

La idea de progreso tal y como la hemos conocido tradicionalmente basada estrictamente en el desarrollo, atraviesa una profunda reconsideración. La reciente y todavía no superada crisis sanitaria, es la expresión de una mutación de mucho mayor alcance como es el vínculo del hombre con su entorno, un frágil equilibrio que cuestiona desde nuestra relación con los recursos naturales hasta nuestros modos de vida, trabajo e incluso relaciones interpersonales. En esta sacudida sin precedentes la ciencia, como conjunto de saberes objetivos, se muestra no solo como un puerto seguro en el que protegerse de la incertidumbre, incluso de lo falso, sino como una palanca ineludible para nuestra supervivencia.

En este contexto y omitiendo deliberadamente lo más visible de la crisis sanitaria, amplia y desigualmente tratada en diversos espacios, quisiéramos recuperar desde nuestro ámbito el foco en la relación de la disciplina de la arquitectura con su propia razón, lejos eso sí de lo estrictamente racional. Esta exploración no apuntará tanto al hallazgo de un antídoto contra lo superfluo, la cal de lo arbitrario, sino más bien a eludir la amenaza de su propio colapso. Tal y como ha sucedido en otros momentos de su historia, la arquitectura necesita soportarse firmemente en el conocimiento. Es casi un oxímoron, acto creativo racional, donde la acción colectiva y solidaria implica la ineludible colaboración con otras ramas del saber especialmente a través del ingenio de otros técnicos.

Es así como en otros números de Palimpsesto los ingenieros han tenido presencia a través de entrevistas, aportaciones teóricas, proyectos. Tras la única referencia directa a la pandemia a través de la reflexión de Francesc Pernas sobre la necesaria reformulación de la arquitectura sanitaria las aportaciones de este número pretenden renovar el hilo de lo mejor de esta conversación compartida. En este renovado marco de colaboración arquitectos-ingenieros, lejos de las cuitas del siglo XIX, de la estéril admiración o de la displicencia recíproca, **Eduard Gascón** nos obsequia con la que mantuvo con **Leslie Robertson**, uno de los últimos grandes ingenieros del siglo XX, en el marco de su investigación personal. Ilustra de la mejor manera posible la glosa de colaboraciones entre arquitectos e ingenieros que desde Palimpsesto recordamos unas páginas más adelante. De este elenco del siglo XX Robertson arroja algunas sombras, incluso sacudiendo alguna de nuestras convicciones como arquitectos con el análisis crítico del Seagram de Nueva York. Sobre esta mesa de diálogo compartida presentamos una secuencia de proyectos que arrancan en una poco divulgada Iglesia en Jávea de GO-DB, y discurren por una sensible pasarela de **Pere Riera** y **Josep Maria Gutierrez** en Terrassa de reminiscencias suizas (Jung Conzett) hasta dos proyectos más contemporáneos como la cubierta de la Olmeda de **Paredes Pedrosa** concebida y desarrollada a cuatro manos con **Cogaite Ingenieros** o el diálogo para la torre diagonal 00 de **Enric Massip** con **Julio Martínez Calzón**.

La paradoja de la arquitectura es también la multiplicidad de sus razones. Palimpsesto les ha prestado atención a través de sus distintas secciones como reflejamos en el acto en la ETSAB con motivo de la efeméride del número 20 con Oriol Bohigas y Federico Correa como testigos y protagonistas. 20 microrelatos surgidos de un crisol de aportaciones a lo largo de la trayectoria de la revista que fotografian el presente y futuro de la Escuela de Arquitectura de Barcelona. En este número 21 introducimos otro tipo de diálogo, el del arquitecto con lo natural y el paisaje, a través de la reseña de la tesis doctoral de **Joan Casals** que reflexiona sobre los mecanismos de proyecto en el paisaje.

En otro período convulso, a principios del siglo XIX, la figura histórica del ingeniero Agustín de Betancourt, padre de la ingeniería en España, encarna esta fusión entre ciencia y humanismo, entre razón y cultura, si alguna vez pudieran separarse, que nos glosa detalladamente **Javier Rui Wamba**. El compromiso de este autor tanto en su práctica profesional como en la labor cultural de su fundación constituyen hoy un ejemplo paradigmático para afrontar solidariamente y desde nuevas razones los retos del futuro de la arquitectura.

PALIMPSESTO

NUEVAS RAZONES

#20 Año 08. Primavera 2020 (20 páginas) ISSN 2014-1505
Revista semestral de temática arquitectónica

Dirección
Carlos Ferrater y Alberto Peñín

Redacción y diseño gráfico
Cecilia Obiol
Editorial AP

Agradecimientos
Javier Rui Wamba

Edición
Cátedra Blanca - E.T.S.A.Barcelona - UPC
palimpsesto@cbbbarcelona.com

Impresión
Vanguard Gráfico

Depósito Legal B-5689-2011
ISSN 2014-1505
e-ISSN 2014-9751

V.O. PALIMPSESTO respeta el idioma original de los autores.

