

LA DESAPARICIÓN DE LA BARRERA DEL ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN LOS PROYECTOS ARQUITECTÓNICOS

Rey Rey, J.^{1.*}, Fernández Cabo, J.L.²

(1) *Mecanismo Ingeniería. Madrid, España.*

(2) *Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S.A.M., Dep. de Estructuras. Madrid, España.*

RESUMEN:

A lo largo de la historia en numerosas ocasiones la imaginación de los creadores ha ido por delante de las posibilidades técnicas de cada momento. Muchas de estas nuevas ideas han requerido largos periodos de tiempo para materializarse como realidad construida, hasta que el desarrollo tecnológico e industrial ha alcanzado un desarrollo suficiente.

Estas limitaciones técnicas se han acotado paulatinamente desembocando en la situación actual en la que cualquier planteamiento formal puede ser representado y analizado desde un punto de vista estructural, concluyéndose por tanto que ha desaparecido la barrera del análisis y de la representación gráfica en lo que al desarrollo de los proyectos arquitectónicos se refiere.

A lo largo del artículo se analiza cómo la formulación del método de los elementos finitos en la década de los 50 y la posterior generalización de los ordenadores personales y de los paquetes de software de dibujo (C.A.D.) y análisis estructural (F.E.M.) en los estudios de arquitectura e ingeniería en la década de los 80 del siglo pasado, posibilitó el desarrollo de cualquier propuesta arquitectónica por compleja que ésta sea.

Esto ha provocado una verdadera revolución a nivel formal en el mundo de la arquitectura, especialmente en el campo de la edificación singular o icónica.

Se estudia este proceso a través de los siguientes casos de estudio: Frontón de Recoletos, Edificio Seagram, Habitat '67, Ópera de Sydney, Guggenheim Bilbao, Victoria & Albert Museum, Crematorio en Gifu y CCTV en Pekín.

Palabras clave: Ingeniería estructural, edificación singular.

THE DISAPPEARANCE OF THE STRUCTURAL ANALYSIS BARRIER IN THE DEVELOPMENT OF ARCHITECTURAL PROJECTS

ABSTRACT:

Throughout history, many times creator's imagination has gone beyond the technical possibilities of each moment. Many of these new ideas have required long periods of time to materialize until technological and industrial development has reached sufficient development.

These technical limitations have been narrowing up to the current situation when any formal approach can be analyzed from a structural point of view, therefore concluding that the barrier of the structural analysis in the development of an architectural project has disappeared.

This paper explores how the formulation of the finite element method in the 1950's and the subsequent spread of personal computers, together with drawing (C.A.D.) and structural analysis' (F.E.M.) software in architecture and engineering offices in the 1980's, made the development of any formal proposal for a building possible.

This has caused a revolution at a formal level in architecture, especially in the field of iconic buildings.

This process is studied through the following case studies: Frontón Recoletos, Seagram Building, Habitat '67, Sydney Opera House, Guggenheim Bilbao, Victoria & Albert Museum, Gifu's Crematorium and Beijing CCTV.

Key words: Structural engineering, iconic buildings.

* juan.rey@mecanismo.es

1. Introducción

A lo largo de la historia, en el mundo de la arquitectura, como en muchos otros ámbitos, la imaginación de los creadores ha ido muy por delante de las posibilidades técnicas y constructivas de cada momento histórico. Así, muchas de las formas gestadas en las cabezas de diversos grupos de arquitectos han tardado años e incluso décadas en pasar del cuaderno a materializarse como realidad construida.

Históricamente los grandes cambios en las formas arquitectónicas fueron debidos a la aparición de un nuevo material estructural. En cambio, recientemente, el gran giro a nivel formal que se ha producido en los edificios icónicos no responde a este motivo sino al desarrollo de nuevos métodos de cálculo y representación gráfica así como la generalización de los ordenadores personales para el desarrollo de proyectos de arquitectura.

