

Filosofía y técnica estructural

Javier Manterola Armisén

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Promoción 1962

Hasta el siglo XIX la tecnología de la construcción reposaba en dos elementos fundamentales. En primer lugar, el material resistente, es decir la piedra y la madera, que eran materiales encontrados, buscados y elegidos, pero no diseñados. En segundo lugar la tecnología resistente, el cómo funcionan y deben hacerse las estructuras, que dependía de la historia, transmitida por tradición oral y unos pocos tratados escritos, Vitrubio, Alberti, Palladio, etc. y por el método de prueba y error que era el lentísimo procedimiento de avance en el conocimiento resistente, lo que hacía que la cúpula de San Pedro de Roma no fuese tecnológicamente mejor que el Panteón de Roma, realizado 1500 años antes.

El siglo XIX supone el espectacular cambio en la tecnología de la construcción y es debido a la coincidencia de tres factores fundamentales que configuran la primera revolución industrial. El primero es la máquina de vapor (Watt, 1785), la industrialización y el ferrocarril, como motores de nuevos tipos de construcciones, estaciones, fabricas, rascacielos y puentes, estos últimos más importantes que los anteriores por la pequeña flexibilidad de acoplamiento del ferrocarril al terreno. El segundo es la aparición de unos materiales artificiales (no naturales), diseñados (no encontrados), como son la fundición, que se aplica por primera vez en la construcción del puente de Coalbrookdale en 1779, con excelente resistencia a la compresión y a la corrosión, el hierro pudelado, con resistencia a la tracción y finalmente el acero (Bessemer, 1855). El tercero es la sustitución, para el conocimiento resistente de las construcciones, del método de prueba y error (aunque no abandono) por el método científico. Partiendo de los trabajos realizados a lo largo de los siglos XVI, XVII y XVIII (Galileo, Hooke, Bernoulli, Euler, Lagrange y Coulomb) se produce una transformación total en el entendimiento de lo construido. Y esta transformación se realiza en dos direcciones claramente interrelacionadas que se excitan mutuamente. La primera es lo que podría entenderse, como conocimiento científico de lo resistente, realizado por científicos-ingenieros tan poderosos como Navier, Cauchy, Castigliano, Mohr, Rankine, Culmann, etc, etc y tantos otros que a lo largo del siglo esclarecen y definen el comportamiento resistente de las estructuras y permiten cuantificarlo de una manera segura. El segundo es la

labor realizada por los que, a partir de entonces, se llamarán ingenieros, que desarrollan técnicas, métodos, tipologías, posibilidades en fin, a partir de los planteamientos científicos y de las exigencias de funciones cada vez más complejas que demanda la sociedad industrial. Celosías inventadas por Pratt, Warren, Polonceau, las vigas tubulares de R. Stephenson, la prefabricación de Joseph Paxton en el palacio de Cristal de Londres, la ejecución de naves con luces que no se podían ni imaginar cien años antes, como las que se producen en las estaciones de ferrocarril y las grandes exposiciones universales como es el caso de la Sala de Máquinas de Contamin de 140 m de luz y 400 m de largo o rascacielos en Chicago como los realizados por William Le Baron Jenney de 1884 con mas de 20 plantas y que se desarrollan ininterrumpidamente, a más y más altura, hasta alcanzar los 237 m de altura en 1913 para el Woolworth Building de Nueva York.

En España la construcción metálica para puentes, estaciones de ferrocarril y edificios significativos toma un gran desarrollo y perfección. La estación de Atocha es de 1888, la de Delicias de 1880, la del Norte se realiza entre 1889 y 1933. Estas tres estaciones están en Madrid. La estación de Medina del Campo es de 1896, la estación del norte en Barcelona de 1906 y la terminó de la misma ciudad de 1926, etc, etc.

El siglo XX empieza con este desarrollo espectacular de las construcciones metálicas, auténtico logro del siglo XIX y que ininterrumpidamente se desarrolla con más o menos velocidad, hasta nuestros días.

Se podrían destacar tres períodos en el desarrollo y entendimiento de las estructuras a lo largo de este siglo. El primero correspondería hasta la finalización de la Segunda Guerra Mundial. El segundo desde esta fecha hasta mediados de los años 70 y el tercero que corresponde al último tercio de este siglo.

