

Los materiales estructurales en los edificios de gran altura



Jaime Fernández Gómez

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Catedrático de Edificación y Prefabricación de la ETSICCP de la UPM



David Fernández-Ordóñez Hernández

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Profesor Titular Interino, Coordinador de Edificación de la ETSIC de la UPM

Resumen

En este artículo se analiza el empleo de los diferentes materiales estructurales en la construcción de los edificios de gran altura. Se realiza un repaso histórico, desde el empleo de la fábrica resistente y los logros conseguidos con ella, hasta las tendencias más actuales. El predominio de la estructura metálica durante más de 50 años se ha visto abandonado con el empleo y la utilización de hormigones de alta resistencia. Otros dos hormigones especiales tienen su utilización: los hormigones autocompactantes, para hormigonar zonas muy congestionadas de armaduras, y los hormigones ligeros, para utilizar en la estructura horizontal y disminuir las cargas.

Palabras clave

Edificios altos, materiales estructurales, estructuras de edificación, hormigones especiales, sistemas estructurales

Abstract

The article analyses the use of different structural materials in the construction of tall buildings, ranging from the first use of reinforced masonry walls and the achievements obtained by the same, right up to the most modern practices. The predominance of steel structures that lasted over 50 years has since given way to the use of high-performance concretes. A further two special concretes are also being employed in the form of self-compacting concretes, used to minimise voids in areas of high reinforcement, and lightweight concrete used in the horizontal structure to reduce loading.

Keywords

Tall buildings, structural materials, building structures, special concretes, structural systems

La utilización del espacio en vertical siempre ha sido una necesidad en muchos centros habitables. Ya en la antigüedad, la necesidad de concentración poblacional para tener los servicios a mano y evitar los desplazamientos provocó la construcción de edificios en altura. La Antigua Roma edificó manzanas de varias alturas como vivienda habitual, en las cuales se localizaban también las tiendas. Incluso los primeros centros comerciales, muy al estilo de los actuales, surgen y se construyen para concentrar la actividad comercial.

Caso especial supone la ciudad de Shibam, en el actual Yemen (ver figura 1), conocida como el Manhattan del desierto. Es el primer caso, y desde luego mejor conservado, de urbanismo de edificación en altura. Sus edificios más altos alcanzan los 40 m, con 16 plantas, lo cual supone un logro notable para su época, técnicas constructivas, y estado del conocimiento. Las estructuras están formadas por muros de carga de ladrillo de tierra, y los más antiguos se remontan al siglo XVI.

El gran desarrollo y las mayores necesidades de edificios altos surgen con el urbanismo creado a finales del siglo XIX en EE. UU., con un detonante muy importante: el desarrollo del ascensor moderno por Elisha Graves Otis. Ya existían muchos antecedentes de elevadores, tanto como montacargas, como elevadores de minería, e incluso el primer elevador de personas en un edificio se considera el construido en el Palacio de invierno de San Petesburgo por Kulibin en 1793. Considerado el 'padre' del ascensor de edificios, en realidad su invento consistió en un mecanismo de seguridad para evitar la caída del ascensor en caso de rotura del cable de sustentación y ello permitió construir ascensores mucho más seguros y utilizables para la elevación de personas. Él mismo explotó su invento, dedicándose a la construcción de ascensores.

La construcción de los edificios en altura, hasta la incorporación del hierro y el acero como materiales estructurales, se solucionaba con estructuras portantes de muros de carga, bien de ladrillo o piedra, que también dotaban de la rigidez lateral necesaria. Desde el punto de vista estructural las reglas de diseño usadas obligaban a muros que aumentaban su espesor en una determinada magnitud cada cierto número de plantas, lo que suponía que en las plantas inferiores el espacio útil ocupado por la estructura era muy importante.

El caso más detonante fue el edificio Monadnock, en Chicago, hoy edificio histórico, construido con fábrica de ladrillo. En la figura 2 puede verse el aspecto del edificio en la actualidad. Para la construcción y proyecto del edificio se utilizaron las técnicas más modernas en su tiempo, con un sistema de arriostramiento frente a viento, pero los espesores de los muros en planta baja, 1,80 m, suponían un 25 % del espacio útil. Fue el último edificio alto de su clase construido en Chicago, y hasta la aparición de la fábrica armada en los edificios de gran altura, se abandonó el empleo del ladrillo como material estructural.

