

REIA #13/2019
180 páginas
ISSN: 2340-9851
www.reia.es

Felipe Asenjo Álvarez

Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño. Universidad Europea de Madrid
felipe.asenjo@universidadeuropea.es

Geometría de arquitectura. La forma indefinida / Architecture Geometry. The Undefined Shape

La relación entre geometría y arquitectura es innegable. Esta relación se extiende desde la idea a la puesta en obra, y se encuentra en la descripción gráfica, pero también en la ideación, así como en la optimización estructural y ambiental.

La geometría puede ser herramienta, pero también estrategia. Las formas expresivas resultan fascinantes, pero necesitan un proceso de parametrización para poder ser comunicadas, de modo que su materialización no resulte incierta.

La arquitectura del siglo XX se caracterizó, en gran medida, por el empleo de sistemas ortogonales. Otras industrias y el diseño exploraron configuraciones más complejas; multitud de objetos y máquinas adoptaron formas más libres.

Ciertamente, el diseño computacional llegó tarde a la arquitectura y a la construcción; del mismo modo los sistemas paramétricos están llegando con retraso. En cualquier caso, esto podría justificar la inhibición de algunas formas de riesgo extremo, pero no explica la indefinición formal de algunos proyectos del siglo XX.

The relationship between geometry and architecture is undeniable. This relationship extends from the idea phase to the implementation. This relationship is found in the graphic description, but also in the ideation and structural and environmental optimization.

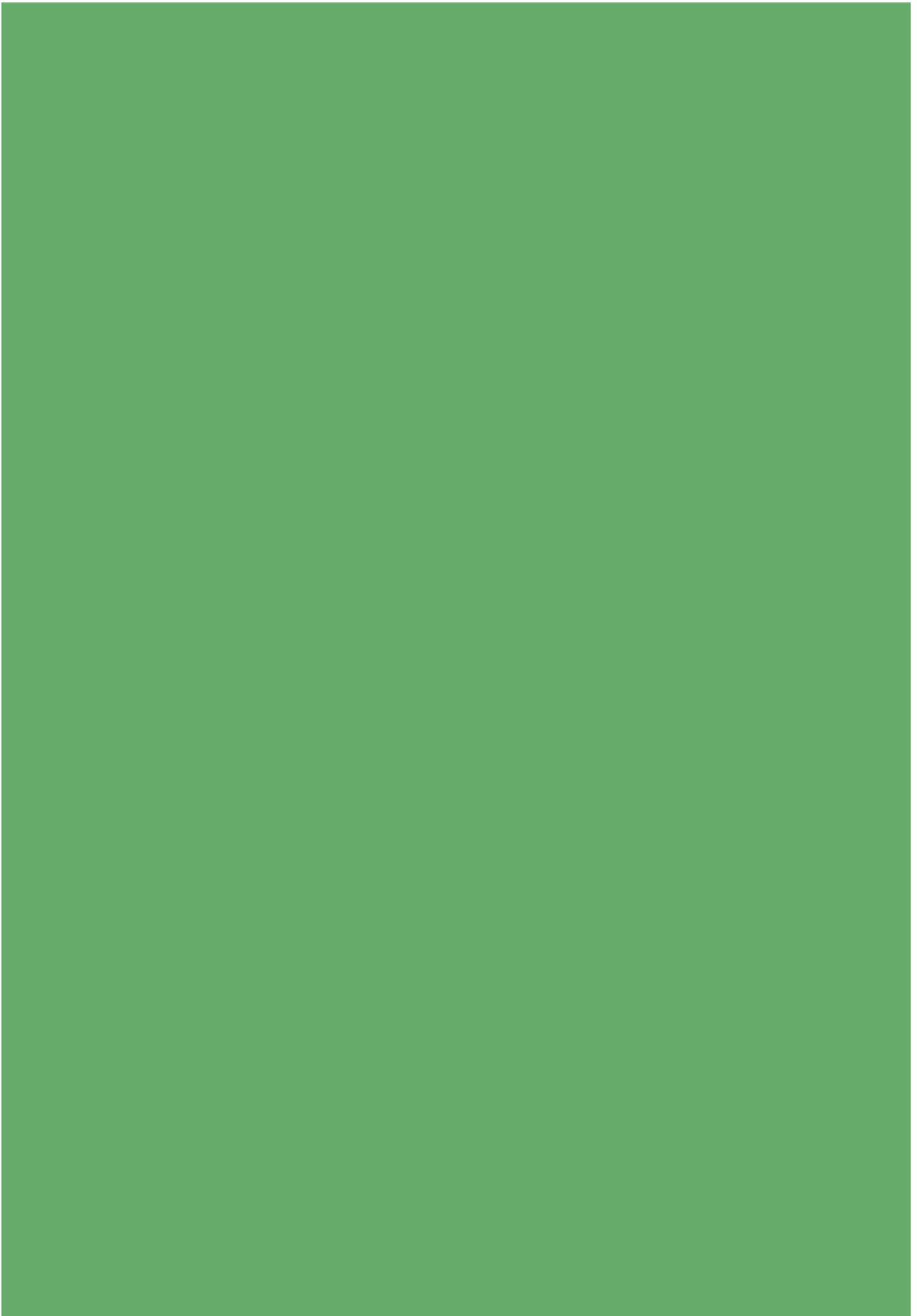
Geometry can be a tool, but also a strategy. The expressive shapes are fascinating, but they need a process of parametrization to be communicated, so that their materialization is not uncertain.

The architecture of the twentieth century was characterized by the use of orthogonal systems. Other industries and designs explored complex configurations; Many objects and machines have adopted free shapes.

Computer Design came late to architecture and construction; In the same way, Parametric systems are arrived with delay. In any case, this could justify the inhibition of some forms of extreme risk, but it does not explain the formal lack of definition of some projects of the 20th century.

Geometría arquitectónica, Geometría estructural, Diseño geométrico, Diseño arquitectónico, Diseño Paramétrico /// Architectural Geometry, Structural Geometry, Geometric Design, Architectural Design, Parametric Design

Fecha de envío: 07/05/2018 | Fecha de aceptación: 22/02/2018



“La geometría debe ser interpretada como un recurso para garantizar la optimización de la forma”.