© De los textos: sus autores.
Las imágenes han sido cedidas por los autores de los artículos. No ha sido posible encontrar todos los propietarios de sus derechos. Las partes interesadas pueden ponerse en contacto con el editor.

Los autores conservan los derechos de autor y garantizan a la revista el derecho de una Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC BY-NC-ND) que permite a otros compartir el trabajo con un reconocimiento de la autoría.



▲ FIG. 1. World Trade Center

Entrevista a Leslie Robertson

La forma del rascacielos: el diálogo entre arquitecto e ingeniero

Eduard Gascón

Recibido 2020.05.11 :: Aceptado 2020.05.15
DOI: 10.5821/palimpsesto.21.9573
Persona de contacto: egc@tcarquitectes.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7626-0250>
Doctor arquitecto por la UPC

El pasado 29 de abril, Michael Kimmelman, crítico de arquitectura para *The New York Times*, arrancaba su artículo *The Hidden Feats That Built New York's Towering Skyscrapers* constatando cómo el skyline de esa ciudad no puede considerarse como una obra exclusiva de los arquitectos sino más bien como el resultado de un esfuerzo compartido, como mínimo, con otros actores principales: los ingenieros de estructuras. En compañía de Guy Nordenson, ingeniero y profesor en la Universidad de Princeton, el artículo nos propone una visita virtual - y cronológica - a unos pocos rascacielos del Midtown Manhattan en la que Kimmelman y Nordenson conversan sobre el sentido histórico de esas obras y el papel de sus protagonistas: Mies y Severud en el Seagram, Eero Saarinen y Weidinger en el CBS "Black Rock" Building, Johnson y Burgee con Robertson en el AT&T de la Avenida Madison y Viñoly con WSP en la muy esbelta torre de 432 Park con la calle 57.

En el párrafo dedicado al edificio para la AT&T, Nordenson destaca cómo tras su polémico remate historicista se oculta la brillante estructura de Les Robertson, "our greatest living structural engineer", y pone su creatividad a la altura de Gustavo Eiffel por la forma como éste último resuelve la estructura de la Estatua de la Libertad.

"En mi opinión, Robertson es un virtuoso", acaba sentenciando Nordenson.

Les Robertson (1928) fue un pionero en el uso de la tecnología digital aplicada al diseño y el cálculo de estructuras y su dilatada carrera profesional constituye el mejor exponente de esa relación entre la arquitectura y la ingeniería, por lo general, tan poco conocida y valorada. Esto es así hasta el punto de que sus incontables innovaciones técnicas, aplicadas especialmente a la construcción en altura, diluyen la frontera entre ambas disciplinas en algunos de los mejores proyectos de grandes arquitectos como Gunnar Birkerts (Federal Reserve Bank, Minneapolis 1972), Minoru Yamasaki (World Trade Center, New York 1973) Philip Johnson (AT&T, New York 1981) o I.M.Peí (Bank of China, Hong Kong 1989). En todos estos casos resulta difícil discernir

a quien corresponde el mérito o la autoría de la obra finalmente construida, en el caso, claro está, de que sea ésta una cuestión relevante.

Para Robertson, cada proyecto es una oportunidad para avanzar en el conocimiento de las estructuras, mostrando así la prevalencia de una investigación aplicada a la práctica de la profesión y a la resolución de problemas concretos a partir de los principios básicos de la ingeniería. Es ésta la actitud que explica cómo, en un intervalo relativamente corto de tiempo, Robertson ideara los sistemas estructurales de dos rascacielos que, todavía hoy, constituyen un hito de referencia en la evolución de este tipo edificatorio: el World Trade Center y el Bank of China.

La entrevista objeto de esta nota introductoria fue realizada en 1994, muy anterior, por lo tanto, al atentado de las Torres Gemelas. Durante esos años, trabajé como arquitecto local en un proyecto liderado por I.M.Peí para una importante institución financiera. La obra nunca fue ejecutada, pero la prolongada elaboración del proyecto me permitió establecer una intensa amistad tanto con Peí como con Robertson. Coincidió esa época con un interés personal en los edificios altos, por lo que el descubrimiento del Bank of China de la mano de sus autores me dio pie a estudiar en profundidad un rascacielos que, todavía hoy, constituye, uno de esos grandes momentos de la arquitectura en los que una tecnología de vanguardia permite formular nuevas hipótesis estructurales y figurativas aplicadas, en este caso, a la construcción en altura.

No quiero acabar esta nota sin hacer mención a la dimensión humana de Les Robertson, a su pacifismo, activismo y lucha por la justicia social. El año pasado tuve la ocasión de visitarle en su estudio de New York. Le pregunté, entre interesado y atónito, por la estructura de esos nuevos rascacielos de viviendas que empiezan emerger en el skyline de la ciudad, como el extremadamente esbelto, alto y lujoso de 432 Park Avenue. Su respuesta fue contundente: "esos edificios no me interesan en absoluto, son una indecencia, un derroche de medios al servicio de unos pocos multimillonarios".

