

Los esquemas estructurales de los edificios altos



Miguel Ángel Astiz

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

En este artículo se presenta una clasificación de los distintos esquemas estructurales de los edificios de altura indicando para cada uno su principio de funcionamiento, su rango de aplicación y proporcionando algún ejemplo de realización. Los tipos que se definen son los siguientes: el pórtico, las estructuras con pantallas o muros de cortante, el tubo con sus variantes de tubo en tubo, tubo múltiple y tubo arriostrado, las estructuras con núcleo central, con apoyos laterales o no, la celosía espacial y un grupo final heterogéneo de nuevas propuestas.

Palabras clave

Esquemas estructurales, edificios altos, tubo, muro de cortante, núcleo central, celosía espacial

Abstract

The article classifies the different structural arrangements of tall buildings, providing examples of each group and indicating their working principles and range of application. These groups are classified as: frame buildings, shear walls, the tube in all its variations of tube in tube, bundled tube and trussed tube, structures with central core, with or without lateral support, space trusses and a final diverse group of new proposals.

Keywords

Structural arrangement, tall buildings, tube, shear wall, central core, space truss

1. Introducción

En el edificio de altura, la función estructural es sencilla por tratarse básicamente de una ménsula pero más importante por la magnitud de las cargas aplicadas. Por ello, la estructura se convierte en el elemento definitorio de la esencia del edificio y la optimización del espacio interior hace que la estructura salga al exterior y le dé forma y personalidad.

Por otra parte, no hay que olvidar la sensibilidad de las estructuras de los edificios de altura a los defectos, accidentes o atentados, como los trágicos acontecimientos recientes se han encargado de demostrarnos. La búsqueda de la robustez en estas estructuras es probablemente una tendencia que puede marcar la evolución a medio plazo del proyecto estructural de los edificios de altura.

El objeto de este artículo consiste en presentar los distintos esquemas estructurales utilizados insistiendo sobre sus principios de funcionamiento y su rango de aplicación. Para ello se establece una clasificación de tipos estructurales basada exclusivamente en su funcionamiento mecánico como forma de presentar de forma más comprensible las distintas alternativas existentes.

2. Pórticos

El pórtico es la estructura base de la mayor parte de los edificios por lo que no es de extrañar que se contemple como la primera opción en el caso de los edificios de altura. Su funcionamiento estructural está basado en la rigidez de los nudos de unión de vigas o losas y columnas. Los mecanismos de deformación frente a las acciones laterales están basados en el predominio de los esfuerzos de flexión por lo que se trata de estructuras generalmente dúctiles (siempre que estén correctamente armadas) pero con una capacidad resistente limitada y con una deformabilidad excesiva. Por ello su rango de aplicación es forzosamente limitado; se

considera que esta tipología sólo es razonable aplicarla para edificios de menos de 25 a 30 plantas.

Ante la aplicación de cargas laterales sobre una estructura pórtico, el tipo de deformación resultante es intermedio entre la deformación de las columnas si fueran exentas y la deformación de una ménsula cuyas dimensiones transversales coincidieran con las del edificio tal como se aprecia en la figura 1.

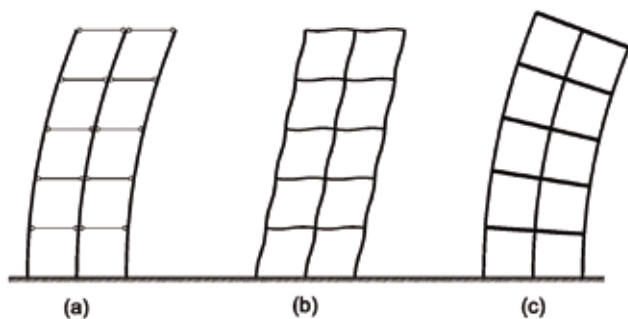


Fig. 1. Deformación de una estructura pórtico ante acciones laterales en los casos: a) vigas de rigidez despreciable; b) vigas de rigidez normal; c) vigas muy rígidas

A partir de una cierta altura es necesario disponer elementos de arriostramiento para activar un mecanismo más eficaz de resistencia frente a las acciones laterales. Ejemplos significativos de esta tipología son el Empire State (102 plantas) o el edificio Chrysler (77 plantas), ambos en Nueva York.

