

El diverso origen de nuevas formas estructurales y arquitectónicas: la aparición de nuevos materiales en los siglos XIX y XX frente al desarrollo tecnológico actual

Alejandro Bernabeu Larena

La arquitectura e ingeniería de los siglos XIX y XX se caracterizaron por la aparición de nuevos materiales y sistemas estructurales que, utilizados inicialmente por los ingenieros, supusieron una verdadera revolución en el mundo de la construcción.

Contrariamente, el final del siglo XX y el comienzo del XXI han estado marcados por la ausencia de nuevos materiales estructurales de la relevancia de los ya existentes, así como por las extraordinarias innovaciones en las técnicas auxiliares de proyecto y ejecución, que han hecho posible en la actualidad la resolución de prácticamente cualquier planteamiento formal.

El origen de nuevas formas estructurales y arquitectónicas ha venido determinado por estas dos situaciones contrapuestas, influyendo de manera muy significativa en el grado de relevancia de la estructura en el proyecto y en la relación entre ingenieros y arquitectos.

LA APARICIÓN DE NUEVOS MATERIALES COMO FACTOR CLAVE DEL DESARROLLO DE NUEVAS FORMAS ESTRUCTURALES

El desarrollo de nuevas formas y tipologías.

El origen y desarrollo de nuevas formas estructurales en los siglos XIX y XX estuvo íntimamente ligado a la aparición de nuevos materiales.

Así, la utilización del hierro a partir del siglo XIX supuso una transformación radical del mundo de la construcción, al ofrecer una resistencia y unas posibilidades mucho mayores que las de los materiales

estructurales conocidos hasta entonces (piedra y madera), que permitieron superar rápidamente la escala de las construcciones realizadas anteriormente y cambiar su planteamiento formal.

Una obra clave en este sentido es el Palacio de Cristal (fig. 1), construido en Londres para la Exposición Universal de 1851, y que supone la culminación de las construcciones de hierro y vidrio realizadas en el si-

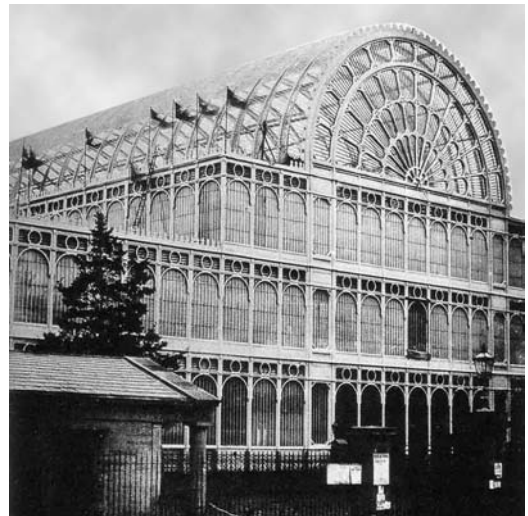


Figura 1
Palacio de Cristal. Londres, 1850–1851. Joseph Paxton. (Picon 1997)

glo XIX. El Palacio de Cristal ofrece una aproximación radicalmente distinta a las construcciones de la época al plantearse como un sistema estructural basado en la repetición de un mismo módulo e introducir los sistemas de producción industrial y prefabricación.

Estas construcciones de hierro y vidrio eliminan además el empleo de muros como elementos portantes, con la consiguiente reducción de carga muerta, todo lo cual redundaba en una mayor simplicidad y transparencia. Reaparece de esta manera la estructura como un elemento visible que contribuye a la arquitectura y los ingenieros pasan a ser miembros necesarios y esenciales del proceso de diseño.

Esta situación alcanza su cenit en la Exposición Universal de París de 1889, con la predominancia de las construcciones de hierro y el apogeo del arte del ingeniero, representado en todo su esplendor por la Torre Eiffel y la Galería de las Máquinas (fig. 2).

Esta última construcción supone un profundo logro técnico, no sólo por el empleo de un sistema de arcos tri-articulados que le permiten salvar grandes luces, sino por el delicado equilibrio alcanzado entre los requisitos estructurales y el refinamiento artístico.

Sin embargo, estas obras de ingeniería son fuertemente contestadas por los arquitectos de la época, que

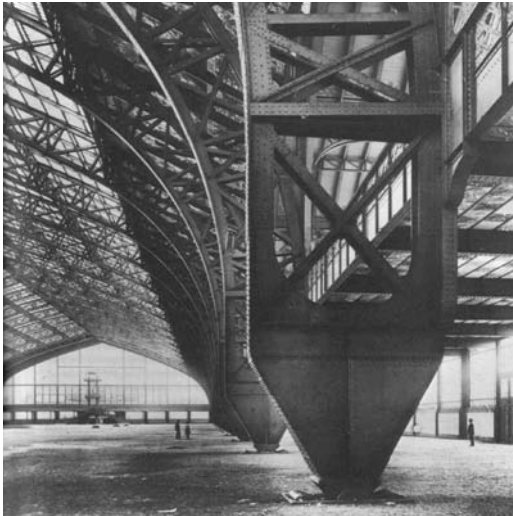


Figura 2
Galería de las Máquinas. París, 1889. Victor Contamin y Ferdinand Dutert. (Deswarte 1997)

las consideran construcciones utilitarias sin valor artístico, y no serán reconocidas como verdaderas obras de arquitectura, fundamentales en el desarrollo de nuevas formas y tipologías, hasta mucho más tarde.

