

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA



DEPARTAMENT DE CONSTRUCCIONS ARQUITECTÒNIQUES I
DEPARTAMENT D'ESTRUCTURES A L'ARQUITECTURA

Optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura.

**Análisis de las direcciones principales identificadas por sus
líneas isostáticas.**

TESIS DOCTORAL

ROGER SEÑÍS LÓPEZ

DIRECTORES

Dr. D. RAMON SASTRE SASTRE

Dr. D. ROBERT BRUFAU NIUBÓ

Mayo de 2014

Capítulo 4 Contribución a la clasificación y al análisis de edificios en altura. Evolución histórica, formal y estructural

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo precedente, el creciente interés en el uso de las mallas espaciales de acero como elementos estructurales envolventes de edificios en altura, conlleva a que actualmente el concepto estructural adquiera un papel de mayor relevancia en el diseño y la estética del edificio. Una primera referencia visual de esta tendencia arquitectónico-constructiva en boga, y muy extendida en las últimas décadas, como exponente significativo de esta concepción estructural, es el edificio para la sede de la Televisión Central de China (CCTV), en Beijing construido el año 2008, como se reitera en la figura 4.0-1.

En base a esta tipología edificatoria, para poder hablar de una buena resolución arquitectónica de la misma, es necesaria la existencia de una estrecha relación del binomio que conforman ambas concepciones, el diseño arquitectónico y el concepto estructural del edificio. Esta tendencia ampliamente utilizada y conocida, de acuerdo a lo expuesto anteriormente, como «estética estructural», es el objetivo fundamental de estudio de la presente Tesis y, por ello, requiere en este capítulo de una profunda y exhaustiva exposición de la evolución histórico-formal-estructural de los edificios en altura, estableciendo, así, las bases arquitectónicas y estructurales necesarias con las que abordar el estudio final de mallas espaciales de acero, como sistema estructural envolvente de edificios en altura, que se tratará de forma consecuente en el quinto capítulo.



Figura 4.0-1. Edificio de la sede de la Televisión Central de China en Beijing, inaugurada el año 2008. Proyecto de OMA y estructura de Arup. (Imagen propia, 2012).

El conocido proyecto diseñado por OMA y Arup, mostrado en la figura anterior, se caracteriza por el uso de la tipología arquitectónico-constructiva, en la cual la estructura o esqueleto resistente no se oculta dentro y/o detrás del cerramiento de la fachada sino que, bien al contrario, se muestra en el exterior influyendo de forma notable en la composición de ésta, hasta el punto que la propia estructura resistente pueda llegar a ser, en esencia, el único elemento constructivo que dé forma a la fachada, quedando el cerramiento, ya sea de vidrio u otro material, en un plano ulterior. Nueva tendencia constructiva que es conocida como «fachadas estructurales».

Esta tendencia es el resultado evolutivo del estilo arquitectónico que impulsaron, desde una visión totalmente moderna e innovadora, en la primera mitad del siglo XX especialmente, dos arquitectos y diseñadores: el alemán **Ludwig Mies van der Rohe** (1886-1969) y el suizo **Charles Édouard Jeanneret-Gris** (1887-1965), este último más conocido desde la década de 1920 a 1930 como **Le Corbusier**, revolucionando junto con otros arquitectos el panorama arquitectónico internacional, incluido el de los edificios en altura.

Como se tratará a lo largo del presente capítulo, las obras de Mies van der Rohe y Le Corbusier fueron la culminación y máxima expresión del Estilo Internacional o Estilo Racionalista. Una contribución en el ámbito de la arquitectura, que surgió en los años veinte del siglo XX, en el mundo occidental que estaba siendo revolucionado por grandes avances industriales, aportando nuevas soluciones constructivas impulsadas en buena parte por el planteamiento avanzado en el área del conocimiento de la Mecánica del Medio Continuo y Teoría de las Estructuras, en íntima relación con el ámbito de la Ingeniería y de la Ciencia de los Materiales. El movimiento promovido por algunos de los arquitectos de la época como fueron, junto con los ya mencionados Mies van der Rohe y Le Corbusier, Walter Gropius (1883-1969), Jacobus Johannes Pieter Oud (1890-1963), Richard Neutra (1892-1970), Rudolf Schindler (1887-1953) y Philip Johnson (1906-2005), quienes discrepaban del eclecticismos creativo¹ y la divergencia de estilos arquitectónicos, que no tenían en consideración la relación entre el formalismo y la utilidad/funcionalidad de las edificaciones^[2].

En base a esta nueva visión racionalista, entre la década de 1920 a 1930, tomaba forma el Estilo Internacional como el conjunto de arquitecturas en contraposición a la arquitectura tradicional, reconociendo y consolidando, así, la importancia del estilo que se ha denominado con mayor o menor precisión «Movimiento Moderno», el cual en el ámbito arquitectónico fue impulsado desde la Escuela de la *Bauhaus* (1919-1933)^[2]. La Escuela de artesanía, diseño, arte y arquitectura fue fundada y promovida por Gropius con un claro mensaje innovador, como se tratará posteriormente de forma amplia en el Tercer Periodo (Estilo Internacional) de los Cuatro Periodos históricos en los cuales se divide la evolución funcional-formal de los edificios en altura, coincidiendo dichas etapas con los *booms* de la construcción vertical claramente delimitados por las grandes crisis económicas mundiales, como se analiza en los próximos apartados.

En definitiva, el objetivo de la corriente o tendencia que emerge a principios del siglo XX, basada en la arquitectura moderna, es la simplificación de las formas, la composición y la estética, eliminando el ornamentalismo vacío propio del estilismo clásico o tradicional. El nuevo estilo se caracteriza por separar la estructura del cerramiento, generar terrazas en la cubierta o utilizar grandes superficies de vidrio,

¹ En 1850 surge el eclecticismos creativo: “los edificios se proyectan en planta, estrictamente de acuerdo a las necesidades funcionales de la época, decorando el conjunto con los detalles históricos más convenientes”, [Franco Flores s.f., 5].

^[2] Jiménez, R.I. (s.f.). <http://www.arqhys.com/arquitectura/internacional-estilo.html>.

en busca de edificios según el eclecticismo racionalista, de marcada geometría ortogonal y superficies lisas, desprovistas de ornamentación, enfatizando el aspecto ligero que permitía la construcción del novedoso voladizo ^[3].

En parte, se busca liberar la planta de la estructura para facilitar la distribución interior, la cual se abría al exterior proponiendo una manera de proyectar y construir en base al uso de nuevos materiales, así como de la aplicación de las tecnologías asociadas, los cuales derivan de la Segunda Revolución Industrial. Fundamentalmente, se utilizaba el acero laminado, el hormigón armado y el vidrio plano en grandes dimensiones, para proyectar edificios desde esta visión arquitectónica racionalista atendiendo, a su vez, las necesidades propias de la actividad humana, dando a la arquitectura la visión “moderna” que se pretendía ^{[3][4]}.

Mediante el impulso de este cambio de estilo, a principios del siglo XX, se genera una transición entre la arquitectura clásica, basada en el funcionalismo así como en el eclecticismo creativo y la arquitectura moderna. Un ejemplo de cierta relevancia de esta combinación entre «claridad funcional» y «expresividad formal» es el museo de Historia Natural de la Universidad de Oxford. El edificio de estilo neogótico fue diseñado en 1853 por los arquitectos irlandeses **Benjamin Woodward** (1816-1861) y **Thomas Newenham Deane** (1828-1899) y construido entre los años 1855 y 1860, en parte, con el estilo arquitectónico clásico y los cánones estilísticos de las *Beaux Arts*⁵, pero, a la vez, utilizando formas góticas y techos altos construidos con hierro fundido y vidrio ^[6], como se aprecia en la figura 4.0-2, encontrándose en un punto evolutivo-transitorio entre el estilo eclecticista creativo (≈1850) y el estilo eclecticista racionalista (≈1920).



Figura 4.0-2. Museo de Historia Natural de la Universidad de Oxford. (Imagen de George P. Landow tomada de [<http://www.victorianweb.org/espanol/arte/arquitectura/oxford/19.html>]).

[3] Jiménez, R.I. (s.f.). <http://www.arqhys.com/arquitectura/internacional-estilo.html>.

[4] Franco Flores, E. (s.f.). *Teoría de la Arquitectura*, pp. 10 y 11.

⁵ Estilo arquitectónico clásico académico, que fue enseñado en la *École des Beaux Arts* de París que influenció en Estados Unidos en el período de 1885 a 1920. Se caracteriza por rasgos como la simetría, la jerarquía de espacios y el diseño preciso y ornamentado de clara tendencia eclecticista, [Franco Flores s.f., 9].

[6] Landow, G.P. (s.f.). <http://www.victorianweb.org/espanol/arte/arquitectura/oxford/19.html>

En base a lo expuesto, el Estilo Internacional o Estilo Racionalista, que pretendía tener un enfoque universal basado en estructuras ligeras, materiales modernos como el vidrio para las fachadas, el hormigón armado y el acero para losas y soportes estructurales, así como partes modulares que facilitarían la construcción, se expuso en el museo MoMA de Nueva York (Museo de Arte Moderno), en 1932, siendo los arquitectos **Philip Johnson** (1906-2005) y **Henry-Russell Hitchcock** (1903-1987) los encargados del comisariado. El esquema dibujado por un joven Le Corbusier en 1915, conocido como sistema *Domino*, (*Dom-ino house*), el cual se muestra en la figura 4.0-3, para la reconstrucción de la destruida región de Flandes, después de la I Guerra Mundial, ya refleja el espíritu innovador y moderno que se desarrolló posteriormente de forma amplia y dio como resultado numerosas edificaciones vanguardistas ^[7].

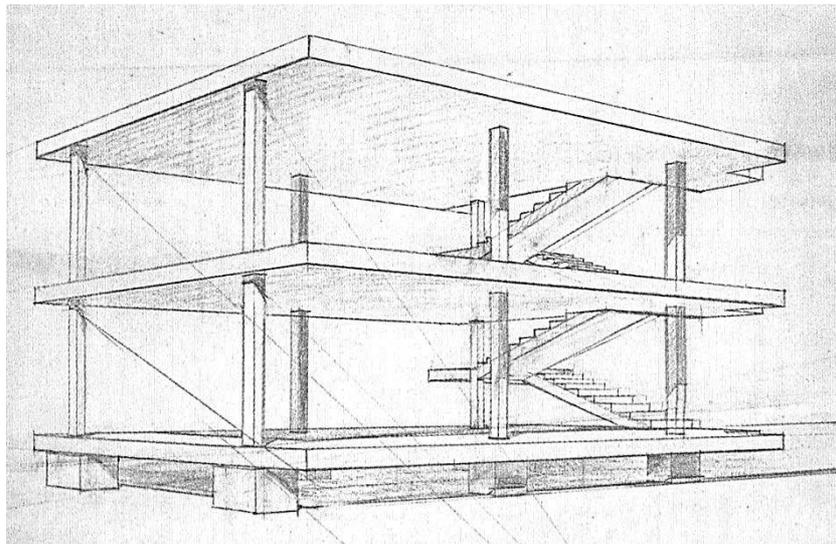


Figura 4.0-3. Boceto para preparar la patente del proyecto *Dom-ino house*. (Imagen tomada de [Benton 2011, 189]).

Uno de los edificios más representativos y emblemáticos del Estilo Internacional es el *Seagram Building* (1958), de Nueva York, obra de Mies van der Rohe en colaboración con su discípulo Philip Johnson, con un total de treinta y ocho plantas destinadas a oficinas, alcanza una altura de 157 metros. Su sencillez formal y su ligereza visual, que le otorga su composición confeccionada por cajas de acero y vidrio con coronaciones planas, lo convierten en un arquetipo arquitectónico, caracterizado por la innovación formal, especialmente tecnológica en el uso de nuevos materiales en la construcción ^{[8][9]}. Otros edificios representativos de esta corriente modernista serían la casa *Schindler-Chase* (Estados Unidos, 1922) de Rudolf Schindler, la *Villa Savoye* (Francia, 1931) de Le Corbusier, la *Glass House* (Estados Unidos, 1949) de Philip Johnson, la sede de la Escuela de la *Bauhaus* (en Dessau, Alemania, 1925) de Walter Gropius, o el *860-880 Lake Shore Drive Apartments* (Chicago, 1951) de Mies van der Rohe.

Este último proyecto, de veinte seis plantas, destacable por su invención en aspectos estructurales y de servicios, es el primer edificio de apartamentos con estructura de acero del mundo, en el cual se eliminan los cerramientos de fábrica y la ornamentación de la fachada, de forma que la estructura de acero queda expuesta, mos-

[7] Benton, T. (2011). *Le Corbusier: In concrete or stone, wood or metal?*, p. 188.

[8] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, p. 46.

[9] Jiménez, R.I. (s.f.). <http://www.arqhys.com/arquitectura/internacional-estilo.html>.

trándose al exterior, únicamente con el vidrio de las grandes ventanas como elemento de cerramiento, también con marcos de acero, propio del Estilo Internacional consolidando el cambio de tendencia totalmente distinto a la construcción clásica o tradicional. El proyecto destaca por la simplicidad conceptual y ligereza estructural, como se aprecia en la figura 4.0-4, características propias de los edificios de Mies van der Rohe ^[10].



Figura 4.0-4. *The 860-880 Lake Shore Drive Apartments* en construcción. Obra de Mies van der Rohe finalizada en 1951, Chicago. (Imagen tomada de [Dunster 2011, 185]).

Con la construcción del proyecto de *Lake Shore Drive*, el innovador arquitecto y diseñador industrial, Mies van der Rohe, culminaba la construcción de su primer edificio vertical, teniendo continuidad, con nuevos proyectos en altura. Cabe destacar el *Commonwealth Promenade Apartments* (1956), en la misma ciudad de Chicago, el cual se caracteriza por su sencillez conceptual y ligereza, tanto arquitectónica como estructural, características propias del estilo arquitectónico de Mies van der Rohe, incluidos los edificios en altura. El definido y racional estilo de Mies van der Rohe creó escuela y marcó tendencia, influyendo de forma notable a

[10] Dunster, D. (2011). *Ludwig Mies van der Rohe: The last great inventor of form*, p. 184.

las posteriores generaciones de arquitectos e ingenieros. En la figura 4.0-5, se muestran dos tipologías estructurales de entramado para edificios en altura que, el también arquitecto y diseñador, **Myron Goldsmith** (1918-1996), presentó en 1953 en su Tesis bajo los auspicios de Mies van der Rohe. Siendo estos proyectos, los cuales se caracterizan por una innovadora y avanzada estructura envolvente de doble diagonal (*diagrid*), un referente en el diseño arquitectónico y estructural de edificios en altura vanguardistas ^[11].

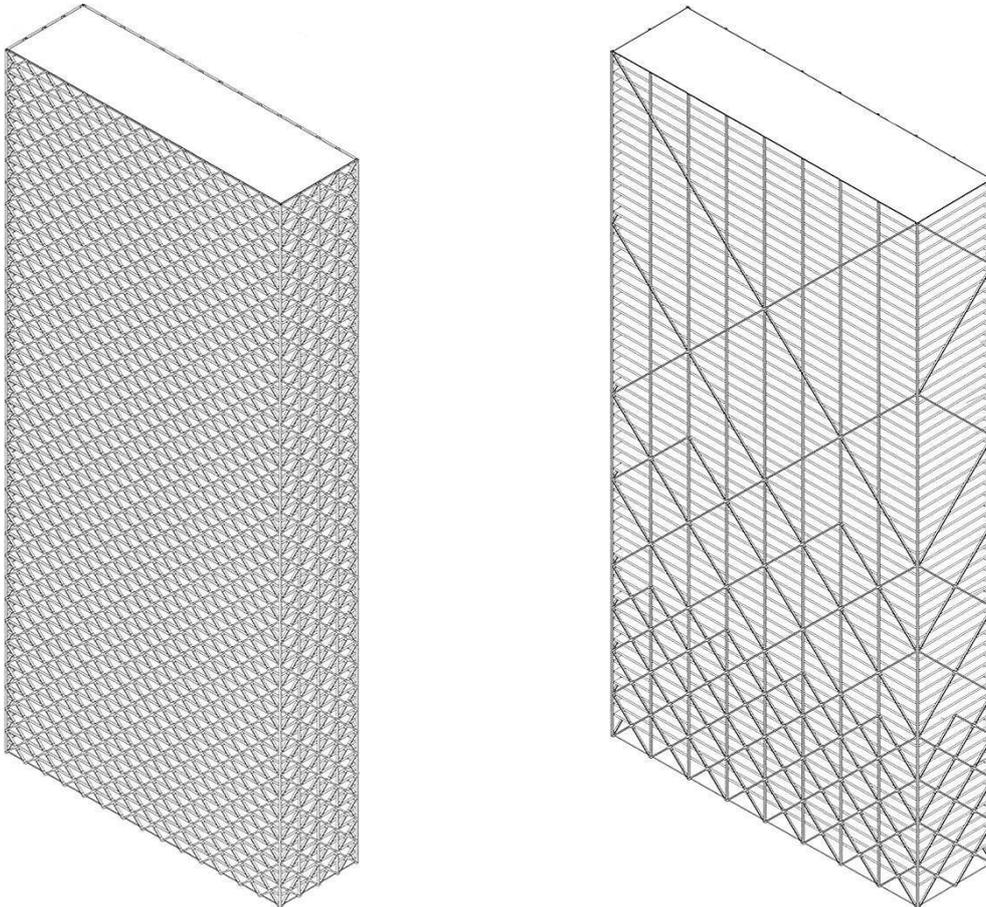


Figura 4.0-5. Proyectos verticales con entramado de doble diagonal (*diagrid*) de repetición uniforme y gradual, de Myron Goldsmith. (Imágenes tomadas de [Moussavi 2009, 97 y 99], respectivamente).

Como se ha expuesto previamente, la relevancia de los proyectos con estructura de entramado de doble diagonal que se muestran en la figura 4.0-5, reside en que define una tipología estructural ampliamente utilizada en las décadas posteriores, y también en la actualidad. Se enfatiza, así, la visión moderna que caracterizan estos proyectos por su innovador sistema estructural tipología que, como se tratará posteriormente, tendrá un gran desarrollo en la década de 1960 a 1970, en gran parte debido a la fecunda y exhaustiva investigación del ingeniero estructural **Fazlur Khan** (1929-1982), destacando al respecto la solución estructural que presenta sobre el rascacielos americano, en colaboración con Goldsmith ^[12].

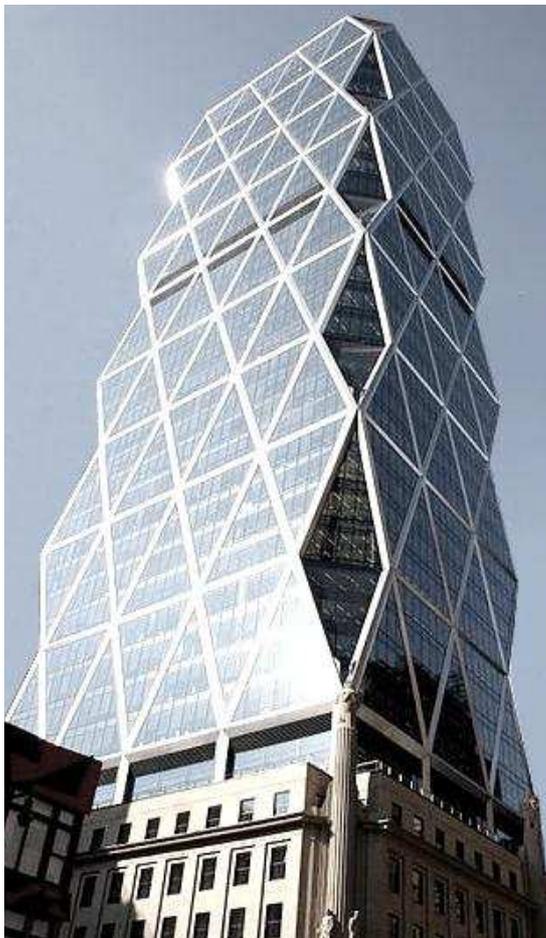
En la figura 4.0-6, se aprecian dos edificios singulares en altura y de actualidad, que se caracterizan por disponer de mallas estructurales de acero envolvente como

[11] Moussavi, F. (2009). *The Function of Form*, pp. 97 y 99.

