

INVARIANTES ESTÉTICOS DE LA INGENIERÍA CIVIL

AESTHETIC CONSTANTS IN CIVIL ENGINEERING

MIGUEL AGUILÓ ALONSO. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático de Estética de la Ingeniería, U.P.M.

RESUMEN: La escisión histórica del tronco común de la construcción en ingeniería y arquitectura a finales del XVIII produjo la progresiva fijación de unos valores ligados a la racionalidad, a los conocimientos científicos y a la mesura en el empleo de los medios, como específicos de la ingeniería civil. Desde estos valores se puede considerar el conjunto de la actividad constructora del hombre e identificar, más allá de los simples listados de competencias de arquitectos o ingenieros, aquellos invariantes que constituyen el núcleo fundamental del quehacer ingenieril. Una consideración crítica realizada desde la disciplina de la Estética, señala los siguientes: la vinculación de la obra a la naturaleza como componente esencial; la consideración primordial de la función; la existencia de una potente lógica interna independiente de los estilos; una especial consideración de lo estricto frente a lo superfluo; la evolución pausada y suave de su quehacer; un soporte específico de la idea de tipo, como principio de transvase entre historia y proyecto; una escala de actuación que permite una privilegiada relación de la obra con la naturaleza; y la trascendencia del proceso constructivo en el diseño de la obra.

PALABRAS CLAVE: INGENIERÍA CIVIL, ESTÉTICA, DISEÑO, VALORACIÓN

ABSTRACT: The common trunk of construction was historically separated into the disciplines of engineering and architecture at the end of the 18th century. This led to the gradual establishment of certain values associated with rationality, scientific knowledge and moderation in the use of means as ones inherent to civil engineering. The basis for all building activity may be considered from this standpoint and one may then identify those constants that serve as the fundamental core of all engineering work within the wide-ranging scope of architects and engineers. A critical assessment in terms of aesthetics reveals: the essential bond between the work and nature; the fundamental aspect of purpose; the presence of a strong internal logic regardless of style; particular consideration of the strictly necessary as opposed to the superfluous; gradual and measured development; the specific idea of structural type as the basis for the transition between history and design; scaled action to ensure perfect harmony between the work and nature; and the importance of the building process in the design of the work.

KEYWORDS: CIVIL ENGINEERING, AESTHETICS, DESIGN, VALUATION

1. LA INGENIERÍA CIVIL, A PARTIR DE LA NUEVA LIBERTAD FORMAL

Cuando se estableció como disciplina autónoma, la ingeniería civil surgió fuertemente condicionada por el desconocimiento de los nuevos materiales de construcción y por el carácter rudimentario de los instrumentos técnicos disponibles para el proyecto y la ejecución. El vertiginoso desarrollo de la ciencia de la resistencia de materiales y de los métodos de cálculo habido en los últimos años ha dado lugar a mayores grados de libertad en la realización de proyectos y obras. Ahora, lo funcional y lo resistente se pueden satisfa-

cer de diversas formas, que permiten la expresión de significados y valores y, con ello, la problemática estética de la obra de ingeniería es totalmente diferente a la de veinte años atrás.

Con la masiva implantación del ordenador, tanto la capacidad de diseño como la de cálculo permiten aproximarse a la formalización de los conceptos resistentes con una libertad antes inconcebible. En cierto modo, se podría decir que la ingeniería actual soporta muy pocas restricciones técnicas (de materiales, procesos constructivos o cálculos resistentes) que habían sido decisivas en cuanto justificaciones de diseño desde sus orígenes. La ingeniería del XIX y principios del

Se admiten comentarios a este artículo, que deberán ser remitidos a la Redacción de la ROP antes del 30 de diciembre de 2002. Recibido: junio/2002. Aprobado: julio/2002

XX, que cautivó a grandes teóricos como Giedion o Le Corbusier y que se constituyó en referente básico de la arquitectura moderna, tenía muy pocos grados de libertad. Sus atractivas formas eran producto de la necesidad: no podían ser de otra manera pues, en la mayoría de los casos, eran las únicas soluciones conocidas para los problemas planteados.

Ahora, en cambio, asistimos a una revolución de las formas de la ingeniería, particularmente en el ámbito de los puentes, que indican la clara superación de las restricciones tecnológicas. Privado del cobijo de la 'necesidad tecnológica', el ingeniero que elige una determinada solución crea nuevas formas y proyecta sobre la obra valores y significados personales, con lo cual se multiplica el repertorio de soluciones.

Como primera consecuencia, ha surgido un creciente interés de arquitectos y diseñadores hacia el mundo de la ingeniería, no tanto para incorporar sus principios a la arquitectura como sucedió a principios del siglo XX, sino para volcar sus capacidades creativas en la obra de ingeniería. Y lo practican desde posiciones de control, al mando de grandes firmas o en fraterna colaboración con complacientes ingenieros estructurales. Así, la ingeniería resulta 'contaminada' por corrientes formales ajenas a sus valores esenciales, que tienden a trivializarla.

Y desde el mundo de la ingeniería surge una doble necesidad. Por un lado, los ingenieros creativos precisan de una redefinición de su especificidad para marcar distancias frente a eso. Necesitan desarrollar su potencial creativo desde premisas propias, bien fundadas en las raíces de su quehacer. Por otro, como esa mayor dosis de creatividad acerca la obra de ingeniería al mundo de la interpretación, del cual siempre estuvo ausente, la crítica de la obra de ingeniería se vuelve más necesaria que nunca.

En ambos casos resulta útil distinguir lo verdaderamente característico de la obra de ingeniería, más allá de las delimitaciones competenciales o administrativas. Frente a la idea de la ingeniería como actividad constructora de unos tipos determinados de obra, como puentes, puertos, carreteras o presas, incluidos en un hipotético listado excluyente de cualquier otro, se prefiere identificar cuáles son los invariantes que caracterizan esa actividad.