Pero si la construcción del siglo XIX está asociada a las estructuras metálicas y a la industrialización, el siglo XX se caracteriza por la aparición del hormigón, armado primeramente y pretensado más adelante, que revoluciona nuevamente el mundo de la ingeniería y la arquitectura.

Al igual que había ocurrido con las estructuras metálicas, el nuevo material es primeramente utilizado por los ingenieros, y son ellos los que se interesan en estudiar sus propiedades y tratan de determinar los sistemas estructurales que mejor se adecuan a sus características, a fin de optimizar su utilización y definir nuevas estrategias formales.

En este sentido, la labor de ingenieros como Robert Maillart, Eduardo Torroja, Eugène Freyssinet, Pier Luigi Nervi o Riccardo Morandi resulta incontestable, y sus construcciones de puentes y edificios imprescindibles en el establecimiento de las formas arquitectónicas del siglo XX asociadas al hormigón.

Así, proyectos como el Frontón de Recoletos de Torroja (fig. 3) o los Hangares de Orbetello de Nervi (fig. 4), contribuyen determinantemente a definir las nuevas posibilidades formales que el hormigón ofrece, al «establecer de una manera definitiva un procedimiento nuevo de ordenación del material para resistir con el mínimo peso» (Manterola 2002a, 41).

Y, mientras que la aceptación por parte de los arquitectos de las estructuras metálicas en el siglo XIX había sido un proceso lento y costoso, el interés y la admiración que suscitaban las nuevas formas derivadas del hormigón fue mucho más rápido y abierto:

Es a principios del siglo XX cuando se produce una profunda transformación generalizada de la arquitectura, al aceptar las innovaciones tecnológicas y los nuevos materiales como parte fundamental de la nueva arquitectura. Si el hierro fue atacado y despreciado durante muchos años, el hormigón armado se aceptó más fácilmente. Se llegó así a la arquitectura que ha dominado casi todo el siglo XX. El arquitecto se incorporó a las nuevas tecnologías de la construcción y esto supuso una superación casi completa de la polémica arquitectos / ingenieros. (Fernández Troyano 2005, 51)

Esta incorporación de los arquitectos a las nuevas tecnologías derivadas del empleo del hormigón les



Figura 3
Frontón de Recoletos. Madrid, 1935. Eduardo Torroja y Secundino Zuazo. (Torroja 1998)

lleva a colaborar con los ingenieros estructurales, que conocen y controlan las propiedades y posibilidades del nuevo material, lo que unido al interés de determinados ingenieros por establecer unos planteamientos de trabajo conjunto y colaboración termina de cerrar la brecha existente desde el siglo XIX entre arquitectura e ingeniería.

Es en esta situación, en la segunda mitad del siglo XX, cuando se produce la aparición de materiales como el PVC, el PTFE o el ETFE, que posibilitan el desarrollo de las estructuras hinchables y de las grandes cubiertas colgadas (fig. 5). Estos sistemas ofre-

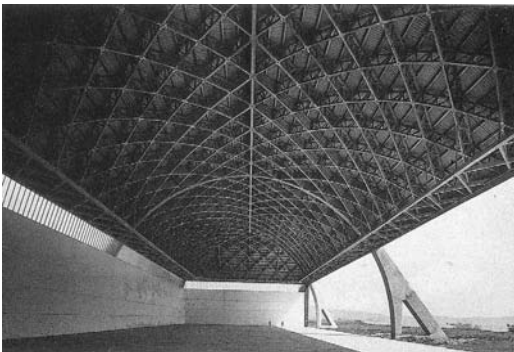


Figura 4
Hangar de Orbetello, 1940. Pier Luigi Nervi. (Picon 1997)



Figura 5
Estadio olímpico de Munich, 1967–1972. Frei Otto, Fritz Leonhardt y Andrä. (Picon 1997)

cen nuevas posibilidades de enfrentar el problema de las grandes luces y amplían aún más el abanico formal de la estructura.

Así, en definitiva, la aparición de nuevos materiales y el desarrollo del conocimiento del hecho estructural durante los siglos XIX y XX fueron el motor que propició el desarrollo de nuevas formas arquitectónicas y estructurales; desarrollo en el que los ingenieros desempeñaron un papel de gran relevancia.

