



La revista de los
Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

3552 MARZO 2014

REVISTA DE
OBRAS PÚBLICAS

ROP

Visión crítica y reflexiones acerca del estado actual
de los edificios altos

Julio Martínez Calzón y Carlos Castañón Jiménez

Prestaciones energéticas de los edificios de
oficinas. Análisis específico de los edificios altos

Luis Irastorza y Jordi Pascual

Edificios altos

NÚMERO MONOGRÁFICO

El significado, la realidad y
la trascendencia de los edificios altos

Jesús Gómez Hermoso







Los ‘edificios altos’, entendiéndolo por tales aquellos cuya esbeltez –el cociente entre sus dimensiones vertical y horizontal– supera determinado umbral, son un elemento característico del desarrollo urbano actual, en el que se conjuga la funcionalidad con el alarde estético y con el refinamiento tecnológico. La cultura urbana de la globalización, homogeneizadora y en cierta medida impersonal, ha incorporado esos edificios singulares, herederos de los rascacielos norteamericanos del período de entreguerras, al paisaje de las ciudades, cuyo perfil viene determinado cada vez más por esos hitos elevados, que constituyen una agresiva afirmación de la personalidad arquitectónica de cada urbe o conurbación.

La edificación es una actividad compleja que, aunque patrimonializada históricamente en España por la Arquitectura y en manos de los arquitectos, abarca y comprende una gama pluridisciplinar de especialidades. Y la Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, que contiene entre sus cometidos medulares el proyecto y el cálculo de estructuras de toda índole, desempeña sin duda un papel relevante en la materialización de edificios singulares, que requieren una conjunción no siempre fácil del diseño con la estabilidad. También los ingenieros Industriales desarrollan aspectos esenciales de los edificios altos. En este número monográfico de la Revista de Obras Públicas, cuya coordinación ha sido encomendada al ingeniero de Caminos, Canales y Puertos Jesús Gómez Hermoso, hemos pretendido indagar en esta faceta de la edificación en que la cooperación entre el arquitecto y el ingeniero es tan natural como espontánea, partiendo del criterio de que sería absurdo que una rivalidad extemporánea frustrase la síntesis entre profesiones a fin de cuentas convergentes en muchos sentidos.

Las nuevas corrientes europeas de liberalización profesional pasan, sin duda alguna, por la competencia abierta entre profesiones colindantes, al menos en aquellos cometidos que con claridad admitan la yuxtaposición.

En los doce artículos que constituyen este número monográfico, vuelcan sus conocimientos y su experiencia una veintena de profesionales versados en la planificación, el proyecto y la construcción de edificios altos, seleccionados atinadamente por el coordinador, además de por el reconocido prestigio de todos ellos, por el amplio campo de actuación que abarcan entre todos ellos.

Desde sus universidades, empresas de proyectos y de investigación, empresas constructoras generalistas, de ingeniería y otras especialistas en diversas aplicaciones, aportan un análisis general de estos edificios y una explicación más concreta de algunos de sus aspectos más significativos.

La Revista de Obras Públicas, órgano de expresión del Colegio de Ingenieros de Caminos, desea finalmente congratularse por la divulgación de un proyecto de decreto del Ministerio de Educación, Cultura y Deportes que, de manerarse en su términos conocidos y una vez corregidas algunas lagunas subsanables, resolverá cuando se promulgue la necesidad imperiosa de homologar los títulos de ingeniero anteriores a Bolonia con los del máster posterior a dicha reforma educativa. Las innumerables gestiones del Colegio han comenzado a dar al fin los frutos deseados, que resuelven una carencia que afectaba tanto al desempeño profesional de muchos compañeros que han de abrirse camino en el extranjero cuanto a las empresas de construcción e ingeniería que concurren a licitaciones internacionales.

SUMARIO

EDITORIAL

-
- 7 **El significado, la realidad y la trascendencia de los edificios altos**
Jesús Gómez Hermoso
-
- 15 **Visión crítica y reflexiones acerca del estado actual de los edificios altos**
Julio Martínez Calzón y Carlos Castañón Jiménez
-
- 27 **Setas y rascacielos**
Una experiencia entre la arquitectura y la ingeniería
Enrique Álvarez-Sala Walther
-
- 37 **Prestaciones energéticas de los edificios de oficinas. Análisis específico de los edificios altos**
Luis Irastorza Ruigómez y Jordi Pascual
-
- 49 **Introducción al urbanismo de Benidorm y sus edificios de gran altura**
Florentino Regalado Tesoro
-
- 59 **La acción del viento sobre los edificios altos**
José Meseguer y Sebastián Franchini

La revista decana de la prensa española no diaria

Director
Antonio Papell

Redactora Jefe
Paula Muñoz

Fotografía
Juan Carlos Gárgoles

Publicidad
MM Mass Media
Hermosilla 64 6ºB
T. 91 432 08 39

Imprime
Gráficas 82

Depósito legal
M-156-1958

ISSN
0034-8619

ISSN electrónico
1695-4408

ROP en internet
<http://ropdigital.ciccp.es>

Suscripciones
<http://ropdigital.ciccp.es/suscripcion.php>
suscripcionesrop@ciccp.es
T. 91 308 19 88

Coordinador de este monográfico
Jesús Gómez Hermoso

Edita
Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Calle Almagro 42
28010 - Madrid

www.ciccp.es



-
- 65** **La seguridad ante incendio en edificios altos: un enfoque múltiple**
Javier Unanua y George Faller
-
- 71** **Los materiales estructurales en los edificios de gran altura**
Jaime Fernández Gómez y David Fernández-Ordóñez Hernández
-
- 77** **Los esquemas estructurales de los edificios altos**
Miguel Ángel Astiz
-
- 85** **Las fachadas de los edificios altos**
Carlos Prada Rodríguez
-
- 91** **Características y requisitos del diseño de las instalaciones de edificios de gran altura**
Cristina González, Eduardo Theirs y Emilio González
-
- 99** **Encofrados y medios auxiliares para la ejecución de edificios de gran altura**
Antonio Reyes Valverde y Abel Ercilla Lecea

Consejo de Administración

Presidente

Miguel Aguiló Alonso

Vocales

Juan A. Santamera Sánchez
José Manuel Loureda Mantiñán
José Javier Díez Roncero
Juan Guillamón Álvarez
Luis Berga Casafont
Roque Gistau Gistau
Benjamín Suárez Arroyo
José Antonio Revilla Cortezón
Francisco Martín Carrasco
Ramiro Aurín Lopera

Comité Editorial

Pepa Cassinello Plaza
Vicente Esteban Chapapriá
Conchita Lucas Serrano
Antonio Serrano Rodríguez

Foto de portada

Torres de Madrid



Formación Técnica especializada en Ingeniería y Construcción

2014



La excelencia, **también**,
en formación online

EADIC: efectividad y competitividad


A través de nuestra experiencia, nos hemos consolidado como la escuela técnica de referencia en los sectores de la Arquitectura, la Ingeniería, la Tecnología y la Construcción.

Ofrecemos Formación Técnica Online, Consultoría de Formación, Creación y Mantenimiento de Plataformas de Formación, así como Planes a Medida de Formación Técnica Presencial.

Todos nuestros docentes son profesionales en activo. Además nuestra metodología garantiza que los profesionales de su empresa se conviertan en expertos y especialistas, desde cualquier lugar y con un horario completamente flexible.

CONTACTO

www.eadic.com

 info@eadic.com

+34 91 393 03 19 

Posgrados Universitarios Online

Solicite más información para la nueva convocatoria Mayo

 eadic
escuela técnica



Universidad
de Alcalá

El significado, la realidad y la trascendencia de los edificios altos



Jesús Gómez Hermoso

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

FCC Construcción, S.A.

Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

Tras acotar lo que se puede entender como un edificio alto históricamente y en la actualidad, así como distinguir entre conceptos como altura y esbeltez, este documento hace un breve repaso de los orígenes y causas de la explosión de los edificios altos en el siglo XIX.

Se hace un repaso de los datos que permiten conocer las alturas reales de los mayores edificios actuales, así como de los materiales que constituyen su estructura y los usos y ubicación geográfica, así como algunos criterios de proyecto y construcción. Finalmente se realiza una breve prospección.

Palabras clave

Edificio alto, esbeltez, evolución materiales, evolución geografía construcción, diseño formas, encofrados, usos edificios

Abstract

This article starts by defining both contemporary and historic tall buildings, before distinguishing between the concepts of height and slenderness and then providing a brief summary of the origins and causes of the proliferation in tall buildings throughout the 19th century.

The author revises available data to establish the real heights of the tallest buildings today and the construction materials used in the same, their allocated uses and geographical location together with certain specific design and construction criteria. The article concludes with a brief forecast of the future of tall buildings.

Keywords

Tall buildings, slenderness, development in materials, geographic-building development, formal design, formwork, building uses

Qué es

Casi todo lo que nos parece evidente, cuando pasamos a analizarlo con cierto detalle, comienza a presentar dudas. Si le preguntan a alguien qué es un edificio alto, es fácil que responda precisamente eso: “Es evidente, un edificio alto es un edificio con mucha altura (valga la redundancia) y con muchas plantas”. Pero el entrevistador podría añadir: “Pero, ¿cuántas plantas? ¿Una torre de telecomunicaciones es un edificio alto o ni siquiera puede considerarse un edificio? ¿Una pirámide es un edificio alto o tampoco es un edificio como tal?”.

Hasta no hace muchos años, algunas asociaciones técnicas internacionales consideraban un edificio alto como aquel que sobrepasaba las diez plantas. El Plan General de Ordenación Urbana del Ayuntamiento de Madrid establece condiciones especiales cuando el edificio tiene más de doce plantas. ¿Podría ser ese el límite? No debemos pasar por alto que en el Imperio Romano, en la época de Julio César, se prohibió construir edificios de más de diez plantas. ¿Son tan altos, por tanto, nuestros edificios de 12, 15 o 20 plantas?

Por otra parte, tampoco debemos olvidar la relatividad de la definición. Cuando se construyó el Centro Sanitario La Paz, en Madrid, en los años 60 del pasado siglo XX, para todos era una referencia de altura el edificio de Maternidad, con sus 17 plantas. Ahora, cuarenta años más tarde, se han terminado de construir los edificios del conjunto Cuatro Torres Business Area (CTBA) y con sólo apreciar la figura 1 se puede comprender la mencionada relatividad.

Hay otro concepto muy importante en las construcciones altas: la esbeltez. Aunque la altura es importante, la citada esbeltez es quizá el aspecto fundamental como parámetro



Fig. 1. Torre Cristal y Edificio de Maternidad del Centro Sanitario La Paz, Madrid [1]



Fig. 2. Empire State Building y Torre Caja Madrid [2]

ingenieril. Esta relación entre la altura sobre rasante y el ancho estructural en su base condiciona muchos aspectos relacionados con los efectos de las acciones horizontales (viento y sismo), sobre el dimensionamiento de la estructura y, sobre todo, y derivados de estas, sobre los condicionantes para el proyecto arquitectónico y las funciones y programas que éste debe desarrollar. En la figura 2 puede apreciarse la clara diferencia en altura y esbeltez entre dos edificios muy conocidos. El Empire State Building (Nueva York), con una altura de 381 m tiene una esbeltez de 6, mientras la Torre Caja Madrid, con una altura de 250 m tiene una esbeltez de 10.

Otros ejemplos históricos pueden ser buena muestra de este fenómeno y quizá uno que recoge ambos aspectos en un solo edificio es Santa María del Fiore, en Florencia, con una cúpula claramente más alta y un campanile que muestra una evidente mayor esbeltez (Figura 3).

En el otro extremo de la medición de la altura de un edificio, es decir, hasta dónde llegamos con un edificio, debemos ser conscientes de las alturas reales habituales y de las tendencias. Hay que distinguir entre los récords y lo que los estadísticos llamarían media o, mejor aún, moda. En la figura 4 se observan los datos de las alturas de los diez edificios más altos del mundo. Viendo este gráfico podemos pensar que alturas normales de un edificio alto son los 500 m. Sin embargo, si observamos la figura 5, donde se recogen los datos de los 200 edificios más altos del mundo, podemos comprobar que aquel valor está muy lejos de la realidad. Aunque se han construido, y se están construyendo, edificios por encima de los 800 m (incluso en torno a los 1.000 m), parece como si hubiera una asíntota en los 250 m. Y esa es la realidad: los edificios altos suelen estar entre los 200 y los 300 m, llegándose incluso a una clasificación que establece el Council Tall Building and Urban Habitat (CTBUH) en la



Fig. 3. Santa María del Fiore,
Florencia [1]

que recoge los que denomina '*super tall building*' (por encima de los 300 m).

Origen

Dentro de la cultura occidental y, más concretamente, en el ámbito religioso del cristianismo tenemos en mente el origen de los edificios altos en la Torre de Babel, siendo esta una construcción que para unos es historia y para otros leyenda.

Lo que sí tenemos claro que es historia son las pirámides, con los 146 m de la de Keops; las catedrales góticas, con los 164 m de la aguja de Ulm o la Torre Eiffel, con sus 330 m. Pero es en las últimas décadas del siglo XIX y en las ciudades de Chicago y de Nueva York, cuando y donde comienza la historia contemporánea de los edificios altos.

Y lo que motiva, por una parte, y permite, por otra, el desarrollo de estos edificios son, fundamentalmente, tres circunstancias:

- El desarrollo de unas corporaciones empresariales que desean concentrar sus oficinas y dar una imagen determinada, muy parecida, en el fondo, a la del faraón que quería mostrar su poder, la Iglesia que quería transmitir su grandeza y llegando a las empresas que han de mostrar la supremacía en el ámbito económico.

- El invento del ascensor eléctrico y los métodos de seguridad que le acompañaban, y no del ascensor (en general), como se dice en ocasiones, ya que no se debe olvidar que en el año 80 a. C. el Coliseo de Roma disponía de 12 ascensores (de tracción animal) y que los monjes de Meteora, en el siglo XIV, ascendían hasta sus monasterios situados a más de 100 m de altura con unos sistemas de cestas y poleas.

- El auge de la calderería durante la Guerra Civil de Estados Unidos y el desarrollo posterior, que permitieron las estructuras metálicas. Los primeros edificios altos, como tantas otras construcciones a lo largo de la Historia, comenzaron con la extrapolación de los métodos conocidos, pero era evidente que el seguido en Chicago en 1889, en el Monadnock Building, con muros de fábrica que arrancaban con un espesor de 2,40 m, no era el camino óptimo.

A partir de estos comienzos, y con la pugna de imagen creada entre las dos ciudades norteamericanas citadas, el siglo XX ha conocido el periodo Funcional, el Ecléctico (o Historicista), el Tercer periodo (o Estilo Internacional) y finalizando con el Cuarto periodo, con su Postmodernismo, el *High-tech*, el Deconstructivismo y otros ismos [4].

Y lo que comenzó en América del Norte se ha extendido al resto del Mundo, pasando ligeramente por Europa y llegando a Oriente Medio y Extremo Oriente. Tal y como

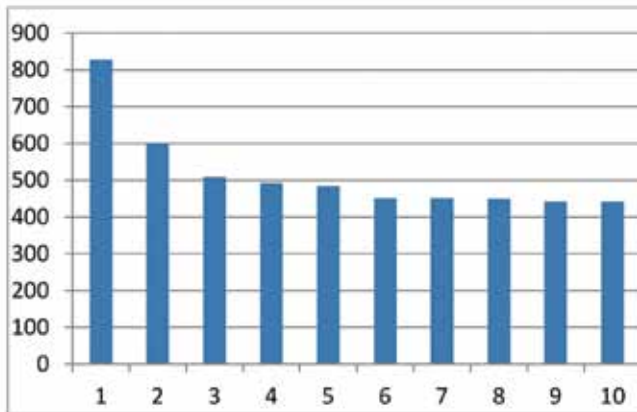


Fig. 4. Altura de los 10 edificios más altos del Mundo [3]

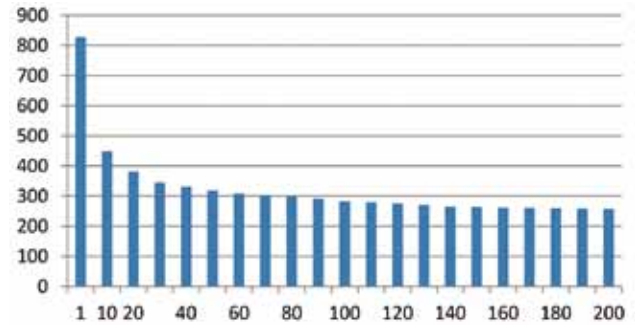


Fig. 5. Altura de los 200 edificios más altos del Mundo [3]

se puede apreciar en la figura 6, de los edificios con una altura superior a 200 m finalizados en 2013, el 74 % han sido construidos en Asia, el 16 % en el Medio Oriente, el 5 % en Europa, el 3 % en Centroamérica y sólo el 1 % en Norteamérica. Este giro radical se debe, en parte, al desarrollo de ciudades en Asia, especialmente en China y, en parte, al valor icónico que un edificio alto supone para una institución, ya sea pública o privada. En la figura 7 se puede apreciar la evolución histórica de la situación geográfica de los 100 edificios más altos del mundo entre 1930 y 2013, confirmándose esta misma tendencia.

Proyecto

El desarrollo del proyecto de un edificio supone el de un programa planteado por las necesidades del promotor. Este proyecto exige la coordinación de un elevado número de especialistas en diversos campos. Si se pretende que sea un buen proyecto, dicha coordinación es un aspecto muy importante; si se trata de un edificio alto, la coordinación es fundamental. Una escasa coordinación garantiza el fracaso del proyecto, en su sentido más amplio. La arquitectura, la estructura y las instalaciones deben ser desarrolladas de forma conjunta y coordinada. La ubicación de plantas técnicas de instalaciones, los anillos de rigidez estructurales, los núcleos de comunicaciones verticales y de rigidización estructural han de proyectarse en función de y condicionando a la arquitectura que el objetivo final del edificio persigue.

El uso de los edificios altos también ha evolucionado a lo largo de su historia. En la figura 7 se puede apreciar cómo, entre los 100 edificios más altos del mundo en 1930, 87 estaban destinados a oficinas, mientras en 2013 son 43, 17

a uso residencial, 8 hoteles y, lo más destacable, 32 con uso mixto. Y para subrayar esta tendencia, en la figura 6 se observa que entre los edificios de más de 200 m cuya construcción ha finalizado en 2013, sólo el 34 % tiene uso exclusivo de oficinas, 30 % residencial, 5 % hoteles y 30 % de uso mixto (con dos o tres de los anteriores usos).

Otro punto muy importante en el proyecto de estos edificios es su forma, tanto por las implicaciones estéticas como técnicas y económicas que ello supone. En la figura 8 se puede apreciar la notable diferencia existente entre siluetas más redondeadas (edificio Lipstick) u otras con aristas más destacadas (sede de la CCTV China). El estudio en túnel aerodinámico permite optimizar los cálculos a efectuar, pero las acciones del viento sobre ambos crea unas importantes diferencias, tanto en el proyecto de los núcleos de rigidización interior, como en el dimensionamiento de los elementos que componen las fachadas, normalmente diseñadas con la tipología de muros cortina.

Los materiales estructurales empleados en el proyecto y construcción de estos edificios también han sufrido una notable evolución. De la exclusividad del acero se ha pasado al empleo del hormigón, sobre todo desde que se han desarrollado hormigones de alta resistencia (HAR), con resistencias a compresión en el entorno de los 80 a 100 MPa. En la figura 7 se puede observar cómo se ha pasado, en los 100 edificios más altos del mundo, de 96 con estructura de acero en 1930 a 14 en 2013, siendo ahora 46 de hormigón, 36 compuesto y cuatro de estructura mixta. En la figura 6 se observan los materiales estructurales empleados en los edificios de más de 200

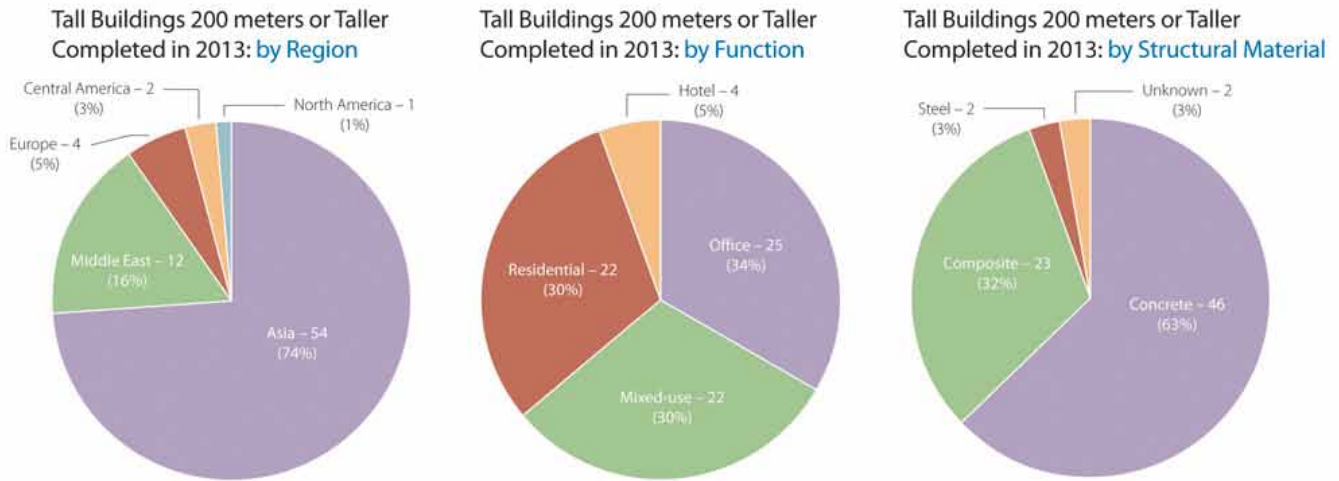


Fig. 6. Datos estadísticos tomados de CTBUH [5]

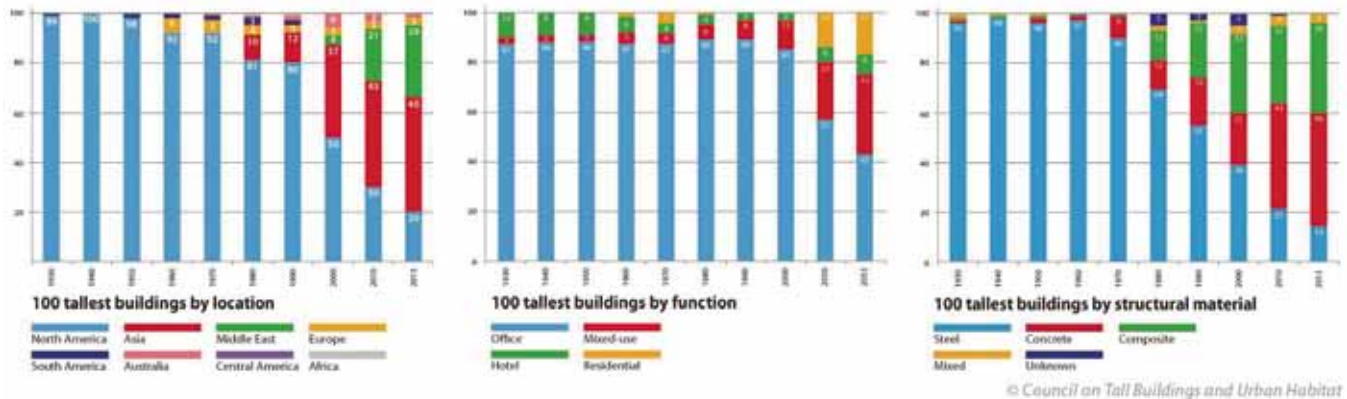


Fig. 7. Datos estadísticos tomados de CTBUH [6]

m finalizados en 2013, destacando que prácticamente dos tercios (63 %) son de hormigón, un 32 % compuesto y sólo un 3 % exclusivamente de acero. Las ventajas aportadas por el hormigón en la rigidez de la estructura y protección frente al fuego están siendo determinantes.

Finalmente, debe tenerse muy presente el avance en el desarrollo de los transportes verticales. Los ascensores, su mejora en velocidad y confort y su optimización en el flujo de personas es un elemento fundamental en la operatividad de estos edificios. Un buen estudio, proyecto y funcionamiento de estos elementos permite una buena operatividad del edificio. Sin ella su uso puede generar importantes desajustes.

Construcción

La construcción de edificios altos presenta algunas singularidades respecto a otras tipologías, normalmente relacionadas con la cimentación, la ejecución de los núcleos de hormigón, el bombeo de este y la elevación de los distintos elementos con medios auxiliares específicos.

La cimentación directa se resuelve mediante losas de un espesor superior a los 4 m, lo que obliga a programar un procedimiento de puesta en obra del hormigón que minimice los efectos derivados del alto calor de hidratación generado, haciéndolo en damero, en dos o más capas horizontales y enfriando previamente sus componentes, entre otras medidas.



Fig. 8. Edificio Lipstick (143 m, Nueva York) y edificio de la CCTV China (243 m, Beijing) [6]

La cimentación profunda, normalmente mediante pilotes in situ, tiene mayores similitudes con otras de este tipo, contando los encepados con unas características similares a las comentadas sobre las losas de cimentación.

Los núcleos de hormigón se ejecutan, con frecuencia, mediante técnicas de encofrado trepante, autotrepa, guiados o deslizantes [7], en función de la geometría de los mismos y del plazo de tiempo disponible para la construcción. El proyecto de este tipo de encofrados supone, por sí mismo, una auténtica obra de ingeniería, como puede apreciarse en la figura 9.

La puesta en obra del hormigón en estas construcciones trae consigo el empleo de bombas que permiten su elevación hasta alturas superiores a los 600 m. Esta se realiza mediante un sólo bombeo o con varios realizados de forma sucesiva entre distintos niveles de la estructura ya ejecutada.

Los medios auxiliares más significativos en estos edificios son los que permiten el movimiento vertical de personas y materiales, es decir, las grúas (autoportantes, arriostradas o trepadoras) y los montacargas. En la figura 10 se aprecia el efecto que, tanto grúas arriostradas como los citados montacargas, provocan en las fachadas constituidas por muros cortina. El empleo de elementos prefabricados en la construcción estará ligado y condicionará de manera importante el dimensionamiento de estos medios de elevación.

Futuro

En los próximos años y, muy posiblemente, en las próximas décadas, el concepto de sostenibilidad se convertirá, cada vez más, en un parámetro fundamental en el desarrollo de las ciudades. Con una clara tendencia a la concentración de la población en entornos urbanos, y con la necesidad de optimizar el consumo energético y preservar el medio ambiente, la edificación en altura tendrá un evidente protagonismo.



Fig. 10. Grúa y montacargas en Torre Cristal, Madrid



Fig. 9. Encófrados autotrepantes en Edificio Caja Madrid

Por otra parte, el valor de representación de los edificios altos, así como su singularidad, tendrán una continuidad en el tiempo, como se ha demostrado a lo largo de la Historia de una forma común a muy diversas culturas.

Si se analizan las previsiones actuales y hasta el año 2020 [5], los que entonces serán los veinte edificios más altos del mundo confirman las tendencias indicadas en párrafos anteriores, considerando también que de ellos sólo dos están actualmente construidos, ocho en construcción y diez en fase de proyecto; todos ellos superando los 530 m. De estos veinte edificios, catorce se encontrarán en el Extremo Oriente, cinco en Oriente Medio y uno en Norteamérica. De los doce actualmente construidos, en construcción y alguno de los que se encuentran en fase de proyecto, uno tendrá estructura de hormigón uno de acero, ocho compuesta de acero y hormigón y dos mixta. Esto confirma la tendencia a igualarse el uso de los dos materiales estructurales principales, el hormigón y el acero.



Fig. 11. Torre de Babel (P. Brughel) y Kingdom Tower, Jeddah (SA) [8]

Finalmente, por lo que se refiere al uso, cinco tendrán como destino albergar oficinas, uno será únicamente residencial y 14 mixtos (oficina/residencial/hotel), combinando dos o tres de ellos.

En la figura 11 se recoge una infografía del que en 2019 está previsto que sea el edificio más alto del mundo (con más de 1.000 m), junto a nuestro origen en estas construcciones, la ya citada Torre de Babel. El afán permanente de superación es lo que ha llevado al hombre a pasar de esta a aquel y el dominio de la técnica es lo que permitirá alcanzar nuevos objetivos. **ROP**

Notas

[1] Revista Hormigón y Acero, nº 249, 2008

[2] Empire State Building y Torre Caja Madrid, Catedral de Florencia, Wikipedia, www.wikipedia.com

[3] Emporis, www.emporis.com

[4] ACHE, Monografía M20-21 "Proyecto de edificios altos", 2013

[5] Council of Tall Building and Urban Habitat, www.ctbuh.org

[6] Wikiarquitectura, www.wikiarquitectura.com

[7] ACHE y Colegio Oficial de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, "Construcción de edificios altos", 2008

[8] www.kingdomtowerskyscraper.com

Visión crítica y reflexiones acerca del estado actual de los edificios altos



Julio Martínez Calzón

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Presidente de MC2 Estudio de Ingeniería



Carlos Castañón Jiménez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director de proyectos de MC2 Estudio de Ingeniería

Resumen

En esta sociedad cada vez más tecnificada y en permanente desarrollo, los edificios altos se presentan como la solución más favorable frente a las nuevas demandas y retos que este desarrollo plantea.

Es necesario en este panorama establecer un criterio de evaluación de los edificios altos, no basado en la mera altura sino en su coherencia, cualidad o adecuación, términos que comprende la eficiencia holística del edificio alto. Ligado a dicha eficiencia entra en juego el concepto de dominio, entendido como la capacidad genérica resolutoria en todas las disciplinas intervinientes en el diseño, construcción y gestión de los edificios altos.

Se considera que el dominio actual de la técnica permite realizar diseños de alta eficiencia holística –dotados de coherencia, cualidad y adecuación máximas– en el ámbito de la Edificación en Altura, por debajo de los 300 m. Por encima de estas alturas –y en muchos casos, por debajo– la eficiencia va disminuyendo.

A pesar de ello, la Edificación de Gran Altura y la Edificación de Altura Excepcional, habitualmente promovidas por el deseo de imagen de una entidad más que por una necesidad directa de la sociedad, tienen una dimensión positiva al servir como puntas de lanza o impulsores de la técnica.

Esta coyuntura, por tanto, requiere una reflexión nueva, que empieza por la introspección sobre la responsabilidad en el campo arquitectónico-estructural y debe desembocar en una revisión esencial de las ideas profundas de la forma y la estructura, que conduzca hacia un retorno de la excelencia.

Palabras clave

Edificios altos, dominio, eficiencia holística, HAR, deformabilidad vertical diferida

Abstract

In this society, ever so technological and under permanent development, tall buildings offer the most favorable solution against the new demands and challenges that this development gives rise to.

Under these circumstances it is necessary to establish a criterion for the evaluation of tall buildings, not based on mere height but on coherence, quality and adequateness, terms which embrace the holistic efficiency of a tall building. Coupled with this efficiency comes into play the concept of proficiency, defined as the generic accomplishing capacity in all the disciplines involved in the design, construction and management of tall buildings.

It is considered that the current proficiency of knowledge allows designs of great holistic efficiency –endowed with maximum coherence, quality and adequateness– in the range of tall buildings under 300 m. Above these heights –and in many cases, below– efficiency drops.

Despite this, supertall and megatall buildings, which are usually promoted by a desire of projecting an image by an individual rather than by a direct need of Society, have a positive outcome as they serve as driving forces of knowledge.

This position consequently requires a new reflection, which must start from an introspection into the responsibility in the architectural/structural fields, and reach an essential review of the profound ideas of form and structure, leading to a return of excellence.

Keywords

Tall buildings, proficiency, holistic efficiency, HSC, differential column shortening

1. Introducción

En el estado actual del desarrollo tecnológico mundial, el ámbito de los edificios altos ofrece una situación extremadamente interesante a poco que se desee analizar en profundidad el tema. Interés que se deriva de muchos y muy diferentes aspectos y circunstancias, entre los cuales los estrictamente tecnológicos relativos a la ingeniería estructural, aun cuando intensos en muchas facetas, no son posiblemente los dominantes, salvo cuando nos vamos situando en las alturas límite que en cada tiempo se van alcanzando.

Dichos aspectos y circunstancias, que más adelante se detallarán, han estado presentes en su mayoría desde el comienzo de esta rama edificatoria, allá por el final del siglo XIX, aunque hoy en día se han incrementado en número y extremado en sus exigencias, respondiendo a las necesidades que la creciente altura de estos edificios requiere, así como a nuevas demandas que la sociedad reclama. Y aunque las investigaciones, estudios y publicaciones acerca de tales temas son verdaderamente ingentes, los cambios de situación global que la humanidad va experimentando y que vemos cada día con mayor nitidez, debido al alcance y rapidez de la información actual, determinan que en cada uno de tales cambios se precise una reflexión nueva, que trate de situar el proceso de cualquier actividad en su también nueva y verdadera situación.

Para ello, y con la intención de centrar en lo posible este tipo de reflexión en el ámbito de los edificios altos, al hilo de las circunstancias actuales de crisis económicas y sociales, se considera importante establecer un tratamiento metodológico apropiado para tratar de situar los problemas en una línea de análisis que pueda ofrecer resultados en un espacio tan limitado como el que nos reclaman.

Así, para conseguir tales fines pero sin la pretensión de clasificar rígidamente los edificios altos, sino para ir acoplando los aspectos fundamentales del tema, se definen tres rangos o categorías de alturas que, aun perteneciendo en realidad a un continuo, sin fronteras reales definidas, permiten señalar diferencias importantes en las zonas centrales del ámbito adoptado para cada uno de ellos, para irse diluyendo y entrelazando tales diferencias en las zonas de frontera entre rangos:

1. Edificación de Altura (EA)
2. Edificación de Gran Altura (EGA)
3. Edificación de Altura Excepcional (EAE)

Estos rangos de altura, obligadamente arbitrarios pero suficientemente representativos, coinciden con los generalmente aceptados y más extendidos en la bibliografía actual [1]: ‘*tall building*’ correspondería con nuestra definición de EA, ‘*supertall building*’ con EGA, y ‘*megatall building*’ con la EAE. Naturalmente, hay autores que establecen otros rangos y clasificaciones.

