

Una mirada transversal a la arquitectura internacional

Entre el soporte ingenieril y el manierismo geométrico



Carlos Nárdiz

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Resumen

A través de la arquitectura internacional, desde mediados del siglo XX (aunque podríamos remitirnos también a la primera mitad), se puede seguir la colaboración que se ha producido entre arquitectos e ingenieros (fundamentalmente estructurales) para proyectar y construir las obras de arquitectura más significativas. La aportación de la ingeniería a la búsqueda de la ligereza en las cubiertas, modificando las soluciones estructurales anteriores y las propuestas también de la arquitectura para construir en las fronteras del conocimiento, manifestadas no solo en las mallas espaciales y en las cubiertas colgantes, sino también en la transformación estructural de los edificios de altura, nos relaciona con una arquitectura en la que el soporte ingenieril ha estado muy presente. Cuando este soporte se ha querido transmitir como imagen tecnológica de la arquitectura, a partir de finales de los años 60, incluyendo la imagen exterior de las instalaciones, los accesos a los edificios y las soluciones estructurales de los cierres de vidrio, la arquitectura ha necesitado más que nunca del apoyo de la ingeniería en la búsqueda de soluciones innovadoras, al servicio de planteamientos arquitectónicos. En etapas más cercanas, ya en el nuevo siglo, en la que el manierismo geométrico ha dominado la imagen de la arquitectura, la ingeniería, siempre complementaria, se ha puesto al servicio de la arquitectura, produciéndose, a veces, contradicciones entre la racionalidad estructural y la imagen formal de los edificios.

Palabras clave

Arquitectos e ingenieros, cubiertas, edificios de altura, geometrías complejas

Abstract

By tracing international architecture from the mid-20th century (and possibly even further back to the early 1900s) we may appreciate the collaboration between architects and engineers (essentially structural engineers) in the design and construction of the most significant works of architecture. The contribution of engineering in the search for ever lighter roof structures, the modification of earlier structural solutions and architectural proposals for structures at the very boundaries of knowledge, as manifested not only by space frames and suspended roofs, but also by the structural transformation of tall buildings, reveals an architecture heavily influenced by engineering. From the end of the sixties and when attempting to transmit this influence as a technological image of architecture, including the external image of the building systems, the accesses to the buildings and the structural glazing solutions, architecture has required the support of engineering more than ever in the search for innovative solutions at the service of architecture. In more recent times, and now in the present century, geometrical mannerism has dominated the image of architecture and the ever-present support of engineering has been brought to the aid of architecture to produce sometimes contradictory results between structural rationality and the formal image of buildings.

Keywords

Architects and engineers, roofing, tall buildings, complex geometries

1. Introducción

Los arquitectos del Movimiento Moderno, en las primeras décadas del siglo XX, al separar el esqueleto resistente del cierre exterior, modificaron el papel que había jugado el muro en la arquitectura tradicional, contribuyendo a desmaterializar el edificio de viviendas y oficinas y ofreciendo una imagen exterior de geometrías puras y planos superpuestos a la que

era fácil adaptar la estructura resistente. El modelo lo habían tomado de los primeros rascacielos, fábricas, mercados, estaciones, galerías o palacios de exposiciones, en los que la ingeniería tenía una fuerte presencia, que reinterpretaron en función de los nuevos lenguajes que ofrecían las artes visuales ligados a la estética de la máquina. Detrás de maestros de la arquitectura como Frank Lloyd Wright, Mies van

der Rohe o Le Corbusier, se encontraban ingenieros poco conocidos como Joseph Polivka, Frank V. Kornacker o Vladimir Bodiensky, para que, sobre todo a partir de los años 40, pudiesen acometer obras como el Museo Guggenheim en Nueva York, las torres de Lake Shore Drive en Chicago, o las diferentes unidades de habitación a partir de Marsella. Igual ocurrirá con el arquitecto Louis Kahn en sus relaciones conflictivas en los años 50 y 60 con el ingeniero August Komendant, conocidas por el libro que éste publicó en 1975 sobre sus 18 años de colaboración en los principales proyectos de Kahn, como los laboratorios de investigación de la Richards Medical en Filadelfia, utilizando la prefabricación.

Los ingenieros, por otra parte, de forma autónoma o en colaboración con arquitectos, encontrarán en la búsqueda de la ligereza de las cubiertas desde las primeras décadas del siglo XX, su principal contribución a la arquitectura, primero a través de las posibilidades que ofrecía el hormigón armado para la construcción de estructuras laminares y, después, a partir de mediados del siglo XX, con las estructuras espaciales de barras de acero y las cubiertas colgantes con redes de cables atirantados o pretensados. A ellas se unirán también, desde finales de los años 50, las transformaciones estructurales de los edificios altos, trasladando la resistencia al perímetro de los edificios, y las distintas soluciones de los muros cortina como imagen de la transparencia entre el interior y el exterior.