Una posible pista de lo limitado de la acepción competencial aparece al analizar importantes obras históricas. Si Juan de Herrera hizo el puente de Galapagar sobre el río Guadarrama al mismo tiempo, con los mismos materiales,

con las mismas técnicas constructivas y con los mismos operarios que en el monasterio de El Escorial, cabe preguntarse si una hipotética historia de la ingeniería debería incluir sólo el primero. Del mismo modo, deberíamos aceptar que cuando Juan de Villanueva hizo la presa de Calanda en Teruel era tan ingeniero (o tan arquitecto) como cuando hizo el Museo del Prado. Frente a quienes defienden que cuando hizo la presa actuó como ingeniero y con el museo lo hizo como arquitecto, parece mejor considerar a Villanueva como un excelente constructor y dejar de lado la disyuntiva. Y, en seguida, plantearse que hay en el puente, en el monasterio, y en la presa que entronca con la actividad del ingeniero y no aparece, en cambio, en el museo.

Alguno de estos invariantes característicos de la ingeniería se estudian a continuación desde la perspectiva de la estética como plataforma comprensiva de lo que no es puramente instrumental y, por lo tanto, común a toda la actividad de construir.

2. LA VINCULACIÓN DE LA INGENIERÍA CIVIL A LA NATURALEZA

La obra de ingeniería no puede ser comprendida al margen de la naturaleza que le proporciona su razón de existir. Se construyen puentes para salvar ríos u obstáculos naturales, y no es posible aprehenderlos sin conocer su relación con ellos. Una presa no tiene sentido sin su cerrada, como un canal no puede justificar su trazado con independencia del relieve.

Así como la distinción entre arquitectura e ingeniería se difumina en lo construido, hay un factor que diferencia claramente a la ingeniería civil del resto de las ingenierías. Se trata de la vinculación de su quehacer con el territorio, claramente ausente en las que realizan objetos, como la ingeniería industrial, aeronáutica, naval o de telecomunicación, y tenida en cuenta solo parcialmente en cuanto al aprovechamiento de recursos en minería, agronomía o montes. En efecto, no se puede hablar de una particular estética de la ingeniería civil sin la consideración, desde el instante inicial, del 'locus' como componente esencial de la esencia de la obra pública. Su especificidad esencial, lo que las da su razón de ser y las distingue de las demás obras, es su vinculación a los accidentes particulares del terreno, con vistas a su superación.

Pero no interesa sólo la morfología del terreno, es imprescindible conocer los procesos naturales por una doble razón. Primero, porque condicionan el dimensionamiento de las obras. El régimen hidráulico de un río es razón de ser de la distribución y amplitud de los vanos del puente, o de la capacidad de regulación del embalse producido por la presa. Y segundo, porque nuestra actuación debe producirse con la mínima alteración de lo natural. Si quere-

La obra de ingeniería no puede ser comprendida al margen de la naturaleza que le proporciona su razón de existir. Se construyen puentes para salvar ríos u obstáculos naturales, y no es posible aprehenderlos sin conocer su relación con ellos



Presa del Portillo.

mos seguir viviendo en el planeta, debemos actuar sin hipotecar el futuro.

La reflexión actual sobre la actuación del hombre en el mundo precisa considerar la naturaleza desde la perspectiva de la ciencia. Necesita acercarse a la naturaleza de los biólogos tanto o más que a la de los filósofos. Necesita considerar al hombre como parte del sistema natural total para que su actuación no altere la capacidad de supervivencia de la naturaleza (hombre incluido). Y no basta anticipar los posibles impactos ambientales de su actuación, o proteger los lugares naturales más frágiles: debe poner en práctica ese acercamiento de manera positiva.

Debe trabajar desde una visión de la naturaleza más amplia que la habitual y dominante visión utilitaria, al tiempo que reconoce la significación y complementariedad de la cultura. Debe partir de una comprensión ecológica del medio o del país, que constituye el fundamento del paisaje con sus diferentes capas de complejidad, además de las visuales. Solo una perspectiva holística, focalizada en los procesos, permite tratar diferentes capas de organización espacial y considerar los cambios como resultado de procesos evolutivos naturales y culturales. Todo ello debe completarse con la comprensión de los significados simbólicos, artísticos y espirituales del paisaje. Para capturar las relaciones intangibles con el entorno, además de lo racional hay que integrar pensamiento, sentimiento, intuición y sensaciones, desde un punto de partida cultural, potenciado por la formación personal del diseñador.

Por su parte, la crítica debe también partir de esa vinculación esencial con el entorno. En general, el escaso análisis estético de la ingeniería estudia sus materiales, su composición formal, su alzado, o sus semejanzas y filiaciones con otras obras de similar estilo, pero no menciona el

entorno donde se asienta. Los puentes, por ejemplo, son tratados prioritariamente según aspectos formales y tipológicos, con total independencia de su enclave natural. Su razón de ser como lugar de paso, ligada a lo natural, queda olvidada, mientras que lo formal se afirma autónomamente. Por su parte, las obras lineales como carreteras, canales o ferrocarriles son poco analizadas, quizás porque no pueden ser comprendidas sin el paisaje que las envuelve. Solo las presas son, a veces, explicadas y representadas con referencias a su absoluta dependencia de las condiciones naturales de la cerrada y el río.