El proceso de asimilación y dominio de los nuevos materiales y tecnologías

Dentro del análisis del origen de nuevas formas como consecuencia de la aparición de nuevos materiales resulta revelador valorar el proceso de asimilación y dominio que siguen habitualmente.

En primer lugar, cuando aparece un nuevo material, las formas y tipologías estructurales que adopta reproducen los sistemas precedentes, característicos de los materiales existentes, sin aprovechar ni expresar las posibilidades que el nuevo material ofrece. Es lo que podríamos denominar una fase inicial de descubrimiento y experimentación del material.

Así, cuando en 1779 se construye el puente de Colbrookdale, primer puente metálico construido en el mundo, éste adopta la tipología de arco como herencia de los puentes de piedra, mientras que sus detalles constructivos recuerdan a la construcción en madera (fig. 6).

De la misma manera, los puentes realizados en la primera época del hormigón armado reproducen las

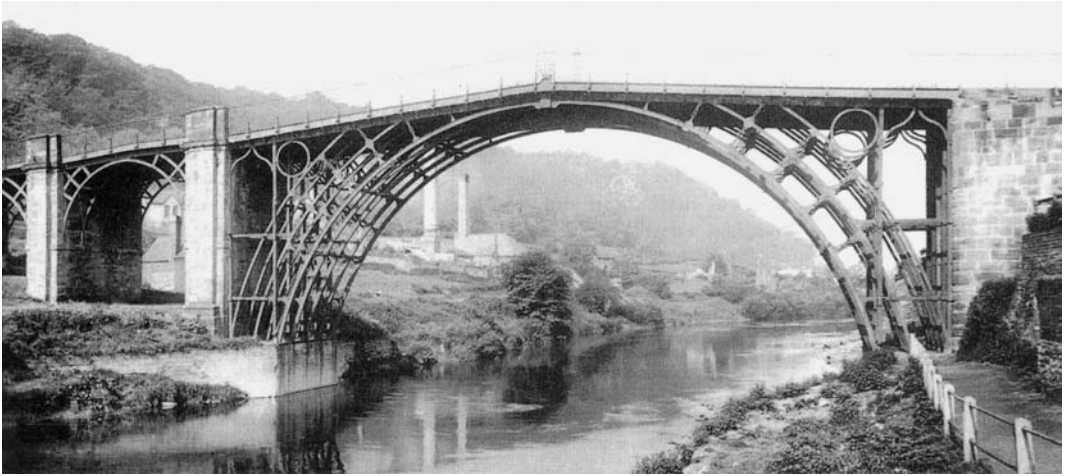


Figura 6
Puente de Coalbrookdale. Inglaterra, 1779. T. Pritchard, A. Darby III y J. Wilkinson. (Fernández Troyano 1999)

vigas en celosía características de los puentes metálicos y, aunque pronto se sustituye esta tipología por la de vigas de alma llena, se siguen utilizando vigas trianguladas para salvar grandes vanos, como en la pasarela de Ivry, de 135 metros de luz (fig. 7).

También en las estructuras de edificación resulta clara esta mimesis con las formas y tipologías precedentes al aparecer un nuevo material. Así, a finales del siglo XVIII el procedimiento más habitual para la formación de forjados metálicos consiste en la disposición de bovedillas de ladrillo entre las vigas metálicas, herencia directa de la construcción tradi-

cional con vigas de madera. De la misma manera, los forjados de hormigón armado adoptan generalmente sistemas de vigas y pilares (fig. 8), que no ofrecen una variación tipológica relevante respecto a los anteriores forjados de estructura de madera o metálicos.

Sin embargo, poco a poco, la experimentación con el nuevo material y el aumento del conocimiento y control de sus características y propiedades llevan al planteamiento de nuevas formas y sistemas, acordes con las posibilidades que el nuevo material ofrece:



Figura 7
Pasarela de Ivry. París, 1930. (Fernández Troyano 1999)

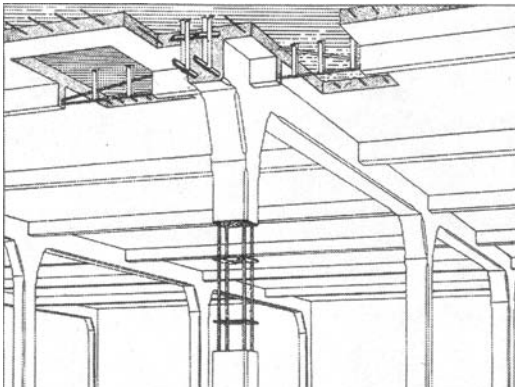


Figura 8
Sistema de forjados viga-pilar en hormigón armado.
François Hennebique. (Deswarte 1997)

Toda innovación tecnológica produce desorientación inicial . . . Pero al irse desarrollando la tecnología del nuevo material, los puentes van evolucionando hasta llegar a su madurez, y en ella se consigue una adecuación de materiales, estructuras, y formas. (Fernández Troyano 1999, 109)

Es en esta fase de conocimiento y madurez donde aparecen nuevas formas y tipologías, que afirman las condiciones intrínsecas y específicas del nuevo material. Ejemplos relevantes de esta fase son las obras que hemos comentado en el punto anterior.

