



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA

# ESTRUCTURAS PARA EDIFICIOS EN ALTURA. CLASIFICACIÓN, CARACTERÍSTICAS Y FICHAS.

*Titulación:*

Grado en fundamentos de la arquitectura

*Curso:*

2015-2016

*Alumno:*

López Castillo, Carmen

*Tutor:*

Fenollosa Forner, Ernesto Jesús

*Cotutor:*

Llopis Pulido, Verónica M<sup>a</sup>

## ESTRUCTURAS PARA EDIFICIOS EN ALTURA. CLASIFICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS.

### RESUMEN

El anhelo del hombre por la altura, por alcanzar el cielo con sus obras, resulta claramente evidente en infinidad de antecedentes, como la legendaria Torre de Babel, el Coloso de Rodas, o los campanarios y grandes catedrales construidos en la Edad Media.

El uso de la estructura resistente como elemento expresivo principal no siempre contribuye de manera sincera a la realidad del proyecto. El abandono de lo cuantitativo para centrarse en lo cualitativo hace que la estructura resistente pase a un segundo plano, dejando de ser una necesidad a ser un elemento de expresividad más en la arquitectura.

Es por ello que en este trabajo nos centraremos en los edificios en altura, donde la estructura no es un elemento de expresividad, sino que es su razón de ser: es difícil de ocultar, puede producir un importante impacto en el entorno y, al ser estructuras de gran envergadura, las acciones gravitatorias, de viento y sismo condicionan el funcionamiento del sistema estructural. Al tener gran envergadura presentan poca redundancia, todos sus elementos trabajan en la transmisión de cargas.

Estableceremos, en función de su comportamiento, cuatro tipologías de edificios en altura y analizaremos diversos ejemplos de cada una. Estos ejemplos servirán para establecer una serie de criterios que puedan ser de utilidad a la hora de diseñar edificios en altura con una estructura sincera.

## ABSTRACT

The humans yearning for heights, to reach the sky with their works, is clearly present in numerous precedents, like the legendary Babel Tower, the Rodas Coloso, or the bell towers and great cathedrals of the Middle Ages.

The use of the structure as the main expressive element doesn't always sincerely express the reality of the Project. To neglect the quantitative aspects of it in favor of the qualitative ones displaces the structure to a second plane, ceasing to be a necessity and becoming another expressive element in the architecture.

Because of this in the project we will focus on high buildings, where the structure is not an expressive element, but the main one: it is difficult to hide, it can cause an important impact in the environment and, seeing as they are structures of large proportions, the gravitational forces, wind and seismic condition the way the structure Works. Due to their great magnitude they present little redundancy, all of their elements work in the load transmission.

We shall establish, based on its behaviour, four types of high buildings and will analyze various examples of each. These examples will allow us to establish a series of guidelines which can be useful when designing high building with a sincere structure.

## RESUM

L'anhel de l'home per l'altura, per aconseguir el cel amb les seues obres, resulta clarament evident en infinitat d'antecedents, com la llegendària Torre de Babel, el Colós de Rodas, o els campanars i grans catedrals construïts en l'Edat Mitjana.

L'ús de l'estructura resistent com a element expressiu principal no sempre contribueix de manera sincera a la realitat del projecte. L'abandó del quantitatiu per a centrar-se en el qualitatiu fa que l'estructura resistent passe a un segon pla, deixant de ser una necessitat a ser un element d'expressivitat més en l'arquitectura.

És per açò que en este treball ens centrarem en els edificis en altura, on l'estructura no és un element d'expressivitat, sinó que és la seua raó de ser: és difícil d'ocultar, pot produir un important impacte en l'entorn i, en ser estructures de gran envergadura, les accions gravitatòries, de vent i sísmes condicionen el funcionament del sistema estructural. En tenir gran envergadura presenten poca redundància, tots els seus elements treballen en la transmissió de càrregues.

Establirem, en funció del seu comportament, quatre tipologies d'edificis en altura i analitzarem diversos exemples de cadascuna. Estos exemples serviran per a establir una sèrie de criteris que puguen ser d'utilitat a l'hora de dissenyar edificis en altura amb una estructura sincera.



<b>1_ LA ESTRUCTURA Y LA ARQUITECTURA, Y VICEVERSA. INTRODUCCIÓN.</b>	<b>6</b>
<b>2_ SISTEMAS DE ESTRUCTURAS. GENERALIDADES.</b>	<b>9</b>
<b>3_ SISTEMAS DE ESTRUCTURAS DE ALTURA ACTIVA.</b>	<b>14</b>
3.1_ EVOLUCIÓN DE LOS EDIFICIOS EN ALTURA.	18
3.2_ CARACTERÍSTICAS DE LOS EDIFICIOS EN ALTURA.	22
3.3_ TIPOLOGIAS DE LOS EDIFICIOS EN ALTURA.	30
<b>4_ EDIFICIOS EN ALTURA. CASOS DE ESTUDIO.</b>	<b>46</b>
<b>5_ LA ESTRUCTURA COMO ARQUITECTURA. CONCLUSIONES.</b>	<b>51</b>
<b>6_ BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIA DE IMÁGENES.</b>	<b>53</b>
<b>7_ ANEXOS. FICHAS.</b>	<b>55</b>

## 1\_ LA ESTRUCTURA Y LA ARQUITECTURA, Y VICEVERSA. INTRODUCCIÓN.

*“La arquitectura es el juego aprendido, correcto y magnifico de formas ensambladas en la luz”.*

Le Corbusier.

*“Toda arquitectura es un refugio, toda gran arquitectura es el diseño del espacio que contiene, exalta, abraza o estimula las personas en ese espacio”.*

Philip Johnson.

La arquitectura es la suma de muchas variables, y es la relación entre estas diferentes partes la que le da forma y significado a la arquitectura.

Una de las variables fundamentales es la ESTRUCTURA, como elemento sustentante, pero también es importante en la organización del espacio que buscamos los arquitectos cuando realizamos un proyecto.

*“Las grandes construcciones casi siempre se basaban en la estructura y ésta era, casi siempre la portadora de su forma espacial”.*

Mies van der Rohe.

*“Creo que el material no necesita ser fuerte para construir una estructura fuerte. La fuerza de la estructura no tiene nada que ver con la fuerza del material”.*

Shigeru Ban.

Actualmente, una parte de la arquitectura se caracteriza por usar la estructura como elemento expresivo principal del proyecto. Algunas estructuras resistentes han sido diseñadas y calculadas por ingenieros, pero ahora, han pasado a ser diseñadas por arquitectos que, o bien buscan “dulcificar” la capacidad resistente (FIG\_1), o bien pretenden acentuar la plasticidad y expresividad de la estructura.

Que la estructura forme parte del proceso de diseño del arquitecto ha dado ejemplos, en ocasiones, bastante brillantes (FIG\_2), pero, en otros casos, perjudica el entendimiento de lo

resistente al primar en exceso la apariencia y expresividad de la estructura sobre lo que es la estructura en sí (FIG\_3).



FIG\_1. Félix Candela.  
Rte. Los Manantiales. México. 1958.



FIG\_2. John Utzon.  
Ópera de Sidney. Sidney. 1973.



FIG\_3. Santiago Calatrava.  
Estación metro WTC. Nueva York. 2016.

Todo edificio tiene una estructura sustentante, que es parte fundamental del mismo pues, mientras exista gravedad y los materiales pesen será necesaria y existirá la estructura resistente. Sin embargo, hay otra manera de entender la estructura dentro de la arquitectura, aquella en la que la estructura resistente está tan presente en los edificios que los configura y determina.



FIG\_4. Félix Candela.  
Embotelladora Bacardí. México. 1960.



FIG\_5. Eduardo Torroja.  
Hipódromo Zarzuela. Madrid. 1931.



FIG\_6. Frei Otto.  
Pabellón Alemán. Montreal. 1967.

La estructura es el instrumento para dar forma y generar el espacio en la arquitectura. Además las estructuras determinan de manera fundamental los edificios, pues de ella depende otorgar resistencia: sin estructura no hay arquitectura. El diseño de la estructura es una decisión arquitectónica importante, y debe estar presente desde el principio del proceso de diseño.

La necesidad de la estructura resistente en la arquitectura impone importantes condicionantes, convirtiéndose en un factor de orden que ha sido, hasta el siglo XX, uno de los mayores retos a los que se enfrentaba la edificación. Actualmente, con la aplicación de los avances tecnológicos y conocimientos científicos a la construcción, las posibilidades son mayores que las necesidades que requieren la mayoría de las construcciones. Es, en este momento, cuando la estructura deja de ser estrictamente una necesidad y pasa a convertirse en una oportunidad, en una intención del que diseña, que podrá ponerla en evidencia o no en función de sus ideales. Así pues, la estructura resistente ya no es solución de un problema, sino que responde a una voluntad expresiva.

En función de la voluntad expresiva que se le otorga a la estructura se podrían citar tres corrientes arquitectónicas: por una parte, aquellas en las que se pretende ocultar todo atisbo estructural del edificio (FIG\_7); por otro lado, las que pretenden presentar la estructura



como algo imprescindible, pero que realmente solo refleja la plasticidad de la actual tecnología (FIG\_8) y, por último, aquellas arquitecturas en las que la estructura es la herramienta que las determina y configura (FIG\_9).



FIG\_7. Alberto Campo Baeza.  
Casa Guerrero. Cádiz. 2005.



FIG\_8. Frank Gehry.  
Hotel Marqués de Riscal. Álava. 2007.



FIG\_9. Kenzo Tange.  
Estadio Olímpico Tokio. Tokio. 1959.

Pero, ¿cómo podemos saber en un edificio si la estructura es el instrumento para configurar espacios y determinar la forma en arquitectura? Desde el punto de vista del arquitecto, ¿existen algunos criterios para poder lograr la sinceridad estructural?

En este trabajo nos centraremos en los edificios en altura, donde la estructura no es un mero elemento de expresividad, sino que es su razón de ser. La estructura de los edificios altos debe ser sincera: es difícil de ocultar, puede producir un importante impacto en el contorno exterior y en los espacios interiores (por lo que debe estar presente desde el principio del diseño). Además, al ser estructuras de gran envergadura, las acciones gravitatorias, de viento y sísmicas condicionan el funcionamiento del sistema estructural. Por otro lado, las estructuras de gran envergadura presentan poca redundancia, todos sus elementos trabajan en la transmisión de cargas, Podemos decir, por tanto, que las estructuras de edificios en altura son estructuras sinceras.

Una vez analizadas las diferentes tipologías de edificios en altura, estaremos en disposición de sacar conclusiones y elaborar una serie de criterios que puedan ser de ayuda a la hora de diseñar edificios en altura con una estructura sincera.

## 2\_ SISTEMAS DE ESTRUCTURAS. GENERALIDADES.

*“La estructura ocupa en la arquitectura un lugar que le da existencia y soporta la forma”.*

Heino Engel.

La estructura es el conjunto de elementos, relacionados entre sí, y unidos al suelo de tal modo, que son capaces de resistir y transmitir las fuerzas que sobre ellos actúan. Los requisitos de una estructura son estabilidad, resistencia y rigidez, a lo largo de su vida útil, frente a los diferentes estados de carga que puedan presentarse.

La estructura se basa en leyes de la ciencia natural, unas leyes absolutas (no como las normas de diseño arquitectónico). Para que una estructura sea lo más sincera posible es necesario que las leyes de diseño arquitectónico sean, además, una ley. Para ello, debemos identificar en qué se basan las leyes estructurales y manejarlas para definir las leyes arquitectónicas.

Las leyes estructurales hacen frente a las fuerzas a las que está sometida una estructura, y deben asegurar el equilibrio del conjunto mediante la redistribución de las cargas a lo largo de la geometría de los elementos que conforman la estructura. Estas cargas que desestabilizan la estructura son el peso propio de la estructura (debido al peso de los elementos que la conforman bajo la acción de la gravedad), las denominadas concargas (peso de los elementos constructivos), cargas producidas por el uso del edificio y otras acciones externas a las que está sometida la estructura (viento, nieve, sismo).

En el libro “Sistemas de estructuras” de Heino Engel, se diferencian cuatro mecanismos para redistribuir las fuerzas que actúan sobre una estructura:

\_Adaptar las fuerzas → mecanismo que trabaja a través de la forma del material. Hace trabajar a la estructura bajo tensiones simples (fuerzas de compresión o tracción).

\_Subdividir las fuerzas → mecanismo que actúa a través de barras sometidas a tracción y compresión. Intenta transformar los esfuerzos de flexión en esfuerzos axiales, mucho más sencillos.

\_Confinar las fuerzas → mecanismo que actúa a través de la sección transversal del material. El esfuerzo principal que actúa en la sección es la flexión.

\_Dispersar las fuerzas → mecanismo que actúa principal a través de la longitud y forma de la superficie. Se basa en las fuerzas de membrana, fuerzas de tensión en la superficie.

En la edificación debemos añadir otro mecanismo de orden superior, el de recoger y transmitir las cargas al suelo, debido a la acción en altura.

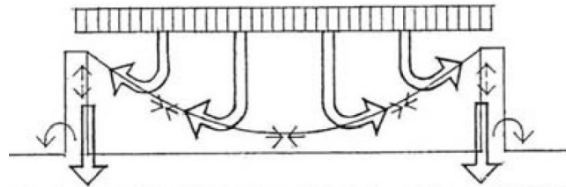
Estos mecanismos que hacen frente a las diferentes fuerzas a las que puede estar sometida una estructura, se pueden relacionar directamente con cuatro sistemas de

estructuras que se basan en ellos. Con este conocimiento podemos hacer que las leyes estructurales sean las normas de diseño que definan nuestra arquitectura, haciendo que la estructura sea lo más sincera posible.

Estos sistemas estructurales son, según Engel:

#### Sistemas de estructuras de forma activa:

Son sistemas portantes de material flexible, no rígido, en los que la transmisión de esfuerzos se efectúa a través de una forma adecuada del material. Los componentes de la estructura están sometidos, únicamente, a esfuerzos normales (de tracción o compresión). Son mecanismos adecuados para conseguir grandes luces y construir grandes espacios diáfanos.



FIG\_10. Transmisión de cargas en estructuras de forma activa.

Son sistemas de forma activa las estructuras de cables, de arcos, las estructuras neumáticas y en tienda.

Algunos ejemplos de este sistema de estructuras son:



FIG\_11. Eduardo Souto de Moura.  
Estadio de Braga. Braga. 2003.



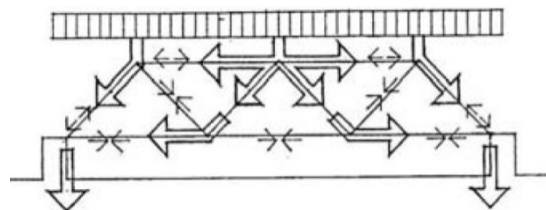
FIG\_12. Álvaro Siza.  
Pabellón de Portugal. Lisboa. 1998.



FIG\_13. Eero Saarinen.  
Aeropuerto Dulles. Virginia. 1962.

#### Sistemas de estructuras de vector activo:

Son sistemas portantes formados por elementos lineales (barras), en los que, gracias a su disposición, se transmiten solicitaciones que actúan en la dirección de las barras, es decir, barras a tracción y barras a compresión. Para garantizar el equilibrio y transmitir las cargas, los sistemas de vector activo usan la triangulación y las uniones mediante nudos. Son mecanismos adecuados como sistemas portantes en cubiertas de grandes luces y para soportar las cargas horizontales en edificios de gran altura.



FIG\_14. Transmisión de cargas en estructuras de vector activo.

Son sistemas de vector activo las estructuras de cerchas, planas y curvas, y las mallas espaciales.