En relación a los aspectos y circunstancias que gobiernan en gran medida el ámbito de la Edificación de Altura, también es metodológicamente apropiado exponer aquellos planteamientos que se consideran plenamente vigentes a la hora de abordar el estudio del ámbito que nos ocupa:

1. Planteamientos energéticos. Relativos estrictamente al coste y requerimientos de la energía necesaria para la construcción y durante el funcionamiento del edificio.
2. Planteamientos medioambientales. Relativos a la interacción con el medio desde la perspectiva de los intercambios energéticos y materiales: sostenibilidad, ecología, residuos, servicios, suministros, interacción ambiental (visual, soleamiento, corrientes de aire...), sistemas inteligentes, aislamiento térmico y acústico; y certificaciones energéticas (LEED...).
3. Planteamientos sociales. Referentes a todo lo que la sociedad demanda respecto a la vida en comunidad: espacios comunes, calidad de vida, tiempos de acceso, externos e internos, costes, sinergias, transformaciones futuras, conservación, estética, urbanismo exterior, garantías de acción, valoración del suelo, temporalidad (vida útil, inspecciones técnicas, revisiones...), mantenimiento particular y global (gestión del edificio), seguridad interna y externa, ocio (instalaciones recreativas, áreas de expansión, recurso...) y planificación urbana.
4. Seguridad global. Relativa a las incidencias accidentales que pueden presentarse, cada vez más vinculadas a la propia sociedad: incendio, impactos, inundaciones, sanidad, sabotajes, terrorismo, robos, control de acceso y vigilancia, evacuación y refugio en casos de urgencia (singulares, colectivos, específicos, simulacros...).
5. Instalaciones. Tanto convencionales como emergentes: MEP (mecánicas, electricidad y conducciones), ascensores, sanitarias, sistemas inteligentes, domótica, helipuerto, LED, miniaturización de sistemas y redes.



Turning torso, Malmo
(2005, 190 m)



Absolute towers, Mississauga
(2012, 175,55m)



CCTV Headquarters, Beijing (2012, 234 m)

6. Materiales no estructurales. En relación al mantenimiento, la seguridad y el confort: fachadas, aislamientos, separaciones, revestimientos, reposición y conservación; e inteligencia global (soleamiento, sistemas automáticos...).

7. Accesibilidad. En referencia a la facilidad y versatilidad: viario público, viario privado, control, garantía y contingencias, conservación y adaptación; y mudanzas.

8. Economía. Relativa a los aspectos de la funcionalidad: fiscalidad, duración, recursos, financiación, devaluación, seguros y transferencia (compraventa, mantenimiento de la calidad inicial, deterioro...).

Y, por supuesto, todo lo referente a los aspectos interrelacionales de la estructura con el medio general: terreno, arquitectura (funcionalidad, estética, versatilidad), tecnología local, normativas, materiales, conservación, control, análisis (resistencia, deformabilidad, accidentalidad), redundancia, confort, demolición y durabilidad.

Por el contrario, aspectos que no se consideran activos para este estudio de actualización por su ya suficiente información publicada: historia, cultura, política y sociología.

Y en mínima consideración, las ideas que, habiendo surgido como propuestas de una situación desahogada, no tienen sentido en el momento actual, debiendo postergarse hasta que, bien por el avance de la tecnología, la reducción de los costes energéticos o materiales, o circunstancias obligadas futuras, vuelvan a tener posible vigencia en la relación coste/uso o coste/prestaciones: edificios giratorios, plantas giratorias y autogeneración energética mediante centrales autónomas especiales (eólicas, solares...).

2. Planteamiento técnico-humanístico-social

Se considera, sin el menor género de duda, que los edificios altos para una sociedad cada vez más tecnificada, con espectaculares avances en todas las ramas de la actividad: comunicación, transporte, seguridad, análisis, acción, efectividad y eficacia, etc., son la solución más favorable a todos los problemas que este modo de vivencia presenta y a los que presentará en un futuro próximo, así como frente a la valoración y optimización de todos los diversos aspectos antes relacionados.

Otra cosa es determinar cuál es el valor que resulte más conveniente en cada momento de la altura de los mismos, en

relación a la optimización o máxima eficacia en la totalidad del conjunto de variables que se han relacionado.

A estos efectos, resulta posible establecer un criterio de evaluación de los edificios altos que no se refiere, sin embargo, a su altura –aunque veremos que este nuevo criterio está también, en cierta medida, relacionado con la misma– sino a su coherencia, cualidad o adecuación, intensas e integrales, relativas a los numerosos aspectos y circunstancias antes enunciados. Esta nueva calificación, estrechamente vinculada al cumplimiento más o menos preciso de estas tres categorías de referencia, representará la eficiencia de un edificio en su visión holística: estructural, funcional, económica, social, estética, etc.

Ligado a los términos anteriores se establece un concepto específico: el dominio, entendido como capacidad genérica para resolver cualquier aspecto referente a todos los campos afectados. Es decir, se posee el dominio de una tecnología cuando se pueden conocer, precisar, valorar y resolver perfectamente todos los problemas que puedan ser planteados en dicho ámbito tecnológico, y se tiene la capacidad de precisar los márgenes de error que pueden darse. [2]

Así, podemos decir que en el estado actual del conocimiento, el dominio de la técnica estructural y del resto de disciplinas involucradas es tan profundo y completo que permite realizar edificios altos dotados de coherencia, cualidad y adecuación máximas, obteniéndose la mejor adaptación a las demandas y sentir de la sociedad en todos los sentidos y aspectos que proceda.

Este grado de máxima eficiencia holística se estima que ha sido alcanzado en la EA, es decir en edificios con alturas inferiores a un orden máximo de unos 300 m, como ha quedado señalado. Con el tiempo, al irse pautando y garantizando dicho dominio, puede irse dando un incremento de la altura límite señalada, aunque se considera que lo será lentamente; con un horizonte quizás en torno a los 400 m hacia finales del siglo XXI.

En este rango de alturas puede decirse que la técnica actual posee un pleno dominio y que, por tal motivo, en ocasiones resultaría posible llegar a desembocar en condiciones que podrían denominarse como ‘sobredominio’: situación inapropiada, causada por el hecho de que al disponer de herramientas y medios capaces de analizar,

resolver y construir diseños muy complicados, se corre el riesgo de emplearlos de forma directa e inmediata, sin una reflexión particular apropiada sobre cualquier tipo de propuesta arquitectónica, por muy descabellada que sea, sin contextualizar debidamente los problemas, resolviéndolos conceptual y éticamente de forma genérica, llegándose así a construir edificios poco coherentes, de baja cualidad e inadecuados.

En la Edificación de Gran Altura, EGA, comprendida a efectos de este artículo a partir de los 300 m y sin superar los 600 m –y quizás algo menos–, la eficiencia holística suele ser más moderada o incluso reducida, al ser su empleo menos coherente, en general, con las demandas del entorno.

En este ámbito puede decirse que, en la mayor parte de los aspectos generales planteados, la eficiencia se mantiene relativamente alta, pero se advierte que en otros, no pocos numerosos, dicho valor de la eficiencia puede ser reducido o incluso bajo. Porque, aun cuando existe ya actualmente un ‘dominio’ intenso sobre gran parte de los factores puestos en juego, en otros dicha eficiencia puede ser bastante reducida o poco controlable, respondiendo por ello la realización de estos edificios a programas de caracteres más privados y especulativos –en el sentido de posibilidad dudosa– o que demanden unos fines de índole relacionados con lo prestigioso, lo exhibicionista, etc. Algo, en suma, que conecta más con los aspectos relativos al sentir de la sociedad que a los planeamientos de la actividad de la gestión requerida por la misma.

No obstante, se estima que en este rango de EGA, las condiciones de seguridad y respuesta a los diferentes aspectos de la problemática técnica están bien resueltos: estructurales, funcionales propios, confort... Pero que en otros, como se ha dicho, lo son en mucha menor medida: accesos, evacuación, seguridad, etc.

Asimismo, se considera que la altura límite superior, establecida en 600 m, puede ser muy estable en relación con todo cuanto aquí se está intentado evaluar en ese futuro limitado por el final del presente siglo.

Finalmente, la Edificación de Altura Excepcional, EAE –los edificios situados en el ámbito de las alturas superiores a los 600 m– entendemos que están fuera de cualquier tipo de referencias relativas a optimización de recursos públicos y al logro eficiente de otros muchos parámetros. Estos edificios



**Izda.: John Hancock Center,
Chicago (1969, 343,69 m)**

**Dcha.: Bank of China tower,
Hong Kong (1990, 367,40 m)**

se plantean en su totalidad como actitudes de carácter privado, o estatal con ingresos afortunados, y sus fines corresponden a decisiones de carácter singular y profundamente dudosas: poder, exhibición, *marketing*, etc., siendo el reflejo inconfundible de una expresión de superioridad que ciertos sistemas, colectivos o entidades requieren para sentirse satisfechos existencialmente.

No obstante, existe una dimensión bastante positiva en la realización de tales edificios, que es la de ser impulsores o puntas de lanza de la técnica en su intento de dominar la naturaleza. Dominio que ejercido con ‘autoridad’ crítica y severa, representa el más suntuoso diálogo que puede darse entre el hombre y la naturaleza y en el cual –en profundidad– la especie se refleja en todo su valor y es fuente de impulso de la gran aventura del ser humano en el pequeño reducto del cosmos en el que ha surgido.

De esta manera, al igual que la invención del ascensor propició la aparición del rascacielos, este mismo elemento ha sido uno de los factores limitantes de la EAE hasta fechas muy recientes, por las grandes alturas a recorrer, con las implicaciones en el material de los cables, la aceleración máxima, tiempos de espera, tiempos de recorrido, etc. En la actualidad, impulsados por esta motivación de llegar a lo

más alto, se han desarrollado nuevas tecnologías de cables, maquinarias y sistemas de control que permiten unas velocidades de cabina realmente vertiginosas. El ascensor más rápido del mundo se está instalando en la Shanghai Tower (632 m), y es capaz de recorrer la totalidad de su altura en tan sólo un minuto [3], quizás menos tiempo del que empleamos en un ascensor típico de un edificio de oficinas de altura convencional.

El ascensor sintetiza, en cierta manera, el dicho de que “la función crea la forma”, pero señala también cómo, cuando la forma evoluciona, puede requerir modificar su función, y cómo esta nueva necesidad crea de nuevo el desarrollo y la innovación imaginativa que, a su vez, vuelve a posibilitar nuevas funciones... Sin embargo, tal necesidad puede ser: un requerimiento activo del conjunto de la sociedad; o puede no ser otra cosa que el signo distintivo de un poderoso tratando de superar una barrera y sobrepasar a los demás. En ambos casos, aun cuando éticamente bien diferenciados, no cabe duda de que dicha necesidad da lugar a impulsar el desarrollo y progreso en el dominio de lo ignoto.

La idea de la EAE o megaedificios como equivalentes a grandes ciudades en vertical, que ha ido seduciendo a los

desarrollo sostenible



Más que agua

Talento, conocimiento y compromiso.
Aportamos respuestas adecuadas
para una gestión más eficiente.
Compartimos conocimiento
y generamos innovación.
Trabajamos por un futuro basado
en el compromiso y la cooperación.

www.aqualogy.net



 **AQUALOGY**
Where water lives

SOLUCIONES INTEGRADAS
DEL AGUA PARA UN
DESARROLLO SOSTENIBLE



Empire State Building, Nueva York
(1931, 381 m)



Willis-Sears-Tower, Chicago
(1974, 442,14 m)



Taipei 101, Taipei
(2004, 508 m)

arquitectos en todo momento: Mendelshon, Casto Fernández Shaw, Foster..., y reflejada de forma muy precisa y variada en la ciencia-ficción de calidad, es favorable y motivadora. Refleja de alguna manera un ideal de transformación del ser racional originario en su camino de diálogo con el cosmos hacia otro ser inmerso en el nuevo entorno de la tecnociencia. Todo ello en un sentido filosófico aún dudoso en cuanto al verdadero significado del ser, pero que no debe en modo alguno desdeñarse, porque implica decisivos aspectos existenciales aún por recorrer.

3. Consideraciones estructurales

El proceso estructural de la EA se ha alterado profundamente en los últimos tiempos. Y lo ha hecho de la mano de tres aspectos que consideramos prioritarios:

1) Las aportaciones incorporadas a los materiales básicos de la ejecución: hormigón y acero estructural y, muy en especial, los hormigones de alta resistencia (HAR) han modificado espectacularmente los conceptos tipológicos y de ejecución, hacia territorios que en los tiempos clásicos precedentes –pongamos hasta finales del pasado siglo XX– no habían sido explorados.



Burj Khalifa, Dubái
(2010, 828 m)



Kingdom Tower, Jeddah
(en construcción, >1000m)

2) La maquinaria requerida para potenciar la incorporación del HAR: centrales de bombeo y encofrados de última generación, junto con las adiciones oportunas que la química ha ido ofreciendo, han permitido al hormigón resolver sin reducciones de cualidad de los edificios –como podrían haber sido: tamaños gigantes de los soportes, largos tiempos de construcción, etc.– la construcción de una, en parte nueva, tipología auspiciada por este material, poniendo de manifiesto su total validez.

3) La prefabricación, asimismo, introduce una nueva dimensión industrializada que ha hecho ya posible la realización de estructuras de edificios altos en unos tiempos de absoluta brevedad, señalando con claridad el potencial que esta metodología, en parte abandonada durante un tiempo, ofrece al desarrollo y a la eficiencia de los recursos. Como ejemplo extremo puede citarse el Sky City en Changsha, China, que propone superar en 10 m al edificio más alto del mundo (Burj Khalifa en Dubái, 828 m) con elementos prefabricados y un tiempo de construcción de tan sólo 4 meses [4]. Pero no hay que recurrir a ejemplos tan desmedidos y cuestionables; la torre B2 en Brooklyn, Nueva York (109 m), ha sido prefabricada en módulos que comprenden no sólo la



Shanghai Tower, Shanghai (en construcción, 632 m)

estructura, sino la fachada y gran parte de las instalaciones, permitiendo una reducción en el plazo de construcción de un tercio del convencional [5].

En paralelo con estos aspectos fundamentales, los sistemas analíticos han permitido determinar con total rigurosidad el control de la fenomenología estructural: resistente, deformacional, diferida, durabilidad, sostenibilidad, etc., significando ello un ahorro de materiales y ejecución notables y determinantes, que han dado, indirectamente, lugar a la introducción del capricho de las formas libres, hasta casi el payasismo; el exhibicionismo y todo cuanto de peyorativo se quiera resaltar. Esas formas libres se han transformado casi en repertorio y la opinión pública en un principio las ha aplaudido. Hoy causan cierta vergüenza y nos llevan a oponernos arduosamente contra ellas.

Porque en el momento actual, verdaderamente, la responsabilidad en ese campo estructural-arquitectónico, en consecuencia con las crisis reflejadas en el mundo: economías en receso, cruentas guerras locales, subdesarrollo de países, etc., nos debe llevar éticamente a indagar en ideas profundas de la forma y la estructura. Sería un poco lo equivalente a lo que Fazlur Khan en los 60 y más tarde LeMessurier, Robertson y otros ingenieros trataron de llevar a cabo con arquitectos concienzudos: esencializar los problemas y resolverlos en excelencia.

No cabe duda de que en este nuevo territorio y con las herramientas que poseemos resulta obligado buscar el ‘tesoro escondido’ que, una vez más, se encuentra en comprender el espíritu del nuevo siglo; y que podría venir representado por una alta severidad y profundidad de conceptos que nos lleve a alcanzar un nuevo clasicismo, en el sentido de canonicidad y excelencia. Una acción que realmente, y por contraposición a lo reciente, dignifique este ámbito de la técnica ingenieril y de la arquitectura.

Y para alcanzar este fin, creemos que profundizar en ese ámbito de la coherencia y la adecuación aunadas, de manera de lograr una eficiencia holística máxima en la creación de edificios altos, es el camino a seguir en el ámbito de la EA.

Por el contrario, en los ámbitos de alturas superiores, EGA y EAE, esa línea de actuación que se basa en las técnicas involucradas en estos sistemas no será suficiente y deberá ir de la mano con la arquitectura y la funcionalidad global, para conseguir una eficiencia holística comparable a la de los EA más pequeños.

A nuestro entender, independientemente de los aspectos tecnológicos generales que tratan de favorecer el estudio y el conocimiento profundos del comportamiento estructural frente a los fenómenos ‘horizontales’ de viento y sismo, con sus complejas respuestas dinámicas, aeroelásticas, de fractura de materiales, etc., y en los cuales los recursos de sistemas amortiguadores cada vez más inteligentes e interactivos van a tener un papel relevante, el punto más importante en los EAE, cuya línea futura de diseño está cada vez más vinculada a los hormigones y aceros de altas y muy altas prestaciones, por criterios básicamente económicos, de rigidez y redundancia frente a las acciones accidentales máximas, radica en la incidencia de la deformabilidad vertical diferida del hormigón, así como en los ciclos de soleamiento y cambios térmicos, en las estructuras que se sitúen parcialmente al exterior del edificio¹.

En relación a la deformabilidad diferencial vertical por fenómenos diferidos del hormigón, la exigencia de tensiones permanentes muy homogéneas en todos los elementos estructurales portantes resulta esencial, a medida que las dimensiones en altura sean transcendentales; porque el recurso de múltiples sistemas ‘cinturón’, capaces de regularizar u homogeneizar tales procesos deformativos, implican –debido a los grandes esfuerzos puestos en juego, y al retraso constructivo que su singularidad incorpora– notables sobrecostes e incremento de los tiempos de ejecución².



Sky City, Changsha (propuesta, ¿iniciada construcción?, 838 m)

Por el contrario, el recurso de homogeneizar la relación $E_c A_c / G$ (deformabilidad longitudinal/carga vertical permanente) en todos los elementos portantes verticales revierte hacia problemas y condiciones de diseño arquitectónico-estructurales del mayor interés.

Así pues, el estudio de soluciones base en esta línea de acción está abierto –junto con todo el resto de consideraciones estructurales– aunque en cierta manera este proceso pueda ser, en general, como un reto amateur o como resolver un sudoku, ya que la posibilidad de llegar a diseñar una de estas piezas EAE es tan reducida que solamente a título honorífico cabe introducirse en sus planteamientos, debiendo ser los integrantes de los grandes equipos involucrados en estas construcciones quienes han de ir avanzando de manera realista.

4. Consecuencias y limitaciones del dominio de la técnica

Centrándonos en la estructura resistente, no parece haber limitaciones de importancia en el diseño y análisis, como lo hubo en épocas anteriores, sino que las principales incidencias estructurales actuales resultan, en general, constructivas.

Como hemos comentado antes, se ha alcanzado la etapa de dominio del conocimiento del fenómeno estructural, tanto en comprensión, como en computación. Se sigue y se seguirá profundizando en el conocimiento, naturalmente, pero hasta que no llegue un nuevo paradigma que revolucione a la ciencia, los avances seguramente consistirán en sucesivas sofisticaciones y optimizaciones, permitiendo un desarrollo más rápido y preciso de los diseños estructurales.

En la actualidad, los límites respecto a la estructura estarían por tanto en las tecnologías de construcción, pero, como siempre ha demostrado la humanidad en el pasado, todos los retos tecnológicos que responden a cuestiones de imaginación y no de mera fantasía, acaban por resolverse mientras haya suficiente interés (económico) tras ellos. Este interés puede ser tanto una demanda de la sociedad para suplir una necesidad, como el deseo de imagen de una entidad (un país, un alcalde, un jeque...). Así, podemos esperar que en el próximo futuro continuarán construyéndose edificios realmente excepcionales porque la condición humana hará que se vaya produciendo el adecuado impulso para ello.

Por estas causas y otras más ocultas, el citado dominio de la técnica ha posibilitado el proyecto y construcción de diseños hasta hace poco impensables, propiciando una verdadera explosión de formas [6]. Estos edificios ‘no usuales’ han existido siempre, pero eran escasos y estaban reservadas a un grupo exclusivo de arquitectos, requiriendo a su vez el aporte de soluciones innovadoras en el resto de las disciplinas que intervienen en el diseño de un edificio de gran altura (estructura, instalaciones, fachadas...).

En la actualidad, en parte debido al sobredominio señalado, y en parte debido a que los poderosos lo impulsan (¿o porque tal vez la sociedad los reclama?), estamos viviendo un período de derroche de formas, en el que comienza a haber un exceso de edificios ‘landmark’ o ‘singulares’, con soluciones en ocasiones brillantes, pero no siempre óptimas, frecuentemente inadecuadas y, las más de las veces, innecesarias.

Estos diseños se encuentran, por el momento, fundamentalmente restringidos al ámbito de la EA y serían difícilmente justificables o factibles en la EGA y, menos aún, en la EAE.

En esta línea, el CTBUH³ definió el año pasado el concepto de ‘altura de vanidad’ (*‘vanity height’*), como la altura desde la última planta ocupable hasta su tope arquitectónico y representaría la altura añadida al edificio con el simple objeto de añadirle altura al mismo [7]. En realidad, no sólo estos elementos de remate de un edificio, que pueden alcanzar centenares de metros, sino todo el conjunto del mismo podría venir señalado por lo que podríamos titular como ‘índice de vanidad’ en la mayor parte de los diseños ‘abiertos’ o ‘libres’. Consiguientemente, el enfoque no debería limitarse exclusivamente a la altura del edificio, pues en una gran parte de las ocasiones son otros aspectos los que añaden dificultad al edificio (grandes vuelos, inclinaciones, giros...). Así, hay decenas de ejemplos de edificios altos con alturas moderadas y, sin embargo, con un derroche de vanidad; estos edificios con alto índice de vanidad tendrían, según nuestro criterio, una eficiencia holística generalmente bastante baja.

5. Conclusión

En términos generales, el intento básico de la propuesta de este artículo tiene como pretexto exponer una línea de educación crítica en relación a la Edificación de Altura.



Ping An Finance Center, Shenzhen (en construcción, 660 m)



Trump International Hotel & Tower, Chicago (2009, 423,22 m)

Por una parte, exaltar el uso de los EA como manera activa para la sociedad en conjunto del próximo futuro, de reducir costes y energía, así como mejorar las sinergias de todo tipo que la sociedad tecnológica, cada vez más compleja, requiere.

Y, por otra, erradicar o al menos desvalorizar esos conceptos ‘ego’ que el desarrollo y el potencial económico de las sociedades cultiva, tratando de armonizar los aspectos de la severidad, lo canónico, la justa medida, como medidas éticas para el diseño de estos edificios y para potenciar una estética de máxima calidad.

Con esta disposición sí consideramos posible grandes avances y mejores resultados, al integrarse plenamente en el camino impulsor de los hechos sociales.

El tiempo de la actuación de excelencia ha vuelto y sería muy importante que lo antes posible nos concienciásemos de ello. El ámbito de los edificios altos –al igual que el de otras grandes construcciones que la sociedad demanda– exige hoy una toma de conciencia y una generación de estudios y análisis profundos de todo el conjunto de valores que se funden en esta tipología: desde los más científico-técnicos a los más estético-humanísticos, para lograr obras de valor incuestionable. **ROP**

Notas

(1) Es fácil comprender, por tanto, que así como en los sistemas EA este tipo de diseño puede resultar favorable para hacer frente a las acciones horizontales, al aprovechar al máximo el brazo interno resistente del material estructural, en el caso de los EAE, las variaciones térmicas resultan determinadamente negativas y deben ser erradicadas. Incluso en la construcción, el proceso de cierre debe ser efectuado lo más inmediatamente posible tras la ejecución de la estructura, para evitar complejos estados deformativos durante las fases del montaje superior.

(2) Además de que tales cinturones dan lugar a procesos de cuelgue de zonas parciales y sobreesfuerzos de palanca, que incrementan aún más el coste de estos elementos respecto a los ideales de su función reguladora frente a las acciones horizontales.

(3) Council on Tall Buildings and Urban Habitat (Consejo de Edificios Altos y Hábitat Urbano) es una organización internacional sin ánimo de lucro con sede en el Instituto de Tecnología de Illinois, Chicago, fundada en 1969 y referente mundial en los edificios altos, sobre los que basa su actividad.

Referencias

- [1] Council for Tall Buildings and Urban Habitat CTBUH “Criteria for the Defining and Measuring of Tall Buildings”, 2013 <http://www.ctbuh.org/TallBuildings/HeightStatistics/Criteria/tabid/446/language/en-US/Default.aspx>
- [2] MARTÍNEZ CALZÓN, Julio. “Treatment of the Form in Structural Engineering”. Proceedings of the first International Conference on Structures and Architecture, ICSA 2010, Guimarães, Portugal. CRC Press, 2010
- [3] NAKAZAWA, Ikuo. “Mitsubishi Elevator Equipment in Shanghai Tower”. Asia Ascending: Age of the Sustainable Skyscraper City: a Collection of state-of-the-art, multi-disciplinary papers on tall buildings and sustainable cities. Proceedings of the CTBUH 2012 9th World Congress, Shanghai, China. CTBUH, Wood, A., Johnson, T. & Li, G. Q., 2012, p. 607-612. ISBN 978-0-939493-33-3
- [4] BRADSHER, Keith. “Across China, buildings brush the heavens”. The New York Times, 3/9/2013, p. 3
- [5] SAFARIK, Daniel. “Modular on the Rise”. CTBUH Journal. Tall buildings: design, construction and operation. 2013, Issue III, p.56-57
- [6] CASTAÑÓN JIMÉNEZ, Carlos et al. “Arquitectura-estructura actual: prisioneros de las formas libres”. Jornadas internacionales de investigación en construcción: Hitos estructurales de la arquitectura y la ingeniería. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, CSIC. 2011, ISBN 84-7292-401-7 (libro), ISBN 84-7293-408-4 (CD)
- [7] “Vanity Height: the empty space in today’s tallest” CTBUH Journal. Tall buildings: design, construction and operation. 2013, Issue III, p. 44-45

Setas y rascacielos

Una experiencia entre la arquitectura y la ingeniería



Enrique Álvarez-Sala Walther

Arquitecto por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid ETSAM 1977.

Director del estudio de arquitectura Rubio&Álvarez-Sala

Director del Máster en Técnicas Avanzadas de la Edificación de la Universidad Europea

Resumen

Los rascacielos son una tipología joven que tiene sus raíces en experiencias históricas. Aparecen allí donde el avance tecnológico lo permite. El rascacielos es el desenlace de un sistema constructivo con una lógica interna de extraordinario interés; es el 'Fórmula 1' de la edificación. En un rascacielos la técnica es siempre un factor determinante de la forma, la simbiosis entre ingeniería y arquitectura es obligada. A partir de cierta altura, la física se encarga de la seriedad de los planteamientos. Lo mejor que puede pasar en un proyecto es que todos piensen que su participación ha sido la decisiva.

Palabras clave

Arquitectura e ingeniería, proyecto y construcción, solución global, técnica en rascacielos, explosión de ideas

Abstract

Skyscrapers are a relatively modern type of building that have their roots in historic experience. These tall buildings appear where technological advances make them possible. The skyscraper is the result of a construction system with a extremely fascinating internal logic, it is the esprit of building. In a skyscraper, technique is always a determining factor of form, an obligatory symbiosis between engineering and architecture. Over certain heights, physics takes over from formal design and the very best that can occur in any such design is that all those involved consider their participation to have been decisive..

Keywords

Architecture and engineering, design and construction, global solution, skyscraper technique, explosion of ideas

Se suele pensar que las palabras hongo y seta son sinónimos, se tiende a creer que son una misma cosa. Un error, muy extendido, pero un error. Todos los aficionados a la micología, que son muchos, se llevarían las manos a la cabeza si confundiéramos un término con otro. Normalmente, lo que vemos en el campo son las setas (el fruto del hongo) ya que el hongo en sí está bajo tierra (el micelio). Es como si comparamos un árbol y sus frutos.



Fig. 1. Sección de las setas y su micelio.

El micelio está aletargado bajo tierra, cuando las condiciones son favorables eclosionan las setas

Pero cuando estas condiciones cambian, o cuando falla alguna, el hongo se aletarga y espera a mejores épocas. Lluvias y calor en la época adecuada hacen presagiar un año favorable, pero basta una helada inesperada y a destiempo para abortar todo el proceso, para desesperación de los seteros.

Sí, ya lo sé, es una obviedad para cualquier aficionado al campo, pero creo que muchos de nosotros somos poco campesinos. Yo tengo que reconocer que soy muy de asfalto, no me

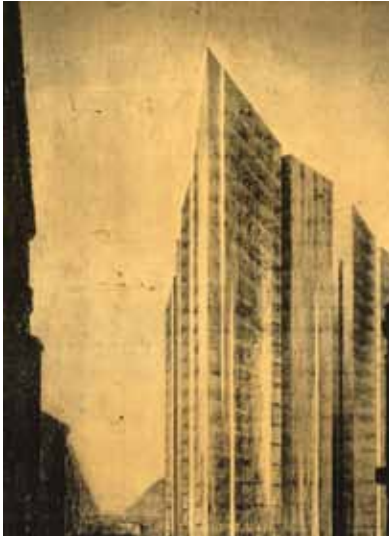


Fig. 2. Concurso de rascacielos en Berlín, Mies van der Rohe. 1929

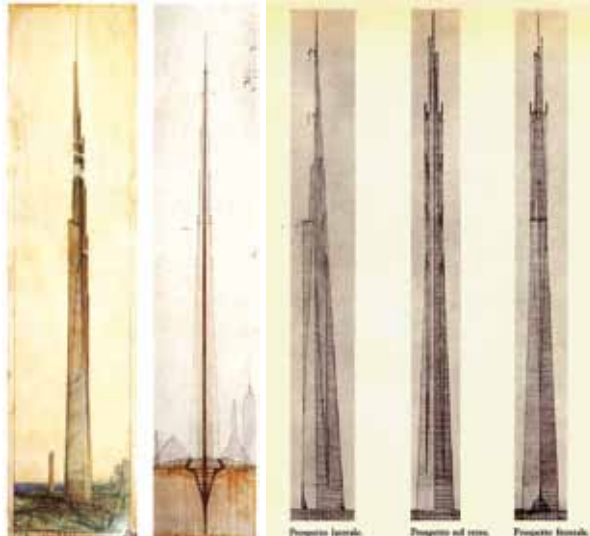


Fig. 3. Edificio de la milla, Frank Lloyd Wright. 1956

Algunos edificios han avanzado ideas imposibles de construir cuando se propusieron como el edificio todo vidrio de Mies o los 1.609 metros del edificio de Wright, precedente directo del Burj Khalifa, de Dubái, de 821 metros de altura

avergüenzo de ello. Pero eso no quita para que tenga claro que la naturaleza es una referencia inmejorable.

Ya sé, debo opinar sobre la edificación en altura, no sobre la naturaleza, pero es que hay comparaciones que resultan irresistibles. Hablar de condiciones favorables para las setas, hablar de letargos, hablar de setas venenosas o de setas alucinógenas pensando en edificios altos es casi irresistible.

Se tiende a pensar que la edificación en altura es una tipología nueva, una tipología muy joven. Otro error. Lo que ocurre es que hasta que las condiciones no fueron favorables, hasta que la técnica no evolucionó, la construcción en altura no tuvo su oportunidad (tuvo que inventarse el ascensor, entre otras cosas, para que fuera posible pensar en utilizar plantas altas para vivir).

Pero cuando existió una situación técnica y económica propicia la tipología surgió con una vitalidad extraordinaria.

Pero eso no debe ocultar los constantes intentos de construir alto, la construcción en altura ha sido siempre una aspiración del hombre, una irresistible tentación. Hay muchas razones para ello, ha sido siempre expresión de poder, exhibición de destreza, de capacidad técnica, de sociedad avanzada, y una inmejorable operación de marketing. Las torres de iglesias, de ayuntamientos, de mezquitas, las torres defensivas..., todas ellas son magníficos ejemplos. Algunas veces sorprendentes por su audacia. Seguro que no son tan altas como muchos

ejemplos de torres actuales, pero en muchos casos son edificios más esbeltos, y es más difícil la esbeltez que la altura.

Algunas torres resueltas con materiales tradicionales alcanzan esbelteces que los rascacielos actuales no han sido capaces de lograr.

¿Hay edificios que superen la esbeltez de la torre medieval de Bolonia? Pues había cientos, ¡y de ladrillo!

Sin duda, la primera referencia la encontramos en la Torre de Babel (posiblemente un zigurat que los arqueólogos sitúan entre los siglos XXIII y XXI a. de J.C.). Parece que un lamentable fallo en el protocolo de comunicaciones arruinó este primer intento.

Por cierto, ¿cómo es posible que el cuadro de Brueghel demuestre un conocimiento constructivo tan preciso? ¿De dónde sacó esa imagen de la Torre de Babel? ¿Existe algún dibujo previo, alguna descripción... algo? ¿Por qué redonda? No puede ser casual tanto acierto.

Pero los intentos y las experimentaciones han sido muchísimas. La idea de edificar en altura ha estado siempre presente, ha sido un 'afán' humano irresistible. Tiene, además, un factor práctico incuestionable, construir mucho, ocupar poco. A pesar de sus complejidades, los rascacielos son edificios económicos que permiten situar en una superficie de suelo muy pequeña una cantidad de enorme de superficie útil. Es decir, precisan poco



Fig. 4. Torre medieval de Bolonia

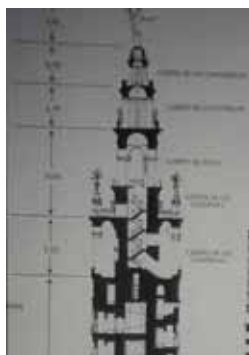


Fig. 5. Sección de la torre de la Giralda de Sevilla

La torre Asinelli de 97.6 metros es una de las de más de 100 torres que existieron en Bolonia entre el s. XII y s. XIII la giralda con sus 98,5 m de altura (104,1 m incluido el Giraldillo) fue durante siglos la torre más alta de España

suelo, liberan mucho suelo a su alrededor y, en ese sentido, son ecológicos.

Sí, ya sé que es una cuestión muy discutible y que no es el momento de entrar en esa discusión, nos desviaríamos demasiado y no podemos permitirnoslo. Pero al menos, cabe apuntar que nada más contaminante que esas infinitas extensiones de viviendas unifamiliares pareadas, donde apenas puede crecer un árbol, que rodean nuestras ciudades y que, sin embargo, no parece que produzcan un rechazo social tan virulento como producen a veces los edificios altos.

¿Qué diferencia a los edificios altos de las extensas colmenas que todos tenemos en la cabeza? Tal vez la distancia desde la que se perciben. Los edificios altos tienen una presencia constante, los bajos por extensos que sean, no se sienten si uno está inmerso en ellos, es como el mal olor, al cabo de un rato no se aprecia. ¡Pero hemos dicho que no entraríamos en esa discusión!

Hemos visto que edificar en altura ha sido un deseo irresistible, sin embargo los rascacielos, tal y como hoy los entendemos, son una tipología joven, hasta que la técnica no evolucionó lo suficiente, la construcción en altura no tuvo su verdadera oportunidad. Pero eso sí, cuando la construcción en altura fue posible, la tipología surgió con una vitalidad extraordinaria.

Una encrucijada histórica. La tipología de los rascacielos surge con una vitalidad extraordinaria. Una nueva forma de vivir y



Fig. 6. La Torre de Babel. Cuadro de Pieter Brueghel, el viejo. Sorprendente rigor constructivo, ¿existió alguna descripción o imagen previa?

un nuevo modelo social. Una técnica nueva y una arriesgada forma de construir.