La arquitectura, que venía reconociéndose en la imagen tecnológica de la ingeniería, de la producción en serie, de los nuevos materiales como los perfiles de acero y aluminio, el hormigón pretensado, las chapas metálicas plegadas, las distintas variedades del vidrio, los polímeros, etc. dio un salto de escala a partir de finales de los años 60, cuando con el llamado *'high tech'* incorporó lenguajes de diseño y constructivos provenientes de la industria del transporte, de la ingeniería estructural de los puentes, de las fábricas o de las instalaciones de los edificios como imagen tecnológica de la arquitectura, que hizo aún más indispensable la colaboración con los ingenieros.

Fue posiblemente la Ópera de Sydney en los años 60, con las relaciones conflictivas que se produjeron entre el arquitecto, la ingeniería y la Administración, el edificio que supuso un punto de inflexión en las relaciones entre la arquitectura y la ingeniería al servicio de formas geométricas complejas, en donde la ingeniería comenzó a tener una presencia mediática que se consideró fundamental para que la arquitectura internacional avanzara con nuevas geometrías, que necesitaban

también de la innovación tecnológica, aunque gran parte del resto de la arquitectura actual, de carácter nacional o local, se siga apoyando todavía en las técnicas tradicionales.

2. La búsqueda de la ligereza en las cubiertas

La experiencia de las primeras décadas del siglo XX en láminas de hormigón armado, desde Dischinger a Torroja, y que se continuará a lo largo de los años 40, e incluso 60, desde Nervi a Esquillan y Candela, va a sufrir un cambio de materiales y tipológico a partir de los años 50, cuando ingenieros como Robert Le Ricolais y Z.S. Makowski, inventores como Buckminster Fuller y arquitectos como Konrad Wachmann o Frei Otto, empiecen a experimentar con las estructuras espaciales, las cúpulas geodésicas, las estructuras *'tensigrity'* y las cubiertas colgantes. Antes, ingenieros como Fred N. Severud, colaborando con el arquitecto Matthew Nowicki (que murió en 1950), habían conseguido cubrir el recinto del Raleigh Arena con una red de cables pretensados desde dos arcos inclinados, experiencia que repitió Severud con el arquitecto Eero Saarinen en el Ingalls Hockey Rink en New Haven (fig. 1), terminado en 1958, en este caso desde un solo arco central.

Aunque en los años 50 las láminas de hormigón armado seguían inspirando todo tipo de formas, como le ocurrió al arquitecto Jörn Utzon en el concurso que ganó en 1957 para la Ópera de Sydney, con la cubierta en forma de velas que Candela, Nervi y Torroja consideraron imposible de construir, hasta que cuatro años después, a partir de la forma esférica, la ingeniería Ove Arup and Partners encontró la forma de construirlas como estructuras nervadas pretensadas, las estructuras ligeras con barras o cables de acero se estaban



Fig. 1. Ingalls Hockey Rink, en New Haven. Foto: C. Nárdiz

imponiendo ya para la cubrición de grandes luces. La exposición de Montreal, en 1967, tuvo en la cúpula geodésica del pabellón americano de Buckminster Fuller, y en la estructura atirantada del pabellón alemán de Frei Otto, sus principales iconos. Tres años después, el arquitecto Kenzo Tange que con el ingeniero Yoshikatsu Tsubai había cubierto las instalaciones deportivas de los juegos olímpicos de Osaka en 1964 con estructuras de redes de cables (siguiendo las enseñanzas de Severud), cubría con una megaestructura espacial de barras la plaza de las Expo de Osaka en el año 70, que permitió pensar en ciudades utópicas con cubiertas ligeras de mallas de barras, como defendía Yona Friedman como apoyo a su arquitectura móvil.

El desarrollo de las estructuras ligeras, a partir de los años 60, tuvo también mucho que ver con la aplicación de los métodos analíticos con ordenador, que empezarán a resolver la indeterminación de los cálculos con derivadas parciales, a los que se añadieron las posibilidades de los nuevos métodos matriciales, en donde la arquitectura, no solamente en el aspectos constructivo de las distintas soluciones a los nudos, barras, anclajes y tirantes, tendrá un evidente soporte en los encuentros estructurales de la ingeniería. A las mallas espaciales de barras y a las cubiertas atirantadas y colgadas, se unirán en esos años las estructuras neumáticas con las que el ingeniero americano Walter Bird conseguirá cubrir grandes estadios, y el también ingeniero David Geiger, que había proyectado con este tipo de estructuras el pabellón de los Estados Unidos en 1970 de la feria de Osaka, conseguirá cubrir también grandes recintos con las estructuras 'tensigrity' que había patentado Buckminster Fuller en 1950, como el pabellón Olímpico de Seúl en 1988.