En las tres últimas décadas del siglo pasado, los nuevos medios técnicos, en especial los ordenadores personales, se fueron popularizando en el ámbito de las oficinas de proyectos y evolucionando exponencialmente en sus prestaciones. En paralelo, los paquetes de software, con los programas de dibujo asistido por ordenador (C.A.D.) y de análisis estructural basados en el método de los elementos finitos (F.E.M.) a la cabeza, comenzaron a desarrollarse. Este proceso ha desembocado en la actual situación, en la cual, por primera vez en la historia, se puede afirmar que el análisis estructural ha dejado de ser una traba para el desarrollo de ciertos proyectos, que por su complejidad geométrica o constructiva, años antes no era posible su desarrollo.

Esta eliminación de la barrera de la representación gráfica y del análisis estructural ha ejercido una influencia decisiva en las formas de muchos de los edificios construidos a lo largo de estos primeros años del siglo XXI, suponiendo una radical ruptura formal con respecto a la arquitectura icónica del siglo pasado.

2. Analisis histórico

2.1. Evolución histórica de los métodos de cálculo de estructuras

Desde los antiguos maestros constructores, que empleaban para el diseño y construcción de las estructuras de sus edificios sencillas reglas de proporción basadas en la experiencia, hasta nuestros días, con el empleo generalizado de ordenadores y software específico, los sistemas de cálculo de estructuras han tenido una evolución constante.

Históricamente, la aparición de nuevos materiales de construcción ha influido de forma decisiva en esta evolución referida. La aparición de un nuevo material implicaba en muchos casos la necesidad de desarrollar sistemas generales de cálculo ad hoc. De este modo, por ejemplo, con la llegada de la revolución industrial y la generalización del acero como material estructural a finales del siglo XIX y posteriormente la aparición del hormigón armado a principios del siglo XX, se vio necesario el desarrollo de métodos de cálculo que posibilitasen la resolución de esquemas estructurales previamente no habituales.

Estos nuevos esquemas estructurales, con altos grados de hiperestaticidad, requerían la resolución de grandes sistemas de ecuaciones. No fue hasta la formulación en 1930 del método de Cross cuando éstos pudieron ser resueltos de forma satisfactoria, aunque siempre dentro de un marco acotado de complejidad geométrica y de cargas.

Sin embargo, es durante la segunda mitad del siglo pasado cuando esta evolución ha sido más decisiva, especialmente con la formulación del método de los elementos finitos por Turner, Clough, Martin y Topp en 1956.

Este método ha visto extendido enormemente su uso debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de ciertos problemas, en general ligados a la existencia de geometrías y/o cargas complejas, con frecuencia el método de los elementos finitos, se convierte en la única alternativa práctica de cálculo.

En el campo de la arquitectura pronto se percibió el potencial del nuevo método para el desarrollo de edificios con geometrías mucho más complejas que las empleadas hasta la fecha, si bien su empleo generalizado para el diseño y cálculo de edificios no se produce hasta la década de los 90 del siglo pasado, gracias a la irrupción de los ordenadores personales y los paquetes de software de cálculo en los estudios de arquitectura e ingeniería.

2.2. Evolución histórica de los métodos de representación gráfica arquitectónica

Desde la antigüedad, el hombre ha sentido siempre la necesidad de representar gráficamente el entorno que le rodea, como lo demuestran los dibujos encontrados en las cuevas prehistóricas, pero no es hasta el renacimiento cuando se intenta representar la profundidad. Posteriormente, Gaspard Monge, con la publicación en 1799 de su obra "*Geometrie descriptive*", revoluciona la representación gráfica en el ámbito de los proyectos arquitectónicos, posibilitando la representación de superficies tridimensionales de objetos sobre una superficie bidimensional, a través de sistemas como el diédrico, planos acotados o perspectiva cónica.

En el ámbito de la representación de líneas y superficies curvas, la publicación de las curvas de Bézier en 1962 por Pierre Bézier resultó un verdadero hito, puesto que la libertad de curvatura que introducía era total, dependiendo la forma final únicamente de la imaginación del diseñador. El sistema, pensado inicialmente para el diseño de piezas de carrocería del automóvil, consistía en unir dos puntos con una curva, definiendo esa curva a partir de unos elementos esenciales: los puntos denominados nodos o puntos de anclaje.



Figura 1 – (1) *Geometría descriptiva*, (2) *Trafalgar Square*, Zaha Hadid (1.985) y (3) *superficie de Bézier*.