Hay una encrucijada histórica: Chicago, finales del siglo XIX, un terrible incendio ha destruido gran parte de la ciudad, es urgente la reconstrucción, la presión demográfica es enorme, los habitantes son un pueblo joven, sin prejuicios. La técnica ha evolucionado mucho, se construye con acero, existe la electricidad; un extraño invento se abre paso por derecho propio, el ascensor. La transferencia de tecnologías entre distintas disciplinas se hace a una velocidad vertiginosa. La oportunidad es única y la necesidad se transforma en virtud. Como en una reacción química, en la que, de la combinación de elementos, surge un elemento nuevo que es más que la simple acumulación de los anteriores, acaba de aparecer una nueva tipología. Una tipología que permite construir edificios representativos, funcionales, que aprovecha de forma óptima el terreno, que representa un nuevo modelo social y una nueva forma de trabajar y de vivir.

La nueva tipología es imbatible y se extiende de forma casi inmediata. Sólo ella es capaz de competir consigo misma, y los edificios luchan por ser el más alto, por ser el más sorprendente. Esto es su talón de Aquiles, el mundo de los récords, su magnetismo mediático, su componente de expresión de poder, su capacidad de sorprender y de fascinar. No tardarán en verse sus efectos nocivos. Pero que existan setas venenosas no significa que otras no sean un manjar.



Fig. 7. Chicago s. XIX



Fig. 8. Edificio Monadnoc 1891-1893 Burnham&Root, Holabird&Roche

Una encrucijada histórica. La tipología de los rascacielos surge con una vitalidad extraordinaria. Una nueva forma de vivir y un nuevo modelo social. Una técnica nueva y una arriesgada forma de construir

El rascacielos es el desenlace de un sistema constructivo y una tipología en sí misma con una lógica interna de extraordinario interés. De alguna manera, los rascacielos son los ‘Fórmula 1’ de la edificación y eso convierte a esta tipología en la expresión de la tecnología punta disponible en un lugar y en un momento histórico.

La racionalidad, la frescura de los planteamientos y la incorporación desde el inicio de todas las disciplinas, sin protagonismos son el origen de esta tipología. Pero todas sus virtudes pueden ser ‘adelantadas por la izquierda’ buscando una hipotética fuerza icónica. Hay disparates que pueden fascinar, sin duda, al menos un tiempo, qué duda cabe, hay setas alucinógenas pero su ingestión no es buena para la salud.

Ingeniería civil y arquitectura han mantenido durante tiempo una pugna absurda, aunque hay que decir que los arquitectos han valorado extraordinariamente a todas las grandes figuras de la ingeniería que han demostrado un perfil creativo.

Los rascacielos tienen una gran virtud, el protagonismo no es exclusivo de nadie, la tipología en sí tiene tanta potencia que sólo participar es ya un éxito (como en las Olimpiadas). Su misma esencia desplaza las extravagancias (¿o debo decir debería desplazar las extravagancias?). Desde alturas en que es posible, poco a poco el precio a pagar será mayor, hasta que su coste sea totalmente inviable. A partir de cierta altura, la física

se encarga de la seriedad de los planteamientos, hasta esta altura será responsabilidad exclusiva de sus autores. La altura en los edificios es como el *handicap* en el golf, iguala las fuerzas de los participantes. Las distintas disciplinas que inciden en su concepción y en su construcción pesan de forma similar en el resultado final. Lo mejor que puede pasar en un proyecto es que todos piensen que su participación ha sido la decisiva. Pero hablo de personas y debería hablar de disciplinas. Sería mejor decir que lo mejor que le puede pasar a un proyecto es que la tensión entre las distintas disciplinas esté en equilibrio, desde el origen de un proyecto, en su fase germinal.

Los proyectos que llevan en su código genético todas las cuestiones fundamentales son, sin duda, los mejores proyectos, los que dan como resultado los mejores edificios. Un código genético adecuado garantiza que el resultado sea un ser humano, no sé si será hombre o mujer, pero sí que no será un gorila.

Son muchos los ejemplos de edificios que tienen ese arranque. Todos ellos se han transformado en símbolos de una forma de pensar, en símbolos de una forma de diseñar. Son edificios que han resistido el paso del tiempo, que incluso han mejorado con él, porque las buenas ideas no envejecen (que se lo pregunten a Platón).

¿Es la estructura la única responsable de la forma del edificio Hancock?



Fig. 9. Fórmula 1



Fig. 10. F-22 Raptor



Fig. 11. Alinghi

La forma debe seguir a la técnica y a la razón (la belleza útil). Los rascacielos son el Fórmula 1 de la construcción, la expresión de la tecnología punta de un lugar y un momento histórico

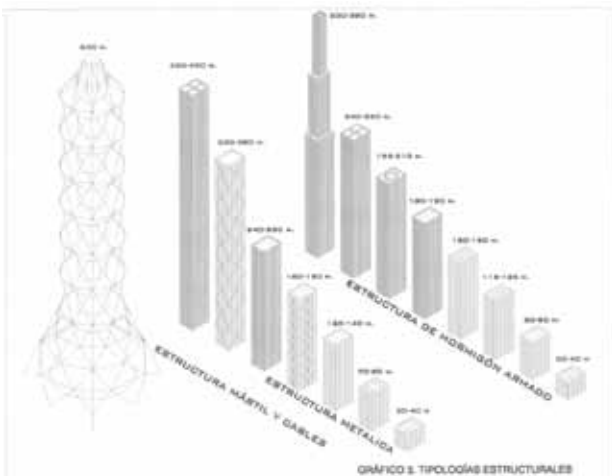


Fig. 12. Gráficos de esquemas estructurales de edificios en altura

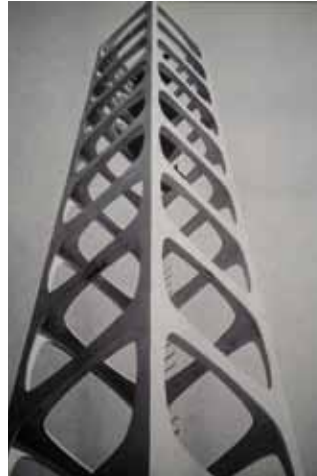


Fig. 13. Torre de Frei Otto

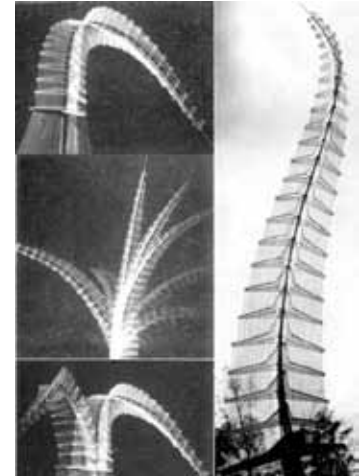


Fig. 14. Deformaciones de la columna Frei Otto

Las edificaciones en altura tienen su propia lógica interna y la forma es la consecuencia domesticada de sus razones, el equilibrio de las disciplinas que intervienen



Fig. 15. Esqueleto de un gorila y esqueleto humano.

El código genético de un proyecto asegura su adecuado desarrollo, garantizando una evolución correcta

En demasiados casos vemos ejemplos de edificios en que parece que la forma es su única razón de ser, no se entiende, el conocimiento simultáneo de la técnica y de la forma debería ser también el campo específico de la arquitectura, no sólo de la ingeniería.

En muchos casos la simbiosis entre ingeniería y arquitectura es obligada, incluso muy fácil si se quiere. En otros casos no es posible, y a veces ni siquiera necesaria. En estos otros casos en que la simbiosis no es imprescindible siempre es posible recurrir a 'procedimientos abreviados', pero la edificación en altura es de esos casos en que la simbiosis sí es obligada y es que en un rascacielos la técnica es siempre un factor determinante de la forma.

Pero volvamos a las setas.

En Madrid ha habido uno de esos momentos favorables en que las edificaciones en altura tienen su oportunidad. La situación económica, la capacidad técnica, la necesidad han coincidido en el tiempo y su aparición era posible. Las cuatro torres aprovecharon esta oportunidad. En Estados Unidos, donde las ciudades son relativamente nuevas, el centro económico y financiero suele coincidir con el centro urbano, Chicago y Nueva York son claro ejemplos de ello.

Como tantas veces en Europa, en Madrid los edificios altos han aparecido próximos al centro de la ciudad, pero no en

el centro histórico. Aunque en muchos aspectos la cultura europea sea extremadamente permisiva (los presidentes franceses abanderan esa tolerancia). En lo que se refiere a la arquitectura en el centro de sus ciudades, la cultura europea es muy conservadora. De alguna manera, situar los edificios altos en las periferias de las ciudades es más asumible en una cultura de gran tradición arquitectónica (aunque es cierto que el centro de las ciudades europeas estaba ocupado frecuentemente por la catedral cuyas altas agujas dibujaban su perfil urbano). Es fácil de entender; en Europa el casco histórico es más antiguo y los nuevos centros de actividad suelen ser tangenciales, pero eso sí, cercanos al centro histórico. Pensemos, por ejemplo, en Canary Wharf, en el nuevo centro de negocios de Moscú o en la Défense de París. En todos estos nuevos centros, los rascacielos proliferan (una vez que se levanta la veda todo son disparos) y es que los rascacielos tienen clara vocación gregaria. Es poco frecuente un rascacielos solitario. Un ejemplo temprano de rascacielos aislado fue la torre Montparnasse, que generó un rechazo popular muy fuerte, probablemente por levantarse en el centro histórico. Sólo últimamente aparecen edificios en centros históricos europeos, como ha sido el caso de la nueva torre de Sevilla, o de los nuevos edificios altos de Londres, edificios carísimos, de gran imagen, proyectados por equipos de primer nivel y que, sin embargo, no han podido eludir la polémica. La discusión está servida y es una discusión acalorada. Hasta el príncipe Carlos interviene.



Fig. 16. Hangar San Francisco 1956 Myron Goldsmith

Proyectos en que la forma responde con sinceridad a su función, es difícil saber si es la estructura o la decisión inicial las responsables del proyecto



Fig. 17. Torre de Myron Goldsmith Efectos de la escala 1953



Fig. 18. Edificio Hancock Chicago S.O.M Bruce Graham/Fazlur Khan 1969



Fig. 19. Blur pavillon Diller y Escofidio Expo 2002 Suiza



Fig. 21. Aeropuerto de Stansted Norman Foster 1991

Conseguir que el edificio desaparezca en una nube de niebla exige una tecnología muy sofisticada. En el aeropuerto de Stansted las sombrillas son estructura, espacio, instalaciones, luz...

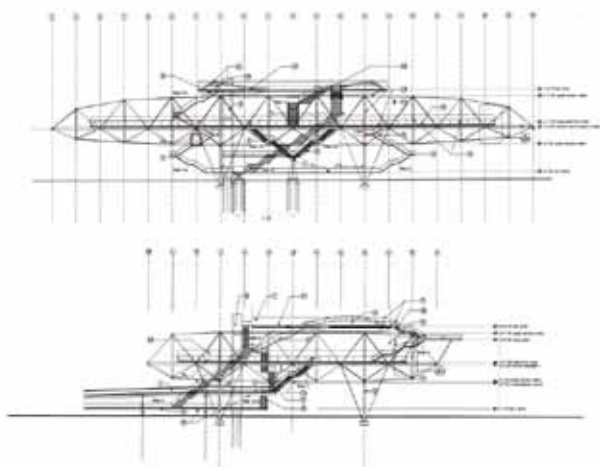


Fig. 20. Seccion del pabellón

Situarse fuera del centro histórico tiene esa gran ventaja, (y así ha sido en Madrid) se evita la polémica. No se altera el perfil de la ciudad ya asimilada por todos, pero no se renuncia a crear nuevo perfil de la ciudad.

Es cierto que ningún sitio es bueno para que una torre se destaque en la meseta castellana. Probablemente, en cualquier ciudad americana estas torres hubieran pasado totalmente desapercibidas. Pero lo cierto es que en Madrid su nueva imagen se asocia con las cuatro torres, han salido en los telediarios, en las telenovelas, en los anuncios comerciales, figura en las pegatinas de los taxis, y sin embargo la cornisa oeste de Madrid sigue intacta. Tal vez en buena parte por ello las torres han sido aceptadas con mucha naturalidad por sus habitantes. Y también han sido identificadas como un signo de progreso. Los edificios altos se entienden como expresión de modernidad y

de poder económico y su aparición ha sido motivo de orgullo para muchos madrileños. Un Madrid más cosmopolita parecía posible. Estaban previstos otros muchos edificios altos en la operación Chamartín (en lo que se ha llamado la prolongación de la Castellana), pero una helada a destiempo ha hecho que la eclosión no se produzca. La crisis está siendo larga, pero puede que las condiciones vuelvan a ser propicias.

En todo caso, la situación favorable tuvo sus frutos, las cuatro torres dan fe de ello. En la torre Sacyr-Vallehermoso, actualmente ocupada por el hotel Eurostars y por las oficinas de la empresa Pricewaterhouse, tuvimos la oportunidad de coexistir sin encontronazos técnicos de muy distinta formación. La experiencia fue ejemplar en ese sentido, no sólo las ingenierías y el estudio de arquitectura se fundieron para desarrollar el proyecto, también la empresa constructora tuvo un papel protagonista. Frecuentemente, se olvida la importancia que tiene la planificación de la construcción y se entiende que la constructora de un edificio tiene un simple papel ejecutor y, por tanto, secundario. No dudo que a veces no sea así, pero desde luego no es ni deseable ni inevitable. En nuestro caso, la participación de la constructora Sacyr, tal vez por pertenecer al mismo grupo empresarial que la promotora Vallehermoso (Sacyr-Vallehermoso), fue decisiva en muchos aspectos. En la Torre Sacyr, desde su origen, mejoras en la solución estructural motivaron cambios en la arquitectura, que seguro mejoró por ello, y necesidades del programa (o soluciones constructivas) motivaron ajustes en la estructura y en las instalaciones que, por ello, fueron más ajustadas.



Fig. 22. Manhattan skyline



Fig. 23. Chicago, vista aérea



Fig. 24. La Défense París

Las ciudades europeas, más antiguas que las americanas sitúan sus nuevos centros de actividad en la periferia de sus centros históricos en tanto que los downtown americanos son el centro de la actividad financiera y alojan los edificios más altos

La adaptación entre todos los intervinientes en edificios de estas características es constante, y la presión de una disciplina, ya sea la construcción, la estructura, las instalaciones, la protección contra incendios, la economía o cualquier otra debe motivar la readaptación de las demás, haciendo que el resultado mejore.

Pensamos que son especialmente interesantes los proyectos en que es difícil decir si fue antes la estructura, la arquitectura o las instalaciones. La historia está llena de realizaciones ejemplares en este sentido. Los mejores proyectos son aquellos en que las soluciones son globales y donde cada solución resuelve simultáneamente distintos problemas.



Fig. 25. Cornisa de Madrid

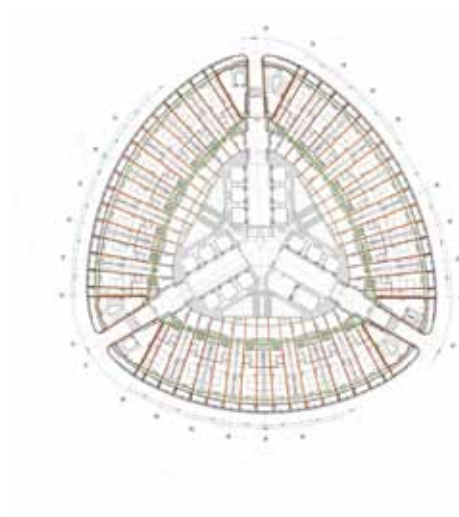
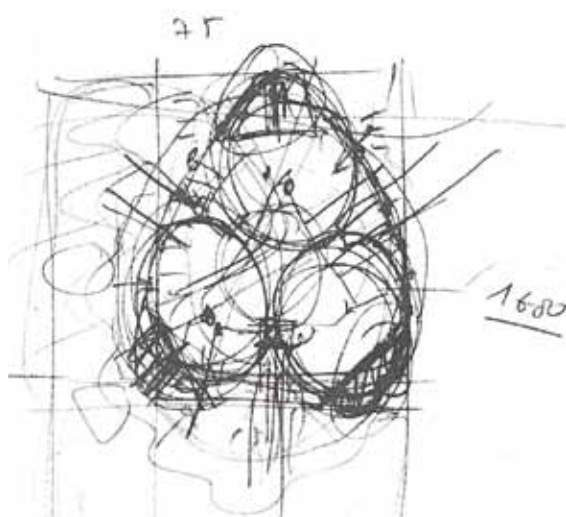


Fig. 26. Torre Sacyr-Vallehermoso esquema inicial y planta final

Madrid tuvo su oportunidad y la aprovechó, al menos en parte. Ahora parece que el caldo de cultivo favorable está en otras ciudades, en otros países, en otros continentes.

El dato puede resultar increíble, pero dos tercios de los rascacielos del mundo se localizan en el 'Lejano y Próximo Oriente'. El *know-how* todavía en algunos casos es occidental pero ¿por cuánto tiempo?

El micelio ha crecido bajo tierra sin que nos diéramos cuenta y las setas aparecen donde las condiciones son más favorables, como siempre. **ROP**

El perfil de la ciudad de Madrid se ha modificado sin alterar su cornisa histórica al oeste. La fuerza de la imagen es el conjunto por encima del aspecto individual. La evolución de los esquemas iniciales progresó al asimilar los esquemas estructurales desde el origen del proyecto y se produjeron los necesarios ajustes con naturalidad



ESIC, LÍDERES EN EMPRESA Y MARKETING

- ▶ MÁS DE 49 AÑOS DE EXPERIENCIA.
- ▶ EL 94% DE LOS TITULADOS SE ENCUENTRA TRABAJANDO.
- ▶ MÁS DE 38.000 ANTIGUOS ALUMNOS A NIVEL NACIONAL E INTERNACIONAL NOS AVALAN.
- ▶ MÁS DE 8.000 CONVENIOS CON EMPRESAS.

Máster en Dirección de Proyectos Internacionales

MDPI

Planteado como la suma de dos Programas Superiores, orientados a la **mejora de la capacitación profesional de los ingenieros:**

Advanced Program in English for International Management.

Diseñado para adquirir los conocimientos y la fluidez necesaria para desempeñar en inglés las competencias empresariales y directivas de los profesionales en negociaciones comerciales, presentaciones, conversaciones a través de todos los canales, gestión de correos, viajes al extranjero, etc.

(Duración: 2 meses aproximadamente, 125h)



Programa Superior en Comercio Internacional.

Una visión integral de la empresa de hoy, que compite en un contexto internacional, y que responde a los cada vez mayores niveles de exigencia que los directivos y empresarios encuentran en su día a día.

(Duración: 8 meses aproximadamente, 285h)



Fechas de inicio de convocatorias y más información en:

Colegio de ingenieros de Caminos Canales y Puertos

Servicio de Formación: servicio.formacion@ciccp.es

www.ciccp.es

WWW.ESIC.EDU



BUSINESS&MARKETINGSCHOOL

Impulsamos tus desafíos.

Prestaciones energéticas de los edificios de oficinas y evolución previsible de sus requerimientos en el Horizonte 2020: análisis específico de los edificios altos



Luis Irastorza Ruigómez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Madrid y licenciado en Ciencias Empresariales por la Universidad Pontificia de Comillas



Jordi Pascual

Licenciado en Ciencias Físicas, DEA en ingeniería y coordinador de equipos técnicos en Aguasol

Resumen

Las políticas energética y climática de la Unión Europea tienen como uno de sus objetivos reducir al máximo la dependencia energética del exterior y descarbonizar la economía. Estas políticas tienen una gran influencia sobre el sector de la edificación donde la Directiva 2010/31/UE de eficiencia energética en la edificación exige que todos los edificios de nueva planta sean de consumo casi nulo de energía a partir de 2021, obligación que se adelanta a 2019 para todos los edificios de titularidad pública. El análisis que aquí se presenta –centrado en edificios de oficinas por su mucha mayor intensidad energética con respecto a los edificios residenciales– forma parte de un estudio que pretende explorar las características técnicas y la viabilidad económica de dichos edificios de consumo casi nulo de energía.

Palabras clave

Prestaciones energéticas, optimización energética, energía, edificación, oficinas, monitorización, simulación, infiltración, calibración

Abstract

One of the main objectives of EU climate and energy policy is to reduce energy dependency and “decarbonise” the economy. These policies have a considerable influence on the building sector, and where Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings establishes that all new buildings in the EU shall have to consume ‘nearly zero-energy’ as from 2021 and that all public authority owned or rented buildings apply these measures as from 2019. The analysis presented in this paper -focusing on the case of office buildings due to their far greater energy demands with respect to residential buildings- forms part of a study that attempts to examine the technical characteristics and economic feasibility of these “nearly zero-energy” buildings.

Keywords

Energy performance, energy efficiency, energy, buildings, offices, monitoring, simulation, infiltration, calibration

El sector de la construcción, motor de la economía española a lo largo de más de 50 años, está sufriendo una transformación estructural profunda. Además de estar sometido a una cura de adelgazamiento sin precedentes, se está produciendo asimismo un cambio de paradigma de gran alcance. En concreto, la edificación va a pasar de ser un sector donde el peso fundamental le corresponde a las viviendas nuevas a otro en el que la rehabilitación del parque edificado va a representar una parte relevante, sin duda, mayor del 50 % de la inversión en el mismo.

En este artículo analizamos la previsible evolución de los edificios de oficinas, tanto de nueva planta como existentes,

que están sometidos a una profunda transformación como consecuencia del mayor requerimiento de prestaciones energéticas que se viene produciendo en los últimos años y que previsiblemente va a continuar en el futuro.

1. Contexto energético y regulatorio de la edificación

Del consumo de energía final y de las emisiones de gases de efecto invernadero en nuestro país, a la edificación le corresponden el 28 % y el 22 % respectivamente, correspondiendo el resto al transporte, a la industria y, en menor medida, al sector primario. Además, queda claro que el sector de la edificación junto con el del transporte son los que tienen un mayor potencial de reducción de ambos al estar las decisiones muy atomizadas,

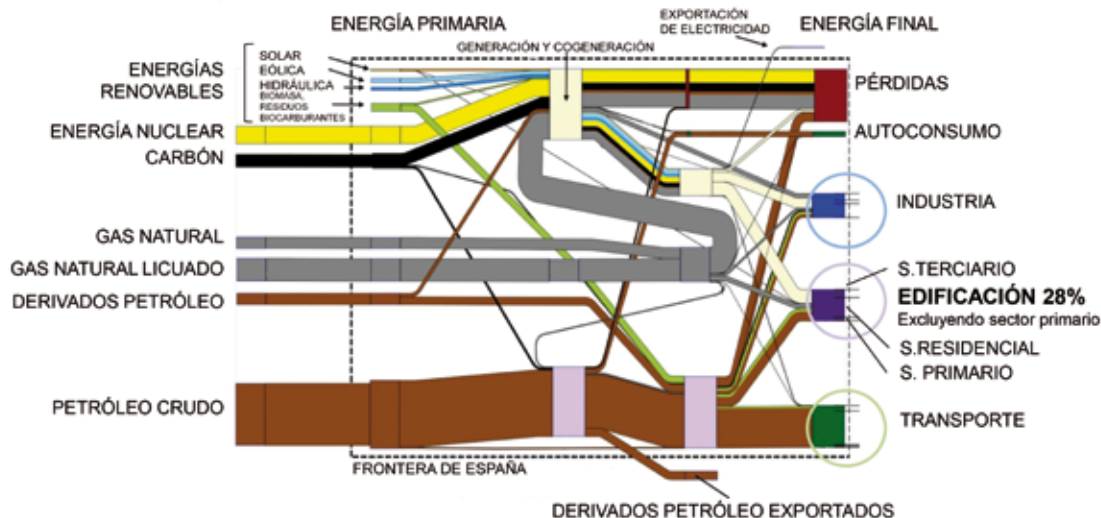


Fig. 1. La generación y el consumo de energía en España en 2011. Fuente: Observatorio de la energía y la sostenibilidad en España. Universidad Pontificia de Comillas

y con ello dependientes de múltiples agentes, y al no haber sido abordada esta cuestión con seriedad, recursos y objetivos ambiciosos hasta ahora. No es, por tanto, posible ninguna política energética ni climática en el futuro que no contemple estrategias, planes y medidas específicos para mejorar la eficiencia energética tanto de la nueva edificación, como, todavía en mayor medida, del parque edificado existente.

La superficie total construida en España a finales del año 2010 era de 2.600 millones de metros cuadrados (Fuente: BPIE, octubre 2011), de los que 2.250 km² corresponden a viviendas y 350 km² a edificios terciarios. La superficie construida de estos últimos se distribuye de la siguiente manera:

	Km ²	%
Oficinas	80	23
Comercio	75	21
Educativo	55	16
Hoteles y restaurantes	35	10
Hospitales	25	7
Instalaciones deportivas	10	3
Otros usos	70	20
Total	350	100

Tabla 1. Superficie construida por usos en España en 2010. Fuente: BPIE, 2011

Por otra parte, el consumo energético de los edificios de usos terciarios en España se ha multiplicado por cuatro en los últimos 30 años y representa alrededor del 30 % de la energía final consumida y el 38 % de las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto al total del sector de la edificación.

Del análisis de la energía final consumida y de la superficie construida se puede concluir que la edificación terciaria de oficinas tiene una intensidad energética por metro cuadrado construido unas ocho veces superior a la correspondiente en la edificación residencial. De ello se deriva la importancia de la aplicación de criterios de diseño que optimicen el consumo energético de los edificios de oficinas, así como de los condicionantes del mercado de este sector, con exigencias imperantes provenientes de tendencias internacionales del sector inmobiliario.

Por otra parte, los requisitos de prestaciones energéticas de la edificación en España están muy condicionados por la política energética y climática de la Unión Europea, cuyo marco legislativo está contenido en el denominado Paquete Verde –aprobado el 6 de abril de 2009 por el Consejo de la Unión Europea– y que consiste en un conjunto de Directivas y Normas con unos ambiciosos compromisos vinculantes para 2020 y que ha venido a conocerse como 20/20/20 (20 % de reducción de emisiones, 20 % de cuota de las energías renovables en la energía final y 20 % de mejora de la eficiencia energética, todo ello en 2020).

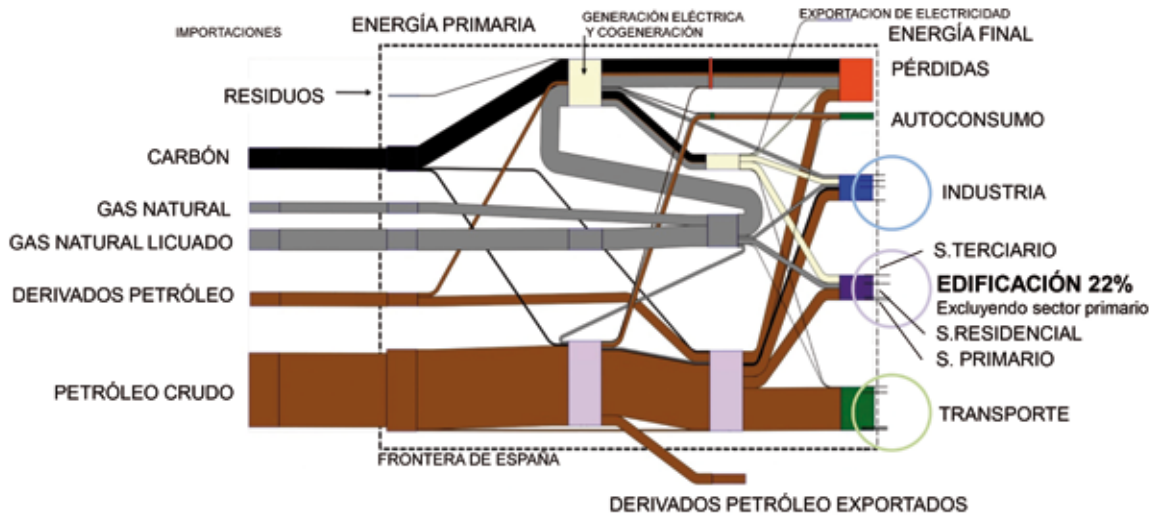


Fig. 2. Emisiones de CO₂ del sector de la energía en España en 2011. Fuente: Observatorio de la energía y la sostenibilidad en España. Universidad Pontificia de Comillas

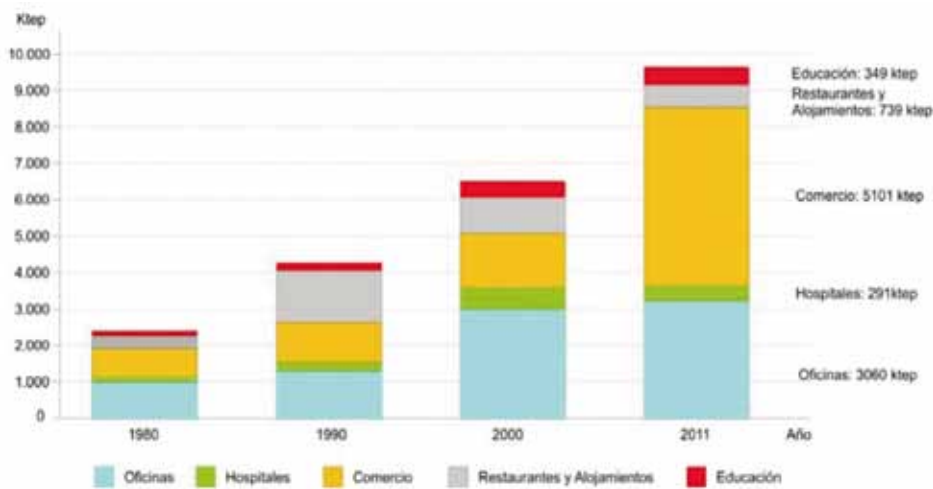


Fig. 3. Consumo de energía final de la edificación terciaria en España 1990-2011. Fuente: IDAE

Reducciones de GEI s/1990	2005	2030	2050
Total sectores	-7%	-40 a -44%	-79 a -82%
Electricidad (CO ₂)	-7%	-54 a -68%	-93 a -99%
Industria (CO ₂)	-20%	-34 a -40%	-83 a -87%
Transporte (incl. CO ₂ aviación. excl. marítimo)	+30%	+20 a -9%	-54 a -67%
Residencial y servicios (CO ₂)	-12%	-37 a -53%	-88 a -91%
Agricultura (ex-CO ₂)	-20%	-36 a 37%	-42 a -49%
Otras emisiones ex-CO ₂	-30%	-72 a 73%	-70 a -78%

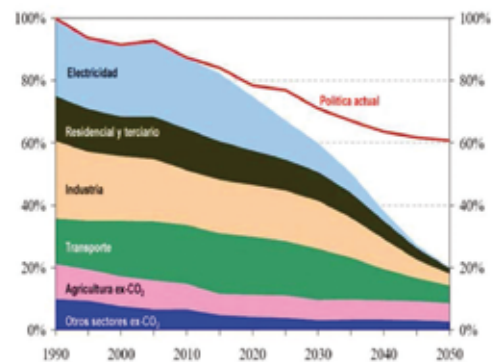


Fig. 4. Reducción de GEI en la UE por sectores con respecto a 1990. Fuente: Comisión Europea

Asimismo, a finales de enero de 2014 la Comisión Europea ha propuesto los objetivos concretos para 2030 dentro de su política energética y climática. Por un lado, ha confirmado la reducción del 40 % de las emisiones para 2030 que establecía su Hoja de Ruta de 2050, ha establecido un objetivo común de que las energías renovables alcancen un 27 % de la energía final, pero sin especificar objetivos por países, y ha establecido unas recomendaciones de buenas prácticas en las técnicas de perforación para la obtención del gas de esquisto. Por otra parte, no se ha establecido objetivo alguno para la mejora de la eficiencia energética en 2030.

En el marco de la política energética y climática contenida en el Paquete Verde, el Parlamento Europeo y el Consejo de la Unión Europea aprobaron el 19 de mayo de 2010 la Directiva 2010/31/UE de eficiencia energética en la edificación. Dicha Directiva exige que todos los edificios de nueva construcción sean de consumo casi nulo de energía a partir del 1 de enero de 2021, obligación que se adelanta en dos años para los edificios de titularidad pública. Las normativas de los estados miembros deben establecer requisitos prestacionales de forma que el coste global de los edificios a lo largo del ciclo de vida sea mínimo. A estos efectos, el coste global debe incorporar tanto el coste de inversión como el de explotación y mantenimiento, debiendo deducir el valor residual, todo ello según el procedimiento recogido en el Reglamento publicado al efecto por la Comisión Europea en enero de 2012. Los requerimientos prestacionales para los edificios de consumo casi nulo de energía deben ser propuestos por cada uno de los estados miembros y deben ser validados por la Comisión Europea con el objeto de que los niveles de exigencia sean homogéneos por países.

Otra Directiva de gran relevancia para el parque edificado es la 2012/27/UE de eficiencia energética, publicada con el objeto de conseguir el cumplimiento de los objetivos del anteriormente mencionado Paquete Verde. En la misma se exige, a partir del 1 de enero de 2014, la rehabilitación anual de un 3 % del parque edificado cuya titularidad corresponda a la Administración Central, de forma que se cumpla con los requisitos establecidos en la Directiva 2010/31/UE de eficiencia energética en la edificación.

Las dos Directivas europeas están en fase de trasposición a la legislación española. Asimismo, en 2013 se han publicado en nuestro país una serie de leyes y de requerimientos que van en esta dirección, como la Ley de Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbana, de 12 de abril de 2013, el Plan

Estatal de Fomento del Alquiler de Viviendas, Rehabilitación, Regeneración y Renovación Urbana (2013-2016), de 5 de abril de 2013, y la Certificación Energética de Edificios, de 5 de abril de 2013. Mención aparte merece la revisión del Documento Básico de Ahorro de Energía del Código Técnico de la Edificación (CTE en adelante), de 10 de septiembre de 2013; dicha revisión supone un salto cualitativo con respecto a los requerimientos del CTE 2006, de alrededor de un 30 % a un 35 % de reducción en la demanda energética de los edificios, habiéndose empleado por primera vez la metodología del coste global mínimo en la definición de las exigencias normativas.

2. Antecedentes del estudio

A pesar de las políticas comunitarias mencionadas y del contexto normativo derivado de las mismas, la profundidad e intensidad de la crisis económica y, muy específicamente, de la edificación en nuestro país ha hecho que se esté produciendo un creciente divorcio entre los requerimientos normativos, cada vez más exigentes, y la realidad del sector, de por sí históricamente poco dado a la evolución tecnológica y a la aplicación del conocimiento reciente.

Parecía, por tanto, de gran importancia poder disponer de un análisis de viabilidad técnica y de la repercusión en los costes que podrían suponer los crecientes requerimientos normativos en las prestaciones energéticas de los edificios con el objeto de que pudieran resultar de utilidad a los prescriptores, a los promotores de edificios y a los diferentes técnicos que intervienen tanto en el diseño como en la construcción de los inmuebles. Por otra parte, se decidió realizar el estudio sobre edificios de oficinas por su mayor intensidad energética con respecto a los edificios residenciales y sus condicionantes de mercado en un entorno muy competitivo y se centró el trabajo en la ciudad de Madrid, por su amplia disponibilidad de edificios de diferentes tipologías y por ser el mercado más importante de oficinas de nuestro país.

