

EDUARDO TORROJA. UNA VISIÓN PERSONAL

EDUARDO TORROJA. PERSONAL IMPRESSIONS

Juan Monjo, Director del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, me ha pedido escribir una introducción a este libro sobre los proyectos y obras de mi padre. Con motivo del centenario de su nacimiento, en 1899, han aparecido publicaciones (9, 11), en las que se analizan in extenso diferentes facetas de su obra, tanto en cuanto a su encuadre en las corrientes arquitectónicas y estéticas de su época como en relación con aspectos técnicos. Por ello, yo voy a incluir aquí exclusivamente una visión, necesariamente personal, sobre su encuadre entre los ingenieros pioneros del uso del hormigón estructural en la primera mitad del siglo XX, y sobre la aplicación, en general nada convencional, del concepto del pretensado al hormigón.

Juan Monjo, Director of the Eduardo Torroja Institute for Construction Science, asked me to write an introduction to this book on my father's designs and works. In 1999, on the occasion of the centenary of his birth, the various dimensions of his oeuvre were extensively analyzed in several publications (9, 11), both against the backdrop of the architectural and aesthetic currents of the age and in terms of the engineering per se. In light of such precedents, here I am going to limit my necessarily personal view to his position among the engineers who pioneered the use of structural concrete in the first half of the twentieth century and his—normally very un-conventional—approach to the use of prestressed concrete.

1. EDUARDO TORROJA Y LOS INGENIEROS DE SU TIEMPO

A mediados del siglo XIX, el hormigón de cemento Portland en masa estaba ya fuertemente asentado, y empezaron a aparecer tímidas incursiones en su versión de hormigón armado. La barca de Lambot, en Francia, y la patente de Wilkinson, en Inglaterra, serían sus primeros balbuceos. Pero, al menos en Europa, se considera que las patentes del jardinero francés Joseph Monier, de 1877, dieron paso al desarrollo del hormigón armado. Aunque serían los ingenieros alemanes Wayss y Freitag, tras adquirir los derechos de la patente de Monier en 1884, y, en particular, el francés Hennebique, que obtuvo su patente en 1892, los que establecerían las bases para el desarrollo imparable del hormigón

1. EDUARDO TORROJA AND CONTEMPORARY ENGINEERS

The use of plain Portland cement concrete was already firmly consolidated by the mid-nineteenth century, when the first hesitant experiments with its reinforced version began to appear. Lambot's boat in France and the Wilkinson patent in England were among the earliest attempts. But in Europe at least, French gardener Joseph Monier's 1877 patents are regarded to have paved the way for the development of reinforced concrete. Actually, however, it was German engineers Wayss and Freitag, after acquiring the rights to Monier's patent in 1884, and especially their French colleague Hennebique, whose patent was issued in 1892, who would lay the groundwork for the inexorable development of reinforced concrete

armado en la última década del siglo XIX y su irrupción en el XX.

En la primera década de este siglo aparecen las primeras normas sobre el uso del hormigón armado como material estructural, dando pie con ello a su libre utilización sin tener que pasar por las cerradas patentes, disposiciones constructivas y métodos de cálculo que caracterizaron a sus comienzos. Aunque Hennebique siguió licenciando su patente hasta bien entrada la segunda década del siglo XX, aquello representó que el hormigón armado se convirtiese en el material preferido para una serie de ingenieros que comenzaban su actividad profesional en estos años. Robert Maillart (1872-1940), Emil Mörsch (1872-1950), Eugène Freyssinet (1879-1962), Franz Dischinger (1885-1956), o Pier Luigi Nervi (1891-1970), y me dejó un gran número en el tintero, son ejemplos sobresalientes de esta tendencia. El mundo de la arquitectura, por otra parte, también fue adoptando y adaptando el hormigón a sus concepciones, no solo como material estructural sino también como constituyente de su propia expresividad funcional y estética. Nombres como Auguste Perret, Max Berg, Walter Gropius, Le Corbusier o Frank Lloyd Wright son ejemplos de arquitectos coetáneos con los ingenieros antes mencionados.

En España, es quizás José Eugenio Ribera quien representa mejor la situación comentada. A principios del XX obtuvo una franquicia para el uso del sistema Hennebique, y creó también su propio «Sistema Ribera». Pero la pujanza del hormigón armado en nuestro país se afianzó con la introducción en el plan de estudios de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, en 1911, de la asignatura de Hormigón Armado, a cargo de José Manuel de Zafra, quien publicó unos apuntes de la asignatura, reeditados como libro en 1914. Como curiosidad, en estos apuntes Zafra arremete contra los que proponían métodos de cálculo en rotura, tomando en consideración la plasticidad del acero. ¡Si Zafra levantase la cabeza...!

in the final decade of the nineteenth century and its coming of age in the twentieth.

The publication, in the first decade of the last century, of the earliest standards on the use of reinforced concrete as a structural material freed its use, obviating the need for the closed patents, construction provisions and structural engineering methods that characterized its beginnings. Nonetheless, Hennebique continued to license his patent until well into the second decade of the century, making reinforced concrete the material of preference for a series of engineers who were just beginning their careers at the time. Robert Maillart (1872-1940), Emil Mörsch (1872-1950), Eugène Freyssinet (1879-1962), Franz Dischinger (1885-1956), and Pier Luigi Nervi (1891-1970), to name but a few, are outstanding examples of this trend. The world of architecture, in turn, also began to adopt and adapt concrete to its designs, not only as a structural material but also as a constituent with a functional and aesthetic expression of its own. Architects of the renown of Auguste Perret, Max Berg, Walter Gropius, Le Corbusier and Frank Lloyd Wright were among the contemporaries of the above engineers.

In Spain, the most prominent name in this regard may be José Eugenio Ribera. In the early twentieth century he obtained a franchise to use the Hennebique system, while devising his own “Ribera System”. But the rise of reinforced concrete in our country was consolidated in 1911, with the introduction of the subject “Reinforced concrete” in the curriculum of the Special School of Civil Engineering. The subject was delivered by José Manuel de Zafra, whose printed notes for his students were published in book form in 1914. By way of curiosity, in his notes Zafra levelled some very sharp criticism against ultimate strength design methods based on steel plasticity. Poor Zafra must be rolling over in his grave...

En este contexto, Eduardo Torroja Miret nace en 1899, en una familia de matemáticos y geómetras, ingenieros y físicos. En 1918 ingresa en la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, obteniendo su título en 1923. Estudió hormigón armado con Zafra y puentes con Ribera. Éste último, a la vista de las dotes de su alumno, le ofreció su primer trabajo en la empresa Construcciones Hidráulicas y Civiles, donde hizo sus primeras armas como ingeniero, influenciado, sin duda, por la fuerte personalidad y experiencia de Ribera. A los cuatro años, en 1927, Torroja se independiza de Ribera y comienza su andadura individual.

Se ha incluido muchas veces a Maillart, Freyssinet, Nervi y Torroja como exponentes de ingenieros pioneros de la primera mitad del siglo XX, con trayectorias personales y profesionales comunes, que supieron definir el uso del hormigón estructural, con una gran sensibilidad estética por las posibilidades de este nuevo material de construcción. Pero, en mi opinión, existen importantes diferencias entre ellos.

Maillart se graduó en 1894. Empezó trabajando para un contratista suizo que utilizaba el sistema Hennebique, y pronto pasó a prestar sus servicios en Departamento de Obras de Zurich. En 1902 creó su propia empresa constructora, desde la que realizó sus sorprendentes puentes y forjados sin vigas, siempre en hormigón armado. En 1918, al terminar la Primera Guerra Mundial, cerró su constructora y se estableció como consultor independiente. Siguió, hasta su muerte, sorprendiendo con sus concepciones estructurales, no solamente en puentes, siempre en hormigón armado. Aunque realizó una serie de ensayos muy interesantes sobre sus forjados fungiformes, nunca se dedicó a la investigación ni a la docencia; fue su actividad como proyectista y constructor de excelsas obras de hormigón armado, convertidas en arte de su mano, lo que le llevó a estar presente en toda la literatura sobre la historia de los comienzos de este material.

Freyssinet comienza su actividad profesional en 1905, en una administración local francesa. Desde

Such was the prevailing environment when Eduardo Torroja Miret was born in 1899 into a family of mathematicians and geometricians, engineers and physicists. In 1918 he enrolled in the Special School of Civil Engineering and graduated in 1923. He studied reinforced concrete with Zafra and bridges under Ribera. The latter, in light of his brilliant academic record, offered him his first job with a company called Construcciones Hidráulicas y Civiles, where his first engineering designs were most certainly formulated under the influence of Ribera's strong personality and experience. Four years later, in 1927, Torroja split away from Ribera and began a career on his own.

Maillart, Freyssinet, Nervi and Torroja are often named as early twentieth century engineers who, with similar personal and professional itineraries, divined the aesthetic possibilities of structural concrete and pioneered their implementation. But in my opinion, there are substantial differences between them.

Maillart graduated in 1894. He started to work for a Swiss contractor who used the Hennebique system and very early on took a job with the Zurich Civil Works Department. In 1902 he founded his own construction company, under whose umbrella he designed and built his surprising reinforced concrete solid slab bridges. In 1918, after World War I, he folded his company and set up shop as an independent consultant. He continued to produce surprising structural designs, and not only for bridges, until his death. Although he conducted a series of very interesting trials on mushroom-shaped slabs, he never engaged in research or education; it was his activity as a designer and builder of sublime reinforced concrete structures, which he converted into works of art, that placed his name in the annals of the early history of this material.

Freyssinet began his career in 1905, in a French municipal government. Using concrete from the

el principio utiliza el hormigón, y muy pronto nace en él la idea del pretensado. Ya en 1907 utiliza un tirante pretensado para absorber el empuje horizontal de un arco de ensayo de 50 m de luz. Entre 1914 y 1928 desarrolla su trabajo en una empresa constructora, proyectando y construyendo interesantísimas obras de hormigón armado. A finales de 1928 patenta su sistema de pretensado y en 1929 abandona aquella empresa y se dedica a desarrollar, en solitario, sus procedimientos de hormigón pretensado, aplicados fundamentalmente a postes prefabricados, con poco éxito comercial. En 1933, prácticamente arruinado, consigue un éxito espectacular al lograr salvar de la ruina, utilizando su técnica del pretensado, la recién construida estación marítima de El Havre. Ello le vale el apoyo incondicional de la constructora Campenon-Bernard, en la que sigue desarrollando sus ideas y, en particular, patentando, en 1939, su Sistema Freyssinet, con sus famosas cuñas de anclaje de 12 alambres y su gato de tesado. Freyssinet ya no abandonará esta empresa, que en 1943 crea la S.T.U.P., consultora dedicada, al finalizar la Segunda Guerra Mundial, a la difusión del pretensado y de los procedimientos Freyssinet por todo el mundo. En definitiva, Freyssinet dedicó toda su vida, con un asombroso tesón, a un solo material, el hormigón, y a una idea, el pretensado. Intuyó que el hormigón no era un material elástico e hizo ensayos para determinar sus complejas leyes reológicas, aunque fueron otros los que, finalmente, las definieron. En mi opinión, fue más un agudo observador de la realidad y un inventor genial que un investigador. Nunca se dedicó a la docencia, quizás por falta de tiempo, pero dejó sus ideas plasmadas en multitud de artículos y conferencias, y su nombre quedará siempre unido a la historia del hormigón y, en particular, a la de la técnica del pretensado.

