación casi exclusiva se centró en el estudio de las propiedades del hormigón armado tanto en el Laboratorio Central de Materiales de la Escuela de Caminos como en el Instituto de la Construcción y del Cemento que, bajo su dirección, alcanzó fama mundial y que ahora lleva su nombre. Desarrolló una teoría sobre el comportamiento anelástico del hormigón armado que llevó a un nuevo método de cálculo de secciones de hormigón sometidas a flexión. En reconocimiento de sus méritos científicos ingresó en la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Matemáticas en 1944, institución a la que también pertenecieron su padre y dos de sus hermanos.

En 1957, publicó "Razón y Ser de los tipos estructurales" donde recoge lo fundamental de su pensamiento estructural. Precisamente ahora a finales de siglo, cuando la ingeniería civil está en un momento tan desconcertante desde el punto de vista de la creación de formas, las páginas escritas por Torroja, un ingeniero que amaba apasionadamente las formas, pueden aportarnos sosiego y lucidez para relexionar sobre las relaciones entre forma y estructura, entre lo funcional y lo estético. La belleza de las construcciones, para Torroja, se basa en la autenticidad, en la racionalidad de su estructura, la elegante sencillez y la razonada justificación conceptual. Pero, en última instancia, como él mismo decía, la idea creativa será siempre única y en nuestra contingencia podrá ser elaborada solamente por aquella misteriosa e íntima colaboración entre los límites de la materia y del espíritu.

Torroja, de quien F.L. Wright decía que era el ingeniero que mejor había expresado los principios de la construcción orgánica, alcanzó con el hormigón armado el alto objetivo de expresividad del fenómeno resistente, donde se funden el fenómeno tensional y el fenómeno estético "(la máxima valoración de la función resistente en la expresión estética)", sin recurrir a ornamentos "(la simplicidad es una virtud)" donde la belleza se basa en la racionalidad de la estructura.

Eduardo Torroja, conjuntamente con Freyssinet, Maillart y Nervi contribuye decisivamente a la popularización mundial del hormigón armado como material tan noble y digno como la piedra y el hierro

Ninguna obra pasará a la posteridad por la perfección de sus cálculos. Solamente la forma continuará impresionando, decía Torroja, quien conocía sin duda, debido a su profunda formación humanística, que el problema más singular y característico de la estética es el de la

belleza de la forma. ● José A. Fernández Ordóñez y José Ramón Navarro Vera

BÓVEDA DEL FRONTÓN RECOLETOS (MADRID)

Las láminas de hormigón armado constituyen la primera aplicación genuina que expresaba las ventajas de este nuevo material: moldeabilidad, monolitismo y resistencia por su forma.

Las cubiertas laminares de Torroja* rompen con el concepto tradicional de cubierta como un conjunto de dos materiales, uno estructural y otro de cerramiento. Las láminas sustituyen ambos por un único material, el hormigón armado, que cumple ambas funciones creando nuevos espacios arquitectónicos diáfanos donde la continuidad no se consigue por falsos techos o encamionados, sino por la propia estructura que cubre el espacio interno como "un velo envolvente continuo y de pequeñísimo espesor que, al tiempo que cierra, envuelve y abriga este espacio, se sostiene a sí mismo", en palabras de Eduardo Torroja* creador de la cubierta del frontón Recoletos de Madrid.

En 1935 se terminó de construir en Madrid el frontón Recoletos del que son autores Torroja y el arquitecto Zuazo. Es una de las obras más originales, audaces y bellas de la gran época de las cubiertas laminares, que desgraciadamente tuvo que ser derribada tras los desperfectos irreversibles que sufrió por los bombardeos de la Guerra Civil 1936-1939.

El programa funcional del juego vasco de pelota exige un amplio espacio rectangular de cubierta de gran altura delimitándose su dimensión mayor por dos muros paralelos de cierre.

Las condiciones funcionales fueron resueltas por Torroja construyendo, sobre un espacio de 55 m. x 32,5 m., una ligerísima lámina de sección tubular de sólo 8 cm. de espesor, de directriz disimétrica compuesta por dos secciones de sectores circulares, de 12,20 m. y 6,40 m. de radio respectivamente, que se cortaban ortogonalmente a lo largo de una directriz, formando un perfil en "gaviota" como lo denominaba Torroja. La iluminación natural se conseguía a través de dos grandes lucernarios longitudinales abiertos en cada una de las dos secciones circulares, y que se materializaban con un entramado en celosía de triángulos equiláteros de 1,40 m. de lado.