El grupo neoyorquino "Five architects" organizó una exposición en el MOMA en 1967 donde declaró la intención de recuperar en el ámbito de la representación gráfica la experimentación radical de las vanguardias de inicio del siglo. En este sentido, es paradigmático el proyecto de Zaha Hadid para Trafalgar Square (1985), registrando en sus planos múltiples niveles del edificio, mezclados con secciones, puntos de vista en distintas posiciones, etc. No obstante las propuestas de las neovanguardias apenas incorporaron las innovaciones tecnológicas y no lograron alterar los paradigmas de la perspectiva y del sistema de vistas ortográficas, no suponiendo por tanto una ruptura real con el sistema clásico de representación gráfica arquitectónica.

El diseño asistido por ordenador (Computer Aided Design o C.A.D.) ha revolucionado los sistemas de representación gráfica, proporcionando una herramienta relativamente simple para la representación digital de los planos y sobre todo para la visualización 3D, suponiendo un paso de gigante respecto a la elaboración manual de perspectivas 3D basadas antaño en técnicas de dibujo lentas y laboriosas, que además no eran interactivas.

El primer CAD data de los años 50 para las Fuerzas Aéreas de USA, estando ya disponibles en 1.968 los sistemas CAD 2D que funcionaban en terminales de grandes ordenadores. Su introducción en las oficinas de arquitectura e ingeniería se produce en términos generales a lo largo de la década de los 80 con la llegada de los paquetes comerciales de software (Autocad, etc) y popularizándose exponencialmente hasta la situación actual en la que se ha convertido en el estándar en el ámbito de la representación gráfica.

3. Casos de estudio

Se han seleccionado un total de 8 casos de estudio para, a través de su análisis comparado, profundizar en los orígenes, causas y consecuencias de las eliminaciones de la barrera del análisis

estructural en el ámbito de los proyectos arquitectónicos. Se ha establecido dicho periodo clave de forma aproximada, entre los años 1980 y 1985 y se han seleccionado 4 edificios anteriores a dicha franja temporal y 4 posteriores.

El frontón de Recoletos se construyó en Madrid 1935. Con su cubierta laminar de tan solo 8 cm de espesor para cubrir una superficie de 55 x 32,5 m supuso un verdadero hito estructural en su momento. Hoy en día, con los ordenadores y software de dibujo y análisis estructural existentes en el mercado, el cálculo de la estructura de cubierta planteada por Torroja puede ser desarrollado con cierta facilidad y rapidez. En cambio, en el momento en el que la estructura del edificio fue calculada, esta tecnología no estaba disponible y todos los cálculos fueron desarrollados manualmente. Así, la estructura no pudo ser analizada completamente debido a la complejidad de la misma en relación a los medios disponibles y resultó imprescindible que Torroja llevase a cabo un buen número de importantes simplificaciones para poder abordar el problema. Los cálculos se basaban en la resolución de un sistema de nueve ecuaciones diferenciales obtenidas del planteamiento de equilibrio y compatibilidad de la estructura de las láminas. Las tensiones y deformaciones eran obtenidas de la resolución de dicho sistema de ecuaciones.

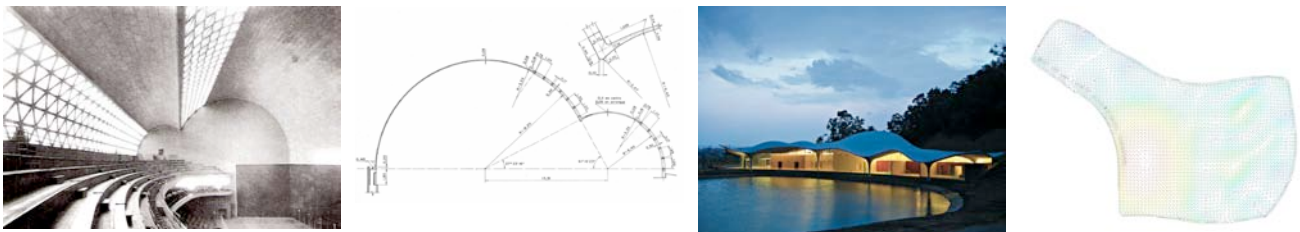


Figura 2 – Frontón de Recoletos: (1) vista interior del edificio y (2) sección transversal tipo de la cubierta. Crematorio en Gifu: (3) vista exterior del edificio y (4) modelo de elementos finitos.