El primer período se caracteriza por la consolidación del hormigón armado como el material básico de construcción. La fabricación en masa del cemento Portland empieza en EEUU en 1845, pero es a partir de finales del siglo XIX, cuando empieza a

Entre nosotros destaca, en este campo, la formidable figura de E. Torroja. En esta época produce tres obras fundamentales: el mercado de Algeciras (1933), el frontón Recoletos, una de las estructuras más geniales jamás construidas (1935) y el hipódromo de la Zarzuela (1936)

cristalizar la unión del acero y el hormigón para enfrentarse a los problemas de flexión. Monier en 1852 realiza una primera experiencia con jardineras, pero es François Hennebique quien en 1880 construye la primera losa de hormigón armado con redondos, así como empieza a disponer estribos para el cortante. El suizo Ritter pone a punto los métodos de cálculo de hormigón armado que se editan y extienden a lo largo de las primeras décadas del siglo. En España es José Eugenio Ribera quien empieza la utilización de este material principalmente en puentes (Puente de Golbardo 1900), acueductos y sifones como el de Araxes, (Guipuzcoa 1898) o el de Sosa en Monzon (Huesca en 1905).

Desde el punto de vista del cálculo de estructuras se pone a punto el método para resolver las estructuras estáticamente indeterminadas, en primer lugar con el "slope-deflection method" formulado inicialmente por Axel Bendixen en 1914 y la aportación definitiva de Hardy Cross, que en 1932, desarrolla el cálculo de estructuras hiperestáticas por aproximaciones sucesivas, por su famoso método tantas veces imitado pero no igualado. Culmann resuelve el cálculo de arcos con la obtención del centro elástico (1906) y U.S. Bureau Reclamation entre 1929 y 1931, establece el método de ajuste radical primero y de torsión después para la determinación de esfuerzos en presas bóvedas.

A finales del siglo XIX nace un gran número de ingenieros notables que cambian la tecnología de la construcción. Son ingenieros que reúnen una excelente capacidad científica unida a una rara habilidad para diseñar estructuras nuevas en hormigón. Tal cantidad de talento constructivo junto se debe a que cada época produce el tipo de hombres que requiere. En un tiempo en que la ciencia y la tecnología se erigen en máximos representantes del espíritu, nace un número importante de ingenieros, bien formados, imaginativos y audaces. Maillart nace en 1872, Freyssinet en 1879, Nervi y Caquot en 1881, Dischinger en 1887, Buckminster Fuller en 1895, Torroja en 1889 y Finsterwalder en 1897. Un poco más jóvenes y nacidos en este siglo tenemos a Morandi nacido en 1902, Fernández Casado en 1905, F. Leonhardt en 1909, etc...

Y los hechos constructivos trascendentales se producen ininterrumpidamente revelándonos cómo pueden ser las estructuras, qué configuraciones nuevas pueden adquirir, ampliando, así, el repertorio no formal de las construcciones. Aparece un mundo formal que cambia la imagen del mundo.

En 1912 se construye en Breslau, la gran cúpula del centenario formada por arcos de hormigón de 63 m de luz. En 1921, Freyssinet construye los hangares de dirigibles de Orly, formida-

ble construcción formada por arcos parabólicos plegados de 86 m de luz y 7,5 m de anchura, que repite 40 veces con un encofrado móvil.

La aparición más novedosa de la época son las cubiertas laminares, cúpulas y bóvedas delgadas. Dischinger y Finsterwalder empiezan a trabajar en este campo hacia 1924. En 1926, en Jena, Dischinger realiza el famoso Planetario, cúpula de 25 m de luz, con 6 cm de espesor que utiliza como soporte una estructura tubular geodésica, (predecesora del trabajo de B. Fuller) sobre la que proyecta el hormigón (gunitado). En Leipzig (1929) realiza el mercado con dos cúpulas laminares de 70 m de luz. Finsterwalder establece la teoría de las láminas cilíndricas, con nervios transversales en 1930 y la construcción de barcos de hormigón durante la Segunda Guerra Mundial. Entre nosotros destaca, en este campo, la formidable figura de E. Torroja. En esta época produce tres obras fundamentales: el mercado de Algeciras (1933), el frontón Recoletos, una de las estructuras más geniales jamás construidas (1935) y el hipódromo de la Zarzuela (1936). Maillart realiza en 1939 la lámina de hormigón en la exposición nacional de Zurich y Nervi, otro de los formidables creadores de estructuras, realiza los hangares de Orbetello entre (1929-1940). La estructura losa sobre columnas sin vigas, es puesta a punto por Maillart para los almacenes de la calle Giesshübel de Zurich en 1910.