Los arquitectos, a partir de los años 60, se mirarán en las imágenes de las estructura ligeras para salvar grandes luces. La imagen de los Juegos Olímpicos de Múnich en 1972, serán las cubiertas atirantadas del estadio, la piscina olímpica y el hall de entrada, después del concurso ganado en 1967 (en el mismo año que la feria de Montreal) por el arquitecto Günter Behnisch que necesitó para llevarlas a cabo el asesoramiento de Frei Otto y la definición constructiva y estructural por parte de la consultora de ingeniería Leonhard und Andrä, en la que trabajaban dos jóvenes ingenieros Jörg Schlaich y Rudolf Bergermann, que fueron en realidad los que consiguieron materializarlas. Los problemas derivados de la definición geométrica de las mallas de membranas, la normalización de elementos constructivos (incluidos los nudos y los anclajes) y la definición del anillo perimetral interior para recoger los



Fig. 2. Cubierta del estadio olímpico de Múnich. Foto: C. Nárdiz

atirantamientos de las mallas que complementase los mástiles inclinados exteriores, fueron aportaciones ingenieriles apoyadas en cálculos y ensayos con modelo reducido, para resolver las geometrías complejas de la cubierta del estadio (fig. 2).

Los proyectos de Schlaich y Bergermann, a partir de los años 80, en colaboración con los arquitectos, se reconocen también en las láminas de rejilla de acero y cristal, herederas de las cúpulas geodésicas de Buckminster Fuller, con mallas triangulares o rectangulares rigidizadas por cables diagonales, de una gran transparencia, como las que han ido cubriendo patios como el del Museo de Historia de Hamburgo (1989) e incluso espacios de estaciones, como la Estación Central de Berlín (fig. 3), de acuerdo con el concurso ganado



Fig. 3. Cubierta de la Estación Central de Berlín. Foto: C. Nárdiz

en 1995 por el arquitecto Meinhard von Gerkan, especializado en proyectos de estaciones y aeropuertos, incluido el propio aeropuerto de Stuttgart, con sus estructuras arborescentes de sostenimiento de la cubierta. Las mallas de rejillas triangulares se han convertido hoy en una imagen de las cubiertas ligeras, adaptables a todo tipo de formas, como la que el arquitecto Norman Foster y la ingeniería Buro Happold proyectaron en 1994 para cubrir el patio del Museo Británico en Londres, terminada en el año 2000.

Decía Frei Otto que la mejor construcción es aquélla que emplea el mínimo de energía y material, y que construir significa hacer arquitectura real en las fronteras del conocimiento. La ingeniería y la arquitectura han venido dando, desde los años 50, con las cubiertas ligeras, una respuesta a esas fronteras del conocimiento y sus realizaciones, que se prolongarán en los años 80 con membranas pretensadas como en el aeropuerto de Jeddah en Arabia Saudí, proyectado por los ingenieros Fazlur Khan (dentro de SOM) y Horst Berger; son la expresión de las posibilidades de colaboración entre la ingeniería y la arquitectura.

3. La transformación estructural de los edificios de altura

La imagen de los esqueletos resistentes de las estructuras metálicas reticulares de los primeros rascacielos en el Loop de Chicago, a finales del XIX, y la forma en que quedaban reflejados en las fachadas, excitaron la imaginación de Mies van der Rohe con sus dibujos de las torres en los años 20 en Berlín, que no conseguirá concretar hasta finales de los años 40, ya en América, con los apartamentos 860/880 Lake Shore Drive, también en Chicago, en los que la estructura metálica reticular resistente, revestida de hormigón para protegerla contra el fuego, se complementa con el muro cortina de la fachada, en el que los montantes de los perfiles laminados que enmarcan el vidrio contribuyen a acentuar la verticalidad del edificio. Los apartamentos, con 29 plantas, terminados en 1951, se convertirán en el modelo de las torres de viviendas y oficinas que Mies repetirá en Chicago, Detroit, Toronto o Nueva York, como el edificio Seagram en Park Avenue, terminado seis años después, con 39 plantas, casi enfrente de la Lever House, con la que SOM en 1957 había mostrado la nueva imagen de las torres de oficinas, en la que se reconocerán a partir de entonces las corporaciones que van a dominar el cielo de las ciudades americanas.