El estudio se ha denominado, de forma muy gráfica y autoexplicativa, 'Estudio de Optimización Energética de Edificios de Oficinas en Madrid', siendo su metodología y muchos de sus resultados aplicables a otras zonas climáticas. Ha sido patrocinado por los siguientes organismos públicos y empresas:

- Organismos públicos: IDAE y Ayuntamiento de Madrid.
- Empresas del sector de la energía: Gas Natural Fenosa y Remica.

- Empresas y asociaciones ligadas a la promoción inmobiliaria: DUCH, ARMN y ASPRIMA.
- Ingenierías y consultoras: TYPESA, LKS, Jones Lang Lasalle.
- Empresas de materiales de construcción: UPONOR y Yesos Ibéricos.

El trabajo ha sido coordinado por la ingeniería AIGUASOL, participando el estudio de arquitectura ALIA y habiendo contado con el asesoramiento de Servando Álvarez, catedrático de Termotecnia de la Universidad de Sevilla. Asimismo la Dirección Facultativa ha sido desempeñada por Luis Irastorza y la Dirección Técnica por Jordi Pascual, autores de este artículo.

El estudio, desarrollado entre el mes de septiembre de 2011 y el mes de diciembre de 2013, ha obtenido numerosos resultados y conclusiones relevantes, tanto de forma genérica como en cuestiones de detalle. En este artículo se pretende ofrecer sólo una pincelada de los mismos, y analizar con más detalle la problemática inherente a los edificios altos.

3. Objetivos del estudio

El objetivo principal del Estudio es el de determinar la viabilidad económica y técnica de los requerimientos energéticos prescritos en la normativa, así como servir de guía en la propia determinación de dichos requerimientos en la ruta hacia los edificios de consumo casi nulo de energía en el Horizonte 2020. Este objetivo principal se subdivide, a su vez, en los tres siguientes objetivos parciales:

- Determinar los costes de inversión y global a lo largo del ciclo de vida del edificio, así como la energía primaria consumida por el mismo, de un conjunto muy amplio de soluciones de envolvente y de instalaciones, de forma que permitan identificar los parámetros de diseño en las zonas de coste mínimo, tanto de inversión en la construcción como global, a lo largo del ciclo de vida. El análisis anterior se realiza para los requerimientos energéticos y los parámetros del edificio, tanto en base a los establecidos en el CTE como para los valores reales de operación medidos en la monitorización de los mismos (la primera opción es relevante para la definición de la normativa y la segunda para el inversor y el futuro usuario del edificio).
- Determinar los límites razonables de las prestaciones energéticas potencialmente exigibles a los edificios de oficinas

para conseguir edificios de consumo casi nulo de energía, considerando tanto el estado actual de la tecnología y de los costes como su previsible evolución en el futuro próximo. Se espera que ello pueda ser de utilidad para futuras revisiones del CTE.

- Desarrollar una metodología consistente que pueda ser aplicada para diseñar un edificio de coste global mínimo durante su ciclo de vida a partir de la estimación de los precios de la energía y de la tasa de actualización de los flujos financieros posteriores al momento de la inversión, así como estimar dicho coste y el consumo de energía previsto por usos y total.

4. Metodología y alcance

Resulta imprescindible describir, aunque sea someramente, la metodología del trabajo, tanto para la comprensión como para la credibilidad y solvencia de los resultados obtenidos en el mismo.

Con el fin de alcanzar los objetivos previstos, el proyecto se ha desarrollado en tres grandes fases de trabajo:

- Fase 1: caracterización de la problemática. En donde, en base a la selección, análisis detallado y valoración de edificios reales, se determina tanto la problemática real de los edificios de este uso en Madrid como la definición y caracterización de los escenarios de futuro a analizar y la calibración de las herramientas de simulación de los edificios.
- Fase 2: desarrollo metodológico y análisis escenarios CTE. En la que se ha desarrollado toda la metodología interna de cálculo, basada en el procedimiento de coste óptimo establecido por la Directiva Europea EPBD 2010, y se han definido y analizado los escenarios de futuro bajo condiciones normativas CTE 2013.
- Fase 3: análisis de escenarios de operación y gestión, de sistemas energéticos y análisis de sensibilidad. En donde se comparan escenarios en condiciones reales y optimizadas, se valoran distintas soluciones tecnológicas de sistemas energéticos y se lleva a cabo un análisis de sensibilidad en base a distintos escenarios de evolución de los precios de la energía y de la tasa de descuento.

Del trabajo realizado en estas tres fases, caben destacar algunos desarrollos y valoraciones específicas bien por su valor singular, bien por aportar información específica relevante.

En primera instancia y para la fase de caracterización de la problemática, se han seleccionado seis edificios de oficinas de Madrid, de reciente construcción (principalmente a partir del 2000) y que cubren un amplio abanico de soluciones de fachada. Más allá de los datos técnicos disponibles de los mismos, se ha monitorizado su comportamiento en zonas características mediante sondas de temperatura ambiente, humedad relativa, luminosidad, temperaturas de impulsión y condiciones exteriores. Dichos datos se han obtenido cada diez minutos durante un período de ocho meses. Igualmente, se han llevado a cabo pruebas de infiltración mediante el ensayo de puerta soplante hasta conseguir una sobrepresión y una depresión de 50 pascales en el interior del edificio. A partir de los caudales de aire necesarios para conseguir estas sobrepresiones y depresiones y mediante la aplicación de la metodología de Sherman-Grimsrud, recomendada por ASHRAE, es posible caracterizar la envolvente mediante la superficie de infiltración equivalente (ELA, *Equivalent Leakage Area*), que se mide en cm² de hueco equivalente por m² de envolvente. Todo ello ha permitido la constatación fehaciente de problemáticas energéticas, siendo, igualmente, parte fundamental de la calibración de las herramientas de análisis.

En este sentido, se considera relevante destacar el uso de las herramientas TRNSYS (simulación térmica) y DaySim (simulación lumínica) de forma acoplada para considerar las interrelaciones entre consumos térmicos y lumínicos de los edificios. Ambas herramientas son referentes a nivel mundial (TRNSYS cumple con el estándar 140-2007, y es una de las herramientas validadas por la Agencia Internacional de la Energía, mientras que DaySim, desarrollado por Departamento de Energía de EE. UU. y el Gobierno Federal de Suiza, goza de prestigio internacional). La calibración de ambas, según los resultados de las mediciones, se ha llevado a cabo mediante complejas técnicas de análisis de sensibilidad estadístico, habiendo conseguido finalmente desviaciones inferiores al 3 % anual.

En la segunda fase, se han definido las distintas soluciones cuya combinatoria establece los escenarios de análisis. En concreto:

- Diez tipos de fachadas, que se pueden agrupar en las siguientes cuatro familias: 1) fachada opaca con porcentaje de huecos inferior al 60 %, 2) fachada opaca con porcentaje de huecos superior al 60 %, 3) muro cortina acristalado y 4) fachada de doble piel.

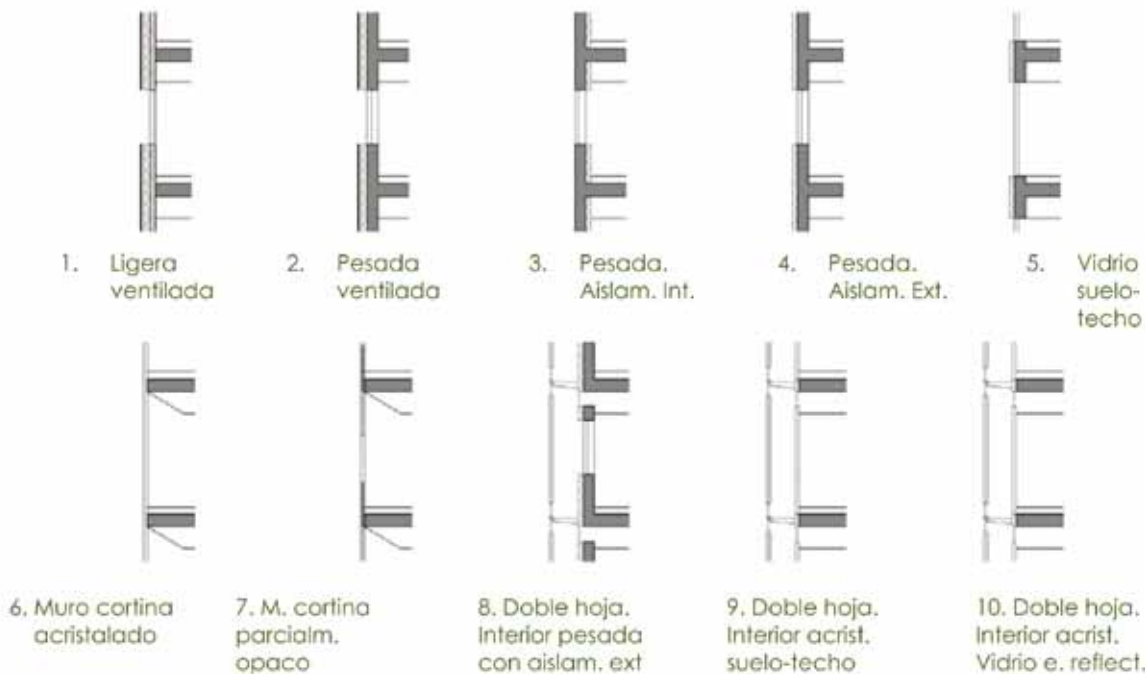


Fig. 5.
Esquema y descripción de los 10 tipos de fachadas

- Altura del edificio: urbano (seis plantas) y en altura (12 plantas).
- Planta del edificio: cuadrado o rectangular (pastilla).
- Inercia del edificio: ligero o pesado.
- Porcentaje de huecos en fachada: del 30 % al 85 %.
- Diferentes tipologías de vidrios.
- Diferentes tipologías de elementos de sombra.
- Diferentes orientaciones del edificio.
- Sistemas de climatización:

o Generación. Se analizan los cuatro sistemas siguientes: 1) caldera de condensación y enfriadora, 2) sistema de caudal variable con motor térmico mediante gas, 3) bomba de calor eléctrica y 4) central de distrito mediante gas con cogeneración.

o Emisión. Se analizan los dos sistemas siguientes: 1) sistema convectivo mediante 'fan-coils' y 2) sistema de suelo radiante.

Igualmente, y considerando que el análisis requiere de la evaluación energética y económica de los escenarios de estudio, ha sido necesario definir los costes de construcción, de los sistemas, de la operación y mantenimiento del edificio y de la energía. Los mismos se basan en:

- Envoltente. Se han utilizado las siguientes fuentes de información: 1) generador de precios de la construcción de CYPE Ingenieros; 2) base de precios PREOC 2012; 3) base de precios BEDEC, del Instituto Tecnológico de la Construcción de Catalunya; 4) base de datos del estudio de arquitectura ALIA; y 5) datos facilitados por fabricantes de componentes.
- Sistemas, operación y mantenimiento del edificio: Se ha utilizado información suministrada por Gas Natural, LKS, Ortiz, TYPESA, IG, AICIA, FCC, UPONOR y AGUASOL.
- Energía: se han tomado los precios de los diferentes combustibles y su evolución estimada por el Ministerio de Industria, Energía y Turismo.

Se esquematiza el procedimiento de cálculo utilizado en el siguiente esquema:

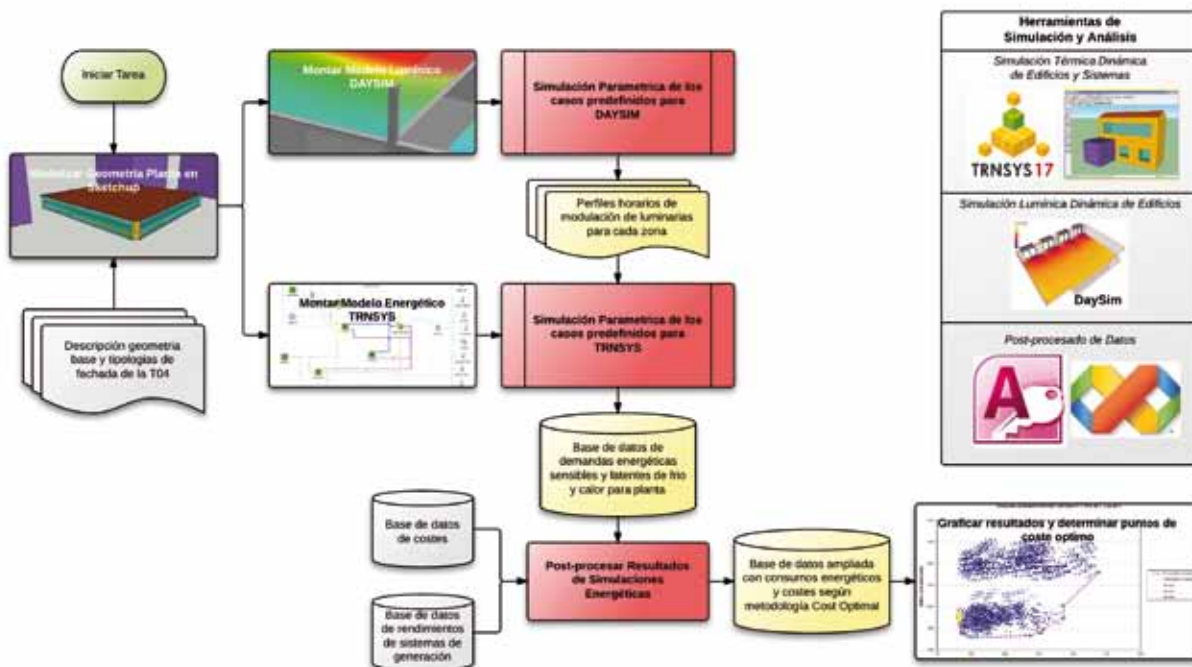


Fig. 6. Esquema del procedimiento de cálculo

En este contexto, se han obtenido los resultados del análisis de más de 12.000 escenarios (edificios a lo largo de su vida útil) bajo condiciones normativas (CTE 2013), desde las siguientes perspectivas:

- **Análisis financiero:** se consideran tanto los costes de inversión como los de operación y mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del edificio y se deduce el valor residual del mismo al cabo de 20 años, aplicando una tasa de actualización del 3 % para llevar al momento inicial de la inversión los flujos financieros producidos con posterioridad.
- **Análisis macroeconómico:** igual que el análisis financiero pero incrementando los costes con el precio de las emisiones de CO₂ a lo largo de los 20 años de vida útil del edificio que estima la Comisión Europea.
- **Análisis de inversión:** únicamente se consideran los costes de construcción del edificio, es decir, no se consideran los costes de operación y mantenimiento ni el valor residual del mismo.

En la tercera y última fase, se han analizado distintos modelos de operación y gestión de los edificios, considerando tanto las condiciones reales de operación de los mismos (obtenidas de la caracterización inicial del proyecto mediante la monitorización) como de medidas de optimización básica propuestas (elementos domóticos de sombra y de control de

la ventilación, control de la infiltración y sistemas eficientes de iluminación). Igualmente, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad de las siguientes variables:

- Evolución del precio de las diferentes fuentes de energía: gasóleo, gas natural, GLP y electricidad.
- Variación de la tasa de actualización entre el 2 % y el 7 % (la central es el 3 %).

El estudio finaliza con la valoración de los límites del mismo, en base a la definición de soluciones optimizadas por variaciones cruzadas de elementos según orientaciones y en unas condiciones optimizadas de operación del edificio.

5. Resultados generales

Durante el desarrollo del proyecto se han obtenido múltiples resultados de temas específicos, como el impacto de la operación real de los edificios en la factura energética o la afectación de la infiltración del aire exterior en el consumo energético de los edificios. La mayor parte de ellos queda incluida, de forma inherente, en los resultados finales, de los que se muestran los que tienen una orientación general, sin entrar en los análisis paramétricos.

En base a la metodología de coste óptimo, se representan los resultados en gráficas en cuyo eje X se recoge el consumo de energía primaria (KWh/m²año) –lo que requiere la

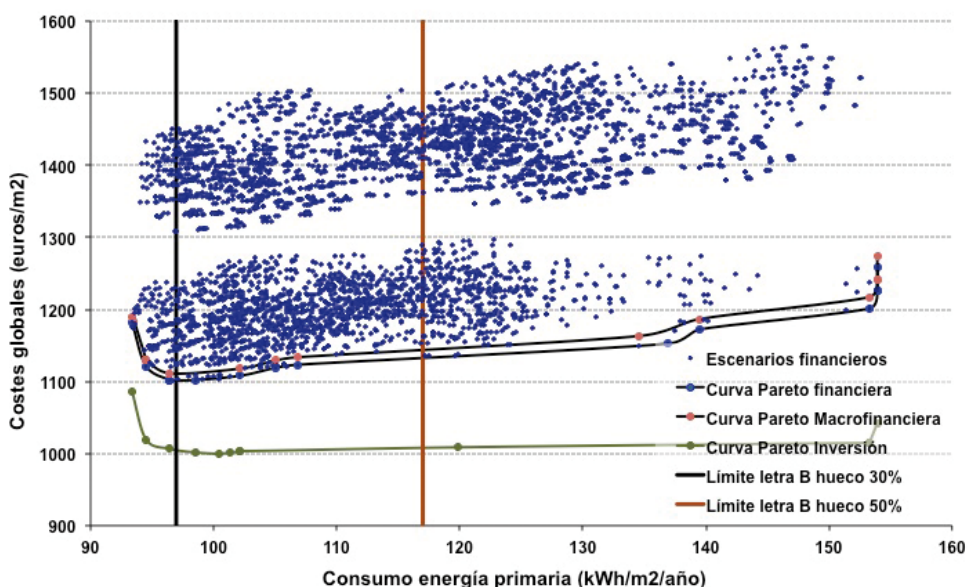


Fig. 7. Análisis de coste óptimo según condiciones CTE. Escenarios financieros y curvas de Pareto financieras, macroeconómicas y de inversión

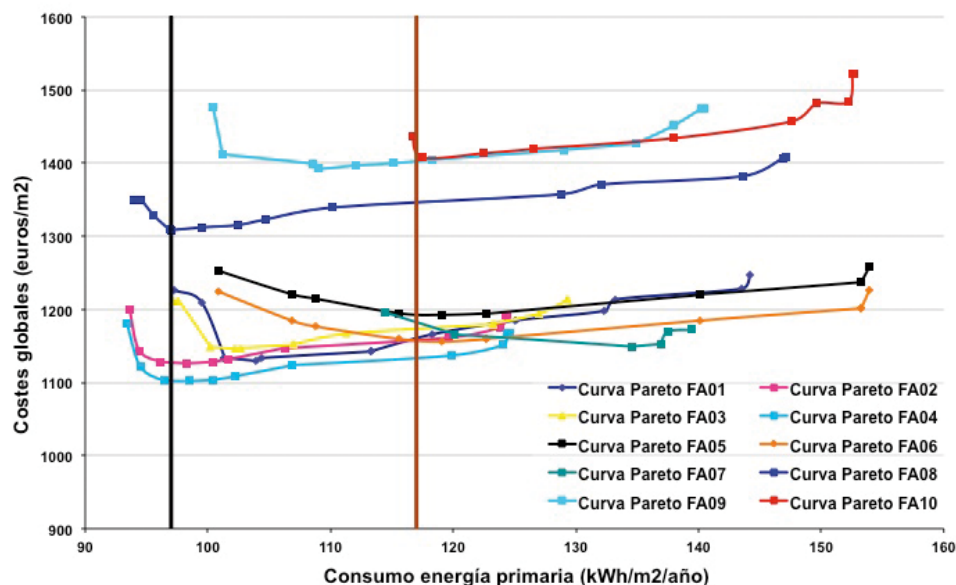


Fig. 8. Curvas de Pareto de los escenarios agrupadas según tipología de fachada en condiciones normativas CTE 2013

transformación de las demandas de energía a consumo de energía primaria mediante los consiguientes coeficientes de paso de una a otra— y en el eje Y el coste global a lo largo del ciclo de vida del edificio (€/m²) para los análisis financiero y macroeconómico (considerando también el coste de las emisiones) o bien únicamente el de construcción (para el análisis de inversión). Cada uno de los puntos representa el resultado de consumo de energía primaria—coste global de un edificio de características concretas en todo su ciclo de vida.

En el gráfico siguiente se incluyen las dos referencias normativas (líneas verticales), que deben interpretarse considerando que todos los escenarios (puntos) que queden a la derecha de la línea roja (límite letra B hueco 50 %) representan edificios que no cumplirán el CTE. Los escenarios entre los dos límites pueden cumplir con los requisitos normativos, mientras que los que quedan a la izquierda del límite inferior (línea negra o límite letra B hueco 30 %) serán edificios con calificación energética B o A. Igualmente, y junto a la valoración financiera de los escenarios, se representan las curvas envolventes de todos los puntos (curvas de Pareto) tanto de los casos financieros como macroeconómicos y de inversión (sin representar todos los escenarios en estos dos últimos casos, para facilitar la lectura de resultados). Dichas curvas resultan relevantes puesto que son las que marcan la envolvente de costes mínimos para los distintos consumos de energía primaria. Finalmente se indican las regiones de interés, que se en-

tienden como las tres regiones en donde se encuentran edificios con consumos máximos de energía primaria, los de mínimos en costes y los que tienen asociados consumos de energía mínimos.

Del análisis destaca, en primera instancia, la distribución de puntos a lo largo del eje de consumo de energía primaria, que comporta que muchos de los escenarios queden fuera de las referencias normativas. Ello es un indicativo de la complejidad de alcanzar los nuevos límites impuestos en el CTE 2013 y una referencia de las restricciones previstas para 2020. Igualmente es posible constatar cómo bajar de la región de consumos máximos (sobre los 154 kWh/m²·año) a la de los costes mínimos (con consumos de energía primaria asociados del orden de 97 kWh/m²·año) representa un ahorro de más de 150 €/m² en costes de análisis financiero, e incluso de más de 42 €/m² en costes de análisis de inversión. En este sentido, resulta relevante destacar que la inversión supone entre el 75 % y 80 % de los costes globales.

Igualmente resulta destacable la agrupación de los resultados de los diferentes escenarios en dos franjas claramente diferenciadas a nivel de costes, aunque no de consumos. De uno de los análisis paramétricos se constata que este agrupamiento es un reflejo de las tipologías de fachadas analizadas. Efectivamente, se observa una clara distinción entre las fachadas de diseño más convencional y las fachadas tipo muro cortina (costes globales más bajos) con

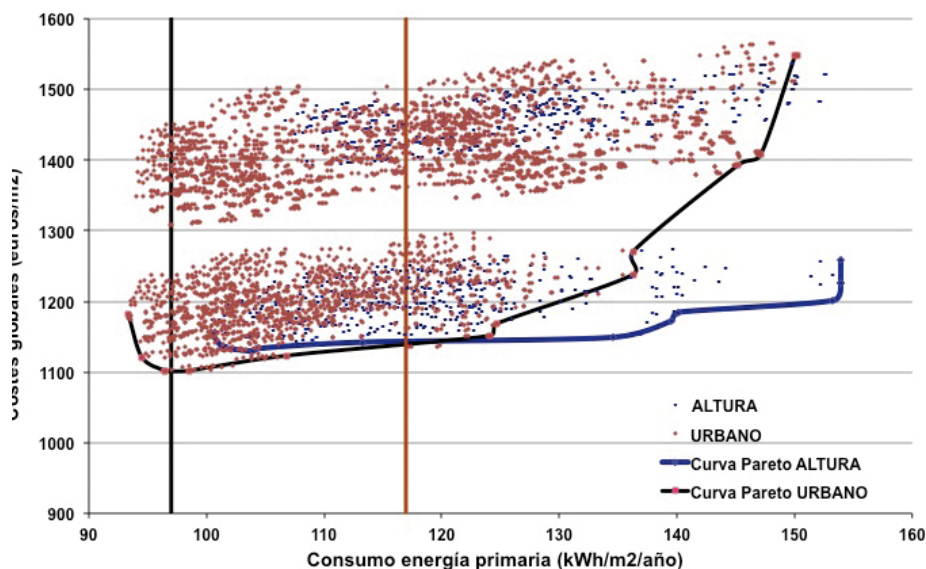


Fig. 9. Análisis financiero en condiciones CTE según altura (entorno) de los edificios

respecto a las fachadas de doble hoja (costes globales más elevados).

En el gráfico anterior es posible verificar cómo las fachadas de doble hoja (FA08, FA09 y FA10) quedan asociadas claramente a unos costes globales significativamente más elevados, independientemente de las variaciones del resto de parámetros analizados (por ejemplo, proporción de hueco o tipo de vidrio).

6. Resultados específicos de edificios altos

El estudio presentado ha analizado la variable altura de los edificios en detalle; ello se ha hecho considerando escenarios de edificios bajos (planta baja+5) y edificios en altura (planta baja+11), con las variaciones pertinentes en costes de inversión. Aunque no se han considerado casos de mayor altura, por valorarse que estos son casos singulares a analizar uno a uno, sí que se considera, por lo mostrado a continuación, que las tendencias de los edificios en altura analizados en este estudio se reproducirán en casos de torres de altura superior.

Del análisis en detalle de los edificios en altura, se observa que los mismos se caracterizan por unos costes globales con una mayor dispersión que los de los denominados urbanos o bajos y unos consumos energéticos más concentrados, pero ligeramente mayores que aquellos. Ello se puede constatar de forma fehaciente en un análisis estadístico de los resul-

tados. Del análisis de estos datos, se concluye que estas tendencias derivan de:

- i. Límites estructurales. En el análisis se considera la viabilidad estructural de las distintas soluciones tipológicas de fachadas. De esta forma, los edificios en altura no consideran soluciones pesadas inerciales que, del análisis previo, pasan por ser las de mejor relación coste-consumo. En cambio, los edificios en altura quedan representados por soluciones más ligeras y, a menudo, en base a muros cortina o dobles hojas.
- ii. Condiciones de entorno. Los edificios en altura tienen una mayor exposición a las condiciones climáticas ambientales, lo que incrementa los requisitos para alcanzar las condiciones de confort interior. En este sentido, no se producen las atenuaciones de temperatura, regímenes de viento y sombreados que se dan en edificios bajos.
- iii. Infiltración. Derivado de los anteriores, pero remarcable por sí mismo, los efectos de la infiltración en edificios en altura tienen un impacto considerable en los consumos energéticos asociados al uso de los mismos. La infiltración, que se muestra como un factor predominante en el consumo energético de los edificios, depende de la ejecución en obra de las soluciones de piel (más relevante en soluciones menos convencionales) y de las condiciones exteriores (temperatura y regímenes de viento). En edificios en altura, se suelen dar estos dos condicionantes amplificadores.

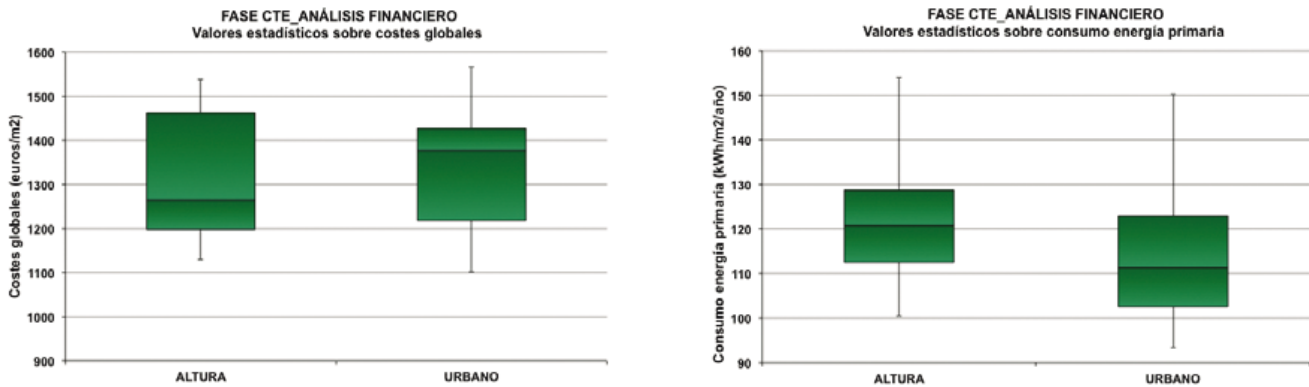


Fig. 10. Análisis estadístico (valores máximos, mínimos y percentiles del 25 %, 50 % y 75 %) de costes (izda.) y consumos energéticos (dcha.)

Destacar, igualmente, que en las regiones de interés analizadas de mínimo coste económico y mínimo consumo energético resulta estadísticamente difícil encontrar edificios en altura.

7. Invariabilidad de tendencias

Aunque en el presente artículo sólo se muestra una pincelada de los resultados obtenidos, cabe destacar que, de los análisis mostrados, se han analizado otras variaciones en función de los sistemas energéticos, las condiciones de operación y gestión, y la evolución de los precios de la energía y de la tasa de descuento.

De estos destacan,

i. Condiciones de operación y gestión. El cálculo de los mismos escenarios según distintas condiciones de operación y

gestión (temperaturas de consigna, régimen de ocupación interna, implementación de elementos domóticos, optimización de iluminación, etc.) deriva en variaciones significativas tanto en los consumos energéticos como en los costes económicos.

ii. Análisis de sensibilidad de precios y tasas de descuento. Del análisis de distintos escenarios de evolución tanto de los precios de la energía como del valor de la tasa de descuento, deriva una mayor relevancia de esta última respecto a los precios, y una invariabilidad de valores relativos y tendencias observadas por parámetros.

En cualquiera de los casos, sin embargo, las tendencias observadas para los edificios en altura se mantienen, produciéndose variaciones en los valores absolutos pero no en las conclusiones relativas.

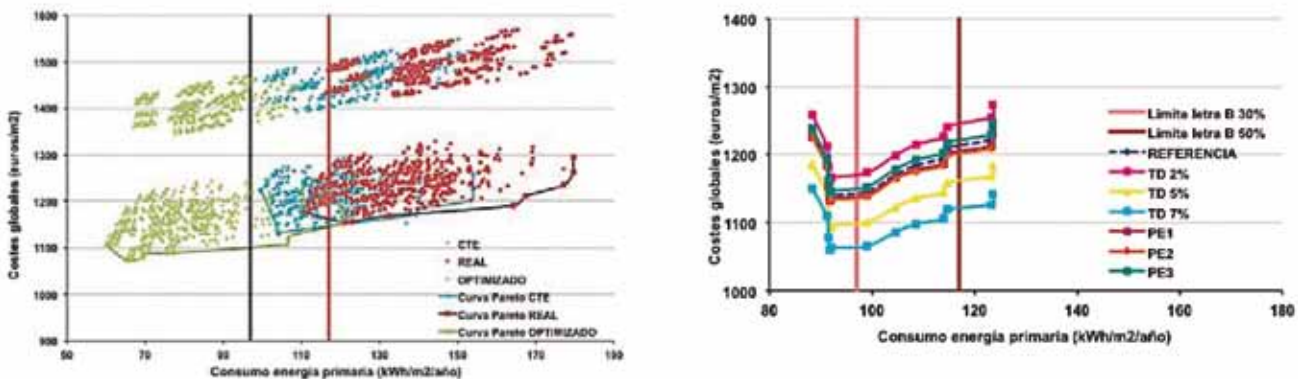


Fig. 11. Variación de comportamiento en función de las condiciones de operación y gestión (CTE azul, REAL rojo y ÓPTIMO verde) para los escenarios analizados (izda.) y variaciones de los resultados para los escenarios de referencia de la curva de Pareto en condiciones CTE según escenarios de evolución de los precios de la energía y de la tasa de descuento (dcha.)

8. Conclusiones

El estudio ofrece múltiples conclusiones específicas que merecen, en un análisis más profundo de los resultados, ser detalladas y aplicadas directamente o en otros estudios sectoriales. Sin embargo, se ha considerado prioritario desarrollar un trabajo de síntesis sistémica que permita adquirir una visión global desde la que determinar las principales conclusiones del proyecto. Las mismas se deben circunscribir al ámbito concreto del análisis, los edificios de uso oficinas para el ámbito de Madrid, si bien es cierto que se considera que gran parte de las conclusiones podrían ser razonablemente válidas para otras tipologías de uso terciario y en otras zonas climáticas de la geografía peninsular.

Así se sintetizan cuatro grandes conclusiones que se consideran prioritarias en este contexto:

i. Es perfectamente viable construir edificios de oficinas de consumos energéticos reducidos a unos costes globales significativamente inferiores con respecto a los edificios efectivamente construidos en los últimos años, en las condiciones actuales, de conformidad a las capacidades del sector, conocimientos técnicos y tecnología disponible en el mercado. Esto es, considerando que los edificios de oficinas construidos en los últimos años tienen consumos asociados –calefacción, refrigeración e iluminación– superiores a los 150 kWh/m²·año, se pueden reducir los mismos a alrededor de 60 kWh/m²·año, en edificaciones con un rango de costes globales en el análisis financiero –costes de construcción y de operación y mantenimiento a lo largo de los 20 años de vida útil del edificio menos el valor residual, en valores actualizados– entre los 1.100 y 1.200 €/m². Estos valores pueden verse reducidos en el diseño en detalle edificio a edificio.

ii. Construir edificios de oficinas energéticamente eficientes a costes óptimos resulta más económico, considerando tanto los costes globales de todo el ciclo de vida como los costes de inversión. Efectivamente, pasar de un edificio gran consumidor a otro en una horquilla de entre 50 a 100 kWh/m²·año resulta un ahorro económico de más del 4 % de la inversión inicial, sin entrar a considerar los ahorros en la factura energética u otros conceptos del ciclo de vida.

iii. Los principales elementos a considerar en los edificios eficientes, en costes y energía, son el diseño arquitectónico y constructivo y la operación en su vida útil, siendo la consideración del sistema energético el factor de menor

peso. A nivel de costes económicos, el factor predominante es el diseño de la edificación con un peso tres veces más relevante que la operación en la vida útil o los sistemas energéticos. A nivel de consumo de energía y en escenarios conservadores, la correcta operación del edificio tiene un peso casi tres veces superior al diseño arquitectónico y constructivo del mismo y casi 9 veces superior al sistema de energía propuesto.

iv. Los edificios en altura (sin valorar las torres singulares) son económicamente más caros y energéticamente menos eficientes que los edificios bajos. Ello deriva, en gran medida, de los condicionantes arquitectónicos y constructivos, aunque también de las condiciones ambientales del entorno, más cuando existan patologías de la construcción. No se entra a considerar, sin embargo, otros factores que pueden influir en el comportamiento, más relacionados con cuestiones urbanísticas.

El análisis de sensibilidad muestra que las variaciones en la evolución de los precios de la energía y de la tasa de descuento pueden hacer variar los valores pero no las tendencias establecidas. **ROP**

Introducción al urbanismo de Benidorm y sus edificios de gran altura



Florentino Regalado Tesoro

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Resumen

En este artículo se expone la filosofía del urbanismo que ha permitido levantar la ciudad de Benidorm, describiéndose sucintamente la arquitectura y las estructuras que sostienen sus edificios.