[12] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, p. 60.

estructura resistente de proyectos de arquitectura *High-Tech*, en base a una tipología estructural que ya proponía, en 1953, Goldsmith bajo la tutorización de Mies van der Rohe, tal y como se ha expuesto previamente. La figura 4.0-6a, corresponde a la *New Hearst Tower*, de Nueva York, diseñada por el polifacético arquitecto británico **Norman Foster** (1935-), junto con la ingeniería estructural WSP Cantor Seinuk, con una altura de 182 metros de acuerdo a sus 46 pisos destinados a oficinas. La torre se alza sobre una estructura de hormigón armado de seis plantas que se ejecutó en 1928, la construcción de la torre original se pospuso como consecuencia de la *Gran Depresión* que surgió en 1929. La estructura de hormigón se convirtió en la base de la torre de Foster finalizada en 2006, con distinción especial por ser uno de los primeros edificios del mundo con estructura mallada de doble diagonal.

Una segunda y tercera referencias de marcado interés, en base a esta tipología estructural, son el edificio GLA (2002) y el edificio *30 St. Mary Axe* (2004), ambos en la ciudad de Londres, también, obras de Foster y de la ingeniería Arup^[13]. Este último, el cual se muestra en la figura 4.0-6b, destaca, además de su innovador diseño estructural, por su forma de ovoide que le confiere un alto grado aerodinámico^[14].



.a.



.b.

Figura 4.0-6. La *New Hearst Tower* en Nueva York, y el *30 St. Mary Axe* en Londres, caracterizados por su estructura metálica de doble diagonal, obra de Foster. (Imagen propia, 2008 y tomada de [Dupré 2008, 127]).

[13] Boake, T.M. (2013). *Diagrid structures: innovation and detailing*, p. 305

[14] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 36.

Estas primeras referencias arquitectónicas de prestigio internacional las cuales se han expuesto, de forma breve, en base a una primera reseña sobre la evolución histórica de los edificios en altura, a modo de introducción, considerando sus respectivos estilos y periodos constructivos, que se desarrollarán de forma amplia a lo largo del presente capítulo. Atendiendo, así, a la evolución histórico-formal-estructural de los edificios en altura, en el marco de esta tipología arquitectónica, como requiere el objetivo principal de estudio de la presente Tesis, a la cual se ha hecho referencia al inicio del capítulo.

En este contexto es necesario abordar, ahora, el estudio de los edificios en altura desde el punto de vista del diseño y del análisis estructural, así como de los aspectos arquitectónicos y constructivos que tengan una influencia determinante en dicho concepto, en concreto, en base a las tipologías estructurales espaciales de acero envolventes de edificios en altura. Disponer de estos conocimientos básicos y esenciales, permitirá establecer una base para proyectar desde la propia estructura edificios en altura con mallas estructurales de acero envolventes, para obtener las formas resistentes más óptimas y eficientes, tal y como se aborda ampliamente en próximo capítulo. De esta forma, dada la tendencia arquitectónica actual, se desarrolla un procedimiento de trabajo y de análisis para un adecuado planteamiento estructural que permita resolver los problemas habituales implícitos en el diseño y el análisis de este tipo de estructuras. Es necesario, pues, atender aspectos de diseño que permitan obtener una geometría estructural de mayor eficiencia, a la vez que se dé respuesta a las cuestiones formales y funcionales del edificio proyectado.

De acuerdo al recorrido histórico-evolutivo que se aborda a continuación, se incide inicialmente en los aspectos y elementos relacionados con las edificaciones en altura que destacan por su notable interés arquitectónico y/o estructural, de contenido prioritario para el desarrollo específico de la Tesis. En este contexto, son innumerables las edificaciones y construcciones realizadas en vertical, como las mostradas en la figura 4.0-7, las cuales corresponden al *skyline* de Shanghai visto desde la *Jin Mao Tower*, destinadas a uso residencial, comercial, terciario u otro uso cualquiera. En él se ven numerosas edificaciones a las cuales no se les prestará ninguna atención especial dada su mínima relevancia en el alcance y los objetivos del presente trabajo, de carácter exclusivamente numeral, en el sentido de la temática arquitectónico-estructural que es objeto del presente trabajo de investigación.



Figura 4.0-7. *Skyline* de Shanghai desde la *Jin Mao Tower*. (Imagen propia, 2012).

4.1 Evolución histórica de los edificios en altura. Concepto de esbeltez

Cabe señalar que, cuando se hace referencia a edificios en altura, básicamente a lo que se está refiriendo el articulado es a torres, es decir, “construcciones que además de ser altas llevan en sí el concepto de esbeltez”, como indica Cobrerros ^[1]. La necesidad del ser humano por construir edificios y monumentos en altura, los cuales no siempre son torres, como la Pirámide de Keops o las cúpulas de San Pedro de Roma y de *Saint Paul* de Londres, representadas en la figura 4.1-1, ha sido una actividad constante a lo largo de los siglos que se remonta a la época de las primeras civilizaciones históricas, ya fuera por cuestiones funcionales de observación, de defensa o de emisión de señales acústicas y visuales ^[1], entre otras.

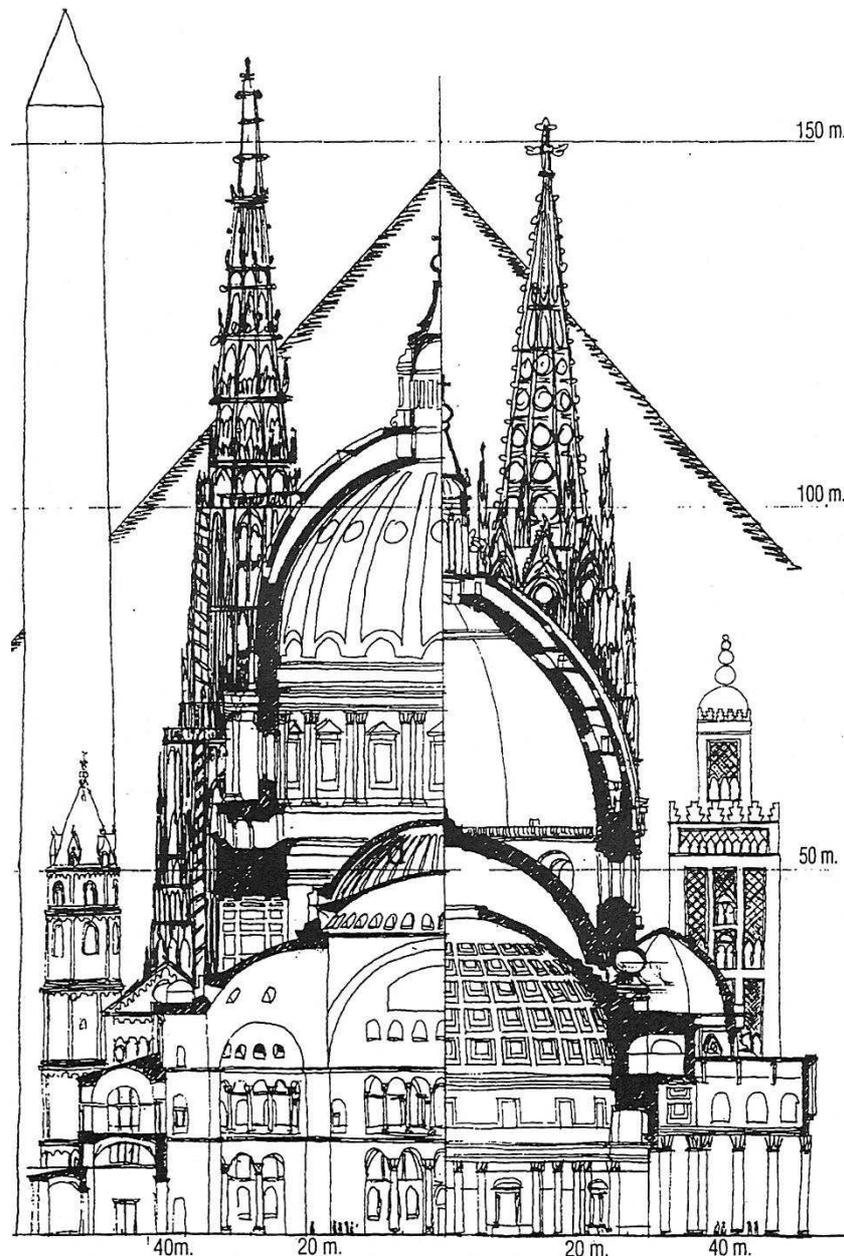


Figura 4.1-1. Dibujos de Félix Escrig Pallarés (1950-2013) sobre edificios altos, los cuales no todos son torres, como la Pirámide de Keops o las cúpulas de San Pedro en Roma y de *Saint Paul* en Londres. (Imagen tomada de [Cobrerros Vime 2002, 13]).

[1] Cobrerros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, pp. 7 y 13.

Desde esta perspectiva se constata que, en la época de los egipcios, como se ha avanzado en el primer capítulo, con la construcción de las grandes creaciones (templos, palacios y tumbas) desarrolladas desde el 3100 al 30 a.C., tomaron forma construcciones de tamaño colosal principalmente de piedra, que otorgan a la arquitectura egipcia un carácter monumental característico. Un ejemplo de ello es la ya referida Pirámide de Keops (*Jufu*) o Gran Pirámide de la Necrópolis de Guiza, que se muestra en la figura 4.1-2, y que llegó a ser el edificio más alto del mundo, con una altura inicial de 146,6 metros, hasta que se construyó la Torre Eiffel para la Exposición Universal de París de 1889.



Figura 4.1-2. Imagen de la Esfinge del Cairo con dos de las tres majestuosas Pirámides de la Necrópolis de Guiza en el fondo. (Imagen propia, 2012).

Menos conocidos son el mausoleo del emperador Qin Shi Huang de China (221 a.C. 210 a.C.) de 76 metros de altura o la tumba Daisen Kofun en Osaka del emperador japonés Nintoku-ryo que alcanza una altura total de 35 metros. Esta última, data del siglo V y se considera que precedió a las tumbas aztecas y mayas. También la época bizantina, desde el siglo VI d.C. hasta su caída en 1453, destaca por sus construcciones religiosas y edificios administrativos que reflejan la majestuosidad e importancia del proteccionismo imperial, aspecto fundamental en las construcciones de este período ^{[2][3]}.

Es por ello, por lo que se desprende que el interés por la construcción de edificios altos como son las catedrales y las torres, ya sea en recintos religiosos o como construcciones ornamentales, ha sido una constante a lo largo de la historia. Estos edificios respondían a motivos religiosos, con el fin de comunicarse con el ente divino, pero también por motivos económicos, demostrando así el poder eclesiástico. En este sentido acerca de la evolución histórica de los edificios altos, es oportuno hacer mención del mito de la Torre de Babel, la cual se muestra en la figura 4.1-3. Dicha edificación bíblica, mencionada en el antiguo Testamento, y con la cual se pretendía alcanzar el cielo, como se infiere del capítulo 11 del Génesis:

“Vamos, edifiquemos una ciudad y una torre que llegue hasta el cielo; así, nos haremos un nombre y no nos dispersaremos por toda la tierra.”

Génesis (11, 1-4), citado por [Albaric et al. 2012, 22].

[2] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 20.

[3] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, pp. 7 y 13.



Figura 4.1-3. Pintura de Pieter Brueghel el Viejo (1525-1569), *Construcción de la Torre de Babel*, en 1563, y maqueta de resina de la Torre de Babel, escala 1/200, 2011-2012 Eietres Laan-ETSAV (UPC). (Imágenes tomadas de [Albaric et al. 2012, 36 y 37] respectivamente).

Otro ejemplo de sumo interés, que sirvió de ejemplo para las construcciones de los siglos posteriores, fue el Faro de Alejandría construido entre los años 285 y 247 a.C., el cual destacó no sólo por su gran altura de 134 metros, que no fue superada hasta el siglo XV, sino también por su concepción estructural compuesta por un sistema de doble tubo, como se muestra en la figura 4.1-4.

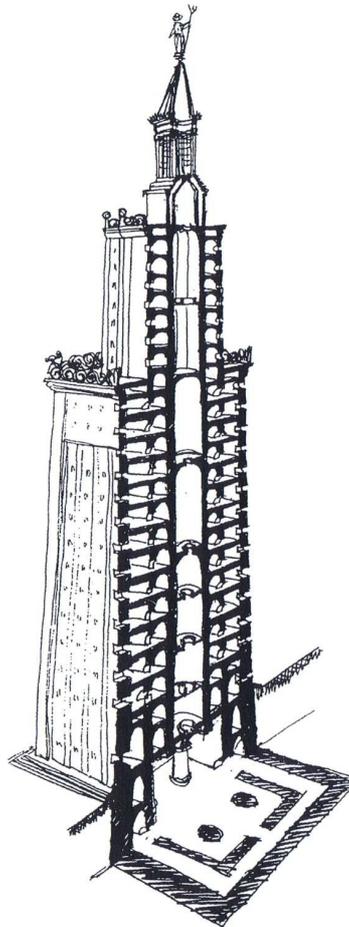


Figura 4.1-4. Posible sección de la Torre del Faro de Alejandría (Egipto). (Imagen tomada de [Escrig Pallarés 1994, 62]).

La construcción, de base cuadrada y de forma decreciente, ligeramente piramidal y escalonada para bajar el centro de gravedad en relación con las cargas horizontales, se compone de un tubo interior circular que funciona como núcleo de comunicación albergando las rampas y escaleras de acceso, mientras que el tubo exterior, de 70 metros de altura, dota al conjunto de una mayor **rigidez** estructural. Propiedad intrínseca del proceso estructural, necesaria para soportar las cargas horizontales que en los edificios en altura son determinantes frente a las cargas verticales o gravitatorias (peso propio y sobrecargas), para las cuales la sección resistente o espesor de los muros sería menor con respecto al requerido para resistir las cargas laterales. La misma rigidez en ambas direcciones permitía que la torre tuviera un comportamiento altamente eficiente ^{[4][5]}.

La construcción de grandes torres, de acuerdo a las funciones anteriormente expuestas, especialmente la relativa a la motivación por creencias religiosas o relacionadas con la divinidad, son comunes en muchas civilizaciones y culturas del mundo, pero especialmente fueron proclives en los periodos de la Edad Media y Renacimiento. Ejemplos de construcciones como los zigurats mesopotámicos, las pagodas chinas, templos como el de Lindaraja (siglo XI), en la India, de 45 metros de altura, o los minaretes y torres de origen musulmán y cristiano previos a las torres de los templos románicos y a las catedrales góticas de Europa occidental, sirvieron de base, justificación e inspiración de muchos edificios altos y torres. Hasta el punto, de llegar a convertirse, este tipo de construcciones, en modelos a imitar en los edificios en altura construidos, en las principales ciudades norteamericanas, durante el periodo ecléctico, como se tratará posteriormente. La cultura islámica nos ha permitido conocer edificios como la Giralda de Sevilla, precedida por la Torre Hasan en Rabat o el alminar de la mezquita de Marrakech, ambas en Marruecos, las cuales se muestran en la figura 4.1-5. Los minaretes fueron las construcciones de mayor esbeltez hasta las construcción de algunas chimeneas en el siglo XIX o de las antenas de telecomunicaciones en el siglo XX ^[6].



Figura 4.1-5. Giraldas de Marrakech y de Sevilla, y Torre Hasan en Marruecos. (Imágenes propias, 2003, 2011).

[4] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 7.

[5] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 45, 46 y 277.

[6] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 21.

De la misma manera, la arquitectura románica que se extendió en la Europa cristiana durante los siglos de la Alta Edad Media (siglo XI al siglo XIII), influenciada por los estilos de la Baja Edad Media (romano, bizantino, árabe, etc.), cuyos edificios, como las iglesias románicas de la Vall de Boí (Pirineo leridano), de estilo lombardo, se caracterizan por sus esbeltos campanarios de piedra tosca ejecutados de forma cuidadosa. En la figura 4.1-6, se aprecia el armónico campanario de seis plantas de la iglesia románica de Santa Eulàlia de Erill la Vall, que fue construido en la segunda mitad del siglo XII junto con el porche, ampliando la iglesia inicial de una sola nave que data del siglo XI. El campanario, que fue restaurado en la década de 1960, se eleva prácticamente hasta una altura de 21 metros que, junto con su base cuadrada de 4 metros de ancho, dotan al campanario de una **esbeltez** geométrica superior a cinco ^[7].

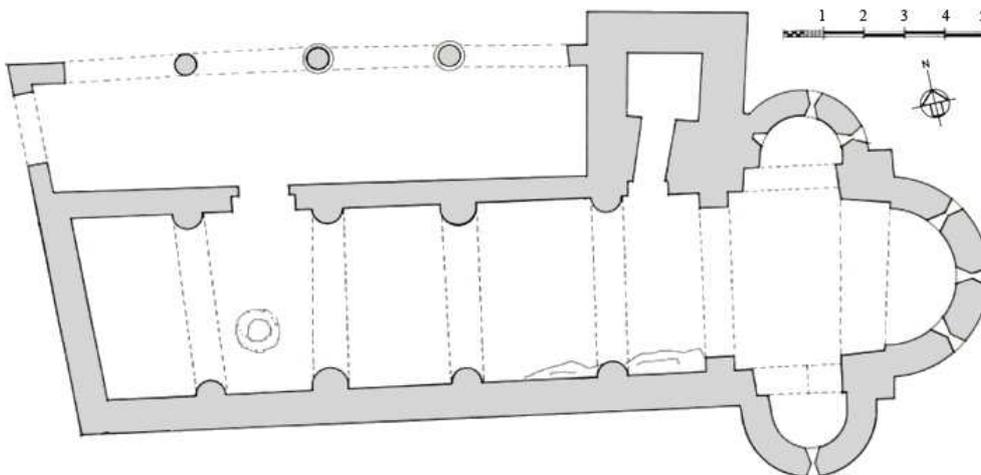


Figura 4.1-6. Vista del campanario y planta de la iglesia románica de Santa Eulàlia de Erill la Vall. (Imágenes propias, 2003).

[7] Señis López, R. (2003). *Restauració església Santa Eulàlia d'Erill-Avall*.

En referencia a los campanarios de las iglesias románicas de estilo lombardo, es de especial relevancia destacar la Torre de la Abadía de Pomposa (Bologna), construida en 1063, la cual se caracteriza por el concepto de mayor ligereza en la parte superior para, nuevamente, bajar el centro de gravedad, mejorando la **estabilidad**, como ya se ha comentado en el Faro de Alejandría. Ello se consigue con la distribución de los huecos o ventanas, como se muestra en la figura 4.1-7, minimizando dentro de lo posible el momento de vuelco de los edificios frente a las cargas horizontales que condicionan, de forma relevante, el diseño y la forma de las torres.