Esas construcciones muestran las posibilidades formales de los distintos materiales estructurales y tratan de establecer las formas resistentes más apropiadas a sus características, con un criterio claro de rigor estructural, según el cual la forma viene determinada por los esfuerzos a los que se ve sometida la estructura y por la naturaleza de los materiales, y la belleza de la construcción se apoya en la depuración de las formas y la optimización de su comportamiento resistente. Es la apoteosis de la forma ingenieril:

Cada material tiene una personalidad específica distinta, y cada forma impone un diferente fenómeno tensional. La solución natural de un problema —arte sin artificio—, óptima frente al conjunto de impuestos previos que la originaron, impresiona con su mensaje, satisfaciendo, al mismo tiempo, las exigencias del técnico y del artista . . .

Antes y por encima de todo cálculo está la idea, moldeadora del material en forma resistente, para cumplir su misión. (Torroja 1998, VII)

Finalmente, el conocimiento y control de las propiedades de los nuevos materiales y la aceptación e interés por parte de los arquitectos de las posibilidades formales que éstos ofrecen desembocan en una fase que podríamos calificar de sobredominio del material.

En esta fase, motivada por las inquietudes formales de los arquitectos, se aprovechan las posibilidades que ofrece el nuevo material, pero las formas planteadas se alejan de las derivadas estrictamente de sus propiedades y características intrínsecas, en busca de una plasticidad personal que la forma resistente pura no es capaz de proporcionar.

Así, a finales de los años cincuenta Eero Saarinen diseña la terminal de la TWA en Nueva York utilizando una lámina de hormigón de geometría compleja, deudora de los desarrollos formales de Torroja, pero cuya geometría se aleja decididamente del rigor estricto de las formas ingenieriles para adoptar una libertad y una plasticidad nuevas (fig. 9).



Figura 9
Terminal de la TWA. Aeropuerto de Idlewild. Nueva York,
1956–1962. Eero Saarinen con Ammann & Whitney. (Gössel 2005)

Y esta nueva libertad formal sugerida por los arquitectos, que se sirve de los nuevos materiales y sistemas, pero que no deriva directamente de ellos, constituye el preámbulo de la situación arquitectónica e ingenieril actual.

LA SITUACIÓN ACTUAL

El desarrollo tecnológico actual y la nueva libertad formal

Frente a las situaciones de épocas anteriores, el origen de las formas fracturadas, angulosas e informes de la arquitectura actual no se encuentra en la utilización de nuevos materiales, sino en el extraordinario desarrollo tecnológico que se ha producido recientemente.

En efecto, el final del siglo XX y el comienzo del XXI han estado marcados por las extraordinarias innovaciones que se han producido en las técnicas auxiliares de proyecto y ejecución, llegando a una situación en la que prácticamente cualquier planteamiento formal puede ser resuelto y construido. Así mismo, el

creciente desarrollo de la informática ha convertido al ordenador en un potentísimo asistente de la concepción, permitiendo el análisis y la representación gráfica de propuestas altamente complejas.

A estos avances informáticos y tecnológicos hay que añadir además la mejora de las propiedades de los materiales estructurales (en términos de resistencia, control, durabilidad . . .) y la gran profundización del entendimiento estructural (cálculos dinámicos, no linealidad de las estructuras, análisis de los efectos de inestabilidad . . .), todo lo cual ha creado una situación de «sobredominio del hecho estructural» (Martínez Calzón 2005).

Sin embargo, a esta situación se contraponen el hecho de que, de una manera general, no han aparecido durante este período nuevos materiales o sistemas estructurales de la relevancia de los ya existentes, que permitan a los ingenieros sugerir nuevas soluciones formales que puedan influir de manera determinante en el diseño de los proyectos.

La libertad de formas actual, por lo tanto, no es producto de nuevos materiales o tipologías estructurales, sino de la potencia de las técnicas auxiliares de



Figura 10
Cúpula del Milenio. Londres, 1996–1999. Richard Rogers y Buro Happold. (Lyll 2002)



Figura 11
Museo Judío. Berlín, 1989–1999. Daniel Libeskind y GSE-IGW. (Libeskind 2001)

diseño y construcción y del sobredominio estructural. Sobredominio que aumenta exponencialmente las posibilidades estructurales, dando origen a una gran heterogeneidad de formas y estilos.