Algunos ejemplos de este sistema de estructuras son:



FIG\_15. Alejandro de la Sota.  
Gimnasio Maravillas. Madrid. 1962.



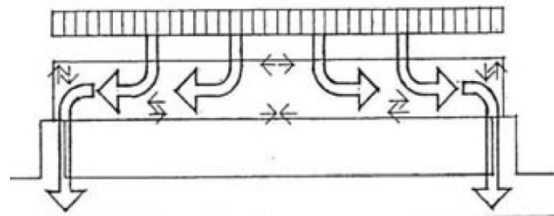
FIG\_16. R.Piano, R.Rogers.  
Centro Pompidou. París. 1977.



FIG\_17. Norman Foster and Partners.  
Sainsbury Centre Visual Arts. Norwich. 1978.

### Sistemas de estructuras de sección activa:

Son sistemas estructurales de elementos lineales rígidos y másticos en los que la transmisión de cargas se realiza a través de la movilización de tensiones, es decir, a través del material de su sección desvía las fuerzas hacia los apoyos. Los componentes de la estructura están sometidos a flexión, a esfuerzos internos de compresión, tracción y cortante. Los mecanismos portantes de sección activa se pueden emplear como megaestructuras a las que se pueden incorporar otros mecanismos portantes.



FIG\_18. Transmisión de cargas en estructuras de sección activa.

Son sistemas de sección activa las estructuras de pórticos, retículas de vigas y losas.

Algunos ejemplos de este sistema de estructuras son:



FIG\_19. Mies van der Rohe.  
Galería Nacional. Berlín. 1968.



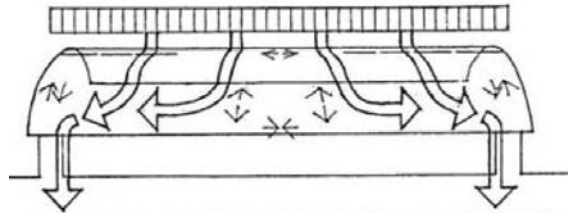
FIG\_20. Frank Lloyd Wright.  
Casa de la Cascada. Pensilvania. 1939.



FIG\_21. Mies van der Rohe.  
Crown Hall- IIT. Chicago. 1956.

### Sistemas de estructuras de superficie activa:

Son sistemas superficiales que, aunque no son resistentes a flexión, resisten esfuerzos cortantes, de tracción y compresión, en los que la transmisión de las fuerzas se efectúa mediante la resistencia de la superficie y una forma adecuada de la misma. Los componentes de la estructura están sometidos a solicitaciones de membrana, fuerzas que actúan en paralelo a la superficie. El diseño de la forma correcta y la continuidad de la superficie son dos características de este tipo de sistemas.



FIG\_22. Transmisión de cargas en estructuras de superficie activa.

Son sistemas de superficie activa las estructuras de láminas y membranas.



FIG\_23. Eduardo Torroja.  
Frontón de Recoletos. Madrid. 1936.



FIG\_24. Eugène Freyssinet.  
Hangares de Orly. Orly. 1923.

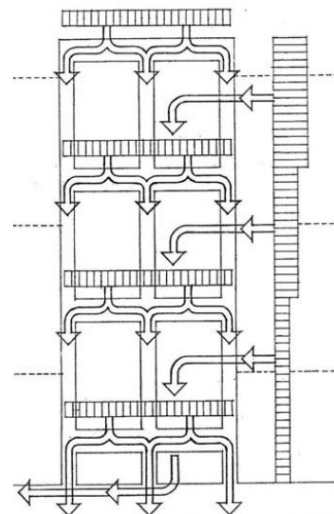


FIG\_25. Eladio Dieste.  
Terminal Omnibus. Salto. 1974.

### Sistemas de estructuras de altura activa.

Son sistemas portantes cuya tarea principal consiste en recoger cargas sobre los planos horizontales (forjados), situados unos encima de otros, y transmitir las verticalmente al suelo. Los edificios en altura están formados por elementos sólidos y rígidos desarrollados en vertical y rigidizados frente a cargas laterales y anclados firmemente a tierra. Los elementos del sistema, tanto los transmisores de cargas como los estabilizadores laterales, están sometidos a fuerzas diferentes variables, por lo que se dice que son sistemas con un estado de tensiones complejo.

Son sistemas de altura activa las estructuras de edificios en altura y grandes rascacielos.



FIG\_26. Transmisión de cargas en estructuras de altura activa.

Algunos ejemplos de este sistema de estructuras son:



FIG\_27. Mies van der Rohe.  
Edificio Seagram. Nueva York. 1958.



FIG\_28. F.J. Sáenz de Oíza.  
Torre Banco de Bilbao. Madrid. 1981.



FIG\_29. Antonio Lamela.  
Torres de Colón. Madrid. 1976.

### 3\_ SISTEMAS DE ESTRUCTURAS DE ALTURA ACTIVA.

Los sistemas estructurales de altura activa son aquellos sistemas portantes cuya tarea principal consiste en recoger cargas sobre los planos horizontales (forjados), situados unos encima de otros, y transmitir las verticalmente al suelo. Los edificios en altura están formados por elementos sólidos y rígidos desarrollados en vertical y rigidizados frente a cargas laterales y anclados firmemente a tierra.

Los edificios en altura no son la repetición de sistemas de una planta y no se comportan como un gran voladizo colocado en vertical; sino que son sistemas mucho más complejos con problemas específicos y soluciones particulares.

Se caracterizan por su desarrollo en altura, con lo que están muy expuestos a las cargas horizontales (siendo, en muchas ocasiones, más importantes que las cargas gravitatorias). Por esta razón, la rigidización transversal es un elemento fundamental a tener en cuenta desde el inicio del proceso de diseño de las estructuras de edificios en altura.



FIG\_30. Construcción hotel Bali, Benidorm. Estructura de pantallas.

Puesto que a partir de una determinada altura, los esfuerzos horizontales son tan importantes que empiezan a determinar una forma predeterminada del edificio, en este trabajo trabajaremos con edificios en altura (entre 40 y 80 plantas) y no con los grandes rascacielos que se están construyendo en la actualidad.

Los edificios en altura se pueden diferenciar según el sistema de concentración de cargas en cada planta: en el sistema reticular los puntos de concentración de las cargas están distribuidos uniformemente por toda la planta; en el sistema perimetral (tubular) están situados en el perímetro y, en el sistema nuclear, la concentración de cargas se encuentra en el centro de la planta.

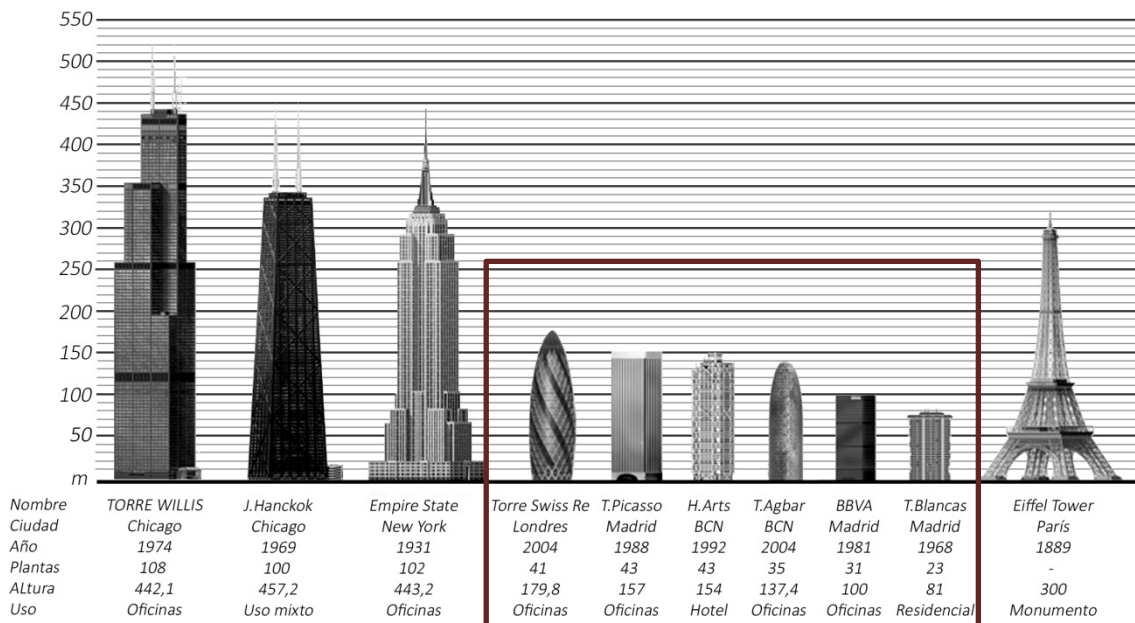
Para conseguir una planta lo más flexible posible, el proyecto debería aspirar a reducir al máximo los elementos verticales de transmisión de cargas, tanto en sección como en número. Pero también es cierto que, debido a la necesaria continuidad de la transmisión de las cargas, los elementos verticales se convierten en elementos de sección importante, lo que limita la superficie útil de las plantas. Una de las soluciones para este problema supone que las plantas dejen de estar apoyadas en los pilares, sino que se encuentren suspendidas puesto que, al trabajar a tracción en lugar de compresión los pilares no necesitan tanta sección. Esta transmisión indirecta de las cargas exige un sistema estructural de mayor envergadura para transmitir las cargas hasta la cimentación, es lo que se conoce como edificios-puente



FIG\_31. Torre Cepsa, Madrid. Rascacielos puente.

Una de las razones por las que decimos que la estructura de un edificio en altura es una estructura sincera es porque este tipo de edificios exigen la continuidad de los elementos verticales que transmiten la cargas hasta el suelo, por lo que la distribución, en cada planta, de los puntos de concentración, debe partir de una reflexión sobre la utilización de la superficie útil, lo que supone tener en cuenta la estructura desde el principio del proceso de diseño.

Otra de las razones por las que consideramos sincera la estructura de los edificios en altura es porque, la necesidad de reducir al máximo la sección de los elementos que transmiten las cargas para aprovechar al máximo la superficie útil, todos los elementos que definen el espacio deben ser necesariamente elementos estructurales.



FIG\_32. Diagrama representativo de los edificios en altura.



El auge de los edificios en altura se debe, entre otros factores, a la necesidad de un mayor aprovechamiento del suelo en las grandes ciudades y la posibilidad de concentrar servicios comunes como las instalaciones en una sola construcción, dando servicio de forma más económica.



FIG\_33. Skyline de Manhattan.

No se puede considerar únicamente el número de plantas de un edificio a la hora de catalogarlo como edificio en altura, sino que deben estudiarse, en conjunto, diversos factores:

\_ Circulaciones verticales del edificio y la protección contra el fuego, las dificultades que surgen de la colocación de los ascensores o la superación de la altura alcanzable por los equipos de salvamento.

\_ La estructura debe proyectarse de modo que resista, de forma económica, las acciones laterales (viento y sismo), manteniendo las condiciones de seguridad, estabilidad y habitabilidad necesarias, puesto que las magnitudes de estos esfuerzos dependen en gran medida de la altura del edificio.

\_ La concepción del sistema estructural, pues la forma de resistir las acciones y los procedimientos de puesta en obra, dependen de que el edificio se construya en hormigón armado, acero o sea prefabricado.

La optimización de la estructura tiene como principal objetivo eliminar o reducir al máximo el coste de la estructura a la vez que se garantizan las condiciones de rigidez y estabilidad frente a todas las cargas a las que está sometido un edificio.

Algunos aspectos que afectan al dimensionamiento de algunos elementos por su influencia sobre la optimización de la estructura son:

\_ Disposición en planta del edificio y de los elementos resistentes dentro de ella. Las plantas muy asimétricas generan torsiones que obligan a soportar esfuerzos adicionales. Además, tampoco son convenientes las distribuciones que obliguen a concentrar cargas importantes en las plantas altas del edificio o dejen diáfanas plantas intermedias, puesto que los esfuerzos generados por las acciones laterales sobre algunos elementos serían mayores y habría que sobredimensionarlos.

\_ Proyecto y ejecución de los nudos. Se debe garantizar la transmisión de esfuerzos y limitar las deformaciones relativas entre los elementos, de modo que se reduzca la deformación lateral del conjunto y suponga un ahorro en la estructura.

\_ El aprovechamiento del comportamiento elástico de la estructura permite que, siempre que se asegure la suficiente ductilidad, la estructura siga resistiendo las sollicitaciones que se producen en la estructura a causa de las deformaciones superiores al límite elástico, muy interesante para la resistencia frente a fenómenos sísmicos.

### 3.1\_ EVOLUCIÓN DE LOS EDIFICIOS EN ALTURA.

El anhelo del hombre por la altura, por alcanzar el cielo con sus obras, resulta claramente evidente en infinidad de antecedentes, como la legendaria Torre de Babel, el Coloso de Rodas, o los campanarios y grandes catedrales construidos en la Edad Media.

Pero se puede considerar que el desarrollo de los edificios en altura, tal y como los consideramos actualmente, surge, en paralelo, con el crecimiento de la población en las ciudades, puesto que, debido a la industrialización (s.XIX) la población rural se trasladó a las ciudades. Además, los avances en la tecnología y los nuevos materiales favorecieron el desarrollo de esta nueva tipología de edificios.

Con la aparición del ascensor en 1854 de la mano de Elisha Graves Otis, que permitía transportar verticalmente, y con cierta rapidez, personas y enseres; y su posterior electrificación en 1887; los edificios superaron las 4 alturas, y pasaron a construirse los primeros edificios en altura y rascacielos.



FIG\_34. Otis haciendo una demostración de su invento en 1854.

El incendio que sufrió Chicago en 1871, que destruyó gran parte de la ciudad, hizo que fuera necesario un nuevo plan para reconstruir la ciudad, usando materiales diferentes de la madera (que propició la expansión de aquel incendio). Fueron una serie de arquitectos, de la Escuela de Chicago (Louis Sullivan y Le Baron Jenney entre otros), quienes se hicieron cargo de la reconstrucción, introduciendo nuevos materiales y técnicas para la construcción de los primeros rascacielos.



FIG\_35. Louis Sullivan. Wainwright Building. San Luis. 1890.

Las estructuras verticales de los primeros edificios en altura fueron los tradicionales muros de carga, que se construían aumentando sus espesores con el número de plantas. Este método proporcionaba buenos resultados, pero eran muy costosos y ocupaban mucha superficie útil en las plantas. La durabilidad y seguridad de estos muros de carga tenía poco que ver con problemas de resistencia, más bien dependía de la estabilidad, es decir, de la esbeltez de los muros.

Al proceso de liberación de la planta siguió la liberación de las fachadas, siendo la Escuela de Chicago el mejor exponente de este desarrollo. La obra de los arquitectos e ingenieros pertenecientes a esta escuela se caracteriza por respeto al papel de la estructura en la definición del tipo y en la apariencia de sus fachadas.



FIG\_36. Obreros en un descanso de la construcción de un rascacielos.

Poco a poco, y al industrializarse la fabricación de perfiles metálicos (fundición, hierro y finalmente, acero), y con la introducción, a finales del siglo XIX del hormigón armado en la edificación, los muros de carga fueron desapareciendo de la construcción de edificios en altura.

