

# CONSTRUCCION, PROYECTO Y CALCULO

Por CARLOS FERNANDEZ CASADO,  
Ingeniero de Caminos.

*Se plantea el problema de la relación entre las dos actividades básicas del Ingeniero, proyectar y construir, llegándose a la conclusión de que en la actualidad no es posible separarlas sin grave quebranto para ambas. Se enfoca a continuación el problema del cálculo, juzgándose desorbitada la importancia que se le asigna, pues en la teoría de estructuras del Ingeniero, todo debe girar alrededor del proyecto.*

## La construcción y el proyecto.

La misión principal de nuestra profesión es *construir* estructuras resistentes. Incluso los desmontes y terraplenes que antes se miraban desde un punto de vista puramente geométrico, han de considerarse en el aspecto estructural que la mecánica del suelo exige.

Dada la envergadura de la ingeniería actual, no puede construirse obra alguna sin proyecto previo, por lo cual resulta que la labor primaria y básica del ingeniero es *proyectar*.

Proyectar y construir aparecen de este modo, disputándose la primacía al tratar de definir nuestra labor profesional; pero esta discrepancia en la valoración deriva de la imposibilidad de separar ambas funciones. Así como actualmente no es posible realizar una obra sin proyecto, tampoco tiene sentido el proyectar sin la esperanza de una realización más o menos próxima. Además, el proceso de proyectar no cesa hasta la terminación de la obra, pues la ejecución misma demanda un continuo prevenir y una serie de reajustes del plan primitivo en las situaciones sucesivas.

Las previsiones del proyecto tienen su cumplimiento en la obra, y ésta sanciona de un modo inexorable el acierto de aquéllas. La responsabilidad tan acusada de la profesión del Ingeniero tiene su raíz en esta condición fundamental. En frase cartesiana, que ya hemos repetido en otras ocasiones, al Ingeniero le sucede que: "l'événement le doit punir bientôt après s'il a mal jugé", en contraste con el hombre de gabinete: "touchant des spéculations qui ne produisent aucun effet". O como nos diría D. José Ortega y Gasset, precisamente para este caso del Ingeniero: "La materia disciplina al espíritu. La cosa pasa a ser pedagogo de la idea". La construcción es norma, limitación y medida para el proyecto.

No es posible desarrollar adecuadamente un proyecto si se pierde de vista la realización de la obra. El Ingeniero ha de tener muy metido el proceso constructivo, particularmente en las técnicas más modernas. Esto exige, en primer lugar, que el que proyecta haya construido. Toda construcción no sólo es término de un proceso, sino iniciación del siguiente, ya que la experiencia directa con las cosas corrige errores, centra la visión y permite que el proyecto próximo apunte a una obra más perfecta. Además, el punto de vista constructivo conduce a una simplificación de todos los elementos de la estructura, tanto para facilitar su ejecución como para, lo que es más importante, reducir los riesgos de error.

Avanzando un paso más en esta relación entre el Ingeniero y la obra, cabría decir que no sólo es necesario que el que proyecta haya construido, sino que, además, sea el que va a construir. Debe quedar en grado mayor o menor, comprometido en el éxito de la obra, solidarizándose físicamente con la estabilidad de la misma.

Existe una tendencia al antagonismo entre los que proyectan y los que construyen, originado por el contraste violento entre la pulcritud con que se realizan los planos y la rudeza natural de la obra, que es la realización definitiva. Para evitar este posible distanciamiento, es preciso acostumbrarse a que la obra, en casi todos sus momentos, está sucia y desagradable, resultando hermoso mantener siempre una tendencia a la perfección, con aceptación de los defectos irremediables y una aspiración hacia lo bello, pasando por la inevitable fealdad intermedia.

Cuando se está frente a un papel en blanco, es fácil tener audacia y dibujar atrevidas estructuras de hormigón armado; pero si se mira más allá del papel y se considera el descimbramiento de aquellos elementos que aún no son sino trazos de lápiz, nos ponemos en la realidad de las cosas y los atreivi-

mientos se frenan. Resulta muy conveniente pensar en los hombres que habrá debajo cuando el descimbramiento, uno de los cuales puede ser el autor del proyecto.