Si hasta hace relativamente poco tiempo era necesario simplificar las formas arquitectónicas de manera que se ajustaran a geometrías conocidas para posibilitar su representación, cálculo y construcción, hoy esto ya no es necesario, sino que disponemos de los medios suficientes como para representar, calcular y construir cualquier forma. No es necesario, por lo tanto, que exista una lógica interna que permita generar y controlar las formas, sino que su geometría puede venir definida por el trazo libre del arquitecto.

Los condicionantes estructurales y constructivos que delimitaron y enmarcaron el desarrollo de las formas arquitectónicas en épocas anteriores están hoy superados, mientras que los condicionantes económicos son cada vez más débiles. La arquitectura, actualmente, está en una posición de poder hacer lo que se le ocurra al arquitecto. Como explica el ingeniero Javier Manterola:

Del reino de la necesidad se ha pasado al de la decisión proyectual. Y esto resulta evidente en una época tan ecléctica como la actual, en la que coexisten tanto el pensamiento arquitectónico que ignora lo resistente en la conformación de su pensamiento, como aquel otro que lo sublima utilizándolo como uno de sus principales valores expresivos. (Manterola 1988, 17)

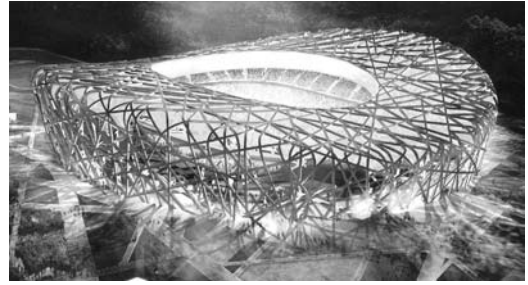


Figura 12
Estadio Olímpico de Pekín, 2002–2007. Herzog & de Meuron y Ove Arup & Partners. (Herzog & de Meuron)

Un rápido recorrido por algunos de los edificios más relevantes de los últimos años ilustran claramente esta variedad de formas arquitectónicas, cuyo eclecticismo da muestra del grado de libertad e inquietud actual (figs. 10, 11 y 12).

Esta ausencia de las exigencias de cálculo, representación y construcción ha ampliado radicalmente el abanico de posibilidades, permitiendo la aparición de muchas propuestas válidas e interesantes. Sin embargo, esta nueva libertad formal ha traído también consigo una demanda creciente de formas novedosas y espectaculares que ha motivado la aparición de numerosas propuestas banales y vacías de contenido. Como explica el arquitecto suizo Jacques Herzog:

El problema de la arquitectura actual no es la ausencia de libertad, sino la libertad misma . . . Sin embargo, el problema es precisamente esa riqueza, las variaciones interminables que inundan el mundo de la arquitectura y el arte, creando una especie de ceguera. La cuestión, al cabo, es cómo eludir la tiranía de la innovación. (Fernández-Galiano 2005, 20)

Posibles actitudes del ingeniero estructural

En este contexto, el ingeniero estructural puede adoptar una actitud pasiva a nivel de diseño, aceptando la forma arquitectónica como un enunciado predefinido, limitándose a resolver el problema estático que se le plantea. Por supuesto, el desarrollo del proyecto hará que determinados aspectos de la propuesta inicial del arquitecto deban ser revisados y ajustados para acomodar la estructura, pero en gran medida el

ingeniero permanecerá ajeno a su definición formal. En este caso, el arquitecto asume la práctica totalidad del diseño del proyecto, mientras que el ingeniero parte de ese diseño y lo interpreta en términos estructurales:

Es decir: el ingeniero debe ser un intérprete preciso y exacto de su parte en la orquesta, cuyo director —compositor— es el arquitecto, y en la que, junto con otros técnicos, debe lograr una interpretación fiel y ajustada en tempo, afinación y ritmo. (Martínez Calzón 2006, 355)

Es importante destacar que este planteamiento es absolutamente válido y puede dar lugar a proyectos de gran acierto y belleza. La estructura es uno de los elementos que pueden ser utilizados como punto de partida para la definición formal del proyecto, pero no es imprescindible que sea así.

Un ejemplo claro en este sentido es el museo Guggenheim de Bilbao (fig. 13), en el que la estructura se subordina a la forma diseñada por el arquitecto. En efecto, la estructura, a pesar de quedar vista en muchos de los espacios, está condicionada y determinada por una forma predefinida que le resulta, en gran medida, ajena. La estructura hace posible el proyecto, pero no influye de manera relevante en el diseño del mismo, que es obra del arquitecto.