Después de la Segunda Guerra Mundial se va a producir la segunda gran eclosión de la ingeniería de estructuras gracias al desarrollo de los planteamientos realizados en las décadas anteriores y a la consolidación del hormigón pretensado como nuevo procedimiento de diseño y construcción de estructuras. Puesto a punto por Freyssinet entre los años 1928-33, el pretensado va a extender la capacidad de saltar grandes vanos al introducir una acción controlada y evitar la fisuración del hormigón armado. La máxima construcción, que no es un puente, realizada por este procedimiento, en esta época, es la Basílica de Lourdes en 1958.

El pretensado va a ocupar un lugar especial en la construcción de cubiertas colgadas como la realizada por Finsterwalder en Karlsruhe en 1953, cubierta oval de doble curvatura de 73,5 m de luz mayor y 48,6 m de luz menor. Esta cubierta tiene 6 cm de espesor. Fernández Casado realiza, por un procedimiento similar, el Picadero del Club de Campo en 1968. Se trata de una cubierta colgada cilíndrica de hormigón pretensado de 70 m x 40 m. R. Morandi construye el hangar colgado de Fiumicino en 1963, también utilizando vigas de hormigón pretensado colgadas de tirantes.

Dentro de las cubiertas en general, pretensadas, aunque no de hormigón, en esta época se producen unas novedades formidables. En 1953 Novicki, con Severud, realiza la gran cubierta colgada de la Arena Releigh, cubierta de doble curvatura, de cables metálicos de 92x97 m de luz, soportada por dos arcos parabólicos cruzados. B. Fuller empieza en 1953 la construcción de cúpulas ligeras geodésicas. En 1958 realiza la Baton Rouge en Luisiana de 117 m de diámetro y después de realizar una gran serie de ellas, termina en la gran cúpula geodésica de Montreal de 1967.

En este mismo año, y en el mismo sitio, se realiza una cubierta fundamental en la futura historia de las cubiertas colgadas, el Pabellón Alemán de la feria de Montreal de Frei Otto. Esta estructura abandona el marco, el contorno cerrado de donde colgar los cables para acudir al puntal, elemento que permite una formidable libertad en la distribución en planta y espacial y una mayor riqueza formal junto con una considerable complicación técnica. La culminación de esta tipología se realiza en otra de las estructuras fundamentales de todos los tiempos, las cubiertas para la Olimpiada de Munich de 1972.

Nervi asocia prefabricación y hormigón armado en las construcciones de: la Sala de Exposiciones de Turín de 1947, el Palacio de Deportes de Roma de 1958-59. N. Esquillan realiza en 1952 el hangar del aeropuerto de Marignane, dos naves laminares de 101,5 m de luz. Este planteamiento lo extiende al Palacio de la CNIT de París de 238 m de luz en 1958.

En España, en el mundo de la prefabricación de naves industriales cabe destacar la labor desarrollada por Fernández Casado junto a Huarte y Cia, que en las décadas que van de 1940-1960, guiado por la precariedad de medios de nuestra post-guerra y la necesidad de construir y reconstruir una industria nacional, toma el camino de la prefabricación como método para regularización de la producción, calidad de la ejecución y construcción sin andamios de grandes superficies cubiertas de hormigón armado. La prefabricación de vigas y viguetas de hormigón pretensado para edificios se extiende rápidamente por España de la mano de Carmelo Monzón y Fernández Conde que permiten abaratar y acelerar la construcción de viviendas. Se empieza también a desarrollar la prefabricación pesada de edificios que sucesivamente aparece y desaparece sin un definitivo asentamiento.

Florencio del Pozo y Alfredo Paez desarrollan un gran número de cubiertas laminares y pretensadas, Canódromo de Madrid

(F.P.), cúpulas y láminas colgadas del Pabellón de la Feria de Barcelona (P.).

