



David Billington Estructuras y Arquitectura
Selección de **La Torre y el Puente** Madrid, Cinter divulgación técnica, 2013

ESTRUCTURAS Y ARQUITECTURA

El mundo moderno tiende a clasificar las torres, los estadios e incluso los puentes como arquitectura. Esta clasificación es otra falacia, similar a la de la confusión de la tecnología con la ciencia aplicada y con las máquinas, aunque más sutil. En este caso incluso la palabra es un problema, porque el término “arquitecto” viene del griego y significa “técnico en jefe”. Pero a partir de la Revolución Industrial, la estructura se transformó en una forma de arte independiente y separada de la arquitectura. Las formas visibles de la Torre Eiffel y del Puente de Brooklyn son el resultado directo de unas ideas tecnológicas y de la experiencia e imaginación de ingenieros estructurales concretos. En algunas ocasiones, los ingenieros trabajaron con arquitectos, como también lo hicieron con ingenieros mecánicos o eléctricos, pero las formas proceden directamente de ideas de ingeniería estructural.

Los proyectistas de estructuras dan forma a objetos de relativa gran escala y de un único uso y ven las formas como un medio para controlar las fuerzas de la naturaleza que la estructura debe resistir. En cambio, los arquitectos dan forma a objetos de relativa pequeña escala y complejo uso humano y ven las formas como un medio para controlar los espacios que el hombre empleará. La forma ingenieril arquetípica, el puente público, no necesita de ningún arquitecto. La forma arquetípica de la arquitectura, la vivienda privada, no requiere ingeniero alguno. Hemos visto con anterioridad cómo científicos e ingenieros desarrollan sus ideas en paralelo y, en ocasiones, con mucha discusión, y que los ingenieros estructurales dependen de los ingenieros de maquinaria para construir sus obras. De manera análoga, ingenieros estructurales y arquitectos aprenden unos de otros y, en algunos casos, colaboran con resultados muy fructíferos, especialmente en aquellos en los que la gran escala va acompañada de un uso complejo, como sucede en los edificios altos o rascacielos. Pero los ámbitos de actuación de arquitectos e ingenieros son generalmente diferentes.

Las obras de Arte Estructural han surgido de las ideas de ingenieros que procedían mayoritariamente de un nuevo tipo de escuela, desacostumbrada antes de finales del siglo VIII: la escuela politécnica. Los ingenieros crearon nuevas asociaciones profesionales, trabajaron con nuevos materiales e impulsaron a los pensadores políticos a imaginar nuevas visiones de la sociedad futura. Sus escuelas implantaron planes de estudio que, de forma decidida, cortaron todos los lazos que previamente existían entre los que hacían formas arquitectónicas y los que empezaban a proyectar y construir las nuevas formas ingenieriles (primero con estructura metálica y, más tarde, con hormigón armado), por las que se reconoce en todas partes del mundo moderno. Para estas formas que se estrenaban ya no resultaban válidas las ideas heredadas de la antigüedad y relativas a la construcción con piedra, puesto que eran esenciales nuevas ideas para construir con los nuevos materiales.

Estas nuevas ideas rompían tan radicalmente con el gusto tradicional que fueron rechazadas por la clase cultural dirigente en lo que es un problema clásico en la historia del arte: las formas nuevas ofenden con frecuencia a los académicos. En este caso concreto, la confrontación fue entre el estilo beaux arts (“bellas artes”) y las artes estructurales. El esqueleto metálico del siglo XIX ofendía a la mayoría de los arquitectos y líderes culturales. De hecho, nuevos edificios y puentes urbanos sufrieron de desesperados intentos por ocultar su estructura o desfigurarla mediante elementos que imitaran las formas estructurales empleadas con la mampostería. Ya en el siglo XX, el hormigón armado tuvo que hacer frente a problemas similares. Aunque algunas personas pudieron ver el potencial que el hormigón

tenía para generar nuevas formas y ligereza, la mayoría de los arquitectos intentaron decididamente hacer que el hormigón se pareciera a la piedra o, más tarde, a las emergentes abstracciones del arte moderno. Había una sensación profundamente extendida de que la ingeniería por sí sola era insuficiente.