Por otra parte, el ingeniero estructural puede adoptar en cambio una actitud activa en el diseño, buscando estrategias y herramientas que le permitan hacer que la estructura adquiera una relevancia determinante en la definición formal del proyecto. En este

caso la estructura cumple, además de los necesarios requisitos de resistencia y estabilidad, una labor compositiva y formal de gran importancia.

Así, al igual que en épocas anteriores el desarrollo de nuevos materiales y sistemas estructurales posibilitó, en manos de ingenieros de talento, la aparición de nuevas formas estructurales y arquitectónicas, el ingeniero actual puede proponer nuevas herramientas de diseño estructural que sean capaces de definir o sugerir conceptos compositivos y formales que determinen, en gran medida, el diseño del proyecto. El ingeniero trasciende entonces su función de asistente técnico del arquitecto, siendo el diseño final del proyecto resultado de un trabajo conjunto que engloba los conceptos formales de ambos, arquitecto e ingeniero estructural.

Sin embargo, para que pueda existir una colaboración de este tipo deben darse una serie de factores que la hagan posible:

- En primer lugar, la colaboración entre el arquitecto y el ingeniero estructural debe comenzar desde el inicio del proyecto, de manera que los dos participen en la definición formal y conceptual del mismo.
- El arquitecto tiene que estar dispuesto a que la estructura adquiera una relevancia y un protagonismo importante en el proyecto. Esta relevancia de la estructura no tiene que ser visualmente explícita, pero sí intervenir de manera clara en la definición y configuración del proyecto.
- El ingeniero estructural debe tener la habilidad suficiente para racionalizar la propuesta del arquitecto. Debe proponer un planteamiento estructural que sea capaz de ofrecer una respuesta satisfactoria a los requisitos e inquietudes del arquitecto, con el suficiente potencial y carácter como para intervenir en el diseño del proyecto.
- El proyecto debe tener unas características propicias que posibiliten el desarrollo de propuestas de este tipo. En efecto, proyectos muy condicionados por requisitos funcionales o de programa, pueden dificultar en gran medida la aparición de estos planteamientos, al limitar la libertad que a menudo requieren.
- Finalmente, debe existir entre el arquitecto y el ingeniero una estrecha colaboración basada en la confianza, el respeto y la complicidad mutuas, que permitan el desarrollo conjunto del diseño.

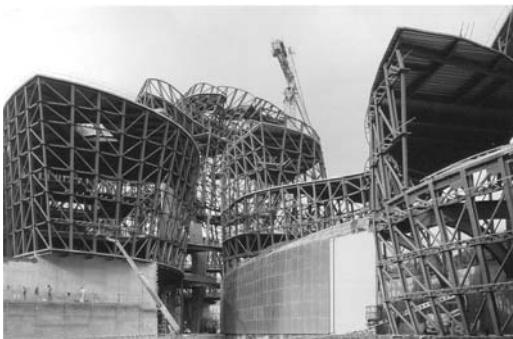


Figura 13
Museo Guggenheim. Bilbao, 1991–1997. Frank Gehry y SOM. Ejecución de la estructura. (Lyllal 2002)

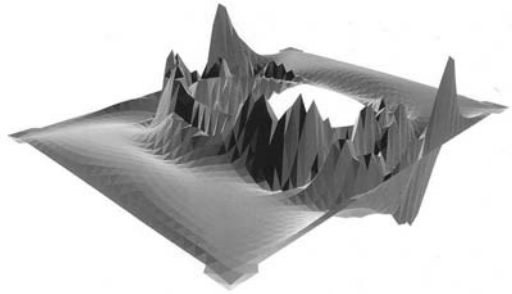


Figura 14

Cubierta del British Museum. Londres, 1997–2000. Norman Foster y Buro Happold. Vista interior y Modelo de desarrollo de la cubierta. (Buro Happold y Williams 2004)

En el caso en que confluyan estos condicionantes, cuando un arquitecto y un ingeniero deseados de explorar el potencial de determinados planteamientos estructurales colaboren estrechamente en un proyecto que goce de unos condicionantes propicios para ello, nos encontraremos en una situación clara de colaboración multiplicadora.

Dentro de estos planteamientos de búsqueda de nuevas herramientas y estrategias de diseño estructural resulta interesante valorar el interés del ingeniero británico Peter Rice por el empleo de los materiales. En efecto, en una época en la que el potencial de los nuevos materiales estructurales ya se había desarrollado, Rice planteó la utilización de materiales conocidos de forma no convencional y el empleo de materiales poco utilizados en construcción. Es el caso de algunos de los proyectos realizados en colaboración con Renzo Piano, quien comparte su interés por explorar el potencial de materiales no convencionales y por expresar su naturaleza. Así, para la cubierta de la Fundación Menil utilizaron un sistema estructural de vigas celosía de hierro dúctil y ferrocemento, mientras que en el pabellón itinerante de IBM, los requisitos de ligereza y transparencia les llevaron a utilizar el aluminio y el policarbonato como materiales estructurales.