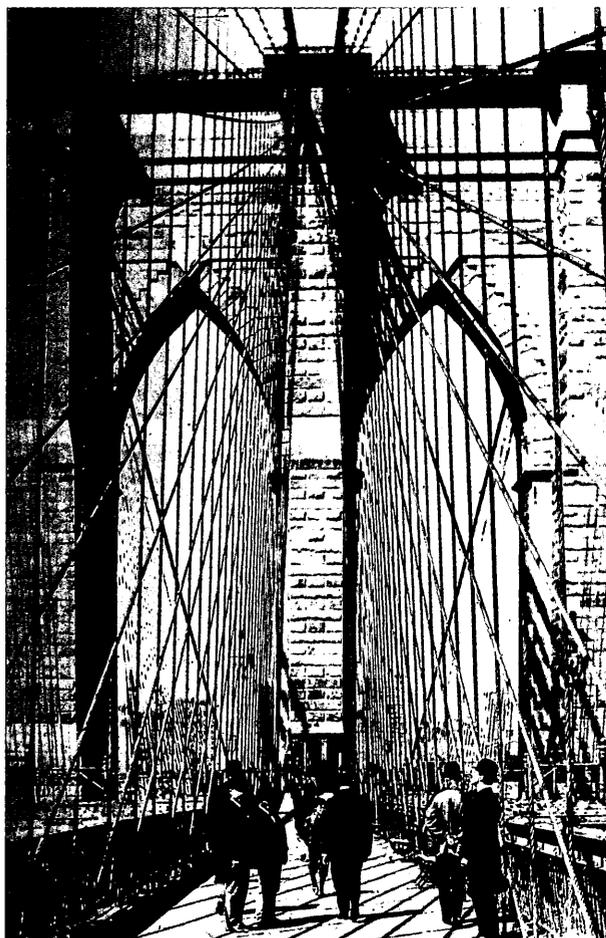
La incidencia de las obras de ingeniería sobre la naturaleza puede analizarse espacialmente a muy diversas escalas, desde la geografía, como ya hizo Fernández Casado (1), hasta el diseño, que pone el énfasis en los más pequeños detalles. Pero la disciplina más adecuada para entender la obra de ingeniería enraizada en su entorno es la del paisaje, pues su carácter comprensivo de lo natural y lo construido proporciona un enfoque óptimo y equilibrado. Con ayuda del concepto de lugar se puede introducir la dimensión humana, tanto en sentido histórico como emocional, al iluminar los significados derivados de la intencionalidad del proyectista y de la utilización histórica de la obra. Con ello, la obra de ingeniería puede ser abarcada de un modo más amplio, que incluye su radicación en la naturaleza, su vinculación con el mundo, y su evolución en el tiempo, como factores básicos de acumulación de sentido.

3. CONSIDERACIÓN PRIMORDIAL DE LA FUNCIÓN

La reflexión sobre forma y función es crucial en la ingeniería civil. Puentes, presas, carreteras o puertos han sido siempre construidos con un claro propósito funcional, que durante siglos ha sido dominante cuando no excluyente en la definición de la obra. Limitaciones tecnológicas, de materiales o procesos constructivos han condicionado fuertemente las posibles soluciones aplicables a problemas concretos de paso, de estabilidad, de recorridos o de abrigo. Muchas veces, la única posibilidad de cruce de un río con un solo vano era un determinado tipo de puente, un arco por ejemplo, con lo que se establecía una forzada vinculación entre la función de cruzar y la forma de arco utilizada.

Aceptado esto, es preciso afrontar la complejidad de la definición funcional de la obra de ingeniería. En primer lugar, se debe tener en cuenta que lo funcional no es único, sino diverso y entremezclado. De manera más o menos explícita, toda obra atiende varios tipos de fines, entre los que es obligado considerar los fines potenciales y los simbólicos. En general, se pueden reconocer tres categorías de cometidos: lo físico (resistencia, vibraciones,

Puente
Brooklyn.



estanqueidad o aislamiento), lo funcional o adecuación al uso, y lo simbólico, tanto en lo social (las obras públicas son vividas como comunidad y manifiestan significados sociales) como en lo cultural (las obras públicas pueden representar objetos culturales, como concepciones religiosas, políticas, filosóficas o cosmológicas).

Seguidamente, es preciso aclarar el grado de coordinación de las diferentes funciones y las prioridades entre ellas señaladas por el proyectista. La excesiva especialización o prioridad absoluta de una función deshumaniza la obra de ingeniería. Además, los cometidos forman estructuras en las cuales hay dominancias y subordinaciones. Otras veces, las diferentes funciones entran en conflicto. Un ejemplo reciente lo constituye la polémica sobre el trazado de los ferrocarriles de alta velocidad: si se considera prioritaria la velocidad (función primigenia) hay que minimizar las paradas (constitución de una red). Los políticos preferirán que pase por más sitios y no que llegue antes, para no tener que pagar el precio electoral de cualquier exclusión.

En tercer lugar, hay que considerar no solo la función sino el uso. Y no el uso abstracto que se presupone pueda

realizar un individuo tipo, sino la concreción de los diversos momentos de uso que relacionan la obra con el hombre como acontecimiento y como acción, y que incluyen el acercamiento, la entrada, el uso, la salida y la simple contemplación.

Por último, hay que tener en cuenta que los cometidos o propósitos de lo construido pueden variar con el tiempo y, de hecho, se puede comprobar que las exigencias de la sociedad se vuelven obsoletas más rápidamente que lo construido. Desde esa perspectiva, la propuesta de Sullivan "Form follows function" (2) dejaría de tener sentido y habría que acercarse a la de Mies van der Rohe, mucho más pragmática, quien decía: "El propósito del edificio varía continuamente, pero no podemos permitirnos el lujo de derribarlo. Por eso rechazamos el lema de Sullivan 'la forma sigue a la función', y construiremos un espacio práctico y económico al que adaptaremos las funciones" (3).

A la vista de lo anterior, es preciso reconocer que la reducción de lo funcional a la estructura propugnada por tantos ingenieros es una simplificación. Parece un síntoma de la habitual carencia de reflexión sobre obras de ingeniería diferentes de los puentes y cubiertas y, en definitiva, de una insuficiente sintaxis ingenieril. El principio de Sullivan plantea una cuestión interesante pero no se debe aplicar solo en cuanto a la expresión de la función resistente, la cual sólo es una más. Debe ser investigado en relación al conjunto de cometidos, como instrumento de aproximación al análisis de la capacidad expresiva de la obra.