Los conservadores aburridos y trabajadores técnicos pueden ser, como escribió el arquitecto Le Corbusier, “prósperos y viriles, activos y útiles, equilibrados y felices en su trabajo, pero solamente el arquitecto, a través de la disposición y definición de formas, comprende que hay un orden que es una creación pura de su alma...en ese momento experimentamos la sensación de belleza”. La creencia de que el ingeniero feliz, como el buen salvaje, puede crear objetos útiles a los que únicamente el arquitecto puede transformar en arte ignora la importancia que el artista estructural otorga a la estética. Es cierto que la estructura es solo una parte del proyecto de obras arquitectónicas como una vivienda privada, una escuela o un hospital, pero en torres, puentes, cubiertas de gran luz y en muchas clases de edificios industriales las consideraciones de tipo estético proporcionan importantes criterios de proyecto al ingeniero. Las mejores de estas obras de ingeniería son ejemplos de Arte Estructural y se encuentran con una frecuencia suficiente como para que esté justificado considerar al Arte Estructural como una tradición madura con un carácter único. Este carácter tiene tres dimensiones.

LAS TRES DIMENSIONES DE LA ESTRUCTURA

La primera dimensión de la estructura es la científica. Cada estructura o máquina debe funcionar de acuerdo con las leyes de la naturaleza. En este sentido, la tecnología forma parte del mundo natural y los métodos de análisis que permiten a los científicos explicar fenómenos naturales son, a menudo, también útiles al ingeniero para describir el comportamiento de sus creaciones artificiales. De hecho, la falacia de que la ingeniería es ciencia aplicada se alimenta en gran parte de esta similitud de método. No obstante, los científicos buscan descubrir formas preexistentes y explicar su comportamiento mediante fórmulas por ellos inventadas, mientras que los ingenieros quieren inventar formas empleando fórmulas preexistentes para comprobar sus diseños. Debido a que las formas estudiadas por los científicos son muy diferentes de las de los ingenieros, los métodos de análisis diferirán aunque ambos tipos de formas deben obedecer a las mismas leyes naturales, ya que existen en el mundo natural. La dimensión científica se mide a través de la eficiencia de la estructura.

Las formas tecnológicas existen incluso en el mundo social y son modeladas tanto por las leyes de la naturaleza como por el curso de la economía y la política. Por ello, la segunda dimensión de la estructura es la social. En el pasado o en sociedades actuales primitivas, era posible que las formas más elementales de estructuras terminadas o de maquinaria fueran obra de una sola persona. Sin embargo, en el mundo civilizado estas formas tecnológicas son el producto de una sociedad. La ciudadanía debe apoyarlas con los impuestos o mediante el comercio privado. La economía mide la dimensión social de la estructura.

Los objetos tecnológicos dominan visualmente nuestro paisaje industrial y urbano y se encuentran entre los símbolos más poderosos de los tiempos modernos. Estructuras y máquinas definen nuestro entorno. Así, la locomotora del siglo XIX dio paso, en el siglo XX al automóvil y al avión. Y todos estos elementos han requerido grandes complejos que incluyen

tanto las estructuras como las máquinas, unos complejos cuyo diseño y construcción han sido, y son, asuntos públicos de gran envergadura. Centrales eléctricas, sistemas de armas, refinerías, obras hidráulicas... todos ellos simbolizan las promesas y los problemas de la civilización industrial.

El puente del Golden Gate de San Francisco y los puentes George Washington y Verrazano de Nueva York continúan las tradiciones establecidas por el puente de Brooklyn. El edificio John Hancock y la torre Sears de Chicago, el edificio Woolworth, el Empire State y las Torres Gemelas, en Nueva York, recogieron el testigo de la Torre Eiffel y la adaptaron a la utilidad necesaria en los edificios urbanos de oficinas y apartamentos. [...]

Casi todos los americanos conocen algún aspecto de estas inmensas estructuras del siglo XX y las ciudades modernas se publicitan haciendo referencia a este tipo de obras. Tal y como el primer crítico americano de las estructuras, Montgomery Schuyler, escribió en el siglo XIX con motivo de la inauguración del puente de Brooklyn "resulta que la obra que probablemente es nuestro monumento más duradero, y que transmitirá más información sobre nosotros a la más remota posteridad, es un puente, una obra de desnuda utilidad, y no un santuario, una fortaleza o un palacio. Esta es la característica de nuestro tiempo". Por ello la tercera dimensión de la tecnología es la simbólica y esta es, por supuesto, la dimensión que abre la posibilidad a la nueva ingeniería de llegar a ser Arte Estructural. Aunque la dimensión simbólica no se puede medir, reconocemos un símbolo por su elegancia y poder expresivo.