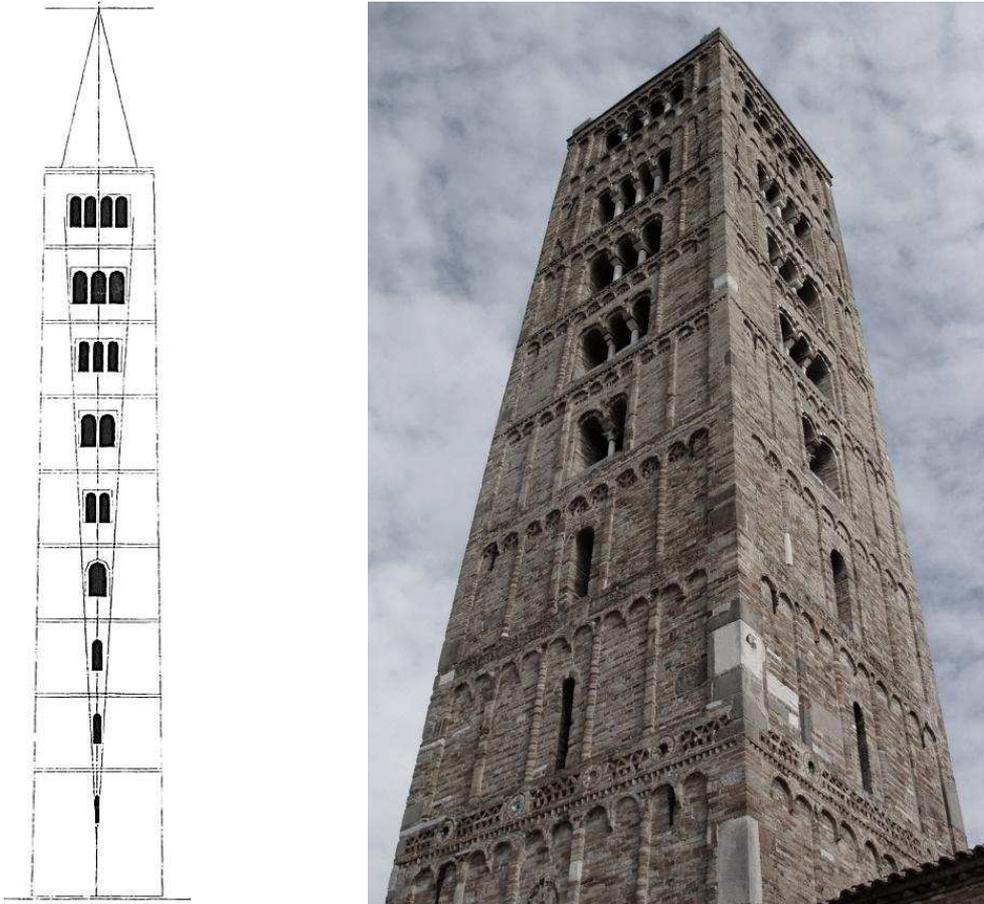


Figura 4.1-7. Alzado y vista de la Torre de la Abadía de Pomposa en Bologna. (Imágenes tomadas de [Cobrerros Vime 2002, 8] y propia, 2011).

Avanzando en este recorrido analógico histórico-constructivo, cabe destacar la construcción de torres y campanarios, ejemplificada con el *Campanile* de San Marcos como una forma totalmente identificable en los obeliscos, como es, por ejemplo, el del Templo de Karnak en Luxor, construido durante el reinado de varios faraones egipcios (Hatsepsut, Seti I, Ramsés II y Ramsés III), entre los siglos III y I a.C. Ambas construcciones verticales, se muestran en la figura 4.1-8ab. El *Campanile* de la plaza San Marcos inició su construcción en el siglo IX y terminó en el siglo XII. Actualmente alcanza una altura de 99 metros y es sumamente conocido por haber sido reconstruido en más de ocasión, la última en 1912, tras el colapso de 1902, conservando la forma que tenía desde la reconstrucción del año 1514. Su geometría ha sido utilizada de forma habitual para la ejecución de distintas construcciones, como por ejemplo el *Washington Monument*, alzado en 1884, con un altura total de 169 metros ^[8].

[8] Dupré, J. (2008). *Skyscrapers: A history of the World's Most Extraordinary Buildings*, p. 15.



.a.



.b.

Figura 4.1-8. a) *Campanile* de la plaza San Marcos de Venecia, b) Obelisco del Templo de Karnak en Luxor, (Egipto). (Imágenes propias, 2011 y 2012 respectivamente).

En cuanto a las construcciones en altura y torres se refiere, es oportuno mencionar las torres medievales de Siena (Torre del Mangia), de Bolonia, así como las de San Gimignano, entre otras. La Torre de Mangia en Siena (en la Toscana) fue construida entre los años 1338 y 1348 en la plaza principal, con una altura total de 88 metros, siendo una de las torres más altas de la Italia medieval, lo que permite que sea visible desde todos los puntos de la ciudad ^[9].

En el caso de la Bolonia medieval, la ciudad tenía un número de torres considerable como símbolo de poder, estimándose que pudieron llegar a más de cien entre los siglos XII y XIII. De todas ellas, destacan las Torres de Garisenda y Asinelli, las cuales actualmente todavía continúan en pie. La Torre de Asinelli alcanza una altura de 97,6 metros (después de su ampliación), mientras que la Torre Garisenda mide 48 metros.

No obstante, uno de los ejemplos de agrupaciones de torres de mayor relevancia se encuentra en el pequeño pueblo amurallado de Gimignano, de origen medieval, el

[9] Unesco Heritage Centre (1994). *World heritage list: Historic Centre of Siena*, p. 26.

cual se erige en lo alto de la Colinas de la Toscana en Italia, cerca de las ciudades de Siena y de Florencia ^[10]. El *skyline* de la población se muestra en la figura 4.1-9, destacando la arquitectura medieval caracterizada por sus torres.



Figura 4.1-9. *Skyline* medieval y renacentista del pueblo de San Gimignano en la Toscana (Italia). (Imagen tomada de [Gómez Hermoso et al. 2013, 47]).

Pero sin duda, en cuanto a los hitos históricos de construcciones altas se refiere, fueron las construcciones medievales, especialmente las góticas con las catedrales como el edificio religioso gótico por excelencia, las que superaron todos los registros en altura, alcanzando dichas edificaciones las alturas más elevadas jamás ejecutadas con piedra, caracterizadas por su verticalidad, refinamiento y ligereza. Para ello fueron necesarios altos conocimientos técnicos y de organización, en base a métodos puramente empíricos por parte de los maestros de obra y canteros, debido a la ausencia de una base de cálculo para dimensionar los elementos resistentes, con la dificultad que conlleva esta limitación y los medios sumamente precarios de los que disponían ^{[10][11]}.

La catedral gótica ubicada en la población alemana de Ulm, es la más alta de todas ellas, y ostenta en la actualidad la torre de iglesia, construida con piedra, más alta del mundo con sus 161,53 metros de altura para una dimensiones en planta de la nave de 123,46 y 48,8 metros, de largo y ancho respectivamente. Su construcción se inició a finales del siglo XIV (1377) y fue terminada con la construcción de la aguja calada en 1890 ^[11]. De igual forma que el resto de las catedrales la Catedral de Ulm, como se aprecia en la figura 4.1-10, se caracteriza por disponer en la parte superior de un mayor número de huecos o vanos. Se permitía así el paso del viento a través suyo mermando sustancialmente la oposición al mismo, demostrándose los conocimientos de aerodinámica de los constructores, que sabían que a mayor altura los efectos derivados de la acción dinámica del viento tienen mayor influencia e incidencia sobre la edificación ^[12].

[10] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 47.

[11] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, pp. 21 y 22.

[12] Dupré, J. (2008). *Skyscrapers: A history of the World's Most Extraordinary Buildings*, p. 21.

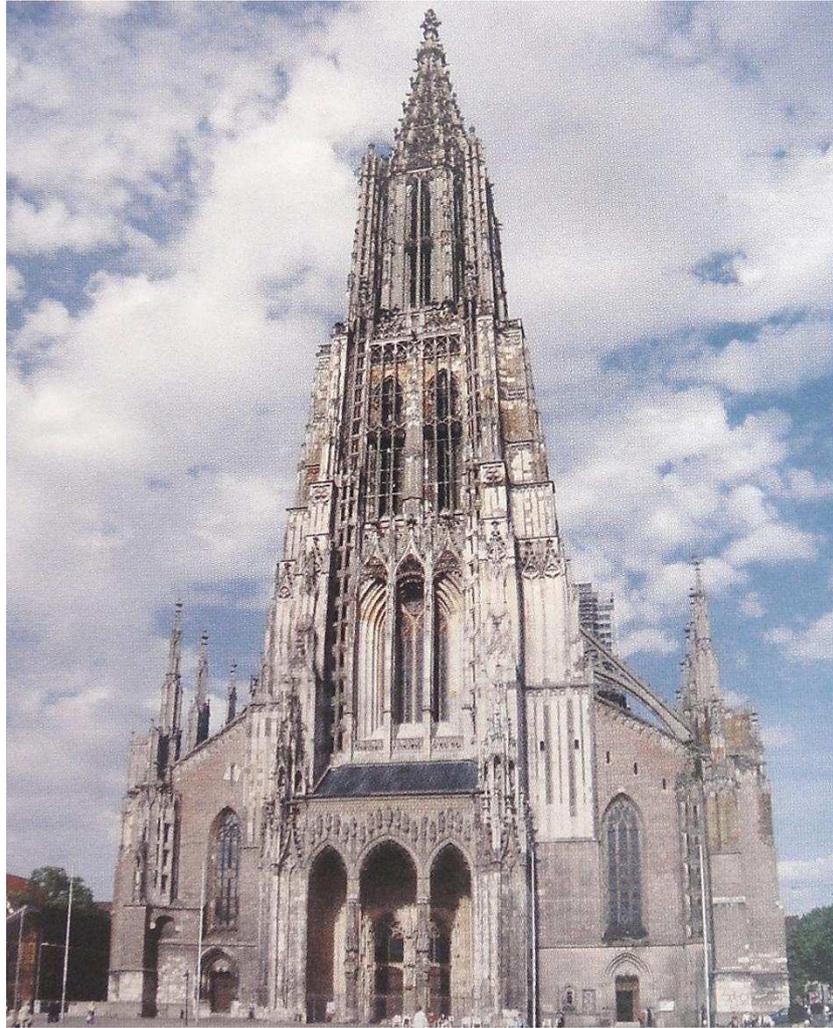


Figura 4.1-10. Catedral gótica de la ciudad de Ulm. (Imagen tomada de [Burón Maestro et al. 2008, 22]).

Posteriormente, las iglesias del Renacimiento de los siglos XVI, XVII y XVIII se caracterizan por las espectaculares cúpulas, y los palacios señoriales, previo a los templos del estilo barroco, principalmente católicos, con la clara intención de acercar el cielo a la Tierra, a la vez que daba respuesta a motivaciones económicas y de poder. Así mismo, la propia cúpula de *Saint Paul* en Londres o de San Pedro en Roma, la cual se alza casi hasta los 150 metros de altura, son edificios o construcciones altas, aunque, en este caso, no se traten de edificaciones geométricamente esbeltas ^{[13][14]}.

En este sentido, la tendencia constructiva vertical se ve en gran parte influenciada por la fuerte entrada del Renacimiento, desembocando en el inicio de la era científica, que propulsó los cambios suficientes que darían lugar, ya en las postinearías del siglo XVIII, al inicio de la ilustración y de la era industrial.

Esta inquietud histórica, no cesó a lo largo del siglo XIX, más bien todo lo contrario, ya que gracias a la industrialización y la evolución en el tratamiento de nuevos materiales de construcción como el hierro, se implantó la idea de construir una torre de gran altura que obsesionaba a los ingenieros de la época, asumiendo un

[13] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 22.

[14] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 13.

papel de gran importancia, al mostrar los edificios su estructura interna, en un ámbito limitado hasta el momento por los arquitectos. Son muchos los intentos por conseguirlo, como en 1833, cuando el ingeniero inglés **Richard Trevithick** (1771-1833) propuso alzar una columna de hierro colado de 1000 pies de altura (304,80 m), o los ingenieros **Thomas Curtis Clarke** (1827-1901) y **David Reeves** (1852-1923) que aspiraron a construir una torre de la misma altura para la Exposición Mundial de Filadelfia de 1876. No obstante, fue finalmente el año 1889 cuando, con motivo de la Exposición Universal de París para conmemorar el centenario de la Revolución Francesa, se llevó a cabo la construcción de la torre emblemática de hierro de 300 metros de altura (324 metros con la antena de radio superior): la Torre Eiffel ^{[15][16]}, la cual se muestra en la figura 4.1-11.



Figura 4.1-11. La Torre Eiffel finalizada el 31 de Marzo de 1889. (Imagen tomada de [Albaric et al. 2012, 82]).

Es precisamente en este contexto, del reto continuo, en busca de la altura en el que se puede considerar como exponente la Torre Eiffel, la cual se proyecta y construye para demostrar el avance tecnológico y las posibilidades de la construcción en

[15] Albaric, M.; et al. (2012). *Torres i gratacels. De Babel a Dubai*, pp. 73 y 74.

[16] Cobrerós Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 7.

hierro con las nuevas técnicas en plena Segunda Revolución Industrial (1850/1870-1914). Fue la construcción más alta hasta los años 20 y 30 del siglo XX cuando aparecieron los rascacielos neoyorquinos ^[17]. La construcción se inició el año 1887 y duró veintiséis meses y supuso toda una hazaña de precisión, eficiencia y velocidad de ejecución, tal y como indica Lemoine ^[18], con más de 18.000 piezas distintas. Se asemeja a la forma de una pila de hierro constituida por cuatro vigas de celosía unidas por elementos horizontales, como se muestra en la figura 4.1-12, y que confluyen en la parte superior. El proyecto se llevó a cabo bajo las órdenes del ingeniero civil francés **Alexandre Gustave Eiffel** (1832-1923), pero ya en 1884 dos ingenieros de la empresa Eiffel estaban trabajando en su proyecto. Eran el ingeniero de estructuras **Maurice Koechlin** (1856-1946) y el ingeniero civil **Emile Nouguier** (1840-1898), contando con la colaboración del arquitecto **Stephen Sauvestre** (1847-1919) de la misma empresa. En realidad, fue Sauvestre quien le dio la forma de monumento, dejando atrás el aspecto inicial esquemático e industrial propuesto por Koechlin, resultado de fusionar distintos estilos como la Estatua de la Libertad de Nueva York, (inaugurada en 1886, también a cargo del ingeniero Koechlin), Notre-Dame de París, las columnas Vendôme o el Arco de Triunfo ^[19].

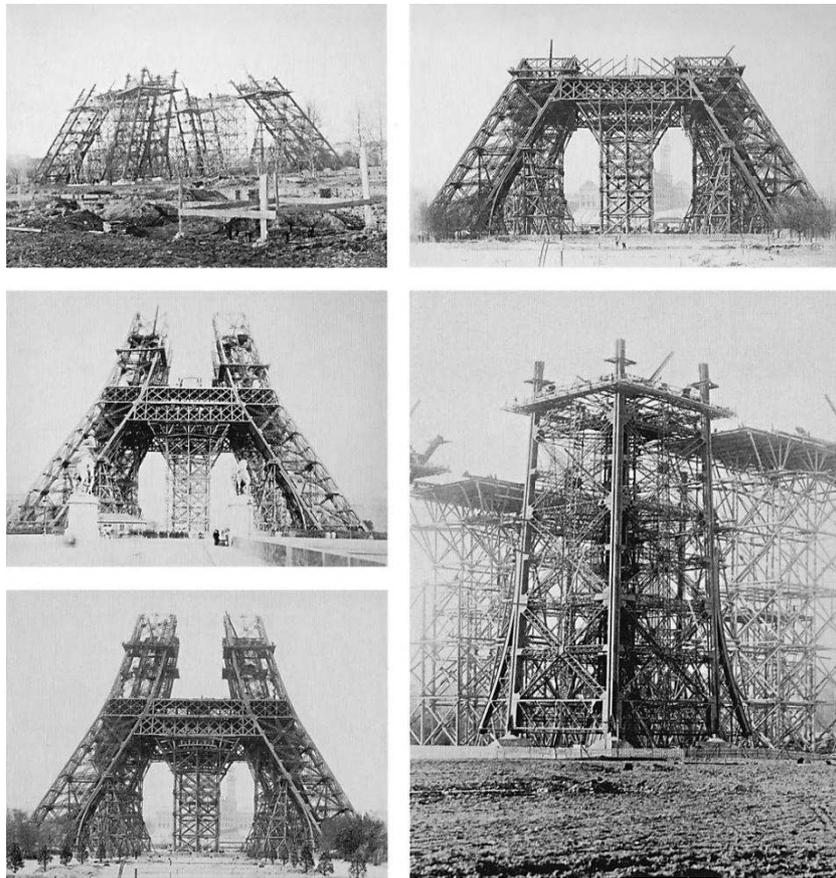


Figura 4.1-12. Distintas fases de la construcción de la Torre Eiffel, París. (Imagen tomada de [Albaric et al. 2012, 78]).

La culminación de la Torre Eiffel en 1889, con la cual se pretendía modificar el aspecto o *skyline* de la ciudad de París, fue la confirmación al mundo de las posibilidades técnicas de que se disponían, y de las altas prestaciones que ofrecía el hie-

[17] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 22.

[18] Lemoine, B. (2011). *Gustave Eiffel: Engineering mastermind of tall metal structures*, p. 145.

[19] Albaric, M.; et al. (2012). *Torres i gratacels. De Babel a Dubai*, pp. 73 y 74.

rro como material de construcción, aunque ya se utilizara en puentes ferroviarios y otras construcciones de grandes dimensiones, de acuerdo a lo expuesto en el primer capítulo. En la figura 4.1-13, se muestra la colosal envergadura y magnitud de la Torre Eiffel con respecto al resto de edificaciones altas desarrolladas hasta el momento, avivando así la feroz competición para construir el edificio más alto, que se convirtió en un reto de constante superación tecnológica y de los medios necesarios para ello.



Figura 4.1-13. Cuadro comparativo de los monumentos más altos del mundo alzados hasta el 1889. (Imagen tomada de [Albaric et al. 2012, 89]).

Todas estas referencias históricas de construcciones, edificios o torres en altura, desarrolladas a lo largo de la historia de la Humanidad, han respondido a la imperiosa necesidad latente y al anhelo del ser humano de alcanzar una mayor altura, por cuestiones o motivaciones diversas, como se ha tratado a lo largo de este epígrafe, sucediéndose a lo largo de los siglos, de las civilizaciones y las distintas culturas de todo el mundo, los hitos arquitectónicos-esculturales de plena carga simbólica e icónica.

Como indican Burón ^[20] y Gómez ^[21], el auge constructivo de edificios en altura se traslada, a finales del siglo XIX, a Estados Unidos de América. En concreto, se inicia en la ciudades de Chicago y consolida en la de Nueva York, de acuerdo a distintos factores y razones ya fueran prosaicas, materialistas o simbólicas desde la perspectiva de los arquitectos e ingenieros pero en realidad, como se aborda en el siguiente epígrafe, en gran parte surge de la presión social que reclama cambios para satisfacer sus necesidades (nuevas viviendas, comercios, oficinas, etc.). Dichas carencias fueron atendidas desde una clara mentalidad y vertiente empresarial y política dentro de unas ciudades que, como refieren Ali y Moon ^[22] y Huxtable ^[23], cada vez están más densificadas y congestionadas producto de su rápido crecimiento y el de la actividad económica, favoreciendo la aparición de un nuevo y característico tipo constructivo: el edificio estadounidense de oficinas.

[20] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 22.

[21] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 48.

[22] Ali, M.M.; Moon, K.S. (2007). *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, p. 205.

[23] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, pp. 22 y 23.

4.2 Evolución formal de los edificios en altura contemporáneos

Los edificios en altura, también conocidos como rascacielos en países de habla hispana y *skyscrapers* en países de habla inglesa, son edificios habitables particularmente altos, y/o que destacan por su altura con respecto a las edificaciones de su entorno urbano. La asociación internacional *Council on Tall Building and Urban Habitat* (CTBUH) los definió hace unas décadas, desde un punto de vista historicista, como aquel edificio que supera las 10 plantas y utiliza para su funcionalidad el ascensor como elemento esencial ^{[1][2]}.