Eduard Gascón, junio 2020

Es bien sabido que la historia del rascacielos viene determinada, en gran medida, por el avance de las técnicas constructivas aplicadas al problema de la construcción en altura y, muy especialmente, por la evolución de los tipos estructurales, de los cerramientos y de los sistemas de mecanización del ambiente. En este sentido, a lo largo de tu carrera profesional, y desde tu condición de ingeniero, has diseñado la estructura de algunos de los ejemplos más paradigmáticos, como las Torres Gemelas en New York o el más reciente Bank of China en Hong Kong. Sobre este último queremos hablar hoy porque esta torre parece alejarse definitivamente de algunos de los preceptos que definieron el rascacielos del Movimiento Moderno, como el prisma puro o la retícula estructural.

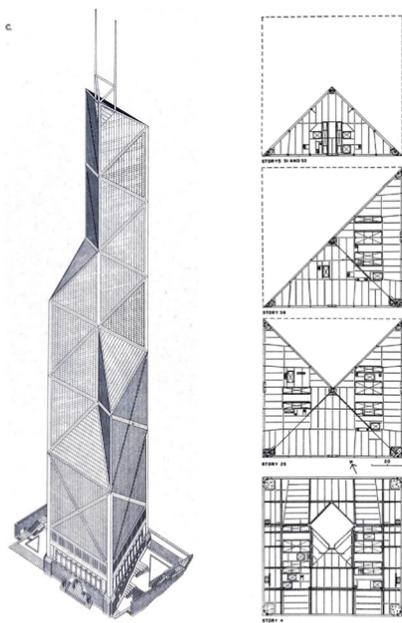
Creo que cabría hacer algunas matizaciones. Si tomamos como ejemplo el Seagram Building vemos como, en efecto, el espectador lo percibe como una forma prismática, especialmente cuando lo observamos desde Park Avenue, donde el edificio se presenta con todo su esplendor: la escala y el detalle del muro cortina, la relación que establece con la plaza, la plaza misma, el lobby.... Sin embargo, desde el lado opuesto, el Seagram muestra un aspecto menos brillante; de hecho, es como si tan sólo tuviera tres fachadas. Su estructura es impropia para una torre de sus características y, en general, creo que no se trata de un buen edificio de oficinas. En New York tenemos un edificio que tal vez no conoces – se trata, a mi entender, de uno de los más feos de la ciudad –, el Wells Fargo de Harrison y Abramovitz. Se reconoce por su arco rebajado en forma de bumerán en la calle 42, entre la Segunda Avenida y Lexington y fue el primer edificio construido con un muro cortina de vidrio y metal...

Yo pensaba que ese honor recaía en el célebre Lever House, del SOM.

No, éste al que me refiero es anterior. El cerramiento del Lever House, muy bello, dispone de un muro cortina con montantes y carpintería metálica, pero tanto el antepecho como la ventana son de vidrio. En el de Harrison y Abramovitz, sin embargo, las ventanas son perforaciones en un panel metálico y, como ya te he comentado, se trata de la primera ocasión en la que se instalaron paneles ligeros prefabricados en una construcción en altura. Insisto en este tema porque la cuestión del cerramiento es crucial en la evolución del rascacielos. Los primeros *high-rise buildings* de Chicago fueron de ladrillo (estadio 1); luego vinieron los de esqueleto de hierro y ladrillo, donde la estructura metálica soportaba las cargas gravitatorias y la fábrica de ladrillo asumía el resto, incluida también buena parte de las cargas por gravedad (estadio 2).

Le siguieron los esqueletos de acero con los que se construyeron los grandes rascacielos de los años 30 – el Chrysler y el Empire State entre otros –, todos con cerramientos exteriores y particiones interiores de fábrica de ladrillo (estadio 3). El esqueleto de acero fue diseñado por los ingenieros para soportar tanto las cargas gravitatorias como las de viento; sin embargo, si cogemos los planos del Empire State Building y calculamos su frecuencia de oscilación – si conocemos la rigidez (resistencia a la flexión / relación entre la deformación en el extremo superior y las cargas horizontales) y el peso del edificio, podemos calcular la frecuencia de oscilación del esqueleto de acero – y la comparamos con la frecuencia de oscilación real del edificio tomada, como así hemos hecho, durante una tormenta de viento, vemos como la frecuencia real es mucho mayor de la que le corresponde al esqueleto de acero. Así, mientras la estructura metálica aporta solo el 20% de la rigidez total, el 80% restante proviene de la fábrica de relleno. Los muros de ladrillo situados en el interior del esqueleto actúan como trabazón diagonal frente a la presión lateral. Si observamos las esquinas de estos edificios veremos grietas verticales en la fábrica de ladrillo. Cuando el edificio entra en carga, los muros de fachada confinados por la estructura metálica tienden a pandear y a deformarse según su propio plano. En la esquina los dos paramentos perpendiculares empujan en dirección opuesta provocando así la aparición de las mencionadas grietas. Esta patología muestra hasta qué punto la rigidez de los edificios de esa época depende básicamente de la combinación del esqueleto de acero y de la fábrica de relleno.