A partir de esa época, el ladrillo como material estructural deja de ser competitivo en los edificios de gran altura. En el año 1924, ya con muchos edificios altos en construcción, el Código de la ciudad de Nueva York obligaba a que un edificio de 12 alturas destinase un 30 % de la superficie de la planta baja a los muros estructurales. El desarrollo de la prefabricación moderna ha permitido el uso de muros portantes (hormigón) en edificios de gran altura, y así en la segunda mitad del siglo XX se han desarrollado edificios con paneles portantes prefabricados hasta alturas de 150 m.

La incorporación del acero estructural como material de construcción a los edificios altos comienza a finales del siglo XIX. El primer 'rascacielos' construido en el mundo utilizando el acero estructural fue el Home Insurance Building (ver figura 3), de 1885 y hoy demolido, con diez pisos y 42 m de altura. En aquellas épocas el término de 'skyscraper' se aplicaba a edificios de más de 9 alturas. Curiosamente la idea original de construir el edificio en acero fue la de su posible invulnerabilidad frente a los incendios.

Desde esas épocas, finales del siglo XIX, y hasta bien avanzado el siglo XX, el acero es el material estructural utilizado de forma masiva en la construcción de edificios altos. Es el protagonista indiscutible del gran desarrollo de Manhattan en los primeros 70 años del siglo XX, no pudiendo el hormigón presentar una alternativa razonable, debido a su mayor coste y a la ocupación



Fig. 1



Fig. 2

en planta que suponen los pilares para edificios de alturas importantes. Icono de esta época en la que el acero era el único protagonista de los grandes edificios es el Empire State Building, récord de altura durante 40 años. En las figuras 4 y 5 pueden verse dos escenas ya clásicas de edificio durante su construcción, y otra más olvidada o desconocida, y es la del



Fig. 3



Fig. 4

incendio sufrido por el choque de un bombardero B-25 contra el edificio, en julio de 1945, a la altura de las plantas 79 y 80, en las oficinas del National Catholic Welfare Council. A pesar de lo aparatoso del accidente, sólo hubo 14 bajas mortales, en 40 minutos se extinguió el incendio, y el edificio abrió varias de sus oficinas el mismo lunes siguiente (el accidente fue un sábado).

El hormigón armado, con resistencias convencionales, tenía muchas limitaciones en los edificios de gran altura para ser usado como material estructural integral. Dejando a un lado las losas de piso, de las que hablaremos más adelante, las cargas verticales que se producen en esos edificios obligaban a escuadrías de pilares muy importantes, con el consiguiente problema de pérdida de espacio en las plantas inferiores. Independientemente de la pérdida de espacio real, cuantificable y valorable como superficie edificada a efectos de establecer la comparación de coste final con otros sistemas estructurales, se generaban problemas arquitectónicos notables en las plantas de garaje y baja, con una complicación de cambio de dimensiones en altura. En esas circunstancias el hormigón como material estructural no puede competir con el acero.

A finales de los años 60, y fundamentalmente a partir de la década de los 70, se comienzan a desarrollar los hormigones

entonces llamados (y casi todavía hoy) de alta resistencia. La limitación de resistencias en el hormigón convencional estaba establecida en los 50 MPa, resistencia máxima considerada en tiempos por las diferentes normas, y que suponía un límite superior de lo que se podía conseguir con cementos de buena calidad y alta resistencia.

A nivel práctico, resistencias por encima de 40 MPa no eran utilizables, e incluso esos valores se reservaban para el hormigón pretensado. Esta limitación venía de las relaciones agua-cemento mínimas utilizables, que en la práctica no bajaban de 0,40. Con los aditivos de la época no se podían conseguir reducciones de agua mayores compatibles con la puesta en obra, y la capacidad de los cementos estaba limitada por la zona de transición árido-pasta, más débil por la presencia de agua en los áridos y la mayor porosidad. En esas épocas aparecen los aditivos superfluidificantes de tercera generación, productos industriales ya diseñados para su fin y no subproductos más o menos transformados de otras industrias. Estos productos actúan sobre el problema del exceso de agua necesario para conseguir una adecuada compactabilidad: la floculación de los granos de cemento. Debido a las cargas electrostáticas que tienen las partículas de cemento, fundamentalmente por los procesos de molienda, se atraen entre sí, produciendo una estructura difícilmente dispersable



Fig. 5

y que necesita aportes de agua considerables para romperla. Estos aditivos rodean las partículas de cemento neutralizando su carga y facilitando su dispersión, permitiendo reducir el agua de amasado a valores ya cercanos a los necesarios para la hidratación del cemento. De esta forma se utilizan relaciones agua-cemento entre 0,25 y 0,30, e incluso inferiores, consiguiendo aumentar la resistencia del hormigón por encima de los valores antes expuestos. En cualquier caso, la limitación debida a la debilidad de la zona de transición árido-pasta seguía existiendo, y aunque mejorada por la menor cantidad de agua, suponía un límite a la resistencia máxima, que podemos establecer en el entorno de los 70 MPa.