Como se ha indicado, un criterio para determinar si un edificio es alto o no, en este caso desde un punto de vista histórico, se establece en base al número de plantas. Pero es importante destacar que no hay un criterio único unificado para definir la categoría de un edificio según su altura. En este sentido es importante definir dos parámetros geométricos que se deben considerar en el momento de establecer la categoría de un edificio, en términos de altura, como plantea CTBUH ^[3]:

- La altura del edificio en función del contexto o cultura urbana en el cual se ubica, es decir, en relación con la altura de las edificaciones colindantes, como ya se ha expuesto previamente, y se representa esquemáticamente en la figura 4.2-1a.
- Proporción y escala del edificio, es decir, considerar el concepto esencial de un edificio en altura: la esbeltez, como se muestra en la figura 4.2-1b.

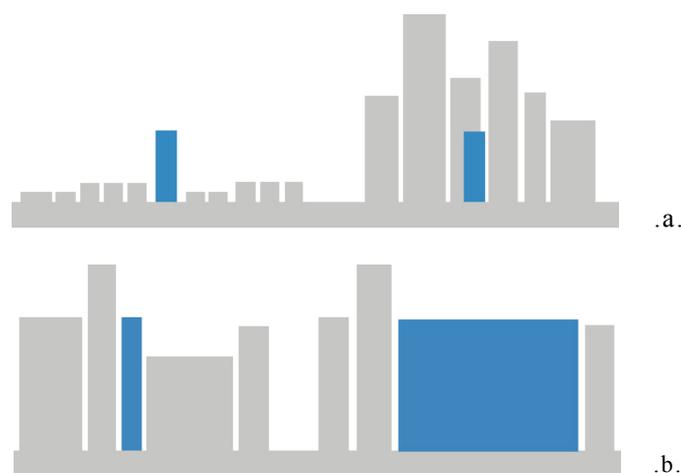


Figura 4.2-1. Influencia del entorno urbano (a) y esbeltez (b) para determinar la categoría de un edificio según su altura. (Imagen tomada de [CTBUH s.f./a]).

En cuanto a los edificios que destacan por su altura en relación con los edificios de su alrededor, es posible ordenar los edificios en base a los siguientes tres criterios que establece CTBUH ^[4]:

- Altura en la planta ocupada más alta.
- Altura en la cima de la aguja, pináculo, antena o mástil.

[1] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 19.

[2] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 21 y 26.

[3] CTBUH. (s.f./a). <http://dhakadesigners.wordpress.com/2012/06/26/ctbuh-criteria-for-defining-and-measuring-tall-buildings/>

[4] CTBUH. (s.f./b). <http://www.ctbuh.org>

- Altura en la cima arquitectónica del edificio. Las alturas se miden desde la entrada peatonal al aire libre más baja hasta la cima del edificio, incluyendo las agujas pero excluyendo elementos como los mástiles de banderas o antenas.

En las figuras 4.2-2, 4.2-3 y 4.2-4, se comparan y ordenan los edificios más altos construidos hasta el año 2012 de acuerdo a los criterios establecidos por la organización CTBUH [5], anteriormente descritos.

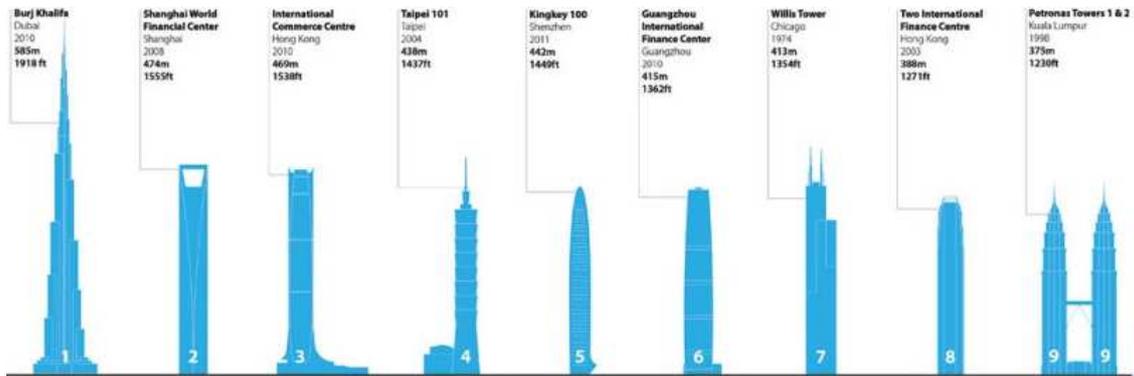


Figura 4.2-2. Comparativo edificios más altos en 2012 de acuerdo a la altura de la planta ocupada más alta. (Imagen tomada de [CTBUH s.f./a]).

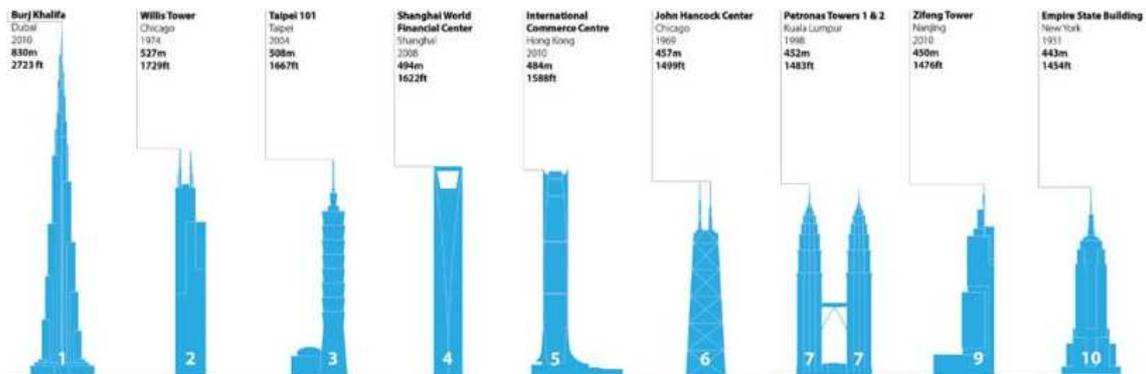


Figura 4.2-3. Comparativo edificios más altos en 2012 de acuerdo a la cima de la aguja o antena. (Imagen tomada de [CTBUH s.f./a]).

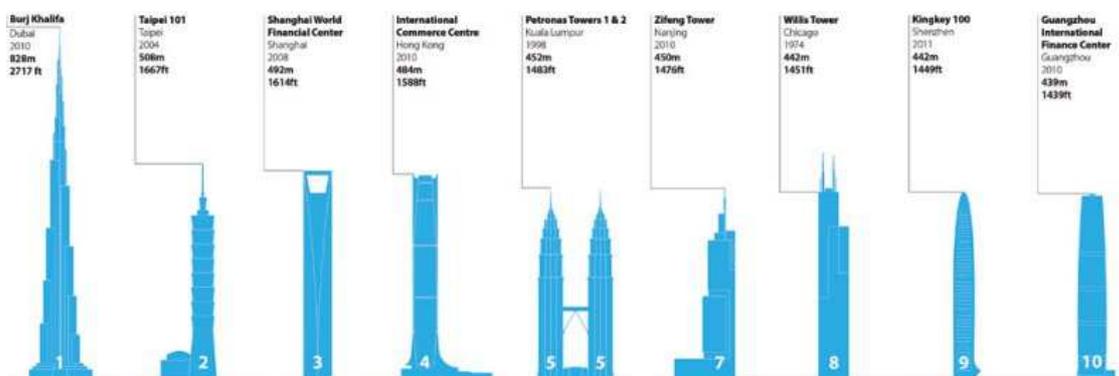


Figura 4.2-4. Comparativo edificios más altos en 2012 de acuerdo a la cima arquitectónica el edificio. (Imagen tomada de [CTBUH s.f./a]).

[5] CTBUH. (s.f./b). <http://www.ctbuh.org>

En cuanto a edificios altos o de gran altura se refiere, cabe destacar, como se desprende de lo anteriormente expuesto, que no hay un único criterio para determinar el límite entre una categoría u otra, ya que el contexto urbano en el cual se ubica un edificio determina su denominación. En este sentido, Díaz ^[6] hace referencia a estos criterios, en base a la escala/proporción y la cultura urbana, de acuerdo a la siguiente afirmación:

“En este sentido es importante tener claro cuál es la idea de escala que tiene la cultura urbana norteamericana. Los rascacielos no son para ellos (como de alguna manera los son para nosotros) un hecho excepcional, un fenómeno particular a controlar socialmente. Los edificios de gran altura forman parte natural de su cultura; y me refiero a la cultura de toda la gente y no sólo a la de los arquitectos.

Como ejemplo vale la pena mencionar la experiencia que surge al enseñar en cualquier escuela de arquitectura norteamericana. Impresiona, desde el punto de vista de la escala, las alturas que manejan los estudiantes americanos en sus ejercicios. Generalizando, ésta es la doble de las que se plantean nuestros estudiantes europeos para resolver el mismo tipo de problemas. Lo que para nosotros está entre cuatro y diez plantas para ellos oscila por arriba de las veinte. Y esta escala es, para todos, una cosa normal, de la que no se tiene una consciencia particular.

La concepción americana de la altura se desarrolla en una clave cultural tecnológica mientras la europea lo hace en una clave cultural más tradicionalista; y es por ello que resulta posible hablar del carácter que poseen los rascacielos.”

Antonio Díaz (1989), citado por [Gómez Hermoso et al. 2013, 27].

En este contexto, otro aspecto o criterio para determinar si un edificio es de gran altura, o no, se establece en función de la tipología o esquema estructural necesario para soportar las cargas horizontales, independientemente de la altura, ya que en este aspecto influye, de forma muy significativa la relación altura/base, es decir, el parámetro geométrico de esbeltez, que suele estar alrededor de un valor de cinco o seis aunque algunas construcciones más recientes, algunas de ellas en España, alcanzan un valor de diez o superior. Los edificios en altura serán aquellos que no se puedan resolver únicamente de una forma técnica y económica razonable, con una estructura de pórticos, siendo necesarios núcleos o pantallas que trabajan en ménsula para absorber las acciones horizontales. Es decir, dichas cargas condicionan y determinan la concepción y el diseño de la tipología estructural necesaria, independientemente de la altura total del edificio. Se estima que para una esbeltez entorno a cuatro o superior, las acciones horizontales influyen de forma considerable sobre la tipología estructural necesaria para mantener el equilibrio y sostener el edificio ^{[7][8]}.

Como indican, Ali y Moon ^[9] y Manterola ^[10], los edificios en altura se caracterizan por su verticalidad y esbeltez, los cuales desde un punto de vista resistente equivalen de forma simplificada a una viga vertical esbelta en voladizo con la base fijada en el suelo, que resiste cargas gravitatorias (cargas permanentes y sobrecargas) y acciones horizontales (viento y sismo). En base a esta simplificación, se establece un elemento resistente solicitado principalmente a flexión y corte, siendo su resolución ampliamente estudiada con la tecnología actual de acuerdo a los grandes voladizos que han surgido del diseño y la ejecución de múltiples puentes y torres de comunicación. No obstante, para dar respuesta a las prestaciones funcio-

[6] Díaz, A. (1989). *Arquitectura viva*.

[7] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 19.

[8] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 28 y 30.

[9] Ali, M.M.; Moon, K.S. (2007). *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, p. 207.

[10] Manterola Armisén, J. (1985). *La estructura resistente de los edificios altos*, p. 1.

nales y de uso es necesario que los edificios, en este caso en altura, den una respuesta satisfactoria a unas determinadas condiciones de diseño, de construcción y de uso diferentes, atendiendo a las siguientes prestaciones:

- Resistencia a corte y flexión, a la vez que resistencia torsional, como se tratará en el próximo capítulo, para soportar las cargas laterales equivalentes correspondientes a las acciones dinámicas de viento y sismo.
- Capacidad para soportar cargas verticales.

Por lo tanto, es necesaria la resolución de un edificio que requiere de una estructura espacial hueca de gran complejidad que debe conjugar las necesidades y cuestiones arquitectónicas del proyecto con los mecanismos resistentes internos que deben dar equilibrio al conjunto y soportar los esfuerzos de corte, así como el correcto desarrollo de dichos mecanismos hasta las caras límites del edificio frente a la flexión. Evitando, así, el conflicto entre la estructura resistente y las exigencias de uso del edificio proyectado ^[11].

El desastre provocado por el gran y devastador incendio de la ciudad de Chicago, que se produjo en el año 1871, y que duró tres días, propició un desarrollo espectacular de la ciudad, en parte provocado por el auge económico norteamericano que propició la creación y crecimiento de grandes compañías, así como el aumento de servicios terciarios que se materializó con la proliferación y construcción de rascacielos o edificios en altura. Después de la reconstrucción de la ciudad de Chicago, surgió la oportunidad de replantear el diseño y la construcción de un nuevo entorno urbano, teniendo al alcance los grandes avances tecnológicos derivados de la Segunda Revolución Industrial en la ingeniería de materiales de la construcción, para dar respuesta a las necesidades de la ciudad, convirtiéndola en una de las ciudades estadounidenses más importantes e influyentes. No obstante, para ello fue necesario ampliar los conocimientos de los materiales existentes, introduciendo otros nuevos materiales con las altas prestaciones geométricas y mecánicas que requerían las edificaciones en altura propuestas ^{[12][13][14][15]}.

De esta forma, se inició un nuevo estilo arquitectónico-constructivo en permanente expansión y evolución hasta la actualidad, como se trata a continuación, y que se desarrolla en cuatro periodos históricos o estilos significativos: el Periodo Funcional, el Periodo Ecléctico (Periodo Historicista), el Tercer Periodo (Estilo Internacional o Moderno) y el Cuarto Periodo (el Postmodernismo) ^{[14][16]}.

Como expone Binder ^[17], la historia de los rascacielos, se divide en tres importantes etapas o *booms* constructivos durante el siglo XX: la primera etapa finalizó en los años 30 (Periodo Funcional + Periodo Ecléctico), como se ha tratado anteriormente; la segunda se produce hasta los años 70 (Tercer Periodo: Estilo Internacional), la cual tiene como emblemas la ejecución del *World Trade Center* de Nueva York y la *Sears Towers* en Chicago construidos a principios de 1970, previo a la *Crisis del Petróleo* de 1973, y la tercera etapa, conocida como la era Icónica (Cuarto Periodo: el Postmodernismo), que se inició en los años 90 con la construcción de las *Petronas Towers* en Kuala Lumpur en 1998, y que se considera que perduró hasta el inicio de la crisis actual. De lo anteriormente expuesto se infiere

[11] Manterola Armisen, J. (1985). *La estructura resistente de los edificios altos*, p. 7.

[12] Albaric, M.; et al. (2012). *Torres i gratacels. De Babel a Dubai*, p. 93.

[13] Ali, M.M.; Moon, K.S. (2007). *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, p. 206.

[14] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 62-74.

[15] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, p. 1.

[16] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, p. 14.

[17] Binder, G. (2008). *The "International" Skyscraper: Observations*, p. 2.

que las épocas constructivas fundamentalmente finalizan con el inicio de las grandes crisis mundiales, aspecto que aborda con profundidad Lawrence ^[18], como se ha mostrado en la introducción de la presente Tesis.

4.2.1 El Periodo Funcional

Como indica Gómez ^[19], el rascacielos funcional propio de este primer periodo, que el ingeniero **David Bennet** (-) establece de forma estimatoria entre los años 1880 y 1900, responde a una cuestión básicamente económica para dar respuesta a las necesidades de la sociedad norteamericana con un alto índice de población, que **Ada Louise Huxtable** (1921-2013) define y expone de la siguiente manera:

“El banquero inversor era el mecenas, y la eficacia, desde el punto de vista del coste, era la musa. El diseño formaba parte de la ecuación empresarial, y el estilo era tan sólo un aspecto secundario, que estaba supeditado a los factores primordiales de la inversión y el uso.

Los sistemas estructurales que entonces se idearon eran sencillos y repetibles. Las consideraciones estéticas eran una función subordinada de la creciente importancia de la rentabilidad del suelo, fomentada por los avances de la siderurgia, la construcción de las estructuras y los servicios mecánicos. A nadie le importaba, más allá de la obvia identificación del beneficio con el prestigio, dejar huella o construir símbolos visuales, y menos aún dar con una solución estilística para un nuevo tipo constructivo. Las prioridades de los hombres que levantaron estos edificios eran la economía, la eficiencia, el tamaño y la rapidez.”

[Huxtable 1988, 23 y 24].

Por lo tanto, atendiendo a Ali y Moon ^[20], así como a Cámara, Compán y Sánchez ^[21], es en la segunda mitad del siglo XIX y principios del siglo XX cuando surge la tendencia de los edificios altos en Estados Unidos de América, dando lugar a las primeras construcciones constituyendo, así, el «Estilo de Edificación Americana», (*The American Building Type*), para denominar el desarrollo de esta nueva tendencia constructiva-tipológica de edificios en altura. Esta tendencia responde a una clara intención en busca de mayores prestaciones esencialmente económicas: rentabilizar la zona o paquete de suelo apilando en vertical oficinas dotadas de una mayor eficiencia lumínica. Esta posibilidad, conforme a la luz natural, era posible gracias a la aparición de nuevos materiales para la construcción de edificios menos pesados, como son el hierro/acero y el vidrio, que fueron substituyendo la pesada y opaca construcción con muros de fábrica como elemento resistente dando paso a nuevos conceptos de revestimiento, por ejemplo el muro cortina, y nuevos sistemas estructurales, como se tratará posteriormente.

Entre 1884 y 1885 se construyó en Chicago el que se conoce, desde un punto de vista propiamente histórico, como el primer rascacielos del mundo, ejecutado íntegramente con estructura metálica de pórticos semirrígidos, confeccionados con vigas y pilares de hierro y acero, sin la aportación resistente de las fachadas o cerramientos. El edificio de 10 plantas y 42 metros de altura conocido como el *Home Insurance Building*, mostrado en la figura 4.2-5, es obra de **William Le Baron Jenney** (1832-1907) quien se formó en la *École Polytechnique* de París. El edificio

[18] Lawrence, A. (2012). *Talking Tall: The Skyscrapers Index*, p. 42.

[19] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 62.

[20] Ali, M.M.; Moon, K.S. (2007). *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, pp. 205 y 206.

[21] Cámara, M.; Compán, V.; Sánchez, J. (2013). *El atrio como estrategia estructural en nuevos rascacielos que renuncian a la verticalidad: casos de estudio*, p. 422.

que se demolió el año 1931, fue el inicio del Periodo Funcional, siendo necesario un cambio en la tipología estructural de los edificios para alcanzar mayor altura, en base a tres innovaciones de orden técnico principales: la difusión de la electricidad, el invento del ascensor con autofrenado a cargo de **Elisha Otis** (1811-1861), en el año 1854, (perfeccionado de forma considerable por el propio Le Baron Jenney, y eléctrico en 1887), y la sustitución de la mampostería tradicional por la estructura metálica, como material resistente, obteniéndose estructuras más ligeras que permitían ejecutar edificios más altos, en gran parte gracias a los avances obtenidos en la resistencia de materiales frente al fuego pero también a las mejoras en la cimentación, sistemas de climatización e iluminación, así como en la fontanería. Todos estos aspectos fueron muy significativos en el ámbito de la construcción, íntimamente relacionados con el desarrollo de edificios en altura, ya que éstos no se podrían concebir sin los avances tecnológicos mencionados ^{[22][23][24][25][26]}.