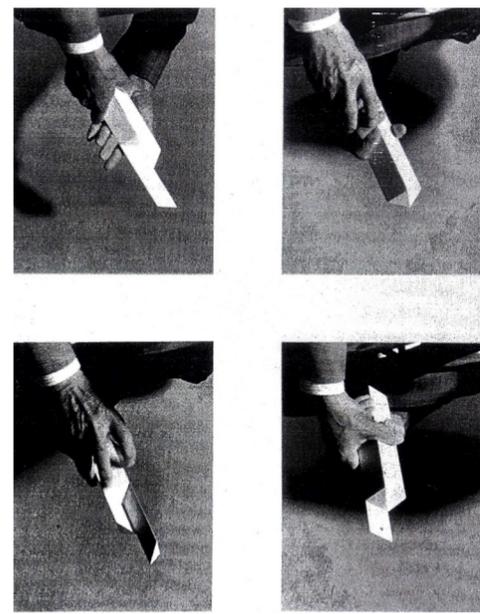
A continuación, tras este tercer estadio en la evolución estructural del rascacielos, tenemos que volver a hablar del edificio de Harrison y Abramovitz en la calle 42, como te decía antes, el primer edificio construido con esqueleto de acero con fachadas ligeras de paneles



▲ FIG. 2. Bank of China. Axonométrica, plantas de estructura y primera maqueta de madera

metálicos y vidrio y particiones interiores de ladrillo. Los ingenieros calcularon su resistencia y su rigidez mediante métodos analíticos que mostraban que el comportamiento de la estructura era teóricamente correcto. Sin embargo, no disponían de método alguno para evaluar la colaboración de la fábrica de ladrillo. De hecho, si revisamos la bibliografía entre los años 1935 y 1940, hallamos posiciones enfrentadas entre los ingenieros sobre la pertinencia de tomar o no en consideración los esfuerzos laterales en el cálculo del entramado de acero debido a la constatación del importante papel de los muros de fábrica en la rigidez total del edificio. Ellos – los ingenieros – eran conocedores de este fenómeno, no sabían manejarlo, pero sabían que estaba allí. Y así llegamos a la Segunda Guerra Mundial. Todo se para, no hay recursos, no se proyectan ni construyen rascacielos. Los arquitectos paran, los ingenieros también y toda la investigación sobre el tema queda congelada. Concluida la guerra, se remprende una dinámica constructiva centrada en la producción y alejada de toda reflexión sobre su evolución técnica: los edificios se aguantan y, por lo tanto, funcionan y eso es lo importante en esos momentos. Park Avenue está llena de ejemplos de esa época. En el edificio de Harrison y Abramovitz, construido durante esos años, con sus fachadas de paneles metálicos y vidrio, gran parte de la rigidez que antes aportaba la fachada desaparece. Y como éste, muchos otros, construidos con entramado de acero, cerramientos ligeros de metal y vidrio y particiones interiores de fábrica de ladrillo (estadio 4). Todos ellos funcionaban – es términos estructurales – relativamente bien dado que en su interior todavía había importantes superficies de fábrica.

Aparece entonces el World Trade Center (WTC), el siguiente estadio (5) en esta descripción evolutiva (FIG. 1). En el WTC, con estructura de acero y cerramientos de metal y vidrio, me planteé el problema de las particiones interiores de ladrillo, de su conservación, de sus fisuras frente al movimiento de la estructura que provocan pérdidas de presión en los conductos de aire... y hallé la idea del *shaft wall*, una partición de cartón-yeso, resistente al fuego, montada sobre un entramado metálico, sellada en sus extremos y que podía ser utilizada también para formar conductos de ventilación y extracción. Así, de repente, el edificio estaba desprovisto tanto de fachadas como de particiones de fábrica de ladrillo y, en consecuencia, todo estaba suelto. En ese proyecto dispuse de presupuesto y tiempo para pensar y, además, era lo suficientemente joven como para poder hacerlo, por lo que pude desarrollar un sistema de amortiguación formado por placas metálicas y material viscoelástico –*damping*, algo así como los amortiguadores de un coche – capaz de absorber la energía de oscilación debida al viento y disiparla en forma de calor, reduciendo así a la vibración (FIG. 3, ver pág. 3). A partir de entonces, una nueva serie de edificios fueron construidos asumiendo las ventajas del *shaft wall* pero sin incorporar amortiguación alguna obteniendo como resultado unos edificios excesivamente dinámicos y poco apropiados para una arquitectura estable frente a las acciones del viento (estadio 6). Para resolver este problema se optó por aumentar considerablemente el



La torre del Bank of China (BOC) es un edificio que tiene poco que ver con todo lo anterior, un sistema tridimensional mixto de hormigón y acero que utiliza una compleja tecnología de cálculo para conseguir que una estructura en apariencia irracional funcione realmente bien.

peso del entramado, por lo que la ligereza estructural de los edificios del estadio 4 se fue perdiendo progresivamente con el fin de reducir la oscilación. Aunque es anterior, podemos decir que el Seagram Building se halla dentro de esta categoría.