Palabras clave

Edificios de altura, urbanismo, estructuras, rascacielos, desarrollo sostenible, pórticos, pantallas, resistencias

Abstract

The article outlines the town planning philosophy that gave rise to the city of Benidorm and provides a brief description of the city's architecture and the structures supporting its buildings.

Keywords

Tall buildings, town planning, structures, skyscrapers, sustainable development, frame building, shear walls, strength



1. Introducción

Benidorm posiblemente sea una de las ciudades españolas más conocida a nivel mundial, que no deja indiferente a nadie que la visite. A Benidorm, como el mayor exponente emblemático a nivel mundial del turismo de sol y playa, se la quiere o se la odia: no cabe término medio. Benidorm fue un producto inventado en su juventud por el alcalde Pedro Zaragoza Orts (1922-2008), a través del primer Plan General de Ordenación Urbana integral para todo su término municipal que se confeccionó en España (1956), permitiendo que los edificios crecieran libremente en altura con un respeto mínimo a unas sencillas normas de distancias y volumetría construida. Y aunque en sus inicios tuvo más detractores que partidarios, sin embargo, con el tiempo y tras ir observando cómo se ha desarrollado el urbanismo costero en España, poco a poco, la tendencia se fue cambiando y en la actualidad creemos que sus partidarios ganan por goleada; aunque siempre introduzcan un cierto acento ligeramente despectivo hacia todo lo que representa Benidorm sociológicamente cuando se manifiestan sobre la ciudad con un cierto aire de academicismo progresista.



Fig. 1. El Benidorm de los tiempos remotos

Quizá el sociólogo José Miguel Iribas, dentro del grupo de los partidarios de Benidorm, pueda ser un ejemplo vivo de lo expuesto cuando se manifiesta de esta forma: “El éxito de Benidorm no puede explicarse sin recurrir a la potencia que imprime su condición urbana. El fundamento de ese éxito consiste en que Benidorm se parece mucho a una Coca-Cola de litro: es un producto industrial; de equilibrada relación calidad-precio; útil a toda hora; y capaz de combinarse con todo tipo de brebajes (Chivas y ginebras de garrafa, o sea, burgueses anónimos y proletarios del mundo unidos en busca del desmadre psicológicamente reparador). Un producto a la vez sencillo y complejo y, por tanto y tan variadas razones, irremediabilmente destinado al éxito”.

La ciudad de Benidorm, ejemplo sobresaliente donde los haya de un modelo urbano donde se premia a los edificios de altura, ha sido y sigue siendo para sus detractores ilustres, como el arquitecto Ricardo Aroca, un exponente representativo de la anticuidad por antonomasia, el reducto de todos los males, la ciudad líder de la antiarquitectura y el antiurbanismo. Las calles, plazas y hoteles de Benidorm, para los que la odian, han sido vistos como una especie de gueto de la tercera edad; y como un conjunto de playas y espacios destinados a las masas de la Europa de escasos recursos, que desea pasar unas cortas pero intensas vacaciones a un módico precio. Sin embargo, estas opiniones no son compartidas, sino al contrario, por también ilustres arquitectos como Óscar Tusquet o Josep Bohigas.

En el año 1950, la población censada de Benidorm era de 1.720 habitantes y en el año 2010 se sitúa alrededor de los 75.000, aunque en realidad su población, de hecho, no desciende en ningún mes del año de las 150.000 personas, y en los mo-

mentos de plena ocupación, pueden residir en ella en torno a las 600.000.

Se quiera aceptar o no con mayor o menor agrado, Benidorm es uno de los ejemplos más espectaculares del desarrollo turístico que uno pueda imaginar. Y como nos dice Tomás Mazón, de la Cátedra homenaje al creador de Benidorm Pedro Zaragoza Orts de la Universidad de Alicante, Benidorm es el buque insignia del turismo de la Comunidad Valenciana y la fábrica de turismo de masas más eficaz del litoral español, como demuestran con sus visitas los cinco millones de turistas internacionales que, junto al turismo nacional, representan más de 70 millones de pernoctaciones anuales. Es la segunda ciudad de Europa en ocupación hotelera y ha demostrado que, con su filosofía, es posible mantener y sostener un turismo de masas de forma razonable y sensata, sin esquilmar el medio donde se asienta la ciudad, tal y como lo está haciendo Benidorm (Benidorm. Un destino turístico de altura Gran Tour: Revista de Investigaciones Turísticas nº2 (2010)). En el polo opuesto tenemos el caso contrario de Torrevieja y otros asentamientos en las costas españolas, donde ya no queda suelo disponible donde poder construir, haciendo insostenible el urbanismo extensivo que han desarrollado, al tener unos costes de mantenimiento insoportables para las arcas municipales.

Y, sin embargo, a Benidorm se la ha ignorado académicamente, como lección viva y magistral, en todo lo que ha supuesto su desarrollo, su urbanismo, su arquitectura y el cómo, con una tecnología local simple y sencilla, ha conseguido levantar unas construcciones de gran altura a unos costes económicos muy por debajo de lo que en otras partes se ha podido materializar, sin algaradas publicitarias de tipo alguno.



Fig. 2. Los comienzos del invento 'Benidorm'



Fig. 3. La 'B' de Benidorm: Playa de Levante y el nuevo Paseo de Poniente, resuelto por el arquitecto Ferrater



Fig. 4. Los edificios de Benidorm en sus parcelas

2. La filosofía urbanística de los edificios de Benidorm

La filosofía urbanística de Benidorm es muy simple y responde a unos trazados de calles y avenidas paralelas y perpendiculares al mar rotas por el casco viejo de la ciudad, asentado en la pequeña península que, adentrándose en la bahía, configura el tramo horizontal de la 'B' de Benidorm.

Dentro del esquema mencionado, se asientan las parcelas que, en función de la superficie que posean, tienen derecho a construir una determinada volumetría, respetándose unos parámetros de retranqueos. Se premia consumir la volumetría a la que se tenga derecho, disponiéndola en altura y cuanto más alta, mejor.

Lo anterior conduce a un ratio de ocupación del solar muy pequeño, permitiendo por ello poder construir en las parcelas: jardines, canchas deportivas y piscinas de formas variadas. El espacio entre los edificios de Benidorm se dispara a unas amplitudes considerables, hasta el punto de que las interferencias entre los bloques se reduce a límites envidiables y, por ello, la mayoría de sus diseños responde al esquema del croquis de la figura 5.

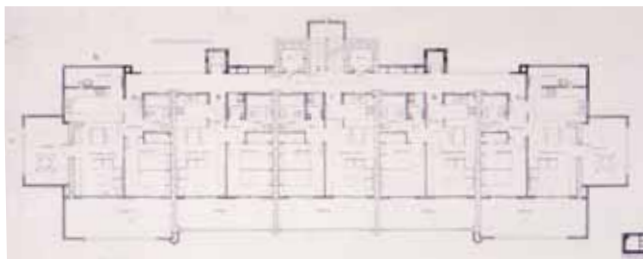


Fig. 5. Planta clásica representativa de los edificios de altura de Benidorm (Torre Soinsa-esbeltez-13)

Pese a que la realidad es la que es y se ha descrito brevemente, los detractores de Benidorm lo tienen muy fácil cuando pretenden presentarlo como una aberración de ciudad, pues basta situarse en los paseos marítimos y hacer fotografías de escorzo, para que, al superponerse los edificios, la imagen que aparezca sea la de una muralla de bloques que conforman una barrera infranqueable. Sin embargo, dicha imagen en modo alguno responde a la verdad de cómo se encuentran realmente situadas sus construcciones.



Fig. 6. Imagen falseada de una masificación inexistente de un Benidorm cuando se observa de escorzo

Para poder apreciar realmente cómo es Benidorm y cómo se encuentran distribuidos sus edificios, resulta obligado mirarlo desde arriba o pasarlo lentamente apreciando el concepto de las distancias y las ventajas de los bloques exentos, frente a la monotonía continua y aplastante de las manzanas cerradas, una al lado de otra, en las estrechas calles que pueblan la



Fig. 7. La realidad de los espacios que ofrece el urbanismo de Benidorm: Edificios ampliamente separados con visión espacial plena

mayoría de nuestras ciudades, agobiando desmesuradamente a sus habituales.

Frente al modelo urbanístico de Benidorm, con sus innegables deficiencias, no creemos que sea mejor oponer el urbanismo contrario; el urbanismo que propicia las construcciones individualizadas y las grandes superficies ocupadas por viviendas y apartamentos adosados, arrasando con todo ello las mejores zonas de nuestro litoral y del entorno que rodea nuestros pueblos y ciudades.

Todo lo mencionado quizás haya hecho reflexionar a los teóricos de urbanismo, y por ello comienzan a considerar que, tal vez el modelo Benidorm, adecuadamente planificado y gestionado, no sea tan malo como en principio parecía que era y, una vez más se demuestra y se pone de manifiesto, que los sabios teóricos de la arquitectura y del urbanismo intervienen la mayoría de las veces (con alguna que otra excepción como la que nos ofreció el ingeniero Idelfonso Cerdá) llegando tarde a los problemas, cuando casi siempre los mismos se encuentran fuera de su alcance y resulta imposible que puedan ser planificados y resueltos satisfactoriamente.

3. La arquitectura de los edificios de Benidorm

En cualquier libro divulgativo que tenga que ver con los rascacielos puede encontrarse, con un despliegue de imágenes asombrosas, la evolución formal de estos grandes edificios, sin que en ellos aparezca, salvo en algún autor despistado, la más mínima referencia a la arquitectura de los edificios de Benidorm, quizás porque resulte imposible poder encajarlos

en ninguno de los estilos arquitectónicos que se mencionan en las revistas de papel couché dedicadas a estos menesteres.

Y posiblemente, también, porque los críticos de la arquitectura limitan su visión arquitectónica a los edificios de altura exclusivamente comerciales, dejando de lado los destinados únicamente a viviendas, que son los que mayoritariamente han sido construidos en Benidorm con resultados para todos los colores, pero a los que apriorísticamente les atribuyen unas cualidades proyectuales más bien vulgares y escasas. Sin embargo, nosotros creemos firmemente que no siempre es así, y existen ejemplos más que notables de su interés arquitectónico.

No sólo Benidorm sino también algún que otro pueblo de la provincia de Alicante, empezando por su capital, introducidos de lleno en el expansionismo turístico que se inició en los años sesenta del pasado siglo hasta el presente, siempre han tenido una cierta permisividad en la construcción de edificios de cierta altura, debido a la presión y demanda de los promotores inmobiliarios y hoteleros.

Han sido tres arquitectos alicantinos pioneros en los viejos tiempos del *boom* turístico alicantino, cuando la calidad y el conocimiento del hormigón en los años 60 y 70 en la edificación española dejaba mucho que desear, los que se lanzaron a proyectar edificios con estructuras metálicas que superaban los veinte pisos: Francisco Muñoz, Juan A. García Solera y quizás el mejor de ellos y el que más edificios de altura ha construido en la provincia, Juan Guardiola. La arquitectura española no ha sabido descubrir a este complejo arquitecto, ya fallecido,



Fig. 8. Edificios de Muñoz y Solera



Fig. 9. Ficha del edificio más espectacular del arquitecto Juan Guardiola

que ha manejado las fachadas de ladrillo con una habilidad extraordinaria, y que con sus claros y oscuros ha construido edificios de una calidad notable y, bastantes de ellos, capaces de soportar el paso del tiempo con una nobleza envidiable.

Los numerosos edificios que proyectaron los tres arquitectos mencionados fueron básicamente residenciales, siendo pioneros en abandonar la arquitectura vernácula tradicionalista, adentrándose en los postulados que predicaba y lideraba Le Corbusier, aplicándolos con fortuna variable en sus proyectos.

En general, estos arquitectos y los que vinieron posteriormente partían de un conocimiento nulo sobre los mecanismos resistentes de los edificios de gran altura y, por ello, básicamente se limitaron a superponer plantas más o menos convencionales, partiendo de una distribución funcional acorde con las exigencias comerciales del mercado, tal y como les era transmitida en función de la demanda de las ventas por los promotores de los edificios. Pese a que en el diseño previo de las plantas, las estructuras no se contemplaban inicialmente, al estar los edificios destinados a viviendas y apartamentos, resultaba relativamente sencillo dotarlos de pilares más o menos apantallados y de muros pantallas capaces de sostenerlos básicamente en voladizo.

Lo anterior era posible hacerlo sin mayores problemas de diseño al estar libre de aparcamientos los bajos de los edificios, pues sus garajes se construyen fuera de los mismos, en el resto de los espacios liberados en las parcelas, merced a las características urbanas permitidas en Benidorm.

Con la única intencionalidad de hacer algo de justicia a los arquitectos (R. Sanchís, J.A. Nombela, Tomás González, Carlos Gilardi, Antonio Escario, Juan Carlos Oliva, Ricardo Llácer, Roberto Pérez-Guerras, etc.) que han diseñado sin algaradas de tipo alguno los edificios que pueblan Benidorm y, también, con la intencionalidad de motivar alguna tesis o estudio en profundidad sobre su arquitectura, adjuntamos un abanico



Fig. 10. Edificios de estilos diversos

representativo de los mismos, sin que la selección elegida tenga significado alguno.

4. Tipologías estructurales comúnmente empleadas en los Edificios de Gran Altura acopladas en Benidorm

Hasta no hace mucho tiempo y todavía en el presente, los tratados estructurales exponían y exponen métodos más o menos ingeniosos y más o menos complicados, con la aparente sana intención de permitir abordar el cálculo de las estructuras de los edificios de gran altura, pero al mismo tiempo los rodeaban de un cierto misterio, como diría el maestro de las estructuras laminares Félix Candela, con el objeto de espantar a los no iniciados en este campo.

No está mal seguir contando con los métodos aproximados y simplificados, que pese a su carácter burdo han permitido capear el temporal de levantar las estructuras de Benidorm con mayor o menor acierto, siguiendo las indicaciones que Dios le daba a entender a cada estructurista, sin que se hayan tenido problemas de tipo alguno que nosotros conozcamos con los empujes horizontales del viento. Estos métodos nos siguen permitiendo el predimensionar estructuras y chequear rápidamente los resultados de los cálculos de programas de ordenador.

No obstante, actualmente, merced a los ordenadores y a los programas que los alimentan de análisis matricial planos, tridimensionales y de elementos finitos existentes en el mercado, cualquiera de las estructuras empleadas en los edificios, sea de la naturaleza que sea, puede ser analizada hoy día con suficiente rigor, teniendo un mínimo de conocimientos estructurales y unas ciertas dosis de sentido común (el orden se lo dejamos elegir al lector).

Todos los edificios que nosotros hemos resuelto en Alicante y Benidorm han sido calculados por las teorías clásicas lineales y elásticas en cuanto a la obtención de esfuerzos se refiere. Con los esfuerzos obtenidos se han dimensionado los elementos de hormigón por los métodos actualmente en vigor en todo el mundo, sin que por estas causas hayamos tenido problemas resistentes ni queja alguna de que hayamos superado en servicio el confort de las personas que viven en los edificios ya construidos.

Creemos que los métodos elásticos lineales son los que mejor reflejan el comportamiento en servicio de las estructuras, como así parecen demostrarlo los ensayos que se realizan en las piezas estructurales. Por otra parte, el cálculo no lineal, al invalidar el principio de superposición de efectos, complica conside-

rablemente, en los entramados espaciales de los edificios de gran altura, el análisis y combinación de las distintas hipótesis de carga a las que se encuentran sometidos. No obstante, el efecto P- Δ , si pensamos que puede ser tenido en cuenta sin excesivas complejidades técnicas, y si se le acompaña con alguna que otra redistribución de esfuerzos en los armados, mejor que mejor.

Con los pórticos tradicionales compuestos de pilares y vigas, y también con los pórticos virtuales de los forjados reticulares, resulta posible materializar el esquema estructural más comúnmente empleado en los edificios ordinarios y también en los edificios de mediana altura. Para los edificios de 15 a 20 plantas de Benidorm, resulta posible acudir al sistema de pórticos y resolver sus estructuras con relativa comodidad a un precio razonable. Las vigas entre pilares pueden no estar materializadas como tales, como sucede en los forjados tipo losa, ya sea de tipo reticular o de losas macizas, que se materializan en pórticos virtuales perfectamente resueltos en la literatura técnica disponible.

A pesar de que el análisis de estos edificios se ha estado realizando de forma grosera como ya se ha dicho, asignando las fuerzas de viento proporcionalmente al número de pilares de cada pórtico sin poder preocuparnos excesivamente de compatibilizar teóricamente los desplazamientos de cada planta entre los mismos por falta de medios, los resultados prácticos por nosotros conocidos han sido buenos.

Conforme los edificios crecían en altura en Benidorm y superaban las 20 plantas, la deformabilidad y los esfuerzos se incrementaban desmesuradamente y fue preciso acudir a otros sistemas estructurales, más allá de los tradicionales pórticos de la arquitectura convencional.

El sistema de pantallas-ménsula (Shear Wall), con y sin pórticos colaborantes y en todas sus variantes, suelen ser el sistema estructural más idóneo que puede plantearse en Benidorm para cubrir el campo de los edificios entre 15 y 50 pisos de altura, dado el diseño funcional de sus plantas.

No obstante, la pantalla clásica maciza tiene una aplicación espléndida en los edificios de viviendas de Benidorm y en hoteles, aunque en estos últimos sea obligado puentear los bajos por exigencias funcionales en algunos casos. Este sistema ha sido el más conveniente, antes de disponer de los medios de cálculo actuales, al poder controlar con mayor precisión la resistencia de los edificios a los empujes del viento.

La solución de pantalla maciza es la que habitualmente hemos empleado en edificios de apartamentos en Benidorm y en el hotel Bali-III, con un resultado económico excelente.

El análisis de los edificios con pantallas se hacía cómoda y rápidamente como ménsulas, repartiendo las fuerzas horizontales que origina el viento proporcionalmente a sus rigideces, teniendo siempre en cuenta los posibles desvíos que se producen, cuando el centro de empujes no coincide con el centro de torsión de las pantallas en planta.

Cuando existen pantallas y pilares acoplados en las plantas, siempre puede entrar la duda en despreciar el efecto resistente de los pórticos a efectos horizontales, porque si bien las pantallas por su rigidez se llevan casi todos los esfuerzos en las plantas bajas reteniendo a los pórticos, en las plantas altas sucede todo lo contrario y se apoyan sobre los mismos, pudiendo dar origen a pequeños desarreglos estructurales. No obstante, la experiencia nos dice que los posibles daños que podrían presentarse por el efecto mencionado son más teóricos que reales cuando el acoplamiento se produce a través de forjados flexibles. No hemos detectado patologías conocidas por esta causa.

Finalmente, también se considera dentro del esquema estructural de pantallas-ménsulas, los núcleos resistentes que pueden configurarse funcionalmente bordeando los huecos destinados a las comunicaciones verticales entre plantas: ascensores, escaleras y posibles núcleos para alojar instalaciones.

Las secciones resistentes que se obtienen son de tipo celular o multicelular, intentando ubicarlas lo más simétrica y centradas posibles dentro de la planta del edificio, para obviar las torsiones generalizadas que se presentan cuando no se sitúan correctamente.

Haber tenido la enorme fortuna, hablando a nivel puramente técnico, de participar en el diseño, análisis y construcción de las estructuras de los edificios más destacados en cuanto a su altura se refiere en Alicante y Benidorm, nos es posible contar su historia siendo protagonistas.

La historia y descripción de la evolución de las estructuras de estos edificios podemos resumirla de forma breve y sencilla. Los primeros edificios de altura, que superaban las 20 plantas, como el Apartahotel de Alicante, fueron construidos con estructuras metálicas. El coste del acero laminado, el miedo al fuego, la conservación y, sobre todo, los movimientos

horizontales que experimentan estos edificios, al no poderse arriostrar suficientemente por problemas básicamente de tipo funcional (no debe olvidarse que son edificios levantados en solares pequeños y destinados a viviendas), obligó a desarrollar al máximo la tecnología convencional de las estructuras de hormigón armado tradicionales, ampliamente dominada por los constructores locales de tipo medio.

Las primeras estructuras de hormigón que empezaron a construirse en el Levante estaban configuradas a base de pórticos con vigas rectangulares acusadas en los techos y forjados de tipo tradicional de viguetas y piezas de aligeramiento cerámicas, o de hormigón.

El buen comportamiento que tuvieron estas primeras estructuras permitió ir arañando centímetros a los cantos de las vigas y simultáneamente comprobar que los edificios seguían comportándose muy bien frente al viento.

El descubrimiento del forjado reticular en los años 70 por una empresa local de estructuras llamada ECISA, rápidamente imitada por las restantes, hizo posible que se comenzara a colocar este tipo de forjados en vez de vigas en los edificios convencionales, y también poco a poco en los edificios de cierta altura.

Actualmente, el forjado reticular en Alicante es, indiscutiblemente, el forjado rey por excelencia debido a su funcionalidad, sencillez y economía.

Los primeros pasos con el forjado reticular en los edificios de altura, no estaban exentos de un cierto temor, rápidamente superados al comprobar cómo pasaban magníficamente la prueba de los vientos que superaban los 100 km/h, sin problemas de tipo alguno.



Fig. 11. Estructura típica de pórticos virtuales empleada en Benidorm entre las 15 y 20 plantas

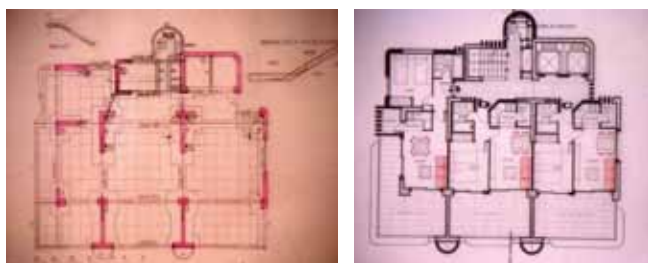


Fig. 12. Edificios Tobago idénticos pero resueltos con un H-17,5 y un H-22,5

Pronto se comprobó que se podían construir estructuras muy económicas de 10 a 20 plantas, empleando pilares apantallados de valor medio $0,3 \times 1,50$, con un forjado reticular de canto 27 cm (24 + 3 cm de capa de compresión) incluso sin mallazos de reparto, haciéndolo trabajar conjuntamente con los mismos, siempre que se emplearan hormigones de resistencia superior a la de 18 Mpa, resistencia esta última comúnmente empleada en la edificación en España en los años 70 y 80 del pasado siglo.

Los edificios Tobago, levantados en la playa de San Juan, supusieron un magnífico laboratorio a escala real, puesto que permitieron demostrar lo dicho anteriormente y poner de manifiesto a los constructores locales que, abandonar la resistencia tradicional de 18 Mpa para el hormigón en favor de resistencias mayores, resultaba mucho más económico para este tipo de edificios.

El primer edificio Tobago se construyó con un hormigón H-175 y el segundo se recalculó de nuevo con un tímido H-225, resultando más económica la estructura. Ambos edificios se encuentran en servicio sin incidencias.

Posteriormente se construyeron los primeros edificios en España, y posiblemente en toda Europa, con resistencias en los hormigones de 60, 70 y 80 MPa, en Alicante, Benidorm y Calpe.

El esquema estructural de pilares apantallados colocados en las divisiones de las viviendas, trabajando conjuntamente con un forjado reticular por efecto pórtico, se ha repetido sistemáticamente en la mayoría de los edificios, sin que hasta la fecha hayan presentado problemas.

La esbeltez de estas estructuras, comprendida entre 5 y 7, sin pretender comparar lo no comparable, se sitúa en el mismo rango de las esbelteces de los rascacielos americanos.

A título meramente anecdótico, el World Trade Center de Nueva York posee una esbeltez de 6,5 y el John Hancock Center de Chicago la tiene de 6,70.

Mientras rutinariamente construíamos edificios con el sistema descrito, se pudo proyectar la estructura de un edificio pequeño en la playa de San Juan, de 14 pisos y 5 metros de base, esbeltez 8; donde el forjado reticular, calculado exclusivamente a cargas verticales, demostró que podían perfectamente, de esta forma, transmitir los esfuerzos de viento a las pantallas haciéndolas trabajar en ménsulas verticales sin refuerzos adicionales dignos de consideración.

La única precaución que se adoptó en el forjado que hemos generalizado en las estructuras de estos edificios es la de



Fig. 13. Torre Levante

no cortar totalmente las armaduras negativas de los nervios. Este pequeño edificio permitió analizar y estudiar las estructuras donde todos los esfuerzos debidos al viento se encomiendan exclusivamente a pantallas-ménsulas.

En la línea anterior, se pudo proyectar en colaboración con el arquitecto Carlos Gilardi un edificio ciertamente singular, como es Torre Levante.

Torre Levante posee una planta de 220 m² y 35 forjados de tipo reticular con una esbeltez de 9.

La forma de las pantallas en Torre Levante tuvo que amoldarse a la distribución arquitectónica y al considerable valor que el m² tiene en las plantas bajas, cuando estas se encuentran en primera línea frente al mar; su escaso tamaño obligó a tener que arriostrarlas fuertemente entre sí, con vigas de piso a piso en las plantas 1, 8, 18 y 35, conformando una especie de ménsulas Virendeel, para reducir las deformaciones horizontales a un nivel razonable comprendidas entre 14 y 18 cm ($h/800$).

En Torre Levante, el núcleo de ascensores descentraba la respuesta del edificio al viento y se tuvieron que absorber las torsiones del edificio con un pórtico en fachada, formado por las cabezas de las pantallas y una viga de canto 1 m, que se disimulaba formando el parapeto de las terrazas y ayudaba a

resistir, con sus prolongaciones, los importantes voladizos de las terrazas laterales.

El edificio lleva más de 20 años en servicio sin ningún tipo de problemas, salvo las que se produjeron en los revestimientos monocapa al construirse sin juntas.

El auge de la construcción de apartamentos en torno a los 60 m² en Benidorm en la década de los 80, ha impuesto un tipo de edificio modulado a unos 6 metros, con el fondo exclusivo para alcanzar la mencionada superficie.

La estructura que mejor se adapta a estos edificios, a nuestro juicio, es muy simple y sencilla: pantallas transversales ubicadas en las divisiones de los apartamentos, arriostradas con un forjado reticular, y encargadas de recibir en ménsula todo el viento que actúa perpendicularmente a las fachadas mayores. En el sentido transversal a las pantallas (lado mayor del edificio), la estructura se calcula como un inmenso pórtico de 5 a 6 vanos, donde la viga es el propio forjado reticular, con un ancho coincidente con el del edificio.

El forjado que se empleó es siempre de tipo reticular, con un canto de 24+3 cm, muy adecuado para las luces entre pantallas en torno a los 6 m, y también, por la estabilidad que proporciona con su peso a estos edificios tan esbeltos.

El exponente más representativo que hemos proyectado en la línea anterior, lo constituyen las Torres de Soinsa, del arquitecto José Antonio Nombela. Sus pantallas tienen un canto de 8,50 m y poseen unas pequeñas alas en sus extremos, necesarias para arrojar las armaduras y crear la inercia suficiente frente a las deformaciones horizontales, en definitiva pantallas dobles-T (ver figura 5).



Fig. 14. Torres Soinsa

La Torre de Soinsa más alta posee 38 pisos y, con una esbeltez de 13, duplica las esbelteces habituales de los rascacielos americanos. La torre pequeña posee 28 pisos y una superficie en planta de 180 m².

El modelo estructural mencionado se ha repetido en cuatro edificios de Edibesa de 28 pisos, proyectados por el arquitecto Ricardo Llácer, y en el Gran Hotel Bali III proyectado por los arquitectos A. Escario, F. Candel, R. Luelmo y F. Sanchís.

En los edificios más recientes, alejados de la costa, por problemas con las distribuciones y las nuevas formas arquitectónicas en planta, ha sido imposible resolver sus estructuras simplemente como ménsulas, empleando exclusivamente las pantallas, y se ha tenido que aplicar un sistema mixto de pórticos-pantallas, con un resultado económico peor, tal vez motivado por el diseño más complejo de los edificios.

Sin embargo, el sistema mixto de pórticos-pantallas para las tipologías de los edificios que se construyen en Alicante,



Fig. 15. Gran Hotel Bali III

no siempre tiene que resultar más costoso que los sistemas puros de pórticos o pantallas; depende mucho de cómo pueda encajarse en planta la estructura.

Con losas macizas y esta filosofía se ha resuelto recientemente el edificio Negurigane, Torre Lugano y el edificio residencial más alto y singular de Europa, el edificio In Tempo. **ROP**



Fig. 16. Torre Lugano



Fig. 17. Edificio In Tempo

La acción del viento sobre los edificios altos

José Meseguer

Doctor ingeniero Aeronáutico.

Catedrático de Universidad, IDR/UPM. E.T.S.I.A.E., Universidad Politécnica de Madrid



Sebastián Franchini

Doctor ingeniero Aeronáutico.

Profesor titular de Universidad, IDR/UPM. E.T.S.I.A.E., Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

En este artículo se presenta una breve reseña de los aspectos más relevantes de la problemática relacionada con las acciones del viento sobre edificios de gran altura. Por sus características, el viento que incide en este tipo de construcciones presenta complejos gradientes verticales de velocidad e intensidad de turbulencia. Por otro lado, la respuesta de los revestimientos y las estructuras depende de un gran número de parámetros geométricos, aerodinámicos y estructurales. Se exponen los métodos utilizados en ingeniería para acotar la incertidumbre en la estimación de las acciones resultantes.

Palabras clave

Edificios altos, acciones del viento, túnel aerodinámicos, capa límite atmosférica, aeroelasticidad

Abstract

The article provides a brief summary of the most relevant aspects of wind loading on tall buildings. Due to their characteristics, the wind affecting this type of building presents complex vertical wind speed gradients and turbulence intensity. Furthermore, the response of the cladding and structures depends on a large number of geometric, aerodynamic and structural parameters. The author outlines the methods employed in engineering to restrict uncertainties in the calculation of wind loading.

Keywords

Tall buildings, wind loading, aerodynamic tunnel, atmospheric boundary layer, aeroelasticity

1. Fundamentos

En aerodinámica, los edificios altos son las construcciones esbeltas (aquellas en las que la relación entre el cuadrado de la altura y el área de una sección o planta típica es mucho mayor que la unidad) que además tienen una altura real que es una fracción apreciable del espesor de la capa límite atmosférica, cuyo espesor varía entre 600 m y 1000 m dependiendo del área en consideración. En la capa límite terrestre la velocidad del viento crece con la altura, mientras que la intensidad de la turbulencia decrece, de modo que el viento que incide sobre una construcción, sea alta o baja, no es estacionario ni uniforme.

Si el edificio no es alto, las cargas de viento sobre la estructura y sobre los revestimientos se pueden determinar aplicando la normativa de cargas de viento, donde la variación con la altura de la velocidad y la turbulencia se tiene en cuenta a través de varios coeficientes que afectan a la presión dinámica de cálculo. Si el edificio es alto, esta aproximación no es válida, y en todos los códigos se indican los límites de aplicación de los métodos consignados (un valor representativo de la altura máxima está en torno a 60 m), entendiéndose que, por encima de dichos límites, los valores que resultan de la aplicación de la norma son excesivamente conservadores.

Si la edificación es más alta, para conocer las cargas de viento se ha de acudir a ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos, incluso aunque el modelo sea muy rígido. Y si además el edificio fuera flexible, se debería tener en cuenta en los ensayos esta flexibilidad a fin de evitar posibles episodios aeroelásticos, asociados a que el viento real en el entorno del edificio no es uniforme ni estacionario, como se ha dicho.

La no estacionariedad de la corriente incidente puede ser debida a la turbulencia presente en el viento atmosférico, y también puede ser debida a que el cuerpo se encuentre inmerso en la estela producida por otro obstáculo situado corriente arriba. Pero existe todavía otra posibilidad y es que sea el mismo cuerpo el que produzca un comportamiento no estacionario en el fluido (aunque el cuerpo permanezca en reposo), como es el caso del desprendimiento de torbellinos alternados en cuerpos romos (de sección alejada de la de los perfiles aerodinámicos), torbellinos que son arrastrados por la corriente formando la estela turbillonaria conocida como calle de torbellinos de Von Kármán.

Debido al elevado número de parámetros que intervienen en los fenómenos dinámicos originados por el viento atmosférico, que atañen tanto a la causa perturbadora (turbulencia del viento, estela turbillonaria propia o estelas de otros cuerpos) como a las propiedades mecánicas de la edificación, dentro de las inestabilidades aeroelásticas se suelen distinguir diversos tipos, tales como desprendimiento de torbellinos, galope transversal, galope de estela, divergencia torsional, flameo y bataneo, si bien el primero (desprendimiento de torbellinos) no es estrictamente una inestabilidad que conduzca necesariamente al colapso de la estructura. En el caso de edificaciones de gran altura, quizás los fenómenos aeroelásticos más característicos son los asociados al desprendimiento de torbellinos y en menor medida el galope, transversal y de estela, y el bataneo de estela.

A pesar de las dificultades, el conocimiento sobre los fenómenos aeroelásticos en estructuras civiles ha alcanzado cierta madurez, posibilitando que existan recomendaciones de cálculo de acciones dinámicas del viento en muchas normas de viento (Kwon & Kareem, 2013; Steenbergen y otros, 2012), donde se proponen procedimientos de evaluación de la respuesta dinámica de estructuras ante los diversos casos de cargas aerodinámicas no estacionarias.

A la hora de afrontar los problemas aeroelásticos en las edificaciones, las posibilidades de actuar están ciertamente acotadas, ya que en muchas edificaciones además de los requisitos relativos a la propia integridad de la es-

tructura (evitar su colapso), el diseño está fuertemente condicionado por aspectos económicos y estéticos. Con todo, el problema de la respuesta frente al viento adquiere cada vez más protagonismo, y rara es la construcción de cierta importancia en la que este aspecto no es tenido en cuenta, siendo obligatorio en muchos casos demostrar qué diseño de la estructura frente a las acciones estáticas y dinámicas del viento es el adecuado.

Las vibraciones inducidas por el viento suelen ser, en general, combinaciones de los distintos tipos de acciones aerodinámicas descritas, y siempre en la interacción aeroelástica de una estructura con la turbulencia del viento atmosférico desempeña un papel importante. Como la energía de la turbulencia atmosférica es mayor en el rango de frecuencias bajas, los acoplamientos aeroelásticos sólo son posibles cuando la primera frecuencia propia de la edificación es baja, y además cuando el amortiguamiento de la construcción es pequeño.

Pero incluso en el caso de que no aparezcan inestabilidades aeroelásticas de ningún tipo, determinar la distribución de cargas de viento sobre una edificación inmersa en la capa límite terrestre no es un caso que se contemple en las normas de cálculo si la edificación es alta, debiéndose entonces acudir, como se ha dicho, a ensayos en túnel aerodinámico.