En contraposición al planteamiento resistente como generador de las formas del edificio proyectado por Torroja y Zuazo, la idea del proyecto del Crematorio en Gifu (2004-06) nace a partir de unos croquis a mano alzada de una lámina ondulante de hormigón armado “flotando” sobre el paisaje en los que Toyo Ito únicamente tiene en consideración el programa que debe albergar el edificio y la belleza del resultado final. En este caso no es por tanto la lógica estructural la que determina la forma de la cubierta, si no otro tipo de condicionantes por lo que se puede afirmar que en este caso la estructura se supedita a la forma.

Esta geometría inicial, concebida sin tomar en consideración el esquema resistente del edificio, fue digitalizada y analizada desde el punto de vista estructural por Mutsuro Sasaki con ayuda del software Nastran para, manipulando ligeramente dicha forma inicial a través de un proceso interactivo aplicando el algoritmo genético, encontrar una nueva geometría más económica y con un mejor comportamiento desde el punto de vista estructural que a la vez se ajustase a la forma predefinida inicialmente, realizando para ello leves variaciones en la geometría. El modelo digital fue empleado además para la fabricación por CAD-CAM de los complejos encofrados necesarios para la construcción de la cubierta.

La nueva sede de la CCTV (2003-08) es un rascacielos de 44 plantas y 234 metros de altura proyectado por OMA y emplazado en el CBD (distrito financiero) de Pekín, China. Su estructura principal se concibió inicialmente como un tubo, formado por una malla continua de vigas de acero dispuestas en diagonal cubriendo por completo la superficie perimetral del edificio. A través de un proceso de análisis iterativo, en aquellas zonas donde los esfuerzos a soportar eran muy elevados esta malla se duplicó o incluso cuadruplicó. Por el contrario, en aquellas otras zonas en las que los esfuerzos eran muy reducidos o incluso nulos, los elementos se iban eliminando. Se trata por tanto de un nuevo ejemplo en el que a partir de un esquema estructural poco optimizado, éste es manipulado para tratar de “racionalizarlo” de forma que, sin cambiar sustancialmente la apariencia inicialmente planteada, se economice en su construcción.

Por el contrario, Mies van der Rohe concibió el edificio Seagram (1954-59), icono del estilo internacional, a partir de un concepto estructural claro: un núcleo estructural central dimensionado para absorber la totalidad de las acciones horizontales y que comparte la misión portante de las acciones verticales con un entramado metálico de pilares y vigas metálicas alrededor del mismo.



Figura 3 – Edificio Seagram: (1) vista exterior del edificio (2) plano de planta y (3) esquema núcleos. Sede CCTV: (3) vista exterior y (4) maquetas del proceso evolutivo de diseño estructural.

El edificio, de 157 metros de altura, fue calculado por Severud Associates por medios manuales, introduciendo grandes innovaciones en su momento como el empleo de tornillos de alta resistencia en un edificio en altura, la disposición de un núcleo mixto acero-hormigón, etc. Por el contrario, para el desarrollo del proyecto del CCTV, se emplearon con profusión los nuevos medios tecnológicos disponibles. Así se realizaron modelos en SAP2000 (análisis matricial elástico lineal), LS-Dyna (análisis sísmico), Xtract (análisis no-lineal de secciones mixtas), GSRaft (análisis no-lineal de la interacción suelo-estructura), MSC/Nastran (diseño de uniones a través de FEM), así como software CAD-CAM para la fabricación de la estructura metálica.

Habitat '67 es edificio prefabricado de 12 plantas y 44 metros de altura construido en Montreal, Quebec, Canadá y diseñado por el arquitecto Moshe Safdie para la Expo 67 a partir de módulos prefabricados de hormigón de 11,7 x 5,3 x 3,0 m. La geometría del edificio, todavía generada a partir de formas ortogonales, presenta no obstante una gran complejidad debido a los decalajes que se producen entre los módulos para formar terrazas y cubiertas ajardinadas en voladizo.