Me sorprende que no hayas hecho mención del concepto de “tubo” estructural en el WTC o, lo que es lo mismo, a la evolución entre los estadios 4 y 5 como el paso del entramado reticular hacia la concentración de la masa estructural en el perímetro de la torre.

En mi opinión, la diferencia más significativa entre los estadios 4 y 5 consiste en la eliminación de las particiones de ladrillo, su sustitución por *shaft walls* y la inclusión de sistemas de amortiguación. Es cierto que el “tubo” aumenta la rigidez en comparación con el entramado, pero, aun así, no es suficiente sin los amortiguadores. En el WTC, el *damping* permitió reducir considerablemente la masa estructural con el consiguiente ahorro económico. Como ya he comentado, la oscilación puede reducirse aumentando el peso de la estructura, pero se trata de un recurso muy costoso. Casi todos los rascacielos “tubo” construidos hasta la fecha mejoran su rigidez a base de sobredimensionar la estructura.

Y así hasta la torre del Bank of China (BOC), un edificio que tiene poco que ver con todo lo anterior, un sistema tridimensional mixto de hormigón y acero que utiliza una compleja tecnología de cálculo para conseguir que una estructura en apariencia irracional funcione realmente bien (FIG. 2). En mi opinión, el BOC ocupa el séptimo escalón dentro de esta evolución del rascacielos. Insisto en este aspecto evolutivo porque creo que tanto arquitectos como ingenieros tienen que mirar hacia atrás con el fin de entender lo que están haciendo ahora porque, en el fondo, la tecnología es todavía bastante imperfecta. Para alcanzar un conocimiento auténtico hay que entender cómo estos edificios fueron construidos y porqué son como son, cómo se comportan, porqué sus esquinas se agrietan... Hay que entender el pasado si no quieres que lo mismo suceda en tu edificio.

Por lo general, la clasificación de los tipos estructurales de los rascacielos tiende a centrarse en la geometría y en la posición de la masa de sus elementos principales;

tu explicación sobre esta evolución a partir del análisis del comportamiento real de las estructuras y la importancia de lo que podríamos definir como los subsistemas - cerramientos, particiones, conexiones, etc. - como elementos que colaboran en la rigidez y en la respuesta dinámica del edificio es muy reveladora para mí.

La posición de la estructura es algo relativamente independiente de todo lo que hemos venido hablando hasta ahora. La estructura debe situarse donde trabaje mejor; por ejemplo, en el mayor edificio corporativo de oficinas jamás construido, con más de 4000m² por planta y cerca de setenta pisos, el US Steel Building en Pittsburg, el sistema estructural es el siguiente: tenemos en núcleo hincado en el terreno y en su extremo superior disponemos de una gran cercha, como si de un paraguas se tratara. Un sistema perimetral de pilares en el exterior – por delante del muro cortina – se conectan al núcleo cada tres plantas a través de unas jácenas principales de 18m de luz. En el interior se dispone una estructura secundaria con pilares metálicos cuadrados de 15cm de lado que soportan las dos plantas intermedias. Como ves, es este caso, la estructura se halla tanto en el interior como el exterior, hay una estructura principal y otra secundaria...hay que estudiar cada caso concreto y sacarle el máximo partido.

Volviendo al Bank of China, su estructura trata de decir algo sobre lo que hay de nuevo en lo que nos rodea. Lo que impulsó el proyecto del BOC fue el deseo de crear una gran arquitectura, la constatación de que al otro lado de la calle se estaba construyendo el edificio más caro de la historia – el Hong Kong Bank de N. Foster – y la personalidad de I.M.Pei, que no estaba dispuesto a construir un edificio menor a pesar de contar con un presupuesto tres veces inferior para una superficie equivalente. Todo esto, combinado con un enorme ahorro en el coste de la estructura, permitió convertir el proyecto en una realidad. Se trataba del primer edificio importante que yo hacía con I.M.Pei y trabajamos intensamente casi durante un año antes de que él aceptara el encargo.

A primera vista, el Bank of China aparece como la formalización cristalina de una idea estructural potente y clara; sin embargo, el hecho de que estuvierais durante un año comprobando la viabilidad de la propuesta indica la existencia de importantes condicionantes formales de partida.

Efectivamente, la forma, en este caso, fue anterior. I.M.Pei empezó con la idea de un prisma de planta cuadrada dividido en cuatro cuadrantes iguales según sus diagonales; a medida que la torre crecía, estos cuadrantes se iban interrumpiendo sucesivamente hasta reducirse a un único prisma triangular que se elevaba hasta alcanzar una altura total de 76 plantas. Probablemente has visto fotografías de la primera maqueta de madera, con las cuatro piezas deslizándose según su eje central (FIG. 2).