La geometría ayuda a la definición de modelos que permiten describir formas; estas, generan superficies, espacios y volúmenes; la arquitectura los articula.

La interpretación geométrica de la forma se hace más necesaria cuanto más compleja es, de modo que existe un nexo entre ella y las disciplinas servidoras de la arquitectura: la construcción, el cálculo estructural, la acústica, etc. Con frecuencia, las propuestas de arquitectura presentan una interrupción en esta relación. Este artículo se interesa por estos casos y las consecuencias que, entonces, se producen.

La idea de que el éxito del diseño está ligado a la practicidad y a la inmediatez (a la sencillez) es un antiguo debate, pues la complejidad de la forma es algo que parece irrenunciable en el proceso creador. Es así, porque la geometría compleja produce en el subconsciente humano, referencias simbólicas constantes; como a la Naturaleza. La Naturaleza es compleja, pero eficaz; cada forma obedece a una función; produce construcciones excepcionales; auténticas lecciones de tridimensionalidad. En ella proliferan los sistemas de proporciones y las repeticiones, con especial presencia de algunas como la serie de Fibonacci o la proporción áurea. En la Naturaleza, toda esta complejidad existe con un doble fin: la máxima eficiencia, con la mínima energía. Esta es la misma idea omnipresente en la optimización de la forma arquitectónica.

De la observación de estas y otras estructuras surge el intento de imitarlas rompiendo con la seguridad de lo conocido: así, las artes plásticas han explorado la abstracción después de obtener la perfección figurativa, y la música lo ha hecho con la atonía tras obtener la excelencia en la armonía. La justificación, probablemente, se encuentra en la necesidad de producir soluciones no convencionales; nuevas, alejadas de la costumbre y, como resultado, sorprendentes. Existe, además, una componente esotérica relacionada con la forma y su composición, como en las matemáticas o en la música, cuya cercanía a la geometría es indudable. Estas ciencias están íntimamente relacionadas con el misterio y lo oculto: el número de oro, el pentagrama o pentáculo, o la proporción áurea son parte del misterio.

1. ARAUJO ARMERO, Ramón. Geometría técnica y arquitectura. Septiembre de 2004. *Tectónica* 17. Pág. 4.

Las tradiciones técnicas del mundo de los constructores, conectadas con el conocimiento geométrico, dieron lugar a logias ocultistas con rituales secretos; primero en Oriente y después en Occidente.

Se ha atribuido a lo que se denomina “revolución digital” la aparición de formas audaces; sin embargo, la audacia ha sido una constante. Los diseñadores y los artistas han sobrepasado los límites para alcanzar su expresión personal, complejizando con ello la comunicación de la idea. Ha sido entonces, cuando la definición formal se ha convertido en obstáculo; sobre todo, cuando el paso del mundo de la idea al mundo de lo material debe producirse inexorablemente. Este es el caso de arquitectura.

La maqueta es el instrumento para imaginar, desarrollar y comunicar, convirtiéndose en imprescindible, cuando las formas asumen mayor riesgo. Sin embargo, resulta limitante cuando la forma explora sus límites extremos; cuando los interiores pasan a exteriores, las cubiertas se confunden con los paramentos, y éstos con los suelos. En ese momento, la dificultad consiste en trasladar la idea a la construcción de una manera eficaz, intentando garantizar:

- La eficacia en aspectos como la habitabilidad, la estabilidad y la conservación.
- La eficiencia en los recursos y los medios que se emplean en la ejecución, de cara a obtener la mayor estandarización, pero manteniendo la singularidad.
- La eliminación de las incertidumbres sobre el resultado, coste y tiempo.
- La satisfacción del que proyecta, que desea que su idea sea trasladada fielmente a la obra.

La geometría queda, entonces, ligada tanto al proyecto, como a su materialización; tanto cuando la forma es el argumento del proyecto, como cuando ésta es necesaria para resolver problemas estructurales, optimizar secciones, o mejorar condiciones técnicas de carácter ambiental. En el primer caso, la expresividad se enfrenta violentamente a la usabilidad, y la profusión formal es relacionada con una opción personal del autor, en un ejercicio de expresión anecdótica a su contexto. Cuando esta manifestación desbordante es aceptada, se producen logros elocuentes; la salida del marco de costumbre ha permitido, con frecuencia, avances valiosos en el diseño, pero también en la técnica constructiva.

Después de las formas de fábrica: las formas de hormigón

Uno de los momentos de mayor impulso fue el inicio de la experimentación, con láminas de hormigón, de soluciones que, en piedra ya se habían producido. Ya en el gótico, la masa había transformado parte del sentido estructural en delgadas bóvedas nervadas. De igual manera había sucedido en su posterior transformación en bóvedas tabicadas, que heredando el sistema de encamonado y las cimbras de la fábrica pétreo, adoptaron un material más humilde.

La introducción del hormigón armado sucedió cuando se intuyó como material que, pudiendo trabajar a tracción y a compresión, construía el espacio, lo sustentaba y lo vestía con su austeridad. La plasticidad y el monolitismo del hormigón armado trasladaban esfuerzos por su masa; la misma que envolvía y la misma que singularizaba el espacio.

El nuevo material presupuso la desaparición del muro y el esquema gravitacional masivo como elemento distribuidor y transmisor de cargas, en favor de otro de elementos esbeltos y configuración libre. El material plástico, capaz de adoptar cualquier forma, dio, sin embargo, lugar a la racionalización y al control en gran parte de los casos. Adoptando un sistema de soportes en disposición reticular.

No todos lo manejaron igual, y en algunos casos se incorporó como elemento integrante de un nuevo lenguaje: en él perdió la posición estructural propicia en favor de una mayor expresividad. Cuando así sucedió, fue necesaria la asistencia de la técnica para resolver otros problemas inherentes a la forma: fundamentalmente para el diseño y para la construcción de los moldes de su puesta en servicio.

Con la disponibilidad de este material fácilmente moldeable, se inició el estudio y desarrollo de láminas de hormigón armado con directrices diversas, que cubrieron grandes espacios con espesores mínimos. De este modo, se recuperaron otra vez las formas de directriz curva que se habían desarrollado con fábrica. Las formas desnudas volvieron a recibir la responsabilidad de la expresividad, y la estructura adquirió el cometido que la ornamentación había sustentado.