La deformación global de un pórtico arriostrado debería parecerse a la deformación por flexión de una ménsula. Sin embargo, como los elementos de arriostramiento son necesariamente flexibles, la deformación resultante es más parecida a la de una viga de Timoshenko, combinando la deformación por flexión, traducida en una curvatura, y la deformación tangencial, traducida en una distorsión de los marcos del pórtico. Se puede decir entonces que se trata de una deformación intermedia entre la de una ménsula y la de un pórtico no arriostrado (Fig. 2).

3. Pantallas o muros de cortante

El desarrollo de sistemas de arriostramiento como forma de rigidización de pórticos conduce de forma natural a un sistema en principio más eficaz consistente en rellenar los marcos ocupados por los arriostramientos. De esta manera se llega al concepto de pantalla o muro de cortante, tra-

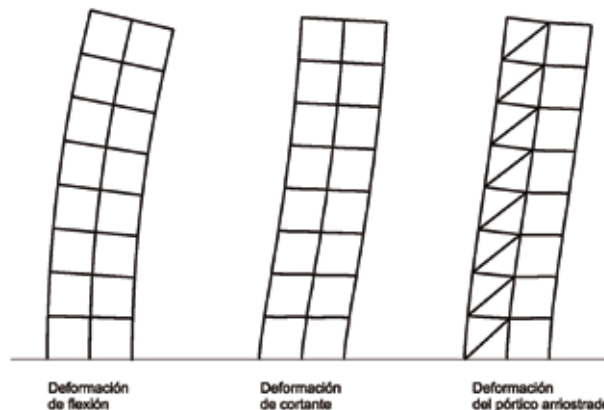


Figura 2. Deformación del pórtico arriostrado

ducción directa del inglés (*'shear wall'*) y denominación que traduce su función en el esquema resistente del edificio.

Dado que este sistema es muy parecido al de pórticos arriostrados, su dominio de aplicación es también parecido por lo que entre los ejemplos que se pueden citar existen edificios de gran altura y de construcción reciente como las torres Petronas (88 plantas y edificio más alto del mundo hasta 2004).

La pantalla es un elemento vertical continuo de hormigón que se caracteriza por un espesor reducido pero un canto importante lo que le da una gran rigidez y resistencia a las fuerzas laterales en su plano. La necesidad de resistir acciones laterales en cualquier dirección e incluso momentos torsores de eje vertical conduce a proyectar varias pantallas orientadas en direcciones ortogonales de forma que sean capaces de absorber tanto las acciones laterales como los posibles momentos torsores asociados.

Consideradas como elementos exentos, se utilizan en edificios de hasta 35 plantas. En zonas sísmicas se consideraron en principio una solución excelente por su gran resistencia pero esta opinión ha ido cambiando a causa de su falta de ductilidad. Hoy en día se siguen considerando como una alternativa válida para zonas sísmicas, ya que la dificultad de dotarlas de ductilidad se puede paliar con el uso de amortiguadores.

Conforme aumenta la altura de los edificios es necesario aumentar el canto de las pantallas lo cual acaba entrando en conflicto con las necesidades funcionales. Para evitar este conflicto se hace necesario abrir huecos en las pantallas lo

cual lleva al concepto de pantallas acopladas. Se trata de pantallas coplanarias unidas en cada planta por los forjados o por vigas de unión (Figura 3). Se puede considerar que el comportamiento de las pantallas acopladas es como el de una pantalla de muy gran canto (el del conjunto de las dos pantallas) pero con una flexibilidad a cortante importante (la que proporciona la flexibilidad a flexión de los elementos de unión entre las pantallas).