Pero no fue una desaparición brusca, sino que existió una etapa intermedia donde se combinaron muros de carga de piedra y ladrillo en fachadas y núcleos verticales, con pilares intermedios. En esta tipología, los muros de fachada y los núcleos proporcionaban rigidez y estabilidad transversal al edificio, mientras que los pilares liberaban el espacio interior aumentando los espacios útiles. Más tarde, el ladrillo realizó sólo funciones de cerramiento, como en el Home Insurance Building (42m, 10 plantas), de William Le Baron Jenney, en Chicago en 1883, considerado como el primer rascacielos, y que fue construido gracias al invento del ascensor, la difusión de la electricidad y la sustitución de la mampostería tradicional por viguetas metálicas, lo que permitió aligerar la estructura y aumentar su elevación. La estructura de este edificio era semirrígida de pórticos de vigas y pilares de hierro y acero, y el ladrillo como cerramiento, sin ser las fachadas portantes.

FIG\_37. William Le Baron Jenney.  
Home Insurance Building, Chicago.1883.

En 1890, el hormigón se empezó a utilizar como material estructural, primero imitando la estructura de acero y, tras la Segunda Guerra Mundial, empezó a adquirir identidad propia. Fue el momento de la construcción de emblemáticos edificios como la torre Woolworth en 1913, de Cass Gilbert, que llegó a los 57 pisos y 241m de altura, o el Empire State Building, de William F. Lamb, construido en 1931 con 381m de altura y 102 pisos, y que fue el edificio más alto del mundo durante más de cuarenta años.

La crisis de 1929 impulsó la construcción de rascacielos. Éstos son edificios muy caros, pero que también permite aprovechar al máximo el precio del suelo y, además, su construcción era un símbolo de grandeza y poder que ocultaba las miserias de la situación económica.

Fue a partir de la Segunda Guerra Mundial cuando la estética del rascacielos se difundió por todo el mundo. Los edificios construidos a partir de este momento basaban su estabilidad en el comportamiento monolítico de la conexión viga-soporte; conseguir esta rigidez en las estructuras de hormigón armado suponía una disposición y armado muy complicados, mientras que, en las estructuras de acero, requería que las uniones fuesen soldadas o realizadas mediante roblones.

El último rascacielos construido con muros de carga fue el Monadnock Building, en 1891 en Chicago, del ingeniero J.Root. Sus fachadas eran portantes y estabilizadoras para las cargas laterales, con 6 pies de espesor en la base y un pie en coronación; las cargas verticales las soportaban exclusivamente las columnas de acero del interior. Los muros de carga llegaron a tener 180cm para 16 plantas.

Con el Movimiento moderno se produjo la separación definitiva entre estructura y cerramiento, caracterizado por los edificios de Mies, con sus esqueletos metálicos y cerramientos acristalados.

Con la generalización del muro cortina y los avances en las estructuras metálicas aumentaron las posibilidades de elección del sistema estructural.



FIG\_38. J. Root.  
Monadnock Building. Chicago.1891.

Además, al ir decreciendo con la altura las cargas laterales acumuladas por las plantas superiores a una dada, las secciones de los elementos debían ir variando, lo que impedía una rapidez de ejecución, puesto que era inviable la fabricación en serie.

La aparición de la pantalla como arriostramiento de los pórticos mejoró su comportamiento a flexión, pero introdujo una restricción en cuanto a la configuración espacial interior, puesto que las pantallas ocupaban parte de la superficie útil en el interior del edificio.

A medida que los avances tecnológicos permitían aumentar la altura de los edificios, las tipologías hasta ese momento utilizadas no permitían estas nuevas alturas deseadas por lo que había que encontrar nuevas formas de elevar los edificios asegurando su estabilidad y seguridad. En la segunda mitad del siglo XX apareció una figura que revolucionaría el diseño de los edificios en altura: Fazlur Khan, quien inició sistemas estructurales fundamentales para el diseño de edificios en altura en la actualidad, introdujo métodos y conceptos de diseño que establecen nuevos estándares para el uso eficiente y sugieren nuevas posibilidades para la construcción en arquitectura.



FIG\_39. Fazlur Khan.

La innovación central de Khan en el diseño y construcción de rascacielos fue la idea del sistema estructural “tubo” para edificios altos; se dio cuenta que la rígida estructura de acero que había dominado el diseño de edificios en altura no era el único sistema de montaje. Su concepto de tubo, utilizando toda la pared exterior como estructura sustentante revolucionó el diseño de los edificios altos. La mayoría de los edificios de más de 40 plantas construidos desde los años 60 utilizan un diseño de tubo derivado de los principios de ingeniería estructural de Khan.

Trabajando en el estudio SOM (Skidmore, Owings y Merrill), fue el encargado de diseñar edificios emblemáticos hoy en día, como la Torre Sears o el John Hancock Center. Chicago. 1965.



FIG\_40. Fazlur Khan, SOM.  
John Hancock Centre. Chicago. 1965.

En la actualidad, el cambio climático ha motivado una arquitectura verde, ecológica y sostenible, que se va poniendo de manifiesto para que los edificios sean más autosuficientes, como en el caso de la torre Hearst, de Norman Foster.

Debido a la densidad de las ciudades, los consolidados rascacielos de décadas pasadas conviven con una nueva generación de edificios altos, los Highrise, que se convierten en verdaderos iconos escenográficos, ganando cada vez más altura, como en el caso del Burj Khalifa, construido en 2010 y ubicado en Dubái, que alcanza los 828m de altura y está considerado el edificio más alto del mundo en la actualidad.



FIG\_41. SOM.  
Burj Khalifa. Dubái. 2010

### 3.2\_ CARACTERÍSTICAS DE LOS EDIFICIOS EN ALTURA.

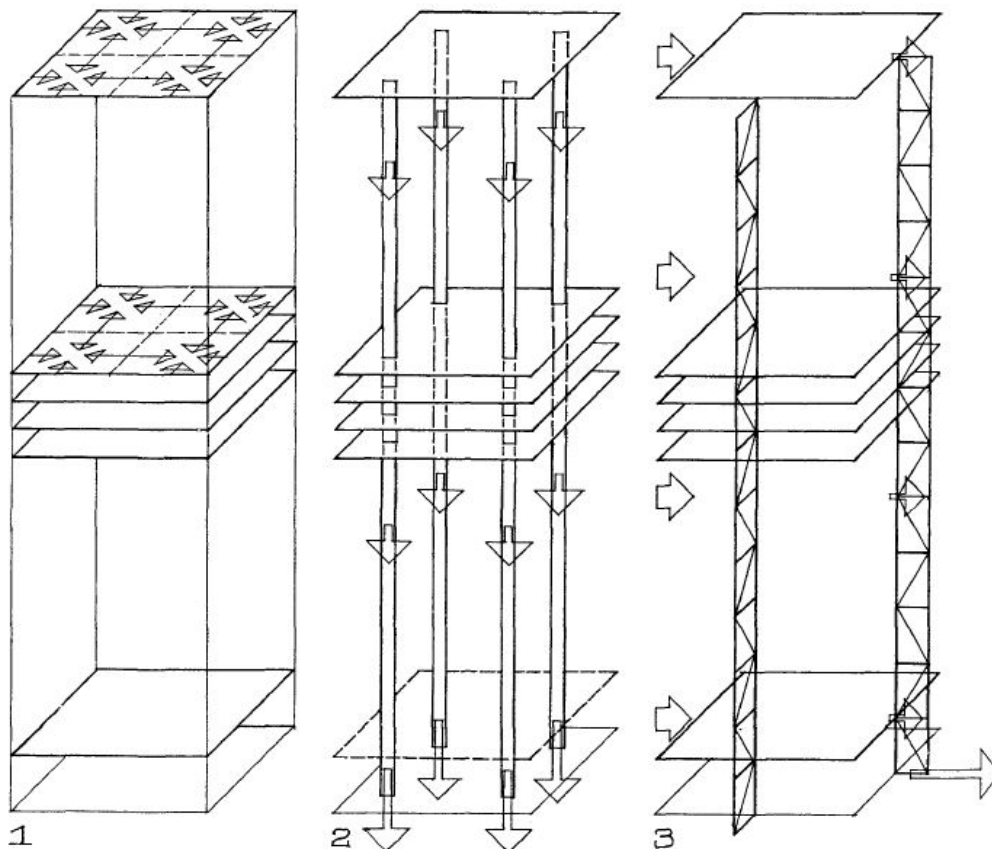
#### A. Condicionantes estructurales.

En el diseño de estructuras de altura activa aparecen tres mecanismos:

1\_ Concentración de cargas: en cada planta, el forjado se encarga de repartir las cargas horizontales que actúan en él hasta los elementos verticales.

2\_ Transmisión de cargas: los elementos verticales de la estructura se encargan de transmitir las todas las cargas hasta la cimentación.

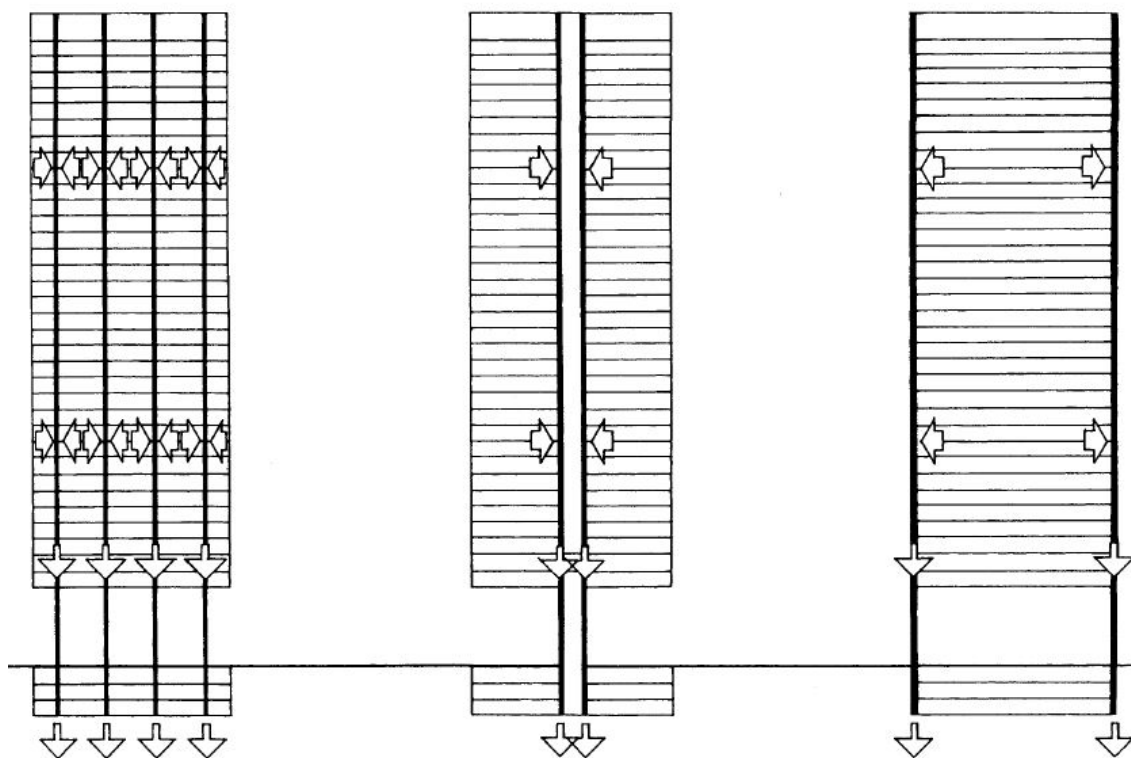
3\_ Rigidización: frente a las cargas horizontales, el edificio debe arriostrarse para evitar deformaciones excesivas.



FIG\_42. Mecanismos en el diseño de estructuras en altura.

El objetivo del diseño de una estructura de altura activa es conseguir la máxima integración entre los tres mecanismos descritos anteriormente, de modo que cada uno también realice algunas funciones de los otros.

En los sistemas de altura activa, los elementos horizontales (vigas y forjados) son los encargados de agrupar las cargas horizontales y repartirlas entre los elementos verticales, que son los que las transmiten hasta la cimentación. En cada una de las tipologías estructurales de edificios en altura, este sistema de agrupación y transmisión de cargas se realiza de un modo u otro:



FIG\_43. Principales sistemas de agrupación y transmisión de cargas.

El primer esquema (FIG\_43-a) corresponde a un sistema reticular, en el que la distribución de las cargas es uniforme, es decir, las cargas de cada planta se reparten proporcionalmente al ámbito de influencia de cada soporte, y se transmiten individualmente hasta la cimentación.

El segundo esquema (FIG\_43-b) corresponde a un sistema de núcleo, donde las cargas se agrupan en el centro de la planta y se transmiten a través del núcleo hasta el terreno.

Por último, el tercer esquema (FIG\_43-c) corresponde a un sistema tubular, donde las cargas se agrupan en el perímetro y se transmiten periféricamente hasta la cimentación.

Las acciones horizontales, por cómo condicionan las secciones de los elementos resistentes y por las deformaciones y movimientos horizontales que producen, son las que más condicionan la elección del sistema estructural de edificios en altura.

Las dos acciones laterales más importantes son el viento y el sismo y, aunque entre ambas hay grandes diferencias, tienen un aspecto en común, son dinámicas y aleatorias, por lo que no se puede conocer de antemano su magnitud exacta.

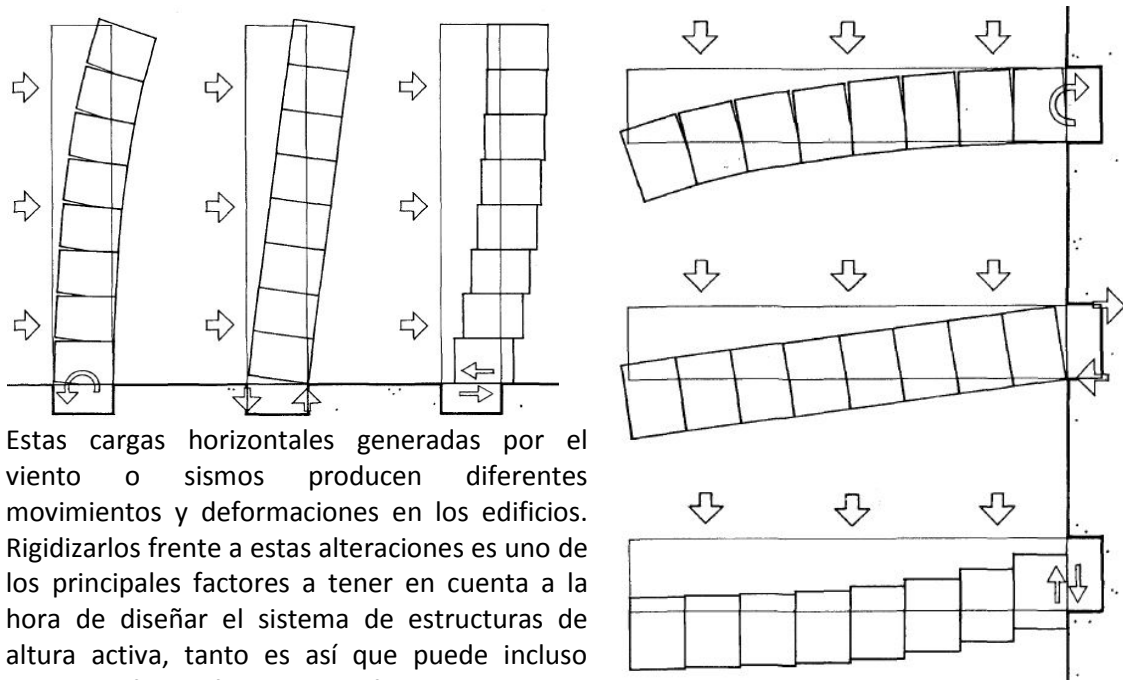
Puesto que las acciones de viento actúan sobre los edificios durante períodos de tiempo mucho más largos que el sismo, el control sobre los desplazamientos producidos por el viento debe ser mayor que los debidos al sismo, ya que los de viento afectan al estado en servicio de la estructura, mientras que en los de sismo se pueden admitir desplazamientos que puedan producir daños parciales en el edificio. En este apartado nos centraremos en los efectos de las acciones del viento.