Nervi, por su parte, termina sus estudios en la segunda década del siglo XX. A sus 30 años crea su empresa constructora desde la que desarrolló sus propios conceptos estructurales y constructivos, utilizando el hormigón armado de una forma muy peculiar. Retomando la idea de Lambot de 1853, crea su *ferro-cemento*, con armadura muy fina y dis-

outset, he soon envisioned prestressing as a construction technique. In 1907 he used a prestressed tie to absorb the horizontal thrust of a trial arch with a 50-m span. From 1914 to 1928 he worked for a construction company, designing and building very distinctive reinforced concrete structures. He patented his prestressing system in late 1928 and in 1929 left the company to develop concrete prestressing procedures on his own, essentially for application in precast posts, an idea that met with little commercial success. In 1933, on the verge of bankruptcy, he attained renown for the spectacular rescue of the recently built but sinking harbour station at Le Havre orchestrated with his prestressing system. That earned him the unconditional support of the Campenon-Bernard construction company, where he continued to develop his ideas and, in particular, to patent his Freyssinet System in 1939, with its famous stressing jack and 12-wire anchorages. Freyssinet never left the company, which in 1943 founded S.T.U.P., a consultant firm that after World War II engaged in promoting Freyssinet's prestressing procedures around the world. In short, Freyssinet devoted his entire life, with surprising tenacity, to a single material, concrete, and an idea, prestressing. He realized intuitively that concrete was not an elastic material and whilst he conducted tests to determine its complex rheological laws, these were finally defined by other researchers. In my opinion, he was more a shrewd observer of reality and ingenious inventor than a researcher. He never engaged in teaching, perhaps for lack of time, but he set his ideas down in countless articles and conferences, and his name will always be associated with concrete and, in particular, with prestressing techniques.

Nervi, in turn, earned his degree in the second decade of the twentieth century. He was only 30 when he founded a construction company where he developed his own structural and construction ideas, using reinforced concrete in a very peculiar manner. Revisiting Lambot's 1853 idea, he created ferrocemento, a very thin, dense concrete heav-

tribuida, patentando su *Sistema Nervi*. Utilizó esta patente para prefabricar moldes para encofrados perdidos y elementos estructurales de muy pequeño espesor, con unos acabados extraordinarios. Una parte importante de la fuerza expresiva de sus realizaciones se debe a la calidad que, a través de su propia constructora, imprime a sus obras. Sus famosos encofrados de madera y sus elementos prefabricados de *ferro-cemento* le permiten dejar sus estructuras vistas, tanto al exterior como en espacios interiores, sin necesidad de ornamentación superpuesta, proporcionando al hormigón unas texturas y acabados que hoy nos asombran todavía. Pero no es sólo la calidad de construcción lo que lanzó a Nervi a la fama: sus proyectos son formalmente de una elegancia exquisita, mantenida a través de más de cuarenta años de trabajo, fundamentalmente en el campo de la edificación. Sus tipologías estructurales fueron, sin embargo, relativamente clásicas para su época: forjados nervados, bóvedas y cúpulas, amén de elementos a flexión. No se aventuró en el campo de las láminas cilíndricas ni de las regladas, lo que no le impidió imprimir a sus obras una impronta personalísima que las hace inconfundibles. Nervi utilizó casi exclusivamente el hormigón armado: sobran los dedos de una mano para contabilizar sus obras metálicas o pretensadas, incluso para las grandes dimensiones. Nervi, al igual que Maillart, no se dedicó a la investigación ni a la docencia, pero el estudio de sus obras será siempre un referente imprescindible para entender el desarrollo del hormigón en la primera mitad del siglo XX.

Como ya he indicado, Torroja empieza, en 1923, trabajando en una empresa constructora. No está mucho tiempo en ella, pues, a propuesta del propio Ribera, en 1927 pasa a integrarse, como ingeniero, en el equipo que, bajo la dirección del arquitecto Modesto López Otero, proyecta y dirige las obras de la Ciudad Universitaria de Madrid. Ello le permite crear ese mismo año su propio estudio, con el nombre de «Eduardo Torroja, Oficina Técnica», desde la que a partir de entonces realizará todos sus proyectos. Para Torroja, el hormigón armado es su material predilecto, el que le permite expresar libremente

ily reinforced with evenly distributed steel mesh, which he patented as the Nervi System. He used this patent to precast moulds for permanent formwork and very thin structural members, with extraordinary finishes. His achievements owed much of their expressive power to the quality that he bestowed on the works built by his own company. His famous wooden forms and ferrocemento precast members enabled him to use exposed concrete both in exteriors and interiors, with no need for any type of facing. The texture and finishes on his concrete is astonishing even today. But it was not only the quality of his construction that brought Nervi his fame: rather, it was the exquisite formal elegance of his designs, particularly in building, maintained throughout forty-plus years in the profession. His building typologies, however, were relatively classical for the period: ribbed slabs, vaults and domes, and flexural members. He never ventured into the field of cylindrical shells or folded plates, although this did not prevent him from imbuing his works with a distinctive personality unmistakably bearing his signature. Nervi used reinforced concrete almost exclusively: his steel or prestressed works, even for large-scale structures, can be counted on one hand. Nervi, like Maillart, engaged neither in education or research, but his works will always be an indispensable point of reference to understand the development of reinforced concrete in the first half of the twentieth century.

As noted above, Torroja began to work in a construction company in 1923. He was there for a relatively short time, however: on Ribera's own urging, in 1927 he joined an engineering team that was designing and supervising works on Madrid's university campus under the leadership of Modesto López Otero. That enabled him to set up his own studio that same year, under the name "Eduardo Torroja, Engineering Bureau", from which he would author all his designs from then on. Reinforced concrete was Torroja's favourite material, one that allowed him to freely express his

su sensibilidad estética y, en particular, proyectar sus queridas estructuras laminares, cúpulas, bóvedas, cilíndricas, regladas o absolutamente libres, como el Club Táchira o la Iglesia de Pont de Suert. Pero, a diferencia de los tres ingenieros antes comentados, no rechaza el uso de otros materiales cuando los considera más adecuados. A partir de 1939, utiliza el acero estructural, interesándose por la electrosoldadura; se adentra en las estructuras mixtas de hormigón y acero; y hasta utiliza con frecuencia el ladrillo como material estructural, sin dejar de lado el propio hormigón pretensado. Cuando Torroja, en la primera página de *Razón y Ser* dice, a modo de prólogo, «Cada material tiene una personalidad específica distinta, y cada forma impone un diferente fenómeno tensional», parece que está reflejando su propia experiencia vital como proyectista. Es esta una actitud cuando menos diferenciadora respecto a las de Maillart, Freyssinet o Nervi. Ni mejor ni peor; simplemente, diferente.

Otra diferencia fundamental está en su dedicación a la docencia y a la investigación. Ya en 1934 funda, con otros ingenieros y arquitectos, el Instituto Técnico de la Construcción y Edificación, ITCE, como asociación privada, así como la revista Hormigón y Acero. Algunos datos sobre la creación de este Instituto y de sus estatutos puede verse en (10). Por otra parte, en 1939 es nombrado profesor de la Escuela Especial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, dependiente entonces del Ministerio de Obras Públicas, en la que él mismo había estudiado. Su dedicación a la Escuela fue, desde entonces, muy intensa, llegando a impartir docencia en tres cursos: Resistencia de Materiales y Teoría de Elasticidad, en 2.^º curso; Hormigón Armado en 3.^º, completada con unas bases de Hormigón Pretensado a cargo de Alfredo Páez, y Cálculo de Estructuras en 4.^º, asignatura que impartió Florencio del Pozo cuando Torroja creó la asignatura de Tipología Estructural en 5.^º curso. A esta dedicación a la docencia se sumó, en el año 1941, la dirección del entonces Laboratorio Central de Ensayos de Materiales de Construcción —hoy día Laboratorio de Estructuras del CEDEX, depen-

aesthetic sensitivity and in particular to design his shells - domes, vaults, cylindrical, folded or absolutely free-form structures, such as in the Táchira Club or the Pont de Suert Church. But, unlike the other three engineers mentioned, he did not decline to use other materials when he found them more appropriate. Beginning in 1939, he used structural steel and took an active interest in electric welding; he experimented with mixed concrete and steel structures; and he often used even brick as a structural material, while not neglecting prestressed concrete. When Torroja, on the first page of the book *Razón y Ser* says, by way of preface, "Every material has a different and very specific personality and each shape imposes a different tensional phenomenon", he seems to be referring to his own experience as a designer. This attitude at least distinguishes him from Maillart, Freyssinet and Nervi: neither better nor worse, simply different.

Another essential difference lies in his educational and research activities. As early as 1934 he, with other engineers, founded the Instituto Técnico de la Construcción y Edificación, ITCE (Technical Institute for Construction and Building) as a private association, along with the journal Hormigón y Acero. Facts and figures about the creation of this institute, along with its by-laws, are given in (10). In addition, in 1939 he was appointed professor of the Special School of Civil Engineering, at the time under the aegis of the Ministry of Public Works, from which he himself had graduated. He became intensely involved in the school from that time onward, teaching subjects in three different years: Material strength and Theory of elasticity in 2nd year; Reinforced concrete in 3rd (reinforced by Essentials of prestressed concrete delivered by Alfredo Páez); and Structural engineering in 4th, a subject later taught by Florencio del Pozo when Torroja created the 5th year subject, Structural typology. In addition to all this, beginning in 1941 he assumed the management of what was then the School's Central Laboratory for Construction Materials Testing —today the CEDEX Structures Lab-

diente del Ministerio de Fomento— adscrito a la Escuela. En 1939, el ITCE se integra en el Consejo Superior de Investigaciones Científicas como «centro adherido», manteniendo sus estatutos como asociación privada, pasando a formar parte del Patronato Juan de la Cierva del C.S.I.C. en 1946 y fundiéndose con el Instituto del Cemento en 1949, con el nombre de Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento. Torroja es nombrado director de este centro, y durante unos años se dedica, casi en exclusiva, a promover, proyectar y construir su nueva sede, inaugurada en 1953 en «Costillares», a donde traslada su despacho y su puesto principal de trabajo.

A la terminación de la Segunda Guerra Mundial comienza a generarse el sentimiento de unión europea, y Torroja decide estar presente en este movimiento. Apoyándose en el Laboratorio Central y en el Instituto, así como en su propio prestigio personal ya reconocido en Europa, lleva a la técnica de la construcción española a todos los foros importantes que se generan, o ya existentes, en aquella época. En unos años políticamente difíciles para nuestra aceptación fuera de nuestras fronteras, Torroja es nombrado presidente de la recién creada Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayo de Materiales, RILEM; participa en la fundación del Comité Europeo del Hormigón, CEB, en el que, a pesar de su nombre, se integran Estados Unidos y Rusia; es cofundador y primer presidente de la International Association for Shell Structures, IASS; y sustituye, en 1958, a Freyssinet en la presidencia de la Féderation Internationale de la Precontrainte, FIP, cargo que ocupó hasta su muerte en 1961, fomentando la creación del Comité Mixto FIP-CEB, y, en definitiva, influyendo decisivamente en la orientación de la nueva normativa europea sobre el proyecto y construcción de obras de hormigón armado y pretensado.

Como es lógico, todas estas actividades, docente investigadora y de presencia en foros internacionales, le obligan a reducir su actividad como proyectista, aunque nunca la abandonase. Mi hermano y

oratory, now under the aegis of the Ministry of Internal Development. In 1939 the ITCE joined the Spanish Council for Scientific Research as an “affiliated centre”, maintaining its status as a private association. It was incorporated into the C.S.I.C.’s Juan del la Cierva Trust in 1946 and, after merging with the Cement Institute in 1949, changed its name to the “Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento”. Torroja was designated Director of this centre and for a number of years engaged almost exclusively in developing, designing and building the new headquarters, opened in 1953 at “Costillares”, where he relocated his office and main occupation.

After World War II, Torroja decided to participate in the new trend towards European union. Using the Central Laboratory and the Institute as a springboard, along with his own acknowledged prestige in Europe, he carried Spanish construction techniques to all the important platforms that were created, or existed, at the time. In years when acceptance beyond our borders was politically difficult, Torroja was appointed president of the recently created International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials (RILEM); participated in the founding of the European Committee for Concrete (CEB) whose membership, despite the name, included the United States and Russia; was co-founder and first President of the International Association for Shell Structures, IASS; and replaced Freyssinet in 1958 in the presidency of the Féderation Internationale de la Precontrainte, FIP. He remained in that office until his death in 1961, furthering the creation of the FIP-CEB Joint committee and decisively influencing the new European legislation on reinforced and prestressed concrete design and construction.