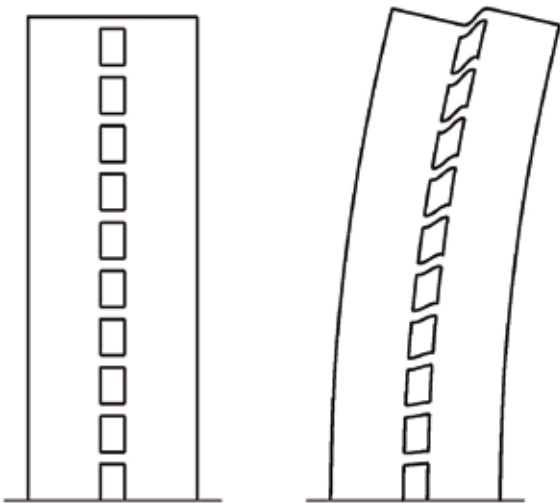


Fig. 3. Pantallas acopladas

Cuando se utilizan de forma combinada la estructura pórtico y la pantalla como elementos resistentes del edificio de altura, se ponen en juego dos formas diferentes de resistir las cargas laterales y, de alguna forma, se pueden conseguir aunar las cualidades de los dos tipos estructurales. La idea básica que genera este sistema consiste en asignar al pórtico la distribución y transmisión de las cargas verticales y a las pantallas la transmisión de las cargas horizontales. Funcionalmente, las pantallas se suelen localizar en los núcleos de escaleras y ascensores, mientras que los pórticos se extienden a lo largo de toda la planta del edificio. Se considera que el rango de aplicación de este sistema alcanza, e incluso puede superar, las 50 plantas. El ejemplo arquitectónicamente más significativo que se puede citar es el edificio Seagram en Nueva York (38 plantas), obra de Mies van der Rohe en colaboración con Philip Johnson.

Como pórticos y pantallas tienen comportamientos diferentes frente a las cargas horizontales, al igualarse los desplazamientos se producen intercambios de cargas entre ellos que

hacen que la deformada resultante sea una combinación de la deformada de ménsula en flexión, típica del muro de cortante, y la de la ménsula en cortante, típica del pórtico (Fig. 4).

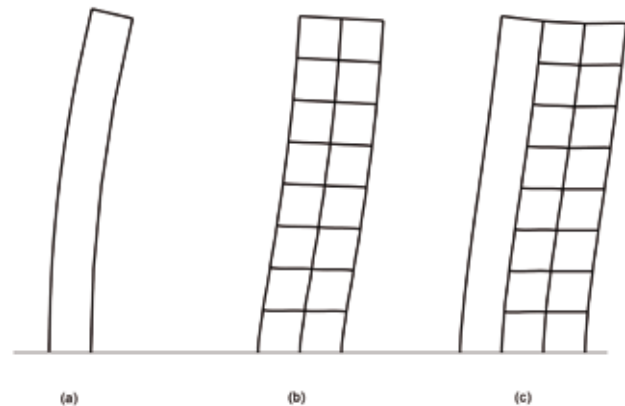


Fig. 4. Deformadas típicas de una pantalla (a), un pórtico (b) y una estructura pantalla-pórtico combinados (c)

4. Estructuras tubulares

Dentro de este grupo colocamos no solamente a las estructuras de un solo tubo sino también al tubo en tubo, al tubo múltiple y al tubo arriostrado. El concepto del edificio de altura como una ménsula sometida a acciones transversales, además de las muy importantes fuerzas verticales, conduce de forma natural a las secciones de pared delgada que han demostrado ser las óptimas para resistir acciones de flexión en la construcción metálica y, más especialmente, en la ingeniería aeronáutica.

Como tanto el viento como el sismo pueden llegar a producir torsiones, es muy natural que el tubo sea perfectamente aplicable a los edificios de altura por su eficacia tanto frente a la flexión como frente a la torsión. El concepto tiene que adaptarse a las exigencias funcionales y ello implica que la lámina continua se vea sustituida por un entramado de elementos horizontales y verticales cuyas propiedades globales serán semejantes a las del tubo.

El concepto de la estructura tubular para los edificios de altura fue introducido por primera vez en 1963 por Fazlur Khan, autor entre otros de edificios tan conocidos como el John Hancock o las torres Sears (ahora denominadas torres Willis), o el edificio de apartamentos DeWitt-Chestnut, de 43 plantas, situado en Chicago. Hoy en día se estima que la mayor parte de los edificios de más de 50 plantas deben utilizar este esquema u otro similar.