Lo funcional está presente en la obra de diferentes maneras y todas ellas acaban trasladándose a la forma. Los canales, por ejemplo, tienen una componente estructural mínima pero evidencian sus funciones tanto en la casi horizontalidad de su alzado, como en la suavidad de sus curvas en planta, exigencias ambas de la hidráulica. La forma cilíndrica de los faros, su altura o su ubicación en la rugosidad de la costa no son determinaciones originadas por la resistencia de materiales, sino por su función de aviso a los navegantes. La organización en planta de una depuradora de aguas residuales resulta de la selección de los tratamientos a aplicar, su concatenación y las restricciones del espacio disponible, con exigencias resistentes de escasa o nula influencia (4).

En una consideración completa o esencial de la obra de ingeniería, es importante reflexionar sobre el conjunto de la obra. Normalmente la obra de ingeniería tiene muchas dimensiones y su interés aumenta cuando eso se hace patente. Un caso claro, que es imposible de obviar si se quiere entender la obra como totalidad, es la dimensión simbólica de la ingeniería. El anterior ejemplo del AVE muestra también perfiles de la incidencia de lo simbólico en las decisiones de planificación. Una vez que se

realiza la primera línea de alta velocidad, surgen las obligadas comparaciones: Si Sevilla y Barcelona tienen AVE con Madrid, ¿cómo no lo va a tener Valencia, que es la tercera ciudad de España?. Disponer de la alta velocidad se ha convertido también en un símbolo de estatus de una ciudad.

El puente de Brooklyn es otro ejemplo, pero de diferente naturaleza: materializa lo simbólico al cumplir un cometido. No es que se convirtiera en simbólico con el paso de los años, es que fue diseñado teniendo en cuenta su inevitable potencial simbólico. Su creador Roebling fue consciente de la trascendencia de la obra desde el inicio de su concepción. Para unir la isla de Manhattan con Brooklyn, diseñó un puente con un 25% más de luz que el mayor de los construidos hasta entonces. Desde el arranque del proyecto quiso que sus pilas expresaran esa grandeza: quería unas torres que fuesen verdaderos monumentos (5), y vaticinó que el puente convertiría a Nueva York en el nuevo centro del mundo (6). Desde su inauguración, el puente cumple su función de paso, pero también ha sido un importante símbolo del poderío de la ciudad.

4. LO ESTRICTO Y LO SUPERFLUO

Es característico de la ingeniería circunscribirse a lo esencial y rechazar lo accesorio. La exigencia de que todo parezca obedecer por entero a necesidad y conveniencia, formulada por Alberti, siempre ha sido premisa del diseño. Las formas innecesarias, al igual que las palabras innecesarias tornan confuso el significado.

Decía Ledoux: "todo lo que no es indispensable fatiga los ojos, obstruye la mente y no agrega cosa alguna al conjunto" (7). El fraile Carlo Lodoli, defensor a ultranza del funcionalismo en el siglo XVIII, propugnaba la radical eliminación de todo lo que no derive de la más estricta necesidad, y rechazaba también todo ornamento inútil. Su coetáneo Francesco Milizia, iba más lejos y consideraba que en un edificio no debe introducirse cosa alguna que no tenga un papel apropiado que cumplir y que no forme parte integral del mismo.

Sin embargo, con el racionalismo y la industrialización, la referencia a lo necesario como justificación estética se degrada o particulariza para referirse simplemente a lo económico. Y es, precisamente, en el entorno de los ingenieros donde se encuentran las primeras referencias a las justificaciones económicas de la belleza. Para el arquitecto Jean Louis Durand, profesor de la École Polytechnique desde 1795 hasta 1830 con gran influencia sobre varias generaciones de ingenieros, el principio de la economía es un principio clave. No solo justifica con él su rechazo a la decoración inútil, sino que le atribuye un papel 'activo' en la consecución de la belleza. Para él, "es falaz



Presa de Gadarranque.

suponer que la belleza o la economía son incompatibles, o siquiera simplemente compatibles, puesto que la segunda es una de las principales causas de la primera" (8).

Sin embargo, esta referencia a lo económico como generador de belleza ha sido claramente superada, al considerarla una simple particularización de un concepto más amplio. La formulación de lo 'estricto' realizada por Fernández Casado enriquece sobremedida el sentido particular de lo económico al extenderlo a numerosas parcelas del proyecto. En su presentación de la colección de puentes de altura estricta (9), enuncia la aplicación de lo estricto a los puentes con la idea de "conseguir la menor elevación de la rasante, ajustándose lo más posible al gálibo obligado, para alterar de modo mínimo el perfil de la carretera". La solución surgía frente al empleo tradicional de arcos, que requieren "elevar la rasante de un modo forzado, con lo que el tramo de puente queda levantado, produciendo una discontinuidad en el paisaje y un lomo de asno en la carretera".

Don Carlos diferencia claramente lo estricto de lo económico, cuando señala que "Esto, además, tiene una ventaja económica por reducir la importancia de los accesos, terraplenes, muros de acompañamiento, nuevo pavimento en caso de variantes y la superficie de terreno ocupada por los derrames del terraplén". Y recurre a la estética para perfeccionar este tipo de puentes: "La estética de una obra es muy importante para el perfeccionamiento del tipo a que pertenece". Lo estricto debe posibilitar un nuevo tipo de puentes que impresionen "de modo placentero a nuestra inteligencia".

La conquista de la ligereza es una formulación que se basa en similares presupuestos. El ahorro de peso que está implícito en ella no se busca simplemente porque suponga un menor coste económico de material. Como más

adelante se verá, la ligereza es un requisito básico de lo ingenieril cuando se trata de alcanzar dimensiones importantes. Para conseguirla se pueden emplear multitud de técnicas que pueden encarecer la obra, pero que facilitan el logro de lo que con mayor abundancia de material no sería abordable.