El control técnico llegó desde la geometría, que se encargó de traducir la idea al lenguaje de lo material. Su empleo dio lugar a toda una investigación que desarrolló su cálculo y tecnología; a través del estudio de la forma se pudieron establecer los comportamientos estructurales. La llegada de la informática supuso un avance significativo, que se ha incrementado hasta parámetros inimaginables en los últimos años, y en el que arquitectura e ingeniería han compartido protagonismo.

Partiendo del supuesto de que para poder reproducir una forma es necesario conocerla, los modelos informáticos son fundamentales en el diseño y en el cálculo. Antes de este desarrollo tecnológico, los modelos complejos de describir necesitaron maquetas a diferentes escalas. Algunas se construían para ser destruidas mediante secciones, que permitían la parametrización de su envolvente por rebanadas paralelas. Sin embargo, cada uno de los puntos que se obtenían, solo tenían una referencia cartesiana. En el mejor de los casos, definida la curva por puntos, esta sufría una adaptación a otra conocida (preferiblemente cónica, por ser fácilmente parametrizable), y se reconstruía el modelo para volver a seccionarlo en sucesivas ocasiones. En el ámbito estructural las maquetas también sirvieron como elemento de comprobación, de modo que igualmente se procedía a su destrucción mediante cargas proporcionales, simulando la puesta en servicio de las estructuras, siempre con la limitación de que la reducción de escala y su distinta materialidad condicionaban el ensayo.



Fig. 01. Las curvas más importantes para el diseño computacional han sido las Bézier y los B-Splines, siendo sus estudios determinantes para el desarrollo de automóviles como los Citroën DS, conocido también como "Tiburón".
 Disponible en: <https://www.pinterest.es/pin/243968504791690497/?lp=true>.
 06/05/2018.

Fig. 02. El Concorde también fue resultado de la revolución computacional que favoreció el desarrollo de las curvas Bézier y las B-Spline, en la década de los 60.
 Disponible en: <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/289568>.
 06/05/2018.

Las formas geométricas en el siglo XX

En el siglo XX se produjeron ensayos en hormigón que desafiaron la lógica del equilibrio, y que exploraron la mayor expresividad del material, inicialmente, con cálculos aproximados; sin embargo, fue un momento de madurez. Los métodos de cálculo se definieron gradualmente, los procedimientos de puesta en obra se sancionaron con la práctica, y tanto unos como otros, condujeron al avance en cimbras y encofrados.

Las superficies que resultaron más exitosas fueron las regladas cuadráticas. Lo fueron, porque en el ámbito matemático sus ecuaciones son sencillas, y en el geométrico los moldes se construyen con dos generatrices rectas y sencillas de implementar. Su punto fuerte fue, por un lado, que su estructura formal presentaba capacidades estructurales superiores a otras como las desarrollables. Estas últimas pueden ser transformadas en planos, aunque las deformaciones que permiten, no siempre las hacen adecuadas estructuralmente. Por otro lado, en el caso de las primeras, su puesta en servicio es más sencilla, porque se generan con elementos rectos, que les permite adquirir el papel de nervios cuando es requerido. A esto se añade que, en el terreno estructural, cuentan con la ventaja de permitir aproximar la flexión al estado de equilibrio.

Estas son las condiciones que cumplen el paraboloide hiperbólico y el hiperboloide hiperbólico. En el primero las dos direcciones generatrices están contenidas en planos paralelos y se genera como la transición de una parábola a través de otra con sus ramas apuntando en sentido opuesto, o dividiendo los lados opuestos de un cuadrilátero alabeado en partes iguales, y procediendo a unirlos con rectas (procedimiento favorable para el encofrado con madera).

El otro modelo que resultó exitoso fue el hiperboloide hiperbólico. Esta es la generada por la revolución de una recta en torno a un eje, generando una superficie alabeada no desarrollable, cuyas secciones por los planos que contienen al eje, son hipérbolas; por tanto, se puede construir como un hiperboloide de revolución.

Como es de suponer, esto no ocurrió exclusivamente en el ámbito de la arquitectura. La industria tuvo su momento paralelo, incluso más exitoso, con investigaciones sobre la curva que dieron lugar a los trabajos de Pierre Bézier o Paul de Casteljaou. A fines de los cincuenta Pierre Bézier y Paul de Casteljaou se dedicaron básicamente al mismo objetivo;

Fig. 03. Uno de los diseños más reconocidos del siglo XX: la silla Tulip de Eero Saarinen. Disponible en: <https://www.noboruki.com/es/sillas-modernas-baratas-cocina-comedor/47-silla-tulip-reposabrazos.html>. 06/05/2018.



ambos en la industria del automóvil. Bézier, ingeniero en Peugeot, desarrolló en 1966 sus curvas basándose en polinomios de Bernstein. Casteljau, ingeniero de Citroën, había trabajado en un desarrollo algorítmico en 1959. Sin embargo, ambos llegaron al mismo tipo de curvas y, aunque lo hicieron con recursos matemáticos distintos, sus teorías son equivalentes. El algoritmo que las define se conoce como “algoritmo de Casteljau”, pero las más conocidas llevan como nombre “curvas de Bezier”. Bezier publicó sus trabajos y Casteljau los desarrolló como trabajo de empresa, pero esta los consideró secreto industrial. De este modo, en los sesenta se desarrollaron las más importantes para en el diseño computacional: las de Bézier y las B-Splines. Su conocimiento fue determinante para el desarrollo de automóviles, como el Citroën DS (conocido como Tiburón, fig. 01), o aviones como el Concorde (fig. 02); la industria aprovechó el poder de las curvas, de modo que le permitieron lograr rigidez sin necesidad de elementos estructurales adicionales.