Tres tipos de diseñadores trabajan con las formas en el espacio: el ingeniero, el arquitecto y el escultor. Cada uno de ellos debe considerar los tres criterios o dimensiones previamente discutidos al crear una forma. El criterio científico se traduce básicamente en crear estructuras que empleen una cantidad mínima de materiales y que, al mismo tiempo, tengan una capacidad de resistencia suficiente frente a las acciones medioambientales y frente a las cargas que soportan. De este modo, su permanencia en el tiempo queda asegurada. La preocupación por la seguridad arbitra este análisis de eficiencia frente a resistencia. El criterio social se refiere principalmente a un análisis del coste de la forma frente a su utilidad para la sociedad. Este tipo de análisis coste-beneficio se realiza en el contexto definido por la política. Finalmente, el criterio simbólico consiste en estudios de la apariencia de la obra junto a consideraciones sobre cómo la elegancia puede ser alcanzada en el marco de las restricciones impuestas por los criterios científico y social. Esta es la base ética y estética sobre la que cada diseñador individual edifica su obra.

Para el proyectista de estructuras, el criterio científico es el más importante, mientras que para el arquitecto y el escultor los criterios primordiales son el social y el simbólico, respectivamente. No obstante el proyectista de estructuras debe equilibrar el criterio científico con los otros dos. Es cierto que todo Arte Estructural surge de la idea de central de crear formas artificiales que controlan las fuerzas naturales, pero las formas estructurales nunca se construirán si no son, en cierta medida, aceptadas socialmente, porque el deseo del proyectista no es suficiente para materializar una obra. Finalmente, el proyectista debe tener muy presente la estética si quiere que la forma estructural llegue a ser Arte Estructural. Todos los grandes artistas de la estructuran reflexionaron sobre la apariencia de sus diseños. Estos ingenieros hicieron elecciones estéticas conscientes para llegar a la versión final de sus proyectos y sus escritos sobre estética muestran cómo sus proyectos no se basaron exclusivamente en los criterios científico y social de la eficiencia y la economía. De hecho, los

grandes artistas fueron capaces de encontrar y expresar la libertad para inventar nuevas formas estructurales, en el contexto de las restricciones impuestas por los criterios científico y social. Precisamente, la austera disciplina asociada a la minimización de materiales y costes permitió a los grandes artistas estructurales crear nuevas imágenes que pudieron construirse y perdurar.

ARTE ESTRUCTURAL Y SOCIEDAD

Mucha gente estaría de acuerdo que los ideales del Arte Estructural coinciden con los de una sociedad urbana: conservación de los recursos naturales, minimización del gasto público, y creación de un entorno visualmente más atractivo. Tal y como muestra la historia del Arte Estructural, algunos ingenieros han hecho reales estos ideales. Pero se trata de casos aislados, por lo que la pregunta clave es ¿cómo podría transformarse lo excepcional en habitual? Abordemos esta pregunta históricamente, mediante la identificación de las ideas centrales que han estado asociadas al gran Arte Estructural. Estas ideas reflejan cada una de las tres dimensiones de la estructura: la científica, la social y la simbólica.

La principal idea científica es la de reducir el análisis. En el Arte Estructural, esta idea ha coexistido con la tendencia opuesta de poner un énfasis excesivo en el cálculo, una tendencia que hoy en día ejemplifica la fe ciega en el ordenador para realizar cálculos estructurales. El diseño de estructuras laminares de hormigón proporciona un llamativo ejemplo de esta noción. Los mayores avances en este campo entre 1955 y 1980 –una época en la que se realizaron intensos desarrollos analíticos- se consiguieron gracias a la reducción del análisis a ideas muy simples basadas en la observación del comportamiento físico de las estructuras y modelos, en lugar de echar mano a los complejos análisis con ordenadores. Las cubiertas abovedadas caracterizan este avance y ejemplifican una idea científica central en el Arte Estructural: el analista de la forma, puesto que es también su creador, es libre de modificar la misma de modo que la complejidad analítica desaparezca.

La forma controla las fuerzas y cuanto más claramente el proyectista pueda visualizar esas fuerzas, más seguro estará él de su forma. Los grandes artistas estructurales de principios y mediados del siglo XX como Robert Maillart y Pier Luigi Nervi escribieron enérgicamente contra el deseo de complejos análisis. Veremos cómo los mejores proyectistas de finales del siglo XX se manifestaron en el mismo sentido. Cuando la forma se elige correctamente, el análisis resulta asombrosamente sencillo. Por supuesto, el ordenador es cada vez más útil para ahorrar tiempo en los cálculos rutinarios que son necesarios una vez se decide desarrollar un diseño específico y para ayudar al proyectista a través de las herramientas de diseño gráfico. Pero, como sucede con todas las máquinas, el ordenador puede disminuir el trabajo a realizar por el ser humano, pero no reemplazar su creatividad.