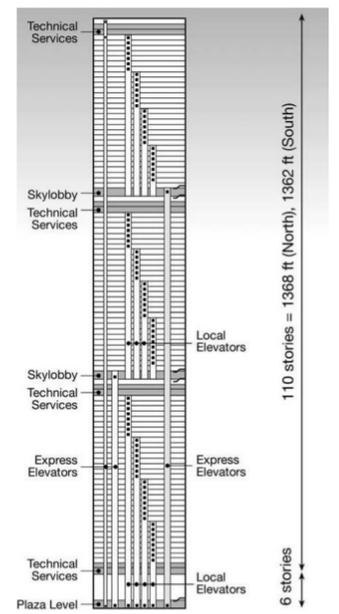
La primera vez que vi el proyecto ya tenía una forma determinada; le faltaban muchas cosas, por ejemplo, la definición de la secuencia de interrupción de los cuadrantes o el número de plantas entre los puntos singulares de la torre. Pei tenía claro que el edificio tenía que ser muy alto y emerger sobre el resto de los rascacielos de Hong Kong (FIG. 3). Antes de la Segunda Guerra Mundial, tanto el Hong Kong Bank como el Bank of China construyeron sendos edificios en la ciudad, siendo el de este último el más alto de oriente en aquella época. En la actualidad el Hong Kong Bank es el edificio más caro del mundo y el BOC continúa teniendo el récord de altura en oriente.

Yo creo que I.M.Pei conocía las ventajas de construir un edificio alto con forma afilada. El prisma del World Trade Center es una forma poco eficiente para un rascacielos, incluso su funcionamiento no es el más adecuado porque los núcleos de comunicación vertical siguen un esquema escalonado. De hecho, si tomamos el Empire State Building y el John Hancock en Chicago y los superponemos vemos que son prácticamente idénticos, el Empire se escalona y el Hancock se afila, ambos tienen la misma dimensión en ambas direcciones, la misma altura y silueta. La forma afilada es muy apropiada para un rascacielos porque la fuerza del viento es mayor en el extremo y porque el núcleo es mayor en la base. Por lo tanto, tanto en términos funcionales como técnicos, es una buena solución. En este sentido, yo diría que el BOC, con sus vértices ocupados por la estructura, tiene el inconveniente de no permitir disponer de oficinas en esquina.

Otro inconveniente que me parece observar es que, debido a la secuencia de escalonamiento de la torre, el núcleo de comunicaciones verticales no es continuo.



▲ FIG. 3



▲ FIG. 4. Sistema sky lobby

Existe un sky lobby para cambiar de ascensores, es un sistema habitual en los rascacielos: en el diagrama de transporte vertical de WTC vemos cómo dos sky lobbies conectan los ascensores directos con los de recorrido local. El WTC fue el primer edificio en recurrir al sistema de sky lobby (FIG. 4).

Pero volviendo a la estructura del BOC, lo que I.M.Pei no advirtió en un principio, y de hecho no tenía por qué, es que en Hong Kong, un edificio convencional con una altura de setenta plantas volcaría bajo la acción del viento. La razón es que un edificio convencional, de oficinas, el 80% de su peso es soportado por el núcleo y el 20% restante por el perímetro. Por lo tanto, cuando me preguntas si la estructura debiera estar en el perímetro – lo que tiene mucho sentido al aumentar la inercia frente al momento de vuelco – yo debiera responderte que, en un edificio convencional, tengo tan sólo una quinta parte del peso en esa zona y que prefiero tener la estructura allí donde tengo más material porque así el peso colabora de forma gratuita frente a las acciones laterales del viento y el sismo. En el BOC, todo el peso de los núcleos de servicio debía ser transferido al perímetro del edificio con el fin de evitar el vuelco (FIG. 5). Hay que recordar que la fuerza del viento en Hong Kong es el doble que en New York y entre cuatro y cinco veces mayor que la carga sísmica en Tokio o, lo que es lo mismo, es el mayor esfuerzo aplicable a un edificio en nuestro planeta. La necesidad, por lo tanto, de desplazar la carga al perímetro nos obligó a todos, arquitectos e ingenieros, a pensar en los núcleos de servicio de manera distinta a la habitual, de tal forma que, cada 13 plantas, éstos transfieren progresivamente sus cargas a las tres columnas situadas en los vértices de los triángulos en los que se inscriben. Finalmente, en la planta 25, el soporte central transmite a su vez toda su enorme carga a las cuatro columnas del perímetro exterior mediante un sistema espacial de cerchas, lo cual permite disponer de un lobby con una luz libre de 52 m en ambas direcciones y aprovechar al máximo el brazo para compensar, de este modo, la aparición de fuerzas resultantes de elevación (tracciones) en la cimentación de los soportes del perímetro provocadas por la fuerza horizontal del viento (FIG. 6). En definitiva, usamos la megaestructura para conducir las cargas hacia su posición óptima (FIG. 7).