La cubierta, aunque formalmente recuerde a las bóvedas de cañón tradicionales, que transmiten esfuerzos a los muros laterales, se comporta estructuralmente como una viga recta de sección igual al perfil de la directriz y de 55 m. de luz apoyada en los muros paralelos de cierre del frontón. La cubierta no transmite prácticamente esfuerzos a los muros laterales a los que solamente está vinculada a través de dos puntos y de un sistema de bielas que permiten su desplazamiento longitudinal. El cálculo de la lámina se realizó según el método de Dischinger y Finsterwalder quienes lo habían ensayado en las cubiertas de Francfort y Budapest. Sin embargo, los largos y complicados cálculos no daban una confianza suficiente a los proyectistas que decidieron ensayar la cubierta con un modelo reducido, donde se midieron deformaciones de la lámina que se compararon con los valores teóricos de cálculo encontrándose una coincidencia aceptable.

Para conseguir el monolitismo exigible, y para el buen comportamiento estructural de la cubierta se hormigonó prácticamente sin pausa utilizando cementos de fraguado rápido, de tal modo que a los tres meses y medio de comenzar la cimentación del edificio -que en conjunto tenía cinco plantas- ya se había descimbrado la totalidad de la cubierta.

La innovación formal y estructural de la cubierta del frontón Recoletos, récord mundial de su tipo, la convirtió en una obra paradigmática de la modernidad arquitectónica. Su belleza, que oculta y disimula esfuerzos y cálculos complejos tras apariencias tan simples, entronca con la mejor tradición del barroco español. ● José A. Fernández Ordóñez y José Ramón Navarro Vera

HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA (MADRID)

La cubierta laminar del frontón Recoletos* de Madrid es la más audaz e interesante aportación de Torroja* en el terreno de las estructuras laminares. Sin embargo, su destrucción durante la Guerra Civil, convirtió a las cubiertas de las tribunas del hipódromo de la Zarzuela en la más emblemática de sus realizaciones, elogiadas por F.L. Wright y reconocida internacionalmente como una de las mejores piezas de la arquitectura racionalista europea del período de entreguerras.

En 1935 Torroja, junto con los arquitectos Arniches y Domínguez, ganó el concurso de proyectos para construir el hipódromo con unos graderíos protegidos por unas marquesinas.

La marquesina, que tiene un voladizo de 12,60 m., está formada por fragmentos de hiperboloide de una hoja de eje horizontal, apoyadas en pilares separados 5 metros y arriostrados por tirantes posteriores que ingeniosamente se anclan a la cubierta de la sala de apuestas inferior que también vuela en sen-

tido contrario y proporcionando un sabio contrapeso a la cubierta. El espesor de la lámina de la marquesina es de 5 cm.

Ante la dificultad de realizar cálculos rigurosos, Torroja, con gran intuición y sabiduría estructural, dimensionó un modelo de cubierta a tamaño real y lo sometió a un ensayo de carga. Durante la Guerra Civil estuvo expuesta a bombardeos y perforada en más de 25 puntos, pero no se derrumbó y pudo ser reparada.

La estructura general del edificio es el resultado de una reflexión técnica y estética que desde un entramado convencional inicial de piezas rectas horizontales y verticales alcanza la forma final con suaves curvas eliminando todo lo que sobra en un proceso de búsqueda de la simplicidad, cualidad ésta que para Torroja era esencial en la virtud estructural y estética de una forma constructiva. ● José A. Fernández Ordóñez y José Ramón Navarro Vera

TORRES QUEVEDO

Leonardo Torres Quevedo nació en un pequeño pueblo de Santander en 1852 y murió en Madrid en 1936. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, se licenció en 1876. Ingresó en la Academia de Ciencias en 1901, institución que llegó a presidir. Pertenece a la generación científica española del 1889 de la que formaron parte nombres tan notables para la ciencia como el Premio Nobel de Medicina Santiago Ramón y Cajal, el matemático e Ingeniero de Caminos Echeagaray, Premio Nobel de Literatura, y Marcelino Menéndez Pelayo, entre otros.

Como investigador e inventor, Torres Quevedo, fue un precursor de la Automática -nuevo término que introdujo- a través de sus escritos y prototipos de máquinas de calcular. La proyección internacional de Torres Quevedo como científico se inició en 1900 con la memoria que presentó sobre el cálculo automático a la Academia de Ciencias de París, para culminar en 1914 con la titulada “La Automática. Su definición, extensión teórica de sus aplicaciones”.

En su actividad como Ingeniero destaca el desarrollo de sistemas que tenían en común moverse venciendo la gravedad, de un modo autónomo como los dirigibles, o guiados por cable como los transbordadores.

La obra de ingeniería civil más conocida de Torres Quevedo son sus transbordadores, de los que construyó dos, uno en el Monte Ulía, en San Sebastián, de 280 m. de longitud (1907), y el más conocido, de 580 m. de recorrido, sobre el lado canadiense de las cataratas del Niagara, inaugurado en 1916. Este transbordador, que lleva ochenta años funcionando ininterrumpidamente, introdujo innovaciones técnicas que producían una notable mejoría en la seguridad de los pasajeros con relación a otros sistemas más convencionales. ● José A. Fernández Ordóñez y José Ramón Navarro Vera