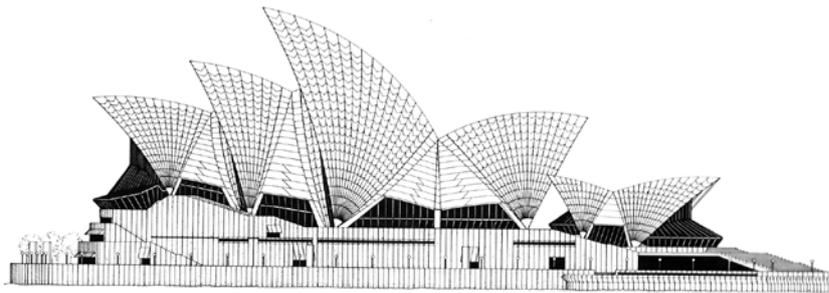
En los cincuenta, multitud de máquinas, muebles o electrodomésticos (fig. 03) cambiaron la arista por la curva de un modo natural. Añadido al inconveniente de la complejidad de comprensión y de representación de algunas curvas, para la arquitectura, todas estas superficies presentaban la dificultad de la repercusión económica imposible de amortizar en una seriación industrial. Su empleo fue singular en las ocasiones en las que pudieron competir por su fuerte expresividad y, en algunas otras, por sus ventajas estructurales.

La forma indefinida: recorriendo los siglos XX y XXI

Aún sin resolver algunos de estos problemas, la arquitectura no rehusa el empleo formas distintas a las ortogonales, pero con frecuencia, la descripción exhaustiva no es parte de la propuesta de un proyecto, y posteriormente comienza el trabajo de formalizarlo. Ese camino se pretende recorrer con el máximo respeto por el diseño inicial, pero incorporando planteamientos que permitan hacer el modelo analizable, comprensible, y posteriormente trasladable a una obra construida.

El proceso gráfico está siempre presente en la fase de ideación, incluso en las formas más simples y asequibles. La mano dibuja o tal vez una aplicación CAD lo hace; la traslación al terreno se realizará mediante

Fig. 04. Alzado lateral de la Opera de Sídney. En: *Sydney Opera House*. Jorn Utzon. DREW, Philip, 2002.

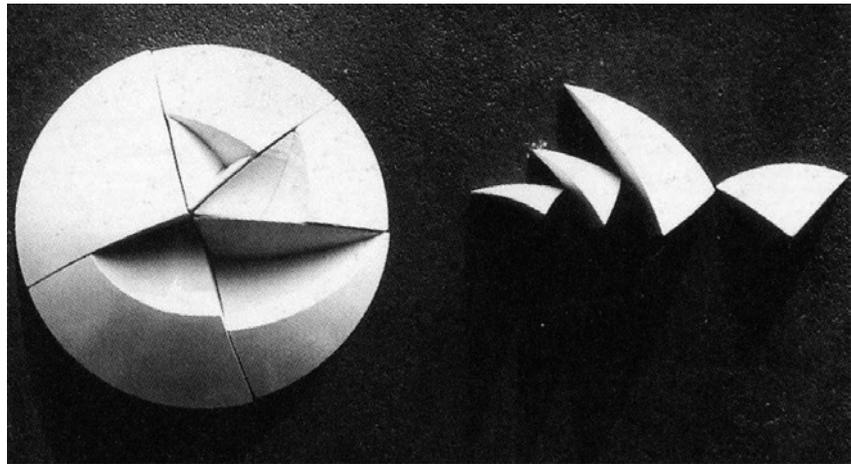


coordenadas cartesianas o polares desde un lugar de estacionamiento (este es, también, un procedimiento gráfico). En nuestro tiempo, el empleo de medios digitales es indiscutible en todas las fases del proyecto, pero, así como la industria puede cerrar un ciclo digital completo desde el diseño, pasando por el cálculo y desarrollo, y concluyendo con la fabricación, la construcción no trabaja con esa posibilidad por el momento; el ciclo se interrumpe en la fabricación. Siendo cierto que cada vez más componentes tienen un ciclo digital íntegro, todo apunta al tamaño como la dificultad principal, si bien podemos encontrar equivalentes industriales en tamaño, cuyo control es completo: por ejemplo, esta. Es impensable, para esta o la aeronáutica, que la definición de alguna de sus partes pudiera quedar a la libre solución de la obra.

Esta es la principal diferencia: la arquitectura y su industria vienen de una tradición de planteamientos sin soluciones exhaustivamente desarrolladas. Es lícito reconocer que las naves, bóvedas, cúpulas y transiciones entre ellas, estuvieron bajo el control en obra de los arquitectos y maestros de obras anteriores al siglo XIX. Estos tuvieron limitaciones fundadas para la representación, y las solventaron con práctica y dedicación a la obra; si volvemos sobre el equivalente naval, este funcionó de un modo similar. Pero la Revolución Industrial lo cambió todo, y los ingenieros trasladaron a la fabricación proyectos perfectamente definidos, que permitieron que distintos componentes se desarrollaran a kilómetros de distancia. En arquitectura, proyectos ideados durante los pasados cien años han encontrado sus soluciones durante el desarrollo de su construcción, amenazando con frecuencia su resultado. Se debe reconocer que, en muchos casos, han alcanzado notable éxito, pero manteniendo grandes dosis de incertidumbre.

Cuando se aborda la “forma indefinida” es imposible no pensar en la Ópera de Sídney (fig. 04). El proyecto, inicialmente concebido de una manera muy libre, es de los más conocidos por haber necesitado reconducirse a formas calculables y construibles. Los problemas que rodearon a la ejecución de la obra costaron a Utzon ser apartado del proyecto cuando todo parecía encauzado. La propia Administración australiana cometió errores y precipitaciones, y la industria local presionó por encontrarse relegada, pero la indefinición geométrica de las conchas produjo abundantes dificultades, así como necesidad de costosos ensayos y retrasos en la ejecución. Aun cuando fueron, finalmente, parametrizadas, su increíble tamaño hizo complicado contar con los medios auxiliares necesarios.

Fig. 05. En: Los cascarones se obtienen de una misma esfera de 75 m. en: *Sídney Opera House*. Jorn Utzon. DREW, Philip, 2002. Pág. 14.