Con la sucesión de pórticos metálicos uniformemente espaciados, y nudos rígidos complementados con arriostramientos en los núcleos de escaleras y ascensores para resistir las

cargas laterales (viento y sismos), Mies había llegado a las 46 plantas del Toronto Dominion Center, terminado a finales de los años 60, y lo mismo había hecho la consultora de arquitectura e ingeniería SOM con otras torres que compartían el lenguaje racional de Mies, hasta que a partir de finales de los años 50 los ingenieros Myron Goldmith, que había presentado en 1953 en el IIT de Chicago una tesis sobre los efectos de la escala en los edificios altos apoyada en las experiencias de D'Arcy Thompson sobre el crecimiento y la forma, y Fazlur R. Khan, investigando sobre la eficiencia y la disminución del peso de las estructuras metálicas en estos edificios, mostraron, que al igual que en los puentes, sí se aumentaba la altura del edificio había que modificar el sistema estructural.

La concentración de la estructura que hacía Goldmith en su tesis en la periferia del edificio y que implicaba la concentración de pilares en la periferia del mismo, o la disposición de diagonales a medida que aumentaba la altura, pudieron ponerla en práctica Goldmith y Khan, trabajando dentro de SOM, en edificios de hormigón como el Dewitt Chesnut Apartment Building o el Brunwich Building, ambos en Chicago, terminados a mediados de los años 60 y, sobre todo, el John Hancock Center (1969) con estructura metálica y usos mixtos residenciales y de oficinas, en donde la participación del arquitecto Bruce Graham y el ingeniero Fazlur R. Khan fue fundamental para conseguir una estructura tubular metálica de 100 plantas, con diagonales exteriores para resistir los esfuerzos horizontales, que todavía domina el cielo de Chicago (fig. 4). El '*premium for height*' con el que Khan mostraba



Fig. 4. Lake Shore Drive en primer término, Dewitt Chesnut Apartament en el medio y el John Hancock Center al fondo, en Chicago. Foto: C. Nárdiz

la reducción del peso del acero en el tubo con diagonales periféricas (*brace tube*), se transformó en los años 70 en el 'bundle of tubes' de la Sears Tower, también en Chicago, con la que se llegó a las 110 plantas y en el 'tube-in-tube', en el que el tubo perimetral con diagonales y pilas separadas solo para resistir las cargas gravitatorias, se complementaba con un núcleo interior con pantallas de hormigón (ya desarrollado en esa época, con variantes como el Centro Pirelli en Milán, de Gio Ponti y P. L. Nervi, a finales de los 50) con el que se podía llegar también a las 70 plantas en edificios de hormigón armado.

Las torres de estructuras diagonales perimetrales, conformando estructuras externas espaciales apoyadas en la triangulación (*space truss*) y una estructura interior con pantallas de hormigón, se convertirán en la imagen estructural de las nuevas torres como el Banco de China en Hong Kong, en el que los ingenieros Leslie C. Robertson y Le Messurier, ayudarán a partir de 1982 al arquitecto I. M. Pei, especialista anteriormente en museos, a levantar esta torre acristalada con planta triangular, de 315 m de altura, en la que las diagonales exteriores definen la imagen de la fachada de cristal.

Será Le Messurier, quien desarrollará a partir de los años 70 las investigaciones que había iniciado Fazlur R. Khan con megaestructuras, mostrando que los edificios de gran altura podían ser construidos por medio de megacolumnas en los extremos del edificio, interconectadas por potentes diagonales, con las que se podía llegar a las 150 plantas de forma eficaz, y cuyas investigaciones serán útiles a arquitectos

como Norman Foster que con la ingeniería Arup consiguió levantar con un atrio interior la torre del Hong Kong and Shanghai Bank en Hong Kong (1986). El propio Le Messurier, con los arquitectos Hug Stubbins y Emery Rohh, conseguirá ya en la segunda mitad de los años 70 levantar la torre del Citicorp Center (fig. 5) en Nueva York (en una transversal al Seagram, desde Park Avenue) en el que un mástil central recibe la mayor parte de las cargas laterales, mientras que el cerramiento transversal arriostrado en fachada, recibe las cargas gravitatorias cada 12 plantas, dejando libre las 10 primeras plantas, en donde el edificio parece soportado solo por las cuatro pilas exteriores que ocupa la parte intermedia de cada lado del edificio.

El nuevo siglo nos traerá la destrucción de las torres gemelas de Nueva York (World Trade Center), proyectadas como tubos perimetrales en la segunda mitad de los años 60 por el arquitecto Minoru Yamasaki y el ingeniero Leslie E., con 110 plantas. La aplicación de los ensayos en túnel de viento, para comprobar la resistencia de las torres a las cargas laterales (como hará el propio Leslie E. Robertson con modelos reducidos), se irán complementando después progresivamente con modelos matemáticos por ordenador para simular la acción del viento o de cualquier fluido en cualquier forma geométrica (*Computational Fluid Dynamic*). Ello permitirá incluso asociar la forma y las consideraciones ambientales de ventilación del interior del propio edificio a los efectos del viento, como hicieron Foster y Arup en las Torre Swiss Re (1997-2004) en pleno corazón financiero de Londres (fig. 6).