El comportamiento de la estructura tubular ante las cargas transversales se puede diferenciar del teórico de una ménsula que obedezca a la hipótesis de deformación plana de Navier-Bernoulli. Ello es debido al fenómeno del arrastre de cortante, bien conocido en la ingeniería aeronáutica y en la de puentes. Como consecuencia de este fenómeno, se concentran los esfuerzos de flexión general del tubo en las columnas de esquina, es decir en los extremos de las hipotéticas almas de la sección transversal del tubo (Fig. 5). La mayor o menor importancia de este fenómeno depende de la geometría del tubo y de la rigidez de las vigas horizontales.

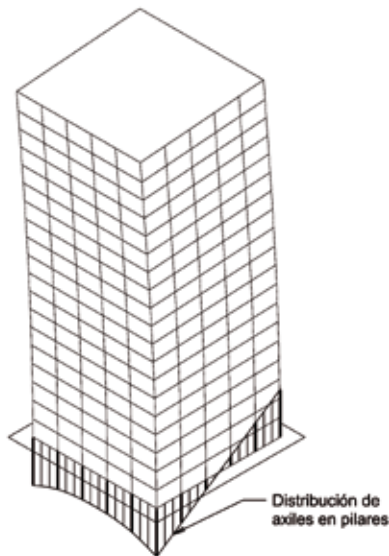


Fig. 5. Deformada típica de una estructura tipo tubo

Una variante de esta tipología es lo que se conoce como tubo en tubo. La necesidad de disponer un núcleo de servicios (escaleras y ascensores) habitualmente localizado en el centro de la planta, conduce naturalmente a una solución de dos tubos: uno exterior cuya función es la explicada anteriormente y otro interior que colabora en la rigidez lateral del conjunto en un mecanismo de deformación similar al de las pantallas pero que además supone un soporte eficaz para las losas de forjado (Fig. 6). Como ejemplo de esta tipología se puede citar el edificio Central Plaza de Hong Kong (78 plantas).

El mecanismo de arrastre de cortante explicado anteriormente para las estructuras tipo tubo se hace tanto más apreciable cuanto mayor sea la anchura del edificio en dirección normal a las cargas laterales. Para paliar este defecto en edificios

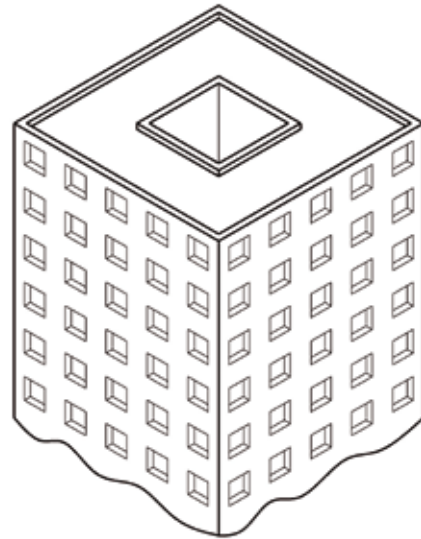


Fig. 6. Estructura tubo en tubo

muy anchos existe un remedio evidente consistente en aumentar el número de pantallas intermedias reduciendo así la distancia entre ellas y haciendo por lo tanto que el reparto de los esfuerzos de flexión general del tubo sea más eficaz. De esta manera se llega a lo que se ha venido a llamar la solución de tubo múltiple aunque sería más correcto denominarla solución tubo con almas intermedias (Fig. 7). El ejemplo más destacado de esta tipología son las torres Sears en Chicago (también obra de F. Khan).

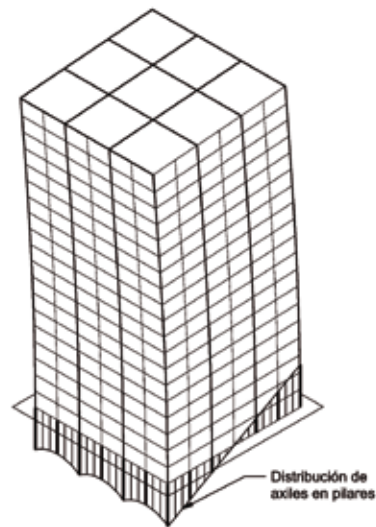


Fig. 7. Deformación del tubo múltiple

El tubo arriostrado surge como una alternativa al tubo aporricado ya que permite rigidizar cada plano exterior del tubo mediante elementos diagonales que convierten a estos planos en celosías (figuras 8 y 9) reduciendo la flexión en los pórticos y relajando los requisitos de proximidad de columnas y canto de las vigas horizontales. De esta manera, se hace posible aumentar el tamaño de las ventanas aunque los elementos diagonales interfieran en el ordenamiento ortogonal de la fachada.