All these activities —education, research and presence in international fora— obliged him to cut back on his design activities, although he never gave them up altogether. My brother and I remem-

yo recordamos, a nuestra vuelta, en mayo de 1939, al chalet en el que vivíamos en la Colonia Residencia, junto a la del Viso, una para nosotros gran habitación en el semisótano, en la que mi padre tenía su «Oficina», entonces llena de gente, algunos de ellos alumnos de los últimos cursos de la Escuela. Mi padre estaba casi siempre en casa, trabajando en su despacho en la primera planta, justo debajo de nuestro dormitorio, lo que nos impedía ciertos juegos ruidosos que le molestaban. Y de pronto, hacia el año 1943 o 1944, la Oficina desapareció, y, aunque mi padre siempre comía en casa y volvía del trabajo hacia las seis de la tarde, encerrándose en su despacho, ya no teníamos problemas para nuestros juegos, porque aquella habitación en el semisótano, que ya no nos parecía tan grande, se transformó en nuestro centro de recreo. Mi padre se llevó su «Oficina», muy reducida, a una habitación junto a su despacho en los locales del Instituto. Cuando yo empecé a trabajar en él, a finales de 1959, tenía sólo dos personas fijas —una de ellas trabajando ya con él desde 1930— y un delineante contratado por horas. Cuando yo quería consultar con él alguna duda, se lo decía a su secretaria, y cuando sus obligaciones en el Instituto se lo permitían, me llamaba para exponerle el problema. En general no me contestaba en el momento; seguía dedicado a sus temas y al día siguiente, después de haberlo meditado en casa, me llamaba a primera hora para darme la solución.

El por qué Torroja, reconocido nacional e internacionalmente por sus proyectos y concepciones estructurales ya en 1936, da este golpe de timón a su actividad profesional, es objeto de conjeturas. Es posible que el clima cerrado que se vivía en nuestro país le impulsase a salir al exterior y no perder el contacto con otras culturas más abiertas y con sus amigos ingenieros de allende nuestras fronteras, y que esta nueva actividad le permitiese hacerlo mejor que a través de sus proyectos. Yo creo que también hubo motivaciones más íntimas y profundas. Volviendo a mis recuerdos personales, cuando ingresé en la Escuela de Ingenieros de Caminos, en junio de 1952, mi padre estaba en Argentina, impartiendo

ber - when in 1939 we returned to our home in the "Colonia Residencia" next to the Madrid's "Viso" quarter - what to us seemed like a huge room in the semi-basement, where my father had his "Bureau", full of people at the time, some of them upper year engineering students. Since my father was almost always home, working in his first storey office that was located just under our bedroom, certain noisy games were banned from our childhood, so as not to disturb him. But suddenly, in 1943 or 44, the Bureau disappeared and although my father always came home for dinner, returning to work at around six in the evening, our games were no longer restricted, because the room in the semi-basement, which no longer seemed so large, was turned into a recreation room. My father relocated his much reduced "Bureau" in a room adjacent to his office in the Institute headquarters. When I started to work there, in 1959, he had only two full-time employees —one of whom had been working with him since 1939— plus a draftsman, hired by the hour. When I needed to ask him a question, I would tell his secretary, and when his obligations at the Institute allowed, he would call me in to discuss the problem. He hardly ever replied right away; rather, he was more inclined to carry on with whatever he was doing and, after thinking about it at home, call me to his office early the next morning with the answer.

Why Torroja, nationally and internationally renowned for his designs and structural solutions since 1936, should have made such a radical mid-career change is a matter of conjecture. Perhaps the stifling climate that prevailed in our country at the time drove him abroad so as not to lose contact with other more open societies and his engineer friends outside our borders, and that could be more readily done with this new activity than simply as a designer. I believe there were also deeper personal reasons. Going back to memories of my youth, when I was admitted to the School of Civil Engineering in June 1952, my father was delivering a series of conferences in Argentina. When he heard

un ciclo de conferencias. Al enterarse, me escribió una carta en la que, en un corto párrafo, me felicitaba por mi ingreso, y dedicaba el resto de la carta a decirme que lo que había conseguido no era lo más importante en la vida, que existen muchos valores más profundos y fundamentales que ser ingeniero de Caminos y que nunca me olvidase de que, por encima de ello, estaba yo como persona. Recordando esta carta y releyendo la que dejó a sus colaboradores poco antes de morir, pueden encontrarse algunas pistas. «... No en vano hemos vivido tantos años sintiendo la alegría del trabajo y de la mutua convivencia, verdaderamente identificados con y orgullosos de nuestra organización.» «... Y muy por encima de los resultados técnicos valoro la experiencia realizada en su sentido humano, social y profesional. Ha quedado demostrado que en España era posible crear unas organizaciones en las que exista una perfecta convivencia entre las diferentes profesiones, entre los de arriba y los de abajo; en la que todos se han acostumbrado a vivir una vida de elevado rango humano, de caballerosidad, de respeto y ayuda mutuos, de máxima dignidad personal.» «... Cada cual tiene una misión en la vida y yo la ligué a este ideal que no traicioné.» Sus motivaciones personales, «muy por encima de los resultados técnicos», quedan bien reflejadas en estos párrafos, como en el resto de la carta.

Pero, volviendo a su actividad como ingeniero constructor y proyectista, existen otras diferencias. Sólo se conoce una patente de Torroja, de 1929, sobre un «hormigón adiotérmico». Pero nunca más estuvo interesado en patentar ideas ni en industrializar procesos. Parece como si no quisiese obligarse a utilizar conceptos ya establecidos, aunque los hubiese generado él mismo. Quizá una de las facetas más interesantes de la actividad proyectual de Eduardo Torroja está en su forma de enfrentarse con un nuevo proyecto. Siempre intentó, en primer lugar, buscar una solución nueva que se adaptase mejor que las clásicas a los requisitos funcionales, formales y económicos de cada proyecto, incluyendo en esa búsqueda al material y al proceso constructivo. Cuando no la encontró, utilizó las

the news, he wrote me a letter in which, after one short congratulatory paragraph, he went on to tell me that what I had achieved was not the most important thing in life, that there were many other values much deeper and more essential than being a civil engineer and that I should never forget that, above all, I had to think of myself as a person. Remembering that letter and re-reading the one he wrote to his colleagues shortly before he died provides some clues. "... At the end of the day, what we've had is the satisfaction of so many years of work and mutual harmony, truly identified with and proud of our organization." "... And far more than the technical results, I value the experience in its human, social and professional dimension. We've shown that it's possible in Spain to create organizations where the different professions, the upper and lower echelons, could work together in perfect harmony; where everyone has grown accustomed to living a life on the highest rungs of humanity, where courtesy, mutual respect and support and maximum personal dignity reign." "... Each of us has a mission in life and I linked mine to this idea that I have not betrayed." His personal motivations "far more than the technical results" are reflected in these paragraphs, and in the rest of the letter.

But to return to his activity as engineer, builder and designer, there are other differences. Torroja only took out one known patent, in 1929, for «adiothermal concrete». But he was never interested in patenting ideas or industrializing processes. It was as though he wanted to avoid having to use pre-established concepts, even if he himself had generated them. Perhaps one of the most interesting aspects of Eduardo Torroja's design activity was the way he broached each new project. He always tried, first of all, to seek a new solution that was better adapted than traditional methods to each project's functional, formal and financial requirements, including materials and the construction process in that pursuit. When he found none, he would resort to classical solutions.

soluciones clásicas. Pero cuando la encontró, no se arredró ante las dificultades o problemas que pudiesen derivarse de tal solución, no cejando hasta resolver correctamente aquellas dificultades. Algo sobre este tema comenta en el capítulo XIX de *Razón y Ser* (4). Ello le llevó, al contrario de lo que puede apreciarse en Maillart o en Nervi, a no repetirse a sí mismo más que en muy contadas ocasiones, cuando las condiciones del proyecto eran prácticamente idénticas —los hangares de Torrejón y de Barajas, o los depósitos de Marruecos con capacidades de entre 600 y 1.000 m³—.

De los cuatro ingenieros comentados, Torroja es el que nació más tarde y el que antes murió. Nunca sabremos lo que hubiese hecho si hubiera vivido veinte años más, pero lo antes expuesto constituye mi experiencia personal, derivada fundamentalmente del poco más de año y medio que trabajé con él, sobre su manera de pensar y de entender el ejercicio de la profesión de ingeniero proyectista y constructor de obras. Aunque, en su caso, su nombre haya pasado a la historia del desarrollo del hormigón estructural no solo como ingeniero proyectista sino también como impulsor de la normativa, fundamentalmente europea, de este material en la primera mitad del siglo XX.

2. EDUARDO TORROJA Y EL PRETENSADO

Últimamente se ha escrito bastante sobre Eduardo Torroja y su relación con el pretensado (9). Y, en parte, ello se debe a una sugerencia de Alfredo Páez quien, todavía en vida de Torroja, comentó que, con el Acueducto de Tempul, éste había sido el precursor del pretensado. Torroja siempre lo negó, diciendo que, sin duda, su verdadero inventor fue Eugène Freyssinet, y que lo que él iba buscando en esta obra era otra cosa. Y, leyendo sus escritos (1), yo creo que así fue, aunque ciertos elementos estructurales resultasen realmente pretensados. A aclarar estos conceptos dedico más adelante el comentario específico del Acueducto de Tempul.

But when his search was successful, he was never put off by the difficulties or problems that might stem from his approach and would persist until finding the solution. He discusses this in Chapter XIX of *Razón y Ser* (4). It was an attitude that led him, unlike Maillart or Nervi, to avoid repeating himself except on very rare occasions, when project conditions were practically identical. Though scant, examples include the Torrejón and Barajas hangars, or a series of water towers in Morocco, all with capacities ranging from 600 to 1,000 m³.

Of the four engineers discussed, Torroja was the one who died last and youngest. We shall never know what he might have done had he lived another twenty years. The foregoing is my own recollection, based essentially on the year and a half or so that I worked with him, of the way he viewed and understood the practice of the profession of engineering design and building. Torroja's name, however, has been recorded in the history of the development of structural concrete not only as a designer, but as a driver of legislation, essentially European, for that material in the first half of the twentieth century.

2. EDUARDO TORROJA AND PRESTRESSING

Much has been written of late about Eduardo Torroja and his relationship with prestressed concrete (9). This interest stems in part from a remark made by Alfredo Páez during Torroja's lifetime, to the effect his Tempul Aqueduct was in fact a precursor of the technique. Torroja always denied any such role, sustaining that Eugène Freyssinet had indisputably invented prestressing and that with the Tempul work his own sights were actually trained on something else. And reading his writings (1), I believe that was the case, even though some of the structural members were in fact prestressed. I address the issue in greater detail in my specific comments on the Tempul Aqueduct below.

El hormigón pretensado en Europa se desarrolló realmente a partir de la terminación de la Segunda Guerra Mundial. El invento por Freyssinet de su cuña de anclaje y de sus gatos de tesado en 1939 fue fundamental para el desarrollo industrial de la técnica del hormigón pretensado, pero la guerra estaba ya en sus comienzos. Sin embargo, a partir de principios de la década de los 30 las bases del pretensado y su aplicación al hormigón, tal como los definió Freyssinet, eran ya conocidos. Torroja lo utilizó ya conscientemente en 1939 para el acueducto de Alloz —ver capítulo Acueducto de Alloz/Presa de Canelles—. No disponía de sistema de anclaje ni de puesta en carga de los cables, y tuvo que arreglárselas como pudo, con su conocido esquema estructural que produce solamente flexiones negativas en los tramos, lo que le permitió situar un pretensado recto por la cabeza superior de la sección y poner los cables en carga mediante un ingenioso sistema que, bien mirado, es semejante al que utilizó para poner en carga los tirantes en Tempul.