El viento es una carga dinámica que puede definirse como una masa de aire que se mueve a una determinada velocidad y en cierta dirección. Ésta, al encontrarse con la fachada de un edificio ejerce una presión, siendo máxima cuando la dirección del viento es perpendicular a la fachada sobre la que actúa (situación más desfavorable y la que se considera a efectos de cálculo).

Así pues, independientemente de la tipología estructural elegida para rigidizar el edificio frente a las cargas de viento, el conjunto se comporta como una ménsula empotrada en el terreno, de modo que, al encontrarse la masa de aire en movimiento con el edificio se produce un momento de vuelco, que debe ser equilibrado con otro momento, de igual magnitud y signo contrario, generado por los esfuerzos internos de la estructura.

La presión que ejerce el viento aumenta con la altura del edificio, y su efecto sobre la estructura vertical es el mismo que tendría una carga gravitatoria sobre una viga en voladizo.



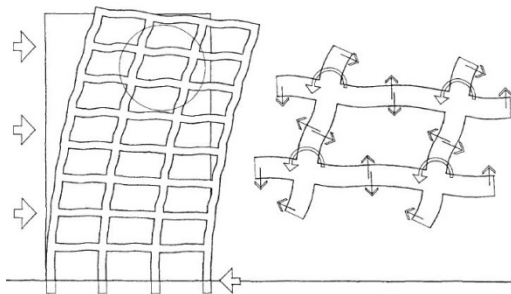
Estas cargas horizontales generadas por el viento o sismos producen diferentes movimientos y deformaciones en los edificios. Rigidizarlos frente a estas alteraciones es uno de los principales factores a tener en cuenta a la hora de diseñar el sistema de estructuras de altura activa, tanto es así que puede incluso llegar a definir la forma del edificio.

FIG\_44. Mecanismo portante frente a cargas laterales.

Los principales tipos de deformación que sufren los edificios bajo cargas horizontales son:

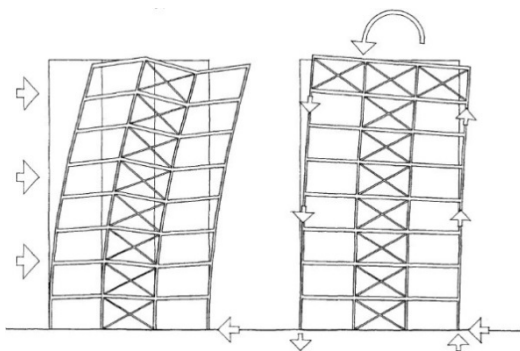
FIG\_45. Tipos de deformación bajo cargas horizontales.

Frente a la acción de las cargas horizontales, la respuesta de los diferentes sistemas estructurales se basa en unos mecanismos resistentes:



FIG\_46. Mecanismo resistente en estructuras de pórticos rígidos.

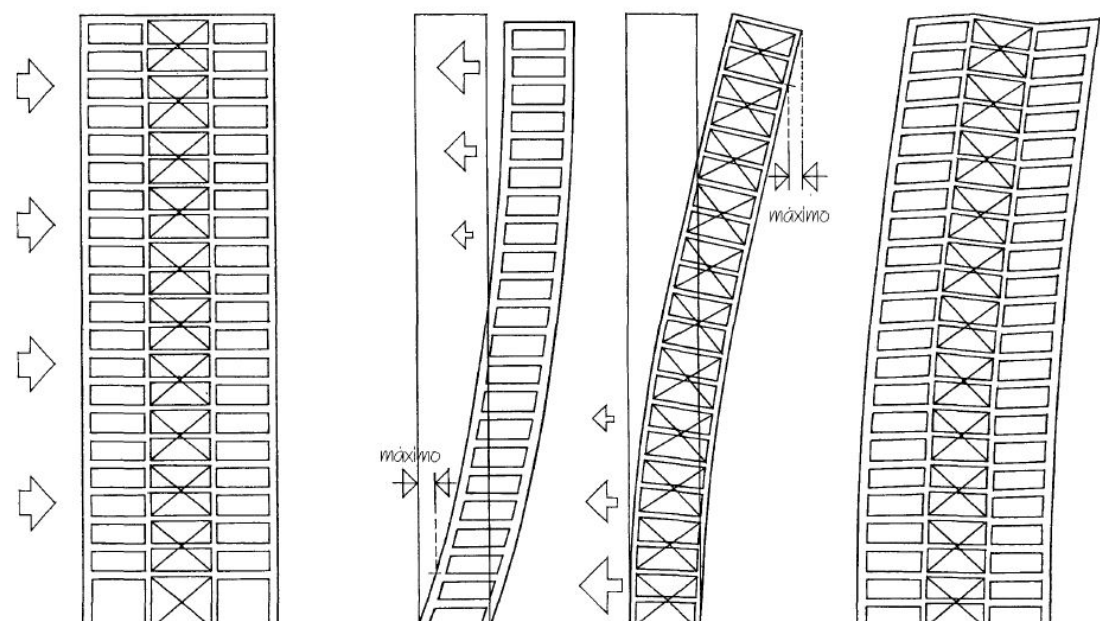
La rigidez lateral en el sistema porticado de nudos rígidos se basa en la rigidez a flexión de los elementos que lo configuran (vigas y soportes) y de los nudos que los unen. Al deformarse debido a la acción de cargas laterales, aparecen fuerzas transversales en pilares y vigas que generan momentos de giro en los nudos (debido a que su rigidez se opone a la deformación).



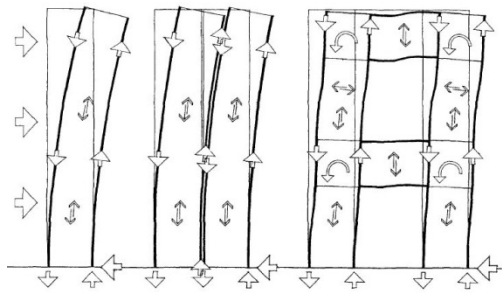
FIG\_47. Sistema de rigidización superior.

Cuando se hace uso de un sistema combinado de pórticos y pantallas de arriostramiento, el mecanismo de rigidización aumenta. La deformación de la pantalla de arriostramiento debida a la acción de cargas horizontales origina esfuerzos en los pilares exteriores. Estos esfuerzos, de tracción y compresión, generan un momento opuesto que equilibra la estructura, reduciendo los esfuerzos de flexión y la deformación.

En las estructuras porticadas, debido al esfuerzo cortante, aparecen grandes deformaciones horizontales, cuya distorsión angular máxima se da en la base, debido al esfuerzo cortante. La rigidez de la estructura depende de la parte superior. Por el contrario, cuando la estructura está formada por pantallas, el momento flector produce un desplazamiento, que tiene su máximo valor en la parte alta. La rigidez de la estructura depende de la parte inferior. Los sistemas estructurales que combinan ambos mecanismos tienen menos deformación global, puesto que la unión entre ellas garantiza la compatibilidad de deformaciones.



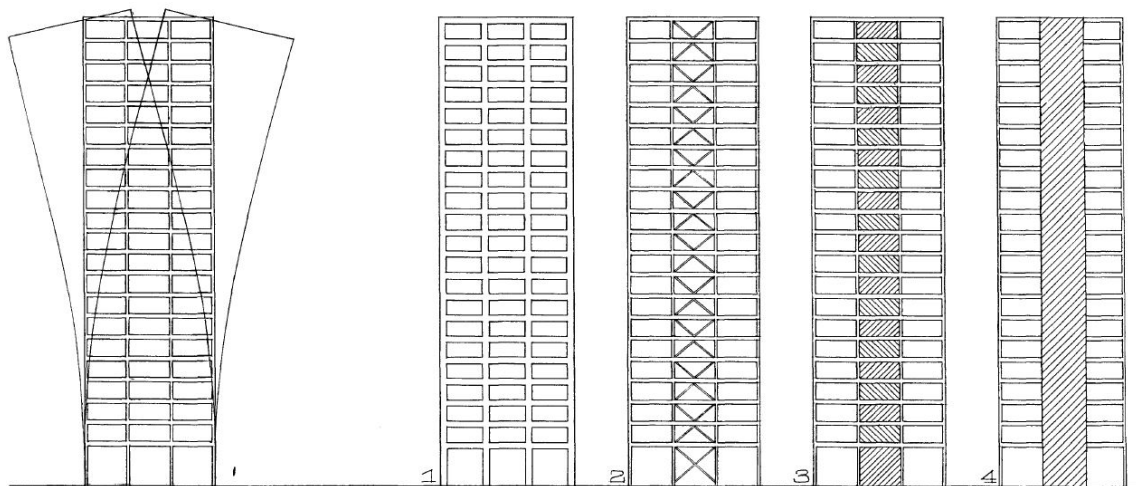
FIG\_48. Mecanismos de rigidización en estructuras combinadas de pórticos y pantallas.



FIG\_49. Mecanismo resistente en estructuras tubulares.

En los sistemas tubulares, la construcción de las paredes exteriores resistentes a esfuerzos cortantes, así como la unión rígida entre ellas, hace que sea un sistema estructural especialmente eficaz frente a las cargas laterales, debido a que todos los elementos (pilares, nudos, antepechos, etc...) colaboran en la resistencia lateral, aprovechando el máximo brazo mecánico del edificio.

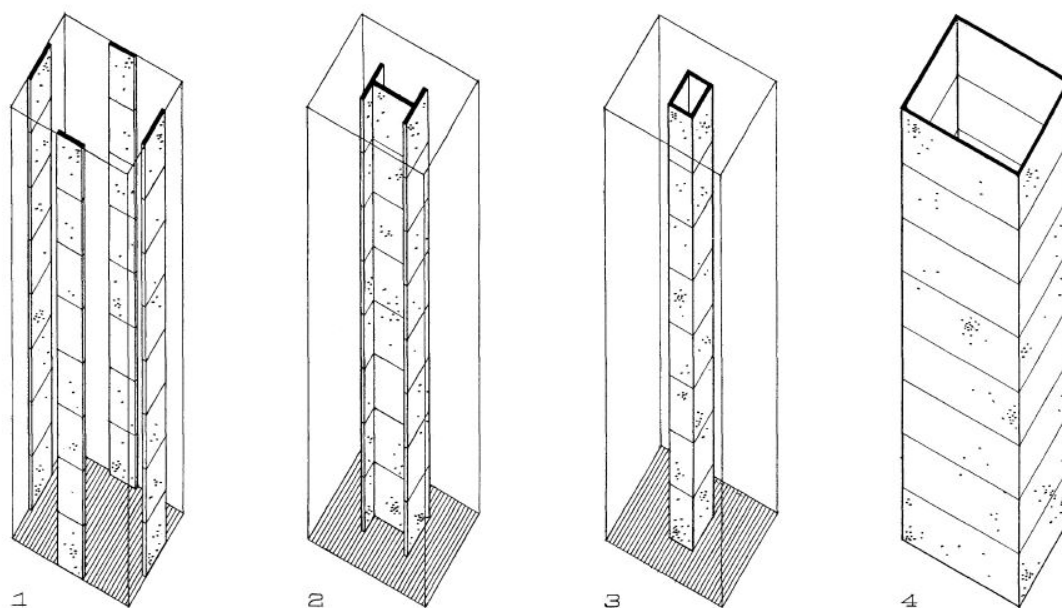
Existen varios modos para rigidizar una estructura frente a cargas horizontales, de los que nacen las diferentes tipologías estructurales de edificios en altura:



FIG\_50. Principales mecanismos para rigidizar estructuras verticalmente.

Las estructuras porticadas pueden rigidizarse sobredimensionando los elementos para aumentar la rigidez (FIG\_50-1), triangulando uno o varios vanos (FIG\_50-2), disponiendo un muro en el interior del edificio (FIG\_50-3), o bien mediante un muro en las fachadas (FIG\_50-4).

En cuanto a la disposición de los muros de rigidización (FIG\_51), éstos se pueden colocar en diferentes posiciones: en la fachada en varias direcciones (FIG\_51-1), en el interior (FIG\_51-2), en el interior formando cajón (FIG\_51-3), o en el perímetro formando un tubo (FIG\_51-4).



FIG\_51. Formas normalizadas de rigidización vertical.

Los sistemas de transporte vertical y las instalaciones tienen una gran influencia sobre la arquitectura, ya que la satisfacción de las necesidades relativas a la funcionalidad del edificio o la comodidad de sus ocupantes va ligada a una adecuada previsión de las instalaciones y equipos que éstas precisen.

En el caso de edificios en altura, las grandes exigencias funcionales y de espacio de las instalaciones son más difíciles de satisfacer pues el acondicionamiento de aire, la ventilación y el suministro de agua requieren conductos y canalizaciones que hay que llevar a todas las plantas. Así pues, las instalaciones tienen que preverse desde un primer momento, pues pueden interferir en la concepción arquitectónica y estructural del edificio.

### **B. Condicionantes de protección contra incendios.**

El sistema de protección contra el fuego es de gran importancia en los edificios en altura, sus exigencias tienen una gran influencia en la concepción arquitectónica de los edificios altos.

Se puede considerar, desde el punto de vista de la protección contra el fuego, que un edificio será alto cuando su altura supere la altura máxima a la que pueden acceder desde el suelo los equipos mecánicos de los servicios de bomberos. En las plantas superiores a este límite, la protección deberá emprenderse desde el interior del propio edificio, lo que exige unas particulares precauciones.

Las dificultades que plantean los edificios en altura se basan en las condiciones de accesibilidad de los bomberos y en la evacuación global del inmueble en caso de alarma.

Para una protección eficaz contra el fuego se establecen unas exigencias mínimas, encaminadas a salvaguardar las vidas humanas, entre las que destacan:

\_Disposiciones arquitectónicas que faciliten la evacuación de las personas.

- \_ Exigencias en los accesos y en la ubicación de maquinaria de servicios de socorro.
- \_ Comportamiento al fuego de diferentes unidades y elementos estructurales.
- \_ Instalaciones de alarma y socorro.

En la edificación en altura se hace imprescindible asegurar una estabilidad de la estructura suficiente tras un incendio. Respecto al comportamiento de la estructura en su conjunto, presenta unos márgenes de seguridad a destacar:

- \_ Los sistemas hiperestáticos se comportan mejor que los isostáticos al transmitir mejor los esfuerzos, pudiendo soportar mejor una ruina localizada.
- \_ En las construcciones prefabricadas se necesita prever entregas suficientes en apoyos y anclajes, a causa de las deformaciones que pudieran producirse.
- \_ Las uniones y rigidizaciones (verticales y horizontales) deben protegerse perfectamente, sobre todo si son decisivos en la estabilidad del conjunto.
- \_ Los sistemas muy susceptibles al fuego, como las torres con forjados suspendidos por cables pretensados, deben plantearse cuidadosamente, asegurando la protección necesaria.
- \_ debe prestarse especial atención a los elementos de hormigón armado y pretensado que puedan dañarse por tensiones térmicas relativamente débiles, que pueden provocar fisuras en la estructura o alteran la unión acero-hormigón.

Respecto a los sistemas de comunicación vertical, la disposición del conjunto de las escaleras y ascensores condiciona en gran medida la distribución de las superficies útiles. En la mayoría de los casos, las exigencias relativas a la fácil accesibilidad de los ocupantes a escaleras y ascensores, así como las exigencias mínimas de seguridad y protección contra el fuego, tienden a situarlos en una posición centrada de la planta.