En el polo opuesto, es frecuente la aparición de soluciones estructurales más pesadas de lo necesario, que han sido utilizadas por circunstancias coyunturales de abaratamiento. Por ejemplo, la existencia de moldes o encofrados de hormigón pertenecientes a una obra anterior de mayores dimensiones permitiría reducir el coste al evitar la construcción de unos nuevos y compensaría, quizás sobradamente, el coste del exceso de material en la nueva construcción. Y esto que es, indudablemente, más económico no es un rasgo peculiar de la ingeniería sino pura conveniencia o mero oportunismo. Aunque sea justificable o deseable, lo económico no constituye una categoría esencial de lo ingenieril: simplemente lo afecta como a cualquier otra actividad del ser humano.

En la exigencia de lo necesario y en la negación de lo superfluo subyace la presencia de la racionalidad o el orden, lo cual sí es característico de la actitud ingenieril. Los presupuestos racionales exigen claridad y simplicidad: el pensamiento racional busca

en el arte, como en todas las cosas, un orden y una lógica. La concepción racional del arte induce, asimismo, a admirar la perfección técnica: desde muy antiguo existe una indudable tendencia a identificar belleza con perfección.

5. SUAVIDAD DE LAS TRANSICIONES TECNOLÓGICAS

Es también destacable la suavidad de las variaciones que muestra la apariencia de las obras de ingeniería. Las formas y tipologías utilizadas por los ingenieros siguen pautas muy estables frente a modas o variaciones de estilo. En arquitectura, los edificios se adaptan a las nuevas tendencias estilísticas de forma muy rápida: el post modernismo, por ejemplo, se esparce con rapidez y, cuando pasa de moda, desaparece de forma brusca. En la ingeniería, en cambio, las innovaciones técnicas de materiales y procedimientos se implantan muy lentamente, tienen que demostrar su adecuación y durabilidad frente a factores muy impredecibles.

Por ello, es usual que las nuevas soluciones ingenieriles convivan con las anteriores. Esto sucede no solamente en cuanto a determinadas técnicas o materiales, sino en todo el conjunto de funciones a satisfacer, materiales para la construcción o medios disponibles para realizar la obra. Un repaso de la historia reciente de la ingeniería pone en seguida de manifiesto como conviven o resucitan funciones, materiales o medios durante largos períodos de tiempo.

El caso de los diferentes modos de transporte es un buen indicador de esa estabilidad. Con el desarrollo de los canales, la navegación fluvial complementó a la marítima de tal manera que, a principios del XIX, el transporte de mercancías parecía indisolublemente ligado a la navegación. El ferrocarril tuvo un desarrollo espectacular, pero convivió con el transporte por barcas durante más de un siglo. A raíz del desarrollo del automóvil, la carretera supuso una gran amenaza para el ferrocarril, pero su saturación ha obligado a resucitar aquel con las nuevas tecnologías de la alta velocidad, para los pasajeros, y el desarrollo del transporte combinado para mercancías. La flexibilidad del avión le permite concentrarse en largos recorridos, cuando la saturación del tráfico aéreo ha reducido su utilidad en distancias cortas. Todo ello obliga a considerar los distintos modos que han surgido en diferentes momentos históricos con una visión territorial única, y proporciona una gran relevancia a los intercambiadores entre modos (10).

La sustitución paulatina de materiales de construcción clásicos por otros nuevos desarrollados por la tecnología es otro ejemplo de esa estabilidad. La aparición del hierro a finales del XVIII fue decisiva para la ingeniería, pero los puentes adaptaron sus formas antiguas al nuevo material y se siguió empleando la piedra durante todo el siglo XIX (11). El renacimiento del hormigón a principios del XX, hecho realidad gracias al desarrollo del cemento Portland, no terminó con el empleo del hierro y del acero, sino que permitió una especialización estructural en función de las características resistentes de cada uno de ellos. La evolución de la ciencia de la resistencia de los materiales ha consagrado su empleo conjunto en los puentes mixtos de finales de siglo.

Diferentes tipologías estructurales han entrado o salido suavemente de la escena de la construcción en función de los avances en materiales y en procesos constructivos. Por ejemplo, los puentes en vigas por voladizos sucesivos, contruidos con la ayuda de la prefabricación o de los encofrados deslizantes, se han prolongado de manera natural en los puentes atirantados. Los adelantos en la tecnología de anclajes han permitido sacar el cable del interior de la sección y colocarlo a mayor distancia de la fibra neutra con el consiguiente ahorro de material, en una secuencia de bastantes años y completa coexistencia de ambos tipos.



Puente
Britannia.
Estrecho
de Menai.

La riqueza de materiales, sistemas constructivos y tipologías de que se dispone para satisfacer demandas de transporte, abastecimiento de agua o sistemas estructurales proporciona una enorme cantidad de posibles combinaciones, que conviven durante mucho tiempo. Y de esta manera, la apariencia formal de las obras mantiene una regularidad muy alejada de las rápidas variaciones que caracterizan a las actividades más sujetas a las modas.

6. USO EXTENSIVO DE LOS TIPOS

El tipo siempre ha sido una variable de gran importancia para la consideración estética de la obra construida. Aunque procede del exclusivo dominio de la técnica, marca profundamente su apariencia y cualidades estéticas.



Puente de
Osera de Ebro.

De hecho, en el último cuarto de siglo, las exigencias económicas y funcionales se manifiestan prioritariamente por la elección del tipo que, como se verá después, siempre está ligada al proceso constructivo.

La invención o el desarrollo de algo nuevo se basa siempre en un germen preexistente. La idea de tipo se desarrolla en torno a una serie de ejemplos ya realizados que presentan ciertas similitudes, bien en sus esquemas resistentes, bien en su estructura formal o en cualquier elemento esencial de la obra.