Fig. 5. Planta baja del Citicorp Center en Nueva York. Foto: C. Nárdiz



Fig. 6. La Torre Swiss Re, en Londres. Foto: C. Nárdiz

Aunque los efectos del viento se han reivindicado como justificación de las nuevas formas de los edificios de gran altura (incluido el Swiss Re), la realidad es que las nuevas torres responden a lo que Deyan Sudjid ha llamado “la arquitectura del poder”, que tiene su máxima expresión en las torres que dominan el cielo de las ciudades emergentes (Hong Kong, Singapur, Pekín, Shanghái, Dubái, Doha, etc) que han sustituido a las ciudades americanas, y algunas europeas como Fráncfort o Londres, en el dominio de la altura con celosías metálicas triangulares en las fachadas (*dyagrid structures*) y núcleos de hormigón, que se transparentan a través de las fachadas de cristal y que no responden ya a planteamientos estructurales, sino a la imagen personalizada de las corporaciones que las encargan que tratan de mostrarla en la forma de la piel ligera de los edificios, reinterpretando incluso como han hecho Rem Koolhaas y Arup, la forma de las torres como en la sede de la CCTV en Pekín, construida para los Juegos Olímpicos del 2008.

4. La imagen tecnológica de la arquitectura

La industrialización de los materiales y los métodos de construcción, desde la producción al montaje, la importancia de las instalaciones (calefacción, aire acondicionado, iluminación, etc.) para la consecución de un entorno bien climatizado, la transformación de las fachadas ligeras para la mejora de las condiciones ambientales del interior de los edificios, que al mismo tiempo ofrezcan una imagen exterior transparente de los mismos, la flexibilidad de las plantas, la diferenciación entre los espacios sirvientes y los servidos, la disminución del peso de los materiales para abaratar su coste, la manifestación exterior de la estructura resistente informarán los retos de la arquitectura a partir de los años 60, que se traducirán en la propia forma de los edificios, en los que las aportaciones tecnológicas se impondrán sobre el lenguaje anterior compositivo y pictórico de la arquitectura.

El fallo del concurso para el Centro Pompidou en París (el Beaubourg), en 1971, por parte de un jurado presidido por Jean Prouvé, a favor del edificio proyectado por los arquitectos Renzo Piano y Richard Rogers con la ingeniería Ove Arup and Partners, mostraba los cambios que se estaban produciendo en la arquitectura de la década anterior, en la que la escala de los materiales y los elementos constructivos era la escala del edificio. La imagen del Beaubourg como un gran barco varado, con los accesos y las instalaciones exteriores, con las Gerberetes de acero fundido (fig. 7) y los nudos de los tubos y tirantes diseñados expresamente



Fig. 7. Las Gerberetes del Centro Pompidou, en París. Foto: C. Nárdiz

para la estructura, en los que se veía como decía Peter Rice (el ingeniero de Arup, junto con Ted Happold) la huella del proyectista frente a la producción industrializada del acero, se convirtió en la imagen de una arquitectura, apoyada aparentemente en la alta tecnología (*high tech*), sólo posible por la comunicación entre arquitectos e ingenieros. De esta arquitectura participarán en los años 70, e incluso después, aparte de los dos arquitectos anteriores, otros arquitectos británicos como Norman Foster, Michael Hopkins o Nicholas Grimshaw, extendiéndola a partir de las últimas décadas del siglo XX a otros muchos arquitectos, hasta que otra vez los aires postmodernos, volvieron a reivindicar la vuelta a los lenguajes clásicos y a los materiales tradicionales, aunque beneficiados ya de los encuentros constructivos anteriores.

El ingeniero Peter Rice, integrado en Arup, hará de su colaboración con los arquitectos, transmitida en su libro ‘Un ingeniero imagina’, publicado en 1994, dos años después de su muerte, su principal aportación a la arquitectura, llegando a estar asociado con Renzo Piano (con el que proyectó por ejemplo el Museo Menil en Houston) colaborando con Richard Rogers también en el edificio Lloyd’s en Londres, y fundando con los arquitectos Ian Richie y Martín Francis, “R. F. R.”, para proyectar estructuras acristaladas con el “vidrio estructural” como las de los invernaderos de La Villete en París (con el arquitecto Adrián Fainsbilder) o la pirámide de acceso al Louvre (con I. M. Pei). Con Norman Foster colaboró en el proyecto del aeropuerto de Stansted (el tercer aeropuerto de Londres), y con el arquitecto ‘desconstructivista’ Bernard Tshumi, a comienzos de los 80, en los edificios y la pasarela que los comunica en el parque de La Villete, co-



Fig. 8. Aeropuerto de Stansted en Londres. Foto: C. Nárdiz

laborando también con otros arquitectos que se extienden incluso a las primeras obras de Zaha Hadid.