El otro aspecto no previsto por I.M.Pei en los estadios iniciales del proyecto, debido también a los esfuerzos horizontales de viento, tiene que ver con el desarrollo del volumen en altura de y la progresiva interrupción de uno de los cuatro cuadrantes que forman las diagonales del cuadrado inicial de la planta. Esta geometría provoca que la resultante de la carga del viento en los distintos tramos tenga una posición excéntrica y cambiante que tiende a torsionar el edificio. La torsión, por pequeño que sea el ángulo, produce desplazamientos con efectos muy negativos en la habitabilidad de los edificios. Los ingenieros tratamos siempre de evitar esfuerzos de torsión. En el BOC, a pesar de que las cargas eran excéntricas, organizamos la estructura y su rigidez de forma que su centro de resistencia estuviera siempre alineado con el centro de la fuerza aplicada. Esto no eliminó la torsión, pero sí su componente estática.

Lo que impulsó el proyecto del BOC fue el deseo de crear una gran arquitectura, la constatación de que al otro lado de la calle se estaba construyendo el edificio más caro de la historia – el Hong Kong Bank de Foster – y la personalidad de I.M.Pei, que no estaba dispuesto a construir un edificio menor a pesar de contar con un presupuesto tres veces inferior para una superficie equivalente.

Bajo la acción del viento, el edificio se mueve en una determinada dirección – que no siempre coincide con el ángulo de incidencia debido, entre otras razones, a su propia forma – hasta alcanzar una determinada posición – posición estática –, situación en la que empieza a oscilar en dos direcciones siguiendo un movimiento más o menos armónico. Si registramos a lo largo del tiempo las distintas posiciones de los desplazamientos de oscilación frente a los diferentes ángulos de ataque del viento, obtenemos una figura que, dependiendo de las circunstancias naturales de lugar, se aproxima a una elipse. Estos registros se producen para determinadas intensidades y ángulos de ataque del viento, por lo que, cuando a los ingenieros nos preguntan ¿cuánto se mueve este edificio?, tan solo podemos responder en términos de probabilidades para un determinado desplazamiento. No podemos decir que se mueve, por ejemplo, un metro. Los edificios altos son muy sensibles al ángulo de ataque del viento, hasta el punto de que, en determinadas situaciones, la oscilación dinámica puede ser hasta tres o cuatro veces superior al desplazamiento debido a una fuerza estática equivalente.

Vemos, por lo tanto, que la forma del edificio tiene mucho que ver con su comportamiento dinámico. ¿Qué me puedes decir sobre cómo se abordó esta cuestión en el proyecto del Bank of China?

Como sabrás, la velocidad del viento aumenta con la altura, provocando la aparición de turbulencias que hacen que el edificio oscile en una dirección y, al cabo de un tiempo, en la opuesta. La frecuencia con la que este efecto sucede es más o menos proporcional a la velocidad del viento e inversamente proporcional al tamaño del edificio o, mejor dicho, a su diámetro. Veamos ahora qué sucede en un edificio afilado: en la cima, al ser esta frecuencia el cociente entre una gran velocidad del viento y un diámetro reducido, su valor es muy alto. Por otra parte, en la base, con una velocidad del viento muy baja y un diámetro mucho mayor, la frecuencia de oscilación es muy baja. Con

esto conseguimos que la frecuencia de las turbulencias debidas al viento, que tratan de excitar el edificio, esté desfasada respecto a las de la torre. Se trata, por lo tanto, de modelar el edificio para mantenerlo alejado de la frecuencia de las turbulencias y es muy deseable que su dimensión se reduzca a medida que se eleva para que la oscilación no lo afecte demasiado, aumentando dicha frecuencia y reduciendo su período de oscilación – el tiempo que tarda un edificio en completar un ciclo de vibración –. Este período es de 10 segundos en el WTC - mientras que en el BOC lo reducimos a 5 segundos.

En el caso del BOC vemos como la forma triangular de su tramo final es muy mala en sí misma en términos aerodinámicos, pero, muy buena, sin embargo, en relación con la totalidad de la torre dado que en el tramo inmediatamente inferior el edificio pasa de un triángulo a otro que dobla su superficie, con lo que la frecuencia de las turbulencias cambia también según un factor igual a 2. Y así a medida que el edificio crece en planta hasta la base. En definitiva, tratamos de que los esfuerzos asociados a los torbellinos varíen de un tramo a otro de la torre tanto en magnitud como en frecuencia.

Hasta ahora hemos hablado de la importancia de la forma de la torre y de su sección variable, pero lo que realmente nos asombra es cómo la geometría triangular del edificio se convierte en una inmensa estructura espacial de 76 plantas.

Como ya te he comentado, la forma general de la torre es anterior a cualquier hipótesis estructural, pero no tengo la menor duda de que Pei intuyó desde el inicio todo el potencial de su geometría y, de hecho, lo que hicimos fue convertirla en una gigantesca estructura espacial. Podemos decir que en el BOC partimos de la ya probada solución de tubo triangulado, pero a diferencia de ésta, y por vez primera, conseguimos integrar en un solo sistema lo que hasta la fecha era objeto de dos estructuras separadas, una para las cargas gravitatorias y otra para los esfuerzos laterales debidos al viento y al sismo. Ya hemos hablado antes de cómo las cargas se van transfiriendo hacia los soportes de las esquinas, pero no de cómo resolvimos las conexiones que aseguraran la continuidad entre los distintos componentes de la estructura. Así, en vez de recurrir a complejas y costosas soldaduras y uniones tridimensionales, conseguimos que el conjunto actuara de forma unitaria revistiendo la estructura metálica con hormigón armado, una estructura mixta capaz de absorber el esfuerzo cortante y de resolver la excentricidad inherente a la geometría de la torre y la voluntad de I.M.Peí de que las aristas coincidieran en un punto (FIG. 8). Esta condición se

da en la envolvente, pero no así en la forma cómo las cerchas se sitúan en las esquinas, separadas y envueltas por columna de hormigón armado. Este innovador sistema mixto de conexiones supuso un ahorro de un 40% de acero respecto a las soluciones convencionales.