Las principales exigencias que imponen el resto de las instalaciones (acondicionamiento del aire, ventilación y suministro de agua) a la distribución de espacios derivan de la ubicación de los conductos y canalizaciones que precisan, así como de la necesidad de prever algunas plantas técnicas (plantas dedicadas casi por completo a instalar los equipos precisos).

### **C. Condicionantes funcionales.**

La clase de función del edificio tiene gran repercusión en la elección del sistema estructural, pues las características de los espacios libres necesarios entre elementos resistentes, la instalación de los servicios (aire acondicionado y calefacción fundamentalmente) y la flexibilidad para satisfacer otras necesidades condiciona el tipo estructural más idóneo.

Las diferencias más significativas pueden darse entre un edificio de oficinas y otro residencial:

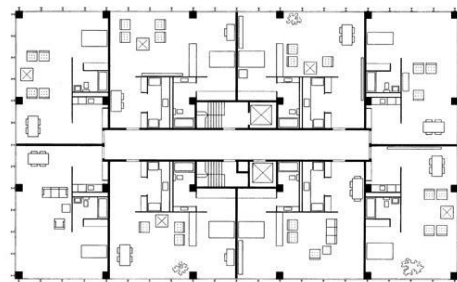
- \_ Los edificios de oficinas precisan mayores luces y alturas libres, y tienden a concentrar las instalaciones y servicios comunes en una zona central (lo que favorece el sistema basado en un núcleo rígido interior que las albergue).

\_ Desde el punto de vista de la flexibilidad en la distribución de espacios, en los edificios de viviendas pueden existir particiones fijas, mientras que en los de oficinas se requiere mayor libertad para modificar la distribución, lo que se hace difícil si hay elementos fijos.

Los edificios residenciales (viviendas, hoteles, apartamentos...) tienen la característica común de tener divisiones ejecutadas al mismo tiempo que la estructura y que permanecen inalteradas a lo largo de la vida útil del edificio, lo que facilita la disposición de los soportes (no precisan un armado importante y pueden quedar ocultos).

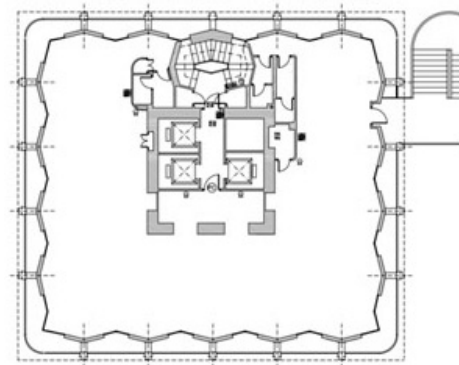
En este tipo de edificios se pueden aprovechar las divisiones permanentes para albergar los conductos verticales de las instalaciones y, al no necesitar tantos conductos horizontales, se puede emplear una losa como forjado.

El sistema estructural de este tipo de edificios puede estar formado por pórticos, constituidos por soportes aislados sobre los que se apoyan las losas planas de los forjados, procedimiento económico por la reducción de la altura de las plantas y por la ligereza del forjado.



FIG\_52. Planta del edificio Lake Shore Drive.  
Viviendas.

En los edificios destinados a oficinas, debido a la necesidad de liberar lo máximo posible la planta para poder ajustar las divisiones interiores a las necesidades de cada momento, la tendencia ha llevado a la reducción del número de soportes interiores, llevando la estructura resistente a la fachada (sistema tubular) o mediante un sistema de núcleo central, que aglutine las instalaciones y demás servicios a la vez que trabaja como elemento sustentante principal.



FIG\_53. Planta de las Torres de Colón.  
Oficinas.

### 3.3\_ TIPOLOGIAS DE EDIFICIOS EN ALTURA.

En edificios en altura, las tipologías estructurales más usuales son las siguientes:

#### Estructura de pórticos o reticular:

Esta tipología está constituida, de forma general, por un entramado reticular de vigas y pilares conectados entre sí mediante uniones rígidas. Su configuración viene determinada principalmente por las cargas verticales.

Debido a la continuidad entre los elementos (uniones rígidas), las cargas horizontales generan flexión, tanto en las vigas como en los pilares, por lo que su capacidad de carga depende de la resistencia de estos elementos, disminuyendo al aumentar la altura de las plantas y la separación entre soportes.

Frente a las cargas verticales, los elementos horizontales recogen las cargas y las transmiten, mediante un comportamiento de "sección activa", a los pilares, generando en ellos compresiones, pero también cortantes y momentos flectores. De esta forma se hacen interactuar entre sí a las diferentes solicitaciones (axiles, cortantes, flectores y cortantes), razón por la cual no se pueden despreciar en ningún caso los efectos de segundo orden (los esfuerzos adicionales producidos por la excentricidad de los axiles, tanto en vigas como en soportes).



FIG\_54. Vista y planta del Sas Building.

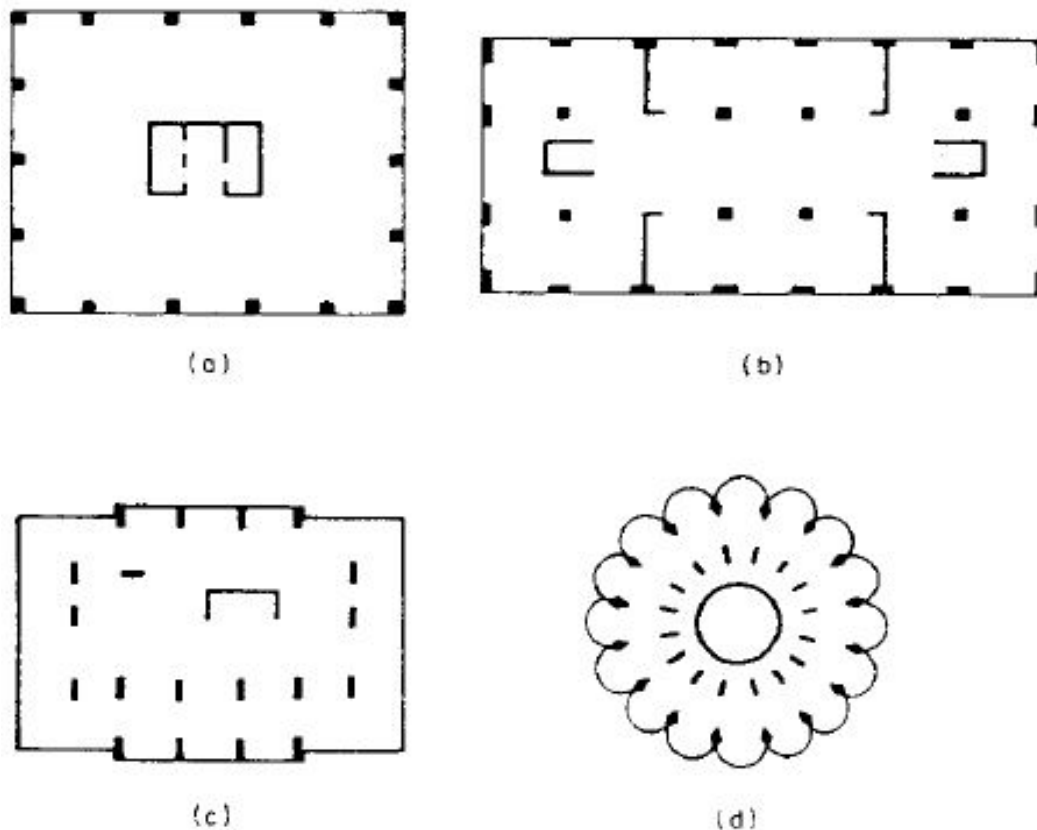
La rigidez del conjunto se obtiene reduciendo la distancia entre soportes (reduciendo longitud de viga), o aumentando la sección de vigas y soportes, lo que obliga a sobredimensionar los elementos pudiendo resultar antieconómico. Por ello se habla de que, a partir de un número determinado de alturas (20 o 30), los pórticos en sí mismos no tienen rigidez suficiente para soportar los esfuerzos laterales, por lo que se debe recurrir a pantallas o núcleos de rigidización.

La deformación predominante en este tipo de sistemas es la que genera el esfuerzo cortante que actúa a nivel de cada planta, sobre los soportes.

El desplazamiento lateral se produce debido a la flexión de las vigas y soportes y a la deformación axil de los soportes, que con sus alargamientos y acortamientos contribuyen a resistir el momento exterior.

Este sistema estructural suele usarse para edificios de hasta 30 plantas, en el caso de estructuras de acero, y para edificios de hasta 20 plantas, si la estructura es de hormigón.

Para edificios de más altura resulta necesario acudir a la ayuda de las pantallas. La combinación de pórticos y pantalla permite que las pantallas otorguen rigidez al conjunto mientras que los pórticos conservan su ductilidad y permiten mayores espacios libres en el interior. La forma y disposición que pueden adaptar las pantallas en planta puede ser:



FIG\_55. Disposiciones habituales en edificios en altura rigidizados por pórticos y pantallas.

La aparición de esta forma estructural va aparejada a dos hechos que tienen lugar en la edificación en altura:

\_La aceptación de que la rigidez de las estructuras porticadas a partir de un número determinado de plantas (20 a 30) es insuficiente; a partir de este límite, la construcción en la que la resistencia ante esfuerzos laterales se base en la rigidez de las uniones entre elementos se hace antieconómica.

\_La introducción, a finales de los años 40 de las primeras pantallas para hacer frente, por sí mismas, a las cargas horizontales en algunos edificios en altura.

Surge así la combinación de ambos esquemas, en los que las pantallas proporcionan rigidez al conjunto y los pórticos conservan su ductilidad y permiten mayores espacios libres en el interior, convirtiéndose en una disposición habitual en edificios de oficinas, donde las pantallas se concentran en una posición centrada de la planta (albergando en su interior comunicaciones verticales y demás servicios) y disponiendo los pilares en fachada, liberando el espacio intersticial.

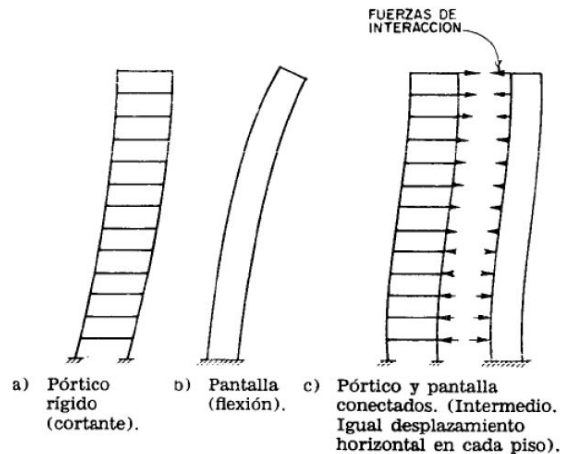


Puesto que las pantallas, además de funcionar como rigidizador de la estructura frente a cargas horizontales, resisten cargas verticales, puede resultar difusa la distinción entre soporte y pantalla. Dos aspectos que pueden servir para clasificar un elemento son:

\_ El momento de inercia respecto de un eje es mucho mayor en una pantalla que en un soporte.

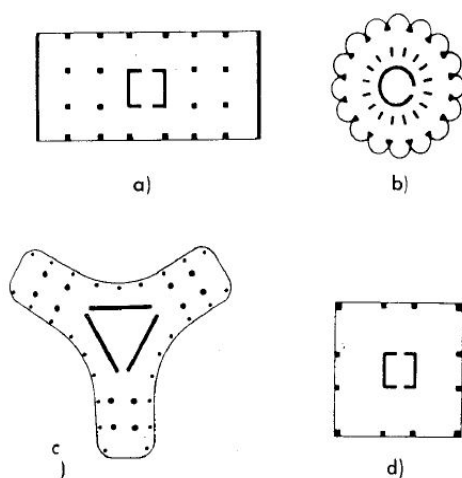
\_ La dimensión en planta de la pantalla no resulta despreciable en relación al vano que salvan las vigas contiguas, no siendo normalmente inferior a 1,50 metros.

Las deformaciones de las pantallas (por flexión) y el pórtico (por el cortante entre plantas) son diferentes y, para que ambos tengan la misma deformación a nivel de cada forjado, deben originarse unas fuerzas de interacción entre ellos. Por la actuación de estas fuerzas, las pantallas tienden a reducir la traslación del pórtico en la parte inferior mientras que en la superior es el pórtico el que sujeta a la pantalla.



FIG\_56. Modos de deformación.

En los esquemas a), b) y c) de la imagen anterior, el número de pantallas interiores se adapta a la disposición arquitectónica, pudiendo cumplir, además de su función de rigidización, la misión de separar y compartimentar, propias de edificios residenciales. El inconveniente surge al tratar las plantas inferiores para grandes salas o aparcamientos. La elección del número y localización de pantallas resulta de una combinación entre las exigencias arquitectónicas y estructurales. El límite de la construcción de edificios residenciales con este sistema se encuentra en las 70 plantas.



FIG\_57. Esquemas habituales de rigidización en edificios residenciales.

En edificios de oficinas, el límite recomendado son 40 plantas, y su esquema más habitual es el correspondiente a la figura d). La disposición de un núcleo interior en lugar de pantallas es lo habitual en este tipo de edificios, puesto que las pantallas podrían interferir con la utilización de los espacios, al reducir la flexibilidad de la planta. Aunque muchos edificios de oficinas se construyen con la disposición tradicional que proporciona luces de 7m en ambas direcciones, se tiene a disponer un núcleo central y llevar el resto de la estructura a fachada, bien en forma de soportes tradicionales o una disposición de tubo porticado, liberando el espacio interior y aumentando su flexibilidad.

Ejemplos de esta tipología son el edificio Lake Shore Drive (Mies van der Rohe, Chicago, 1951), el Lever House (Gordon Bunshaft (SOM), Nueva York, 1952) o el edificio Jaraguá (Paulo Mendes da Rocha, Sao Paulo, 1984), entre otros.



FIG\_58. Lake Shore Drive



FIG\_59. Lever House.

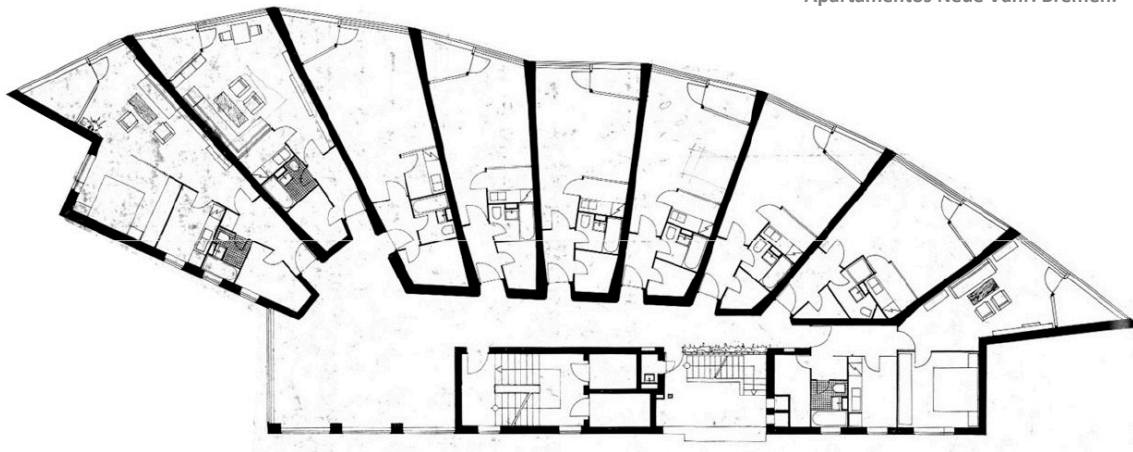


FIG\_60. Edificio Jaraguá.