Otro ejemplo interesante de empleo de estrategias de definición de la forma desde la estructura lo encontramos en algunos de los proyectos de Mike Cook, discípulo de Edmund Happold y deudor en gran medida de los planteamientos desarrollados por éste en colaboración con Frei Otto en el campo de las

estructuras ligeras. Lo que Cook propone es orientar el empleo de los mecanismos actuales de diseño y análisis computerizado a la búsqueda de sistemas que optimicen geoméricamente el empleo de los materiales, consciente de la necesidad actual de preservar los recursos globales. Al igual que en el caso de Otto y Happold el objetivo está en, tomando como punto de partida las estructuras de la naturaleza, desarrollar sistemas que garanticen un empleo eficiente de los materiales. Sin embargo, los modelos físicos utilizados por Otto y Happold son ahora sustituidos por potentes modelos digitales que permiten dar una respuesta estructuralmente eficiente a la nueva libertad formal de la arquitectura contemporánea. Es el caso, por ejemplo, del proyecto de la cubierta del British Museum, de Norman Foster, en el que se desarrolló un sistema de generación de la forma para definir la geometría y volumetría de la cubierta. Este sistema permitió controlar el nivel de tensiones en las distintas zonas, posibilitando el empleo de elementos estructurales metálicos de pequeño tamaño, que garantizan la transparencia deseada (fig. 14).

Finalmente, todo el trabajo del ingeniero Cecil Balmond en los últimos años ha estado orientado al desarrollo de mecanismos y sistemas de definición de la estructura que permitan que ésta adopte un papel relevante en el diseño del proyecto. Así, Balmond propone estrategias de generación de la estructura basadas en la distorsión de los ordenes estructurales clásicos, en el análisis de la propia respuesta de la estructura y de la naturaleza de sus esfuerzos, o en el empleo de algoritmos geoméricos o matemáticos. Es el caso,

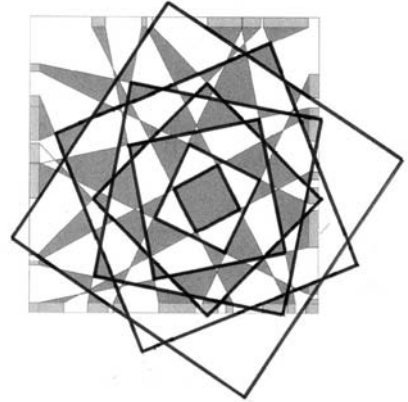


Figura 15
 Pabellón temporal de la Serpentine Gallery. Londres, 2002. Toyo Ito y Cecil Balmond. Vista general y Generación de la malla estructural. (a+u 2006 y Esquema del autor)

por ejemplo, del proyecto del pabellón temporal de la Serpentine Gallery, realizado en 2002 en colaboración con Toyo Ito (fig. 15). En este proyecto, la composición de la piel estructural que envuelve el pabellón está generada a partir de un algoritmo geométrico basado en una serie de cuadrados que reducen su tamaño conforme giran —conservando su centro—, y prolongan sus lados de manera que se crucen entre sí, extendiéndose por toda la superficie de la cubierta y las fachadas.

CONCLUSIONES

La aparición de nuevos materiales en los siglos XIX y XX, utilizados inicialmente por los ingenieros, tuvo una influencia determinante en el desarrollo de nuevas formas arquitectónicas, profundamente marcadas por su respuesta estructural.

Sin embargo, la situación arquitectónica actual está caracterizada por una nueva libertad proyectual que permite la construcción de prácticamente cualquier propuesta formal. Esta situación ha convertido a los arquitectos en autores exclusivos del proyecto, relegando en muchas ocasiones a los ingenieros al papel de simples colaboradores o asistentes, negándoles la participación en la definición formal del proyecto.

Ante esta situación el ingeniero puede reaccionar proponiendo nuevas estrategias de diseño estructural, que permitan el desarrollo de nuevas formas y sistemas, y sean capaces de devolver a la estructura el potencial creativo y compositivo que ha tenido en épocas anteriores. En este caso se establece con el arquitecto un sistema de colaboración multiplicadora, en el que a los conceptos formales del arquitecto se suman los planteamientos estructurales del ingeniero, para definir conjuntamente un proyecto que es mucho más que la suma de una forma y una estructura independientes.

Este es el reto que las nuevas tecnologías y las inquietudes arquitectónicas actuales nos presentan. De nosotros depende que seamos capaces de afrontarlo de manera rigurosa y coherente.