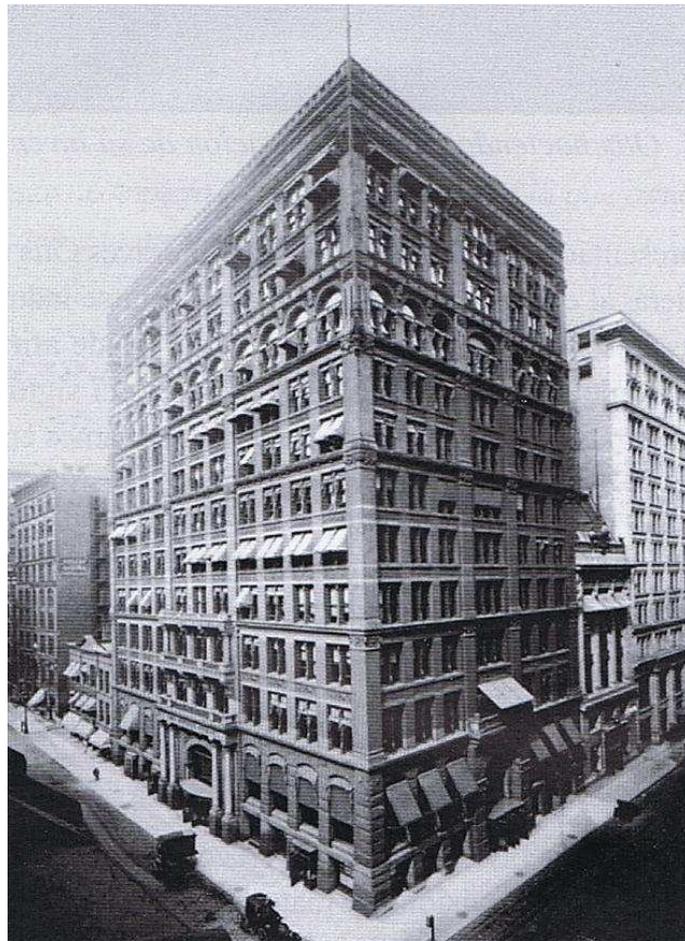


Figura 4.2-5. *The Home Insurance Building* de Chicago, 1885. (Imagen tomada [Gómez Hermoso et al. 2013, 26]).

El ascensor eléctrico dotado de autofrenado, que planteado en 1887 como una evolución de los primeros elevadores de Otis de 1854, fue idóneo para la comunicación y transporte vertical de personas, materiales y provisiones. Tomó especial

[22] Albaric, M.; et al. (2012). *Torres i gratacels. De Babel a Dubai*, p. 93.

[23] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, pp. 22 y 23.

[24] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 25, 26 y 63.

[25] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, p. 23.

[26] Larson, G.R. (2011). *William Le Baron Jenney: Developed Chicago's distinctive skyscrapers*, pp. 134 y 137.

relevancia ya que sin duda permitió llevar a cabo edificios de mayores alturas, dando lugar a la aparición, desarrollo y proliferación de la emblemática Arquitectura Moderna y el Estilo Internacional. Antes de su aparición, en ciudades como Chicago y Nueva York, la construcción de edificios tenían una altura habitual de cuatro y cinco plantas ^[27].

En cuanto al uso del hierro como material para la construcción de edificios en el siglo XIX, el cual ya se utilizaba ampliamente en la ejecución de puentes ferroviarios, como se ha expuesto en el primer capítulo, y posteriormente, el uso del acero, y del hormigón armado en el siglo XX, permitió despojar a las fachadas de la función estructural, como se tratará a continuación con mayor profundidad. De esta forma, se produjo una variación constructivo-estructural de suma relevancia, ya que los muros resistentes de fábrica para soportar las cargas de los forjados representaban una característica propia de la construcción tradicional de edificios. Este cambio en la tipología estructural se vio favorecido por el desarrollo de sistemas de producción y de transporte necesarios para la producción de hierro como un material de mayor calidad y prestaciones, altamente demandado en la Guerra Civil americana la cual tuvo lugar entre los años 1861 y 1865 ^[28]. Este nuevo concepto constructivo fue clave para la evolución de los edificios en altura, dando así una rápida respuesta a las necesidades sociales que requerían las grandes ciudades bajo un fuerte crecimiento edificatorio y económico como expone Ada Louise Huxtable:

“El rascacielos fue una respuesta al crecimiento de las ciudades y los negocios, y a la concentración de actividades comerciales que albergaban mucha gente en un suelo urbano cada vez más congestionado y caro. Su avance tecnológico más radical fue la estructura metálica y el muro cortina, de rápida ejecución. La fachada exterior, que ya no tenía función sustentante, podía revestirse en cualquier momento; ya no era necesario elevarla lenta y pesadamente desde el suelo. Este hecho despertó el interés científico y popular.”

[Huxtable 1988, 23].

En base a los avances tecnológicos que se han descrito, en la ciudad de Chicago a lo largo de este primer periodo se construyeron numerosos edificios en altura de estructura metálica, (inicialmente de fundición, después de hierro y finalmente de acero), de entre diez y quince plantas, los primeros a cargo del propio Le Baron Jenney, y posteriormente los diseñados por sus seguidores. Como indica Gómez ^[27], bajo los auspicios de Le Baron Jenney, se formaron otros arquitectos estadounidenses pioneros en el diseño de edificios en altura, creando el estilo que se conoció como la «Escuela de Chicago» con nombres tan relevantes en la historia de la arquitectura como fueron Louis Henry Sullivan (1856-1924), Daniel Hudson Burnham (1846-1912), William Holabird (1854-1923) o Martin Roche (1853-1927). La construcción de edificios altos se extendió con fuerza en otras ciudades con altos índices de población, como Boston, pero especialmente en Nueva York, entre cuyos primeros rascacielos destaca el *New York World Building*, también conocido como el Edificio Pulitzer, obra del arquitecto **Georges Browne Post** (1837-1913), que fue construido en 1890 y demolido en 1955, con un total de veinte plantas. En este sentido, el *Park Row Building* (1899), de treinta plantas (119 metros de altura), obra de **Robert Herrera Robertson** (1849-1919), se puede considerar el primer rascacielos “auténtico” atendiendo a los estándares modernos.

Estos primeros edificios en altura se caracterizaban por su funcionalidad, como indica el nombre del periodo que se les otorga, quedando el formalismo totalmente

[27] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 25, 63 y 279.

[28] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 23.

apartado de la concepción y diseño de los edificios por las cuestiones económicas que imperaban, como se ha expuesto al inicio del presente epígrafe. Esta tendencia arquitectónica la resumía y defendía de forma sucinta Sullivan al predicar de forma enérgica que “La forma debe seguir a la función”,^[29] (*Form follows function*), a lo que el arquitecto **John Wellborn Root** (1850-1891) de la firma Burnham & Root decía:

“[...] La estructura interna (distribución) de estos edificios ha llegado a ser tan vital, que debe imponer de forma absoluta al carácter general de las formas exteriores; y las necesidades comerciales y constructivas han llegado a ser tan imperativas, que todos los detalles arquitectónicos empleados en expresarlas, deben de ser modificados consecuentemente. Bajo estas condiciones estamos obligados a trabajar, de forma precisa, con objetivos precisos, empleándonos totalmente en el espíritu de la época de modo que podamos dar a su arquitectura la forma de arte.”

John Wellborn Root (1890), citado por [Gómez Hermoso et al. 2013, 64].

4.2.2 El Periodo Ecléctico (Periodo Historicista)

Como indican Ali y Moon^[30], Gómez^[31] y Huxtable^[32], en cuanto a la evolución de los edificios en altura, al Periodo Funcional desarrollado en parte en la ciudad de Chicago, le sucede el Periodo Ecléctico, que se gesta especialmente en la ciudad de Nueva York. Esta fase se inicia a principios del siglo XX y se extiende hasta la década de 1930 a 1940, cuando se produce la *Gran Depresión*, estimándose su evolución entre 1900 y finales de los años 30 coincidiendo con la construcción del *Rockefeller Center Building* (1932-1940). Este segundo periodo se caracteriza por el notable carácter historicista que adaptan los edificios en los aspectos formales, en gran parte, influenciados por la Exposición Mundial de Chicago en 1893, claramente marcada por la amalgama de estilos arquitectónicos clásicos, en base a los cánones y precedentes históricos característicos de la *École des Beaux Arts* de París, buscando en las fuentes académicas soluciones para el diseño de los rascacielos.

Es por ello por lo que las nuevas construcciones en altura, a diferencia del primer periodo, centran sus esfuerzos en el formalismo exterior. La construcción de los edificios ocupando la base de todo el solar y con un fuste más esbelto, que caracterizó las construcciones durante este segundo periodo, eran el reflejo de la columna griega académica. Incluso, se llegaron a proponer edificios con dicha forma, como ocurrió en el concurso para el *Chicago Tribune Building* (1922), en el cual el arquitecto **Adolf Loos** (1870-1933) propuso un edificio que remataba la coronación con un alero en forma de capitel, como se muestra en la figura 4.2-6a, junto con el proyecto ganador de 141 metros construido en 1925^[31].

Como se infiere del proyecto de Loos para el concurso para el *Chicago Tribune Building*, claramente esta etapa histórica de los edificios en altura adquiere una dimensión tal vez desmesurada desde el punto de vista del formalismo más puro, por parte de los arquitectos, empeñados en recuperar las formas clásicas, medievales y renacentistas. De esta forma, el estilo ecléctico es totalmente opuesto a la etapa anterior la cual, como se ha expuesto, estuvo influenciada de forma significativa por la implementación de los nuevos materiales, en busca de un estilo que se caracterizaba por su simplicidad formal y funcionalidad^[31].

[29] Moussavi, F. (2009). *The Function of Form*, p. 7.

[30] Ali, M.M.; Moon, K.S. (2007). *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, p. 206.

[31] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 64 y 65.

[32] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, pp. 14 y 26.

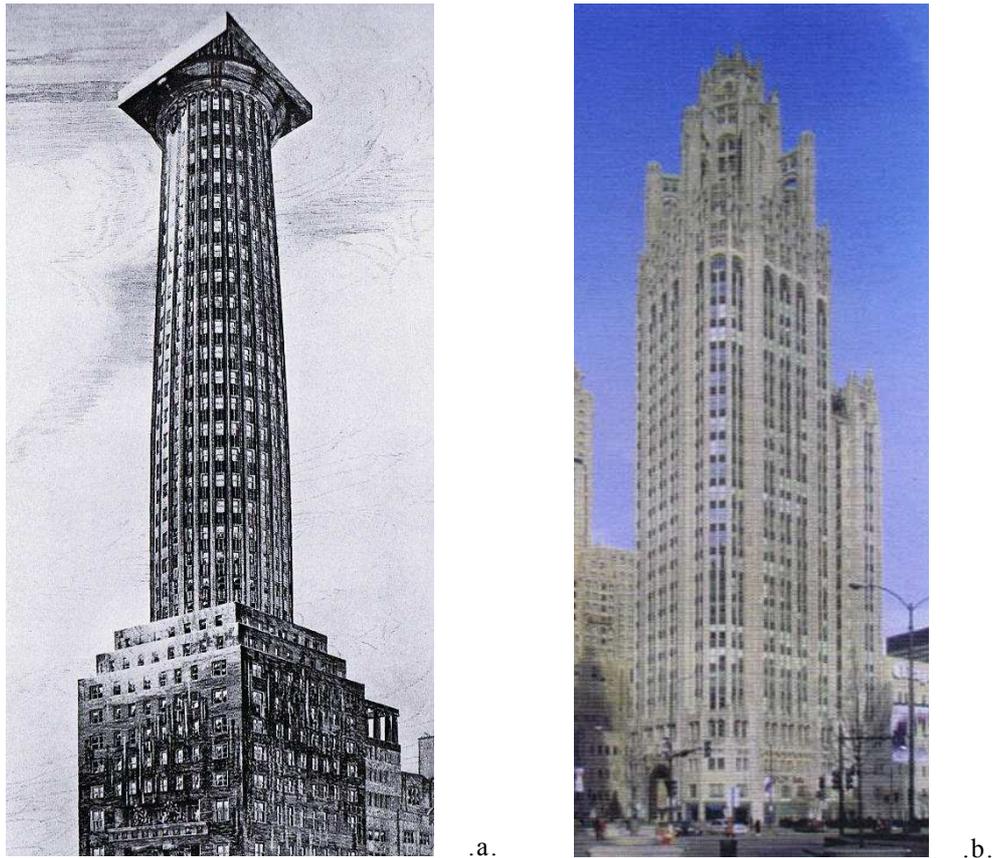


Figura 4.2-6. Proyectos del *Chicago Tribune Buiding* (1922): a) Propuesta de Adolf Loos, b) Proyecto ganador, obra de Howells & Hood. (Imágenes tomadas de [Albaric et al. 2012, 121] y [Gómez Hermoso et al. 2013, 65]).

Esta tendencia, marcada por la arquitectura historicista, la describe Ada Louise Huxtable consecuentemente:

“La fase ecléctica produjo algunos de los monumentos más notables de la historia de los rascacielos. Las incursiones en el pasado abarcaron desde lo banal hasta lo brillante: el gótico llegó a unas alturas como no lo había hecho nunca; se alzaron una y otra vez esbeltos templos griegos y «campaniles» italianos. Aparecieron palacios renacentistas a gran escala, castillos verticales y distintas versiones del Mausoleo de Halicarnaso. El tamaño y estilo de estos edificios los convertía en monumentos espectaculares y reconocibles, pero es su sofisticada erudición y soberbia calidad del detalle lo que les confiere un carácter único e irreproducible.

[...] A pesar de que la postura elitista los ha considerado, en el mejor de los casos, como excentricidades perdonables o, en el peor, como inmensos borrones sobre el paisaje de las alturas, estos edificios pasaron inmediatamente a tener un sitio en la historia de la arquitectura.

Para los modernos, la victoria académica siempre ha representado una derrota arquitectónica. En su opinión, el pecado capital de la fase ecléctica no fue tanto que no se buscara formas nuevas, lo cual era suficientemente malo, como que hiciera tanto hincapié en la tradición romántica y en lo ornamental.”

[Huxtable 1988, 26].

Sin duda, el cambio de estilo de los edificios en altura que se produjo a inicios del siglo XX no dejaba indiferente a nadie, ya fuera para bien o para mal, no tanto por la influencia historicista sino por los resultados arquitectónicos, como se despren-

de de la descripción que realiza Huxtable ^[33] acerca de esta etapa. Nueva York se convierte en el foco de atención arquitectónico, ya que es en esta ciudad donde la construcción de edificios altos se extendió con mayor fuerza, en parte gracias a edificios como el *Flatiron Building* (1902), de 87 metros construido por el arquitecto y urbanista Daniel Hudson Burnham (1846-1912), el *Singer Building* (1908), de Ernest Flagg (1857-1947), con un altura total de 186 metros, el *Metropolitan Life Insurance Tower* (1909) de 213 metros de altura, a cargo de Napoleon Eugene Charles Henry Lebrun (1821-1901) e hijos, o el *Woolworth Building* (1913) del arquitecto pionero Cass Gilbert (1859-1934), con una altura de 241 metros ^[34].

Además, coincidiendo con los últimos años del periodo ecléctico, después de la Exposición Internacional de las Artes Decorativas e Industriales Modernas que se celebró en 1925 en París, se promueve el Art Deco, un movimiento de diseño popular que se extendió e influyó a la arquitectura hasta 1939. La mezcla de estilos del Art Deco, (estilos europeos del pasado, de las culturas maya, azteca y china, influenciado por el cubismo), marcó de forma significativa algunos de los rascacielos más emblemáticos y carismáticos que se hayan construido: el *Chrysler Building*, (1930), de 319 metros de altura, el *Empire State Building* (1931) de 381 metros, los cuales se muestran en las figuras 4.2-7a,b, y el *Rockefeller Center Building* (1940) de 259 metros, convirtiendo Nueva York en una ciudad pionera en este tipo de construcción, dominando el escenario arquitectónico, el cual se conoce como el «Estilo Edificatorio Americano» ^[35].



.a.



.b.

Figura 4.2-7. a) *The Chrysler Building*, b) *The Empire State Building*, en Nueva York. (Imágenes propias, 2008).

[33] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, p. 26.

[34] Albaric, M.; et al. (2012). *Torres i gratacels. De Babel a Dubai*, p. 93.

[35] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 67.

La fase final de la construcción de estos emblemáticos edificios de la etapa ecléctica, coincidió con la crisis económica que se produjo por la *Gran Depresión* que se inició en 1929 en Estados Unidos, poniendo fin al primer *boom* de la construcción de los rascacielos. La crisis económica de los años 30 del siglo XX frenó de una forma contundente la construcción de nuevos edificios en altura, convirtiendo al *Empire State* en el edificio más alto del mundo durante 40 años. Es por ello, como indica Holmes ^[36], que este referente mundial y colosal edificio fue objeto de estudio por parte de distintos autores, entre los cuales destacan tres estudios por su relevancia: Coyle ^[37], Dryden y Hill ^[38], Rathbun ^[39], tratados posteriormente con detalle por **Alan G. Davenport** (1932-2009), en 1975 ^[40], considerando las cargas, los efectos dinámicos y la respuesta inducida por el viento en edificios y estructuras, como se infiere de su «Cadena de Carga de Viento» (*Wind Loading Chain*), la cual se representa en la figura 4.2-8.



Figura 4.2-8. «Cadena de Carga de Viento» de Davenport. (Notación adaptada de [Coulbourne 2011, 7]).

4.2.3 El Tercer Periodo (Estilo Internacional)

En realidad, estas últimas referencias arquitectónicas de los años 30 en Nueva York consideradas como algunos de los rascacielos más emblemáticos, estaban dando paso al «Estilo Modernista» más tradicional y conservador, fundiendo como indica Huxtable ^[41], “lo ornamental y lo exótico en lo que fue la última de las grandes artes decorativas”, estilo secundado por otros edificios de características similares como son el *McGrawHill Building*, en Nueva York en 1931, o el *Philadelphia Savings Fund Society Building*, en Filadelfia en 1930-31.

El Estilo Internacional estaba tomando forma, produciéndose una extensión estética entre el segundo y el tercer periodo histórico en la evolución formal y funcional de los edificios en altura en busca del estilo moderno, que en Europa se inició en la década de 1920 a 1930, bajo la influencia de los grandes avances industriales y tecnológicos que se estaban produciendo. El movimiento fue promovido por algunos de los arquitectos de la época, como fueron Mies van der Rohe, Le Corbusier, Walter Gropius, Jacobus Johannes Pieter Oud, Richard Neutra y Rudolf Schindler, entre otros, quienes no estaban de acuerdo con el eclecticismo creativo, como se ha expuesto anteriormente. Sin embargo, el cambio de estilo se introduce en Estados Unidos de forma paulatina y lenta, por las razones que expone Ada Louise Huxtable:

“Los rascacielos auténticos del primer estilo moderno, llamado Estilo Internacional, no fueron muchos; requerían clientes que tuvieran mucho dinero, valor y un sentido altamente desarrollado de la misión estética. En teoría, la combinación de forma y función encarnada en estos edificios trascendía el estilo; de hecho, el estilo era su producto más duradero. Un ejemplo notable es el edificio de la editorial *McGraw-Hill* de 1931, obra de Hood, Goldey y Fonilhoux en pleno Manhattan, mientras que

[36] Holmes, J.D. (2007). *Wind loading of structures*, p. 196.

[37] Coyle, D.C. (1931). *Measuring the behaviour of tall buildings*.

[38] Dryden, H.L.; Hill, G.C. (1933). *Wind pressure on a model of the Empire State building*.

[39] Rathbun, J.C. (1940). *Wind forces on a tall building*.

[40] Davenport, A.G. (1975). *Perspectives on the full-scale measurements of wind effects*.

[41] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, p. 42.

el de la *Philadelphia Savings Fund Society*, construido por Howe y Lescaze en 1930-1931, es una auténtica obra de arte.”

[Huxtable 1988, 46].

Atendiendo a lo expuesto en la parte inicial del presente capítulo, el Estilo Internacional, también conocido como Estilo Racionalista, es el primer movimiento moderno que se introdujo de forma paulatina en el ámbito de la arquitectura caracterizado, como refiere Huxtable ^[42], por ser una obra austera, abstracta, elitista y vanguardista, bajo la influencia de tres arquitectos y diseñadores, Gropius, Le Corbusier y Mies van der Rohe, aunque fuera promovido por un numeroso grupo de arquitectos, anteriormente mencionados. Este último dirigió la Escuela de la *Bauhaus* desde el año 1930 hasta 1933, periodo en el cual se podría decir que se inicia el Estilo Internacional, como es ampliamente reconocido en este ámbito que el Tercer Periodo nace de los auspicios de dicha Escuela y se extiende hasta las década de 1970, cuando se produce la *Crisis del Petróleo* de 1973.