Ove Arup se encargó de la ingeniería y contempló desde el inicio estos inconvenientes constructivos; las cáscaras de hormigón no podrían levantarse sin encontrar un sistema estructural que permitiera construir el edificio a un coste razonable y sin desvirtuar la idea original. La falta de un estudio geotécnico adecuado retrasó el inicio de la cimentación, de modo que se pudo contar con más tiempo para resolver las cubiertas. Aun así, trascendió a la prensa y sumado al sobre coste de la cimentación (sobre el que Utzon no tuvo responsabilidad) generó un importante nerviosismo, tanto en los políticos, como en la opinión pública.

Arup propuso diferentes modelos constructivos sin encontrar una solución aceptable. Se ensayaron formas parabólicas, hiperbólicas y elipsoidales. Esta llegó del propio Utzon, basada en casquetes esféricos. Todos de la misma esfera, de 75 metros de radio, simplificaba mucho la forma y fundamentalmente la estructura. La esfera con una curvatura uniforme producía innumerables combinaciones que, además, eran muy sencillas de describir geoméricamente. En este punto, aún quedaba por definir el desarrollo constructivo: fueron soportadas por vigas en abanico, que se unían en un apoyo, pero que formaban parte de un casquete concéntrico (fig. 05), siendo de directriz circular y siempre del mismo radio (esto posibilitó la reutilización de los encofrados para diferentes piezas). Las vigas de sección variable, que la aumentaba al acercarse a la cumbre, se desarrollaron como meridianos de esfera, lo que también contribuyó a la simplificación del problema geométrico-estructural. La solución recibió críticas por falta de esbeltez, pero la posición de inestabilidad en la que se colocaban las cascaras no permitió más ligereza.

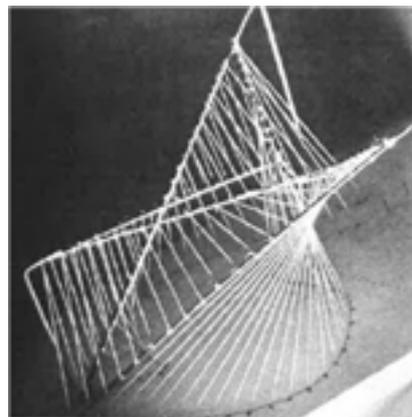
Fue necesario demoler con explosivos la estructura que previamente se había comenzado a construir, lo que aumentó la percepción de caos que se percibía de la obra. Aún con todo esto, el resultado fue magnífico; la ópera es uno de los iconos del siglo XX y la imagen más representativa de la ciudad y del país, pero a punto estuvo de no ser llevada a cabo, o de haber cambiado significativamente la apariencia del proyecto.

Es muy conocido el caso del Pabellón Philips (fig. 06), que se construyó para representar a la marca de iluminación en la Exposición Universal de Bruselas de 1958. El encargo lo recibió Le Corbusier con indiferencia,

Fig. 06. El Pabellón Philips en construcción.
En: *RC Resúmenes de Construcción 3. Poema Electrónico*. María José Pizarro & Oscar Rueda. 1999. Pág. 6.



Fig. 07. Maquetas de alambre y textiles de las últimas propuestas. En la de alambre ya no aparecen superficies planas, y presenta un tercer pico. En: *RC Resúmenes de Construcción 3. Poema Electrónico*. María José Pizarro & Oscar Rueda. 1999. Pág. 7.



pero la complejidad de realizar un “poema electrónico” despertó su interés, y trazó, a mano, un estómago que debería ser la planta que envolviese al visitante.

No parecía fácil darle tridimensionalidad a aquella planta. La solución la aportó Iannis Xenakis. Sobre ella, levantó dos superficies complejas enfrentadas, basadas en paraboloides hiperbólicos. El punto conflictivo fue cubrir el espacio que dejaban entre si, de modo que inicialmente se ensayaron superficies planas que lógicamente no se adaptaron a los trazos curvos de la planta.

Finalmente, Xenakis consiguió darle forma con superficies regladas, y la materialidad del pabellón se confió a paneles de hormigón prefabricados de escasos cinco centímetros de espesor. Las envolventes se realizaron en un despiece de teselas romboidales cercanas a un metro cuadrado, colocadas en obra con ayuda de una cimbra; esta se retiró tras el postesado de las costillas. Los paraboloides, así conformados, fueron comprimidos por cables vistos, que recorrían las directrices regladas de las superficies.

Para definir la forma y encontrar su optimización estructural se realizaron multitud de maquetas de diferentes materiales (fig. 07). La empresa Stabed construyó una de madera contrachapada (fig. 08) para desarrollar el sistema de postesado, en el que la tensión se aplicaba mediante unas varillas que se iban tensando y aprisionaban los paneles. El sistema era complejo, pero además irreal, dado que el contrachapado no pesaba. Se tuvieron que compensar las cargas con cables que, pasando a través de poleas, descolgaban saquitos de arena que impedían que se contracurvasen las cáscaras de contrachapado.

Las teselas de hormigón que finalmente lo conformaron, se encofraron contra un molde de arena, que reprodujo, por porciones, los paraboloides hiperbólicos. Tras su puesta en obra, y antes del postesado, se rellenaron las juntas con mortero de cemento, y se recubrieron con una pintura en plata brillante. La solución, geoméricamente resistente y con altamente imaginativa, fue materialmente artesanal y alejada de la capacidad tecnológica que, la industria de postguerra y la firma, quería representar.

2. El encargo incluía el programa de exhibición, que se planteó como una performance, que llevó el título “poema electrónico”.



Fig. 08. Maquetas de madera contrachapada postesada con alambres, para ensayar la construcción por paneles delgados de hormigón prefabricado. Las caras libres se cargaban con saquitos de arena para tensionarlas. En: *RC Resúmenes de Construcción 3. Poema Electrónico*. María José Pizarro & Oscar Rueda. 1999. Pág. 4.



Fig. 09. Estadio Olímpico de Múnich. 1972. En: *RC Resúmenes de Construcción 3. Estadio Olímpico de Múnich*. Frey Otto. 1999. Pág. 17.

El proyecto ganador del concurso para el Estadio Olímpico De Múnich de 1972 (fig. 09), mérito que recaló en el equipo Benisch&Partners, también presentó grandes dificultades de ejecución. Tras una selección de candidatos, un comité decidió el encargo a Frei Otto para desarrollar su construcción, con una propuesta que se basaba en la racionalización constructiva y la optimización material.