Pero lo cierto es que pasó bastante tiempo hasta que volvió a utilizar el pretensado. Los sistemas de pretensado bajo patente no entraron en España hasta la década de 1950, y por otra parte, Torroja estuvo interesado en esta época en el desarrollo de las estructuras metálicas electrosoldadas y las estructuras mixtas, proyectando obras interesantes utilizando estos materiales, a pesar de la escasez de acero estructural en nuestro país. Asimismo, como he comentado en la primera parte de esta Introducción, a partir de 1943/44, Torroja reduce mucho la actividad de su estudio de proyectos, y no es hasta 1954/55, con el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento ya consolidado, cuando vuelve a aceptar proyectos interesantes, muchos de ellos utilizando el pretensado. En unas Jornadas que organizó la Universidad Politécnica de Valencia en el año 2002, con el título «Eduardo Torroja. La vigencia de un legado», Pedro Miguel Sosa (2) se refiere, con una visión muy clara, al «diseño vivo» de las estructuras de Torroja, refiriéndose al carácter activo de una serie de proyectos que analiza, la mayoría de ellos posteriores a 1939.

In Europe, prestressed concrete was developed essentially after the end of World War II. Freyssinet's 1939 invention of the anchorage and stressing jack was instrumental to the industrial development of prestressed concrete, but the war had just started. Nonetheless, the grounds for pre-stressing and its application in concrete, as defined by Freyssinet, were well known from the nineteen thirties. Torroja used them quite deliberately in the Alloz Aqueduct in 1939 —see Chapter Aqueduct of Alloz/Canelles Dam. In the absence of an anchor system or scheme to load the steel ropes, he had to make do with what he had, using his characteristic structural scheme that generates only negative bending moments on the spans. This enabled him to position a straight prestressed member across the top of the span and then load the cables by means of an ingenious system which, in the final analysis, is similar to the scheme used to load the ties at Tempul.

But the truth of the matter is that a long time lapsed before he came back to prestressing techniques. Patented prestressing systems did not reach Spain until the 1950s, and besides, Torroja was more interested at the time in the development of electro-welded steel and mixed structures, designing attractive works with these materials despite the post-war paucity of structural steel in our country. Moreover, as I mentioned in the first part of this Introduction, beginning in 1943/44, Torroja severely limited the activity of his design studio and it was only in 1954/55, when the Technical Institute for Construction and Cement was fully consolidated, that he began to accept challenging projects, many of which involved prestressing. During a seminar organized by the Polytechnic University of Valencia in 2002 titled “Eduardo Torroja. The validity of a legacy”, Pedro Miguel Sosa (2) referred, with very clear insight, to the “vivid design” in Torroja’s structures, referring to the vigour in a series of projects he analyzed, most of which were post-1939.

Se ha comentado que Torroja nunca estuvo cómodo con el pretensado, y que no llegó a comprender su esencia y trascendencia (3, 9). Pero su interés por el hormigón pretensado fue siempre entusiasta: en 1954 creó, con otras personas interesadas en el tema, la Asociación Española del Hormigón Pretensado, AEHP, con sede en el Instituto de la Construcción y del Cemento, que luego pasaría a llamarse Asociación Técnica Española del Pretensado, ATEP, y finalmente, en 1988, tras su fusión con el Grupo Español del Hormigón, GEHO, Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural, ACHE. Y, en 1958, como ya he comentado anteriormente, sustituyó al propio Freyssinet en la presidencia de la Fédération Internationale de la Précontrainte.

En mi opinión, Torroja entendió muy bien la importancia del planteamiento genérico del pretensado expuesto por Freyssinet: la introducción de una sistema de tensiones, σ_p , artificialmente creado, permanente en el tiempo e independiente de las acciones exteriores, que, si ha sido bien escogido, al combinarse con el sistema σ_e de tensiones originado por las acciones exteriores, conduzca a un sistema $\sigma_t = \sigma_p + \sigma_e$ adaptado a los requisitos del material o a la intención del proyectista al concebir la estructura. El segundo descubrimiento de Freyssinet fue que si queremos aplicar esta técnica a una estructura de hormigón, precomprimiéndola, la predeformación del elemento en tracción debe ser muy grande, para que la posterior retracción y fluencia del hormigón comprimido represente un porcentaje pequeño de aquella predeformación y pueda cumplirse la condición de permanencia de este pretensado. Y, si queremos utilizar el acero para ese elemento en tracción, dado que su módulo de elasticidad resulta prácticamente constante, debemos hacerle trabajar a tensiones muy elevadas para conseguir aquella gran deformación. Hemos de utilizar, por tanto, como armadura aceros de alta resistencia que, afortunadamente, la industria era ya capaz de proporcionar. Y, en tercer lugar, Freyssinet pedía que, para que el hormigón pudiera considerarse como pretensado, aquel tenía que estar siempre comprimido, para cualquier hipótesis de carga, trabajando siempre en régimen elástico.

It has been sustained that Torroja was never at ease with prestressing and never understood its essence and importance (3), (9). But in fact he was always an enthusiast of the technique: in 1954, he and others interested in the subject founded the Asociación Española del Hormigón Pretensado, AEHP, headquartered at the Construction and Cement Institute; later known as the Asociación Técnica Española del Pretensado, ATEP, after its merger in 1988 with the Grupo Español del Hormigón, GEHO, it finally adopted its present name, Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural, ACHE (Scientific and Technical Association for Structural Concrete). And in 1958, as I noted above, he succeeded Freyssinet himself in the presidency of the Fédération Internationale de la Précontrainte.

I firmly believe that Torroja fully understood the importance of the overall approach to prestressing advanced by Freyssinet: namely, the introduction of an artificially created system of permanent stresses, σ_p , independent of exterior actions which, when combined with the system of stresses generated by exterior actions, σ_e , should—if properly engineered—yield a system $\sigma_t = \sigma_p + \sigma_e$ adapted to the requirements of the material or the designer's intention. Freyssinet's second discovery was that to apply this technique to a concrete structure via pre-compression, the pre-strain on the stressed member must be very large for the subsequent shrinkage and flow in the compressed concrete to represent a small percentage of that strain and ensure the permanence of the prestressed condition. And if steel is to be used in this tensioned member, inasmuch as its modulus of elasticity is practically constant, it must be made to work at very high stress levels to achieve such high strain. Consequently, the process calls for high-strength reinforcing steel which the industry was by then, fortunately, able to provide. Thirdly, Freyssinet sustained that, for concrete to be regarded to be prestressed, it should be continually compressed under any load case, and always work under elastic conditions.

Y es posible que en este último punto, Torroja no estuviese de acuerdo con Freyssinet. Para los cálculos resistentes basados en tensiones admisibles, con el coeficiente de seguridad aplicado solamente a las resistencias de los materiales, que se suponen hookeanos, el requisito de Freyssinet era muy lógico. Permitía, por otra parte, desarrollar todos los cálculos sobre secciones completas en régimen elástico, y no era necesario comprobar fisuraciones. Los que tenemos ya cierta edad, nos acordamos todavía del uso de la norma francesa de hormigón pretensado, a finales de los 50 y principios de los 60, utilizada hasta que aparecieron las propuestas del Comité Mixto FIP-CEB, ya que no hubo instrucción española hasta 1977. Esta norma francesa exigía que la tensión mínima de compresión en la fibra más «traccionada», fuese igual o superior al 8% —o eso recuerdo— de la tensión de compresión máxima; o sea, cumpliendo el requisito de Freyssinet.

Pero Torroja estaba ya interesado en 1944 por el comportamiento «anelástico» del hormigón armado; y en 1946 (5) publica unas reflexiones sobre el coeficiente de seguridad a rotura, todavía no definitivamente planteadas, y que se concretarán más en el documento presentado a la RILEM en 1951, publicado previamente en España en 1950 (6), donde ya aparece la idea de plantear la seguridad frente a diferentes situaciones de la estructura, lo que más tarde se plasmaría en los estados límite de servicio y de agotamiento, intentando, para estos últimos, introducir el comportamiento plástico de acero y hormigón para dar respuesta a las hiperresistencias detectadas en la experimentación respecto a las predicciones deducidas del supuesto elástico para los materiales. Y esto requería considerar el acero plastificado, limitando su deformación más que su tensión, y el hormigón fuertemente fisurado en tracción.

La realidad es que las normativas han ido adoptando estos últimos planteamientos, aceptando incluso situaciones de servicio en las que se admiten tracciones en el hormigón, estableciendo métodos para controlar su fisuración, sin que por ello las construcciones dejen de ser de hormigón pretensado. Un buen ejemplo de ello es nuestra actual instrucción

Torroja may not have agreed with Freyssinet in this last regard. For strength calculations based on allowable stress, with the factor of safety applied only to the materials, and where these are assumed to be Hookean, Freyssinet's requirement was completely logical. Moreover, it made it possible to perform all the calculations on full sections under elastic conditions with no need to account for cracking. Those of us who have now reached a certain age, still remember that in the late nineteen fifties and early sixties, for want of a Spanish code on the subject (until 1977) and until the FIP-CEB Joint Committee's proposals appeared, the French standard on prestressed concrete was used in this country. That French norm required a minimum compression stress on the most highly "tensioned" tendon of 8% —or so I recall— of the maximum compression stress; i.e., just as established by Freyssinet.

But Torroja was interested in the "anelastic" behaviour of reinforced concrete as early as 1944. In 1946 (5) he published a series of reflections on the factor of safety against failure, incompletely developed at the time, which he would explore more thoroughly in a paper submitted to RILEM in 1951. In that article, which had been published in Spain in 1950 (6), he addressed safety from the vantage of different situations affecting the structure. This would later materialize in the concepts of serviceability limit states and fatigue, and the attempt, in the latter, to introduce the plastic behaviour of steel as an explanation for the higher strength values found experimentally than deduced from the assumed elasticity of the materials. And this necessitated considering the steel to be plastified, limiting its strain more than its stress, and the concrete to be severely cracked by the tensile moments.

The fact is that this approach has since been adopted in codes and standards, which even allow service situations in which concrete is subject to tensile forces and establish methods to control cracking, none of which implies that the concrete structures involved are not prestressed. A good example of this can be found in the existing Spanish code for "struc-

EHE-98 de «hormigón estructural», que incluye conjuntamente al hormigón armado y al pretensado. ¿Y esto resta méritos a Freyssinet? En absoluto. Fue su genio, su tesón y su entusiasmo, junto a su gran conocimiento del comportamiento estructural y, en particular, del hormigón, los que le llevaron a definir por primera vez y para siempre el concepto de pretensado y su aplicación al hormigón. Que esas condiciones de aplicación hayan ido cambiando después con el tiempo, cosa que ocurre casi siempre, no tiene importancia. Lo importante son los conceptos, y esos son inmutables.

Sin embargo, yo creo que fue el concepto genérico del pretensado —por otra parte ya utilizado desde la antigüedad— definido por Freyssinet lo que interesó a Torroja, tanto, si no más, que sus ideas sobre el hormigón pretensado. Ya en *Razón y Ser* (4), al hablar de las mallas tesas, comenta que su posibilidad de existencia se debe conceptualmente al pretensado, que permite rigidizar una estructura incompleta, aunque en ellas no haya ningún elemento comprimido, sino al revés. Y en su última presentación a la Real Academia de Ciencias (7), insiste en este tema y en la posibilidad, fascinante para él, de construir mallas tesas, con ciertos apoyos provisionales para generar su forma, que se hormigonarían posteriormente, con muy pequeños espesores y sin encofrados, de tal forma que al retirar los apoyos provisionales se invertiría el trabajo de la malla, pasando a trabajar el hormigón a compresión, con una forma, definida por la malla, que aseguraría la ausencia de flexiones. La realidad es que, hasta hoy, esta idea, que, por otra parte, no era original suya, no se ha desarrollado, quizás por falta de un material más adecuado para ello que el hormigón; pero para un ingeniero como Torroja, tan amante de las estructuras laminares e interesado en buscar formas que trabajasen en estado membrana —véase la cubierta del Club Táchira— la idea era de un atractivo especial. Y de nuevo, esta idea necesita del concepto del pretensado.

Pero volviendo a lo apuntado en el penúltimo párrafo de la primera parte sobre la forma en que Torro-

tural concrete”, EHE-98, which deals with both reinforced and prestressed concrete. But would this detract from Freyssinet’s achievement? Not at all. It was his genius, his persistence and enthusiasm, along with a profound understanding of structural behaviour —of concrete in particular—that led him to define the concept of prestressing and its application to concrete, once and for all. The fact that the conditions governing its application have changed over time, which is something that nearly always happens, is immaterial. The concepts are what matter and these have remained unaltered.