El mensaje que se quiso dar en esta etapa formal en la evolución de los edificios en altura, era muy claro: sencillez arquitectónica y estructural según las cuestiones de configuración de espacios, formales, de composición y estéticas del Movimiento Moderno. Estilo que el influyente crítico **Lewis Mumford** (1895-1990) definía en una publicación en el *Architectural Record* en 1928 como “la búsqueda de algo más”, (*The Search for Something More*), refiriéndose a la combinación entre “los nuevos procedimientos constructivos y la incorporación de un sentimiento nuevo”. Rompiendo, así, con el estilo de la arquitectura tradicional que se centraba en el eclecticismo creativo pensado para atender las necesidades funcionales de la época partiendo desde la distribución en planta de los edificios y ornamentando posteriormente el conjunto con los detalles superfluos ^{[42][43]}.

Como indican así mismo Gómez ^[44] y Huxtable ^[42], de esta forma, en total contraposición al estilo ecléctico, el Estilo Internacional o Racionalista, el cual describía de forma sucinta Mies van der Rohe: “Menos es más”, (*Less is more*), se convirtió en referente de los arquitectos vanguardistas de la época, quienes proyectaban en base a la repetición de planos rectos, simples y austeros de acero y vidrio, sin ningún tipo de ornamentación vacua. El estilo pragmático y eficaz, como una extensión natural de “la búsqueda de algo más” («estructura y sentimiento» de Mumford), daba respuesta con el uso de la tecnología a las necesidades económicas y del mercado de aquella época, con ciertos parecidos con la primera «Escuela de Chicago». Mies van der Rohe potenció este estilo mediante el elevado dominio que tenía de los materiales, a la vez que un cuidadoso tratamiento de los detalles y la ejecución, como se infiere de otro de sus lemas que le definían como arquitecto y diseñador industrial: «Dios está en los detalles», (*God is in the details*). Esta concepción de Mies van der Rohe está perfectamente definida por Huxtable ^[42]: “lo que aportó fue un simbolismo estructural como forma artística superior para una época tecnológica”.

El novedoso estilo, con Mies van der Rohe como máximo exponente, presentaba ciertas deficiencias técnicas importantes, y por ello no siempre tuvo una buena acogida, como el exceso de radiación solar que provocaba molestias a los usuarios de los edificios, a la vez que incrementaba el coste energético para climatizar las estancias. No obstante se quiso transmitir un mensaje optimista de este nuevo estilo, minimizando los aspectos negativos y carencias que no debían enmascarar ni

[42] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, pp. 39, 47, 48, 50 y 51.

[43] Franco Flores, E. (s.f.). *Teoría de la Arquitectura*, p. 5.

[44] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 68.

despreciar la intención innovadora e inventiva que tantos beneficios, arquitectónicos y estructurales, aportaba este nuevo estilo. En este sentido cabe destacar la argumentación de Ada Louise Huxtable acerca de esta visión que, en la actualidad, se considera errónea:

“No obstante, despreciar los logros del movimiento moderno, con sus fallos, sería como rechazar las obras de Shakespeare por sus versiones expurgadas y sus malas representaciones. No se pueden menospreciar ni el dinamismo exploratorio ni la expansión definitiva de los límites conceptuales y estéticos que caracterizan este periodo. El movimiento moderno tendrá también sus historiadores revisionistas.”

[Huxtable 1988, 46].

A pesar de que en una primera instancia, la forma del edificio no fuera el elemento esencial, en verdad, parte de su relevancia reside en ésta. Después de que Le Corbusier muriera el año 1965, el escritor británico y crítico de arquitectura, **Reyner Banham** (1922-1988), definió y recordó la significativa figura de Le Corbusier en el obituario que publicó en la revista *The Architectural Review*, como el “último generador de formas” (*The Last Formgiver*). A pesar de que Mies van der Rohe lo contradijera, al exponer que “la forma no es el objetivo de nuestro trabajo”, como reproduce Dunster^[45], en referencia al estilo arquitectónico moderno que habían llevado a cabo. El mismo autor afirma que en 1969 murió el “último gran inventor de formas” de la actualidad, refiriéndose a Mies van der Rohe. No obstante, más allá de la forma y la función, en realidad fue el estilo el aspecto que trascendió y perduró, siendo éste el producto más duradero^[46].

Los seguidores del Estilo Internacional fueron muchos, pero quizás los descendientes más destacados fueron los arquitectos e ingenieros del estudio **SOM** (Louis Skidmore (1897-1962), Nathaniel Alexander Owings (1911-1983) y John Ogden Merrill (1896-1975)), que siguieron la estética y el estilo Mies van der Rohe. La firma SOM abordó el diseño de edificios en altura de «estilo moderno pleno⁴⁷», en base a los criterios de calidad y coherencia. Lo consiguieron en parte, mediante la relevante aportación en el diseño de sistemas estructurales propuestos y desarrollados por el ya mencionado arquitecto y diseñador Myron Goldsmith, pero sobre todo por el trabajo del ingeniero estructural Fazlur Khan, como se tratará posteriormente^{[46][48]}.

Fue gracias a todos ellos que el Estilo Moderno dio lugar en su fase final, entre los años 1960 y 1975, a impresionantes edificios de arquitectura *High-Tech* representada por edificios tan emblemáticos como son el *John Hancock Center* (1969), de 344 metros de altura, y la *Sears Tower* (1970-1974), de 442 metros. Edificios construidos en Chicago, los cuales se muestran en las figuras 4.2-9ab, fueron obra del arquitecto **Bruce Graham** (1925-2010) y del ingeniero Fazlur Khan.

Ambos edificios se caracterizan por sus innovadores sistemas estructurales que permitieron alcanzar grandes alturas. En concreto, la *Sears Tower*, fue el edificio más alto durante 20 años, hasta la construcción de las *Petronas Towers* en Malasia (452 metros), superando incluso a las Torres Gemelas (1966-1975) del *World Trade Center* de Nueva York, de 415 y 417 metros de altura, del arquitecto estadounidense **Minoru Yamasaki** (1912-1986).

[45] Dunster, D. (2011). *Ludwig Mies van der Rohe: The last great inventor of form*, 184.

[46] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, pp. 47 y 50.

47 El «estilo moderno pleno» se describe para referirse a aquellas obras maestras modernas, [Huxtable 1988, 48].

[48] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 70.

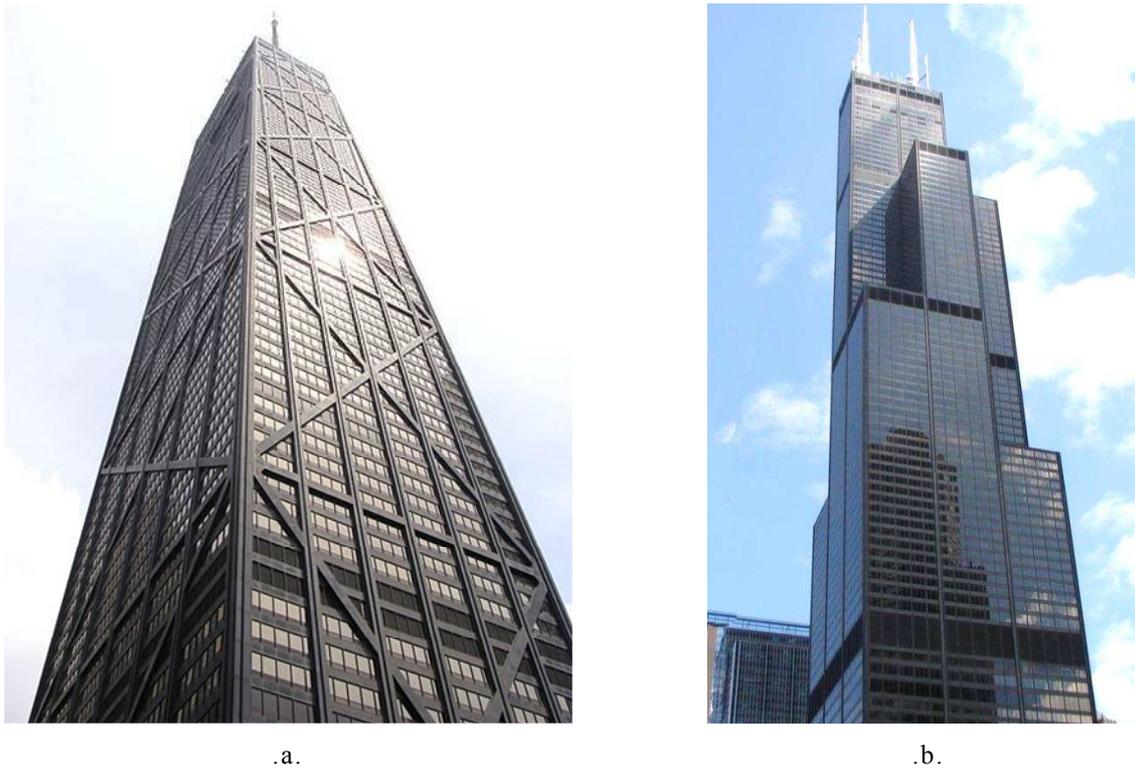


Figura 4.2-9. a) *The John Hancock Center*, b) *The Sears Tower*, en Chicago, obras de Graham y Khan. (Imágenes propias, 2008).

4.2.4 El Cuarto Periodo (el Postmodernismo)

El Estilo Postmodernista en la evolución de los edificios en altura surgió una vez superada la crisis de los años setenta del siglo XX. Implica un cambio radical del estilo arquitectónico que rompe con las rígidas limitaciones de los principios del estilo moderno en busca de nuevas formas y geometrías por parte de los arquitectos en una etapa de expansión y globalización^[49]. Este cambio de estilo lo describe de la siguiente manera Ada Louise Huxtable:

“(En la etapa posterior al Modernismo), el sagrado lema de que la forma seguía a la función estaba dando paso a una investigación de la forma por la forma. La estructura se convirtió en escultura; a veces edificios enteros se transformaban en objetos escultóricos o decorativos. [...] El rascacielos moderno, antes fiel a la simplicidad euclidiana, comenzó a mostrar una geometría mucho más compleja. Se invirtieron silenciosamente las normas de la relación racional de causa-efecto, y la estructura se convirtió en una herramienta para crear resultados abstractos, idiosincrásicos y arbitrarios. La función seguía a la forma. El menos se convirtió en mucho más. Los caminos que exploraban iban desde musculosas contorsiones hasta sofisticados experimentos con los que buscaba ampliar o explotar las relaciones tradicionales entre la función y la forma.”

[Huxtable 1988, 56].

Por lo tanto se produjo un cambio de estilo, destacando que en la etapa de transición sobresalieron los edificios que seguían la línea de la «estructura y el sentimiento» de Mumford, conjugado con los criterios «científicos» y «estéticos» del estilo moderno. Esta amalgama de estilos se refleja en los edificios del reconocido

[49] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 71.

innovador y vanguardista **Philip Johnson** (1906-2005), proyectados junto con **John Burgee** (1933-), que encabezan el eclecticismo postmoderno inspirándose en las formas historicistas para dar paso a formas totalmente vanguardistas. Algunas de estas construcciones son la *IDS Tower* en Minneapolis (1968-1973), o el *Pennzoil Building* en Houston (1976), caracterizados por la fusión entre la forma exterior y el interior, antes de dar paso a un estilo sin limitaciones, cuyos resultados geométricos se caracterizan por su complejidad. Uno de los primeros edificios de este nuevo estilo arquitectónico es la torre curvada para la *Oversea-Chinese Banking Corporation* en Singapur (1976) de **leoh Ming Pei** (1917-), secundado con proyectos de **SOM** y **César Pelli** (1926-) en busca de nuevas formas, pero también de nuevos rascacielos de mayor altura que requieren de «superestructuras»^[50].

El estilo postmoderno se caracteriza por la búsqueda de nuevas formas exteriores sin trabas ni frenos, donde la importancia reside en el estilismo, quedando la funcionalidad y el resto de requerimientos en un plano secundario, incluso a veces como aspectos prácticamente irrelevantes. Como indica Huxtable^[50], “los postmodernos quieren recuperar todo lo que los modernos descartaron: historia, ornamentación, contexto, contraste, variedad, simbolismo, imágenes y metáfora”.

La principal dificultad de esta tendencia constructiva, la cual se caracteriza por estar todo permitido, reside en la complejidad formal que requiere de una tecnología *High-Tech* para dar respuesta a las necesidades constructivo-estructurales que conlleva este tipo edificatorio. Los pilares pierden, en ocasiones, su continuidad y las fachadas se componen de planos con distintas orientaciones, donde por lo general no va relacionado con la lógica y el racionalismo estructural que había propuesto el ingeniero Fazlur Khan unas décadas antes, ya que la verticalidad deja de ser el aspecto prioritario de estas nuevas construcciones. Algunas de estas construcciones se muestran en la figura 4.2-10, en la cual se aprecia la variedad de estilos arquitectónicos tan distintos como son el Banco de Hong Kong de Foster y Arup, el Banco de China de Pei o el lujoso hotel *Burj Al Arab* en Dubai^[51].

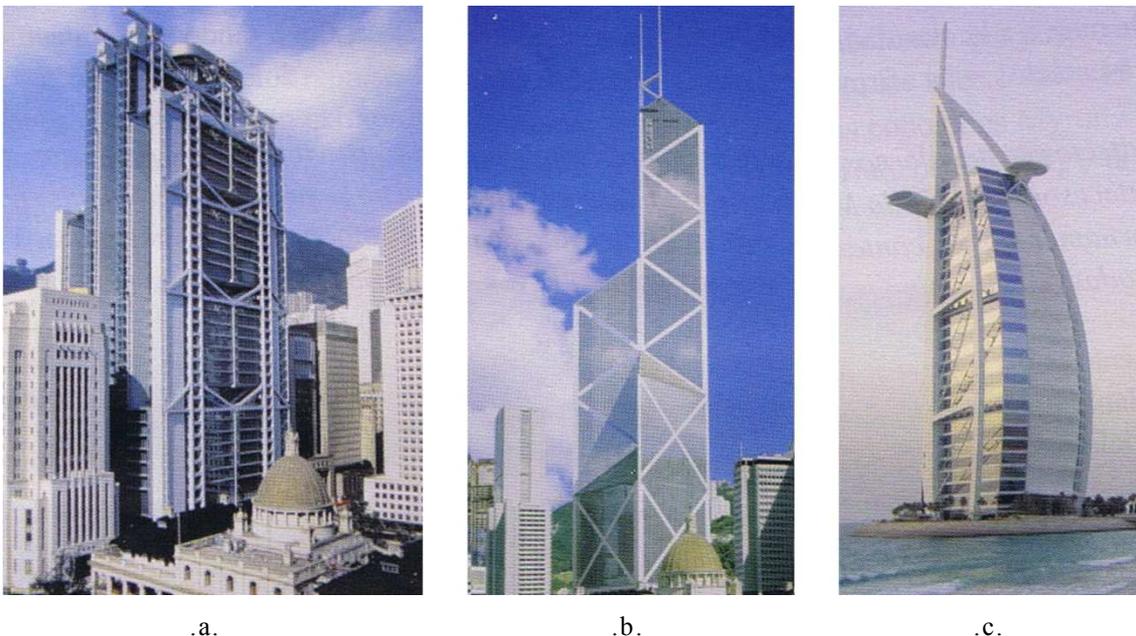


Figura 4.2-10. a) Banco de Hong Kong, b) Banco de China y c) Hotel *Burj Al Arab* en Dubai. (Imágenes tomadas de [Gómez Hermoso et al. 2013, 72].

[50] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, pp. 56, 57, 63 y 64.

[51] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 72 y 73.

Esta nueva etapa constructiva de edificios en altura ha dado lugar, en los últimos años, a distintos estilos arquitectónicos como son el nuevo eclecticismo encabezado por el mencionado Johnson, bajo una mirada nostálgica al pasado (incluso contradictoria con el nuevo estilo), en el cual destacan edificios tan singulares como el *PPG Building* en Pittsburgh (1979-1983), el *Republic Bank Center* (1980-1984) o la *Transco Tower* (1981-1983), ambos en Houston, o el edificio para la firma *E. F. Hutton* en Nueva York (empresa conjunta de la CBS y de Gerald D. *Hines Interests*).

No obstante cabe destacar que, a pesar del cambio de estilo tan radical y drástico que supuso el Estilo Postmodernista, y que ha dado lugar a los edificios escultóricos e icónicos de la actualidad, inicialmente hubo otros estilos más moderados que derivaron de esta cuarta etapa estilista, como es el estilo neomoderno. Esta corriente arquitectónica postmoderna se caracterizó, en parte, por intentar dar una línea continuista al movimiento moderno a la vez que introducía las nuevas tendencias en base a la abstracción formal de los edificios, conservando el sentimiento y el rigor. Algún ejemplo de esta tendencia constructiva continuista son la torre del Museo de Arte Moderno (1977-1984) o el Centro Comercial de *Battery Park City*, ambos en Nueva York ^[52].

4.2.5 La carrera por la construcción de los edificios de mayor altura

Como se ha tratado en los epígrafes anteriores, la experiencia americana para la construcción de edificios en altura de finales del siglo XIX, la cual se extendió a inicios del siglo XX, fue sin duda decisiva para la aparición y consolidación de los distintos estilos arquitectónicos, especialmente el movimiento moderno. La experiencia se centró principalmente en Chicago y Nueva York, pero también aunque a una escala menor en Boston, la cual recogió de forma puntual, como indican Ábalos y Herreros ^[53] el historiador suizo **Sigfried Giedion** (1888-1968) en su libro, *Espacio, tiempo y arquitectura: Origen y desarrollo de una nueva tradición* ^[54].

La nueva tendencia edificatoria, caracterizada por los conceptos de verticalidad y de esbeltez geométrica, dio respuesta a las cuestiones empresariales que estaban floreciendo en aquella productiva época (agrupación de trabajadores e imagen/símbolo de poder de la corporación), a la vez que se buscaba satisfacer el impulso y anhelo propio de la cultura humana por construir en altura, en busca del cielo en sus obras ya desde la Antigüedad, evidenciado con los numerosos antecedentes, ya referenciadas como por ejemplo la pirámide de Keops o el mito de la Torre de Babel ^{[55][56]}.

Por ello, es bien conocido que los edificios en altura se crearon en Chicago, pero se perfeccionaron en Nueva York, dominando la evolución histórica de esta tipología arquitectónica como se muestra en la figura 4.2-11, indicado en color azul los edificios más relevantes de la historia, construidos en la ciudad neoyorkina. Generando una tendencia constructiva que ha cambiado el entorno urbano de los últimos cien años, propiciando una imagen futurista, y convirtiéndose en un símbolo de modernidad a la vez que se retoma el estilo historicista de la *École des Beaux Arts* de

[52] Huxtable, A.L. (1988). *El rascacielos: La búsqueda de un estilo*, pp. 83 y 86.

[53] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, p. 17.

[54] Giedion, S. (1941). *Espacio, tiempo y arquitectura: Origen y desarrollo de una nueva tradición*. Texto traducido en 2009.

[55] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 22.

[56] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 31 y 43.

París, envolviendo los edificios en altura del estilo europeo, pero a la escala norteamericana ^[57].