El uso de ensayos de túneles aerodinámicos descansa en el llamado principio de semejanza, que es ampliamente utilizado para obtener información acerca de las cargas de viento sobre un cuerpo real mediante ensayos con modelos a escala (Meseguer y otros, 2013). En términos generales, semejanza significa que todos los detalles geométricos que son de importancia aerodinámica deben ser reproducidos en el modelo a escala, y que los valores de algunos parámetros adimensionales característicos han de ser los mismos tanto en el flujo alrededor del modelo ensayado como en la realidad.

Los parámetros relevantes se determinan usando el conocido teorema π de Buckingham, que establece que si un problema depende de n variables, y estas variables contienen m dimensiones primarias (por ejemplo, masa, longitud y tiempo), el problema queda caracterizado por

$n - m$ grupos adimensionales que expresan relaciones entre fuerzas u otro tipo de relaciones (cinemáticas y geométricas). Estos grupos adimensionales, denominados números, permiten definir las distintas leyes de modelado a emplear en los ensayos aerodinámicos con modelos a escala, y definen las condiciones de equivalencia o de proporcionalidad entre las cargas de viento sobre el prototipo (la estructura real) y sobre el modelo de ensayo, fijando además las condiciones de ensayo del modelo y el procedimiento para la interpretación de los resultados y su aplicación a la estructura real.

Formalmente, las leyes de modelado se formulan considerando el número adecuado de parámetros adimensionales relevantes (obtenidos a partir de consideraciones físicas o a partir de la formulación matemática a través de un sistema de ecuaciones que proporcione una descripción apropiada de los fenómenos aerodinámicos en consideración). En las aplicaciones de la aerodinámica civil, el número de parámetros a considerar es tan grande que es imposible satisfacer todos ellos simultáneamente, por lo que, habitualmente, al modelar no se tienen en cuenta los parámetros cuya importancia es menor para la explicación del caso en estudio, reteniendo únicamente aquellos que son realmente significativos.

Asegurar la existencia de semejanza dinámica requiere que, en primer lugar, los modelos a ensayar y las correspondientes estructuras reales sean geoméricamente semejantes (en el sentido aerodinámico antes definido), de acuerdo con una cierta escala de longitudes. El flujo de fluido alrededor del modelo debe ser también semejante al flujo alrededor del cuerpo real, lo que se consigue cuando las fuerzas que actúan sobre una masa de aire están en la misma relación sobre el modelo que en la escala real. Existe una amplia variedad de fuerzas que pueden actuar sobre una partícula fluida (inerciales, de presión, viscosas, gravitatorias, etcétera), aunque la importancia relativa de unas frente a otras puede variar mucho dependiendo de los casos.

En el caso de los edificios, los criterios de semejanza se satisfacen si además de la semejanza geométrica se cumple la igualdad de los números de Reynolds y de Jensen correspondientes a los ensayos y a la realidad.

El número de Reynolds, $Re = U_x C / \nu$, es la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción, normalmente expresadas en función de parámetros geométricos (la longitud característica C) y del flujo (velocidad, U_x , y viscosidad cinemática, ν). Para conservarlo, si el fluido de trabajo es el mismo en ambos flujos, hay que mantener el valor del producto $U_x C$, lo cual suele ser imposible en el caso de las edificaciones, pues si la escala del modelo fuera, por ejemplo, 1/100, la velocidad en los ensayos con el modelo tendría que ser cien veces mayor que en la realidad. Afortunadamente, si se trata de cuerpos no fuselados y con aristas, como suelen ser los edificios, las condiciones de ensayo relativas al número de Reynolds se pueden relajar considerablemente, pues en cuerpos con aristas enseña la experiencia que los coeficientes aerodinámicos de fuerzas y momentos resultan ser prácticamente independientes del valor del número de Reynolds, una vez que este parámetro ha superado un cierto valor crítico. La razón de este comportamiento es que, en obstáculos con aristas o con bordes muy poco redondeados, la capa límite se desprende en las aristas de barlovento para velocidades moderadamente pequeñas, situación que no cambia al aumentar la velocidad.

Con el número de Jensen, $Je = C/z_0$, se define la relación entre una longitud característica del modelo, C , y la longitud de rugosidad del terreno, z_0 , y con su conservación se pretende que la turbulencia del flujo en el túnel aerodinámico tenga la misma forma que la del viento natural. Para que se cumpla esta otra ley de semejanza se debe simular satisfactoriamente el perfil de velocidades en la parte inferior de la capa límite, en la cual la rugosidad superficial es la escala de longitud dominante. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que posiblemente en la realidad el número de Jensen varíe a lo largo del tiempo, pues según crezca la vegetación o se levanten o modifiquen otras edificaciones próximas la longitud de rugosidad variará (normalmente crece, y en consecuencia el valor del número de Jensen disminuye).

En el caso de estructuras con posibilidad de que sufran oscilaciones excitadas por el viento, además de los parámetros de semejanza relativos a los ensayos en túnel de las estructuras estacionarias, hay otros característicos del movimiento oscilatorio que también hay que tener

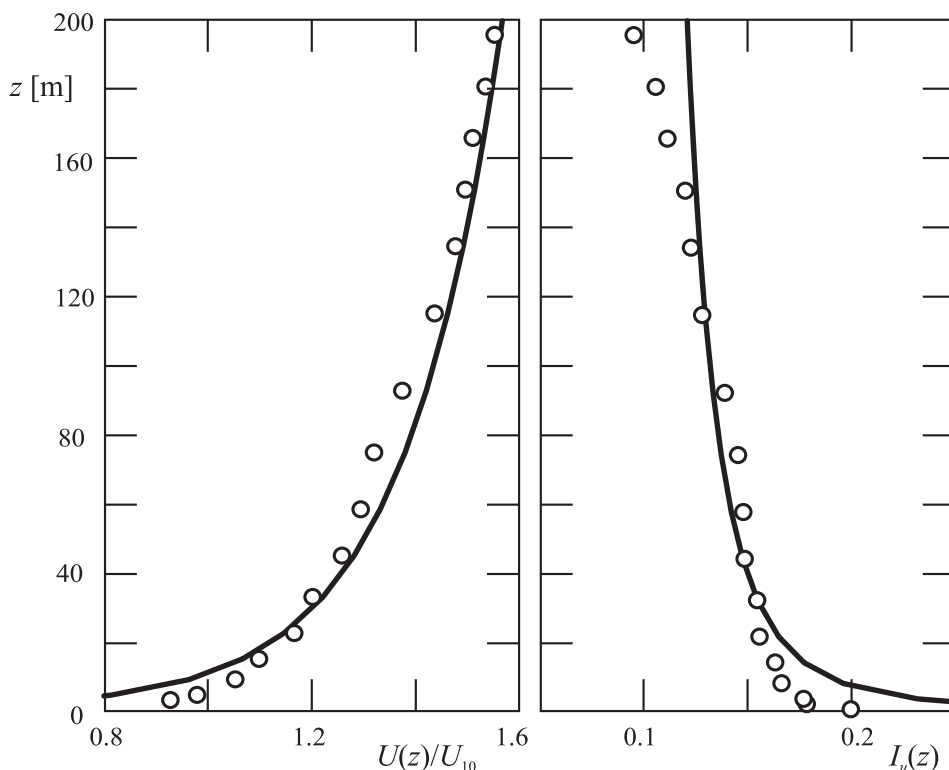


Fig. 1. Variación con la altura sobre el suelo, z , de la velocidad horizontal adimensional en una capa límite terrestre típica, $U(z)/U_{10}$, y de la intensidad de turbulencia, $I_u(z)$, en la cámara de ensayos del túnel ACLA16 de IDR/UPM. U_{10} es la velocidad normalizada a una altura de 10 m

en cuenta. En particular la distribución de masas y de momentos de inercia de la estructura, el coeficiente de amortiguamiento, y las propiedades elásticas.

2. Ensayos en túnel

En razón de lo expuesto es evidente que a la hora de encarar el ensayo en túnel de un edificio surgen diversas disyuntivas, apareciendo en primer lugar en el árbol de decisiones las relativas a la simulación en el túnel de la capa límite terrestre, principalmente la selección del tipo de capa límite a reproducir dependiendo de las particularidades del terreno donde se haya de levantar la edificación. La capa límite en el túnel se simula colocando corriente arriba del modelo de medida los elementos adecuados para alcanzar el perfil deseado, normalmente elementos que modifican verticalmente el área de paso del flujo para lograr el perfil de velocidad y elementos de rugosidad superficial que proporcionan el perfil de turbulencia (figura 1). La definición de estos elementos suele formar parte del conocimiento reservado de cada

institución, pues generalmente está adaptada a cada túnel en particular (figura 2).

Con la opción de capa límite simulada los resultados de los ensayos son los coeficientes de presión adimensionalizados con el valor de una presión dinámica de referencia medida a una cierta altura, con lo que se obtiene directamente ya la dependencia con la altura del campo de presiones sobre las superficies correspondientes a los perfiles de velocidad y turbulencia empleados en los ensayos.

La siguiente decisión atañe a las características aeroelásticas del modelo de ensayos, que puede ser rígido o flexible en función de la rigidez del edificio real. Los modelos rígidos se emplean para la medida de los coeficientes de presión en fachadas y cubiertas, y los flexibles para determinar la respuesta aeroelástica de la edificación en su conjunto. Dentro de esta segunda categoría (modelos flexibles) existe a su vez otra distinción, pudiéndose

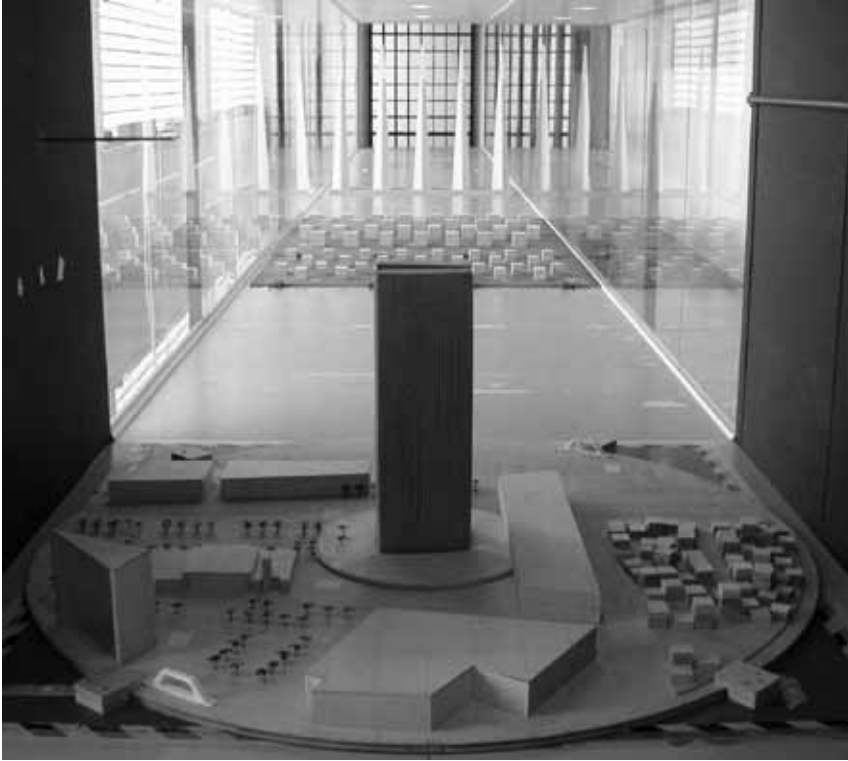


Fig. 2. Vista de un modelo de edificio alto y de su entorno próximo en la cámara de ensayos del túnel ACLA16 de IDR/UPM. En la fotografía se muestran también los elementos previos al modelo para generación y acondicionamiento de la capa límite: cuerpos de sección triangular y rugosidad superficial

optar, con las necesarias gradaciones, entre un modelo realmente aeroelástico en el que se simulen a escala las propiedades mecánicas de las distintas partes de la edificación, con las dificultades que eso implica, o bien, y esta es la opción más empleada, se utiliza un modelo rígido colocado sobre una plataforma elástica en la que mediante muelles, amortiguadores y masas apropiadas se ajustan las escalas de masa, rigidez y amortiguamiento correspondientes (en la figura 3.15 de Meseguer & Sanz (2012) se muestra el esquema de una plataforma elástica que cumpliría los requisitos establecidos).

3. Amortiguamiento de los efectos dinámicos

Cuando se ha de actuar sobre un problema aeroelástico son posibles dos puntos de vista diferentes, estructural o aerodinámico (Tamura, 1998). En el primer caso se puede tratar de rigidizar la estructura (para lograr que la frecuencia de resonancia sea elevada, de modo que la velocidad crítica para cualquier tipo de inestabilidad sea mayor que la velocidad máxima esperada en el lugar considerado), o

bien aumentar el amortiguamiento de la estructura (para disminuir la amplitud de las oscilaciones).

Si lo que se pretende es modificar la respuesta dinámica, puesto que una de las causas de esta respuesta es la formación de estelas de torbellinos coherentes a lo alto de la edificación, la principal idea es actuar sobre el desprendimiento de los torbellinos de manera que las fuerzas aerodinámicas asociadas varíen de unas secciones a otras tanto en magnitud como en frecuencia. Para lograrlo se puede modificar la geometría del cuerpo, añadiendo protuberancias, que alteren la bidimensionalidad del cuerpo, dificultando por tanto la formación de calles de torbellinos uniformes y coherentes a lo largo de la estructura, de forma que el fenómeno sea más aleatorio. Otra posibilidad, más común en edificios altos, es hacer que la forma de la sección del edificio cambie con la altura, pues de este modo cambia también con la altura la frecuencia de los torbellinos (figura 3).

Otra posibilidad para reducir la vibración causada por el viento en estructuras pasa por el empleo de dispositivos atenuadores que, en general, pueden ser de dos tipos: de masas sintonizadas con la frecuencia de vibración de la estructura, o amortiguadores, tanto viscoelásticos como hidráulicos. Los primeros consisten en una gran masa (normalmente hormigón o plomo) situada en lo alto del edificio. La masa suele descansar sobre apoyos hidráulicos que permiten su desplazamiento horizontal, y suele estar conectada a la estructura del edificio mediante actuadores hidráulicos o neumáticos, ajustados para que la masa oscile con la misma frecuencia que la frecuencia natural del edificio, pero en contrafase. Los disipadores viscoelásticos son elementos amortiguadores pasivos que se disponen en puntos seleccionados de la estructura. Este tipo de amortiguadores tiene ya una larga historia, habiéndose utilizado tanto en edificios como en puentes. En Meseguer y otros (2013) se presentan ejemplos de estos tipos de amortiguadores. **ROP**

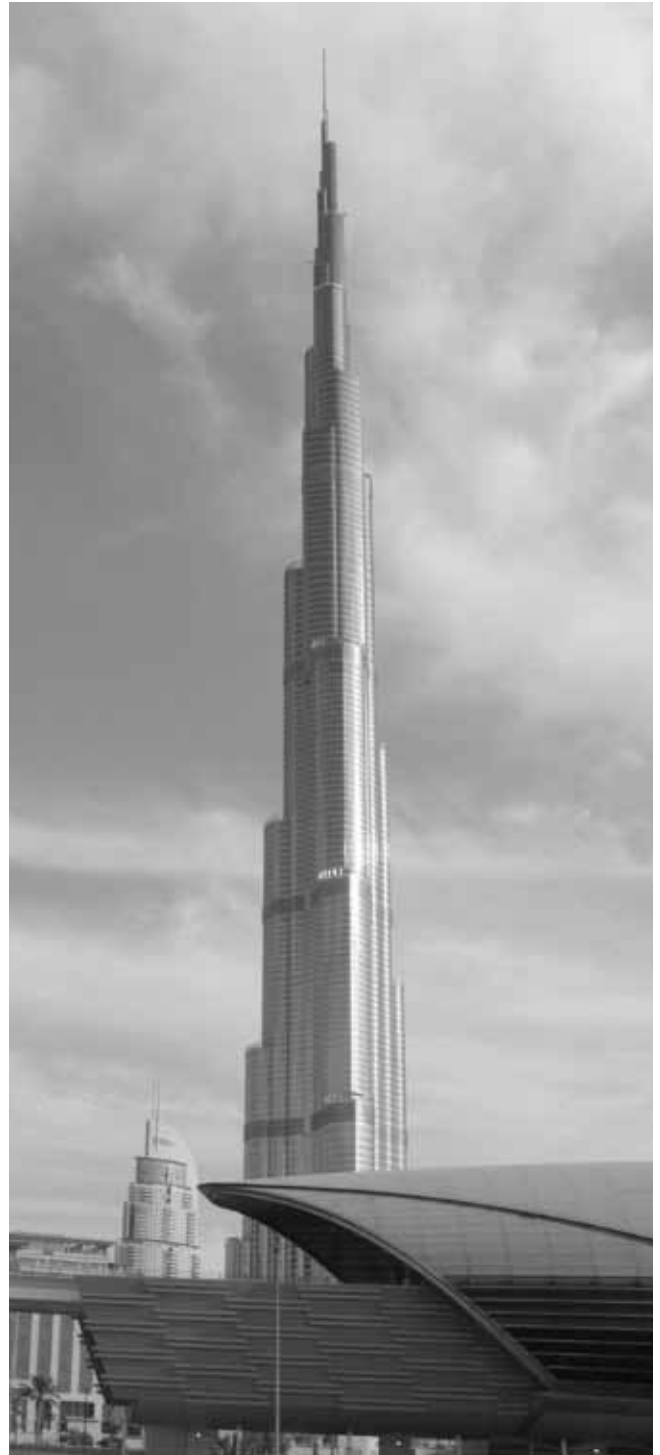


Fig. 3. Fotografía de un edificio alto (Burj Khalifa, Dubái). Obsérvese que la forma y sección de la edificación va cambiando con la altura, para evitar la formación de una estela turbillonaria coherente

La seguridad ante incendio en edificios altos: un enfoque múltiple



Javier Unanua
Ingeniero Industrial



George Faller
Ingeniero Civil

Resumen

Los edificios altos requieren de un tratamiento específico en lo que concierne a la seguridad ante incendio. Una estrategia de seguridad ante incendio debe tratar todos los objetivos de seguridad, de los cuales, la resistencia al fuego es uno de ellos pero no el único. El uso de técnicas y tecnologías cada vez más avanzadas de la mano de la Ingeniería de Seguridad ante Incendio permite abordar de una manera novedosa la seguridad ante incendio, aportando soluciones óptimas que permiten un equilibrio entre coste y expectativas de los agentes intervinientes en el proceso de la edificación.

Palabras clave

Evacuación por ascensores, diseño basado en prestaciones, resistencia al fuego de la estructura, CEIYS, acceso para CEIYS, ISAI, sectorización, propagación por fachada, incendio, 'spalling'

Abstract

Tall buildings require specific treatment with respect to fire safety. A fire safety strategy should cover all safety objectives, including but not purely limited to fire resistance. The use of ever more advanced techniques and technologies brought about by Fire Safety Engineering has made it possible to tackle fire safety in a far more innovative manner and has provided optimum solutions to ensure the correct balance between costs and the expectations of the agents intervening in the building process.

Keywords

Lift evacuation, performance-based design, structural fire resistance, access for fire and emergency response services, ISAI, sectorization, façade spread, fire, spalling

Los siguientes aspectos son particulares en lo que concierne a la seguridad ante incendio de los edificios en altura y deben tenerse en cuenta a la hora de desarrollar estrategias de seguridad ante incendio globales:

- La intervención de los Cuerpos de Extinción de Incendio y Salvamento (CEIYS) está condicionada por las capacidades de sus medios de elevación.
- Se deben tomar medidas especiales para limitar la posibilidad de una propagación del incendio hasta que se haga incontrolable, instalando sistemas automáticos de control del incendio y garantizando la compartimentación, especialmente en fachada.
- El objetivo principal de la estabilidad estructural en este caso es evitar la ruina sobre los miembros de los CEIYS mientras estos actúan y reducir el riesgo de ruina en zonas urbanas con alta densidad de edificación.
- La evacuación del edificio se desarrolla durante un tiempo mayor que en edificios de baja y media altura, al deber efectuar los ocupantes largos recorridos verticales.
- El efecto chimenea ('stack effect') es más pronunciado que en edificios de baja o media altura dada la altura de las comunicaciones verticales y su efecto debe tenerse en cuenta a la hora de evaluar el movimiento de los humos y diseñar algunos sistemas como el de presurización de escaleras.

Propagación por fachada

El fenómeno de propagación del incendio por fachada es, sin duda, uno de los mayores riesgos que se presenta en edificios en altura dada la alta proporción de vidrio en su composición como es el caso de los muros cortina.



Fig. 1. Muro cortina dañado por un incendio

El enfoque tradicional de las normativas de seguridad ante incendio para limitar el riesgo de propagación por fachada ha sido la prescripción de petos o antepechos resistentes al fuego de unas dimensiones dadas en el encuentro entre forjados y fachadas.

La experiencia demuestra que la manera más eficaz de evitar la propagación vertical del incendio con muros cortina es la instalación de rociadores automáticos que cubran las plantas del edificio más una junta eficaz que impide la separación entre forjado y fachada una vez se inicie el incendio y se producen dilataciones en la carpintería sometida al fuego. Es, por tanto, un tema fundamental garantizar que tales juntas hayan sido ensayadas o calculadas para garantizar ese comportamiento.

Evacuación de edificios altos

Evacuación por fases

Una evacuación por fases es la alternativa a una evacuación simultánea y consiste en dar la orden de evacuar el edificio de manera progresiva. Primero se ordena evacuar a los ocupantes de la planta en la que se ha iniciado el incendio y de las plantas inmediatamente inferior y superior. Si es necesario recurrir a una evacuación total del edificio, se procede a evacuar los ocupantes en las otras plantas superiores con un cierto desfase.

Esta estrategia tiene varias ventajas:

- Se facilita la evacuación rápida de las plantas en mayor riesgo; estos ocupantes no comparten las escaleras con el resto de los ocupantes y, por tanto, evacuan más rápido al no verse entorpecido su avance en las escaleras.
- En caso de incendios de muy poca severidad que pueden ser controlados rápidamente o falsas alarmas, cuya frecuencia es mayor que la de incendios reales, se limita la evacuación a las zonas estrictamente necesarias, reduciendo el tiempo de interrupción de la actividad del edificio.

Uso de ascensores

El uso de ascensores es una alternativa especialmente indicada para evacuaciones de discapacitados y de cualquier tipo de público en zonas con alta ocupación, especialmente si están situadas en las plantas altas. Asimismo, el uso de ascensores aporta ventajas cuando se hace necesaria una evacuación simultánea en situaciones de emergencia no relacionadas con incendios (amenazas de bomba, por ejemplo). Algunas normativas ya empiezan a recomendar el uso de ascensores para evacuación en edificación en altura para todo tipo de público.

Acceso de los miembros de los CEIYS

La intervención de los CEIYS requiere de viales apropiados, accesos a la edificación que permitan su despliegue, medios



Fig. 2. Modelado de evacuación de un edificio alto

para acceder dentro de la edificación hasta los focos de incendio y medios de extinción y suministro de agua adecuados para atacar el incendio desde dentro y fuera del edificio.

Una de las características obvias de los edificios en altura es que las escalas de los vehículos de los CEIYS no son capaces de cubrir toda la altura. Por tanto, se debe proveer de los medios necesarios para que puedan intervenir en condiciones aceptables desde dentro.

Actualmente, hay un consenso mundial sobre el uso de ascensores para los CEIYS. La ventaja principal del uso de ascensores es la rapidez, se acorta el tiempo necesario antes de acometer las operaciones de ataque del fuego. El uso de ascensores en vez de escaleras permite ascender a los miembros de los CEIYS sin interferir con la evacuación, que puede estar produciéndose aun cuando llegan al edificio. Además se permite a los miembros de los CEIYS atacar el incendio en condiciones físicas mejores que si tuvieran que subir sus equipos por las escaleras.

En países como el Reino Unido el uso de ascensor de emergencia va ligado al concepto más amplio de 'núcleo de lucha contra incendios'. Se entiende como tal un núcleo que dota a los bomberos de acceso a todas las plantas del edificio, mediante ascensor y escalera de uso exclusivo (que puede también ser usada en la evacuación asistida del edificio de

los discapacitados) así como de los medios de extinción necesarios para el uso de los CEIYS.

El núcleo está aislado del resto de áreas del edificio por elementos resistentes al fuego y protegido frente al paso del humo por un sistema de presurización o por medio de otras medidas como vestíbulos ventilados. Los miembros de los CEIYS acceden desde el exterior del edificio en la planta de acceso mediante un paso protegido hasta llegar al núcleo de lucha contra incendios.

En España la normativa nacional prescribe el uso de bocas de incendio equipadas con mangueras de 25 mm para zonas de riesgo ordinario y columnas secas, alimentadas desde el exterior del edificio por las tomas en fachada. En otros países se introduce el concepto de columna húmeda. De esta manera, los miembros de los CEIYS pueden conectar sus mangueras a un sistema dentro de núcleo alimentado por aljibe y bomba propias del edificio y no depender de las capacidades de bombeo de sus camiones y el suministro de la red.

Resistencia al fuego de la estructura

Un fallo estructural en situación de incendio lleva a que se incumplan otras exigencias como la evacuación de los ocupantes, la propagación interior, la propagación a edificios adyacentes y la intervención de los bomberos.

Tradicionalmente, la exigencia de resistencia al fuego de la estructura se ha tratado en todos los países prescribiendo una duración mínima exigida frente a una curva normalizada tiempo-temperatura. El tiempo exigido está relacionado con la severidad del incendio propia del riesgo de la actividad y con las consecuencias de la ruina, que son mayores a mayor altura (principalmente, la seguridad de los miembros de los CEIYS y el riesgo para el entorno debido a la ruina de un edificio alto).

Por esta razón, las normativas de todos los países prescriben las mayores exigencias de periodo de resistencia al fuego para los edificios altos, que en España son de dos y tres horas en función del uso.

Enfoque tradicional y enfoque prestacional del tratamiento de la resistencia al fuego

La curva de incendio normalizada tiempo-temperatura se supone que es una idealización de las condiciones que se registran en un recinto una vez se produce un fuego totalmente generalizado. Esta curva, que proviene de principios del siglo XX, ha servido durante mucho tiempo para estandarizar las exigencias y el ensayo de las soluciones de protección pasiva que garantizaban esas exigencias. Estos ensayos, llevados a cabo en hornos de dimensiones limitadas, permiten conocer el comportamiento de elementos aislados (vigas y pilares) de unas dimensiones dadas.

Sin embargo, este enfoque tradicional basado en una curva normalizada y el comportamiento estructural de elementos aislados tiene una serie de inconvenientes:

- La curva de incendio prefijada, no tiene relación alguna con las propiedades del recinto que influyen en el desarrollo del incendio como la ventilación o la disipación térmica de los cerramientos del sector.
- La curva no tiene en cuenta la carga combustible, una vez esta empieza a agotarse la temperatura empieza a disminuir. Este hecho impide que en los hornos de ensayo no se estudie el comportamiento de las estructuras una vez se enfrían e inician la contracción.
- El ensayo de elementos aislados no tiene en cuenta el comportamiento global de la estructura que difiere del de un elemento discreto. En estructuras con un grado importante de hiperestaticidad, se produce una redistribución de los esfuerzos de manera que los elementos más calientes y por tanto con menor capacidad portante transfieren sus esfuerzos a otros elementos más fríos.

La evolución del conocimiento científico de la Ingeniería de Seguridad ante Incendio (ISAI) ha permitido desarrollar nuevas metodologías y técnicas para estudiar el comporta-



Fig. 3. Horno de ensayo (cortesía de CIDEMCO)

miento de las estructuras en caso de incendio. Este avance ha permitido aplicar el principio del diseño basado en prestaciones al análisis de la resistencia al fuego de la estructura. Este enfoque permite verificar el cumplimiento de las exigencias normativas para soluciones de protección pasiva alternativas a las soluciones tradicionales.

El diseño basado en prestaciones requiere un proceso que se puede resumir en las siguientes etapas:

1. Definir unas metas y objetivos que el sistema estructural debe cumplir, incluso más allá del cumplimiento de la normativa.
2. Establecer los criterios de aceptación.
3. Definir los supuestos de incendio y caracterizarlos en los escenarios de incendio de cálculo.
4. Elegir un modelo de cálculo de incendio, ya sea empírico o avanzado. Se debe llevar a cabo un estudio de sensibilidad para estudiar qué variables tienen impacto en la evolución del incendio.
5. Calcular la transferencia de calor a los elementos estructurales en función de su exposición particular.
6. Verificar el comportamiento de la estructura ante esas acciones térmicas considerando el deterioro de las propiedades resistentes con el calentamiento.
7. Comprobar el cumplimiento de los criterios de prestaciones y, en caso de no cumplirlos, proponer soluciones nuevas y chequearlas siguiendo el proceso.

El panorama que se abre al proyectista es amplio a la hora de abordar la verificación de la exigencia de resistencia al fuego de la estructura, pudiendo ir desde métodos tradicionales, que permiten dar una solución con poco coste de ingeniería pero transmiten poca información sobre el comportamiento real de la estructura en caso de incendio hasta métodos más avanzados que requieren un mayor esfuerzo de proyecto, pero proporcionan mayor información, permitiendo estudiar soluciones optimizadas de protección pasiva.

Estructuras de hormigón

El hormigón se caracteriza por su baja conductividad térmica, por lo que en situación de incendio se produce un

calentamiento lento. Las secciones de hormigón mantienen durante periodos prolongados su resistencia, siendo el calentamiento de las armaduras de acero el que conduce a la ruina de los elementos estructurales. Se puede decir que, en general, las estructuras de hormigón armado garantizan la exigencia de resistencia al fuego de la estructura para periodos altos sin necesidad de recurrir a medios adicionales de protección.

No debe, sin embargo, obviarse el '*spalling*'. Se trata de un proceso físicoquímico que ocurre en los elementos de hormigón armado sometidos a velocidades de calentamiento elevadas o cuando alcanzan altas temperaturas. El '*spalling*' es de especial relevancia en el hormigón de alta resistencia (HAR) utilizado en edificación en altura. Por sus características el HAR es más propenso al '*spalling*'.

El resultado final es un deterioro físico de los elementos expuestos al incendio que se manifiesta con el desprendimiento de fragmentos de hormigón de la superficie. El '*spalling*' se considera una causa de fallo del hormigón al conllevar este desprendimiento la disminución de la protección de la armadura o, en ocasiones, la exposición directa de las barras de armadura de acero. Una vez ocurre esto, el acero se calienta muy rápidamente y pierde sus propiedades resistentes en muy poco tiempo, pudiendo originarse la ruina del elemento estructural.

De todas las medidas existentes para paliar el efecto del '*spalling*' la adición de fibras de polipropileno parece la más apropiada para estructuras de HAR, la normativa europea recomienda valores de dosificado, aunque sería apropiado un estudio detallado de cada caso.

Estructuras de acero

El acero, como material metálico se caracteriza por su alta conductividad, una vez se someten los perímetros de las secciones a calentamiento, se produce un incremento rápido de la temperatura. Este incremento produce una reducción de las propiedades resistentes. Por este hecho, secciones de acero no protegidas, si se considera su contribución como elementos aislados, tienen unas resistencias al fuego frente a la curva normalizada bajas y requieren de medios de protección pasiva para garantizar altas exigencias de resistencia al fuego.

Como se ha explicado previamente, se puede recurrir a estudios basados en prestaciones para justificar niveles de pro-

tección alternativos a la aplicación de la exigencia normativa de resistencia al fuego. El acero es un material predecible en situación de incendio, tras años de investigación se dispone de tablas de propiedades con la temperatura que permiten modelar su comportamiento.

Estructuras mixtas

En el caso de las estructuras mixtas, la propia naturaleza de las secciones colabora en la resistencia al fuego de la estructura. El hormigón sirve de aislante, reduciendo el incremento de la temperatura en el acero y, por tanto, retardando su pérdida de resistencia.

Para el tratamiento de las estructuras de forjados mixtos con chapa colaborante y vigas de acero existen varias soluciones de diseño y verificación posible. Los métodos convencionales se basan en la protección del forjado con un sistema pasivo proyectado por su parte inferior o la introducción de una barra de armadura en el nervio que permita reemplazar la resistencia a tracción de la chapa que se pierde una vez esta alcanza altas temperaturas en las fases iniciales del incendio.

Existe un método innovador basado en la ISAI y el conocimiento desarrollado en proyectos de investigación. Si se garantiza una resistencia al fuego elevada de los pilares y de las vigas principales y se toman medidas de diseño para garantizar la ductilidad del forjado de hormigón, puede prescindirse o reducirse la protección de las vigas secundarias embrochadas entre vigas principales. En situación de incendio, las vigas secundarias se calientan rápido, experimentan grandes deformaciones y dejan de contribuir a la resistencia del conjunto estructural. El forjado entra en un mecanismo de catenaria que traslada los esfuerzos hacia las vigas principales y estas a los pilares. Vigas principales y pilares mantienen la estabilidad del conjunto. Este tipo de solución requiere de las apropiadas verificaciones mediante métodos de ISAI.

Conclusión

Como conclusión, podemos decir que la seguridad ante incendio de los edificios en altura presenta aspectos de particular importancia que las normativas de edificación tradicional no abordan siempre de manera idónea. La ISAI es un método ingenieril que permite reconocer los temas claves y buscar soluciones adecuadas para abordarlos. **ROP**

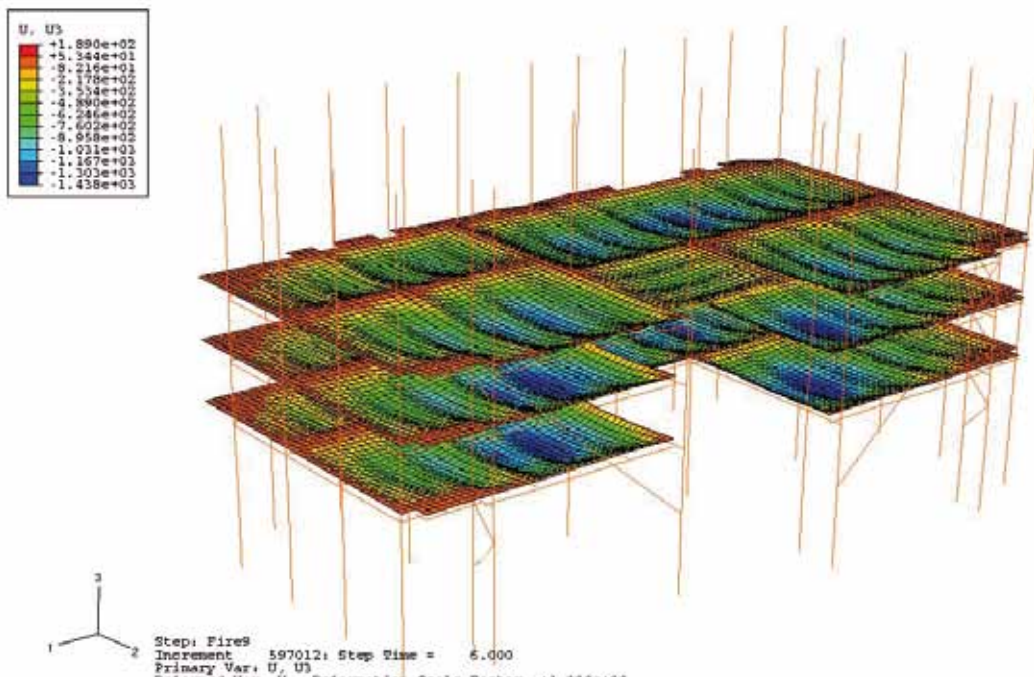


Fig. 4. Modelo de elementos finitos de forjados mixtos de un edificio alto sometidos al incendio

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.