Un subproducto de la industria de las aleaciones del silicio y ferrosilicio se comenzó a utilizar en los años 70 como adición del hormigón, la microsílíce, con el objetivo de solucionar este problema. La microsílíce, aparte de una finura de molido en estado polvo inferior a la del cemento convencional, está compuesta prácticamente por sílice pura. Se dispersa en el hormigón mejorando la porosidad de la zona de transición de los áridos debido a su efecto *filler*, pero además produce reacciones con la 'portlandita' del cemento formando silicatos secundarios que aumentan la resistencia de esa zona. Gracias a los efectos combinados de microsílíce y superplastificantes, pueden obtenerse hormigones de hasta 120 MPa de resistencia, siendo hoy habitual que las normas de hormigón, que ya incorporan el hormigón de alta resistencia como un hormigón convencional, admitan resistencias de utilización de 100 MPa.

Con estos niveles resistentes el hormigón sí que se convierte ya en un competidor de la estructura metálica en precio y prestaciones, al eliminar el problema de la pérdida de espacio por mayores dimensiones de los pilares.

Hacia finales de los 60 empiezan a aparecer los edificios de gran altura con pilares de hormigón. Aunque hablar del primero de ellos siempre es controvertido, pues habría que considerar alturas y resistencia utilizadas, puede citarse como uno de los primeros ejemplos el edificio Lake Point Tower, en Chicago, del año 1968 (ver figura 6). En esa ciudad se construyen en los años siguientes una serie de edificios con hormigón de alta resistencia, y en el año 1989 en el Pacific First Center de Seattle (ver figura 7) se utiliza hormigón de 115 MPa.

En España, el doctor ingeniero de Caminos Florentino Regalado incorporó al Proyecto de Edificios Altos construidos en las zonas turísticas de Levante a partir de los años 90 el hormigón de alta resistencia. En la figura 8 puede verse un ejemplo realizado en una de sus obras para convencer a la propiedad, cuyos recelos a la utilización de estos hormigones era entendible, de la utilización de un hormigón de alta resistencia en sustitución de uno convencional. Tuvo éxito y desarrolló varios proyectos con estos hormigones, lógicamente con una dedicación especial por su parte para evitar problemas en la fabricación y puesta en obra con un producto novedoso en su época.

Gracias al hormigón de alta resistencia este material ha competido con la estructura metálica a partir de los años 70, y en la actualidad seis de los diez edificios más altos del mundo tienen estructura de hormigón o mixta, pudiendo citarse como ejemplos emblemáticos las Torres Petronas en Kuala Lumpur, el Burj Khalifa en Dubái...

Como consecuencia del empleo de hormigones de alta resistencia se produce un aumento de las cuantías de armadura y secciones estructurales mucho más reducidas, lo que origina dificultades para hormigonar. El empleo de hormigones autocompactantes ha ayudado a solucionar este problema, permitiendo el empleo de altas resistencias y consistencias que permiten el hormigonado de piezas con gran congestión de armaduras, lo que en otras circunstancias presentaría problemas difíciles de solucionar.

El hormigón autocompactable se beneficia de los comentados efectos de los superfluidificantes, unido a una dosificación especial que contempla la incorporación de gran cantidad de



Fig. 6

finos y un esqueleto granulométrico que aumenta la viscosidad y capacidad de retención de la pasta y permite manejar el hormigón como un fluido, pudiéndose poner en obra sin necesidad de compactación.

Se ha utilizado en diferentes elementos en edificios de gran altura en los cuales y de otra forma se hubiera complicado mucho el hormigonado.

Un hormigón de aplicación bastante común en edificios de gran altura, y que raramente se emplea en los edificios normales, es el hormigón ligero, o más propiamente definido hormigón de áridos ligeros. Los elementos de la estructura horizontal superficial de los edificios incorporan cantidades de hormigón muy importantes, que como orden de magnitud y dependiendo del tipo de forjado empleado, pueden suponer entre 80 y 200 litros por metro cuadrado. Ello puede suponer que entre un 25 y un 50 % de la carga gravitatoria de servicio viene ocasionada por el hormigón de la estructura horizontal. Es evidente la importancia de reducir esta carga en este tipo de estructuras, debido a los problemas de cimentación que presentan.