And yet I believe that it was the general concept of prestressing —used, moreover, ever since antiquity— defined by Freyssinet that interested Torroja as much if not more than his ideas on prestressed concrete. In *Razón y Ser* (4), referring to stressed mesh, he notes that, conceptually, its possible existence ensues from prestressing, whereby an incomplete structure can be stiffened even if none of its members are compressed. In fact, the contrary holds. He came back to this subject in his final conference to the Royal Academy of Science (7), and to the possibility, by which he was fascinated, of stressing mesh with certain provisional supports to generate a form. They would later be very thinly concreted with no formwork, so that removing the provisional supports would reverse the moment on the mesh, subjecting the concrete to compression with a shape, defined by the mesh, that would ensure the absence of bending moments. Actually, this idea—which, by the way, was not his originally—has not been developed even today, perhaps for want of a more suitable material than concrete; but for an engineer such as Torroja, so enamoured of thin shells and interested in seeking forms able to work in the membrane state—such as the roof on the Táchira Club—the idea held very special appeal. But this idea is dependent upon the concept of prestressing.

To return to the notion set out in the second-last paragraph of the first part of this introduction,

ja se enfrentaba con un nuevo proyecto, buscando siempre ideas nuevas y tratando de encontrar soluciones a los problemas que estas ideas pudiesen plantear, lo cierto es que utilizó igualmente este planteamiento al enfrentarse con la aplicación del pretensado al hormigón, e incluso al ladrillo.

Con independencia del Acueducto de Alloz, ya comentado, un ejemplo de lo anteriormente expuesto lo constituye el depósito de agua de Fedala, de 1956, en Marruecos. Aunque antes he comentado que no repitió nunca sus formas laminares, hay una constante en todas ellas, posiblemente derivada de su ideario estético: son absolutamente limpias y lisas, sin ningún tipo de nervios como, por ejemplo, los de Nervi. Para absorber las tracciones que la presión hidrostática genera en la cuba de un depósito, haciéndola trabajar a compresión, lo más lógico y común es colocar unos anillos pretensados según los paralelos de la superficie. Pero esto requiere establecer unos nervios según los meridianos, situados lógicamente por fuera de la lámina, por donde sacar al exterior los tendones de pretensado para proceder a su tesado y anclaje. Esta solución no le satisfacía, por lo que aprovechó la forma hiperbólica de la cuba para establecer el pretensado según sus generatrices rectas, sacando los tendones por la parte superior de la pared. Resultado: una cuba hiperbólica absolutamente pura y lisa, sin ningún nervio exterior. Soluciones formal y estructuralmente muy diferentes, aunque derivadas de la misma intención de disponer de una pared de la cuba de un depósito trabajando a compresión en todas direcciones, son los depósitos de Khemisset, Souk el Arba y Sidi Bernoussi, también en Marruecos. Por otra parte, el sistema de pretensado utilizado era convencional, empleando fundamentalmente el procedimiento Barredo.

Otros ejemplos interesantes lo constituyen sus proyectos de depósitos de ladrillo pretensado, éstos nada convencionales, para los que se utiliza la propia presión del agua para poner en carga la armadura circunferencial; o el pretensado de la cuba del Acueducto de Tablellina, que comento específicamente al final de esta parte. En realidad, pienso que las úni-

on the way that Torroja broached each new project, always seeking new ideas and attempting to find solutions to problems that such ideas might raise, he in fact used that approach for applying prestressing not only to concrete, but even to brick.

In addition to the Alloz Aqueduct discussed above, another example of the foregoing is the Fedala Water Tower built in 1956 in Morocco. Whilst earlier I sustained that he never repeated his thin shell forms, they do all have one thing in common, possibly a result of the author's aesthetic ideals: they are absolutely clean and smooth with no ribs, such as are found in Nervi's designs, for instance. To absorb the tension generated by the hydrostatic pressure in a water tower, by subjecting the structure to compression, the most logical and usual solution is to ring it with prestressed ribs parallel to the surface. But this calls for establishing ribs along the meridians, located, naturally, outside the shell, for stretching and anchoring the prestressing tendons on the outside of the structure. He was unsatisfied with this solution and so used the hyperbole shape of the tower to prestress the members along its straight generatrices by stretching the tendons from the top of the wall. The result: a pure and absolutely smooth hyperbole, with not a single outer rib. Although formally and structurally different, the towers at Khemisset, Souk el Arba and Sidi Bernoussi, likewise in Morocco, also responded to the same intention: i.e., to design a tower whose walls are subjected to compression in all directions. The prestressing system used was, moreover, conventional, primarily following the Barredo procedure.

Other interesting examples are to be found in his anything but conventional designs for prestressed brick water towers, in which he used the water pressure itself to load the circumferential reinforcement; or the prestressing in the channel for the Tablellina Aqueduct, which I discuss more specifically below. Actually, I think that the only works he ever

cas de entre sus obras que son convencionales en cuanto al uso del pretensado son la cubierta de las naves de la Universidad Laboral de Tarragona y la Iglesia de San Nicolás en Gandía. En lo que sigue, comento en profundidad solamente dos obras, relacionadas en un sentido o en otro con todo lo expuesto anteriormente: el acueducto de Tempul, por la controversia sobre su posible carácter de precursor del hormigón pretensado, y el de Tablellina, como ejemplo del uso no convencional que Torroja hizo del propio pretensado.

El Puente-Acueducto de Tempul

Uno de los ejemplos más tempranos sobre la forma en que Torroja se enfrentaba a los problemas que planteaban sus concepciones estructurales lo constituye el acueducto de Tempul sobre el río Guadalete. Mucha confianza debía tener José Eugenio Ribera en su alumno cuando, a sus veinticinco años, le encargo el desarrollo del estudio y la ejecución de una variante al proyecto original del acueducto. Este proyecto consistía en catorce vanos de 20,00 m, dos de cuyas pilas se cimentaban en el lecho del río. Ante la dificultad de ejecutar estas cimentaciones, la Propiedad pidió eliminar estas dos pilas, cosa que Torroja hizo sustituyendo los apoyos correspondientes por las componentes verticales de dos tirantes inclinados que pasando sobre las pilas situadas en las márgenes, sobreelevadas, venían a anclarse en los tramos laterales sobre el estribo de la margen derecha y sobre la pila contigua en la izquierda. En el capítulo Acueducto/Cajones de Cimentación de las obras incluidas en este libro figura ésta del Acueducto de Tempul, por lo que envío allí al lector para ver gráficamente lo aquí expuesto.

La obra comenzó en el otoño de 1925 y se entregó en enero de 1927, tras unos dieciséis meses de ejecución. Al terminar la obra, escribió un artículo, que apareció en el número 2.477 de la *Revista de Obras Públicas*, de 15 de mayo de 1927 (1), comentando el proyecto y las conclusiones que había extraído durante su ejecución. Los comentarios que siguen están basados en este artículo, escri-

designed in which the use of prestressing can be said to be conventional are St Nicholas' Church at Gandía and the roof over the bays at the Vocational Training University of Tarragona. In the detailed discussion that follows of two of Torroja's works, I shall focus on aspects related in one way or another with the foregoing: the Tempul Aqueduct, for the controversy around whether or not it was a forerunner of prestressed concrete, and the Tablellina design, as an example of Torroja's non-conventional use of prestressing.

The Tempul Aqueduct and Bridge

One of the earliest examples of the way that Torroja broached the problems arising in his structural designs can be found in the Tempul Aqueduct over the Guadalete River. José Eugenio Ribera must have had a good deal of faith in his twenty five-year-old pupil when he commissioned him to devise and erect a variation on the original design for the aqueduct. This design consisted in fourteen 20.00-m spans, two of whose piers rested on foundations in the riverbed. In light of the difficulty entailed in building such foundations, the Owners asked to have these two piers removed, which Torroja did by replacing the respective supports with the vertical components of two slanted ties that crossed over the raised bankside piers and anchored in the spans, on the right bank at the abutment and on the left at the adjacent pier. The reader will find a graphic illustration of the present description in Chapter The Tempul Aqueduct/Foundation Caissons, on the Tempul Aqueduct.

Work on the aqueduct began in autumn 1925 and was concluded in January 1927, after sixteen months of construction. After it was completed, Torroja wrote an article for issue 2477 of the Revista de Obras Públicas, dated 15 May 1927 (1), in which he discussed the project and the conclusions he had drawn during the construction phase. The following comments are based on that

to, evidentemente, sin ninguna influencia que hubiese podido llegarle posteriormente.

El problema principal con que se encontró para llevar a la práctica la idea de los tirantes fue el cómo materializarlos. La práctica normal en aquella época era la de tirantes de hormigón armado. Se sabía que, para tensiones en el acero del orden de 1.000-1.200 kg/cm², el hormigón era capaz de seguir las deformaciones de las barras lisas utilizadas con una fisuración aceptable. Pero no se fiaba de los empalmes por solape de esas barras, y la soldadura no estaba por entonces suficientemente desarrollada. Por ello pensó en utilizar cables trenzados de acero, que podían transportarse a obra en grandes longitudes, evitando la necesidad de empalmes. Por añadidura, la resistencia de estos cables era bastante mayor que la de las barras lisas, por lo que podían hacerse trabajar a mayores tensiones, requiriendo menores secciones. Y tomó la decisión de utilizar cables trenzados para estos tirantes, que en el artículo indicado llama *tirantes de cable hormigonado*.

Pero esta decisión conllevaba otros problemas. En primer lugar, había que anclar los cables en el hormigón. Este problema lo resolvió utilizando unos cables de mayor longitud que la necesaria, y que entrando por una de las almas del cajón que forma los tramos, dan la vuelta y se prolongan por el alma opuesta, proporcionando una longitud de anclaje de varios metros.

Por otra parte, con las disposiciones adoptadas para el proyecto, la tracción en los cables es del orden de 3.000 kg/cm², que suben hasta unos 3.700 kg/cm² por efecto del viento, según se deduce del artículo citado. Teniendo en cuenta este hecho y la dificultad de colocar los cables perfectamente rectos, ¿sería capaz el hormigón del tirante de seguir a los cables en su deformación? Frente a su desconocimiento sobre este hecho, Torroja decidió poner en carga los cables previamente, mediante la elevación sobre las pilas del vano principal, por medio de unos gatos, de las cabezas que sirven de silla a estos cables. El recorrido vertical de estas cabezas sería el necesario para levantar los extremos de los tramos sobre el cauce, consi-

article, written, obviously, in the absence of any possible subsequent influence.

The primary problem he encountered to implement the idea of the ties was how to build them. Normal practice at the time was to use reinforced concrete ties. It was known that when the smooth steel reinforcing bars used at the time were stressed on the order of 1000/1200 kg/cm², the concrete could accommodate the strain with an acceptable degree of cracking. But Torroja felt that lap splicing the bars was not a reliable solution, nor was welding sufficiently advanced at the time. He therefore decided to use twisted steel cables that could be shipped to the worksite in their full length, on drums, thereby obviating the need for splicing. Moreover, as these cables were substantially stronger than smooth bars, they could be subjected to higher stress with smaller cross-sections. He therefore decided to use twisted cables for what in the above article he called "concreted cable ties".

But this decision entailed other problems. Firstly, the ties had to be anchored in the concrete. This problem was solved by using cables longer than necessary which, after penetrating one of the webs of the hollow box girder, curved around and extended into the other, providing for an anchor several meters long.

Moreover, with the provisions adopted in the design, the tensile stress on the cables was on the order of 3,000 kg/cm², which wind action, according to the article cited, might bring to around 3,700 kg/cm². Bearing this in mind, along with the difficulty of running the cables perfectly straight, the question was: would the concrete in the tie be able to accommodate the strain on the cables? In view of his uncertainty in this regard, Torroja decided to load the cables in advance, using hydraulic jacks to raise the seatings on which they rested at the top of the piers that supported the main span of the aqueduct. Lifting the seating in this manner sufficed to draw the cables taut, which in turn slightly raised

guiendo así descimbrarlos directamente, simplificando extraordinariamente la retirada de las cimbras.

the overhanging spans, separating the concrete from the centring and greatly simplifying its removal.