Richard Rogers y Norman Foster, que se asociaron en 1963 a la vuelta de la Universidad de Yale, se reconocerán inicialmente en el lenguaje de las fábricas, como en la desaparecida Reliance Controls en Swindon (Inglaterra), expresión de su arquitectura apoyada en los productos industriales, en cuyo proyecto colaboró también el ingeniero británico Anthony Hunt. Este ingeniero estará detrás de la mayor parte de los proyectos de Foster en los años 70 (una vez separada la sociedad con Rogers), como el edificio comercial Willis Faber@Dumas en Inswich, con su fachada acristalada colgada del forjado, o el Centro de Artes Visuales de Sainsbury, con su estructura espacial reflejada en la fachada.

A partir de los años 80, la arquitectura de Foster, dentro de Foster Associates con un diseño compartido con otros arquitectos como Spencer de Grey, David Nelson y Ken Shuttleworth, es inentendible sin la colaboración con Arup and Partners en obras como el aeropuerto de Stansted (fig. 8), el Banco de Hong Kong citado o la torre de Collserola en Barcelona. El estudio de Foster, a partir de los años 90, en el Riverside Three en Londres, junto al Albert Bridge, ha ido relacionándose con todas las tipologías de edificios desde las torres, como el banco anterior, o la del Commerzbank en Fráncfort, hasta infraestructuras propias de la arquitectura e ingeniería del transporte como el metro de Bilbao, la estación de Canary Wharf en Londres o los aeropuertos internacionales de Hong Kong y Pekín. La relación que tuvo con Buckminster Fuller a principios de los años 70 en torno a la preocupación por los



Fig. 9. Zentrum Paul Klee, en Berna. Foto: C. Nárdiz

problemas energéticos de la arquitectura (como manifestación de la imagen tecnológica) le ha llevado, casi siempre en colaboración con Arup, a plantear proyectos que van desde la torre Swiss Re citada hasta nuevas ciudades como la de Masdar en Abu Dabi, en la que ha coincidido con la preocupación por la defensa de las ciudades sostenibles de Richard Rogers.

Los planteamientos energéticos de la edificación, ligados no solo a la transformación de las fachadas con vidrios laminares o templados de doble hoja o con atrios interiores en los edificios que contribuyan a su ventilación, se han extendido también a propuestas de integración formal y paisajísticas de los edificios en la naturaleza con proyectos como el Zentrum Paul Klee (fig. 9) de Renzo Piano, en Berna (Suiza), o en las propias transformaciones que Richard Rogers plantea para ciudades como Londres.

La escala en la que se mueven hoy estos arquitectos, dentro de sociedades a nivel internacional, con un diseño compartido (aunque bajo el nombre del arquitecto fundador), con la integración también de ingenieros con sus equipos, solo es posible con el apoyo de ingenierías especializadas, que se mueven también a nivel internacional. Los lenguajes de esta arquitectura se nutren también de lenguajes de la ingeniería ya que, como defiende Norman Foster, gran admirador de la aviación, ofrece experiencias y analogías que pueden informar el mundo de la arquitectura.

5. La ingeniería al servicio de las geometrías complejas

Los arquitectos que en el año 1988 se incluyeron en la exposición del MOMA en Nueva York bajo el título

‘Deconstructivist Architecture’ representan hoy, a través de su proyección internacional, la imagen de una arquitectura que se mueve en el campo de las geometrías complejas, en el que la complejidad y contradicción de la arquitectura que ya defendía Robert Venturi a mediados de los años 60, como expresión de un manierismo geométrico que remitía al Barroco y al Rococó, busca despertar emociones en el observador, a cuyo servicio se va a poner la ingeniería. Arquitectos como Frank Gehry, Peter Eisenman, Daniel Libeskind, Rem Koolhaas, Zaha Hadid, Bernard Tschumi o Coop Himmelb(l)au, que se incluían en la anterior exposición, están hoy en la cabeza de esta arquitectura apoyada en nuevos métodos de proyecto, con la utilización creciente del ordenador a partir de mediados de los años 90. Estas geometrías, que se llevan a la piel del edificio, y en donde la personalización de la arquitectura es demandada por los clientes, determinan el marco en el que se mueven hoy los concursos y los encargos a los anteriores arquitectos, o de otros que se mueven también a nivel internacional como Jean Nouvel, Herzog y De Meuron, relacionados con todas las tipologías. Junto a ellos están emergiendo otros estudios de arquitectura menores como los arquitectos japoneses (Shigeru Ban, Sanaa) que se mueven también a nivel internacional y que buscan en los centros culturales de menor dimensión la forma de expresar la ligereza y la transparencia.