Esta idea básica o general en torno al tipo se precisa con diferentes conceptualizaciones. Desde una perspectiva funcionalista, como la forma está determinada por la función, el tipo no es más que la media de las funciones principales. En esa línea, Pevsner organiza su historia de los tipos constructivos en torno a los programas funcionales de los edificios, y aborda como tales el parlamento, el ayuntamiento, el teatro, o la prisión (12). Y Torroja organiza en su 'Razón y Ser' los tipos estructurales en torno al arco, la viga, el pórtico o la catenaria (13).

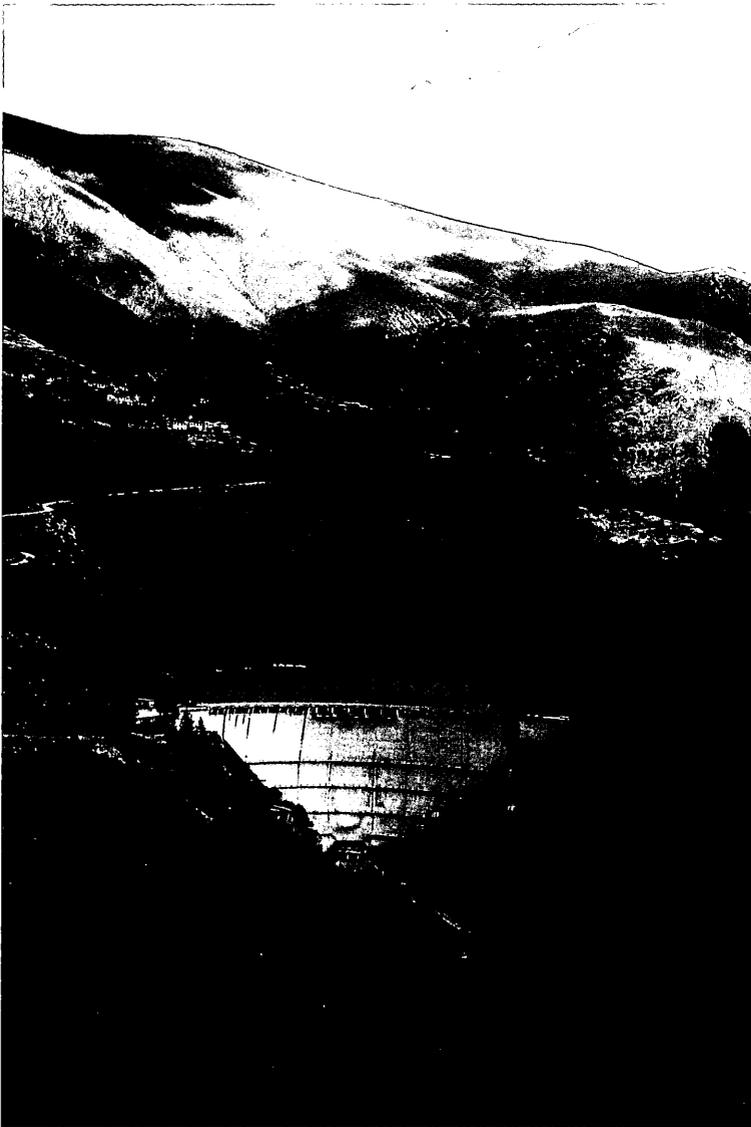
Otra aproximación considera los tipos más como reglas que como formas básicas. En ese sentido, Rossi considera que el concepto de tipo es algo permanente y complejo a la vez, "un enunciado lógico que precede a la forma y la constituye". El tipo es un elemento de composición irreductible, una especie de pre-elemento o elemento primero (14).

El tipo se compone de principios, más que de formas cerradas; son los principios los que determinan la figura que va a ser cada obra particular. Por ello, el tipo se utiliza no para copiar algo que pueda ser considerado como un modelo para ser reproducido, sino para entroncar con el dominio taxonómico previamente definido por ese conjunto de principios.

El concepto de tipo actuó siempre como principio para el transvase entre historia y proyecto. Es lo que relaciona a la obra con unos precedentes estructurales, formales o funcionales que se han configurado como una abstracción básica en la disciplina tecnológica particular de la obra. Por la tipología entra en la obra todo el caudal de experiencia ingenieril, que se ha objetivado a lo largo de la historia en una síntesis generadora de múltiples posibilidades.

En este sentido, el tipo debe considerarse como variable ajena al lugar. Funciona como vehículo para la entrada del material y de la técnica, que son patrimonio de la tecnología, en las condiciones de entorno de cada obra concreta. Eso produce una fuente de impactos potenciales sobre el carácter del lugar, asociado a una tecnología vernácula de improbable utilización actual.

En la actualidad, la tipología está pasando a un plano menos relevante. Con el ordenador, ya no son imprescindibles aquellos esquemas claros y tajantes que facilitaban



Presa de
Santa Eulalia.

el cálculo y sobre los que se va consolidando la tecnología. Antes de su empleo, la casuística de los sistemas estructurales y de las dificultades del cálculo mandaba sobre el diseño. Pero el ordenador los unifica con el tratamiento sistemático de los grandes programas, los cuales sirven tanto para el cálculo de estructuras, como para resolver problemas de hidráulica o de transmisión de calor.

En principio, la utilización del algoritmo permite prescindir de la visión analógica, de la referencia a una forma o pre-concepción que facilite la materialización de las ideas. Gracias a su velocidad de simulación y de cálculo, el ordenador vuelve a hacer factible el clásico procedimiento de innovación por el método de prueba y error, ahora desarrollado en pocos minutos. No obstante, todos los creadores del mundo de la construcción, pues en esto coinciden arquitectos e ingenieros, consideran imprescindible la recuperación

de la aproximación directa, analógica o conceptual como única posibilidad creativa que evite la banalización producida por el algoritmo.

7. IMPORTANCIA DEL TAMAÑO

El tamaño es otra de las características obvias de la obra de ingeniería. A menudo, es el tamaño quien delimita la frontera inferior del quehacer del ingeniero tanto como el tipo de construcción a realizar. Así como es concebible, e incluso habitual, la participación de otras profesiones en obras de pequeño tamaño, se asume el protagonismo indiscutible del ingeniero en las grandes.