Es interesante resaltar, a los efectos que me interesan en este comentario, que esta puesta en carga previa de los cables no representa ningún pretensado: la estructura resultante, en particular la compresión de los tramos entre tirantes, es absolutamente pasiva. Para comprobarlo, analicemos las dos figuras siguientes.

I would stress, for the intents and purposes of this discussion, that this prior loading of the cables by no means involves prestressing: the resulting structure, and in particular the compression on the spans between the ties, is not prestressed as the following two figures show.

En la figura 1 he representado la solución de elevación de las cabezas de las pilas. Hay que tener en cuenta que los dos tramos atirantados equilibran su compresión H a través de una articulación dispuesta en la cabeza inferior de los cajones, apoyados a su vez independientemente sobre las pilas en C (ver capítulo XX). Por simplicidad, he supuesto que esta articulación está centrada en los tramos, y que la carga P en el extremo B correspondiente al estribo es igual, al disponer del contrapeso necesario, a la carga P en el extremo D, que incluye el peso del vano central apoyado en este extremo. En estas condiciones, la elevación Dh de la cabeza A sobre la pila representa un alargamiento de los cables de Dl , que tendrá que ser el necesario para producir una tracción T cuya componente vertical V sea igual a P .

In Figure 1 I have represented the solution for raising the seatings on the piers. Bear in mind that the two tied sections balance their compression, H , by means of a hinge positioned on the lower chord of the box girders, which themselves rest on the piers at C (see Chapter XX). For the sake of simplicity, I have assumed that this hinge is centred in the sections and that because load P at end B corresponding to the abutment has the necessary counterweight, it is equal to load P at end D, which includes the weight of the centre span that rests on this side. Under these circumstances, the increase in the height Dh of seating A on the pier lengthens the cables by Dl , which must be sufficient to generate a tensile moment T whose vertical component is equal to P .

Por otra parte, la figura 2 representa otra posible forma de construcción, que es la típica de la «contraflecha» cuando queremos que la geometría de la estructura, una vez descimbrada y deformada, sea la adecuada. Bastaría construir los tramos con una «contraflecha» igual al Dh antes indicado para que al descimbrar los tramos, mediante cajas de arena, por ejemplo, se produzca en los cables el mismo Dl y quede la estructura en la misma situación anterior. Aquí no hemos introducido ninguna puesta en carga previa de los cables.

Figure 2, in turn, represents another possible form of construction, the typical “camber” used to achieve the appropriate geometry in the de-centred and strained structure. It would suffice to build the sections with a “camber” equal to Dh so that, when the centring is removed from the sections —by unplugging the sand boxes for instance— the cables are stretched by the same Dl and the structure reaches the same status as described above. Here we have made no provision for prior loading of the cables.

No sé si Torroja pensó en esta segunda solución. Pero, si lo hizo, debió descartarla en seguida, al menos por dos razones:

I have no way of knowing whether this second solution occurred to Torroja. But if it did, he must have rejected it immediately, for at least two reasons:

- La primera es que el proceso constructivo es mucho más complejo.

- first, the construction process is much more complex.

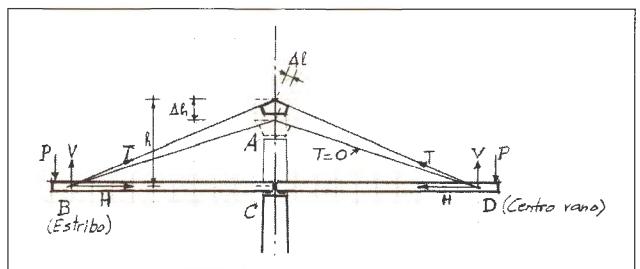


Fig. 1

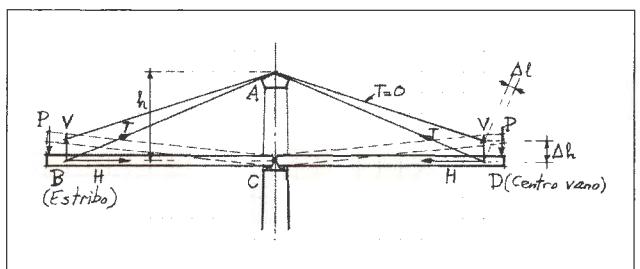


Fig. 2

— La segunda estriba en el hecho de que, para que esta solución conduzca al resultado apetecido, es necesario conocer previamente la deformabilidad de los cables, tan diferentes de nuestros modernos y predecibles cables de pretensado, para fijar correctamente el valor de la contraflecha Dh. Y este dato es precisamente el que Torroja no conocía, y el que, de alguna forma, como luego comentaré, le interesaba comprobar.

De hecho, en la realidad este alargamiento resultó ser muy superior al que cabía esperar en función de la tensión a que quedaron sometidos los cables, que debía ser del orden del 0,15%, pues alcanzó el 1%. Torroja comenta, en el artículo indicado, que éste fue un «... alargamiento nada exagerado si se tiene en cuenta que los cables en la posición inicial estaban simplemente apoyados sin tensión ninguna y difícilmente alineados».

Pero, en cualquier caso, la estructura resultante es pasiva. Basta comprobar que si se suponen nulas todas las acciones exteriores, incluidos los pesos propios —o sea, $P = 0$ —, ambos procesos constructivos representan que la estructura descargada quedaría en la posición indicada en la figura 2 con contraflecha, sin tracciones en los cables ni compresiones en los tramos. Si Torroja hubiese dejado los tirantes como cables sin hormigón, al estilo de nuestros modernos puentes atirantados, la operación de elevación de la cabeza de las pilas no hubiera introducido ningún pretensado, dada la isostática de los tramos atirantados.

Pero Torroja hizo algo más. Dado que disponía fácilmente de la posibilidad de sobrecargar los tramos mediante el llenado del tubo de la conducción soportada por este puente-acueducto, que representaba del orden de 600 kg/m, hizo lo siguiente, según el artículo comentado:

Después de descimbrado y sobrecargado el tramo, se retiró la cimbra y se esperó veinte días, observando durante este período las deformaciones plásticas de los cables, que se amortiguaron completamente al cabo de diez días y que alcanzaron en total al 0,08%. Des-

— *second, for this solution to lead to the desired result, the deformability of the cables would have to be determined so as to correctly establish the value of the camber, Dh: quite an order for cables so very different from the predictable prestressing cables in use today. And this is precisely what Torroja did not know and which, as I will discuss below, he wanted to verify.*

In fact, the elongation proved to be much greater —1%— than would have been expected based on the tensile stress to which the cables were subjected, which must have been on the order of 0.15%. Torroja noted in his paper that this elongation was “... not inordinate, bearing in mind that the cables, in the initial position, were simply supported, with no stress whatsoever, and barely aligned”.

But in any event, the resulting structure is not pre-stressed. For proof, suffice it to note that if all external actions, including self weight, are assumed to be nil —i.e., $P = 0$ —, both construction processes must ultimately adopt the cambered position shown in Figure 2, with no tensile force on the cables or compression on the spans. If Torroja had left the ties as bare cables with no concrete cover such as in our modern cable-stayed bridges, the operation of raising the top of the piers would not have caused pre-tensioning, given the statically determinate nature of the sections.

But Torroja did more than that. Since he could readily load the sections by filling the pipe housed in this bridge-aqueduct to values on the order of 600 kg/m, he proceeded as follows, according to the article cited:

“For twenty days after the centring was removed and withdrawn and the spans were fully loaded, we monitored the plastic strain on the cables, which was fully attenuated after ten days, reaching a total of 0.08 per cent. Thereafter, the space

pués de esto, se hormigonó por partes los huecos que quedaban entre las pilas y sus cabezas, retirándose los gatos, y se vertió lechada por los pozos en que quedaban alojadas las barras verticales de la armadura.

Inmediatamente se procedió al hormigonado de los cables... Para mayor seguridad se dejaron dos juntas próximas a los extremos del tirante y se hormigonaron después de quince días...

Y el resultado de esta última operación sí que representa un pretensado. Basta con comprobar que si, sobre cualquiera de las figuras 1 ó 2, se suponen nulas todas las acciones exteriores — $P = 0$ —, los cables no pueden ahora recuperar su alargamiento, quedando éstos en tracción y el hormigón de los tirantes en compresión, desde luego con resultante exterior nula. Se comprueba también que los tramos no quedan comprimidos: los únicos elementos pretensados son los tirantes. El resto de los elementos estructurales se comportan de forma pasiva, incluidas las pilas.

Que Torroja fue muy consciente de esta situación de los «cables hormigonados» lo demuestra el siguiente párrafo:

Como al descargar la tubería (única diferencia posible de sobrecarga en esta obra) la tensión en el tirante baja de 100 a 80 t, y esta diferencia la absorbe el hormigón en forma de compresión, y siendo la sección del tirante $0,20 \times 0,25$ m, resulta una carga de 40 kg/cm^2 . A primera vista, en una pieza tan larga y estrecha, esta compresión parece suficiente para producir el pandeo, pero en seguida se comprende que no hay peligro ninguno por este lado desde el momento en que el esfuerzo total de la pieza es siempre de tensión.

Toda una lección de «pretensado». Pero no intentó generalizar lo que había obtenido, ni inventó por ello el concepto de pretensado ni el hormigón pretensado. Creo que era totalmente sincero al reconocer que su inventor fue Freyssinet, y que en Tempul él iba buscando otra cosa. Y creo que esa «otra cosa» se refería a la posibilidad de hacer trabajar conjuntamente los

between the top of the piers and the seating of the cables was concreted, the jacks were removed and grout was poured into the holes housing the vertical reinforcing bars.”

“The cables themselves were immediately encased in concrete... For greater assurance, two joints were left at the ends of the tie that were concreted fifteen days later...”

And prestressing was indeed achieved as a result of this last operation. As proof, suffice it to note that if, for either Figure 1 or 2, all the external actions are assumed to be nil — $P = 0$ —, the cables cannot recover from their elongation, being subjected to tensile force and the concrete in the ties is to compression, with a nil exterior resultant, certainly. It will likewise be noted that the spans are not compressed: the only prestressed elements are the ties. All other structural members, the piers included, behave as non-prestressed elements.

Torroja was clearly aware of this situation in respect of the “concreted cables”, as the following paragraph shows:

“Since when the pipe was emptied (only possible source of live load difference in this structure), the stress on the tie declined from 100 to 80 t, a difference that was absorbed by the concrete as compressive stress; since the tie section was 0.20×0.25 m, the resulting load was 40 kg/cm^2 . At first glance, such compression would appear to be sufficient to cause buckling in such a slender member, but in fact there is no danger in that regard inasmuch as all the stress on the member is tensile.”

“Prestressing”, in a nutshell. But he never tried to generalize on his findings, nor did he invent the concept of prestressing or prestressed concrete. I believe he was totally sincere when he acknowledge Freyssinet to be the inventor, since at Tempul he was pursuing something else. And I believe that “something else” was the possibility of making the cables and the con-

cables y el hormigón de forma «elástica» después de la puesta en carga previa de estos cables. En el primer párrafo del artículo de la ROP indicado, Torroja justifica el interés de esta obra diciendo que ..., considero interesante dar a conocer algunas de sus características por los datos obtenidos sobre el comportamiento elástico del hormigón armado con cables de acero. Y en otro párrafo comenta: Al sobrecargar el tramo con 600 kg por metro lineal se acusó un descenso de 0,020 m, de donde resulta un coeficiente de elasticidad del cable de 2.100.000 kg/cm², cifra muy importante, pues señala la posibilidad de que el hormigón siga elásticamente al cable en sus deformaciones, una vez tensado y bien empotrado en sus extremos. Parece querer decir que con la puesta en carga previa de los cables y el posterior hormigonado de los tirantes, el «cable hormigonado» se comporta tan «elásticamente» —comportamiento que en aquel tiempo se consideraba el correcto para este material— como el hormigón armado, y podía ser utilizado como tal, al menos con incrementos de tensión no muy importantes. Pero no comentó nada sobre el hecho, que el mismo había analizado, de que pudiese considerarse el hormigón de un tirante como resistente a tracción, o que la deformabilidad de su tirante estuviese controlada por la descompresión del hormigón en lugar de estarlo por el alargamiento del cable. Ni nada comentó sobre la influencia de las deformaciones diferidas del hormigón, no conocidas por él en aquella época; y que, por otra parte, tienen una incidencia mínima en el comportamiento de esta estructura, dada su isostática genérica.