La dificultad se encontró en que, el proyecto proponía unos graderíos y recorridos aledaños vaciados en el terreno, que debían ser protegidos por una cubierta transparente. Esta debía evacuar el agua, suspendiéndose por una malla de cables, que se mantendrían izados por mástiles a modo de velamen náutico. El aspecto era el de una enorme tienda de campaña transparente, metáfora del lema de los juegos: “los juegos felices”.

Se optó por una solución de teselas de cristal acrílico (Plexiglás), en piezas de 75 por 75 cm aproximadamente. Cada panel que formaba la membrana se ajustaba a los demás con una junta de neopreno, que se interponía entre sus marcos metálicos, y quedaba fijada al cableado de acero por unos manguitos del mismo material. Todo se colgaba de mástiles inclinados de tubo de acero con nudos y abrazaderas de fundición.

Los modelos se ensayaron con maquetas. La cubrición se simuló con tul natural, con tul de poliéster e incluso con seda, buscando que se adaptara con mayor tensión a la forma (a la membrana de la maqueta le faltaba peso con relación a la real). Las maquetas se probaron en un puente de calibración tridimensional y se fotografiaron repetidamente con cámaras estereoscópicas en el Instituto de Estática de Modelos de Stuttgart, para poder simular las deformaciones (fig. 10). Este trabajo tuvo una traslación a obra, pero la forma, solo pudo tener una definición aproximada por planos acotados. Como resultado, la idea ganadora sufrió una importante transformación durante su ejecución, y la incertidumbre sobre su viabilidad y coste presidieron los Juegos.

Finalizando el siglo XX, Peter Cook ganó el concurso para crear un nuevo espacio expositivo en la ciudad de Graz en 1999: la Kunsthaus de Graz. El casco histórico de la ciudad era Patrimonio de la Humanidad e iba a ser Ciudad de la Cultura Europea en 2003.

Fig. 10. Prueba de un modelo a escala en un puente de calibración tridimensional.
En: *RC Resúmenes de Construcción 3*.
Estadio Olímpico de Múnich. Frey Otto.
1999. Pág. 18.

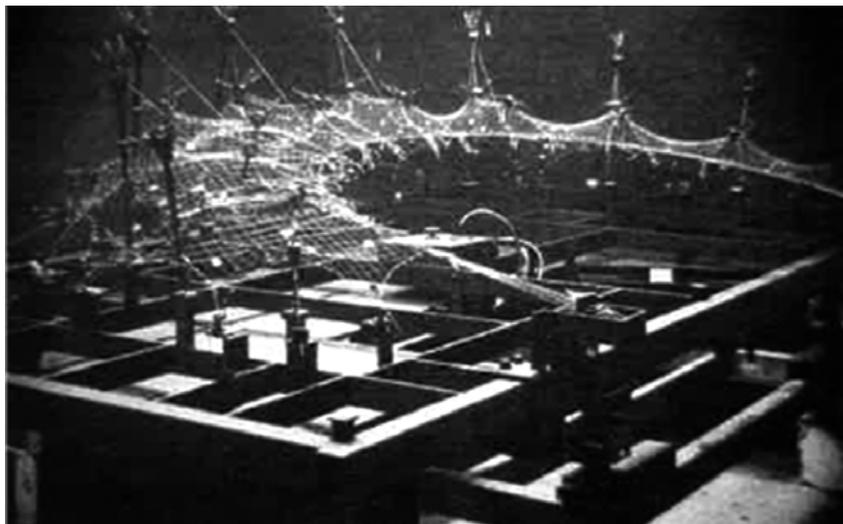
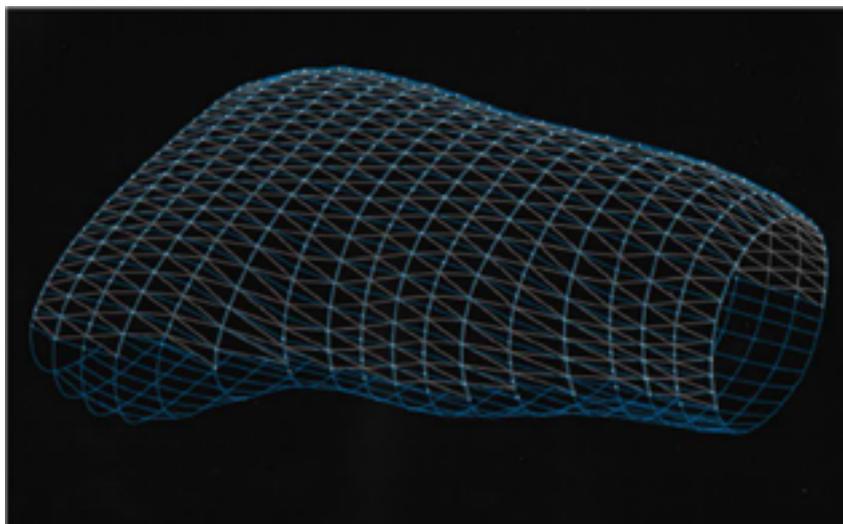


Fig. 11. Imagen de la estructura digital.
En: *A Friendly Alien. Kunsthaus Graz*.
Peter Cook, Colin Fournier. Architects



Cook y Colin Fournier emplearon la potencia de la informática del momento en el diseño de una pieza de fuerte carácter escultórico. El edificio se presentaba como un alienígena amigable, que había llegado a la ciudad y que se destacaba, del homogéneo tejido urbano, por su forma orgánica e intenso color azul.