En lo que respecta a la dimensión social, la idea principal surgida del Arte Estructural es lo que podría llamarse la economía de los concursos públicos. La calidad en el proyecto se consigue a través del estímulo producido por tener que crear un diseño que debe competir con otros más que por la imposición de complejas normas a un único proyectista. Por lo tanto, las administraciones públicas podrían asegurarse mejores diseños si trasladaran parte del control sobre quien proyecta y qué forma se elige a un público informado y cualificado. El que el público proteste por la construcción de diseños feos y caros no es suficiente. Una actividad positiva es fundamental, y esta solo puede suceder cuando el público ve diseños

alternativos para un mismo proyecto. La historia de los puentes modernos es la mejor forma de ilustrar el sentido y el significado de lo que es un diseño alternativo, aunque el concepto se aplica a todas las obras de ingeniería estructural.

Hay poca tradición en los Estados Unidos de realizar concursos públicos en el campo de las estructuras, pero esa tradición está firmemente enraizada en otro lugar con resultados política y estéticamente espectaculares. Ese lugar es Suiza, un país que tiene la más larga e intensiva tradición de concursos para el proyecto de puentes. Por este motivo, no es casual que sean suizos los ingenieros considerados prácticamente por consenso general como los dos mayores proyectistas de puentes del siglo XX: Robert Maillart (1872-1940), que empleó el hormigón, y Othmar Ammann (1879-1965), que proyectó con acero estructuras como el puente Georges Washington y el puente Verrazano. Que Suiza, un país cuyo tamaño es una sexta parte de la superficie de Colorado y cuya población es inferior a la de la ciudad de Nueva York, haya podido adquirir tal importancia mundial se ha debido al papel central que tanto los ingenieros proyectistas como los profesores universitarios dieron a la economía y a la estética, un papel que los concursos públicos fomentan. Los delgados arcos de hormigón de Maillart fueron la propuesta más económica en concursos, así como el principal foco de atención de la primera exposición en un museo de arte dedicada por entero al trabajo de un ingeniero: la exposición del Museum of Modern Art de la ciudad de Nueva York, dedicada a las estructuras del proyectista suizo. En tanto Othmar Ammann fue honrado de forma similar, pues el centenario de su nacimiento se celebró con dos simposios celebrados en Nueva York y Boston y con una exposición en Suiza. Tanto Maillart como Ammann escribieron claramente sobre la apariencia y la economía de sus puentes y son excelentes ejemplos de artistas estructurales.

La tradición suiza del diseño de puentes continúa hoy en día con un amplio número de asombrosos nuevos puentes de hormigón que siguen las ideas de Maillart sin limitarse al detalle. Las obras más impresionantes posteriores a la Segunda Guerra Mundial son los puentes de Christian Menn. Los arcos y puentes por voladizos sucesivos de Menn llevan la técnica del pretensado a sus límites, tal y como antes hiciera Maillart con el hormigón armado y con sus arcos triarticulados y rigidizados por el tablero. Los concursos públicos estimularon a estos ingenieros a estos ingenieros y educaron también al gran público. Estos concursos deben ser aceptados por las autoridades políticas, valorados por ingenieros cuyas opiniones deben debatirse públicamente en la prensa y, finalmente, deben regirse por normas cuidadosamente establecidas.

Una vez más, las falsas imágenes de la ingeniería nos apartan de seguir nuestro instinto, que nos conduce hacia concursos abiertos. La política americana de obras públicas compara falsamente al proyectista de ingeniería con un médico o con un contratista de obras. Los defensores de la primera comparación señalan que una persona nunca organizaría un concurso para decidir quien le va a extirpar el apéndice, sino que elegiría a unos profesionales en función de su reputación y les permitiría hacer el trabajo especializado para el que se formaron. De forma análoga, si aparecen fisuras en un puente determinado, la solución es contratar a un consultor que tenga una buena reputación en el diagnóstico y reparación de este tipo de problemas. Pero el proyecto no es el mismo tipo de actividad que el diagnóstico y la reparación. Son necesarias más oportunidades para proyectar que ocasiones existen para construir, por lo que los concursos constituyen una excelente forma de practicar el ejercicio de proyectar. Aunque pueda resultar frustrante perder un concurso, la actividad es sana y

permite madurar, especialmente cuando los perdedores son compensados económicamente, como sucede, a menudo, en Suiza.