Torroja no inventó el pretensado, ni fue consciente, en su momento, de ser un precursor. Pero, como he comentado en alguna ocasión, construyó, sin intentarlo, una de las primeras obras pretensadas, quizá la segunda, en el sentido moderno de esta técnica: armadura formada por cables de alta resistencia puestos en carga a tensiones elevadas —para su época— previamente al hormigonado del elemento.

El Acueducto de Tablellina

El segundo ejemplo sobre la postura de Torroja al enfrentarse con un nuevo proyecto, buscando

crete work together “elastically”, after the cables had been loaded. In the first paragraph of the article from which we have quoted so extensively, Torroja justifies the relevance of this work sustaining that «... I find it of interest to publish some of its characteristics for the data obtained on the elastic behaviour of concrete reinforced with steel cables». And in another paragraph he adds: “By overloading the spans with 600 kg per linear metre, a dip of 0.20 m was measured, from which it may be inferred that the elasticity of the cable was 2,100,000 kg/cm², quite a large figure, indicating the possibility that the concrete may accommodate the elastic strain on the cable, once tightened and restrained at both ends.” He seems to be saying that with the prior loading of the cables and subsequent concreting of the ties, the “concreted cable” behaves as “elastically”—which at the time was regarded to be the right behaviour for this material—as the reinforced concrete, and could be used as such, at least for reasonably small increments in stress. But he made no reference to the finding that he himself had analyzed, to the effect that the concrete in a tie could be regarded to be tensile-resistant, or that the deformability of this tie might be controlled by decompression of the concrete rather than by elongation of the cable. Nor did he discuss the effect of the deferred strain on the concrete, which he could not quantify at the time; and which, moreover, would have only a minimal effect on the behaviour of this structure, given its overall statically indeterminate nature.

Torroja did not invent prestressing, nor was he aware, at the time, of being a precursor. But as I have said elsewhere on occasion, without intending to, he did build one of the first prestressed works, perhaps the second, in the modern sense of the term: high-strength cable reinforcement loaded to what for the time was high stress values, prior to concreting the member.

The Tablellina Aqueduct

A second example of Torroja’s consistent pursuit of a solution better than the conventional

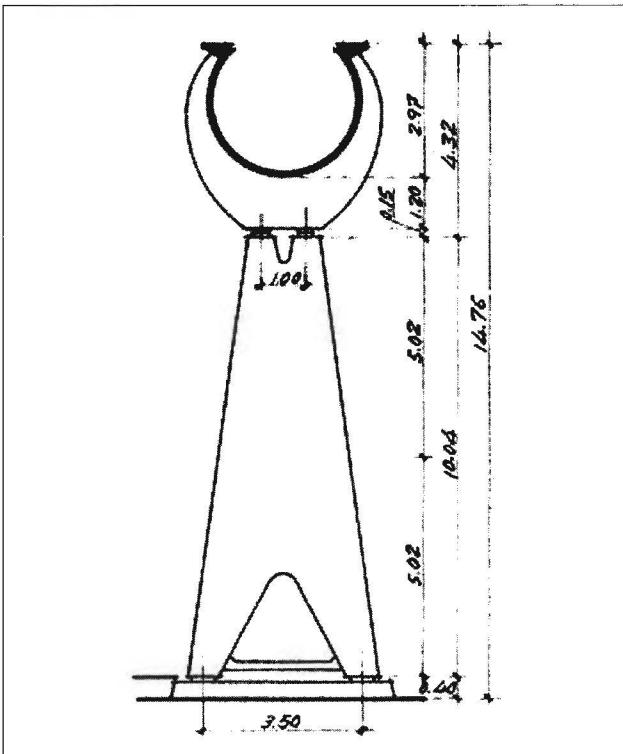


Fig. 3

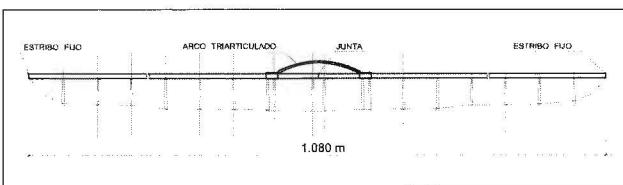


Fig. 4

siempre una solución mejor que la clásica, esta vez en relación con el pretensado, lo constituye el proyecto, no construido, del Acueducto de Tablellina, de 1956. Se trata de un acueducto de unos 1.100 m de longitud. La solución adoptada para Alloz conducía a un número importante de juntas, lo cual siempre es un problema de mantenimiento en un acueducto, en particular si éste es muy largo. Por ello decidió, en primer lugar, disponer el acueducto según dos vigas continuas de sección laminar circular (figura 3), rígidamente empotradas en los dos estribos extremos, con una única junta situada aproximadamente en su centro (figura 4).

La segunda idea fue la de pretensar la cuba del acueducto, tanto longitudinal como transversalmente, para mantenerla comprimida y sin fisuras. El pretensado transversal se estableció mediante tensores de rosca situados en las cabezas superiores de la sección, como en Alloz.

La idea original sobre la precompresión longitudinal de la cuba fue la de utilizar el empuje horizontal de un arco triarticulado (figura 4), situado simétricamente sobre la junta central, para conseguir este efecto. La solución convencional, ya introducida en nuestro país, hubiera sido la de pretensar las dos mitades del acueducto con armadura postesada recta, dada la forma de la sección, aproximadamente centrada en la misma. Pero el coste de este pretensado resulta constante por metro de acueducto y es, por tanto, proporcional a su longitud, mientras que el coste del arco es constante e independiente de ella. Así, para acueductos cortos el pretensado convencional es más económico, mientras que para los largos lo es el arco.

Pero esta solución presenta un problema grave, que no tiene el pretensado convencional, derivado de la retracción y de la fluencia del hormigón. En el caso del hormigón pretensado convencional, bastaría con aplicar una fuerza inicial de tesado del orden de un 10% superior a la final requerida —la tensión media de compresión, en este caso, es baja, del orden de los 45 kg/cm^2 — para conseguir estabilizar, al cabo de

approach when taking on a new project, with regard to prestressing in this case, is a design dating from 1956 for the Tablellina Aqueduct, a 1,100-m long structure that was never built. A large number of joints, such as in the solution adopted at Alloz, represents a maintenance problem for any aqueduct, but particularly when they are very long. For that reason he decided firstly to design the aqueduct as two continuous hollow circular section beams (Figure 3) connected by a single joint approximately in the centre and fixed-ended into abutments at either extreme of the aqueduct (Figure 4).

The second idea was to prestress the aqueduct channel both longitudinally and transversally to keep it compressed and crack-free. Like in Alloz, transverse prestressing was achieved with threaded tie rods fitted across the top of the channel and tightened with turnbuckles.

The original idea for longitudinally precompressing the channel was to use the horizontal thrust of a three-hinged arch (Figure 4). Given the shape of the channel, the conventional solution, by then introduced in our country, would have been to prestress the two halves of the aqueduct with straight post-tensioned reinforcement, approximately along the centre. The cost of this prestressing is constant per metre of aqueduct and therefore proportional to its length, whereas the cost of an arch is constant and independent of length. Therefore, for short aqueducts the conventional prestressing formula is more cost-effective, whilst arches make better economic sense in long ones.

But inherent in this solution is a serious problem absent in conventional prestressing, deriving from concrete shrinkage and creep. In conventional prestressed concrete, it would suffice to design for an initial tensile force on the order of 10% higher than the final force required —the mean compression stress in this case is low, on the order of 45 kg/cm^2 — to stabilize the value of the force required after a few years.

algunos años, el valor de la fuerza requerida. Pero la solución del arco es muy diferente, como se comprueba analizando la figura 5. Esta figura esta basada en las disposiciones del proyecto, en el que se establece un arco de $L = 40,00$ m de luz con una flecha de 5,00 m. Admitiendo un coeficiente de fluencia de 3, el acortamiento total del acueducto por retracción y fluencia es del orden de 0,90 m, y conduce, por tanto, a un incremento de la luz del arco hasta $L = 40,90$ m. Y ello representa, a su vez, que su flecha disminuye hasta 2,608 m en lugar de los 5,00 m iniciales, y, en consecuencia, que el empuje H aproximadamente se duplica. Este proceso de incremento progresivo del empuje conlleva un aumento también progresivo de la fluencia, que conduce indefectiblemente al hundimiento del arco. Basta comprobar que, si admitimos que a empuje doble la deformación del acueducto es también el doble, la luz del arco tendría que ser de $L = 41,80$ m, lo cual es imposible, ya que al llegar esta luz a 41,23 m —el doble de la cuerda del semiarco—, la flecha se anula, invirtiéndose el trabajo del arco, sin tener en cuenta que, antes de llegar a esta situación, el arco se habría agotado.

En principio, aparecen dos soluciones posibles a este problema. Una consiste en disponer un arco muy peraltado. Por ejemplo, con una flecha de 12,00 m, se comprueba que el incremento de empuje al aumentar la luz en 0,90 m es solamente del 11%, y se llega a una situación estable. Pero ello requiere un peso del arco mucho mayor, y supone una complejidad constructiva y una incidencia sobre el paisaje también mayores. Otra solución consiste en proceder a sucesivas aperturas de clave para ir compensando estos incrementos de luz. Pero esta apertura no podría realizarse en una única operación. Sería necesario definir una flecha máxima, para evitar compresiones longitudinales excesivamente pequeñas, y otra mínima, para evitar las excesivamente grandes; y, a partir de estos datos, proceder a una auscultación periódica del acueducto para ir controlando su acortamiento e ir haciendo las aperturas de clave pertinentes. Y todo esto a lo largo de un número de años adecuado. Algo no muy atractivo para la sociedad propietaria del acueducto.

But the arch solution differs greatly in this regard, as an analysis of Figure 5 shows. This figure is based on the design provisions, which called for an arch with a span of $L = 40.00$ m and a rise of 5.00 m. Assuming a creep factor of 3, the total shortening of the aqueduct due to shrinkage and creep would be on the order of 0.90 m, leading, therefore, to an increase in the arch span to $L = 40.90$ m. This in turn means that its height declines to 2.608 m from the initial 5.00 m and therefore that the thrust H is approximately double the original value. This gradual increase in thrust leads to a likewise gradual rise in creep and that, in turn, inescapably to collapse of the arch. Suffice it to note in this regard that, acknowledging that under twice the thrust the strain on the aqueduct also doubles, the span would have to measure 41.80 m. That, however, is impossible, since the rise disappears, inverting the load on the arch, when the span reaches a length equal to double the chord of the semi-arch, in this case, 41.23 m. And in any event, before such a situation could arise, the arch would yield.

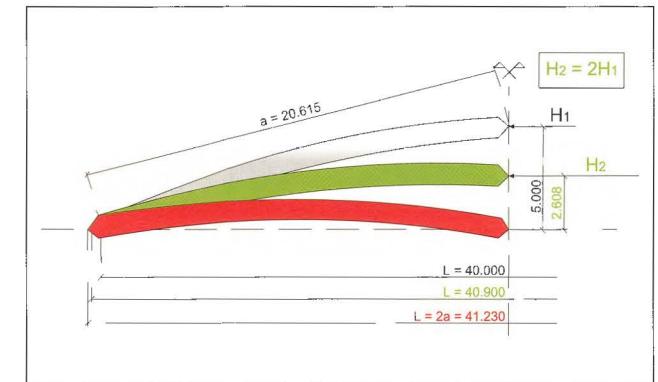


Fig. 5.

There are two possible solutions to this problem, in principle. One consists of designing a highly cambered arch. For instance, with a rise of 12.00 m, the increase in the thrust when the span grows by 0.90 m is found to be 11%, and stability is eventually reached. But the arch in this case is much heavier, construction is more complex and the impact on the surroundings is much greater. The other solution consists in successively opening the crown to accommodate such increases in the span. But such openings could not be made in a single operation. A maximum rise would have to be defined to avoid excessively small longitudinal compression, and a minimum height would likewise have to be determined to avoid overly large values; and based on all these data, the aqueduct would have to be periodically sounded to monitor for shortening and the crown opened accordingly. And all this would have to be done for a suitable number of years. Needless to say, such a prospect would hardly have been appealing to the company that owned the aqueduct.