No nos cansaremos de insistir sobre la trascendencia que tiene el momento de dibujar la estructura resistente, en el cual el que proyecta contrae la máxima responsabilidad. Las cosas representadas en el papel no aleccionan de modo eficaz, y verdaderos disparates pueden ponerse en marcha hacia una realización desatinada. A esto puede objetarse que todo proyecto tiene una tramitación, durante la cual está sometido a revisión por otros Ingenieros y autoridades, y que, además, los preparativos de construcción al materializar los elementos componentes, armaduras, encofrados, etc., llegan a poner en claro las contradicciones, que pueden remediarse hasta el momento de colocar en obra el hormigón.

Un ejemplo muy reciente ha venido a dar razón a nuestro pesimismo, ya que se llevó a concreción material algo que, a simple ojeada de planos, no tenía capacidad para aguantar su propio peso, es decir, que no podía tomar consistencia física. En este caso, la insolidaridad del proyecto con la obra se estableció a través de una cadena de Ingenieros y Arquitectos de cuatro nacionalidades distintas. El contrasentido a que aludimos quedó en evidencia al querer descimbrar la construcción, cuando por la rapidez de marcha, se habían levantado ya tres pisos. El conjunto se venía abajo, a pesar de lo cual la propiedad exigía el descimbramiento. Esta absurda pretensión se cortó al exigir a su vez el constructor de un modo metafórico "que estuviera debajo el Ingeniero que lo había proyectado", y el derrumbamiento se evitó reforzando substancialmente toda la construcción, es decir, dándole la estructura que le faltaba.

Construir sin proyecto no es posible en el momento actual, pero cabe el vicio inverso de proyectar sin construcción que cierre el ciclo. Esta falta de ajuste entre idea y realización conduce a una deformación del que proyecta, y no hay que olvidar nunca que al Ingeniero se le ha de valorar no por sus proyectos, sino por sus obras. Lo perfecto sería llegar a un sólo Ingeniero que proyectara y construyera, pero en realidad las obras de importancia requieren un equipo de Ingenieros que han de establecer la cadena proyecto-construcción. Ya hemos visto a qué resultado puede llevar la rotura de esta cadena al producirse cambios de personal, por lo cual hay que conseguir de un modo automático la persistencia física del primer Ingeniero en la terminación del proceso.

Otra gran ventaja de que construya el que proyecta, está en sacar el máximo rendimiento al carácter de experiencia que la obra lleva en sí misma. Primero, por la utilización de esa experiencia en

los casos análogos que hayan de presentarse, y segundo, porque puede orientar el proceso constructivo para que deje el máximo fruto, aunque esto exija un cierto esfuerzo suplementario, no cotizabile en la valoración de la obra aislada. La contrapartida está en lo oneroso que puede ser la experimentación en obra, por las alteraciones que introduce, lo costoso de las rectificaciones y el riesgo que entraña para el personal que trabaja en la misma. Caso muy indicado sin estos inconvenientes es la prueba hasta rotura de elementos enteros que se repiten muchas veces, cuando se utiliza el procedimiento de premoldeo. En esta orientación experimental, tenemos actualmente un método magnífico que elimina de modo radical los inconvenientes, y es la experimentación en *modelo reducido*.

En la experiencia de obra tenemos la comprobación de resultados en caso único, y además, esta comprobación llega únicamente al comportamiento en condiciones normales, no denunciando a qué distancia estamos de una anomalía peligrosa. Mediante los modelos reducidos, la experiencia se extiende al número de casos que sean necesarios y se intensifica en todos ellos hasta llegar a la rotura, pasando por todas las etapas intermedias. La multiplicidad de los modelos nos permite comparar distintas soluciones, y la observación hasta rotura destaca los defectos estructurales más insignificantes. Llegamos de este modo a la solución adecuada mediante un procedimiento de selección análoga al de la naturaleza, agotando las posibilidades de las formas anteriores o de las ideadas por el que proyecta.