August Komendant, ingeniero al cargo del diseño estructural, desarrolló un sistema de conexión de las unidades prefabricadas entre sí muy avanzado para la época (años 60 del siglo pasado), a través de postesado, generando de este modo un conjunto monolítico.

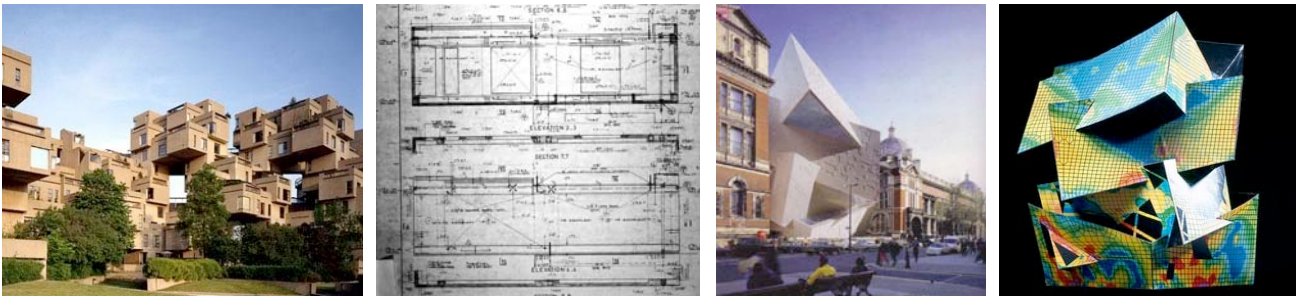


Figura 4 – Habitat '67: (1) vista exterior y (2) plano de estructuras delineado a mano. Museo Victoria & Albert: (3) vista exterior de la propuesta y (4) maqueta modelo FEM.

La propuesta de Daniel Libeskind para la ampliación del museo Victoria & Albert de Londres (1996-2004) se basa en la idea de una línea que se quiebra en el espacio formando una espiral como concepto geométrico del edificio. En contraposición al proyecto de Safdie, vemos como en este caso Libeskind rompe con la ortogonalidad entre las piezas, apoyando por las nuevas herramientas que los avances tecnológicos le proporcionan, configurando un icono del movimiento deconstructivista. A partir de este planteamiento conceptual de Libeskind, Arup –la ingeniería al cargo del desarrollo de la estructura- plantea la posibilidad de generar esta geometría a partir de un algoritmo matemático, buscando conferir un mayor rigor conceptual a la libertad de formas deseada por el arquitecto. La estructura se concibe como una fachada estructural quebrada y continua de hormigón armado, en la que apoyan las losas de los forjados sin necesidad de ningún apoyo intermedio, generando plantas libres. Para poder analizar y dimensionar una geometría de esta complejidad se desarrolló un completo modelo de elementos finitos.

Finalmente, se puede considerar que los dos ejemplos más paradigmáticos del proceso objeto de estudio son la Ópera de Sydney y el museo Guggenheim de Bilbao. El primero, obra de Jörn Utzon, es un claro ejemplo de arquitectura previa a la eliminación de la barrera del análisis

estructural en el ámbito arquitectónico, en el que desde su concepción hasta su inauguración en 1973 pasó por un tortuoso proceso que se prolongó a lo largo de casi dos décadas. El edificio fue además construido con un coste muy superior al inicialmente estimado.

El segundo, obra de Frank Gehry, inaugurado en 1997 en Bilbao, se trata en cambio de uno de los primeros en los que para el desarrollo de su compleja geometría se emplearon de forma pionera (1987) ordenadores personales y paquetes de software tanto de representación gráfica tridimensional (Catia) como de análisis estructural mediante el método de los elementos finitos (AES) como de CAD-CAM (Bocad). Gracias a esto, se pudo construir el edificio de forma fiel al concepto inicial de Gehry y ajustándose al presupuesto y plazo establecidos inicialmente.