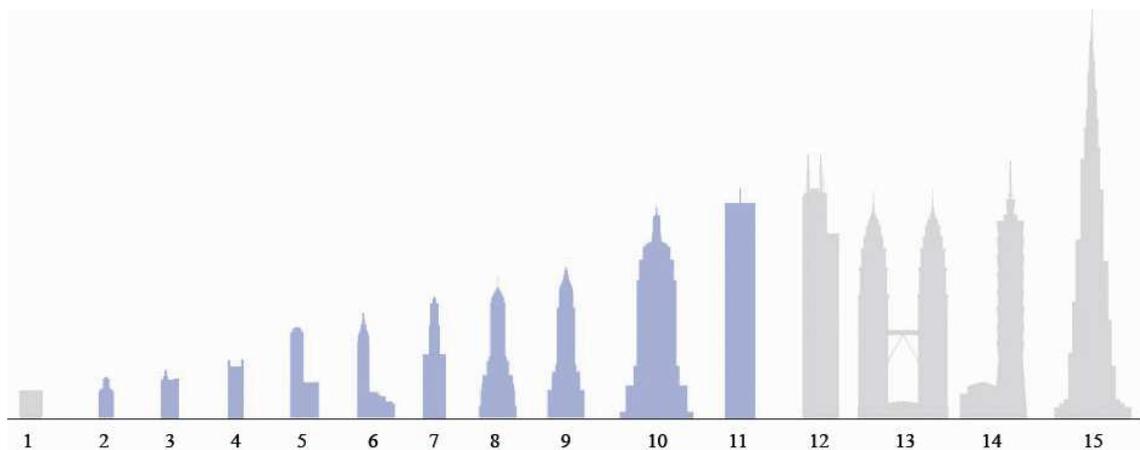


Figura 4.2-11. Evolución histórica de los edificios en altura de acuerdo a CTBUH. (Imagen tomada de [Hollister 2011/b, 1]).

Edificios de la figura 4.2-11. 1: *Home Insurance Building* (Chicago, 1885). 2: *World Building* (Nueva York, 1890). 3: *Manhattan Life Building* (Nueva York, 1894). 4: *Park Row Building* (Nueva York, 1899). 5: *Singer Building* (Nueva York, 1908). 6: *Metropolitan Life Tower* (Nueva York, 1909). 7: *Woolworth Building* (Nueva York, 1913). 8: *Bank of Manhattan Building* (Nueva York, 1930). 9: *Chrysler Building* (Nueva York, 1930). 10: *Empire State Building* (Nueva York, 1931). 11: *One World Trade Center* (Nueva York, 1972). 12: *Sears Tower* (Chicago, 1974). 13: *Petronas Towers 1&2* (Kuala Lumpur, 1998). 14: *Taipei 101* (Taipei, 2004). 15: *Burj Khalifa* (Dubai, 2010).

Desde entonces son muchos los edificios y torres que han buscado crecer en altura, como indica Ada Louise Huxtable, para la búsqueda de un estilo como símbolo de poder económico-administrativo y avance tecnológico, como se ha expuesto anteriormente, y que describe de la siguiente manera:

“Rascacielos y siglo XX son sinónimos; el edificio de gran altura es el sello de nuestra época. Como maravilla estructural que rompe los límites tradicionales de la persistente ambición humana de construir hasta los cielos, el rascacielos constituye el fenómeno arquitectónico más sorprendente de nuestro siglo. Es, sin duda, su presencia arquitectónica más abrumadora. Configurador de ciudades y fortunas, es el sueño, pretérito y presente, confeso o inconfeso, de casi todos los arquitectos. A partir de la Torre de Babel, las fantasías de los constructores han sido más verticales que horizontales.

[...] El rascacielos es una celebración de la tecnología constructiva moderna. Pero también es el producto de la calificación del suelo y de las leyes fiscales, del mercado inmobiliario y del mercado del dinero, de las exigencias legales y de las de los clientes, de la energía y de la estética, de la política y de la especulación. Sin olvidar el hecho, de que se trata del mayor juego de inversión urbana. Con todo ello, y a menudo a pesar de ello, el rascacielos sigue siendo una forma artística.”

[Huxtable 1988, 7 y 8].

La carrera por construir el edificio más alto, la cual se inició en Estados Unidos, como se ha visto anteriormente, se ha convertido en todo un fenómeno mundial.

[57] Albaric, M.; et al. (2012). *Torres i gratacels. De Babel a Dubai*, p. 93.

Actualmente, los edificios en altura se construyen en todo el Mundo. Es oportuno destacar, especialmente, los países emergentes de Asia que buscan crecer en altura como símbolo de poder económico-administrativo y de avance tecnológico, como ocurre en China, Corea del Sur o Malasia, entre otros, marcando un claro cambio de tendencia constructiva de edificios en altura, en cuanto a su ubicación se refiere.

Como se desprende de las tablas 4.2-1 y 4.2-2, los países que conforman las nuevas potencias económicas superan claramente a Norte América y Europa en número de edificios en altura construidos, a diferencia de hace unas décadas donde Estados Unidos era el referente en número de edificios en altura, con Nueva York como la ciudad con un mayor número de rascacielos. En la actualidad, es la ciudad china de Shanghai la que ostenta el récord en cuanto al mayor número de edificios en altura construidos ^[58].

Región	Países	Porcentaje	No. Edificios
<u>Norte América</u>	4	48,9	1.701
<u>Europa</u>	35	21,3	742
<u>Asia</u>	35	20,2	702
Sud América	13	5,2	181
Australia	2	1,6	54
Oriente Medio	15	1,5	51
África	41	1,3	47
TOTAL	165	100	3.478

Tabla 4.2-1. Edificios en altura por regiones en el año 1982. (Tabla tomada de [Ali et al. 2007, 205]).

Región	Países	Porcentaje	No. Edificios
<u>Asia</u>	20	32,2	35.016
<u>Norte América</u>	18	23,9	26.053
<u>Europa</u>	20	23,7	25.809
Sud América	10	16,6	18.129
Oceanía	7	2,6	2.839
África	20	1,0	1.078
TOTAL	95	100	108.924

Tabla 4.2-2. Edificios en altura por regiones en el año 2006. (Tabla tomada de [Ali et al. 2007, 206]).

En la figura 4.2-12, se muestran los veinte edificios más altos del mundo previstos para el 2020, y su ubicación, los cuales son un claro reflejo de esta idea y cambio de tendencia con el continente asiático al frente, donde se aprecia el edificio más alto del mundo construido hasta la fecha: el *Burj Khalifa* en Dubai, con una altura superior a los 800 metros, en concreto, 828 m, encabezando la lista de los «edificios Mega-altos» (*Megatall Buildings*), con una altura de coronación superior a los 600 metros.

[58] Ali, M.M.; Moon, K.S. (2007). *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, p. 205.

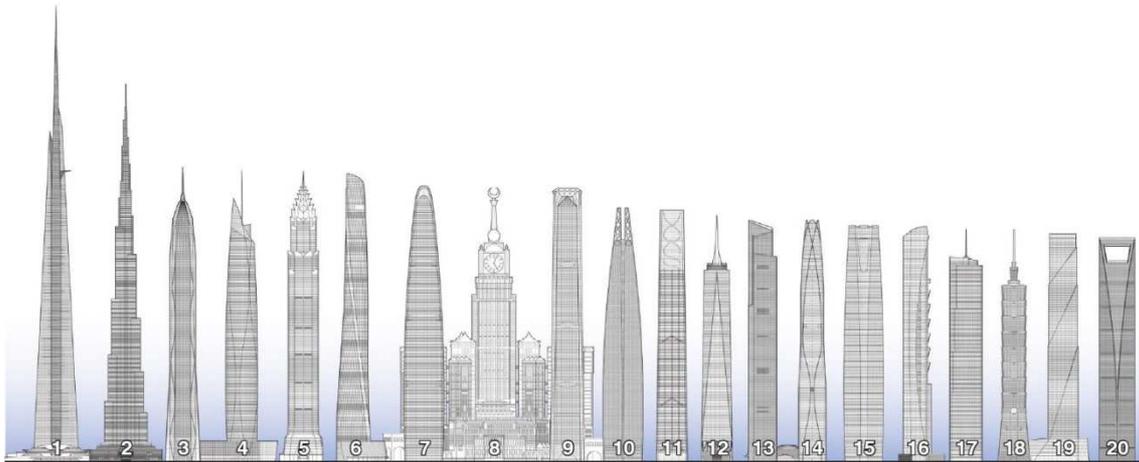


Figura 4.2-12. Los veinte edificios más altos del mundo cuya construcción está prevista para el año 2020. (Imagen tomada de [Hollister 2011/a, 7]).

Edificios de la figura 4.2-12. 1: *Kingdom Tower* (Arabia Saudí, 1000m). 2: *Burj Khalifa* (EUA, 828 m). 3: *Ping An Finance Center* (China, 660 m). 4: *Seoul Light DMC Tower* (Corea del Sud, 640 m). 5: *Signature Tower Jakarta* (Indonesia, 638 m). 6: *Shanghai Tower* (China, 632 m). 7: *Wuhan Greenland Center* (China, 606 m). 8: *Makkah Royal Clock Tower Hotel* (Arabia Saudí, 601 m). 9: *Goldin Finance 117* (China, 597 m). 10: *Lotte World Tower* (Corea del Sur, 555 m). 11: *Doha Convention Center and Tower* (Qatar, 551 m). 12: *One World Trade Center* (EE.UU., 541 m). 13: *The CTF Guangzhou* (China, 530 m). 14: *Tianjin Chow Tai Fook Binhai Center* (China, 530 m), 15: *Dalian Greenkand Center* (China, 518 m). 16: *Pentominium* (EAU, 516 m). 17: *Busan Lotte Town Tower* (Corea del Sur, 510 m). 18: *Taipei 101* (Taiwan 508 m). 19: *Kaisa Feng Long Center* (China, 500 m). 20: *Shanghai World Financial Center* (China, 492 m).

En la figura 4.2-13, se muestra la fase constructiva en la cual se encuentran los veinte edificios más altos del Mundo, anteriormente mencionados, cuya construcción está prevista que finalice antes del año 2020. En este contexto es oportuno destacar el cambio de ciclo en cuanto a la ubicación de los rascacielos más altos, la mayoría de los cuales se ubican en países asiáticos, con China al frente de forma destacada, secundando la tendencia preponderante mencionada previamente. Sólo uno de los veinte edificios más altos del mundo, actualmente en construcción, estará en Estados Unidos de América alrededor del año 2020, como se desprende de la figura 4.2-14.

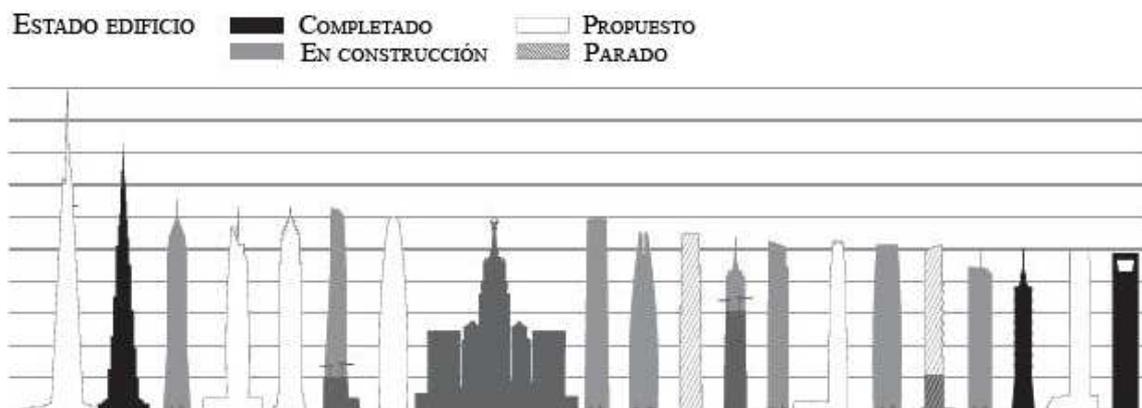


Figura 4.2-13. Fase constructiva de los veinte edificios más altos del mundo en el 2020. (Imagen tomada de [Hollister 2011/a, 7]).

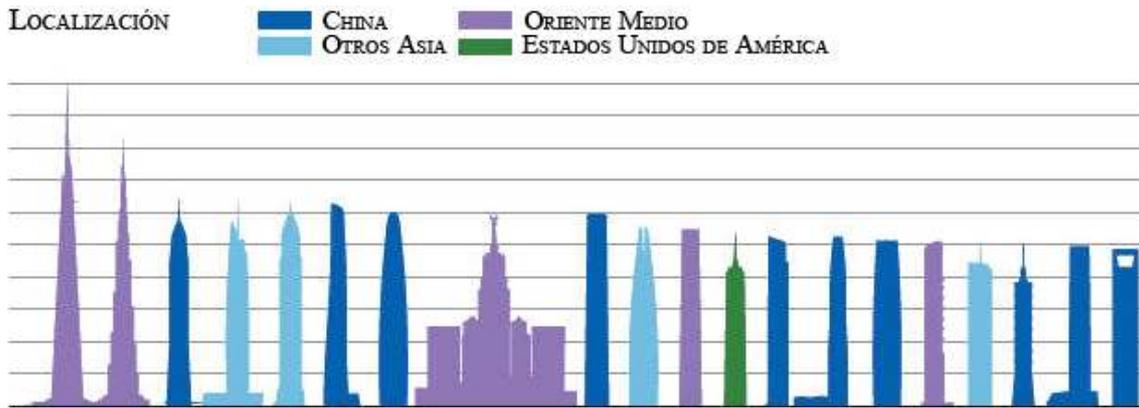


Figura 4.2-14. Localización de los veinte edificios más altos del mundo en el 2020. (Imagen tomada de [Hollister 2011/a, 7]).

Dadas las alturas que se proponen alcanzar, la evolución estructural de los edificios en altura está en constante evolución para afrontar las elevadas prestaciones que requieren este tipo de edificios tan singulares. Por ello, son muchos los estudios sobre las tipologías estructurales de este tipo edificatorio, como por ejemplo, los realizados por el estudio SOM, especialmente durante el periodo de tiempo comprendido entre los años 1953 y 1970, en parte por el trabajo llevado a cabo por Myron Goldsmith en colaboración con Fazlur Khan, así como sobre la adaptación de cada modelo para su adecuación en base a su altura, cuya evolución se aborda en el siguiente epígrafe.

De acuerdo a esta línea evolutiva, en la parte final del presente capítulo se tratará el estudio para mejorar la eficiencia estructural de los edificios en altura desde el **diseño formal** y la **concepción estructural**, secundando la relevancia de la temática que es objeto de estudio del presente trabajo de investigación.

4.3 Evolución estructural de los edificios en altura contemporáneos

La construcción de edificios en altura, cada vez más altos, se debe a muchos factores como son el avance en los métodos de cálculo, la mejora y comprensión de las características de los materiales y de su puesta en obra (especialmente el hormigón y su bombeo), así como el importante avance en los medios auxiliares de obra (encofrados, grúas, etc.), pero sobretodo, la evolución de los edificios en altura ha ido íntimamente relacionada con la creación de nuevas tipologías y esquemas estructurales en base a los puntos previamente descritos, cuya evolución se aborda exhaustivamente en este epígrafe ^[1].

La influencia del modelo tipológico que confeccionaba el rascacielos americano fue recibida y reelaborada por arquitectos como Mies van der Rohe y Le Corbusier, que permitieron materializar las técnicas y la tecnología industrial para obtener y tecnificar modelos arquitectónicos significativos con un Estilo Internacional totalmente modernista. De esta forma se adquirió la idea del Positivismo² en la Arquitectura, que influyó en los arquitectos de finales del siglo XIX e inicios del siglo XX, cambiando el rumbo de la cultura europea en base a la aparición de nuevas ciencias experimentales para dar respuesta a lo desconocido, pero que no confluyó con el estilo y características constructivas americanas hasta principios del siglo XX, estableciendo “una conexión entre conocimiento científico, sistemas productivos industrializados y conformación tipológica”, en acepción a Iñaki Ábalos Vázquez y Juan Herreros Guerra, que añaden la siguiente reflexión:

“El rascacielos alcanzaba así un estatuto de perfección, de cristalización de la unión entre la industria e ideación, y el trabajo sobre él se convirtió en algo trascendente. El rascacielos se percibe como el instrumento que traduce la tecnología industrial en construcción arquitectónica: “objeto-tipo” en el que desaparece la dicotomía entre lo mecánico y lo espiritual, capaz por lo tanto de aportar leyes generalizadas y extensibles a toda la actividad del arquitecto.

[...] La asimilación de la arquitectura a una técnica industrial permitió individualizar aquellos caracteres evolutivos que marcaban el hecho diferencial de la arquitectura de principios de siglo, ya presente en la actividad de los ingenieros civiles a lo largo del siglo XIX. Los nuevos instrumentos de trabajo aportaban a los arquitectos una condición de contemporaneidad que ponía en primer plano el contenido técnico y simbólico del rascacielos como objeto de análisis e ideación.

[...] El rascacielos se convierte así en lugar puro de reflexión arquitectónica, laboratorio en el que individualizar y desde el que extrapolar los nuevos principios de la ciudad industrial y sus tipos edificatorios.”

[Ábalos Vázquez et al. 2000, 18].

De acuerdo a la cita anterior, se desprende que la tecnificación proporcionada desde el ámbito industrial al nuevo modelo tipológico, proporcionó un nuevo estilo edificatorio y de ciudad contemporánea, con la intención de substituir la histórica, tradicional y cotidiana construcción realizada hasta entonces con pesados muros de carga estructurales. El principal inconveniente de esta tipología estructural era, no tanto en aspectos de resistencia y seguridad sino que, especialmente por cuestiones de estabilidad, aspecto relacionado con las esbelteces geométricas de los edificios.

[1] Burón Maestro, M.; et al. (2008). *Construcción de edificios altos*, p. 24.

² Pensamiento desarrollado por Auguste Comte (1798-1857) que tiene como base fundamental la Ciencia al plantear que todos los fenómenos está sometidos a las leyes naturales invariables, [Ábalos Vázquez 2001, 70]. Esta filosofía influyó, entre otros ámbitos, en la Arquitectura, “alentando ideas positivas para buscar solución a las problemáticas recientes que azotan a las nuevas ciudades, que buscan la manera de satisfacer las exigencias de las poblaciones urbanas en aumento, junto con las necesidades de habitabilidad definidas por la nueva era industrial”, [Franco Flores s.f., 7].

Por lo tanto, el uso de muros portantes tenían unas carencias constructivo-estructurales que limitaban la altura máxima de los edificios. De acuerdo a las reglas del *Código de la Construcción* de Nueva York en 1892, para el diseño de muros de carga y divisorios, la altura máxima se recomendaba limitarla a veinte plantas. En la figura 4.3-1, se aprecia las reglas de diseños para la construcción de muros de carga en Nueva York en 1892.

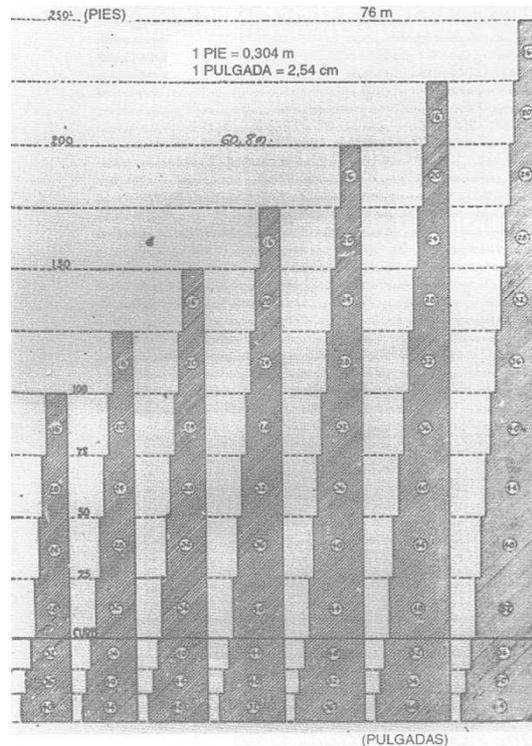


Figura 4.3-1. Reglas de diseño recomendadas para la construcción de muros de carga en Nueva York en 1892. (Imagen tomada de [Gómez Hermoso et al. 2013, 84]).