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.

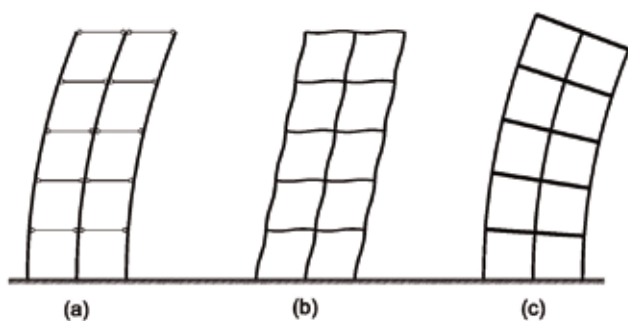


Fig. 1. Deformación de una estructura pórtico ante acciones laterales en los casos: a) vigas de rigidez despreciable; b) vigas de rigidez normal; c) vigas muy rígidas

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-

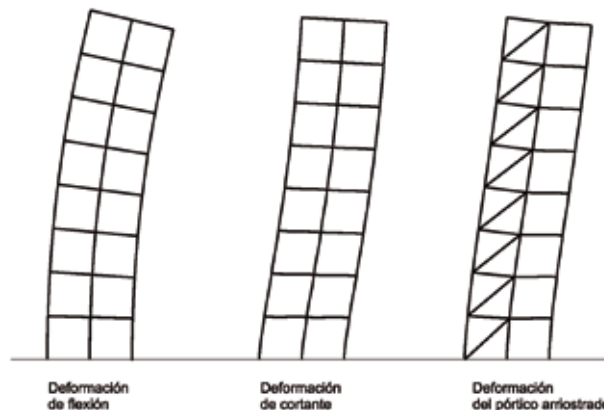


Figura 2. Deformación del pórtico arriostrado

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).

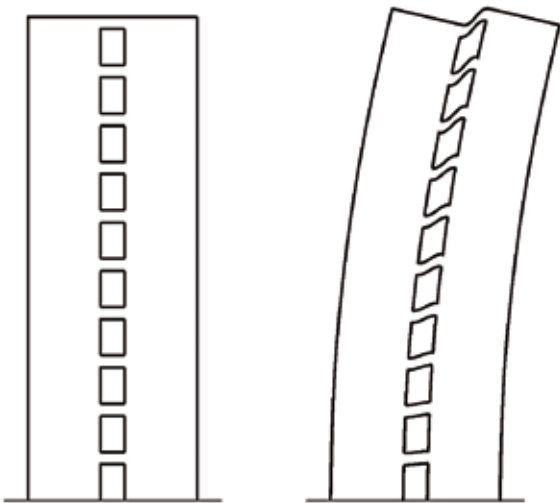


Fig. 3. Pantallas acopladas

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).

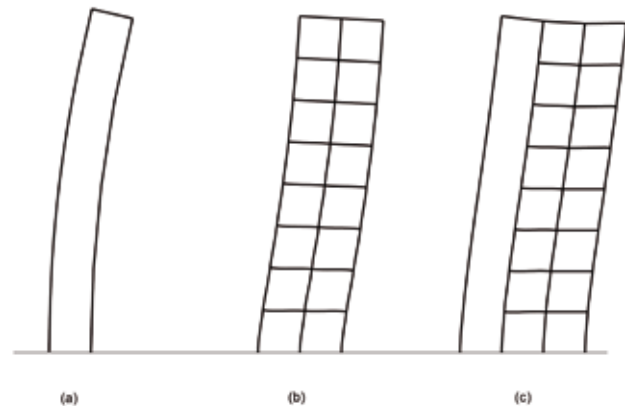


Fig. 4. Deformadas típicas de una pantalla (a), un pórtico (b) y una estructura pantalla-pórtico combinados (c)

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.

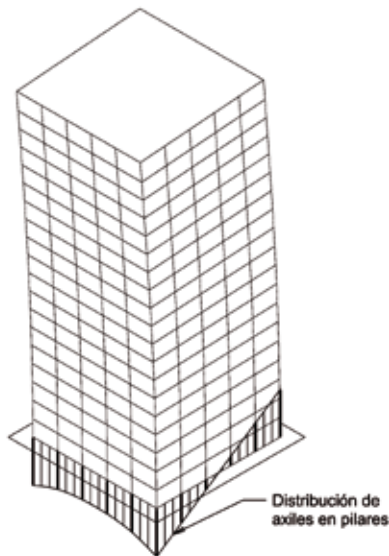


Fig. 5. Deformada típica de una estructura tipo tubo

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

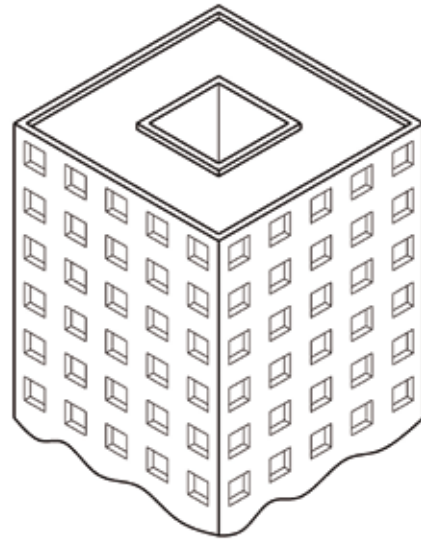


Fig. 6. Estructura tubo en tubo

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).

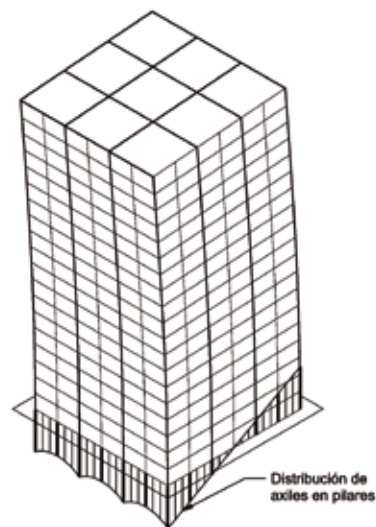


Fig. 7. Deformación del tubo múltiple

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):

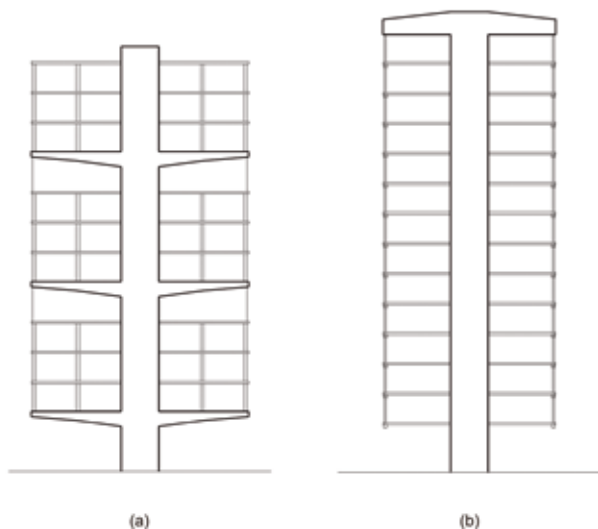


Fig. 10. Edificio con núcleo central y (a) plantas apoyadas o (b) plantas colgadas

- 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**

Las fachadas de los edificios altos



Carlos Prada Rodríguez

Ingeniero Superior Industrial.

Director de KREA Ingeniería y Consultoría

Resumen

En gran parte de los casos, las fachadas de los edificios altos se resuelven con muros cortina modulares que han de cumplir con las prestaciones requeridas a toda envolvente. Sin embargo, en este tipo de construcciones, algunos de estos requisitos precisan de un nivel de exigencia superior al de las fachadas de un inmueble convencional, como ocurre con determinadas necesidades estructurales o térmicas. Además la sostenibilidad es un factor en alza de consideración especialmente necesaria y conveniente durante el diseño de las fachadas de este tipo de edificaciones.

Palabras clave

Muro cortina, prestaciones, sostenibilidad

Abstract

Modular curtain walls are frequently used in the facades of tall buildings. While these logically have to meet the performance standards required of all facade systems, they are subject to a series of additional requirements that place far higher demands on these systems than the facades of conventional buildings, this being particularly so with respect to certain structural or thermal requirements. Sustainability is a further factor that is particularly necessary and convenient to consider during the design of facades in these types of buildings.

Keywords

Curtain walls, performance, sustainability

1. Breves reseñas históricas

A finales del siglo XIX y principios del XX se incorporan a la arquitectura materiales como el hormigón armado, acero, aluminio y vidrio plano que dan lugar a edificios extremadamente originales y avanzados.

Los avances en el campo técnico y científico hacen posible un estudio más exacto del comportamiento de los materiales, abriendo el camino a la realización de grandes obras ingenieriles. La evolución de la tecnología del vidrio y del metal crea nuevas posibilidades constructivas como la realización de amplios espacios vidriados. Las ventanas aparecen como elementos fundamentales en las composiciones arquitectónicas. Se abre la vía hacia las fachadas muro cortina.

La envolvente externa pierde la función de elemento portante. La piel del edificio, liberada de esta función, puede realizarse en vidrio continuo, así como en paneles de aluminio u otros materiales ligeros. La fachada se transforma en un mero elemento de revestimiento, no integrada con la estructura del edificio.

2. Sistemas de fachadas en edificios altos. El muro cortina

Existen muchas clasificaciones distintas de fachadas según su función, su sistema o su tipo de fabricación y montaje. Podríamos diferenciar entre fachadas ligeras y pesadas o fachadas portantes y autoportantes. También entre fachadas ventiladas, muros cortina, dobles pieles, abotonadas, sistemas pretensados, vidrio estructural, etc. Cada una de estas clasificaciones pueden tener o no subclasificaciones atendiendo a diferentes conceptos.

Dado que el propósito de este artículo no es el de explicar las diferentes clasificaciones de fachadas, sino el de analizar brevemente las fachadas de edificios altos, nos centraremos en el tipo que, habitualmente, presentan estos edificios: el muro cortina.



Proyecto de un rascacielos de vidrio en
Berlín en 1921



Instalación de muros cortina modulares. Central Market Redevelopment (Abu Dhabi)

Se puede definir muro cortina (*'curtain wall'*) como un sistema de fachada ligera autoportante independiente de la estructura principal del edificio. Generalmente, se consideran muros cortina a las fachadas continuas que pasan por delante de la estructura de los forjados, aunque también se podrían incluir aquí las fachadas situadas entre forjados (también llamadas fachadas panel) que tengan continuidad en el plano horizontal.

Atendiendo al sistema de fabricación y montaje, los muros cortina presentan dos sistemas principales: muro cortina tradicional (*'stick system'*) y muro cortina modular (*'unitized system'*). El muro cortina tradicional consiste en un sistema que no incorpora módulos prefabricados y en el que los componentes de la fachada se montan separadamente en obra. El muro cortina modular consiste en un sistema de módulos prefabricados, ensamblados en taller y montados en obra.

En el sistema modular, los distintos procesos de fabricación y ensamblaje se realizan en fábrica, bajo un estricto control de ejecución y unas condiciones ambientales controladas. De esta forma, se consiguen unas tolerancias de fabricación y acabados de calidad óptimos. Además, se minimizan los trabajos de puesta en obra, aumentando significativamente la rapidez de montaje y disminuyendo o eliminando la necesidad de medios de elevación auxiliares.

Los edificios en altura presentan, por lo general, una gran superficie de fachada que, unido al grado de repetición de elementos y a la necesaria garantía de calidad y velocidad de instalación, requieren en la mayoría de los casos el uso de un sistema modular de fachada.

3. Aspectos a considerar durante el diseño

La fachada constituye el principal elemento de defensa de un edificio contra los agentes exteriores. Algunas de las prestaciones que podría (no todas las fachadas han de cumplir con todas) tener que cumplir son las siguientes:

- Garantizar su estabilidad estructural.
- Garantizar los requisitos térmicos exigidos: transmitancia térmica, ausencia de condensaciones, temperatura interior, factor solar.
- Proteger al edificio y a sus ocupantes del ambiente exterior, garantizando la habitabilidad y el confort interno de sus usuarios.
- Garantizar las condiciones de servicio.
- Servir de barrera al agua y al aire.
- Garantizar la seguridad interna del edificio y seguridad frente a caídas.
- Garantizar una barrera pasiva contra el fuego.
- Garantizar los requisitos acústicos exigidos.
- Garantizar unas condiciones de luz natural determinadas y vistas a través de ella.

- Garantizar una barrera contra la contaminación.
- Presentar el aspecto estético deseado.
- Seguridad ante ataques de bomba.

Otros factores importantes que afectan al diseño son los siguientes:

- Presupuesto (fondos disponibles, financiación, flujo de caja, etc.).
- Tiempo (programa, envíos, fabricación, etc.).
- Normativas y requisitos legales (normativas, códigos, etc.).
- Administrativos (licencias, procedimientos, etc.).
- Conocimientos disponibles.
- Facilidad de construcción (velocidad de montaje, accesos, etc.).
- Durabilidad (vida útil).
- Mantenimiento y reposición (cómo y cuándo).
- Control de calidad (normativa, acabados, supervisión, etc.).
- Sostenibilidad

En los epígrafes siguientes comentaremos alguno de estos factores.

3.1 Estabilidad estructural

Garantizar la estabilidad estructural es un requisito esencial a la hora de afrontar el diseño de una fachada de un edificio.

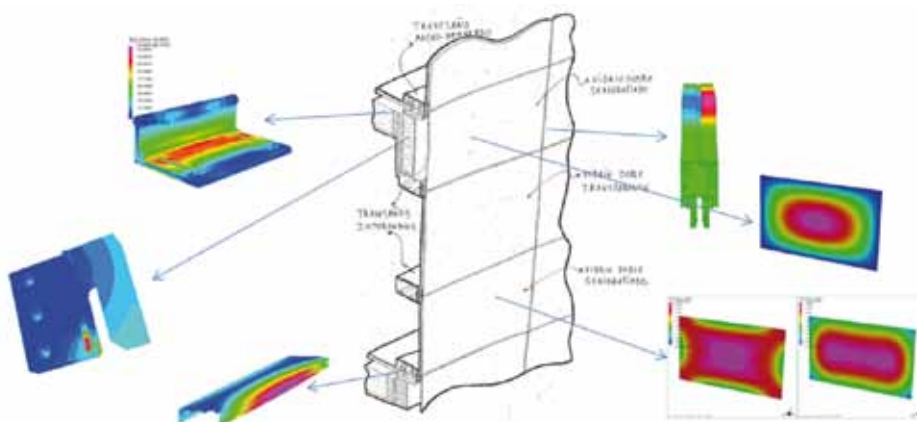
Todas las fachadas están sometidas a sobrecargas de viento y a su peso propio. Además también pueden estar sometidas a otro tipo de cargas, como pueden ser sobrecargas de nieve, sobrecargas de uso, cargas de impacto, cargas sísmicas, cargas debidas a explosiones, cargas térmicas, etc. En el caso de edificios altos, la sobrecarga de viento tiene una especial importancia y es la que suele dimensionar gran parte de los elementos estructurales.

A la hora de acometer un cálculo de una fachada es preciso entender el recorrido de las cargas hasta que llegan a la estructura principal del edificio. Partiendo de los elementos exteriores de la fachada hacia los interiores los principales elementos a calcular son: elementos de revestimiento (normalmente placas planas), montantes y travesaños (sistemas isostáticos o hiperestáticos) y anclajes a la estructura principal del edificio (bien sea forjados o estructura metálica). En este punto es aconsejable tener en cuenta que un sistema isostático puede generar solicitaciones menores en los anclajes y que el medio para llegar a la consecución del sistema isostático es el empleo de rótulas. Por último, todas las uniones entre estos elementos han de ser verificadas (tornillos, siliconas estructurales, soldaduras, tacos o anclajes embebidos en el forjado, etc.).

Una vez definidos los elementos a calcular, los pasos a seguir son los habituales en el cálculo de estructuras: establecer las cargas, definir el esquema estático, elegir el tipo de cálculo a realizar, resolver el análisis e interpretar los resultados.

En numerosas ocasiones también ha de realizarse un análisis modal con el fin de verificar el nivel de riesgo de entrada en resonancia de algunos componentes.

Cabe mención especial la necesidad de un análisis de los movimientos de la estructura principal del edificio (especialmente significativos en edificios en altura): movimientos verticales en el plano de la fachada, tales como deformaciones en el borde de los forjados, acortamiento de los pilares o dilataciones y contracciones térmicas, y movimientos horizontales como el movimiento relativo entre plantas debido a acciones de viento y sismodilataciones y contracciones



Cálculo de componentes de fachada (FEA)

térmicas o asentamientos diferenciales de la estructura principal. También es muy importante el control de las tolerancias de ejecución. La finalidad de estos análisis es la de evitar problemas de ajuste y fijación de la fachada, así como la de prevenir la aparición de cargas adicionales sobre elementos estructurales que no habían sido diseñados para soportarlas.

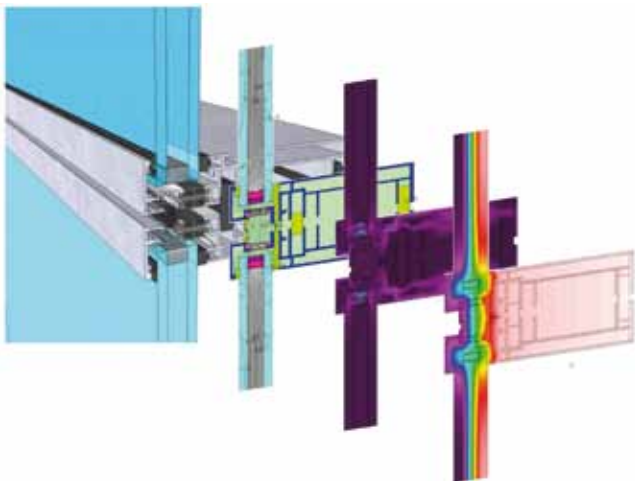
3.2. Análisis térmico

Toda fachada ha de cumplir unos requisitos térmicos mínimos. En el caso de los edificios en altura estos requisitos suelen tener un nivel de exigencia alto debido al uso al que se destinan este tipo de inmuebles (administrativo, hotelero o residencial; raramente se realizan edificios altos para otros usos como industrial o no habitables, aunque puede haber excepciones).

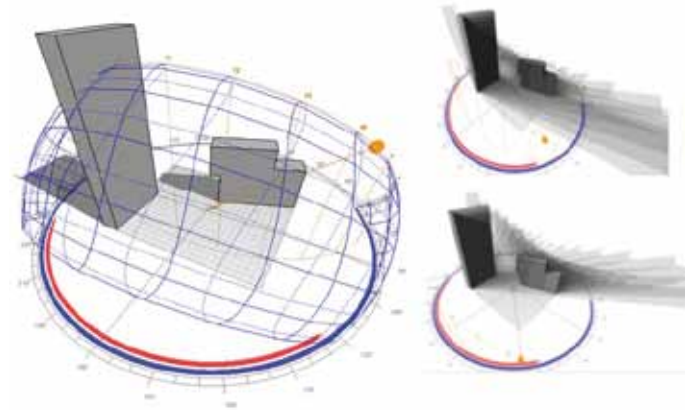
El parámetro fundamental que define el comportamiento térmico de una fachada es el valor U (transmitancia térmica). Según cita el CTE (Documento Básico HE Ahorro de Energía), la transmitancia térmica es el flujo de calor, en régimen estacionario, dividido por el área y por la diferencia de temperaturas de los medios situados a cada lado del elemento que se considera:

$$U = Q/A \cdot \Delta T. \text{ Se mide en } W/m^2K.$$

El valor U global típico de la fachada depende del centro del panel, del valor U de la periferia y de los efectos de borde. Los límites de este parámetro vienen establecidos por las normativas en función de la zona climática en que se encuen-



Ejemplo de cálculo térmico



tre el edificio y de su uso, de la orientación de la fachada, del porcentaje de huecos y del tipo de carga interna del edificio.

Por otro lado, el análisis del riesgo de condensaciones superficiales (o intersticiales) sobre la fachada tiene especial relevancia. Este análisis se basa en la premisa que no se producirán condensaciones si la temperatura superficial mínima obtenida es superior a la de rocío.

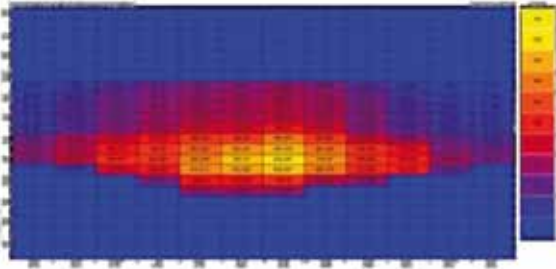
3.3. Análisis solar

Los edificios en altura suelen estar muy expuestos a la radiación solar, debido a la ausencia de otros edificios que les proporcionen cobijo.

El comportamiento energético de la fachada no solamente se cuantifica por la transmitancia térmica, sino también por la cantidad de radiación solar que entra al edificio, definida mediante el factor solar. El factor solar se define como el cociente entre la radiación solar que atraviesa una superficie y la que incide sobre esa misma superficie.

Por lo tanto a la hora de diseñar la fachada se han de tener en cuenta aspectos tales como el porcentaje y tipo de vidrio, sistema de fachada (una sola piel, doble piel, etc.), elementos de control solar y elementos exteriores existentes, orientación del edificio y uso del mismo. También se debe encontrar un balance equilibrado entre la radiación solar que penetra en el edificio y la luz natural que accede a su interior, definido por el 'daylight factor'.

Un análisis del recorrido solar sobre el edificio calculando la radiación solar incidente en la fachada puede ayudar a definir



Ejemplo de análisis solar

de forma más precisa el factor solar necesario, así como a optimizar los elementos de control solar de la envolvente. Además se puede obtener información sobre las sombras arrojadas por nuestro edificio sobre los circundantes y viceversa. En ocasiones también es interesante realizar un análisis de los deslumbramientos ocasionados por las fachadas.

3.4. Fachadas y sostenibilidad

Se puede definir el concepto de sostenibilidad en la arquitectura como un modo de concebir el equilibrio de un edificio con su entorno, buscando optimizar recursos naturales y sistemas de edificación de tal modo que minimicen el impacto ambiental sobre el medio ambiente y sus ocupantes.

Existen multitud de razones para argumentar un diseño sostenible entre las que se encuentran la legislación, el valor añadido, el coste de la energía, la responsabilidad y satisfacción de los técnicos, la destrucción de recursos naturales en la que se encuentra envuelta la humanidad, etc. Estos argumentos se engloban en el conocido triple enfoque: social, económico y medioambiental.

Una forma de medir la sostenibilidad la proporcionan los sistemas de certificación de edificios sostenibles o sistemas de clasificación de edificios verdes (*'green building rating systems'*) entre los cuales se encuentran los siguientes: LEED, BREEAM, VERDE, GREENSTAR, DGNB, ESTIDAMA, CASBEE, HQE, etc.

Entre estos sistemas de certificación los más difundidos son el LEED, BREEAM y el GREENSTAR. Analizando las categorías que estudia cada una de estas certificaciones y

agrupándolas obtenemos una serie de categorías generales a considerar: emplazamiento, gestión, energía, materiales, agua, calidad del ambiente interior, contaminación, innovación y transporte.

¿Cómo se puede actuar sobre cada una de estas categorías a la hora de diseñar una fachada? Un posible enfoque podría ser el siguiente:

- **Emplazamiento.** No siempre se puede escoger el emplazamiento del edificio. Sin embargo, se puede optimizar la orientación, la forma, integrar la fachada con el entorno o considerar la existencia de microclimas. Un análisis solar como el que se ha apuntado anteriormente puede ayudar a optimizar estos conceptos.
- **Gestión.** Procesos de diseño rigurosamente estudiados, políticas aplicadas a la gestión de la construcción, sistemas de gestión ambiental, buenas prácticas de puesta en marcha, manuales de funcionamiento y de mantenimiento de las fachadas adecuados.
- **Energía.** Optimizar la eficiencia energética (y reducir las emisiones de CO₂) implica optimizar los valores U (transmitancia térmica) y g (factor solar), disponibilidad de luz natural,



Categorías de sostenibilidad



Ropemaker Place (Londres). Edificio galardonado con BREEM Excellent y LEED Platinum pre-certification

usar la masa térmica, incorporar sistemas de energía renovables en las fachadas o utilizar sistemas de fachadas que se adapten a las condiciones existentes en cada momento. Un correcto diseño así como análisis térmicos y solares adecuados optimizan la eficiencia energética de las fachadas.

- **Materiales.** Utilización en las fachadas de materiales de baja energía embebida (reducir huella ecológica por la extracción, producción, uso y desecho), gestión eficiente de los recursos (materiales renovables, reusables, reciclables), uso de materiales saludables y seguros (no cancerígenos o que no irriten), fuentes de proveniencia de los materiales responsables o la optimización estructural de los materiales (reduciendo la cantidad de material utilizada).

- **Agua.** Considerar sistemas de fachadas que requieran poca agua para su limpieza (elección de materiales, buen diseño que evite acumulación de suciedad y manchas, inclinación de la fachada, estrategia de limpieza adecuada, reducir la superficie acristalada, etc.), considerar sistemas de recogida de aguas para limpieza o suministro de aguas grises para los servicios del edificio o la consideración de fachadas con baja cantidad de agua embebida.

- **Calidad del ambiente interior.** Mejorar el confort térmico y acústico, la iluminación natural, el confort visual y la ausencia

de deslumbramientos. Las fachadas diseñadas con una única barrera de vapor y con materiales resistentes a los mohos también ayudan a mejorar la calidad del ambiente interior, así como la utilización de materiales locales que acerquen a los usuarios a su edificio.

- **Contaminación.** Considerar las emisiones que se generan en la producción de los materiales de la fachada, diseñar considerando materiales renovables, sistemas que se puedan desmontar, separar los materiales y volver a utilizar, diseñar la fachada para una durabilidad adecuada, considerar en el diseño la futura demolición del edificio, reducir el volumen de residuos generados durante la construcción, prevenir la contaminación desde el interior (buscando el balance entre ventilación natural y eficiencia energética), barreras a la contaminación exterior (buscando el balance entre la contaminación exterior y la ventilación natural).

- **Innovación.** Desarrollar soluciones específicas para una localización determinada que tenga beneficios sostenibles o enfatizar la conexión y la comunicación entre profesionales, sistemas y conceptos a lo largo de la ejecución del proyecto.

- **Transporte.** Utilización de materiales locales para reducir el transporte durante la ejecución del proyecto y la utilización de proveedores locales; estudios iniciales del microclima, localización y orientación puede ayudar a elegir el emplazamiento, lo cual repercutirá en la disponibilidad y el uso de los medios de transporte por parte de los usuarios del edificio. En edificios altos, la concentración de usuarios es un condicionante muy importante a la hora de escoger los medios de transporte con los que se accederá al edificio.

A modo de conclusión se puede afirmar que las fachadas de los edificios altos generalmente son muros cortina que han de cumplir con los requisitos exigibles a toda fachada, aunque algunos de ellos con un nivel de exigencia superior. **ROP**

Referencias

- "Proyecto de Edificios Altos". ACHE. 2013

- Documento Básico HE. Ahorro de Energía. Septiembre 2013

- LEED Reference Guide for Green Building Design and Construction. 2009 Edition.

Características y requisitos del diseño de las instalaciones de edificios de gran altura



Cristina González

Doctora ingeniera Industrial.

Dpto. Ingeniería de Construcción y Fabricación. ETS de Ingenieros Industriales. UNED



Eduardo Theirs

Ingeniero Industrial.

JG Ingenieros



Emilio González

Ingeniero Industrial.

JG Ingenieros

Resumen

El presente artículo intenta exponer distintos problemas y soluciones en el diseño de espacios que ocupan las instalaciones en este tipo de edificios, para tener una correcta previsión e integración en el conjunto global del diseño.

Este tipo de edificios presenta peculiaridades a tener en cuenta en las que se resaltan las consideraciones energéticas y el efecto chimenea. Asimismo, se proponen algunas recomendaciones a la hora de seleccionar los sistemas y equipos necesarios para un correcto funcionamiento del edificio en cuanto a las instalaciones que lo componen. Se consideran, de forma somera, las instalaciones más importantes a considerar, una propuesta de ubicación, así como las distribuciones tanto verticales como horizontales de las mismas.

Palabras clave

Ingeniería de instalaciones en edificios en altura, eficiencia energética

Abstract

This article describes the different problems posed and the solutions required in the design of spaces occupied by the mechanical and electrical installations of these types of buildings, to ensure these are correctly established and incorporated with the global design arrangement. These buildings have a series of characteristics that have to be taken into account, particularly with respect to energy considerations and the stack effect. The article proposes a series of recommendations to be taken into account at the time of selecting the necessary systems and equipment for the correct operation of the building in terms of mechanical and electrical installations. The author provides a brief summary of the most important installations required, together with proposals for their location and the vertical and horizontal distribution of the same.

Keywords

Installation engineering in tall buildings, energy efficiency

1. Introducción

Los edificios de gran altura son edificios emblemáticos entre los de su entorno, y cumplen generalmente una función de representatividad para sus ocupantes, así como la posibilidad de utilización de una gran cantidad de superficie ocupable en un emplazamiento muy compacto.

Cuando se diseñan las instalaciones de un edificio, independientemente de las características que tenga, se deben tener en cuenta las siguientes premisas en el siguiente orden: seguridad, prestaciones y consideraciones medioambientales.

Aunque se han realizado edificios de gran altura con otras finalidades, como en el caso de algunos grandes hospitales, este tipo de edificación es característica principalmente de uso administrativo y, en menor medida, hotelero. Se consideran edificios de gran altura, a efectos de este artículo, aquellos edificios con más de 20 plantas.

Estos edificios tienen consideraciones específicas en su diseño, como las de la solución estructural o el transporte vertical de usuarios. Uno de los problemas básicos en el diseño es la optimización de la superficie del núcleo de servicios del edificio.

El núcleo de servicios contendrá las escaleras de emergencia del edificio (dos ó más), el núcleo de ascensores y vestíbulos de planta, los núcleos de aseos y los patios verticales y locales de instalaciones. Dado que la superficie ocupada por el núcleo deja de ser superficie útil para el edificio, es fundamental resolver y optimizar la distribución y ocupación del mismo.

En este artículo se abordan los posibles problemas y soluciones de los pasos a seguir en el diseño de espacios

que ocupan las instalaciones en este tipo de edificios, para tener una correcta previsión e integración en el conjunto global del diseño.

En primer lugar, se efectúan algunos comentarios sobre las consideraciones energéticas y el efecto chimenea en estos tipos de edificios; posteriormente se consideran las posibles ubicaciones de las centrales técnicas de instalaciones; a continuación, se examina su distribución vertical: espacios necesarios para los montantes verticales y finalmente la altura necesaria entre plantas para poder asumir los espacios en falsos techo y suelos.

Demanda energética en edificios en altura

Los edificios en altura tienen la característica, de que las condiciones climáticas en los pisos superiores puede ser absolutamente diferente a las condiciones climáticas de los pisos más bajos por la existencia de gradientes verticales de temperatura, presencia de nubes bajas (existiendo incluso la posibilidad de que en los pisos superiores haya presencia de una alta radiación solar y los pisos más bajos estén en una capa de nubes), etc.

Por ello, en el diseño de este tipo de edificios se debe tener en cuenta este aspecto, previendo la posibilidad de que existan demandas energéticas de signo opuesto en diferentes partes del edificio. Para ello se deberá garantizar que existe la posibilidad de funcionamiento del edificio con unas plantas refrigerando y otras plantas calentando.

Reducción de los consumos energéticos

Existen diversos sistemas presentes en los edificios en altura que permiten una reducción del consumo energético global del edificio: ventilación, transporte de energía térmica e iluminación.

Ventiladores

Uno de los principales consumos energéticos en cualquier edificio es el correspondiente a los ventiladores de los climatizadores y de las unidades terminales utilizados en ellos.

El consumo de un ventilador viene dado tanto por el caudal de aire que mueve como por la pérdida de carga que debe vencer y el diseño de la pala del mismo por lo que, si se quiere minimizar su consumo, se deberá buscar climatizadores que muevan el mínimo aire indispensable con la menor pérdida de carga posible. Una vez fijados estos parámetros habrá que buscar aquel ventilador que tenga un consumo específico (SFP, consumo por unidad de caudal movido) menor.

Por ello, es importante seguir algunas pautas en el diseño y selección de la instalación de ventilación y aire acondicionado.

- Distribución homogénea y lo más cercana al punto de consumo del aire de ventilación. De esta forma, se acortan las distancias de conductos y, por tanto, la pérdida de carga en los mismos.



Fig. 1.- Influencia climática

- Diseño de recorridos de conductos lo más sencillos posibles, de forma que se minimice la pérdida de carga en los mismos.

- Uso de ventiladores de alta eficiencia tanto en los climatizadores como en las unidades terminales.

Esto implica que en edificios en altura, y siempre teniendo en cuenta el aspecto económico que implica la utilización del espacio por parte de las instalaciones mecánicas del edificio, se debe buscar disponer de varias plantas técnicas donde situar los climatizadores de aire primario del edificio.

Transporte de energía térmica

Los recorridos de los elementos de transporte de fluidos caloportadores suelen ser muy extensos en edificios de este estilo por lo que es fundamental asegurar que el aislamiento de los elementos que transportan estos fluidos (conductos y tuberías) sea el correcto.

En el caso de las tuberías, la importancia es mayor ya que el hecho de suministrar un fluido al elemento terminal con una temperatura que no es la calculada por el proyectista, hace que la potencia del elemento sea menor que la prevista y que se pueda modificar el rendimiento de la unidad terminal, incurriendo en un mayor coste energético de la misma.

Iluminación

Los edificios en altura suelen tener una gran superficie interior iluminada, por lo que la reducción de la potencia instalada para este consumo redundará en una reducción acusada del consumo energético.

En edificios de oficinas, la demanda principal del edificio es de refrigeración. En este caso, el efecto directo de la reducción de potencia de iluminación se combina con la reducción de las cargas internas del edificio por lo que se reduce la potencia a instalar en frío (aumentando ligeramente la de calefacción) y, por tanto, la energía consumida en refrigeración.