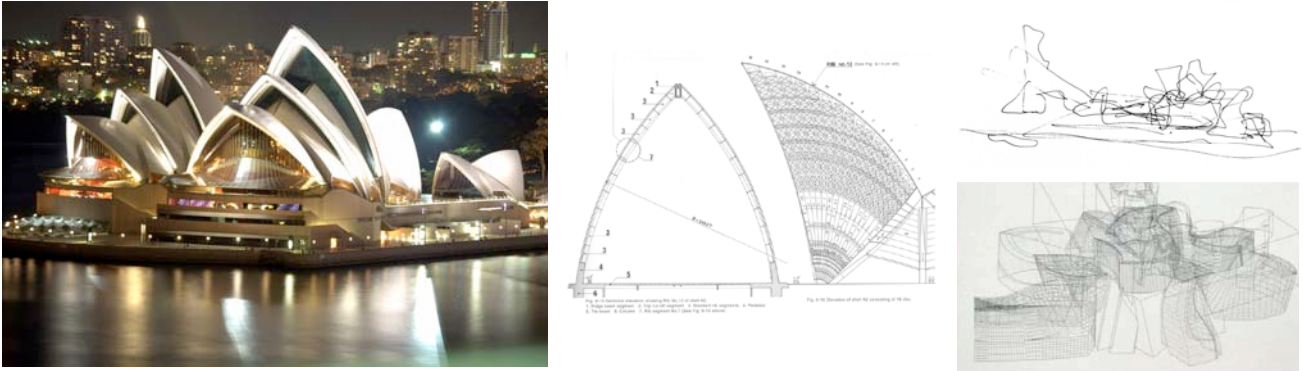


Figura 5 – Ópera de Sydney: (1) vista exterior y (2) geometría de una de las bóvedas. Museo Guggenheim de Bilbao: (3) croquis inicial y (4) modelo 3D con software Catia.

Cuando se comenzó a trabajar en el diseño de la Ópera de Sydney, en 1955, no existían ordenadores personales ni por tanto los paquetes de software asociados en el ámbito de la representación gráfica y del análisis estructural. Por otra parte, el método de los elementos finitos estaba siendo presentado en esa época y no se encontraba lo suficientemente desarrollado para ser empleado. Utzon decide partir de un formalismo como idea generadora del edificio, en la que no tiene en cuenta el esquema resistente, en lo que se puede considerar como un avance de lo que ha acabado por generalizarse en el planteamiento de los edificios singulares en el principio de este nuevo siglo. Así, en palabras del propio Utzon: “... en lugar de crear formas ortogonales, he creado una escultura –una escultura que cubre todos los usos necesarios-”.

Las superficies inicialmente dibujadas a mano alzada por Utzon y que definían las cubiertas carecían de una geometría definida. Pronto se pudo comprobar que estas superficies no eran analizables ni construibles con los medios técnicos ni constructivos de la época. Durante 4 años, los ingenieros de Arup, al cargo del diseño estructural del edificio, estudiaron hasta 8 geometrías diferentes para las cubiertas, desde los primeros diseños basados en parábolas, pasando por elipsoides hasta las definitivas basadas en superficies de una misma esfera.

En el caso del Guggenheim, el proyecto fue iniciado en 1987 y para su diseño se emplearon de forma decisiva ordenadores y software específico, tanto para la generación de volúmenes y superficies como para su posterior análisis estructural y fabricación de la estructura. Este hecho fue el que dotó al edificio de una singularidad anteriormente nunca vista y que habría sido imposible de llevar a cabo tan solo unos pocos años antes.

El diseño del museo es geoméricamente complejo, consistiendo en una serie de volúmenes interconectados, cada uno de ellos con formas aparentemente libres. La creación por parte de Gehry de geometrías tan orgánicas fue posible gracias al empleo por primera vez en el ámbito de los proyectos arquitectónicos del programa Catia. Este software permite manipular modelos tridimensionales de sólidos posibilitando la libertad formal de crear superficies curvas a antojo. El empleo de Catia supuso en este caso la ruptura de la barrera formal que impedía que ideas que llevaban años gestándose en la cabeza de Gehry pudiesen llevarse a cabo.