Fig. 8. Tubo arriostrado



Fig. 9. Edificio Hancock Center, Chicago

El edificio más característico de este tipo es el John Hancock de Chicago, obra de F. Khan. El edificio tiene 344 m de altura (100 pisos) y se terminó en 1968. A su imagen única también contribuye el hecho de que su sección sea variable con la altura adoptando la forma de un tronco de pirámide. Las posibilidades formales de esta tipología también han contribuido a su desarrollo ya que han permitido que el diseño del sistema de diagonales pueda cambiar de un edificio a otro otorgando a cada uno una personalidad diferente.

5. Estructuras con núcleo central

La utilidad de las pantallas en la resistencia frente a las acciones laterales, la necesidad de disponer un núcleo de escaleras y ascensores y las cualidades estructurales de la solución tubo conducen naturalmente a la utilización de un núcleo central de hormigón en el que se satisfacen todas estas condiciones. Este núcleo se puede disponer también como único vehículo de las cargas verticales hasta la cimentación lo que se puede conseguir aumentando convenientemente el espesor de sus paredes con lo que se consigue también una mayor rigidez transversal.

Las soluciones basadas en el uso de un núcleo central confían a este elemento toda la resistencia frente a las acciones laterales que, por tanto, sólo se podrán transmitir a la cimentación mediante la flexión del núcleo. Así, el núcleo se erige en el elemento central y poderoso de la estructura, hecho que se suele resaltar dejando la planta baja diáfana o haciéndola desaparecer por lo que el edificio aparenta estar suspendido en el aire. Dos ejemplos españoles muy notables de esta idea aunque con conceptos diferentes son las torres de Colón y las oficinas del BBVA, ambos en Madrid.

El funcionamiento estructural de estos edificios es muy sencillo ya que el núcleo es prácticamente el único elemento resistente tanto para cargas verticales como laterales o de torsión. Dado que las dimensiones del núcleo vienen determinadas por el espacio necesario para alojar ascensores y escaleras y no se deben aumentar de forma gratuita, la limitación de las dimensiones del núcleo también impone, indudablemente, una limitación en la altura de los edificios basados en este esquema estructural. Se considera que la altura límite para esta tipología es de unas 40 plantas.

Donde más variedad se encuentra en el esquema estructural de estos edificios es en la forma de transmitir las cargas verticales desde los forjados hasta el núcleo. La

solución más inmediata consistiría en que los forjados se apoyaran única y exclusivamente en el núcleo central para lo cual deberían trabajar en ménsula. Esta solución es costosa, sólo es aplicable a vuelos pequeños (y por lo tanto dimensiones totales del edificio reducidas) y, además, requiere dotar a los forjados de espesores mayores e incluso variables lo cual también se conjuga mal con la economía y con la funcionalidad.

Por lo tanto, resulta necesario apoyar los forjados en el perímetro exterior del edificio a través de elementos que transmitan las cargas verticales al núcleo. Para ello existen dos alternativas (Fig. 10):

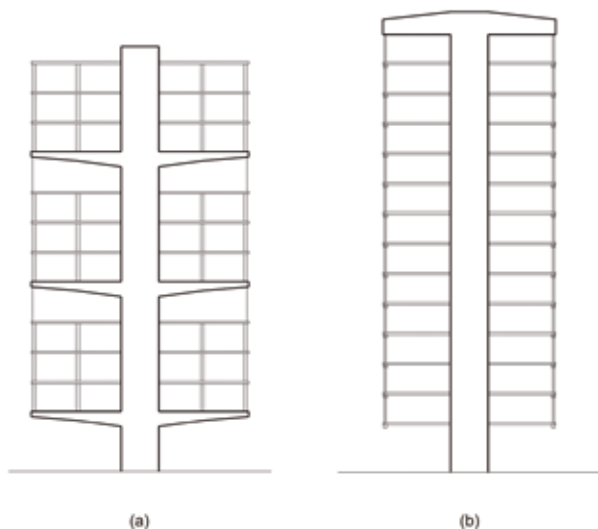


Fig. 10. Edificio con núcleo central y (a) plantas apoyadas o (b) plantas colgadas