Con este método experimental se ha abierto un amplio cauce al libre juego de creación de formas, logrando al mismo tiempo una gran seguridad en el comportamiento estructural de la que se adopte como óptima. Se han reducido al mínimo las trabas para la intuición, consolidándose al máximo la firmeza del proyecto. En este método casi exhaustivo, la perfección aparece desde todos los ángulos que se le mire. Se aleja de la obra el peligro de la rotura, rompiendo otras estructuras menos costosas por su tamaño. Esta justificación del sacrificio, tan satisfactoria para una mentalidad científica, lo sería también para una mentalidad mágica, considerando los modelos como víctimas propiciatorias.

Al proyectar una estructura es preciso partir de todas las análogas proyectadas anteriormente, pero al mismo tiempo hay que esforzarse por resolver el problema directamente, replanteándolo en toda su originalidad. Intuición y experiencia son las dos fuentes vivas a las que ha de acudir el que proyecta. "El cálculo no es más que la cristalización científica de todo el desarrollo intuitivo y experimental anterior."

## El cálculo.

Con esta última frase, que recogemos de un artículo nuestro publicado en esta REVISTA hace ya veinticinco años ("Teoría del arco", julio 1931), pasamos al tercer punto de nuestro enunciado: el *cálculo*, descendiendo con relación al nivel común de los otros dos: construcción y proyecto.

Al contrario de lo que acabamos de establecer, que no hay construcción sin proyecto y no debe haber proyecto sin construcción, empezamos sentando que puede haber proyecto sin cálculo. Basta imaginar una intuición directa tan penetrante que previera entre una serie de soluciones la más ventajosa, o una experiencia tan copiosa que tuviera a mano un conjunto de resultados para elegir los óptimos. Sin embargo, el cálculo es necesario en la mayoría de los casos, y el Ingeniero ha de dominarlo, aunque sólo sea para no ser dominado por él.

Se ha llegado a desenfocar de tal modo este problema, que muchas veces se considera como lo fundamental del Ingeniero el calcular, denominándose calculista al que proyecta estructuras. Consideramos de extraordinaria importancia aclarar esta cuestión, no sólo en la perspectiva que la profesión presenta a los extraños, sino dentro de la valoración necesaria a los propios. Y como hemos publicado libros y artículos que se refieren precisamente al cálculo de estructuras, nos sentimos obligados a esta aclaración, aunque hayamos utilizado todas las ocasiones oportunas para evitar el malentendido. Como resumen de todas las aclaraciones anteriores nos vamos a permitir copiar una parte del prólogo a la edición francesa de nuestro libro: *Calcul des grandes ossatures réticulaires à nœuds rigides* (Dunod, 1954).

"Para entender correctamente el problema del cálculo, es necesario darse cuenta de la diferencia esencial entre los verbos proyectar y calcular. Una preocupación excesiva por el aparato matemático ha hecho perder de vista la verdadera misión del Ingeniero en la esfera de la construcción, que es la de imaginar estructuras para llevarlas en seguida a su realización material. El cálculo resulta necesario en la mayoría de los casos, pero carga de abstracciones el proceso puramente imaginativo del proyectar. El ideal es reducirlo a fórmulas con interpretación física inmediata que, aplicadas directamente, no perturben ni desvien el desarrollo del proyecto. Cuando esto no es posible, como ocurre en la mayoría de las estructuras importantes, es preciso apoyarse en la intuición del fenómeno físico dando a las transformaciones de cálculo un sentido más valioso que el puramente combinatorio."

"En cada proyecto la capacidad intelectual del Ingeniero, que no es ilimitada, debe emplearse en obtener la solución óptima y no malgastarse en desarro-

llos matemáticos brillantes. No hay que perder de vista que en la construcción definitiva lo que vale es la forma y no las fórmulas."

Como en toda actividad humana que ha llegado a un cierto grado de desarrollo, tenemos un arte y una ciencia de la construcción. Hay que mantener ambas direcciones en equilibrio, pues el romperlo conduciría, de un lado a la fantasía irresponsable, y de otro, a la pedantería cerril. En esta difícil armonía está la clave de la posibilidad de colaboración entre ingenieros y arquitectos que ya esbozamos en otro trabajo anterior ("Teoría del puente", *Revista de Ideas Estéticas*, núm. 34, abril-mayo-junio 1951). Y que trataremos de aclarar en artículo próximo.