En la concreción de la forma se trabajó inicialmente con modelos materiales, pasando después a modelos digitales. Se partió de una esfera que, convertida en malla, comenzó a deformarse estirando sus nodos. Los arquitectos moldearon el cuerpo del alien de una manera escultórica hasta encontrar la forma definitiva. La envolvente final fue difícilmente definible geoméricamente, por lo que procedieron a seccionarla paralelamente cada tres metros. De este modo quedaron definidas unas líneas que sirvieron como directrices de la estructura principal, y con un mapa decurvas de nivel se definió la envolvente. Posteriormente estos ejes o pórticos de la estructura principal se ataron entre sí con una trama triangular que los estabilizó (fig. 11). La posición de los núcleos de comunicación y de los forjados, se estudiaron para conseguir que la sección de las barras de la estructura fuese mínima. En el proceso de definición de la envolvente, también se hicieron variaciones en la

Fig. 12. Imagen de la envolvente. En:
A Friendly Alien. Kunsthaus Graz. Peter Cook,
Colin Fournier. Architects



estructura para que las placas de metacrilato azul, que lo recubriría, pudieran tener las máximas dimensiones y se minimizaran el número de piezas. Los óculos se asimilaron, para el desarrollo del despiece, a tubos hexagonales.

Pese a este esfuerzo en la definición digital, la estructura quedó parametrizada por las curvas que conformaban secciones paralelas, y fueron asimiladas a las de la geometría clásica. Los 1.200 paneles diferentes que constituyen la envolvente se anclaron por puntos coincidentes con las líneas de estructura: los cuatro extremos opuestos se hicieron coincidir con las barras principales (las que conforman las secciones paralelas). La curvatura de estos paneles de metacrilato azul vino determinada por la posición de los cuatro anclajes; existiendo un quinto y un sexto solo en las piezas de mayor tamaño. Determinados los puntos, fue necesario realizar un molde para cada una de las placas (fig. 12).

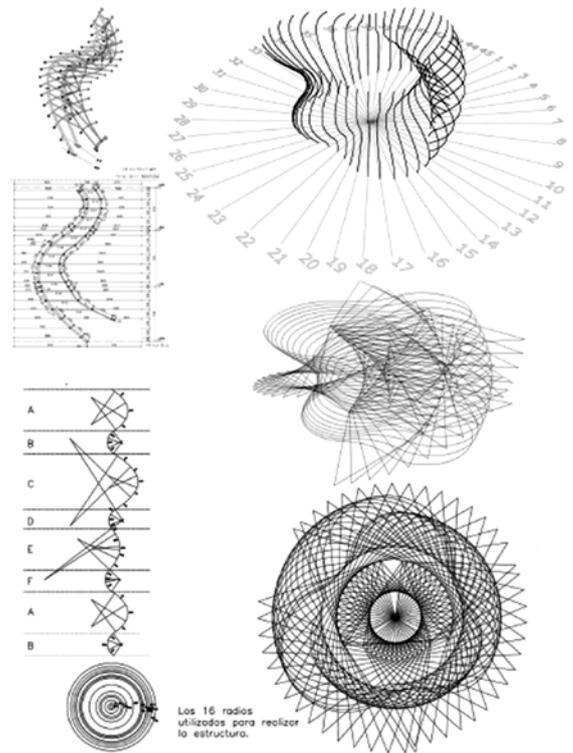
La Kunsthaus de Graz se proyectó al borde del desarrollo digital en la arquitectura. Tan solo unos pocos años más tarde, la tecnología gráfica tendría soluciones para la definición geométrica de la pieza y, lo más importante, para la traslación de la malla a la estampación de las placas de metacrilato en un entorno exclusivamente digital, sin necesidad de generar un molde para cada pieza.

Ya en el siglo XXI, el pabellón que debía representar a España en la Expo de 2010 (fig. 13) fue desarrollado por el estudio de Benedetta Tagliabue. Integrando la artesanía local de las cesterías de materias vegetales,



Fig. 13. Imágenes del pabellón y maquetas.
En: EGA. *Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*. Nº 11, 2011. Pág. 293.

Fig. 14. Curvas resultantes. En: EGA.
Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica.
Nº 11, 2011. Pág. 292.



se pensó como un recinto de formas libres con una envolvente vegetal y por tanto reciclable, que sintonizaba con la idea de construcción efímera de una expo.

Para el diseño trabajaron con maquetas de cartón y simultáneamente con dibujos en el intento de hacer que la forma fuera construible. Pero era necesaria la parametrización del volumen, de manera que las superficies que lo compusieran definitivamente fueran materializables en Shangai. Esto se consiguió generando una malla tridimensional cortada por secciones horizontales y verticales, que se convirtieron en las generatrices de una estructura de tubos que soportaban el recubrimiento vegetal.

Se seccionó la forma con planos paralelos cada 1,20 metros, lo que produjo una familia de curvas planas cerradas horizontales. En vertical se seccionó mediante planos radiales cada 2,40 metros, produciendo una familia de curvas abiertas verticales contenidas en los planos radiales (fig. 14). Entonces, fue necesario adaptar esas secciones a curvas parametrizables, de manera que los tubos estructurales se pudieran curvar con directrices conocidas.

El procedimiento, similar al de Cook, resultó ser suficiente para la construcción de un pabellón temporal, que se recubrió por un procedimiento artesanal de cestería flexible, pero en ningún caso se definieron las superficies de la envolvente que lo materializaron. Artesanos locales crearon escamas que luego se colgaron de la estructura. Su tamaño y la flexibilidad del material permitieron la adaptación al esqueleto.

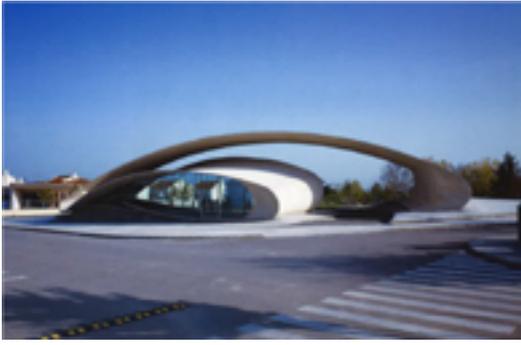


Fig. 15. Foto de Hisao Suzuki. Estación de autobuses del Casar de Cáceres en construcción. En: *Tectónica* 17. José Jurado Egea. Pág. 55.

Fig. 16. Foto de Hisao Suzuki. Estación de autobuses del Casar de Cáceres en construcción. En: *Tectónica* 17. José Jurado Egea. Pág. 62.

Fig. 17. Foto de Hisao Suzuki. Estación de autobuses del Casar de Cáceres en construcción. En: *Tectónica* 17. José Jurado Egea. Pág. 63.