De hecho, la definición geométrica de la torre supuso un gran esfuerzo al que Pei dedicó mucho tiempo, en un momento de su vida en el que tenía sobre la mesa otros grandes encargos, como el Louvre de París o el Meyerson Symphony Center en Dallas. Déjame que te cuente una anécdota: una tarde, en el jardín de su casa sobre el East River en Manhattan, Pei me dijo que estaba preocupado por la expresión de las cerchas horizontales que, junto a las diagonales de la megaestructura, dibujaban una forma "X", de connotación negativa según la tradición china. Mirando el puente de Queensboro, observamos como las "X" podían prescindir de su elemento horizontal y que, por lo tanto, no era necesario manifestar el orden secundario de la estructura. La torre dejaba así de

El WTC responde al concepto de un edificio de 100 plantas, cuando, en realidad, tiene 110. Aunque solo tenga diez plantas más, los esfuerzos son un 20% superiores. Esto llevó la tecnología de su construcción hasta límites desconocidos hasta entonces y supuso un esfuerzo gigantesco. Esta torre es un ejercicio único de artesanía, algo que, en mi opinión, es la esencia de la vida.

ser percibida como una yuxtaposición de "X" y, en mi opinión, su expresión arquitectónica mejoraba sustancialmente.

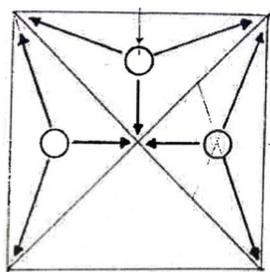
Antes me has hablado de la evolución de la edificación en altura y de los diferentes estadios que explican la cronología de sus estructuras. ¿Podrías resumir, y ya como conclusión, las razones por las que consideras que el Bank of China, respecto a, por ejemplo, el World Trade Center, establece una nueva etapa en la historia del rascacielos?

El WTC responde al concepto de un edificio de 100 plantas, cuando, en realidad, tiene 110. Aunque solo tenga diez plantas más, los esfuerzos son un 20% superiores. Esto llevó la tecnología de su construcción hasta límites desconocidos hasta entonces y supuso un esfuerzo gigantesco. Tratándose de un tubo podemos decir que, hasta cierto punto, se trata de una estructura espacial. El BOC, sin embargo, siendo más bajo, pero con unos esfuerzos derivadas de su situación geográfica son mucho mayores, no tenía más remedio que resolverse mediante un entramado tridimensional debido a la necesidad de transferir las cargas gravitatorias hacia los extremos, que es donde necesitamos el peso del edificio para contrarrestar el efecto del viento. El BOC materializó toda una serie de soluciones que mucha gente conocía, pero que no sabía cómo materializar. En este sentido, esta torre es un ejercicio único de artesanía, algo que, en mi opinión, es la esencia de la vida.

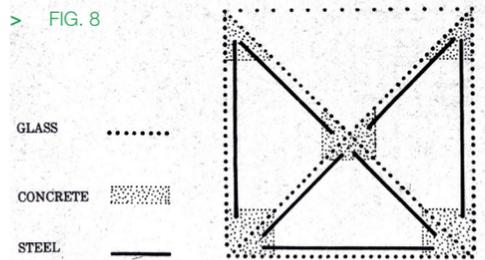
(Transcripción de la entrevista a Leslie Robertson, que tuvo lugar en New York, en mayo de 1994.)

EDUARD GASCÓN es Doctor Arquitecto por la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC) y profesor del Departamento de Proyectos Arquitectónicos de la ETSAB.

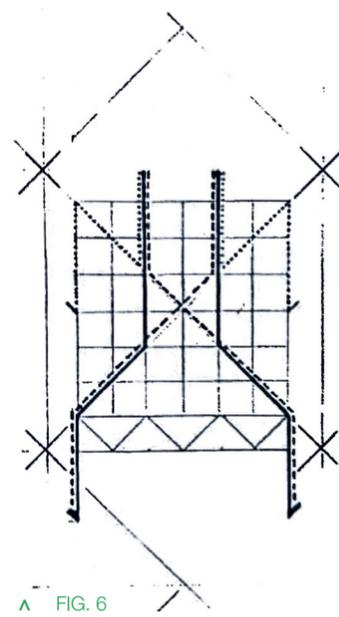
> FIG. 5



> FIG. 8



Λ FIG. 6



> FIG. 7. Alzados de la estructura