En multitud de ocasiones el tamaño es la medida de la importancia de la obra. Los puentes colgantes, por ejemplo se miden y se contrastan contra las grandes realizaciones en términos de la luz salvada. La utilización del récord de altura de una torre o de una presa, o de la luz de un determinado tipo de puente sirve de referencia inmediata para situarlo en una escala de importancia. Una determinada solución es considerada relevante si su utilización ha permitido superar las anteriores en términos cuantitativos. El tamaño es, de algún modo, una referencia constante en la crítica de la obra de ingeniería (15).

El tamaño real o la escala se mide con respecto a una dimensión de comparación, que es la medida del hombre. Por ello, la escala suele emplearse para designar la comparación entre el tamaño de la obra y el del hombre, y cada tipo de obra de ingeniería tiene una escala diferente. Las propiedades morfológicas cambian con el tamaño de la obra, hasta el punto de que una organización formal claramente reconocible a una escala dada puede desaparecer cuando cambian las dimensiones. En general, lo construido no responde a un orden de tipo fractal, capaz de reconocerse a diferentes niveles de actuación, sino que tiene un rango de validez de tamaño, pequeño o grande pero bien definido.

La razón primaria de ello, aunque no la única, es evidente y se explica con la ley del cuadrado - cubo, propuesta por Galileo. Cuando variamos la escala, el peso de la estructura crece con el cubo de sus dimensiones; es decir, si duplicamos los lados, el peso se multiplica por ocho. Sin embargo, el área de las secciones que deben soportar esas cargas crece sólo con el cuadrado de esas dimensiones, por lo cual, en una estructura de dimensiones duplicadas las secciones se multiplicarían por cuatro. De esta forma, las tensiones se duplicarían. Por ello, resulta peligroso aumentar la escala de las estructuras previas, mientras que su reproducción a escalas más pequeñas suele ser un dispendio (16).

Además, en las grandes estructuras se deben tener en cuenta solicitaciones externas que son irrelevantes en es-

estructuras más pequeñas. La acción del viento, por ejemplo, es despreciable en un puente pequeño donde la anchura del tablero y las prácticas normales de disposición constructiva de los elementos son suficientes sin ninguna medida específica. Sin embargo, en un puente colgante de 800 m. de luz los esfuerzos de viento condicionan el diseño y pueden obligar a determinados dispositivos de interacción entre el tablero y las pilas o estribos. En un puente de ferrocarril de gran luz, los esfuerzos de frenado o de aceleración, sumados al balanceo y las vibraciones requieren dispositivos de rigidez y resistencia horizontal que son innecesarios en pequeñas luces.

Por otra parte, determinados fenómenos de inestabilidad dependen de una variación más que proporcional (a veces exponencial) de las dimensiones. Por ejemplo, la carga crítica de pandeo es función inversa del cuadrado de la longitud de la pieza sometida a compresión, tal como definió Euler. Ello determina que, a medida que la longitud aumenta, la resistencia disminuye muy rápidamente y es preciso buscar otra disposición de los elementos que anule ese efecto, como podría ser la colocación de un apoyo lateral, por ejemplo.

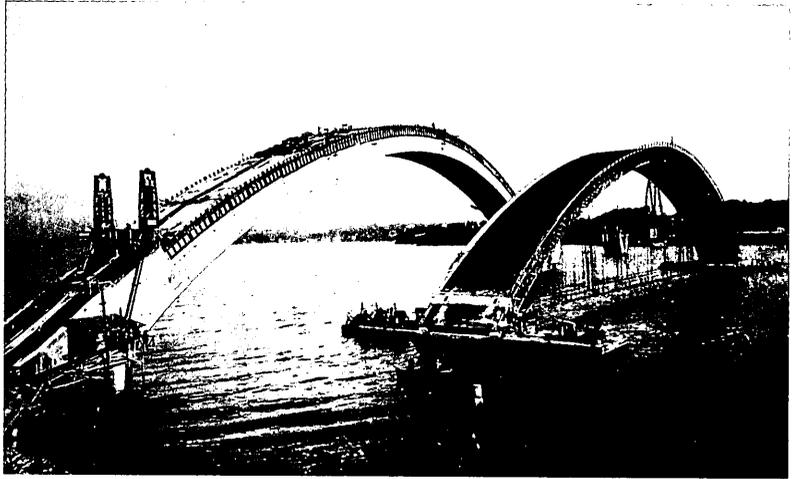
Cuando aumenta el tamaño, el rango de posibles soluciones tipológicas se estrecha, las dimensiones de la obra entran en tensión y algunas variables adquieren prioridad absoluta. La disposición de los elementos y su formas de trabajar deben ser revisadas si se quiere que los pesos se mantengan en rangos adecuados.

Las dimensiones de las piezas son relevantes para la decisión del modo de trabajo, e incluso para la determinación del número de ellas a disponer. En un pórtico de escasa altura, por ejemplo, puede ser irrelevante disponer seis u ocho columnas. Pero si aumenta la altura y se quiere mantener un gasto similar de material será probablemente necesario reducirlas a seis. En las piezas a tracción, en cambio, la influencia es menor porque lo relevante es el coste de los anclajes (17).

En el diseño de cubiertas de grandes luces, donde el control del peso es absolutamente determinante, la elección de la tipología se vuelve crucial. En muchos casos, las soluciones históricas no sirven y el espacio para la innovación es amplio. Y, simultáneamente, el proceso constructivo deviene parte integrante de la solución, de forma que la viabilidad de la obra radica en el afinado acuerdo entre dimensionamiento y proceso de puesta en obra.