### Estructura de muros de carga o pantallas:

Este sistema estructural está formado por unos elementos verticales planos, llamados pantallas o muros, dispuestos longitudinal o transversalmente a la fachada principal, o incluso en ambas direcciones. Estas pantallas son las encargadas de recoger las cargas, tanto verticales como horizontales para transmitir las al suelo. Esta tipología de estructuras introduce rigidez a flexión en los elementos verticales.

Para proporcionar la suficiente rigidez a flexión y torsión al edificio, las pantallas deben disponerse con canto suficiente y con una distancia entre ellas tal que sean capaces de desarrollar el par torsor para contrarrestar fuerzas no centradas. Por este motivo, una distribución simétrica evita solicitaciones complementarias.

FIG\_61. Alvar Aalto.  
Apartamentos Neue Vahr. Bremen.

FIG\_62. Planta apartamentos Neue Vahr.

En estructuras de muros de carga, las luces de los vanos suelen oscilar entre 3,5 y 7,5 metros, en función de la capacidad portante y rigidez del propio muro.

La respuesta de estas estructuras ante los esfuerzos externos depende de los materiales y del tipo de unión entre las pantallas y los forjados:

\_ Las cargas verticales se transmiten por flexión desde los forjados a los muros, generando esfuerzos de compresión en ellos. Estas compresiones dependerán de la anchura del vano, de la altura y de la disposición y dimensiones de las pantallas.

\_ Las cargas horizontales se transmiten por los forjados hasta llegar a las pantallas paralelas a la fuerza, que son las que responden a los esfuerzos horizontales, trabajando como una viga de gran canto debido a su rigidez en ese plano. En este caso, los muros están sometidos a esfuerzos de flexión y cortante.

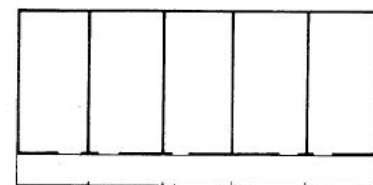
El sistema de rigidización por pantallas es uno de los más eficientes y económicos para edificios de oficinas y viviendas de más de 20 plantas en cuanto a la resistencia ante cargas laterales debido a su gran inercia (al menos según una dirección) y a la gran facilidad de ejecución.

Esta acción estabilizante trae como consecuencia un aprovechamiento de los materiales y economía en la cimentación, a la vez que permite eliminar los soportes próximos y aumentar las luces.

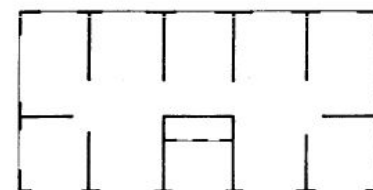
Las pantallas pueden construirse en hormigón o acero, y pueden ser macizas o perforadas.

En el primer esquema el reparto de la carga entre los distintos elementos se hace en proporción a las rigideces de cada uno de ellos; mientras que en los otros esquemas, las pantallas quedan interrumpidas por aberturas y conectadas entre sí por vigas o losas; el conjunto es muy rígido en sentido longitudinal, pudiendo garantizarse su estabilidad en dirección transversal por pantallas adicionales orientadas en este sentido.

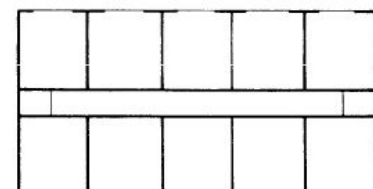
Se precisa disponer pantallas como mínimo según dos direcciones distintas, además la mayor parte de las pantallas serán paralelas a la menor dimensión del edificio, la más vulnerable frente a la inestabilidad por acciones laterales. También pueden disponerse pantallas en las paredes que encierran ascensores y escaleras, generalmente en posiciones centrales en planta, pudiendo proporcionar una resistencia importante frente a torsión ante la acción de cargas excéntricas.



(a) PANTALLAS SIN AGUJEROS



(b) PANTALLAS ACOPLADAS



(c) PANTALLAS LONGITUDINALES

FIG\_63. Disposiciones típicas de pantallas.

En cuanto a la ejecución es habitual hormigonar las pantallas in situ, aunque también es posible el empleo de grandes paneles prefabricados, con lo que se reduce el plazo de ejecución.

En el caso de edificios donde se precisa de flexibilidad y espacios diáfanos, el problema en las pantallas surge de la necesidad de permitir el paso a través de estos elementos resistentes, por lo que las pantallas deben tener grandes aberturas que provocan su debilitamiento, apareciendo así las pantallas perforadas.

Las pantallas pueden disponerse por razones exclusivamente resistentes (pudiendo llegar a ser un obstáculo para la flexibilidad del edificio), o que, además de ser resistentes colaboren en la funcionalidad del edificio sirviendo como elemento separador entre espacios interiores. La situación ideal será aquella en la que se asocien las dos funciones, de forma que, además de la de estructural de soportar cargas verticales y horizontales, tenga, cuando sea necesario, la de delimitar y dividir las superficies.

Tanto en edificios residenciales como en oficinas puede resultar una tipología estructural adecuada dando, como separaciones habituales entre pantallas para edificios residenciales, valores entre 4 y 7 metros que se salvan con vigas de enlace o losa de espesor constantes; con losas pretensadas pueden llegarse hasta luces de 9m, permitiendo su aplicación de algunos edificios de oficinas.

Constructivamente la pantalla va asociada generalmente a otro elemento estructural, la losa, que tiene la misión de transmitir y repartir las cargas horizontales entre los diferentes elementos verticales; las pantallas las transmitirán a la cimentación a la que están empotradas, la cual reparte las cargas concentradas sobre la superficie para que el terreno pueda soportar las tensiones generadas.

El reparto de la carga lateral entre las distintas pantallas se realiza en función de la rigidez de cada pantalla. Se puede considerar que las pantallas trabajan como una ménsula a flexión.

La deformabilidad de las pantallas es un aspecto importante en su elección, pues es uno de los criterios más condicionantes en la rigidización de la estructura. En el caso de la pantalla aislada, la deformación transversal se produce por:

\_Deformación debida a la flexión: es la más importante y predominante, lo que justifica su comportamiento como ménsula.

\_Deformación por esfuerzo cortante: tiene mayor importancia cuanto mayor sea el canto de la pantalla, o cuanto mayor sea el número y tamaño de las perforaciones.

\_Deformación por rotación en la base de la cimentación debida a la acumulación de gran parte de la carga vertical en una zona reducida, lo que puede provocar deformaciones por asiento.

En definitiva, la estabilidad lateral mediante pantallas se consigue de una forma económica, siempre que se disponga una distribución adecuada en planta y se adopten criterios de armado que permitan el máximo aprovechamiento del material, en contraste con la estructura porticada tradicional.

Resulta recomendable desde el momento en que la altura del edificio haga necesarias unas dimensiones excesivas de los elementos lineales.

Sus principales ventajas derivan de la rapidez de ejecución de las pantallas de hormigón armado, de su alto aislamiento térmico y acústico y de la baja cuantía de armadura necesaria. Es un elemento que resiste las cargas horizontales, pero también las verticales.

Por el contrario, sus inconvenientes principales son arquitectónicos, pues reducen el espacio útil y limitan la posibilidad de configurar espacios diáfanos, a la vez que reducen la flexibilidad del edificio.

Las estructuras de pantallas resultan apropiadas en edificios en los que las divisiones permanentes y la pérdida de flexibilidad no resulten un problema, como en el caso de edificios residenciales.

En los edificios de oficinas, a pesar de permitir un pequeño espesor de losa y admitir que las pantallas centradas alberguen servicios interiores, la limitación de la flexibilidad puede no ser aceptable.

Ejemplos de esta tipología son el edificio Pirelli (G. Ponti y P.L. Nervi, Milán, 1955), los Apartamentos Neue Vahr (Alvar Aalto, Bremen, 1958) o las Torres Blancas (F.J Sáenz de Oíza, Madrid, 1964), entre otros.



FIG\_64. Edificio Pirelli.



FIG\_65. Apartamentos Neue Vahr.



FIG\_66. Torres Blancas.

### Estructura de núcleo rígido:

Se trata de un caso especial de las estructuras de pantallas resistentes. En este caso, la pantalla se transforma en una viga cajón de gran rigidez a flexión y torsión, otorgando al edificio la estabilidad lateral necesaria. La principal ventaja de los núcleos es la de permitir, como estructuras espaciales que son, hacer frente a todas las acciones horizontales y verticales en todas las direcciones. Con el empleo de los núcleos interiores se garantiza un óptimo aprovechamiento del material, independientemente de las distintas direcciones en que puedan actuar las acciones.

Esta solución es propia de edificios que necesiten mayor flexibilidad en planta y espacios diáfanos, como en el caso de oficinas o locales comerciales. En estos casos se agrupan los núcleos de comunicación vertical y demás servicios (escaleras, ascensores, instalaciones, aseos,...), y se alojan en el interior de las vigas cajón, formando núcleos rígidos y liberando el resto de la superficie.

Frente a cargas horizontales, los núcleos trabajan como grandes vigas cajón en voladizo sobre el terreno, sometidas a esfuerzos cortantes y de flexión.

Frente a cargas gravitatorias, el núcleo se comprime, con lo que estas fuerzas de compresión contrarrestan las tracciones que produce el momento debido a las cargas horizontales laterales. De este modo aumenta también la resistencia frente a esfuerzo cortante.

Resulta conveniente disponer el núcleo resistente de manera centrada en la planta, para evitar que se generen esfuerzos torsores complementarios. Además, su superficie, comparada con la de la planta, debe ser suficientemente grande.

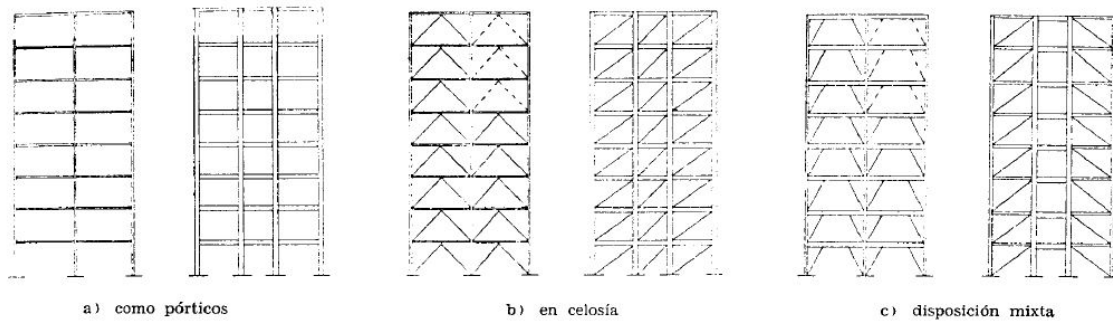
El número de núcleos dentro de cada edificio puede variar, así como la posición del núcleo en planta o su geometría:



FIG\_67. Formas más frecuentes adoptadas por los núcleos.

Estos núcleos pueden ser de acero o de hormigón armado.

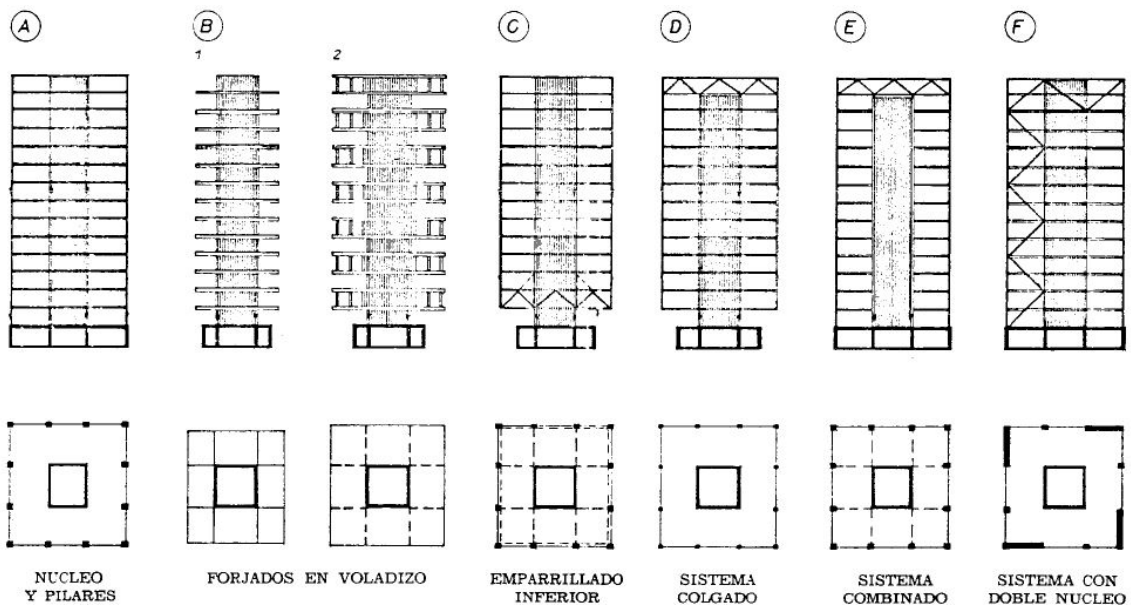
Se puede afirmar, de forma general, que los núcleos de acero suponen una simplificación de la construcción y permiten aprovechar las ventajas de la prefabricación. Estos núcleos de acero pueden construirse en forma de pórticos, celosías o disposiciones mixtas. Los núcleos tipo pórtico tienen la ventaja de permitir grandes aberturas y son muy flexibles y facilitan su relleno, pero debe aumentarse su rigidez transversal, lo que supone sobredimensionar los elementos o aumentar el número de pilares. Las estructuras en celosía, por su parte, requieren menos material y proporcionan mayor rigidez transversal, pero dificultan la disposición de los huecos exigidos por las circulaciones y su relleno y generan grandes tensiones de compresión en los soportes, lo que condiciona la sección de las otras barras.



FIG\_68. Distintas posibilidades de realización en acero.

Una de las principales ventajas del uso de núcleos de hormigón armado es la facilidad de combinar su función portante con la de revestimiento. Tienen gran rigidez lateral, alta resistencia al fuego y elevado aislamiento acústico. Como contrapartida, los núcleos de hormigón exigen mayores tolerancias que en construcción metálica, generando dificultades en el montaje si la estructura con la que colabora es metálica, sin olvidar que la retracción del hormigón puede agravar el problema.