Gehry exportaba directamente las enrevesadas formas de sus maquetas a Catia, mediante el empleo de escáneres 3D que reconocían los puntos de las superficies de las maquetas transformándolos en coordenadas tridimensionales en el sistema. Por su parte, el uso de sistemas

de celosías de acero permitió a SOM, al cargo del diseño estructural, el planteamiento de un esquema relativamente sencillo para la generación de estas complejas geometrías.

El exitoso desarrollo del proyecto y construcción del edificio con esta geometría, enormemente compleja y alejada de lo habitual hasta la fecha, supuso la afirmación de que no existen límites geométricos a las formas construidas.

6. Conclusiones

El importante desarrollo tecnológico e industrial surgido especialmente durante la segunda mitad del siglo pasado ha configurado un caldo de cultivo propicio para la transformación de las formas arquitectónicas de una manera radical y rupturista, viéndose apoyado este proceso en los avances no solo tecnológicos sino también científicos, hasta desembocar en la situación actual en la que cualquier planteamiento formal puede ser analizado desde un punto de vista estructural. Ha desaparecido por tanto la barrera del análisis y de la representación gráfica en lo que al desarrollo de un proyecto arquitectónico se refiere.

Antes de la eliminación de dicha barrera una gran parte de los edificios se planteaban en función de que fuesen fácilmente calculables teniendo en cuenta los métodos científicos e instrumentos técnicos disponibles, resultando muchos planteamientos formales por tanto coartados por el hecho de que su cálculo resultase excesivamente complejo o directamente no abarcable. Los nuevos métodos de cálculo y representación gráfica proporcionan tal cantidad de posibilidades nuevas, que esta tentación de proyectar sólo lo calculable por métodos elementales ha desaparecido.

Además hoy en día la geometría no supone una limitación para el diseñador, ya que existen estructuras geométrico-matemáticas que permiten incorporar al proceso creativo una libertad total. Así, la forma se libera también de la rigidez impuesta en épocas anteriores por la geometría.

Esto ha provocado una verdadera revolución a nivel formal en el mundo de la arquitectura, especialmente en el campo de la edificación singular o icónica, donde, las concepciones formales han comenzado a imponerse sobre las conceptuales y estructurales.

Por tanto, en este contexto posibilista, las nuevas herramientas disponibles a raíz de los avances científicos y sobre todo tecnológicos expuestos a lo largo del presente artículo, pueden ser empleadas o no, y está, en cualquier caso, en último término en manos de los proyectistas hacer un uso sensato y responsable de las mismas.

BIBLIOGRAFÍA

- Bernabeu, Alejandro. 2007. "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". Quinto congreso nacional de Historia de la Construcción. Burgos.
- Bernabeu, Alejandro. 2007. "Estrategias de diseño estructural en la arquitectura contemporánea. El trabajo de Cecil Balmond". Tesis doctoral dirigida por D. Ricardo Aroca en la ETSAM. Madrid.
- Drew, Philip. 1995. "Sydney Opera House". Editorial Phaidon.
- Kurrer, Karl-Eugen. 2008. "The history of the theory of structures. From arch analysis to computational mechanics". Ernst & Sohn. Germany.
- Lozano Galant, José Antonio; Payá Zaforteza, Ignacio. 2011. "Structural analysis of Eduardo Torroja's Frontón de Recoletos' roof". Engineering structures 33, 843-854.
- Manterola, Javier. 1999. "Filosofía y técnica estructural". Revista de Obras Públicas. Número 3.388. Junio de 1999.
- Martínez Calzón, Julio. 2007. "Arquitectura e ingeniería. Una reflexión comprometida". Ingeniería y territorio. Revista del C.I.C.C.P. de Barcelona, nº 78, 2007: 6-13.
- Pellegrino, S. & Wislow, P. & Sharma, S. 2009. "Multi-objective optimization of free-form grid structures". Cambridge University. Springer.
- Sasaki, Mutsuro. 2004. "Shape design of free curved surface shells". Número especial a + u, Architecture and Urbanism, nº5 (404), Mayo 2004: 36-37.
- Van Bruggen, Coosje. 1998. "Frank O. Gehry. El museo Guggenheim de Bilbao". The Solomon R. Guggenheim Foundation.