8. VINCULACIÓN DEL DISEÑO AL PROCESO CONSTRUCTIVO

En las grandes estructuras de la antigüedad, de importancia histórica y alto contenido ingenieril, el proceso constructivo no era esencial, bastaba la buena artesanía



Puente Plougastel.

de construcción. Desde luego, con mejores técnicas y medios, las obras eran realizadas con mayor calidad y más deprisa, pero el proceso no formaba parte indisoluble de la obra. Lo significativo venía aportado por la disposición del material en una forma efectiva.

Los nuevos materiales surgidos desde el siglo XIX no trajeron consigo especiales exigencias de proceso, pero sus posibilidades en cuanto al tamaño obligaron a perfeccionar los procesos para convertir en realidades las grandes obras anticipadas por sus mejores características resistentes.

En muchos casos y teniendo en cuenta los parámetros de viabilidad de la época, la obra sólo es posible en función de una concepción absolutamente vinculada al proceso constructivo. Por ejemplo, el desarrollo de los puentes en viga de hormigón pretensado logró importantes avances con los procesos de construcción por voladizos sucesivos y de dovelas prefabricadas. O también, la construcción en altura se simplificó enormemente con el empleo de encofrados deslizantes y grúas autoelevables.

Puente Ciérvana.



En muchos casos, el proceso constructivo tiene la clave de la viabilidad de la solución. Las estructuras mixtas, por ejemplo, han puesto de manifiesto la trascendencia del proceso constructivo en los estados resistentes de la obra: el momento en que se ponen a trabajar conjuntamente ambos materiales, la existencia de apeos, la utilización de pretensados, la forma de descimbrar y muchas otras variables constructivas son responsables directos de la capacidad resistente de la obra y de sus estados tensionales. En definitiva, la historia de la obra es directamente responsable de la capacidad resistente final.

Los grandes creadores generan sus propuestas de diseño contando con procesos constructivos específicos. Hablando de la adecuación de la forma a los medios de ejecución con que se cuenta de antemano, Freyssinet llegó a decir "Aunque este orden pueda parecer lógico (se proyecta primero y se ejecuta

después), esta concepción es enteramente falsa. Para todas las construcciones, aun las más modestas, el trazado de formas supone el conocimiento previo de los medios de ejecución".

El proceso constructivo utilizado por él en Plougastel, récord del mundo de puentes de hormigón, debe entenderse como parte sustancial de la completa concepción de la obra. La cimbra, con 150 m. de luz, tensada en todas direcciones por cables y realizada con simples tablones claveteados de 4 cm. de espesor, es una de las estructuras de madera más extraordinarias de la historia de la construcción. Se empleó sucesivamente para los tres arcos, trasladándose sobre dos barcasas de hormigón que le servían de apoyo flotante. Veinte años después, cuando el arco se reconstruyó tras la guerra, no se encontró mejor técnica que reproducir exactamente la cimbra inicial y utilizar el mismo proceso constructivo (18). ■

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Fernández Casado, Carlos; 1948 - 1954. Expresión geográfica de las obras de Ingeniería. *Revista de Estudios Geográficos*, Madrid .
- (2) La idea viene de la antigua regla de Lamark y fue reformulada con éxito por el arquitecto Louis H. Sullivan hacia finales del siglo XIX
- (3) Citado en Norberg-Schulz, Christian; 1967. *Intensjoner i arkitekturen*. Universitetsforlaget, Oslo. Ed. Esp. *Intenciones en arquitectura*. Gustavo Gili, Barcelona, 1998: 171.
- (4) Sarabia, Antonio; Aguiló Alonso, Miguel; 1995. *Depuradoras en Madrid: Tecnología y arquitectura industrial en el Canal de Isabel II*. Canal de Isabel II, Madrid: 53.
- (5) Roebling, John; 1867. *Report of J. Roebling to the President and Directors of the New York Building Company, on the proposed East River Bridge*. New York.
- (6) Trachtenberg, Alan; 1965. *Brooklyn Bridge fact and symbol*. Oxford University Press, New York: 85.
- (7) Zurko, Edward R. de; 1957. *Origins of functionalist theory*. Columbia University Press, New York. Ed. esp.: *La teoría del funcionalismo en la arquitectura*. Nueva Visión, Buenos Aires, 1970: 156.
- (8) Durand, Jean Louis; 1802. *Précis de leçons d'architecture donné à l'École Polytechnique*. I, 20.
- (9) Fernández Casado, Carlos; 1955. *Puentes de altura estricta: Realizaciones desde 1933 a 1955*. Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, Madrid
- (10) Aguiló Alonso, Miguel; 1999c. *Infraestructuras para un transporte más sostenible: Ferrocarril en los aeropuertos. Comunicación al III Congreso de la Ingeniería Civil*, Barcelona 24-26 de noviembre. Recogida en el tomo I, 147-150: 147.
- (11) Aguiló Alonso, Miguel; 1977. *Un viaje por viejos puentes*. *Hormigón y Acero*, 123, (1977): 6181: 67.
- (12) Pevsner, Nikolaus; 1976. *A History of Building Types*. Princeton.
- (13) Torroja y Miret, Eduardo; 1960. *Razón y Ser de los tipos estructurales*. Instituto Eduardo Torroja, Madrid.
- (14) Rossi, Aldo; 1967. *L'architettura della città*. Milano. Ed. esp.: *La arquitectura de la ciudad*. Gili, Barcelona, 1971.
- (15) Aguiló Alonso, Miguel; 1983. *Función y diseño en las torres de los puentes colgantes*. *Revista de Obras Públicas*, (Sep., 1983): 637-656: 638.
- (16) Gordon, J. E.; 1978. *Structures, or why things don't fall down*. Pelican Books. Ed. Esp. *Estructuras o por qué las cosas no se caen*. Celeste, Madrid, 1999: 221.
- (17) Gordon, 1978: 365.
- (18) Fernández Ordóñez, José A.; 1978. *Eugène Freyssinet*. 2c Ediciones, Barcelona.: 102, 129 y 137