Para los defensores de la segunda falsa comparación, los concursos públicos deberían funcionar de forma similar a los concursos de obra en los que la oferta más económica conseguiría la adjudicación del proyecto. En Estados Unidos, proyecto y construcción son dos actividades diferenciadas legalmente, suponiendo el coste del proyecto bastante menos del 10 por ciento del coste de la construcción. Por lo tanto, contratar a un ingeniero brillante que invierta más tiempo de lo habitual en el proyecto, frecuentemente se traduce en una reducción del coste final del conjunto proyecto-obra. En cambio, un ingeniero que reduce sus honorarios para conseguir el trabajo puede tener que hacer un diseño más conservador de modo que el coste final del conjunto proyecto-obra fácilmente puede ser más elevado. Por lo tanto, potenciales grandes ahorros para el erario público se echan a perder por la tonta política de ahorrar un poco durante la primera fase de un proyecto.

[...]

Cuando los concursos se plantean de forma apropiada, revelan verdades sobre la sociedad que serían difíciles de obtener por otros medios. De este modo, los diseños resultantes se convierten en símbolos únicos de su tiempo y lugar, lo que nos conduce a una tercera idea importante asociada al gran Arte Estructural: los materiales y las formas poseen un significado simbólico concreto. Pintores, poetas y escritores perspicaces han reconocido en el Arte Estructural un nuevo tipo de símbolo, primero en metal y luego en hormigón, que encaja tanto con las posibilidades de la ingeniería como con las posibilidades inherentes a la democracia. La esbeltez y transparencia de la Torre Eiffel, del puente de Brooklyn y de los arcos de Maillart, así como el fuerte contraste entre sus formas y sus alrededores, guardan una profunda afinidad tanto con las tradiciones políticas como con la época en la que estas estructuras surgieron.

La Torre Eiffel y el puente de Brooklyn se convirtieron en símbolos dominantes, principalmente porque sus formas eran nuevas, transparentes y accesibles al gran público. Esta es una gran diferencia con el Washington Monument de 1884 y con el puente de Londres de 1881, dos sólidas estructuras de mampostería cuya costosa y monumental calidad nos recuerda más a la era preindustrial que a los tiempos democráticos en los que, de hecho, se construyeron. La piedra es un material natural pero, a partir de la Revolución Industrial, su uso en estructuras llevó aparejado un gran coste y, por lo tanto, restricciones a la riqueza. Además, su solidez, su incapacidad para resistir cargas variables, y su consiguiente carácter masivo, implican el empleo de formas pesadas como las de las fortalezas. Las estructuras metálicas y de hormigón correctamente diseñadas son el polo opuesto. Emplean materiales artificiales y sus formas reflejan las fuentes interiores de creatividad que emergen en las sociedades industriales contemporáneas. Estas formas suponen una vida democrática más que autocrática. Cuando forma y estructura se funden en un solo elemento, el resultado es de una ligereza e incluso de una fragilidad equivalente a la esencia de una sociedad abierta y transparente. En efecto, el funcionamiento de un gobierno democrático es transparente y se desarrolla a la vista de todo el mundo y, aunque una democracia pueda estar lejos de ser perfecta, su forma es inseparable de su funcionamiento real (de su estructura). Además, el público debe examinar continuamente su funcionamiento, y un mantenimiento constante y una renovación periódica son esenciales para su estructura. Los políticos no tienen puesto fijo de por vida, sino que deben ser examinados de vez en cuando y, en caso de ser

encontrados corruptos o ineptos, deben ser purificados, castigados y reemplazados. Lo mismo sucede con las obras de Arte Estructural. Ellas también están sujetas a la intemperie y fatiga propias de una existencia en un espacio abierto. Asimismo, nos recuerdan que las instituciones no pertenecen a una élite sino a todos nosotros. El dejar que estas obras se deterioren, como con total descaro sucede en nuestras ciudades y redes de transporte más antiguas, es un signo externo de una corrupción interior de la vida en común en una sociedad democrática libre.

Estas ideas sobre políticas, ciencia y arte alientan e integran el relato histórico del arte en la ingeniería al que ahora nos movemos en lo que constituye la esencia de este libro.

DAVID P. BILLINGTON
LA TORRE Y EL PUENTE
EL NUEVO ARTE DE LA INGENIERIA ESTRUCTURAL

Título Original: The Tower and the Bridge: the New Art of Structural Engineering
Basic Books, New York, 1983

Edición española: Cinter Divulgación Técnica, Madrid, 2013
Traducción: Ignacio Payá Zaforteza