Efecto chimenea en edificios en altura

Dado que los edificios no son totalmente herméticos, existirá un efecto chimenea que causará infiltración de aire en el mismo. Durante la época fría, en la que principalmente el edificio se calefacta, el aire interior cálido se

eleva a través del edificio (principalmente a través de los huecos de los forjados, como pueden ser los huecos de escaleras, ascensores, etc.) y sale del mismo por su parte superior, ya sea a través de ventanas abiertas, aperturas de ventilación o cualquier otra forma de fuga de aire que pueda existir en esta zona del edificio. El aire cálido que asciende provoca una reducción de la presión estática en la base del edificio, provocando una diferencia de presión entre el interior del edificio y el exterior del mismo que hace que penetre aire fresco por la base del mismo. Durante la época cálida, en la que el edificio principalmente se refrigera, el efecto chimenea se comporta de forma inversa a la explicada anteriormente. Este efecto chimenea en las épocas frías suele ser de menor intensidad dada la menor diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior del edificio.

El efecto chimenea se manifiesta en aspectos como dificultades al intentar calefactar los pisos más bajos del edificio (dada la entrada de aire frío en esta parte del edificio en invierno) o dificultades en el cierre de las puertas de los ascensores (dada la diferencia de presión entre el hueco del ascensor y el vestíbulo de espera del mismo).

En los edificios en altura modernos, que tienen una envolvente estanca, el efecto chimenea puede llegar a crear diferencias de presión muy significativas entre las zonas inferiores y las superiores del edificio, que se deben tener en cuenta y que necesitarán de un sistema mecánico para ser paliadas. Las escaleras, escaleras mecánicas, huecos de ascensores, patios de instalaciones verticales si son registrables, contribuyen a aumentar el efecto chimenea, mientras que las particiones interiores horizontales y verticales ayudan a mitigarlo.

El efecto chimenea tiene una importancia especial en caso de incendio ya que éste ayuda a propagar el humo y el fuego. Es, por tanto, de una importancia fundamental que en caso de incendio se controle el efecto chimenea para lograr mantener unas condiciones seguras de evacuación en el edificio y garantizar la seguridad en la entrada de los bomberos en el mismo.

Minimización del efecto chimenea:

- Correcto diseño y ejecución de la envolvente del edificio que minimice las infiltraciones.

- En climas fríos las puertas de entrada deben ser giratorias.
- En climas fríos y en edificios donde haya mucho paso de personas por las puertas de entrada, no se deben utilizar vestíbulos con doble puerta.
- En muelles de carga se deben instalar vestíbulos correctamente climatizados con doble puerta.
- Se deben generar vestíbulos de ascensores, de forma que se minimice el efecto chimenea de los huecos de ascensores.
- Es conveniente que los huecos de escalera formen un espacio separado del resto del edificio.
- El sistema de climatización deberá estar diseñado para generar sobrepresión en el edificio.

Es conveniente tener un sistema de climatización independiente para el *hall* de entrada en el edificio que asegure la sobrepresión del mismo ya que éste es uno de los puntos más sensibles con el fin de minimizar el efecto chimenea.

Ubicación de centrales

A la hora de definir la situación de las máquinas principales del edificio, existen varias opciones y se deben considerar, entre otros, los siguientes aspectos de gran relevancia, relativos a la ubicación de las diferentes centrales:

- Proximidad a las acometidas y a los elementos terminales.
- Requisitos reglamentarios y de seguridad a cumplir y evaluar los posibles riesgos para ocupantes.
- Necesidades de acceso para mantenimiento, averías, reposición de equipos etc.
- Problemas de implantación física: peso, vibraciones, ruidos.
- Necesidades de ventilación de los locales.
- Espacio disponible, impacto visual.
- Valor del suelo ocupado.



Fig. 2. Sala intermedia de climatizadores

Considerando estos criterios generales, se debería optar por ubicar la maquinaria de las distintas instalaciones de las que consta el edificio en el lugar más adecuado:

a) Cubierta

- Plantas enfriadoras condensadas por aire o torres de recuperación.
- Unidades Exteriores de sistemas de VRV/VRF.
- Salas de máquinas de ascensores.
- Recinto de telecomunicaciones superior.
- Climatizadores y ventiladores para plantas superiores del edificio.

También pueden ubicarse también en cubierta los siguientes elementos:

- Sala de calderas (especialmente las de gas).
- Grupo electrógeno (siempre y cuando no haya problema de implantación de ventilación y ruidos, atención al suministro de combustible y vibraciones).
- Depósitos de acumulación de agua para incendios, coordinándolos con el diseño de la estructura del edificio.

b) Plantas intermedias

Para ubicar los equipos de renovación de aire, y si no existe otra alternativa, se precisan las plantas intermedias para



Fig. 3. Patio vertical de instalaciones

instalaciones cuando el edificio tiene un número superior a 18 o 20 plantas.

Unidades exteriores de sistemas de VRV/VRF.

También pueden alojar equipos, como por ejemplo, los cuadros secundarios, los depósitos de acumulación de agua caliente sanitaria, transición de sistemas de desagüe, el depósito secundario contra incendios, etc.

Climatización: conductos y salas de máquinas intermedias

Las centrales de renovación de aire o de climatización con conductos suelen tener un alcance máximo de unas 8 a 10 plantas, por lo que deberán colocarse salas de máquinas en plantas intermedias, básicamente para dar ventilación, a 16 o 20 plantas.

A continuación, se especifican las maneras de reducir el espacio ocupado por los patios asociados a conductos de aire, que son los que más voluminosos:

- Colocando los conductos exentos por el exterior del edificio (edificios tipo Centro Pompidou en París).
- Colocando los conductos a 'alta velocidad' (15-20 m/s), con cajas reductoras de velocidad en cada planta (pasar a 5-7 m/s).



Fig. 4. Sectorización patio vertical

Colocando los sistemas de renovación de aire en fachada de cada planta, para no tener conductos verticales. Aplicable en algunos casos, renunciando a unos metros lineales de fachada 'noble', así como m² de superficie en planta

c) Plantas sótano

- Transformadores
- Cuadros eléctricos principales
- Sistema alimentación ininterrumpida
- Recinto de telecomunicaciones inferior
- Centrales de seguridad
- Depósitos de reserva de agua (agua fría sanitaria, caliente sanitaria, incendios)
- Climatizadores y ventiladores para plantas inferiores del edificio
- Sala de calderas (si no está en cubierta)
- Grupo electrógeno (si no está en cubierta)

La altura libre mínima de los locales para salas de máquinas debería ser 3,5 m, intentando alcanzar, si es posible, los 4,0 m. Según el Código Técnico de la Edificación, en su Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio (CTE-DBSI), las salas de máquinas son locales de riesgo, y debe contemplarse su sectorización. La superficie total ocupada por salas de máquinas, a considerar previamente en el diseño del edificio, puede oscilar entre el 5 % y el 10 % de la superficie construida del edificio.



Fig. 5. Sujeción de tubería

Distribución vertical de instalaciones

Concepto general

Los patios verticales de instalaciones conectan las centrales situadas en plantas bajas y cubiertas (y eventualmente en plantas intermedias) con los elementos terminales de instalaciones en cada planta.

Los patios de instalaciones, especialmente los de conductos, deben colocarse preferentemente centrados en la planta, con radio de acción inferior a 20-25 m para evitar conductos excesivamente largos y con demasiada altura.

Los patios de instalaciones pueden ser independientes para diferentes sistemas (ventilación, electricidad, agua y comunicaciones) o compartir el mismo patio, con los condicionantes de sectorización entre las distintas instalaciones y salvando las distancias de seguridad entre ellos. Deben ser verticales en todo su recorrido, evitando quiebros, y conectando directamente con las centrales. Debemos garantizar la sectorización de incendios mediante accesos al patio por puertas cortafuegos. Al patio debe accederse cómodamente para operaciones de mantenimiento, a través de una puerta desde una zona común de la planta.

En el dimensionado del patio debe preverse tanto una reserva de espacio de un 20 % para futuras instalaciones, como



Fig. 6. Montaje de cableado eléctrico en patio vertical desde el exterior

el espacio de maniobra dentro del propio patio. Las proporciones de sus lados más adecuadas son entre 2:1 y 4:1.

Pueden existir también patios de instalaciones que den servicio a instalaciones de plantas inferiores que no tengan relación directa con las plantas intermedias, como es el caso de conductos de ventilación de aparcamientos, conductos extracción de las campanas de cocina o de las chimeneas de calderas, entre otros, pero que ocuparán espacio en la planta. Se deberán colocar los patios de instalaciones correctamente centrados, para permitir optimizar la altura de los conductos que salen de ellos.

La altura entre plantas: distribución horizontal de instalaciones

En este tipo de edificios, la optimización de la altura entre plantas es crítica, pues un ahorro de 15 cm en cada planta,



Fig. 7. Señalización de balizamiento en cubierta

representará por ejemplo, un ahorro de 4,5 metros en un edificio de 30 plantas.

La altura de cada planta está gobernada por el grueso de los forjados (estructura), la zona de servicios del suelo (falso suelo), la altura realmente ocupada y la zona de servicios en techo (falso techo).

Respecto al grueso de la estructura, se ha de garantizar, además de lo que indique el cálculo correspondiente, la resistencia al fuego de cada forjado según las prescripciones de normativa (120 /180 minutos u otros) lo que puede hacer necesario 'recrecer' alguna solución estructural.

La zona de servicios en suelo sirve normalmente para el tendido de cableados de comunicaciones y de potencia eléctrica, especialmente en edificios de oficinas. No es importante en edificios residenciales (viviendas u hoteles). Se resuelve normalmente de dos posibles maneras:

- Mediante falso suelo registrable, con un óptimo de unos 20 cm (restando 3 cm de espesor de suelo, quedan 17 cm libres) y un mínimo de 14 cm (con 11 cm libres, que permiten colocar una caja de tomas de corriente de 6 cm de fondo y quedan 5 cm para el paso de cableado por debajo de esta caja).

- Mediante canaletas empotradas en el suelo de la planta, se requerirán 10 cm totales, donde se incluyen las cajas de

conexión, de 8 cm de profundidad, que son alimentadas por canaletas empotradas de 4 cm de profundidad.

También puede darse el caso de optar por una climatización por suelo con lo que aumentaría el ancho de éste y en principio disminuiría el ancho del falso techo.

La zona ocupada estará entre los 3,0 m (óptima) y 2,7 m (aceptable).

Finalmente, la altura en la zona de servicios en el falso techo dependerá especialmente del tipo de instalación de climatización que se utilice:

- En instalaciones de *fan-coils* (+ unidades interiores de VRV/VRF) y vigas frías, se deben reservar aproximadamente 60 cm, que se utilizarán para los siguientes elementos: tuberías/canalizaciones eléctricas (10 cm), paso de conductos de renovación y ubicación de *fan-coils* (40 cm) y luminarias y grueso del falso techo (10 cm).

- En instalaciones del tipo 'todo aire' se precisarán aproximadamente 80 cm, que se utilizarán para los siguientes elementos: tuberías/canalizaciones eléctricas (10 cm), paso de conductos de climatización (60 cm) y luminarias y grueso del falso techo (10 cm).

- En instalaciones de techos radiantes, se deben reservar aproximadamente 60 cm, que se utilizarán para los siguientes elementos: tuberías/canalizaciones eléctricas (10 cm), paso de conductos de renovación (40 cm) y luminarias, grueso del falso techo y placas de techo radiante (10 cm).

Por último, se puede reducir la altura entre plantas utilizando forjados de canto menor y mejorando su resistencia al fuego con proyección de morteros especiales, o utilizando sistemas especiales de falso suelo, como por ejemplo los suelos metálicos atornillados (10 cm), y concentrando instalaciones de climatización y potencia y voz/datos en falso suelo. En este caso se puede resolver con 50 cm en suelo y disponer de un forjado 'visto' en techo con luminarias suspendidas o un falso techo mínimo de 15 cm, que permite una cierta absorción acústica.

Además, se quiere resaltar dos instalaciones de gran importancia y a tener en consideración en este tipo de edificios.

Comunicaciones y Seguridad

Estos edificios suelen ser emblemáticos y hay que diseñar muy especialmente la seguridad de los mismos mediante sistemas de control de accesos y restricciones a distintas áreas del edificio. Así como de un sistema de CCTV controlado desde la central de seguridad del edificio.

Igualmente la detección de incendios y la alarma de incendios deben estar gestionadas desde la central de seguridad del edificio, situada en un lugar estratégico del mismo.

En cuanto a la instalación de comunicaciones se han de prever las salas correspondientes a lo largo del edificio con la adecuada flexibilidad.

Es importante contar con un sistema de BMS para realizar la conducción del edificio desde la sala de mantenimiento del mismo que puede estar próxima a la de seguridad.

El correcto funcionamiento de las instalaciones mediante un correcto sistema de BMS hace que se pueda optimizar el consumo energético del edificio en una gran magnitud.

Ascensores

Es de gran importancia realizar un buen estudio de tráfico con consultores especialistas para estos edificios y lograr un número óptimo de ascensores con capacidad suficiente y reducir el tiempo de espera de los usuarios.

Es importante prever montacargas para usos complementarios de servicios del edificio.

En plantas de acceso y en vestíbulos importantes se han de prever escaleras mecánicas.

Por último es fundamental disponer de un correcto plan de autoprotección para garantizar la seguridad de los usuarios del edificio en caso de emergencia.

En este artículo se han considerado, de forma somera, los sistemas más utilizados dada la amplitud de soluciones existentes y siendo conscientes que se omiten algunas soluciones en su totalidad. **ROP**

Encofrados y medios auxiliares para la ejecución de edificios de gran altura



Antonio Reyes Valverde

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director técnico de PERI, S.A.U.



Abel Ercilla Lecea

Ingeniero industrial.
Jefe técnico ULMA Construcción

Resumen

Este artículo pasa revista a las aplicaciones específicas desarrolladas para la ejecución de Edificios de Gran Altura, en el ámbito de los encofrados, andamios y medios auxiliares de construcción.

De este modo, se examinan los encofrados deslizantes, autotrepantes, encofrados para forjados, sistemas de protección de fachada, etc. y como se han ido utilizando estos sistemas en las distintas obras realizadas en España durante las dos últimas décadas.

Palabras clave

Mesas encofrantes, protección de fachadas, encofrado, autotrepante, edificios gran altura, medios auxiliares

Abstract

The article offers a review of specific applications developed for the construction of tall buildings, with respect to formwork, falsework, scaffolding and auxiliary building structures.

The article discusses sliding and climbing formwork, slab falsework, facade protection systems, etc., and examines the use of these systems on different building works carried out in Spain over the last two decades.

Keywords

Formwork tables, facade protection, formwork, self-climbing formwork, tall buildings, auxiliary structures

En la primera década del nuevo milenio, la construcción, primero de Torre Agbar en Barcelona y, posteriormente, de las Cuatro Torres de Madrid, acapararon las primeras páginas de la prensa nacional. España había entrado en la competición: ¡Altius! ¡Citius!

Y para ello había que subirse al carro de unas tecnologías que, si bien se venían utilizando por el mundo desde varias décadas atrás, en España eran poco conocidas.

Si pensamos en un Edificio de Gran Altura (en adelante EGA) como una obra lineal en altura, en la que los distintos oficios trabajan simultáneamente, unos por debajo de los otros en distintas fases de la construcción del edificio, de modo que, mientras unos equipos ejecutan los núcleos de hormigón en lo más alto de la construcción, varias plantas más abajo otros equipos se afanan en la ejecución de los forjados; por detrás, otros se ocupan de instalar zancas de escalera y un poco más abajo ya se está trabajando en el cerramiento de las fachadas... Y todos ellos disputándose el bien más preciado y escaso que se convierte en camino crítico del proceso: la grúa.

Más alto, más rápido... minimizando el uso de grúa, llegando incluso a prescindir de ella en algunas de los procesos de la construcción, pero sin sacrificar el objetivo principal: construir una planta completa de estructura por semana.

Se requiere, por tanto, disponer de unos medios auxiliares de obra que nos permitan alcanzar estos objetivos.

1. Encofrado de paramentos verticales

Independientemente de la solución estructural elegida en el proyecto, en la construcción de edificios de gran altura resulta casi obligado tener que resolver la ejecución de paramentos verticales de hormigón, ya sea en los núcleos que alojan las

cajas de ascensores y escaleras, en las fachadas, o en ambos como fue el caso de Torre Agbar.

Aunque años atrás era frecuente la ejecución de los paramentos utilizando encofrados deslizantes, técnica utilizada, por ejemplo, en los núcleos verticales de las Torres Puerta de Europa en Madrid, en la actualidad, la práctica totalidad de los EGA se ejecutan empleando encofrados autotrepantes, que ostentan en la actualidad el récord de altura, con los 828 m del Burj Khalifa, construido entre 2004 y 2010 en Dubái.

Los sistemas de encofrados deslizantes requieren un hormigonado continuo en el tiempo, 24 horas al día, siete días a la semana, en las que se simultanean los trabajos de encofrado, colocación de elementos embebidos, ferralla, etc.

Los encofrados deslizantes son de escasa altura, en el entorno de un metro, y son permanentemente izados, mediante cilindros hidráulicos, a velocidad prácticamente constante entre 10 y 20 cm por hora.

Los rendimientos alcanzados por los encofrados deslizantes son prácticamente imbatibles siempre que el acabado no sea un condicionante y las secciones a ejecutar no presenten cambios representativos de geometría.

Los encofrados autotrepantes son una evolución de los encofrados trepantes convencionales. El movimiento ascensional de los módulos de trepa, conjunto de consolas, plataformas de trabajo y paneles encofrantes, se realiza a lo largo de un sistema de carriles, fijados al propio paramento de hormigón mediante cilindros hidráulicos incorporados en el sistema, con lo que se libera de una manera significativa tiempo de grúa, pudiendo, además, operar en condiciones de viento relativamente desfavorables, aspecto muy frecuente a grandes alturas.

El condicionante de no poder usar la grúa y la necesidad de trabajar bajo condiciones adversas al viento han hecho que las aplicaciones exclusivas de los encofrados autotrepantes sean los EGA y los grandes pilonos de puentes atirantados y pilas de viaductos de gran altura, como es el caso del viaducto de Montabliz en la Autovía de la Meseta, el viaducto sobre el Barranco de Tenoya en la circunvalación de las Palmas de Gran Canaria, el Puente de La Pepa en el Nuevo Acceso a Cádiz y, fuera de nuestras fronteras, el espectacular Viaducto de Millau.

Existen básicamente tres configuraciones de autotrepas: regular, plataformas y horcas.



Fig. 1. Construcción del edificio Burj Khalifa



Fig. 2. Ejecución de uno de los núcleos de Puerta de Europa con encofrado deslizante

El sistema regular es el más sencillo y se puede aplicar, prácticamente, con cualquier tipología de muro de hormigón aunque con mayores exigencias de espacio que los otros dos.

El sistema plataforma es el indicado para la ejecución de las caras interiores de los núcleos, donde el limitado espacio impide la aplicación de un sistema Regular y se requiere un gran movimiento de paneles con un reducido número de maniobras. Este sistema permite, si fuese necesario, el izado simultáneo de los encofrados interiores y exteriores del núcleo en ejecución.

El sistema horca, (dada su semejanza con el siniestro dispositivo), está pensado para el izado simultáneo de los encofrados de las dos caras de un muro o cuando la disponibilidad de espacio es pequeña.

Es frecuente que los tres sistemas coexistan en la ejecución de un EGA, sobre todo el regular y el plataforma que suelen ser la combinación estándar para la ejecución de núcleos.

Cuando se pretende la ejecución simultánea de alzados y losas, también conocida como construcción monolítica, la



Fig. 3. Sistema Regular

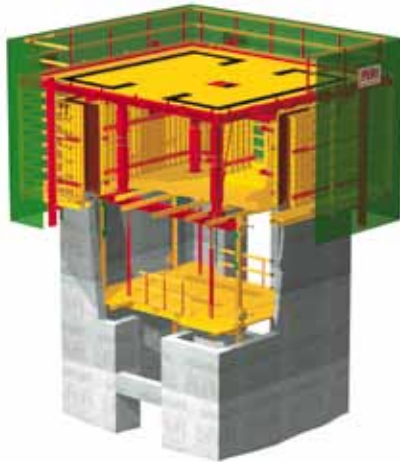


Fig. 4. Sistema Plataforma.
Ejecución de huecos interiores

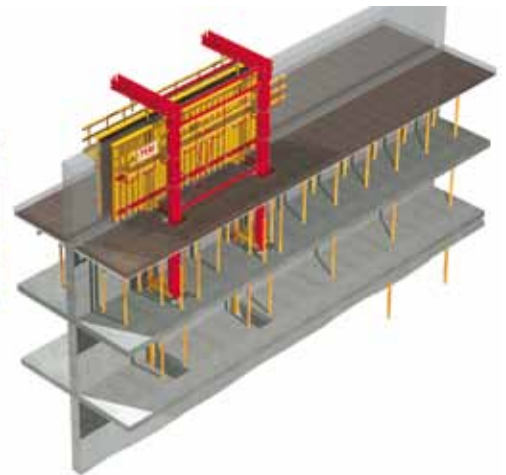


Fig. 5. Sistema Horca.
Ejecución monolítica de muros y forjados

solución idónea es el sistema horca o el plataforma con los encofrados exteriores suspendidos, como fue el caso de Torre Espacio. Al estar los encofrados suspendidos, no interfieren en la colocación de la ferralla de las losas ni en el hormigonado de las mismas. No obstante, debe tenerse en cuenta, que los puentes de los que cuelgan los encofrados cruzan sobre los muros a hormigonar, limitando las dimensiones de las jaulas prefabricadas de ferralla y no debemos olvidar que

estas deben ser lo más grandes posible para incrementar el rendimiento y minimizar la utilización de grúa.

En Torre Espacio se duplicaron los perfiles de cuelgue de los encofrados de modo que cada paño de encofrado tenía cuatro puntos de cuelgue, dos en los planos de los carriles de trepa, que se utilizaban durante las operaciones de izado y que, una vez finalizada la maniobra de trepa se abatían, quedando el



Fig. 6. Ejecución de Torre Cristal con los núcleos en avance respecto a los forjados. Combinación de sistemas Regular y Plataformas



Fig. 7. Ejecución monolítica de forjados y Núcleos en Torre Espacio. Sistema Plataforma



Fig. 8. Ejecución de Torre Bankia con dos núcleos en avance respecto a los forjados. Sistema Horca en el exterior



Fig. 9. Ejecución de Torre PwC con los núcleos en avance respecto a los forjados. Combinación de sistemas Regular y Plataformas

pañó encofrante suspendido de otros dos cuelgues, situados en los extremos del panel de encofrado, consiguiéndose así espacio suficiente para prácticamente duplicar las dimensiones de las jaulas de ferralla.

La ejecución de los EGA requieren la instalación de un brazo distribuidor de hormigón que vaya ascendiendo planta a planta con el edificio... Sí, pero sin usar la grúa.

Entre las múltiples aplicaciones de los encofrados autotrepantes, quizá la más espectacular sea la de haberse convertido

en el medio de transporte de los distribuidores de hormigón. El sistema más frecuentemente empleado para estos fines es el plataforma y, en ocasiones, el horca.

Los encofrados autotrepantes permiten llevar colgando varios niveles de plataformas para realizar distintos trabajos de acabado en los paramentos, e incluso, en Torre Cristal, en el nivel inferior de plataformas de los huecos interiores, se instaló un sistema de polipastos que permitía la instalación de las escaleras prefabricadas del edificio varias plantas más abajo. Esta solución de polipastos también se utilizó en Torre



Fig. 12. Distribuidor de hormigón en Torre Agbar. Fig.13. Sistema de polipastos instalados en las plataformas autotrepantes de Torre Cristal. Fig. 14. Distribuidor de hormigón en las Torres Fira Barcelona

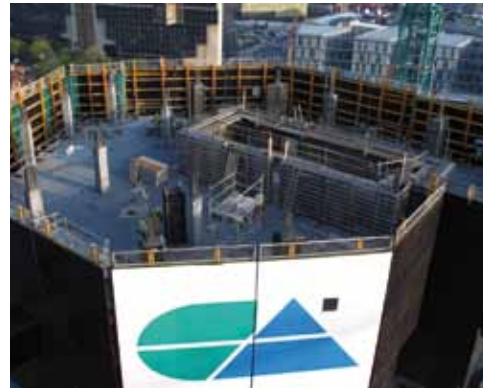


Fig. 15. Sistema de protección perimetral para las Torres Garellano en Bilbao. Fig. 16. Detalle de la protección perimetral en las Torres Garellano. Fig. 17. Sistema de protección perimetral en Torre PwC



Fig. 18. Torre Agbar

Fig. 19. Negativos metálicos de Torre Agbar

Fig. 20. Confección de los negativos de poliestireno para las Torres de Hércules

Fig. 21. Torres de Hércules

Isla Cartuja para la colocación de la estructura metálica de los forjados interiores del núcleo.

Actualmente, se están desarrollando sistemas de autotrepa ligeros, que si bien, su baja capacidad de carga, en comparación con las convencionales, las hace más limitadas en su uso, pueden ser una alternativa interesante para determinadas aplicaciones, como es el caso de las pantallas de protección de fachada. Estas pantallas de protección cubren la totalidad del perímetro exterior del edificio en tres plantas de altura: la del forjado en ejecución y dos por debajo. De este modo, se consigue una protección integral frente a caída al vacío de personas y objetos, así como una protección frente al viento de los propios operarios. Sistemas de este

tipo se han utilizado en la mayoría de las obras realizadas en España y en el mundo.

La ejecución de huecos de puertas y ventanas no presenta gran diferencia con los de cualquier construcción convencional, ahora bien, si pensamos en fachadas tan complejas como las de Torre Agbar o Torres de Hércules, donde el volumen de huecos es incluso superior al volumen de hormigón, con unas exigencias exquisitas de acabado, se hace necesario pensar en técnicas menos convencionales.

En el caso de Torre Agbar se emplearon encofrados metálicos perdidos que se iban insertando, en sus correspondientes posiciones, en las jaulas de ferralla durante su prefabricación.

En la fachada de las Torres de Hércules puede leerse la leyenda 'Non plus ultra'. Para conseguir una fachada conformada por gigantescas letras de hormigón, se dispusieron entre las dos caras de los encofrados, moldes de poliestireno expandido de alta densidad, estando recubiertas las caras en contacto con el hormigón, por una lámina rígida de PVC de 2 mm. Tras el desencofrado el poliestireno se eliminaba con motosierra.

2. Encofrado de forjados

En el caso de que los forjados del EGA se ejecuten con hormigón *in situ*, en principio se podría utilizar cualquiera de los sistemas de encofrado existentes en el mercado, no obstante y atendiendo a la necesidad de minimizar el empleo de la grúa, la tipología de encofrado más recomendable en este tipo de construcciones es, siempre que la geometría lo permita, la de mesas.

Cuanto más grande sea la mesa, más se reducen las operaciones de nivelación, traslación e izado de las mismas. En la ejecución de Torre Cartuja se necesitaban solamente 28 mesas para encofrar una planta completa.

La condición necesaria para el empleo de mesas es que las plantas a ejecutar sean repetitivas y la disposición de pilares permita efectuar el movimiento de las mesas dentro de la planta, para poder desplazarlas hacia el exterior del edificio,

para su izado a la planta superior. La traslación de las mesas se consigue bien porque la propia mesa lleve incorporada ruedas o cualquier otro medio de traslación, o bien mediante carros externos a la mesa, diseñados a propósito para este fin.

El izado de las mesas a la planta superior generalmente se realiza con la grúa.

Cuando la geometría de los sucesivos forjados o la densidad de pilares imposibilitan el empleo de mesas, la solución óptima son los modernos encofrados modulares en los que tanto los bastidores de los paneles como los puntales, de alta capacidad de carga, están fabricados en aluminio, siendo la superficie encofrante de contrachapado fenólico.

La ligereza de estos sistemas permite realizar manualmente todas las operaciones de encofrado y desencofrado, así como su movimiento y acopio en palés, dentro de la planta.

La sencillez de su manejo permite alcanzar rendimientos elevados, teniendo la ventaja adicional de que su diseño permite recuperar los paneles de encofrado sin necesidad de retirar los puntales, facilitando las operaciones de reapuntado o clareado permitiendo reducir el *stock* de material en obra.

Finalmente, otra ventaja fundamental de este tipo de encofrados es que pueden ser izados de una a otra planta



Fig. 22. Mesa de grandes dimensiones utilizada en Torre Isla Cartuja. Fig. 23. Extracción de una mesa en Torre Isla Cartuja.

Fig. 24. Torres Fira Barcelona. Combinación de mesas perimetrales y encofrado modular de aluminio

sin necesidad de usar grúa, un cabrestante o medio de elevación similar, instalado en el forjado superior puede ser suficiente para izar los palés contenedores de los paneles y puntales.

Aunque, probablemente y sin menoscabo de los sistemas señalados anteriormente, la ejecución más espectacular de los forjados de un EGA en España pudo ser la del edificio de acogida y congresos del Bilbao Exhibition Center (BEC).

Tras ejecutar con un sistema autotrepante los cien metros de altura del núcleo de la torre del edificio de acogida y congresos, se construyó sobre él un emparrillado de vigas pretensadas de 4.48 m de canto, con una superficie equivalente a la de una planta, 25.8 x 29.40 m². Este emparrillado era conocido como el "Hat". Posteriormente se ejecutaron los 9 forjados del edificio en orden descendente, quedando los forjados colgados, mediante cables, del Hat. Finalmente se tesaban e inyectaban los cables.

Para llevar a cabo esta ejecución, se diseñó una cimbra de estructura metálica, con un peso aproximado de 325 Tn y una superficie ligeramente superior a la de los forjados de la torre. Esta cimbra se ancló en la coronación del núcleo de la torre sirviendo en un primer momento de encofrado de fondo de las vigas del Hat y dio apoyo a los encofrados laterales de las mismas.



Fig. 25. BEC. Montajes de los encofrados de las vigas del HAT, con la cimbra posicionada en coronación de la torre



Fig. 26. BEC. Cimbra posicionada para el hormigonado del 6º forjado

Una vez ejecutado el Hat y adquirida la resistencia necesaria, la cimbra se descolgaba, mediante cuatro cilindros hidráulicos similares a los empleados en los tesados, situados en la parte superior del propio Hat, hasta la posición del forjado inmediatamente inferior al Hat, se anclaba nuevamente al núcleo, en anclajes perdidos ejecutados al efecto durante el hormigonado del mismo. La cimbra se había convertido así en el encofrado de fondo del forjado. Tras ocho repeticiones de esta maniobra, se completaron los nueve forjados de la torre.

3. Otros medios auxiliares

Aprovechando elementos estandarizados de los propios sistemas de encofrados, los fabricantes de estos han desarrollado un importante número de elementos auxiliares para la ejecución de los EGA, tales como plataformas voladas fuera de la línea de fachada que permiten acopiar materiales para que queden accesibles para la grúa o para un cabrestante ubicado en otra plataforma similar unas plantas más arriba.

Otras instalaciones imprescindibles en un EGA, que puede instalarse fácilmente aprovechando, por ejemplo, cualquiera de las plataformas de las autotrepas interiores de los núcleos, son los sanitarios, evitando así el constante trasiego de los operarios hacia la superficie y la consiguiente pérdida de rendimiento.



Fig. 27. Izado de una mesa de forjado mediante polipasto instalado en una plataforma volada



Fig. 28. Torre de ascensores en Torre Cristal. Fig. 29. Detalle de la Torre de ascensores de Torre Cristal
Fig. 30. Torres de ascensores en Torre Iberdrola

Pero sin duda, uno de los medios auxiliares más espectaculares, desarrollados para este tipo de obras, son las torres que alojan los ascensores y montacargas.

Estas torres son estructuras metálicas que van creciendo, adosadas al EGA, a su mismo ritmo y con su misma modulación de plantas. Su finalidad es servir de carrileras para los ascensores y montacargas y al mismo tiempo, generar las superficies necesarias de desembarco y acceso a las distintas plantas del EGA.

En Torre Cristal se instaló una de estas torres con capacidad para cuatro ascensores y un montacargas.

Nuevamente se consiguió un importante ahorro de horas de grúa ya que todo aquello que cabía en el montacargas no precisaba de grúa para su elevación, como por ejemplo los grandes paneles del muro cortina.

Una solución idéntica fue adoptada también en Torre Iberdrola.

Actualmente se está ejecutando en Madrid la nueva sede del BBVA y aunque su edificio emblemático, popularmente conocido como 'El Euro' en clara alusión tanto a su forma como a su propiedad, quizá esté en los límites de lo que pueda considerarse como EGA, merece la pena reseñar que,



Fig. 31. Nueva sede del BBVA. Muro exterior ejecutado con trepa convencional

aunque el núcleo ha sido ejecutado con encofrados auto-trepantes, los constantes cambios de inclinación del muro exterior, tongada tras tongada, han obligado a ejecutar estos muros exteriores con encofrados trepantes convencionales izados mediante la grúa. **ROP**

CUANDO LOS TÚNELES ESTÁN
IMPERMEABILIZADOS DE FORMA
PERMANENTE:
THAT'S BUILDING TRUST.

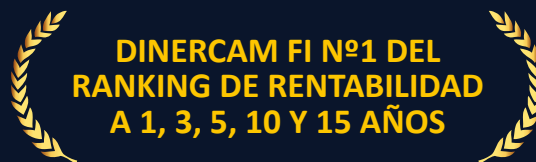




Los Fondos de Inversión Foncam FI y Dinercam FI de nuevo en lo más alto gracias a la confianza y apoyo de nuestros clientes que siempre han mostrado.



Foncam FI (Nº REG. CNMV 659), el Fondo de Renta Fija de Gestifonsa más galardonado, recibe 5 estrellas de Morningstar, la categoría más alta que concede la firma de calificación y que sólo 7 Fondos españoles más han recibido este curso 2013. Morningstar es un proveedor líder de análisis independiente para la inversión, una fuente reconocida de información exhaustiva a través de una amplia gama de disciplinas de inversión que opera en 27 países.



Dinercam FI (Nº REG. CNMV 3449), el Fondo monetario de Gestifonsa, se encuentra en el número 1 del ranking de rentabilidad a 1, 3, 5, 10 y 15 años, según Informe de Inverco primer semestre de 2013.

Disclaimer: IMPORTANTE: para invertir en estos productos es necesario tener conocimientos y experiencia en los Mercados conforme a la Normativa MiFID. Existe riesgo de pérdida de capital invertido. Rentabilidades pasadas no aseguran rentabilidades futuras. Las cifras y datos contenidos en este anuncio no constituyen recomendación de compra o venta de una inversión y tienen estricto contenido publicitario. Los Fondos de Inversión disponen de un folleto informativo y documento con los datos fundamentales para el inversor (DFI) que pueden consultarse en las oficinas de GESTIFONSA SGIC, S.A.U., Nº Registro Administrativo CNMV-123, C/ Almagro 8 planta 5ª, 28010 Madrid, en la página web de la Entidad (www.gestifonsa.es) y en la página web de la Comisión Nacional del Mercado de Valores (www.cnmv.es). La Entidad Depositaria de los Fondos de Inversión es Banco Caminos S.A., Entidad de Crédito registrada en el Banco de España con el código de Entidad 0234.