Aunque existen antecedentes históricos muy notables, como el Panteón de Roma, el hormigón ligero con cementos artificiales se utiliza en construcción desde hace casi un siglo. Los primeros casos de utilización se remontan a los barcos construidos durante la Primera Guerra Mundial, y a partir de ese punto se ha utilizado con resistencias relativamente mo-



Fig. 7

deradas, pues la utilización de áridos ligeros y las resistencias elevadas eran casi incompatibles.

Con el desarrollo de los áridos ligeros artificiales, a base de arcilla expandida, unido al empleo de aditivos, se han conseguido hormigones de resistencias medias y altas con pesos específicos relativamente bajos. Hoy pueden conseguirse hormigones entre 25 y 50 MPa con pesos específicos inferiores a $1,8 \text{ Kg/m}^3$. Unido a la estructura metálica se ha utilizado en algunos tipos estructurales muy concretos, como son los forjados mixtos de chapa colaborante, en la cual la chapa hace de armadura y el relleno de hormigón se efectúa con hormigón de árido ligero. Este sistema no precisa cimbrar la estructura horizontal, siendo la chapa, conectada a la estructura metálica, el elemento que soporta el peso del hormigón durante la fase de construcción. Permite velocidades de construcción muy elevadas, siendo su inconveniente el peso propio. En este campo es donde ha entrado con fuerza el hormigón ligero, que con pesos específicos de $1,8 \text{ Kg/m}^3$ permite reducciones de peso de un 25 %. En la figura 9 puede verse un ejemplo de estos sistemas estructurales, de forjado de chapa colaborante con estructura metálica.

En la actualidad todos los materiales de construcción pueden estar presentes en las estructuras de edificios altos. El hormigón pretensado, y por lo tanto todos los aceros de pretensar, aparecen de forma puntual en todos los casos de quiebras y cambios estructurales. En las Torres de Puerta Europa en Madrid se utiliza el pretensado fundamentalmente para evitar los efectos de fluen-



Fig. 8



Fig. 9



Fig. 10

cia en el núcleo central de hormigón, sometido a un momento importante debido a la excentricidad de la carga vertical.

El futuro parece estabilizado. La estructura metálica seguirá estando presente, conviviendo con el hormigón de alta resistencia y ligero en estructuras horizontales. Aunque actuar como profeta sobre tendencias futuras suele estar sometido a grandes fracasos, es muy probable que la estructura metálica a base de aceros especiales de grano fino, con calidades de 420 y 460 MPa, superiores a los ordinarios, tenga un protagonismo creciente en el futuro. Habrá que mejorar el aseguramiento de la calidad de los productos, y en especial en los espesores utilizados en los pilares de edificios altos. También habrá que continuar con la tendencia actual de realizar en taller los nudos más complejos, y llevar unidos grandes elementos que después se empalman en obra en centros del elemento o en zonas menos comprometidas con tornillos de alta resistencia (ver figura 10). De esa forma las soldaduras, mucho más delicadas en estos aceros debido a su estructura de grano y carbono equivalente, se pueden prácticamente evitar en obra. Todo ello teniendo en cuenta que este sistema requiere mayor control de las tolerancias y atención a los medios de montaje. **ROP**

Referencias

- ACHE. Proyecto de Edificios Altos. Monografía M-20,21.
- ACHE. Ejecución de Edificios Altos. Serie Recomendaciones y Manuales Técnicos E-13.
- ACHE. Hormigón Autocompactante. Diseño y aplicación. Monografía M-13. 2008.
- CTE. Código Técnico de la Edificación. Ministerio de Vivienda 2006.
- Eurocódigo EC-2. Proyecto de Estructuras de Hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1992-1-1. Junio 2010.
- Eurocódigo EC-3. Proyecto de Estructuras de Acero. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificios. UNE-EN 1992-1-1. Mayo 2008.
- Eurocódigo EC-6. Proyecto de Estructuras de fábrica. Parte 1-1: Reglas generales para estructuras de fábrica armada y sin armar. UNE-EN 1996-1-1. Marzo 2011.
- Industrialización para la construcción de viviendas. Viviendas asequibles realizadas con prefabricados de hormigón". Fernandez Gomez, J., Fernandez-Ordoñez Hernandez, D. Informes de la Construcción Vol. 61, 514, 71-79, abril-junio 2009.