Las celosías metálicas tienen su gran antecedente en las imágenes del hangar de aviación para la marina americana (1946) concebido, que no construido, por Konrad Wachsmann, una de las primeras y más hermosas estructuras espaciales de barras. Torroja construye el hangar de Cuatro Vientos, con arcos cruzados en 1949 y el hangar de Torrejón. Fernández Casado realiza la gran cubierta metálica del Estadio de S. Mamés.

Si nos referimos ahora al conocimiento y cuantificación de los fenómenos resistentes, el avance producido desde la Segunda Guerra Mundial a la actualidad ha sido también espectacular. El análisis de la complejidad real que presenta cualquier estructura se simplificaba drásticamente, en las primeras décadas del siglo, en función de la capacidad de cálculo que se tenía, de la experiencia y de la posibilidad de comprobación experimental por modelos reducidos o a escala real. Se planteaba toda una casuística de posibilidades para abordar tal o cual problema, por procedimientos particulares, fácilmente calculables, con la precisión que proporcionaba herramientas tan elementales como puede ser la regla de cálculo o las máquinas de calcular manuales o eléctricas. Una gran parte de la ingeniería se configuraba en función de que fuese fácilmente calculable, y esto, que sin duda representa uno de los objetivos del ingeniero como es cuantificar adecuadamente los problemas, tenía consecuencias negativas en el desarrollo del diseño en ingeniería, coartados por el hecho de que fuese más o menos fácil su cálculo.

Pero el punto de inflexión de esa metodología se quiebra a partir de los años 60 con la presencia de los ordenadores electrónicos, cada vez más rápidos, más potentes y más baratos. La discretización del continuo, que hasta entonces era imposible de resolver a través de larguísimos sistemas de ecuaciones diferenciales, se resuelve definitivamente con el ensamblaje de elementos discretos conectados entre sí. El emparillado de vigas resulta especialmente adecuado para los problemas lineales de vigas y pilares, incluso losas, que existen en nuestras construcciones, pero son poco satisfactorios para la solución de losas o láminas con respuesta en el plano y fuera del plano. En 1954 Turner y Clough, trabajando para la industria aeronáutica, demostraron que la aproximación del comportamiento de un continuo era posible utilizando elementos de formas triangulares o trapeciales conectados entre sí a lo largo de puntos del contor-

En la prefabricación de naves industriales cabe destacar la labor desarrollada por Fernández Casado junto a Huarte y Cia, que entre 1940 y 1960, toma el camino de la prefabricación como método para regularización de la producción, calidad de la ejecución y construcción sin andamios de grandes superficies cubiertas de hormigón armado

no. Suponiendo una distribución simple de tensiones en el interior se demostró la convergencia del problema discretizado al continuo.

El método de elemento finitos. M.E.F., bautizado así por Clough en 1960, experimentó desde entonces un vertiginoso desarrollo, acompañado igualmente por el desarrollo de los ordenadores capaces de resolver, en poquísimos tiempos, el casi infinito número de ecuaciones de compatibilidad formuladas a través de métodos matriciales. Y su aplicación se ha extendido a cálculos estáticos lineales o no lineales, tanto geométricos como del material, y a cálculos dinámicos con o sin linealidad.

No se puede decir que cualquier estructura sea fácilmente calculable por estos procedimientos, pues los problemas no lineales de la respuesta del material en suelos, rocas e incluso el hormigón armado no está, hoy en día, definitivamente al alcance del calculista profesional, pero la velocidad de avance es tan rápida que sin duda pronto se podrá abandonar el concepto de viga como elemento base desde el cual se calcula el estado tensional, de deformación y de seguridad de las estructuras. La historia del cálculo ha conducido a que esto sea así y aún después de un cálculo por elementos finitos, de una determinada estructura, deberemos, en muchos casos, realizar las integraciones correspondientes para acabar desembocando en esfuerzos en la viga. La experiencia y la normativa están sojuzgadas por este elemento. Sin embargo cada vez es posible analizar mejor los comportamientos resistentes en discretizaciones más menudas sin necesidad de acudir a la sección o a los comportamientos de grandes elementos discretos. En poco tiempo veremos un avance significativo en esta dirección que incluso llegará a hacer que "casi" desaparezcan las normas, que no son otra cosa que el acotamiento de una casuística resistente compleja, difícilmente acotable de otra manera hoy en día.