LISTA DE REFERENCIAS

- a+u. ed. 2006. *Cecil Balmond*. a + u. Architecture and Urbanism, Noviembre 2006.
- Addis, Bill. 2001. *Creativity and Innovation. The structural engineer's contribution to design*. Oxford: Architectural Press.
- Bernabeu Larena, Alejandro. 2005. *Universal exhibitions: a unique frame to analyse the interaction between engineers and architects*. Actas del Congreso *Teoria e pratica*

- del costruire: saperi, strumenti, modelli. Esperienze didattiche e di ricerca a confronto.* Dipartimento di Architettura e Pianificazione Territoriale. Università di Bologna.
- Balmond, Cecil. 2002. *Informal*. Prestel Verlag.
- Brown, André. 2001. *The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture*. Peter Rice. Londres: Thomas Telford Publishing.
- Cook, Mike. 2004a. *An engineer's perspective*. En Brookes, Alan J. y Poole, Dominique. *Innovation in architecture*, 74–82. Londres: Spon Press.
- Cook, Mike. 2004b. *Digital tectonics. Historical perspective - future prospect*. En Leach, Neil; Turnbull, David y Williams, Chris. *Digital tectonics*, 40–49. Gran Bretaña: Wiley-Academy.
- Deswarte, Sylvie y Lemoine, Bertrand. ed. 1997. *L'architecture et les ingénieurs. Deux siècles de réalisations*. Paris: Groupe Moniteur.
- Fernández-Galiano, Luis. 2005. *La belleza súbita*. El País, Babelia, 19 febrero 2005, 20.
- Fernández Troyano, Leonardo. 1999. *Tierra sobre el agua. Visión histórica universal de los puentes*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Fernández Troyano, Leonardo. 2005. *Arquitectos e ingenieros. Historia de una relación*. Revista de Obras Públicas, no 3460, Noviembre Diciembre, 41–54.
- Gössel, Peter y Leuthäuser. 2005. *Arquitectura del siglo XX*. Taschen.
- Libeskind, Daniel. 2001. *The space of encounter*. Londres: Thames & Hudson.
- Lyall, Sutherland. 2002. *Maestros de la estructura. La ingeniería en las edificaciones innovadoras*. Barcelona: Art Blume.
- Macdonald, Angus. [1994] 2001. *Structure & Architecture*. Oxford: Architectural Press.
- Manterola, Javier. 1988. *Estructuras resistentes en la obra de Norman Foster*. En Mateo, Josep Lluís. ed. *Norman Foster. Obras y proyectos 1981–1988*. Colegio de arquitectos de Catalunya. Monografías de Quaderns d'Arquitectura i Urbanisme, 16 - 21. Barcelona: Gustavo Gili.
- Manterola, Javier. [1999] 2002a. *La estructura resistente en la arquitectura actual. (1)*. Revista del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia, nº 22, Julio 2002, 38–44. Publicado originalmente en la revista Astrágalo, nº 13, Diciembre 1999.
- Manterola, Javier. [1999] 2002b. *La estructura resistente en la arquitectura actual. (2)*. Revista del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia, nº 23, Diciembre 200, 36–43. Publicado originalmente en la revista Astrágalo, nº 13, Diciembre 1999.
- Margoliuss, Ivan. 2002. *Architects + Engineers = Structures*. Gran Bretaña: Wiley Academy.
- Martínez Calzón, Julio. 2005. *Los sistemas estructurales en la arquitectura contemporánea*. Conferencia impartida en el Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid el 21 de Febrero de 2005.
- Martínez Calzón, Julio. 2006. *Puentes, estructuras, actitudes*. Turner.
- McBeth, Douglas. 1998. *François Hennebique (1842–1921), reinforced concrete pioneer*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Mayo 1998, 86–95.
- Newby, Frank. 1996. *The innovative uses of concrete by engineers and architects*. Historic Concrete, Paper 11066.
- Newby, Frank. ed. 2001. *Early reinforced concrete*. Studies in the history of civil engineering, volumen 11. Ashgate.
- Picon, Antoine. ed. 1997. *L'Art de l'Ingénieur. Constructeur, entrepreneur, inventeur*. Paris: Editions du Centre Pompidou.
- Rice, Peter. [1994] 1998. *Mémoires d'un ingénieur*. Paris: Groupe Moniteur. Traducido del original *An engineer imagines*. Londres: Artemis.
- Torroja Miret, Eduardo. [1957] 1998. *Razón y ser de los tipos estructurales*. Novena edición. Madrid: Consejo superior de investigaciones científicas.
- Thorne, Robert. ed. *Structural Iron and Steel*. Studies in the history of civil engineering, volumen 10. Ashgate.
- Williams, Chris. 2004. *Design by algorithm*. En Leach, Neil; Turnbull, David y Williams, Chris. *Digital tectonics*, 78–85. Gran Bretaña: Wiley-Academy.