Por último, la Estación de Autobuses en el Casar de Cáceres (fig. 15 y 16) de 2004 presenta una forma extraordinariamente compleja, pero definida. Creación de Justo García Rubio, desde el inicio del proyecto, se concibió como una lámina plegada de hormigón blanco que, con su gran tamaño, generaba un vestíbulo de espera a la vez que abrigaba la subida de los pasajeros al autobús, pasando de cubierta a suelo como cabe esperar de estas formas. La lámina es capaz de optimizar su sección para transmitir los esfuerzos estructurales, de modo que presenta una extrema delgadez con la que se salvan 34 metros ayudada por su doble curvatura, que asegura un trabajo solo en el terreno de la compresión.

La forma adoptada en su desarrollo es el hiperboloide de revolución, que está presente en ocho superficies de su despiece. Tiene, además, dos trompas cónicas en un apoyo, que simplemente dan continuidad a la lámina, pues en su interior albergan costillas resistentes, de modo que dos de los apoyos están conformados por hiperboloides, y el tercero se construye con las superficies resultantes de unir dos trocos de cono.

El despiece realizado por el arquitecto, en formas regladas, y su cuidada definición, facilitó enormemente el cálculo y la compleja tarea de encofrar la lámina. Para ello se emplearon elementos lineales de madera (fig.17), que se conservan grabados en la superficie blanca del hormigón, de modo que las generatrices de los ocho hiperboloides que la componen son fácilmente reconocibles. La idea de “proyecto vivo”, inherente al ámbito de la arquitectura, no debe confundirse con “indefinición formal”. Estos casos del siglo XX y XXI, abordados aquí, dispares en sus circunstancias, presentan en mayor o menor medida, algunas incertidumbres que la indefinición geométrica trasladó al resultado de la obra; en algunos casos con resultados finales sobresalientes.



Fig. 18. Exposición de la Vivienda de 1927 en Stuttgart (Weissenhof Siedlung). Le Corbusier. Disponible en: <http://www.stepienybarno.es/blog/2014/05/29/la-colonia-weissenhof-1927/>. (06/05/2018)



Fig. 19. Exposición de la Vivienda de 1927 en Stuttgart (Weissenhof Siedlung). Mies van der Rohe. Disponible en: <http://www.stepienybarno.es/blog/2014/05/29/la-colonia-weissenhof-1927/>. (06/05/2018)

Conclusiones

Le Corbusier proyectó dos edificios (fig. 18) para la Exposición de la Vivienda de 1927 en Stuttgart (Weissenhof Siedlung). La fotografía presenta una arquitectura que hoy definiríamos como moderna, y un vehículo que, sin duda, pertenece a otra época; otra fotografía (fig. 19) repite la escena ante la propuesta de Mies van der Rohe. Ambas permiten percibir que la arquitectura recorrió un camino distinto al de la industria del automóvil durante el siglo XX.

La transformación formal de la arquitectura estuvo condicionada, durante la revolución formal del siglo pasado, por la funcionalidad, tal vez por la necesidad de usabilidad, pero también por la exigencia de ajustar el proyecto a la materialidad posible. De modo que, no se puede asegurar que ocurrió exclusivamente por factores técnicos o de representación, también estuvieron presentes motivos de rentabilidad, tanto de tiempo, como de dinero.

Algunos ejemplos analizados, fueron pensados con la libertad formal que debe regir el proceso creador, pero posteriormente sufrieron adaptaciones a una variante construible. En cierta medida, la aplicación de medios digitales ha mejorado la posible representación y parametrización de forma, a la vez que le ha dado una respuesta técnica eficaz. Esto ha contribuido a que la arquitectura avance en la misma dirección que otras disciplinas con las que se les suponía aparente desventaja, como la automoción, la aeronáutica o el diseño industrial; objetos, vehículos o aviones adoptaron, claramente, a mitad del siglo XX, formas que la arquitectura no exploró con la misma intensidad.

Inmersos en la “Tercera Revolución Industrial”, se está empleando la potencia de la gráfica digital en la fabricación e incluso de la puesta en obra. Esto ha transformado el concepto gráfico, de manera que las herramientas reconocidas como gráficas (fundamentalmente los softwares BIM), son en realidad herramientas de gestión en un entorno gráfico. Ellas producen, almacenan y gestionan los datos del proyecto, pero también es cierto que a través de ellas se proyecta, se piensa y se comunica. Esto nos devuelve al debate suscitado por la llegada del CAD, y consecuentemente al mismo rechazo.

Es, sin duda, un debate superado. La informática, aplicada al diseño, no produce complejidad por sí misma, ni tampoco mejor arquitectura; sí se puede señalar entre otros argumentos, que ayuda a explorarla, definirla y a asegurar la fidelidad de la propuesta, que ha sido la inquietud que ha conducido este artículo.

Bibliografía

- ARAUJO ARMERO, Ramón. Geometría técnica y arquitectura. *Tectónica*, 17. 2004.
- DREW, Philip. *Sydney Opera House. Jorn Utzon*. Architectural in detail. Phaidon. Hong Kong. 2002.
- PIZARRO, María José & RUEDA, Oscar. Poema Electrónico. Pabellón Philips. Le Corbusier e Iannis Xenakis *RC. Resúmenes de Construcción* 3. 1999.
- OTTO, Frey. Estadio Olímpico de Múnich. 1972. *RC. Resúmenes de Construcción*, 3. 1999.
- GILABERT SANZ, Salvador. Dibujar el Pabellón de España para la Exposición Universal de Shanghai 2010. *EGA. Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 11. 2011.
- BOGNER, Dieter & FELLER, Barbara. *A Friendly Alien*. *Kunsthau Graz*. Peter Cook, Colin Fournier. *Architects*. 2004.
- JURADO EGEA, José. Estación de autobuses del Casar de Cáceres. *Tectónica*, 17. 2004.
- CRESPO CABILLO, Isabel. *Control gráfico de formas y superficies de transición*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2005.
- STEELE, JAMES. *Arquitectura y Revolución Digital*. Ed. Gustavo Gili. Barcelona. México D.F. 2001.