La consecuencia de este método de acotación de la respuesta resistente, cada vez más aproximada a la realidad y más segura, proporciona tal cantidad de posibilidades nuevas, que la gran tentación de proyectar sólo lo calculable por métodos elementales ha desaparecido. Actualmente se pueden cuantificar estructuras extraordinariamente complejas.

Junto a estas posibilidades en el campo de la determinación de la seguridad de las estructuras, desde el punto de vista constructivo se ve una tendencia marcada hacia la prefabricación, de hormigón o metálica, con materiales cada vez más resistentes (Hormigones de 700 Kg/cm², son de uso corriente, hoy en día, en construcciones especiales) y la utilización de elementos seriados puestos en situación con las grandes grúas disponibles en este último tercio de siglo. Las empresas tienden a subdividirse en empresas especializadas o empresas de gestión y los planteamientos novedosos, curiosamente y debido a la especialización, encuentran más dificultades de ser aceptadas que en las décadas anteriores.

En estas últimas décadas del siglo el mundo de las estructuras está abandonando la manera ingenieril de enfrentar lo resistente, donde lo estricto, la forma mínima, tiene una significa-

ción ideológica añadida. La estructura resistente está pasando a otras manos, a manos de los arquitectos, en todo lo que se refiere a su expresión formal. El ingeniero, en su dimensión abstracta, se reduce a ser un valedor de la seguridad de la estructura, la dimensiona, la calcula y la encaja en planteamientos formales que no le son propios. El arquitecto diseña la forma resistente, cuanto ésta es considerada como valor expresivo, y el ingeniero la calcula. Todas las posibilidades alumbradas por la ingeniería, en cuanto a cálculo y construcción se refiere, permiten que casi cualquier planteamiento formal pueda ser resuelto y es en estas posibilidades donde la expresión formal de la ingeniería ha encontrado su propia destrucción. Como en tantos otros periodos de la historia de la construcción, la belleza de la expresión formal de la ingeniería más pura es aislada de su contexto, se la separa de sus raíces y se actúa sobre ella desde parámetros ajenos con resultados diversos, más espectaculares que sustantivos, más aparentes que reales, todo ello muy de acuerdo con las manifestaciones culturales de las postrimerías de este siglo.

Si esa es la tónica general, también existe una ingeniería bastante honesta que se manifiesta en planteamientos formales nuevos. Pero para ello tenemos que acudir a los más grandes rascacielos o a las más grandes cubiertas.

El rascacielos que experimentó a lo largo del siglo un proceso de depuración estructural, el tubo, el tubo en el tubo, el tubo múltiple de las Sears de Chicago (1974), el descubrimiento de la eficacia de la Vierendel de fachada del Chestnut de Witt de F. Khan (1965), o las celosías espaciales trianguladas del John Hancock de Chicago (1970), han dejado paso a configuraciones exteriores libres, libres en el sentido de que el arquitecto no tiene que sujetarse a planteamientos resistentes tan estrictos. Las formas se diversifican y su sentido lo encuentran en el orden de lo escultórico. Únicamente en las más grandes propuestas, en la torre Sin Fin de Nouvel en París o la torre del Millenium de Foster de Japón, con 840 m de altura esta última, lo resistente vuelve a tomar la significación que tenía.

En el mundo de las grandes cubiertas hay un campo en el cual los progresos estructurales han sido evidentes, me refiero a las cubiertas colgadas desde apoyos puntuales, sistemas derivados de la cubierta de la Olimpiada de Munich, y que se utilizan hoy en día desde la cubrición de las gradas de grandes estadios hasta las cubiertas tensigrity. Curiosamente estas dos tipologías, que provienen de orígenes radicalmente diferentes, están mucho más próximas de lo que parece. La utilización de los textiles, compuestos de teflón y fibra de vidrio y otros materiales compuestos se configura, en toda esta última época, como material resistente nuevo, precediendo a los nuevos materiales compuestos a base de fibra de vidrio, fibras de carbono en matriz de resina epoxi que, junto con las estructuras adaptables, capaces de variar sus características resistentes con la sollicitación, van a producir el nuevo mundo de las estructuras del 2000. ●