- La primera consiste en disponer columnas verticales que se apoyen, cada cierto número de plantas, en una plataforma de gran canto capaz de transmitir todas las cargas al núcleo.

- La segunda consiste en colgar todas las plantas de unos tirantes que llevan la carga a una estructura muy rígida que corona el edificio y que permite transferir estas cargas al núcleo.

La existencia de un único elemento resistente, que además es muy rígido, hace que la ductilidad de la estructura sea pequeña por lo que el proyecto sísmico se debe hacer en régimen elástico y esto puede suponer un sobre coste excesivo o, simplemente, la imposibilidad de hacer viable esta solución en zonas altamente sísmicas.

La limitación en altura de la solución de núcleo central viene más de la rigidez y resistencia a la flexión que de la resistencia al cortante. Para aumentar la rigidez y la resistencia del esquema frente a la flexión provocada por las cargas laterales existe una solución consistente en coartar el giro del núcleo mediante unas vigas transversales (denominadas *outriggers*) que se empotran en el núcleo y se conectan a las columnas o tirantes exteriores (Fig. 11). Para que este sistema sea efectivo es necesario que los elementos perimetrales lleguen a la cimentación. De esta manera, el canto efectivo de cara a la flexión pasa a ser equivalente a las dimensiones en planta del edificio.



Fig. 11. Deformación del núcleo central con vigas transversales

Aunque este esquema se parece al de un pórtico combinado con una pantalla, en realidad es diferente. El trabajo de flexión se confía a las columnas exteriores siendo secundario el papel del núcleo si éste está centrado. Por otra parte, la transmisión del cortante se produce principalmente a través del núcleo.

En este esquema cumplen un papel muy importante los elementos transversales, que son de dos tipos:

- Las vigas que conectan el núcleo a las columnas extremas deben ser muy rígidas tanto frente al cortante como a la flexión. Para ello es necesario que su canto sea importante por lo que se suelen resolver mediante vigas trianguladas que ocupan una o dos plantas.

- Dado que las vigas transversales no pueden conectar individualmente el núcleo a todas las columnas perimetrales,

se disponen a intervalos regulares unos diafragmas horizontales muy rígidos para incorporar a todas las columnas perimetrales a la sección resistente frente a la flexión que está centrada en el núcleo.

Aunque hasta hace unos años se consideraba que este esquema sólo debería ser válido para edificios de entre 40 y 70 plantas, se ha aplicado recientemente al edificio Taipei 101 de 101 plantas y 508 m de altura aunque complementado con un amortiguador sintonizado y de gran masa situado en los últimos pisos y destinado a reducir la parte no estacionaria de los desplazamientos debidos al viento y al sismo. También hay que citar en esta categoría al edificio Jin Mao en Shanghai (88 plantas) y, por supuesto, la torre Burj Dubái (162 plantas) que es ya el edificio más alto del mundo.

6. Celosía espacial

La solución de muchos problemas estructurales se puede plantear mediante elementos discretos formando una celosía que permite conducir las fuerzas de forma sencilla hasta los apoyos. En el caso de los edificios de altura se puede sustituir el entramado exterior por una celosía como elemento resistente principal y apoyar sobre esta celosía los elementos secundarios de la estructura tales como forjados o columnas accesorias (Figuras 12 y 13). Debido al carácter tridimensional del edificio, la celosía que se convierte en su estructura principal tiene que ser forzosamente una celosía espacial.