En esta situación, Torroja se planteó la posibilidad de eliminar el problema, diseñando un arco triarticulado que mantuviese constante el empuje con independencia la variación de su luz. Y se le ocurrió la solución mostrada en la figura 6, que pasa por sustituir la rótula clásica de clave por el punto C de contacto horizontal entre dos superficies curvas de apoyo entre los dos semiarcos, de tal forma que, al aumentar o disminuir su luz, el punto de contacto entre esas curvas, que define la situación del empuje H en clave, suba o baje para mantener H constante. Se puede demostrar que esa curva es un círculo cuyo radio queda definido por la intersección de la recta horizontal O₁C que proporciona la flecha inicial deseada —en este caso, 5,00 m— con la normal a la recta que une el centro de gravedad del semiarco con su rótula de arranque.

Los datos de la figura 6 están tomados del proyecto original, aunque muy exagerados en cuanto al incremento de la luz por retracción y fluencia, que se ha supuesto de 2,00 m, aunque el real es del orden de 0,90 m, para ver mejor su comportamiento. En gris está representado el arco en su posición inicial, con L = 40,00 m y el punto de contacto C entre los dos semiarcos a una altura f = 5,00 m. En rojo lo está con la luz incrementada hasta 42,00 m, y puede comprobarse que aquel punto de contacto ha subido hasta una altura f = 5,276 m, aunque el punto C inicial ha bajado casi 4,00 m. Naturalmente, para un incremento de la luz de 0,90 m estos movimientos son mucho más pequeños. Y, lo más importante, el empuje horizontal H₂ se mantiene constante e igual a H₁. Esto quiere decir que los dos tramos de acueducto, a ambos lados de la junta central, se comportan como si fuesen dos grandes columnas, sin peso propio, sometidas a una fuerza vertical V = H fija en su punta; o, lo que es lo mismo, a un pretensado axial a carga constante cualquiera que sea su deformación.

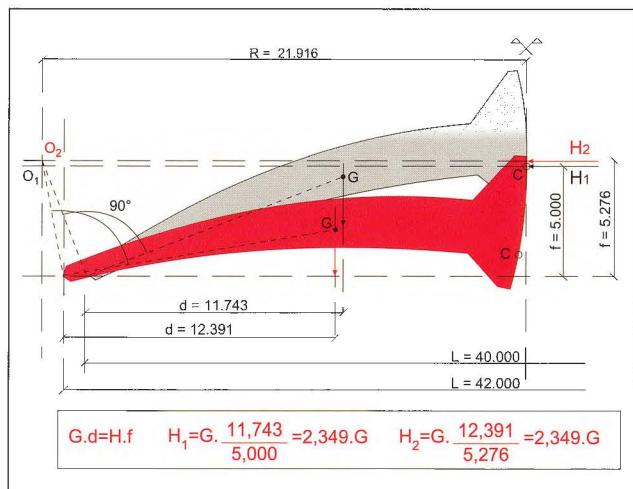


Fig. 6

In light of this situation, Torroja decided to eliminate the problem by designing a three-hinged arch that could maintain a constant thrust regardless of variations in its span. And he thus devised the solution shown in Figure 6, which entails replacing the classic crown hinge with C, or the point where the two semi-arches —two supporting curved surfaces— meet. When the span is shortened or lengthened, then, this point, which defines the thrust at the crown, H, moves upward or downward to keep H constant. That curve can be proven to be a circle whose radius is defined by the intersection between the horizontal line O₁C that provides the initial rise sought —in this case, 5.00 m— and the line normal to the line running from the centre of gravity of the semi-arch to its springing line.

The data for Figure 6 are taken from the original design, although greatly exaggerated to make the behaviour of the structure more visible: the increase in span due to shrinkage and creep is assumed here to be 2.00 m, whereas the actual figure is on the order of 0.90 m. The arch is shown in its original position in grey, with L = 40.00 m and contact point C between the two semi-arches at a height of h = 5.00 m. The red sketch shows the arch after its span grows to 42.00 m, and the point of contact rises to h = 5.276 m, although the initial point C has slid to almost h = 4.00 m! For a span increase of 0.90 m, the distances involved are naturally much smaller. But most importantly, horizontal thrust H₂ is constant and equal to H₁. This means that the two spans of the aqueduct, running from the central joint, behave like two large columns with no self-weight, subjected to a constant vertical force V = H from the top; or, to put it another way, to axial prestressing under a load that remains constant, regardless of the strain.

Esta comparación con una columna sirve también para comprobar que el acueducto puede pandear, cosa que no ocurre con el pretensado convencional. Este problema se resolvió con la forma adoptada para las pilas, como se muestra en la figura 3. La pila for-

This comparison to a column also serves to verify that, contrary to conventional prestressing, in this case the aqueduct may buckle. This problem was solved by adapting the shape of the piers, as shown in Figure 3. The pier forms a pendulum with the

ma un péndulo a través de las articulaciones dispuestas en su cabeza y en su base, permitiendo los movimientos longitudinales del acueducto, pero evitando los movimientos transversales al aumentar hacia la base la distancia entre las dos rótulas de apoyo.

Este libro, que muestra las obras y proyectos de Eduardo Torroja, está editado por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, precisamente el centro de investigación que, en cierto modo, «retiró» a Torroja de su actividad como proyectista. Creo que ello representa un homenaje hacia la persona que dedicó veinte años de su vida y de sus desvelos a que este centro llegase a ser lo que es. O, al menos, yo así lo entiendo y, por ello, lo agradezco.

hinges at the top and base, allowing for longitudinal movements of the aqueduct, but preventing transverse movements, inasmuch as the distance between the two supporting hinges increases from the top down.

This compendium of all of Eduardo Torroja's works and designs is published by the Eduardo Torroja Institute for Construction Science, precisely the research centre that, in a way, meant Torroja's "retirement" from engineering design. I take it as a tribute to the person who devoted over twenty years of his life and many a sleepless night to making the centre what it has become. And for that I am most grateful.

JOSÉ ANTONIO TORROJA CAVANILLAS

BIBLIOGRAFÍA / REFERENCES

- (1) Eduardo Torroja, «Acueducto-sifón sobre el río Guadalete», *Revista de Obras Públicas*, núm. 2.477, 5 de mayo de 1927.
- (2) Pedro Miguel Sosa, «El diseño vivo de las estructuras de Eduardo Torroja», *Eduardo Torroja. La vigencia de un legado*, Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- (3) José Ramón Navarro Vera, «Eduardo Torroja, la arquitectura y los arquitectos», *Eduardo Torroja. La vigencia de un legado*, Universidad Politécnica de Valencia, 2002.
- (4) Eduardo Torroja, *Razón y Ser de los tipos estructurales*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1998.
- (5) Eduardo Torroja, «Coeficientes de seguridad en la comprobación de secciones de hormigón armado», publicado en 1946, *Eduardo Torroja. Su obra científica*, Asociación de Miembros del Instituto Eduardo Torroja, AMIET, y Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, 1999.
- (6) Eduardo Torroja, «Sobre el coeficiente de seguridad en las construcciones de hormigón armado», publicado en 1950, *Eduardo Torroja. Su obra científica*, Asociación de Miembros del Instituto Eduardo Torroja, AMIET, y Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, 1999.
- (7) Eduardo Torroja, «La evolución de las formas estructurales, en relación con sus materiales, a lo largo de la historia de la construcción», presentado en la Real Academia de Ciencias en 1961, *Eduardo Torroja. Su obra científica*, Asociación de Miembros del Instituto Eduardo Torroja, AMIET, y Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, 1999.
- (8) Eduardo Torroja, *Las estructuras de Eduardo Torroja*, CEDEX y CEHOPU, 2000.
- (9) J. A. Fernández Ordóñez y J. R. Navarro Vera, *Eduardo Torroja Miret, ingeniero*, Ediciones Pronaos, S. A., 1999.
- (10) J. A. Torroja, «Presentación de AMIET», *Eduardo Torroja. Su obra científica*, Asociación de Miembros del Instituto Eduardo Torroja, AMIET, y Centro de Publicaciones del Ministerio de Fomento, 1999.
- (11) Eduardo Torroja, *La vigencia de un legado*, Universidad Politécnica de Valencia, 2002.



«Mi objetivo final ha sido siempre que los aspectos funcionales, estructurales y estéticos de un proyecto formasen una unidad integrada tanto en esencia como en apariencia»

“My ultimate aim has always been to blend the functional, structural and aesthetic aspects of a design into an integrated whole, both in essence and appearance”

COLABORADORES

ACUEDUCTO DE TEMPUL

Contratista: Compañía de Construcciones Hidráulicas y Civiles (Hidrocivil); R. Barredo

CAJONES DE CIMENTACIÓN

Contratistas: Compañía de Construcciones Hidráulicas y Civiles (Hidrocivil)

MERCADO DE ALGECIRAS

*Arquitecto: M. Sánchez Arcas
Contratista: R. Barredo*

FRONTÓN RECOLETOS

*Arquitecto: S. Zuazo
Contratista: F. Huarte*

HIPÓDROMO DE LA ZARZUELA

*Arquitectos: C. Arniches; M. Domínguez
Contratista: Agromán*

CIUDAD UNIVERSITARIA DE MADRID

*Arquitectos: M. López Otero; M. Sánchez Arcas; L. Lacasa; P. Bravo; A. Aguirre; M. de los Santos.
Contratistas: Agromán; F. Huarte; Fierro; M. Gutiérrez; Gamboa y Domingo*

PUENTES

Puentes mixtos

*Ingeniero: G. Andreu
Contratista: Obras Metálicas Electrosoldadas (OMES)*

Puente de Tordera

Contratista: Obras Metálicas Electrosoldadas (OMES)

Puente del Pedrido

Ingeniero: C. Villalba

VIADUCTO MARTÍN GIL

*Ingenieros: C. Villalba; A. Salazar
Contratistas: Obras Metálicas Electrosoldadas (OMES); R. Barredo*

HANGARES

Contratista: Obras Metálicas Electrosoldadas (OMES)

TRIBUNA DEL CAMPO DE LAS CORTS

*Arquitecto: J. M. Sagnier
Contratista: J. Pujadas Jorba*

ACUEDUCTO DE ALLOZ

Contratista: F. Huarte

PRESA DE CANELLES

Ingeniero: C. Benito

DEPÓSITO DE AGUA EN FEDALA

*Ingenieros: A. Páez; F. del Pozo
Contratista: F. Fernández*

UNIVERSIDAD LABORAL DE TARRAGONA

*Ingenieros: A. Páez; F. del Pozo
Contratista: R. Barredo*

IGLESIAS

Villaverde
*Arquitecto: Chumillas
Contratista: Agromán*

Pont de Suert y Xerrallo

*Arquitecto: J. R. Mijares
Pinturas: M. Rösset
Esculturas: J. Higuera*

Gandía

*Arquitecto: G. Echegaray
Ingeniero: J. Nadal
Contratista: SICOP*

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA

Arquitectos: G. Echegaray; M. Barbero

Cubiertas laminares trianguladas

*Ingeniero: F. del Pozo
Contratistas: Obras Metálicas Electrosoldadas (OMES)*

OBRAS Y PROYECTOS

Viaducto sobre la calle de Segovia en Madrid
Arquitecto: S. Zuazo

Puente sobre la ría del Eo
Ingeniero: F. Martín Gil

Marquesinas en el Instituto Escuela
*Arquitectos: C. Arniches, M. Domínguez
Contratista: Agromán*

Cubierta del Club Tachira
Arquitecto: F. Vivas

Dépósito de Sidi-Bernussi
Contratista: F. Fernández

Dépósito de Suk-el-Arba
*Ingeniero: J. A. Torroja Cavanillas
Contratista: F. Fernández*

Frontón en Añorga
Ingeniero: J. Batanero