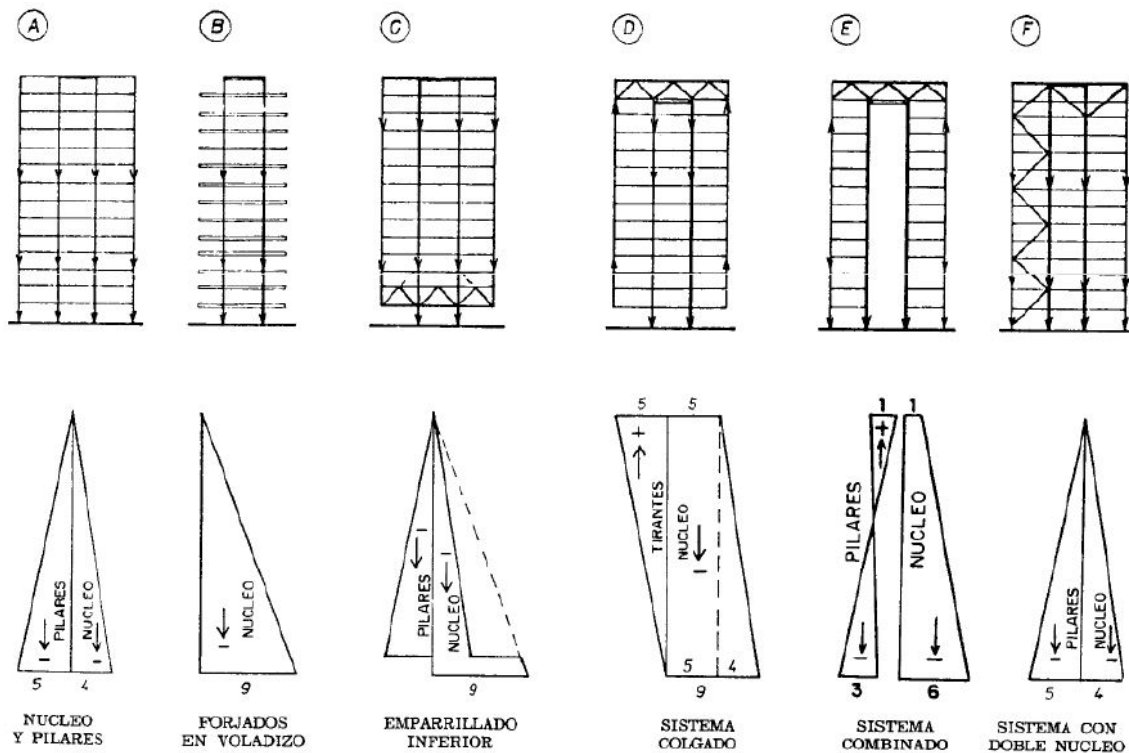
Las estructuras de núcleo interior pueden construirse en base a diferentes esquemas:



FIG\_69. Distintos esquemas en estructuras de núcleo interior.

Cada uno de los sistemas tiene unas ventajas y unas limitaciones (que pueden derivar del uso del edificio, altura total, aspecto arquitectónico, razones estructurales o estéticas o criterios económicos entre otros).

\_Reparto de las cargas verticales entre los elementos estructurales:

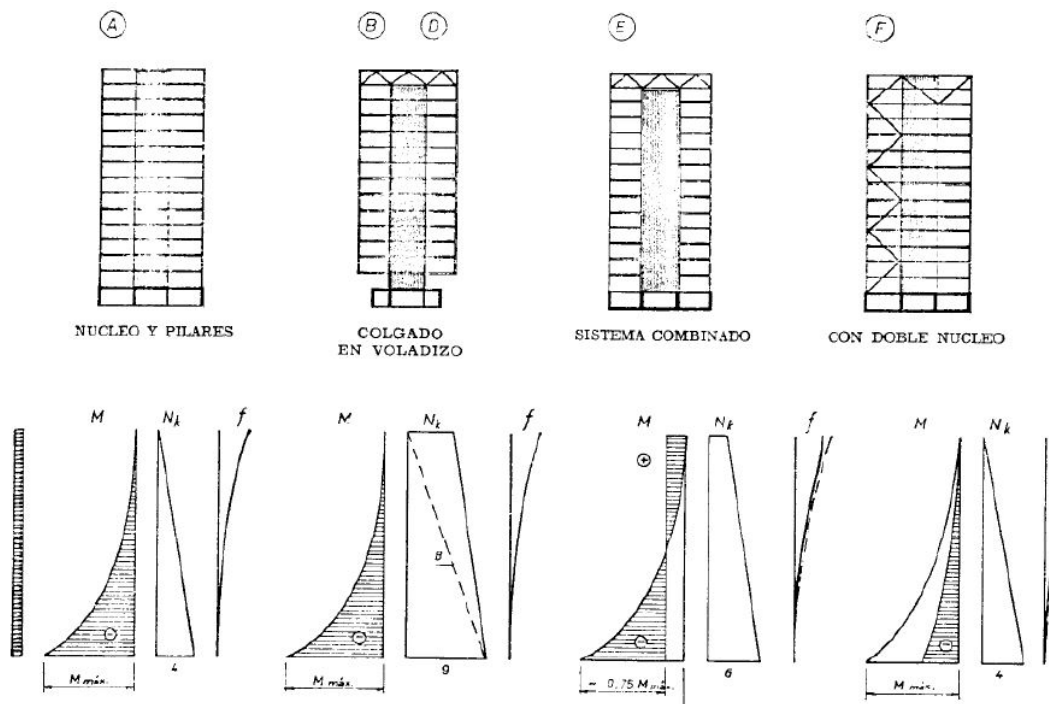


FIG\_70. Reparto de la carga vertical entre elementos estructurales.

- Para el sistema A, la carga gravitatoria se reparte entre el núcleo y los pilares en proporción a su rigidez, aumentando de forma continua desde la parte más alta hasta la cimentación.
- En el sistema en voladizo B, es el núcleo el que soporta toda la carga.
- El sistema con emparrillado inferior (C) tiene una distribución análoga a la A, excepto en el nivel de planta baja o la inmediatamente inferior al emparrillado, donde de nuevo es el núcleo el único elemento sustentante.
- Para el sistema suspendido D, las tracciones en los tirantes aumentan a partir de la base hacia el emparrillado, que las transmiten al núcleo en su extremo superior (esto le supone una sobrecarga de compresión constante a lo largo de toda su altura, equivalente a la máxima tracción de los tirantes). En este sistema es en el que se producen mayores esfuerzos.
- El caso E es un sistema mixto entre el A y el C. Este sistema tiene en cuenta los estados durante la ejecución, de modo que mientras los tirantes no se conecten al emparrillado el conjunto equivale al sistema de núcleo y pilares, pero si la estructura se construye desde arriba hacia la base, se asemejaría al sistema colgado.



\_ Reparto de las cargas horizontales entre los elementos estructurales:



FIG\_71. Reparto de la carga horizontal entre elementos estructurales.

- En el sistema A, aunque el sistema porticado también colabora, el núcleo soporta la mayor parte de los esfuerzos horizontales debido su elevada rigidez frente a los soportes.
- En los sistemas B y D, el núcleo es el único que soporta los momentos debidos a las cargas horizontales. Son los sistemas en los que es mayor la carga de precompresión en el núcleo.
- En el sistema E, los pilares colaboran para resistir la flexión gracias a la acción del emparrillado superior. Los pilares perimetrales absorben una parte del momento constante a través de la altura, contribuyendo a resistir la carga horizontal. En el núcleo se reducen las cargas y las flechas horizontales.
- En el sistema F, con un segundo núcleo de muro exterior, el núcleo interior está aún menos solicitado y se reparte la carga horizontal según la rigidez relativa de ambos.

Tras el análisis de los diferentes tipos de estructuras de núcleos rígidos se pueden extraer algunos criterios útiles para la elección de la estructura:

\_ El sistema de núcleo y pilares perimetrales es la solución más sencilla y económica. Entre los inconvenientes del sistema cabe destacar la dificultad de asegurar la rigidez transversal necesaria. Otra desventaja es la de que un elevado número de pilares en planta baja puede no ser compatible con las posibles necesidades de espacios libres.

\_ En el sistema de núcleo con forjados en voladizo, la superficie perimetral alrededor del núcleo está condicionado por la flexión de los vuelos, de forma que al incrementar el vuelo es necesario sobredimensionar el canto. La principal ventaja de este sistema es que la fachada queda libre de elementos resistentes.

\_ En el sistema de núcleo con emparrillado inferior, la utilización del emparrillado en la base soluciona el problema de mantener las plantas bajas diáfanas.

\_ El sistema de núcleo con forjados suspendidos es uno de los que ofrecen perspectivas formales más interesantes. Es un sistema que exige un núcleo de hormigón armado dado que la elevada carga vertical origina una precompresión mayor, que resulta favorable para resistir las tracciones debidas a la flexión; además, la solución con núcleo de acero para resistir las altas compresiones podría resultar antieconómica.

Una vez ejecutado el núcleo, se comienza por el emparrillado superior, del que cuelgan los restantes elementos, que van siendo colocados de arriba hasta abajo. Los tirantes, traccionados, pueden tener una sección reducida, con lo que no obstaculizan la construcción de la fachada exterior.

Las principales dificultades que surgen de la aplicación de este sistema derivan de un elevado control y experiencia para la ejecución, las posibles dificultades constructivas derivadas del alargamiento diferencial de los tirantes respecto al núcleo, y la existencia de un número máximo de plantas que pueden colgarse.

\_ El sistema combinado es muy eficaz para edificios de gran altura debido a que el emparrillado que corona el conjunto y une los elementos verticales da lugar a una estructura muy rígida. Los soportes perimetrales reciben, bajo la acción del viento, cargas de tracción y compresión según la cara en que se encuentren, y que tendrán un efecto relativamente pequeño sobre la sección transversal. Tienen la ventaja de uniformizar las dimensiones de los soportes a lo largo de la altura del edificio.

\_ El sistema con núcleo interior arriostrado a la estructura perimetral, además del núcleo interior, dispone de unos muros exteriores con los que se aumenta la resistencia global frente a acciones horizontales y verticales. Es un sistema adecuado para edificios altos y muy esbeltos.

Ejemplos de esta tipología son la Torre Price (F. LL. Wright, Oklahoma, 1952), las Torres de Colón (Antonio Lamela, Madrid, 1967) o la Torre Castelar (Rafael de la Hoz, Madrid, 1975), entre otros.



FIG\_72. Torre Price.



FIG\_73. Torres de Colón.



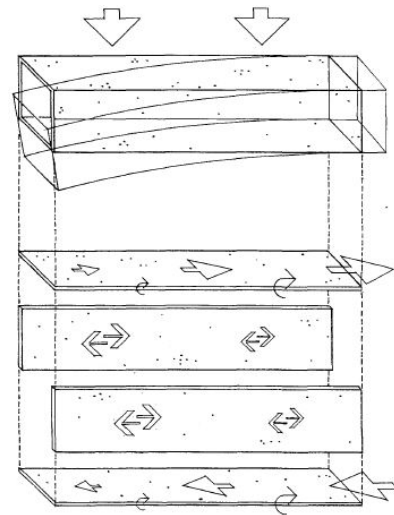
FIG\_74. Torre Castelar.

### Estructura tubular:

El diseño tubular asume que la estructura de la fachada responde frente a las cargas horizontales como una viga cajón cerrada y hueca en voladizo desde el terreno que resiste esfuerzos cortantes, de compresión y de flexión. Como las paredes exteriores resisten toda o la mayoría de la carga de viento, las diagonales de arriostramiento y las pantallas pueden suprimirse. La utilización del tubo como estructura resistente a efectos de las cargas horizontales libera el interior del edificio de las exigencias del viento, y son exclusivamente las cargas gravitatorias las que condicionan su diseño.

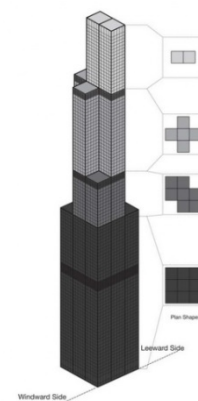
El comportamiento estructural de los rascacielos construidos con tubos es similar al de una viga en voladizo de sección rectangular bajo cargas verticales.

Las paredes del tubo son pilares muy próximos que rodean el edificio, atados por vigas de gran canto entre ellos, creando una fachada que parece un muro perforado. Si el tubo exterior no puede resistir él sólo toda la carga exterior se puede arriostrar con celosías (tubo con celosía) o bien disponer otro tubo interior (tubo en tubo).



FIG\_75. Comportamiento de las estructuras tubulares.

Con un ensamblaje de tubos individuales se puede formar un tubo multicelular llamado macrotubo o haz de tubos. Este aumento de rigidez permite, evidentemente, aumentar la altura y la superficie en planta, como en la Torre Sears, cuya estructura se resuelve con nueve módulos cuadrados, cada uno rígido en sí mismo, lo que permite eliminar apoyos internos. Los diferentes forjados están suspendidos desde los tubos, innovación tecnológica del ingeniero Fazlur Khan. Los diferentes tubos terminan a diferentes alturas, creando una forma con múltiples niveles. A partir de una determinada altura, la cantidad de módulos va decreciendo hasta transformarse en solo dos tubos de acero.

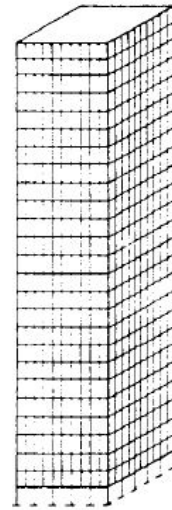


FIG\_76. Esquema Torre Sears.

### Tubo porticado:

El sistema consta de un conjunto de soportes exteriores muy próximos entre sí, conectados mediante vigas de unión de gran canto, a nivel de cada forjado. En estos casos, toda la carga de viento se resiste por el sistema porticado exterior, sin necesidad de sobredimensionar los elementos más allá de las dimensiones necesarias para resistir las cargas gravitatorias.

Entre las ventajas de este sistema se encuentran que la deformabilidad es muy reducida al llevar los elementos resistentes a fachada (liberando el espacio interior), que permite adecuar la estructura a la disposición arquitectónica tradicional de las ventanas rectangulares (uniéndolas directamente a los soportes estructurales), y que su utilización puede estar estética y económicamente justificada y resultar apta para edificios residenciales, comerciales y de oficinas.



FIG\_77. Esquema tubo porticado.

Por otra parte, son motivos que hacen de este sistema económicamente desaconsejable:

\_El que el aumento de columnas exteriores suponga necesariamente un mayor número de detalles de las juntas, por lo que es necesaria la prefabricación para que el sistema resulte eficaz.

\_En construcción metálica, al crecer el número de soportes exteriores, se precisan mayores cuantías de elementos de protección contra el fuego y de cerramiento.

\_Debido al movimiento lateral causado por la flexión en los soportes, la distorsión de particiones y percepción del movimiento podrían ser las mayores limitaciones para el proyecto, lo que significaría un incremento del coste.

Los límites actuales en este sistema parecen situarse en 40 plantas para edificios de oficinas y 70 para edificios residenciales, proporcionando el sistema una buena distribución al no necesitar núcleo central, así como un comportamiento aceptable ante acciones sísmicas.

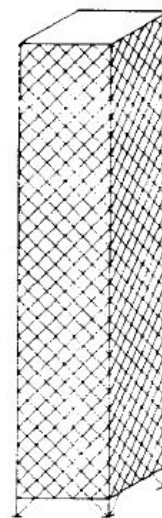
### Tubo con celosía diagonal:

En este sistema se sustituyen los soportes verticales en fachada por diagonales muy próximas entre sí, orientadas en cualquier dirección.

Este sistema tiene los siguientes inconvenientes:

\_Las diagonales, muy juntas entre ellas, son de reducida dimensión, lo que tiende a reducir su eficiencia.

\_El número de uniones en el contorno exterior es mayor que en el caso del pórtico rígido, con lo que aumenta el coste de fabricación y ejecución.



FIG\_78. Esquema de tubo con celosía diagonal.

Consecuencia inmediata de estas desventajas son los aspectos que merecen un especial tratamiento en el estudio de la malla con celosía diagonal, entre los que destacan:

\_Elección de unos parámetros sencillos que permitan definir la distribución de cargas, tanto gravitatorias como laterales, en los puntos de apoyo en la base del edificio, en los que normalmente se produce una discontinuidad en la malla diagonal.

\_Los detalles de las uniones deben estudiarse desde el punto de vista económico.

\_Es fundamental conocer el efecto de las variaciones de temperatura y tolerancias de ejecución en el contorno exterior, sobre las tensiones producidas en los elementos diagonales.