Frente a las maquetas y el diseño paramétrico apoyado en programas con ordenador, procedentes de la industria del automóvil y la aviación, para la representación tridimensional de las formas complejas, la ingeniería ha ido creando sus unidades de ‘Advanced Geometry’ como en Arup, a comien-



Fig. 10. Museo Vitra en Weill am Rheim. Foto: C. Nárdiz

zos del nuevo siglo, en las que apoyar mediante algoritmos la generación de las formas complejas, o dotándose de *software* que diesen una respuesta estructural y constructiva a las representaciones en 3D, mediante el cálculo con elementos infinitos, o con nuevas tecnologías de información como el BIM para representar constructivamente las complejas mallas estructurales, favoreciendo así mismo el proceso de fabricación y montaje de los distintos elementos constructivos con sus uniones. Las firmas de arquitectos hoy, formadas por equipos de arquitectos, ingenieros y diseñadores, bajo el nombre de su fundador, siguen defendiendo la autonomía de la forma. Detrás están las consultoras de ingeniería como Arup, Schlaich Bergermann und partner, Bollinger + Grohmann, BuroHappold, etc. que se mueven también a nivel internacional al servicio de los edificios ‘icónicos’ que representan la arquitectura del nuevo siglo, aunque también ingenierías más locales, como en España, Inglaterra y Alemania, están sirviendo de soporte a estas arquitecturas de autor, en donde el Oriente Medio y los países asiáticos han tomado el relevo de Europa y América en demanda de esta arquitectura.

Frank Gehry en el Museo Guggenheim en Bilbao (1991-97), con sus formas inspiradas en la construcción naval, su estructura de muros alabeados formados por celosías metálicas y su revestimiento exterior en titanio, convirtió a este edificio en una imagen de la nueva arquitectura, en donde Gehry manipula las superficies envolventes de sus maquetas, relacionando la imagen exterior de las mismas con el interior, que su colaborador Jim Glymh, apoyándose en el programa CATIA, traduce en imágenes geométricas construibles. El precedente del



Fig. 11. El Kunsthallen en Rotterdam. Foto: C. Nárdiz

museo de Bilbao fue el museo Vitra (fig. 10), a menor escala, proyectado y construido a finales de los años 80, en Weill am Rheim (Alemania). Gehry reivindica la dimensión escultórica de la arquitectura, y ha estado apoyado por ingenierías locales, aunque en sus obras más conocidas ha tenido que recurrir a ingenierías como Arup o Schlaich Begermann.

Rem Koolhaas, asociado a partir de mediados de los 70 con Elia Zenghelis en OMA, y con el apoyo de la ingeniería Arup y su ingeniero Cecil Balmond, construirá en los años 80 y 90 su obras más personales desde la Casa de Burdeos, al Kunsthal en Rotterdam (fig. 11) y el Consgrexpo en Lille, cuya concepción estructural ha explicado Balmond en su libro 'Informal'. Esta colaboración se ha mantenido durante el nuevo siglo con Balmond integrado en Arup, hasta llegar a obras como la Casa de la Música en Oporto, o la CCTV New Headquarters en Beijing (China), terminada en el 2008 (Ver A+U. Cecil Balmond. November 2006).

La arquitecta iraní Zaha Hadid, formada en la Assotiation School of Architecture (AA) en Londres, donde tuvo de profesores a Koolhaas y Zenghelis, encontró inicialmente en la diagonal, con la que el constructivista ruso Konstantine Melnikov había proyectado el pabellón soviético de la feria de París de 1925, su inspiración para plantear, mediante dibujos en perspectiva, sus formas fluidas que dinamicen el espacio, apoyándose después en su colaborador Patrick Schumacher, para componer mediante ordenador espacios multidireccionales. En Weill am Rheim tiene dos edificios de los años 90, la estación de bomberos, en el propio recinto de Vitra, y el LF One, construido con motivo de la feria de

jardinería de 1999, que muestran la utilización de espacios dinámicos apoyados en la diagonal, abriéndose a partir de esta época a todas las tipologías, y dando sus mejores respuestas en los centros culturales como el Phaeno Science Center de Wofsburg (Alemania) o el Museo Nacional MAXXI en Roma (fig. 12), siempre en colaboración con las ingenierías de Arup, BuroHappold o Bollinger+Grohmann.