La preocupación obsesiva por el cálculo ha tenido su razón de ser cuando no existían métodos apropiados para dominar los nuevos materiales, hierro y hormigón armado, que habían irrumpido violentamente en el campo de la construcción durante el siglo XIX. Pero hoy día las circunstancias han cambiado totalmente y los que llevamos ya casi un tercio de siglo en actividad profesional, hemos asistido a la última fase de la evolución.

Los ingenieros que inician su actividad en el presente no pueden darse cuenta de las condiciones tan extraordinariamente diferentes que encontramos nosotros al terminar nuestra carrera con el año 1924. No disponíamos de métodos de cálculo eficaces para las estructuras más frecuentes y otros como el de la viga de varios tramos o el de las presas de gravedad, estaban tarados por el sello de una inútil crueldad.

Los ingenieros ya hechos con quienes establecíamos contacto, se sentían orgullosos de haber calculado los arcos de sus puentes por Castigliano o por Müller Breslau, importándoles muy poco el aspecto final de sus obras. En las memorias de los proyectos se dedicaban muchas páginas a plantear las ecuaciones para determinar la fibra neutra, cada vez que había que calcular una sección rectangular de hormigón armado, y en un proyecto de puente con arcos de 30 metros de luz había más de cien páginas con el cálculo de las palizadas de tímpanos, sin tener en cuenta ni variaciones de temperatura ni asentamientos de los apoyos sobre el arco. El resultado de todo este despilfarro de energía mental se traducía en un descuido del proyecto, tanto en sus líneas generales como en sus detalles constructivos.

Refleja muy claramente el estado de la cuestión una anécdota humorística que se contaba por entonces, resumida en dos telegramas dirigidos por el Ingeniero de una obra al Director de la Empresa en ocasión de descimbrar una estructura, que se particularizaba "pórtico basilica", para más detalles. El primero decía: "Al quitar puntales aparecen grietas; corro a revisar los cálculos". Y el segundo, pocas

horas después: "Cálculos bien. Estructura en el suelo".

La anécdota anterior, además de poner en evidencia la preocupación por el cálculo y la ingenua confianza en sus resultados, nos indica en su afilada crítica cómo ya se encontraba absurda esta preocupación y confianza. Todo en Ingeniería giraba en torno al cálculo que parecía ser el centro del sistema planetario en el cual se fijaba la atención como meta de aspiración suprema. Por este motivo nos hemos servido de la sencilla metáfora del *giro coperniano* al querer definir la situación actual en el último prólogo de uno de nuestros libros. Ha llegado el momento de considerar que lo fundamental es el proyecto, y toda preocupación ha de orientarse a obtener la solución estructural más perfecta. Para conseguir este fin, resulta indiferente el método de cálculo que se haya de emplear, por la misma razón que no tiene interés para el futuro contemplador las marcas de máquinas de calcular o de la regla de cálculo que se hayan utilizado. En cambio, este mismo contemplador agradecerá el placer que le proporcione la armonía de una solución acertada. Por otro lado, no

corresponde la economía de los resultados al ahorro de unas horas en el proceso de cálculo, sino a la tranquilidad de ánimo, que da al que proyecta un método seguro y lo suficientemente sencillo para descargar el peso mayor al cuidado de sus auxiliares.

Para analizar este problema del cálculo hasta sus últimos detalles vamos a concretarnos a las estructuras reticulares. Se trata del sector más vivo, no sólo por ser el de las estructuras más frecuentes, sino porque en él se ha llegado de nuevo a hipertrofiar la importancia del cálculo en sí, debido a diversos motivos de más o menos actualidad. El simple recuento de los artículos aparecidos en esta REVISTA en los últimos años, todos ellos instando sobre la valoración de métodos de cálculo, da una apariencia engañosa al problema. Además, en ciertos casos se ha sacado de quicio la discusión y hay que poner los puntos sobre las *ies*, a lo cual nos consideramos obligados, por las mismas razones que ya hemos apuntado, al haber iniciado la controversia sobre el método de Cross, precisamente en esta misma REVISTA, con un artículo de abril de 1934 ("Puentes de altura estricta". V. núm. 2642. pág. 121).