#### Tubo en celosía constituido por soportes y diagonales:

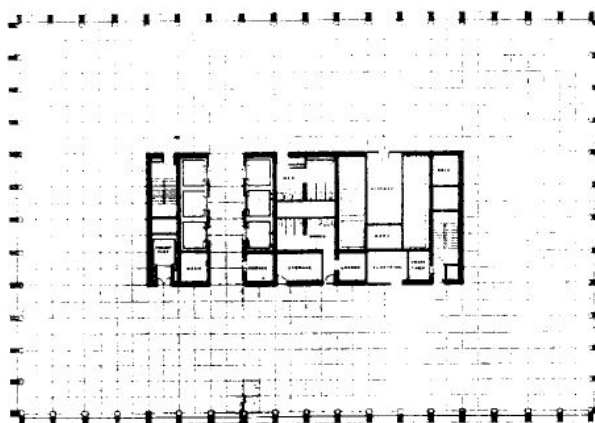
Con la combinación de los dos sistemas anteriores pueden eliminarse algunas de sus desventajas y utilizar una combinación óptima de diagonales, soportes y vigas de unión para crear un tubo rígido. La triangulación constituida por las diagonales permite una mayor distancia entre los soportes exteriores (de 6 a 18m), uniéndose con diagonales a 45°.

Otra de las ventajas del sistema es que las diagonales redistribuyen las cargas verticales entre los soportes de modo que, a pesar de pertenecer a diferentes áreas tributarias (superficie de planta con la misma carga), puedan hacerse todos de iguales dimensiones dentro de la misma planta, lo que supondría la posibilidad de tipificar soportes y detalles. Además, actuando como soportes inclinados, las diagonales rara vez estarán sometidas a tracción aún bajo una carga de viento extrema, por lo que la unión entre las diagonales puede ser bastante similar a la de los soportes, favoreciendo su facilidad de ejecución.

En cuanto a la ejecución de las uniones (problema importante en la construcción de edificios en altura de acero), el sistema estructural formado por diagonales y soportes es el más eficiente de los sistemas en tubo, debido a que la rigidez de los nudos en la intersección de los elementos principales ya no es una consideración fundamental, y el número de uniones importantes es relativamente pequeño comparado con las estructuras en tubo porticado.

#### Tubo dentro de tubo:

Este sistema consta de un tubo exterior formado por soportes muy próximos conectados por vigas y un tubo interior constituido por un núcleo central que incorpora la comunicación vertical y demás servicios. Es un sistema que combina el núcleo central y el sistema de tubo porticado, unidos mediante las



FIG\_79. Planta del edificio Brunswick.

losas de los forjados, aprovechándose de las ventajas de ambas tipologías.

Con este sistema se consigue un amplio espacio interior libre de soportes, así como la agrupación de los servicios generales entorno a un núcleo central, esquema especialmente apto para edificios de oficinas. Además, se permiten luces de 10-12 metros, dimensiones prácticamente imposibles con el empleo de pórticos tradicionales formados por vigas y soportes.

Entre las ventajas derivadas de la utilización del sistema se cuentan:

\_Aplicabilidad del hormigón ligero, que reduce el peso de la estructura, haciendo posible la construcción sobre terrenos de capacidad no muy elevada.

\_Perfecta distribución de esfuerzos, que permite que las acciones laterales no representen un coste extra en el dimensionamiento de los elementos.

\_La posibilidad de construcción de edificios de unas 70 plantas, manteniendo hasta ese límite la suficiente rigidez.

Ejemplos de esta tipología son el John Hancock Centre (SOM, Chicago, 1966), la Torre Sears (SOM, Chicago, 1974) o la Torre Picasso (J. Mir Valls y R. Coll Pujol, Madrid, 1983), entre otros.



FIG\_80. John Hancock Center.



FIG 81. Torre Sears.



FIG\_82. Torre Picasso.

#### 4\_ EDIFICIOS EN ALTURA. CASOS DE ESTUDIO.

A continuación se van a describir las obras objeto de estudio y análisis. Por un lado, explicar brevemente la obra y su sistema estructural, e identificar los criterios de elección y condicionantes de diseño prioritarios en cada elección del sistema estructural por parte de cada arquitecto en ese edificio en concreto.

¿Se podrían haber construido estos ejemplos con otro sistema estructural de altura activa?  
¿Fueron construidos con el sistema idóneo para cada caso?

La finalidad de este análisis es la de encontrar una serie de criterios de elección del sistema estructural que pueda ayudar en un futuro en el diseño sincero y provechoso de edificios en altura.

1. Estructura de pórticos o reticular: Los elementos estructurales constituyen un entramado espacial de nudos rígidos.



Nombre \_ **Lake Shore Drive**

Ubicación \_ **Chicago, Illinois**

Arquitecto \_ **Mies van der Rohe**

Año \_ **1949-1951**

Uso \_ **Residencial**

Tipología \_ **Retícula de pilares y vigas metálicos**

Altura \_ **82 m**

Esbeltez \_ **3,65**



Nombre \_ **Edificio Jaraguá**

Ubicación \_ **Sao Paulo, Brasil**

Arquitecto \_ **Paulo Mendes da Rocha**

Año \_ **1984-1988**

Uso \_ **Residencial**

Tipología \_ **Estructura reticular con muros de arriostramiento**

2. Estructura de muros de carga o pantallas: Los elementos estructurales principales son elementos verticales planos, muros o pantallas, que pueden disponerse longitudinalmente, transversalmente o en ambas direcciones.



Nombre \_ **Edificio Pirelli**

Ubicación \_ **Piazza Duca d'Aosta, Milán**

Arquitecto \_ **G.Ponti, P.L.Nervi**

Año \_ **1955-1959**

Uso \_ **Oficinas**

Tipología \_ **Estructura de pantallas**

Altura \_ **127 m**

Esbeltez \_ **6,50**



Nombre \_ **Torre Lúgano**

Ubicación \_ **Rincón de Loix, Benidorm**

Arquitecto \_ **Adolfo Rodríguez López**

Año \_ **2004-2008**

Uso \_ **Residencial**

Tipología \_ **Estructura de pantallas**

Altura \_ **158,10 m**





Nombre \_ **Torres Blancas**

Ubicación \_ **Av. de América, Madrid**

Arquitecto \_ **F.J Sáenz de Oíza**

Año \_ **1964-1969**

Uso \_ **Residencial y oficinas**

Tipología \_ **Estructura de pantallas**

Altura \_ **71 m**

Esbeltez \_ **1,82**

3. Estructura de núcleo rígido: Los elementos estructurales principales forman núcleos rígidos rodeando los huecos de los elementos de comunicación vertical (ascensores, escaleras e instalaciones).



Nombre \_ **Torre BBVA**

Ubicación \_ **Paseo de la Castellana, Madrid**

Arquitecto \_ **F.J Sáenz de Oíza**

Año \_ **1974-1981**

Uso \_ **Oficinas**

Tipología \_ **Doble núcleo central y forjados en voladizo**

Altura \_ **107,85 m**

Esbeltez \_ **13,72**



Nombre \_ **Torres de Colón**

Ubicación \_ **Paseo de la Castellana, Madrid**

Arquitecto \_ **Antonio Lamela Martínez**

Año \_ **1967-1976**

Uso \_ **Oficinas**

Tipología \_ **Núcleo central y forjados colgados**

Altura \_ **116 m**

Esbeltez \_ **11,60**

**4. Estructura tubular:** Los elementos estructurales verticales se disponen muy próximos entre sí formando una fachada que parece un tubo perforado.



Nombre \_ **Hotel Arts**

Ubicación \_ **Puerto Olímpico, Barcelona**

Arquitecto \_ **Bruce Graham (SOM)**

Año \_ **1990-1994**

Uso \_ **Hotel**

Tipología \_ **Tubo en celosía de soportes y diagonales**

Altura \_ **154 m**

Esbeltez \_ **4,40**



Nombre \_ **Torre Picasso**

Ubicación \_ **Plaza Pablo Ruíz Picasso, Madrid**

Arquitecto \_ **Jorge Mir Valls y Rafael Coll Pujol**

Año \_ **1982-1988**

Uso \_ **Oficinas**

Tipología \_ **Tubo dentro de tubo**

Altura \_ **157 m**

Esbeltez \_ **4,16**



Nombre \_ **Torre Swiss Re**

Ubicación \_ **St. Mary Axe, Londres**

Arquitecto \_ **Norman Foster & Partners**

Año \_ **2001-2004**

Uso \_ **Oficinas**

Tipología \_ **Tubo dentro de tubo**

Altura \_ **180 m**

Esbeltez \_ **3,67**

## 5\_ CONCLUSIONES. CRITERIOS DE ELECCIÓN. CONDICIONANTES DE DISEÑO.

El uso de la estructura resistente como elemento expresivo principal no siempre contribuye de manera sincera a la realidad del proyecto. El abandono de lo cuantitativo para centrarse en lo cualitativo hace que la estructura resistente pase a un segundo plano, dejando de ser una necesidad a ser un elemento de expresividad más en la arquitectura.

Como hemos podido observar, en el diseño estructural de edificios en altura influyen muchas variables, que condicionan la forma y tipología estructural del mismo. Estos condicionantes, junto con la gran envergadura de este tipo de edificaciones hacen que su estructura sea sincera pues, al intentar reducir al máximo el número de elementos estructurales, todos deben contribuir en la transmisión de las cargas.

Así pues, a la hora de escoger la estructura de un edificio en altura, hay que tener en cuenta muchos aspectos, entre los que destacan los siguientes:

\_ Condicionantes del lugar, del terreno en el que se va a ubicar el edificio. En edificios en altura son mucho más importantes que en el caso de una estructura convencional, puesto que los edificios altos pesan más y transmiten más cargas al terreno, siendo necesario diseñar una cimentación que reparta bien las cargas que le transmite la estructura sin generar tensiones que no puedan ser absorbidas por el terreno.

\_ Esbeltez del edificio, la relación entre la altura del mismo y su anchura. Esta magnitud influye en la rigidez del edificio y en su comportamiento frente a las cargas horizontales, de viento principalmente. En el caso de estructuras de núcleo rígido en las que es el núcleo el único elemento que llega hasta la cimentación, la anchura del edificio a efectos de esbeltez será la anchura de dicho núcleo resistente.

\_ Proceso constructivo y elevación de los elementos. Dada la altura que pueden llegar a alcanzar los edificios objeto de estudio en este trabajo, la elevación de los elementos y la propia construcción de la estructura, es un factor importante a la hora de elegir la tipología estructural. No es lo mismo realizar una estructura en acero que en hormigón, pues este último, si es in situ, debe encofrarse y hormigonarse, tarea que puede resultar compleja a muchos metros de altura.

\_ Instalaciones (agua, luz, gas, transporte vertical, etc.). Como hemos visto anteriormente, las instalaciones, por el espacio que ocupan en un edificio y por los conductos y maquinarias que precisan, constituyen un gran coste en este tipo de edificios. Por ejemplo, bombear agua hasta las últimas plantas de un rascacielos es una tarea compleja, y que precisa de potentes máquinas para dar un servicio de calidad.

\_ Sistemas de protección contra el fuego. Dado que la mayoría de plantas están por encima del alcance de las escaleras de bomberos, el rescate debe realizarse desde el interior del propio edificio. Por ello se necesitan eficaces sistemas de evacuación y de aislamiento de las zonas incendiadas, adecuados sistemas de extinción y sistemas de ventilación.

Tras el estudio de diversos edificios en altura de las cuatro tipologías establecidas, estamos en condiciones de establecer algunos criterios o pautas a seguir a la hora de diseñar futuros edificios en altura.

Edificios construidos con sistemas reticulares o a base de pantallas o muros de carga, o combinación de ambos, son especialmente adecuados para edificios residenciales, apartamentos u hoteles. Estos sistemas estructurales ocupan parte de la superficie útil del edificio, lo cual no es un gran hándicap, ya que estos edificios necesitan gran número de particiones interiores.

El principal inconveniente de estas tipologías es que resultan ineficaces para alturas superiores a X plantas, ya que, a partir de este número, las dimensiones necesarias de los elementos estructurales son tan grandes que resultan antieconómicos.

Las estructuras de núcleo rígido y los sistemas tubulares permiten construir más alturas. La agrupación de las cargas en puntos concretos de la planta -en el centro en el caso de sistemas de núcleo rígido y en el perímetro en el caso de sistemas tubulares- permite liberar el resto de la planta de elementos estructurales verticales, lo que los hace especialmente aptos para edificios de oficinas, liberándolos de particiones interiores fijas que les permiten adaptarse a las necesidades de cada momento.

Los sistemas de núcleo rígido suelen agrupar las instalaciones y comunicación vertical en su interior, con lo que no es necesario que las instalaciones circulen por falsos techos, aumentando la altura libre de las plantas.

## **6\_ BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIA DE IMÁGENES.**

### CAPÍTULO PRIMERO: ESTRUCTURA Y ARQUITECTURA, Y VICEVERSA. INTRODUCCIÓN.

#### **Libros:**

\_ Charleston, Andrew. "La estructura como arquitectura". Editorial Reverte. 2007.

#### **Figuras:**

\_ Fig. 1 a 9: imágenes procedentes de fuentes consultadas en internet y de dominio público.

### CAPÍTULO SEGUNDO: SISTEMAS DE ESTRUCTURAS. GENERALIDADES.

#### **Libros:**

\_ Engel, Heino. "Sistemas de estructuras". GG. 2003.

#### **Figuras:**

\_ Fig. 10,14,18,22,26: diagramas procedentes del libro de Heino Engel, "Sistemas de estructuras".GG.2003.

\_ Fig. 11,12,13,15,16,17,19,20,21,23,24,25,27,28,29: imágenes procedentes de fuentes consultadas en internet y de dominio público.

### CAPÍTULO TERCERO: SISTEMAS DE ESTRUCTURAS DE ALTURA ACTIVA.

#### **Libros:**

\_ Engel, Heino. "Sistemas de estructuras". GG. 2003.

\_ Cobreros Vime, M.Angel. "Star structural architecture 3". Monografía tipologías estructurales de edificios en altura.

#### **Artículos:**

\_ Martorano Navas, L.Daniel. "Sistemas de rigidización de edificios en altura frente a acciones de viento y sismo". Monografías del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento. nº342. Madrid 1977.

\_ Manterola, Javier. "La estructura resistente en la arquitectura actual, parte I y II". Informes de la construcción. 1998.

**Cuadernos:**

\_ Aroca, Ricardo. “¿Qué es estructura?”. Cuadernos del Instituto Juan de Herrera. Madrid 1999.

\_ Cervera, Jaime. “Diseño de estructuras en la edificación”. Cuadernos del Instituto Juan de Herrera. Madrid. 1993.

\_ Cervera, Jaime. “Forma y esfuerzos estructurales”. Cuadernos del Instituto Juan de Herrera. Madrid. 2002.

**Figuras:**

\_ Fig. 30,31,33,34,35,36,37,38,39,40,41,52,53,54,58,59,60,61,62,64,65,66,72,73,74,76,79,80, 81,82: imágenes procedentes de fuentes consultadas en internet y de dominio público.

\_ Fig. 32: diagrama de elaboración propia.

\_ Fig. 42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,75: diagramas procedentes del libro de Heino Engel, “Sistemas de estructuras”.GG.2003.

\_ Fig. 55,56,57,63,67,68,69,70,71,77,78: imágenes procedentes del artículo “Sistemas de rigidización de edificios en altura frente a acciones de viento y sismo”. Monografías del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento. nº342. Madrid 1977.

---

**CAPÍTULO CUARTO: EDIFICIOS EN ALTURA. CASOS DE ESTUDIO.****Referencias citadas en las fichas.**

## **7\_ ANEXOS. FICHAS.**