Fig. 12. Esquema de una celosía espacial

En este esquema, es necesario disponer unas columnas de gran sección, normalmente en los vértices de la sección del edificio, y un sistema de montantes y diagonales en las caras del edificio. El diseño de estos elementos es especialmente complicado por la magnitud de las fuerzas a transmitir, por los problemas que se plantean en los nudos y por la fragilidad que introducen al concentrar los elementos resistentes principales.

Este tipo de esquemas resistentes tiene enormes posibilidades aunque los inconvenientes enumerados hacen que su desarrollo no esté muy extendido. El ejemplo más conocido es el del edificio del Banco de China en Hong-Kong (72 plantas), ideado por el arquitecto I. M. Pei.

En el fondo, este sistema no es muy diferente del que hemos llamado tubo arriostrado, cuyo ejemplo más notable es el edificio John Hancock. La diferencia estriba en que en el tubo hay una mayor densidad de columnas 'principales' y el arriostramiento, que tiene una presencia estética muy importante, sólo colabora en la resistencia a las acciones laterales. En la celosía, sólo hay un pequeño número de columnas 'principales' que son las que cumplen el papel de cordones de la celosía.

Una variante de este sistema que da lugar a edificios muy diferentes es la consistente en difuminar la celosía espa-



Fig. 13. Bank of China Tower, Hong Kong

cial en la fachada reduciendo el tamaño de las celdas y la sección de los elementos que las conforman. En estos esquemas, las diagonales cobran un papel muy destacado tanto desde el punto de vista estético como estructural y pueden incluso sustituir totalmente a las columnas verticales. El ejemplo más conocido de estos edificios es la torre Swiss Re en Londres (40 plantas), proyectada por Norman Foster. La reducción del tamaño de las celdas puede no ser uniforme a lo largo de la fachada del edificio sino que puede ser función de las necesidades estructurales como en el caso del edificio CCTV en Beijing (54 plantas), proyectado por Rem Koolhaas.

7. Otros esquemas

La clasificación esbozada en los apartados anteriores es forzosamente imperfecta ya que es posible imaginar esquemas estructurales híbridos en los que se mezclen ideas de varios de los sistemas presentados anteriormente.

Una de las tendencias que se está generalizando consiste en sacar la estructura portante hacia el exterior, incluso separándola del resto de la estructura. Esta estructura exterior puede ser una celosía metálica como en el hotel de las Arts de Barcelona (44 plantas) proyectado por Bruce Graham o un tubo de hormigón con perforaciones circulares, básicamente equivalente a una celosía, como en el edificio COR de Miami (25 plantas) proyectado por Chad Oppenheim Architecture.

La búsqueda de nuevas formas se produce, en primer lugar, en la planta aunque éste es un fenómeno antiguo

y del cual el Ayuntamiento de Toronto, proyectado por el arquitecto finlandés Viljo Revell y terminado en 1965, es un buen ejemplo. Estas formas no están reñidas con los esquemas estructurales descritos anteriormente y, por ello, no tienen que llevar aparejadas necesariamente novedades en sus propios esquemas. Pero si se combina la forma con el hecho de mostrar la estructura portante como se ha explicado anteriormente, las posibilidades de renovación formal son enormes. Así, por ejemplo, nos encontramos con el edificio O-14 en Dubái (21 plantas, proyecto de Reiser & Umemoto) en el que la forma curva de la lámina exterior de hormigón y el tamaño variable de las perforaciones de esta lámina le dan al edificio un sello característico. Cuando las nuevas formas se extienden también a la tercera dimensión y el edificio deja de ser un prisma, aparecen edificios tan originales como el ya citado CCTV de Beijing o el proyectado CICCM en Madrid (119 m de altura, proyecto de Tuñón, Mansilla y Peralta).

8. Conclusiones

Se ha presentado una clasificación de los esquemas estructurales de los edificios altos en la que se ha destacado la razón de ser de cada tipo de esquema sobre la base de la optimización del funcionamiento de la estructura ante las acciones verticales y horizontales. Pero como en cualquier estructura, este funcionamiento debe supeditarse a los requisitos funcionales y este sometimiento condiciona el proyecto de la estructura. Como consecuencia, estos esquemas no suelen tener formas caprichosas sino que son el resultado de una síntesis rigurosa de todas las variables que condicionan el proyecto del edificio. **ROP**