El estudio de arquitectura fundado por Walter Prix y Helmut Swiezinski en Viena a finales de los 60, con el nombre de Coop Himmelb(l)au, influido por el también arquitecto vienés Peter Cook, empezó a internacionalizarse a partir de mediados de los años 90, gracias a la colaboración de ingenierías como Bollinger+Grohmaan (B+G) para materializar edificios como el Ufa Cinema Center en Dresde, terminado en 1998, el BMW Welt (2001-2007) en Múnich, próximo al estadio Olímpico, las torres del European Center Bank (CCB), recientemente terminadas en Fráncfort (aunque fuera del centro financiero de esta ciudad) o el Musée des Confluénces de Lyon, en la confluencia del Ródano y el Saona. Paneles metálicos de acero inoxidable y fachadas acristaladas con formas complejas, comparten planteamientos de proyectos y estructurales en el caso del museo de BMW y el de las Confluencias (con las celosías y estructuras espaciales metálicas que soportan el edificio), mientras que la torre del ECB, de 180 m de altura, proyectada por Walter Prix y la ingeniería B+G, transforma el bloque tradicional de las torres en dos edificios con estructuras triangulares perimetrales y núcleos de hormigón, que dejan un atrio común, en donde la imagen hoy de la margen del río Main, es la del cierre acristalado que las une (fig. 13).



Fig. 12. El Maxxi, en Roma. Foto: C. Nárdiz



Fig. 13. Torre del European Center Bank, en Fráncfort. Foto: C. Nárdiz



Fig. 14. Rolex Learning Center, en Lausana. Foto: C. Nárdiz

Bollinger+Grohmann, con su sede principal en Fráncfort, se reconocen hoy como empresa consultora de ingeniería al servicio de los proyectos de arquitectura con geometrías complejas, con una especialización también en fachadas acristaladas como el Art Museum de Graz, terminado en 2003, y proyectado por Peter Cook. Pero también en la restauración de edificios históricos, como el Stadel Museum en Fráncfort, con la losa pretensada central ajardinada y abierta con claraboyas con la que se han cubierto las nuevas salas del museo, o en proyectos al servicio de una arquitectura ligera y transparente como la de la firma japonesa SANAA en el Museo del Louvre de Lens (Francia) o en el Rolex Learning Center (RLC) en Lausana (Suiza). Esta arquitectura, en el caso del RLC, no impide enfrentarse con soluciones estructurales complejas como la losa curva de hormigón pretensado, abierta por grandes huecos interiores, que constituye la estructura de este edificio tipo ‘sándwich’, en el que se reducen al mínimo las pilas metálicas interiores que sustentan la cubierta metálica superior (fig. 14).

Finalmente traemos aquí a la firma de arquitectura UNSTUDIO, formada a finales de los años 80, por el arquitecto Ben van Berkel y la historiadora de arte Caroline Bos, que se dio a conocer con el Erasmus Bridge, en Rotterdam, terminado a mediados de los años 90 y que utiliza imágenes de las estructuras matemáticas como la banda de Moebius o la botella de Klein, para justificar formas arquitectónicas apoyadas en diagramas funcionales con los que se buscan experiencias espaciales y sensuales asociadas al movimiento. Su obra más significativa es el Museo Mercedes Benz, en



Fig. 15. Museo Mercedes Benz, en Stuttgart. Foto: C. Nárdiz

las afueras de Stuttgart, terminado en el 2002, y con forma de doble hélice que se recorre a través de una rampa continua interior de hormigón que se refleja en la forma exterior del edificio, a través de los paneles de acero inoxidable y cristales poligonales rehundidos (fig. 15). Su relación con las infraestructuras de transporte, aparte del puente anterior, y el de Utrecht, o el que terminaron recientemente para el metro de Lyon (en todos los casos con estructuras atirantadas) se refleja en el magnífico intercambiador de transporte de Arnhem (Países Bajos), para los autobuses, con la estación de ferrocarril próxima (proyectada también por Unstudio), en colaboración con la ingeniería Arup, con un estacionamiento subterráneo ordenada por el soporte en forma en V en el centro, construido con pantallas de hormigón, cuyo concepto estructural explicaba también Cecil Balmond en el libro ‘Informal’.

Frente al anonimato en el que se ha movido la ingeniería al servicio de la arquitectura, hoy es bastante frecuente, a nivel internacional, reflejar en cada proyecto las ingenierías que han colaborado (y no solo las estructurales), pensando en la arquitectura como un trabajo colectivo y complementario entre arquitectos e ingenieros, como se refleja por ejemplo en publicaciones recientes de Detail Engineering sobre Schlaich Bergermann und partners, Arup o Bollinger+Grohmann. Parece que este es un camino de futuro, al cual todavía de una forma tan explícita no se ha incorporado la arquitectura e ingeniería española, a pesar de la fuerte dependencia que ha existido en los últimos años entre las obras de los arquitectos y de determinados ingenieros, como se refleja en este número de la ROP. **ROP**