Además de la limitación en altura o estructural, cabe destacar los otros aspectos negativos de la construcción tradicional como eran su lenta ejecución, la pérdida de superficie útil debido a sus amplios grosores o su elevado coste. Así pues, la idea vanguardista fue desarrollada de forma extensa por los mencionados arquitectos y diseñadores, Mies van der Rohe y Le Corbusier, entre otros, como **Auguste Perret** (1874-1954) que formuló la idea de las aisladas «ciudades-torre» reproducidas en el espacio, investigando la ciudad moderna desde el rascacielos buscaba, entre otras pretensiones, liberar la planta y las fachadas de los gruesos y pesados muros de carga. Este cambio constructivo fue posible gracias a la industrialización de los perfiles metálicos, inicialmente de fundición y hierro y finalmente de acero, así como la aparición del hormigón armado. Uno de los últimos rascacielos con muros estructurales fue el *Monadnock Building*, construido en Chicago en el año 1891^[3], obra del arquitecto **John Wellborn Root** (1850-1891).

En el caso de Le Corbusier, cabe destacar la aportación teórica acerca de los edificios en altura de acuerdo a tres tipologías edificatorias en las cuales confluyen la técnica, la matemática y la geometría: el rascacielos cruciforme (1920-1930), el rascacielos cartesiano (1930-1938) y el rascacielos lenticular (1938-1950), con una clara intención-sentido: “el rascacielos es la manifestación última del acuerdo po-

[3] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 84.

sitivista geométrico-mecánico capaz de suscitar las nuevas emociones del «objeto-tipo»^[4], a la vez que se autonomizan los edificios, entre sí, pensados como ciudades, de acuerdo a los nuevos productos industriales, que conlleva en sí un cambio de escala en cuanto a organización de la ciudad se refiere.

Toma especial relevancia el rascacielos cruciforme propuesto por Le Corbusier en base al concepto estructural de retícula, para liberar la planta generando un espacio isótropo, los sistemas de transporte verticales, el cerramiento de vidrio, la terraza-jardín, etc., permiten el objetivo principal: «ver lejos», es decir, profundizar las vistas a la vez que se aumenta la recepción de luz, como se esboza en la figura 4.3-2. Además, los rascacielos de Le Corbusier toman unas dimensiones en altura que coinciden con la del *Woolworth Building* de Nueva York, finalizado en 1913, y diseñado por **Cass Gilbert** (1859-1934), mientras que en anchura y disposición en cuatro brazos refleja la esencia de la Torre Eiffel de París (1889), reforzando el carácter contemporáneo^[4].

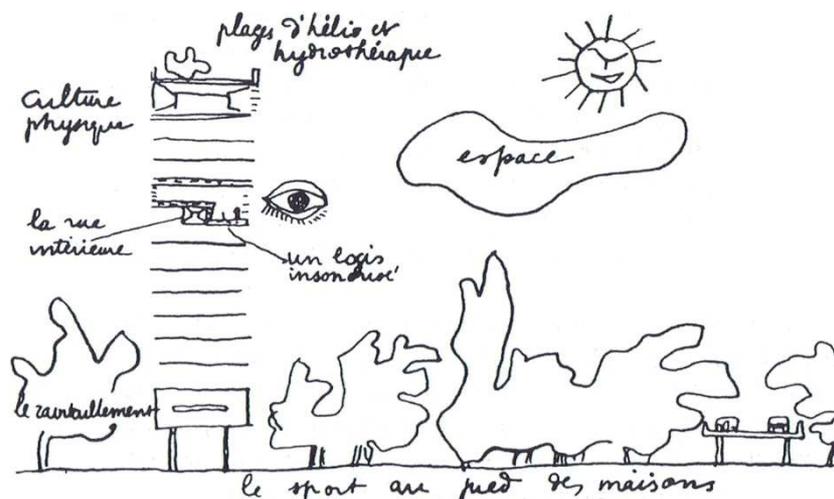


Figura 4.3-2. Concepto de «ver lejos» de Le Corbusier. Explicación de la *Unité d'Habitation*. (Imagen tomada de [Ábalos Vázquez et al. 2000, 31]).

No obstante, en los años 50 del siglo XX, se pone técnicamente en duda, desde un punto de vista teórico y práctico, la estructura reticular (entramado interior de pilares y vigas de acero), tan vinculada a la idea de rascacielos de Le Corbusier, dando paso a la aparición de nuevas tipologías estructurales para la construcción de edificios en altura, convirtiéndose “la sede de la ONU (1950) en un punto de inflexión en la concepción de la construcción en altura: en gran medida, el primer y el último rascacielos moderno”^[4].

Como se ha expuesto en el párrafo anterior, la estructura reticular entra en crisis en la década del 1950 a 1960, aun habiendo sido directamente relacionada con el concepto de construcción en altura y de espacio isótropo, y asumida por los arquitectos de la modernidad como un modelo internacional, independientemente de la escala y de la proporción de la construcción, tal y como describen de la siguiente manera Iñaki Ábalos Vázquez y Juan Herreros Guerra:

“Sin embargo, esta tipología estructural (retícula) entrará en crisis a partir de 1950 al ser consideradas las condiciones de equilibrio de un sólido vertical desde las perspectivas topológicas abiertas por la experimentación con estructuras espaciales

[4] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, pp. 19-21, 37.

y analizar los problemas de escala y proporción en el rascacielos. La primacía de las acciones horizontales da lugar a un programa de trabajo llevado a cabo en los años sesenta -reducir la penalización del viento- que dispone de nuevas disposiciones optimizadas de la masa estructural.

Este programa deriva en los setenta hacia dos aproximaciones a la estructura: concretar su masa según criterios de máxima inercia y rigidez, siguiendo una lógica de la excentricidad en la disposición estructural, y evitar el acceso de las acciones exteriores mediante mecanismos de amortiguación externos a la estructura portante, en un intento de disipar la energía basado en la experimentación con modelos aeroelásticos o con nuevos materiales. La forma, el cerramiento, las conexiones con la estructura pasan a colaborar en el equilibrio como subsistemas implicados.”

[Ábalos Vázquez et al. 2000, 45].

Se desprende de la anterior cita, que **la concepción de la retícula**, la cual estaba siendo ampliamente utilizada como tipología estructural íntimamente relacionada con los rascacielos, **entró en crisis** a partir de la década de 1950 a 1960. **Ello se debe a la pérdida de eficacia a partir de ciertas alturas y proporciones de la estructura reticular, debido a que la carga dominante es el viento frente a las cargas gravitatorias**, provocando un aumento del consumo del material estructural necesario para resistir dichas cargas como se deduce de la figura 4.3-3, que describe la relación exponencial entre el peso (kg) de acero/m² en función del número de plantas del edificio.

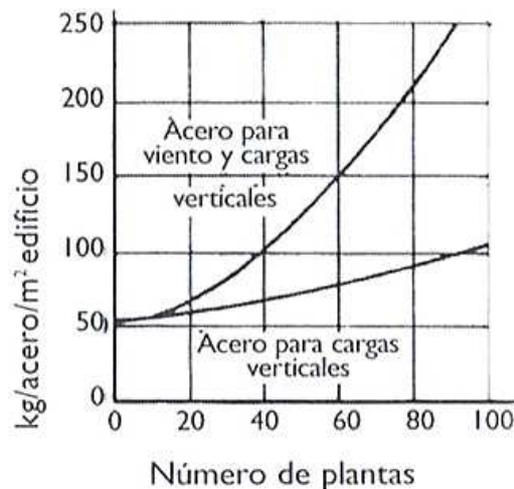


Figura 4.3-3. Consumo de material resistente (kg de acero/m² edificio) para edificación en altura según el tipo de carga actuante. (Imagen tomada de [Ábalos Vázquez et al. 2000, 50]).

Por lo tanto, como indican Ábalos y Herreros ^[5], **fue necesario buscar una tipología estructural o sistema más óptimo**, siendo necesaria la aportación de los conocimientos analíticos de la ingeniería civil, reforzando la idea positivista de la relación entre la arquitectura y los conocimientos científicos, los cuales no siempre estaban tan avanzados por la lenta evolución histórica de las hipótesis de cálculo, que debían dar respuesta al comportamiento estructural tridimensional propio de los edificios en altura, hasta el punto que en los primeros edificios altos de Le Baron Jenney de estructura reticular metálica no tenían en cuenta analíticamente la acción del viento, que era resistido por los muros de fábrica que conformaban los cerramientos, rigidizando así el conjunto.

[5] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, p. 50.

Este esquema elemental o simplificación estructural, el cual se muestra en la figura 4.3-4a, permitía calcular los distintos elementos de la estructura global de forma unidimensional e independiente, de acuerdo a los esfuerzos simples de flexión y de compresión, así como al esfuerzo de cortante, considerando los extremos de las vigas articulados. Debido a la necesidad de desmaterializar la fachada de los muros que obstruían o limitaban las vistas exteriores, fue necesario desvincular los cerramientos de fábrica de la función estructural por completo, siendo necesario, para ello, desplazar al núcleo central de comunicaciones verticales la función de rigidizar la estructura global ^[6]. La desvinculación del cerramiento de la función mecánica, la describió de la siguiente manera **Eugène-Emmanuel Viollet-le-Duc** (1814-1879):

“Un arquitecto práctico no concibe como antinatural la idea de levantar un gran edificio cuyo armazón fuera enteramente de acero y revestir ese armazón, preservándolo, mediante una envolvente de fábrica.”

[Viollet-le-Duc 1867, 1986, 133].

Así mismo, para una mayor estabilidad, se consideraron rígidas las uniones de los pórticos que conformaban las estructuras, resolviendo la complejidad en el cálculo de este tipo de uniones frente a las fuerzas horizontales, aislando la estructura en elementos estáticamente determinados, mediante la aceptación de juntas flexibles en los puntos de inflexión de su curvatura, como se representa esquemáticamente en la figura 4.3-4b, donde el momento flector de las barras era nulo, de acuerdo a Navier ^[6].

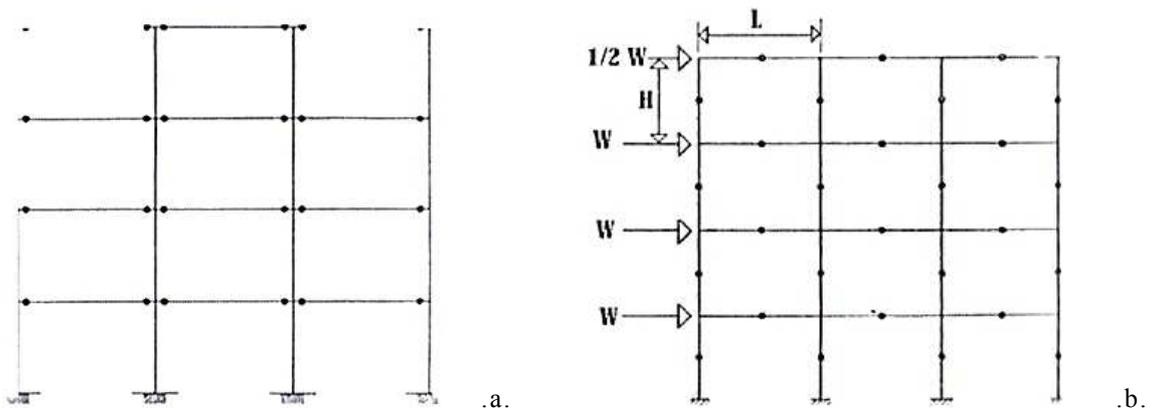


Figura 4.3-4. a) Hipótesis estructural elemental con barras independientes, b) Hipótesis estructural, para cargas horizontales, asumiendo juntas flexibles en los puntos de inflexión. (Imágenes tomadas de [Ábalos Vázquez et al. 2000, 50]).

La Teoría de las Estructuras de entramado como sistemas estáticamente determinadas, en base a lo expuesto de forma exhaustiva en el primer capítulo, fue ampliamente estudiada por A. F. Möbius (1790-1868), O. Mohr (1835-1918), N. E. Joukowski (1847-1921) o H. Müller-Breslau (1851-1925), entre otros, permitiendo aplicar métodos de análisis de otros ámbitos como el de la ingeniería civil para el desarrollo de proyectos con pórticos rígidos en la periferia, reproduciendo el efecto de rigidización del muro tradicional frente a las acciones del viento, siendo ejemplo de este planteamiento el *Masonic Temple* (1892), con cruces para la rigidización de los pórticos, el *Old Colony Building* (1893), con pórticos rígidos en la

^[6] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, pp. 50 y 51.

primera crujía, como se muestra en la figura 4.3-5, el *Woolworth Building* (1913) o el propio *Empire State* (1931), entre otros edificios en altura ^{[7][8][9]}.

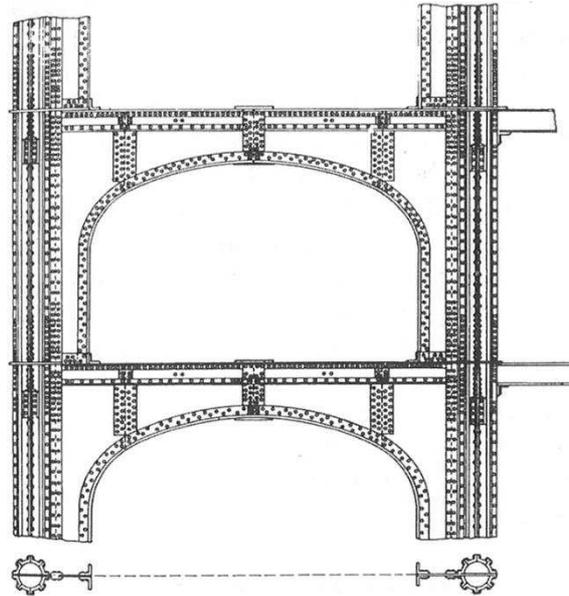


Figura 4.3-5. Pórtico rígido de la primera crujía del *Old Colony Building*, Chicago, 1893. (Imagen tomada de [Ábalos Vázquez et al. 2000, 51]).

Atendiendo a Ábalos y Herreros ^[7], esta nueva tipología estructural permitía liberar las fachadas de los muros tradicionales resolviendo la problemática derivada de las fuerzas horizontales que actuaban sobre los edificios. Aunque se construyeron edificios bastante más altos, esta tipología era eficiente hasta una altura de unas 40 plantas, siendo su rendimiento progresivamente menor para alturas superiores. La aparición del hormigón armado permitió resolver la cuestión de los nudos rígidos, pero el desconocimiento del comportamiento mecánico, y un análisis complejo, de este nuevo material suponía una limitación importante para su aplicación en edificios en altura, a pesar de las grandes aportaciones realizadas por **François Hennebique** (1842-1921), que había simplificado, en 1890, el reparto de esfuerzos mediante procedimientos empíricos, tabulando los resultados obtenidos.

Los conocimientos ampliamente estudiados y aplicados, de Hooke, Navier y Musschenbroek tratados en el primer capítulo, acerca de la Teoría de la Elasticidad, no fueron suficientes de forma inmediata en el análisis de estructuras bidimensionales repetitivas para su aplicación en edificios altos, siendo necesarias las aportaciones de ingenieros como Castigliano ^[10], Mohr ^[11], y especialmente por Cross ^[12], quien estableció un método analítico, en el cual consideraba el entramado de barras correspondiente a un piso aislado de la estructura vertical del edificio, como se aprecia en la figura 4.3-6, y que abordaba con cierto rigor y eficacia el cálculo a la vez que resolvía el problema de la rigidez, al considerar los efectos de las cargas laterales sobre la estructura. El método del ingeniero americano **Hardy Cross** (1885-1959) fue aceptado como válido, después de que se publicara una vez

[7] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, pp. 51 y 52.

[8] Condit, C.W. (1974). *The Wind Bracing of Buildings*, pp. 92-105.

[9] Timoshenko, S.P. (1953). *History of strength of materials*. Reimpreso en 1983, pp. 304-306.

[10] Castigliano, C.A.P. (1873). *Theorie des Gleichgewichtes elastischer Systeme und deren Anwendun.*

[11] Mohr, O. (1892). *Die Berechnung der Fachwerke mit starren Knotenverbindungen.*

[12] Cross, H. (1930). *Analysis of continuous frames by distributing fixed-end moments.*

finalizada la construcción del emblemático *Empire State Building* (1931), en Nueva York, hasta que fue reemplazado paulatinamente por el cálculo matricial, como consecuencia de la aparición de las computadoras y, en especial por su rápida evolución, que se materializó en el ordenador personal, revolucionando el análisis en general y el cálculo estructural en particular ^{[13][14]}.

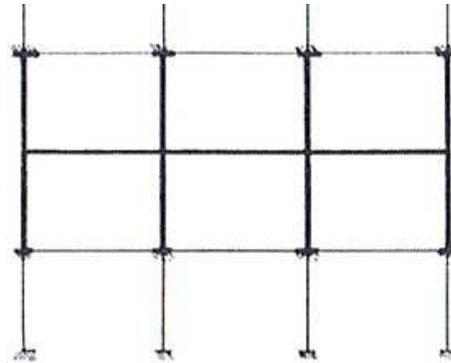


Figura 4.3-6. Pórtico rígido aislado del entramado vertical del edificio. (Imagen tomada de [Ábalos Vázquez et al. 2000, 52]).

De acuerdo con este planteamiento analítico inicial, previo al salto informático comentado, era posible resolver estructuras estáticamente indeterminadas. En 1922, **George Erie Beggs** (1883-1939) desarrolló el aparato *Deformeter*, que permitía medir experimentalmente (modelístico) los desplazamientos, de acuerdo con la Teoría de la Elasticidad, para obtener las reacciones. El primer proyecto en el cual se utilizó este instrumento fue el de los hangares de Orvieto de Pier Luigi Nervi (1891-1979) y Guido Oberti (1907-2003) en el año 1935. Posteriormente, esta metodología se aplicaría en edificios verticales a pesar de que su implementación no fue inmediata por no ser muy precisa. Ante la necesidad y el aumento de las construcciones en altura, se puso de relieve la necesidad de concebir las estructuras verticales tridimensionalmente, en base a la repetición. En este sentido destacan las aportaciones, sobre los rascacielos y sus formas de concepción, de autores como Richard Buckminster Fuller (1895-1983), Zygmunt Stanislaw Mackowski (1922-2005), Konrad Wachsmann (1901-1980) o Robert Le Ricolais (1894-1977), cuyos estudios se han tratado anteriormente ^[13].

La investigación de Le Ricolais le permitió establecer una estrecha vinculación con **Louis Kahn** (1091-1974) cuyos experimentos para el estudio de la concepción de edificios en altura fueron secundados por los trabajos de otros autores sobre tipologías estructurales en altura, como fueron William James Le Messurier (1926-2007), Ove Arup (1895-1988) o Peter Rice (1935-1992), entre otros investigadores.

Le Ricolais investigó con artefactos tridimensionales suspendidos en el espacio, configurados mediante organizaciones espaciales indeformables, que tenían distintas aplicaciones, especialmente, en el ámbito de la arquitectura para comprender las estructuras de los rascacielos, entendidas como voladizos empotrados en el suelo y sometidos a flexión, bajo la acción del viento. Su estudio le permitió abordar la **optimización de entramados espaciales desde una vertiente estructural (función) y formal**, que tuvo continuidad con las investigaciones de Mies van der Rohe y Pier Luigi Nervi, así como de Myron Goldsmith y Louis Kahn, este último junto con Anne Griswold Tyng (1920-2011) ^[13].

^[13] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, pp. 52, 53, 55 y 56.

^[14] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 28.

Los primeros trabajos y propuestas de edificios en altura de Mies van der Rohe y Le Corbusier se basaron principalmente en la retícula estructural o sistemas de entramado, caracterizándose por su sencillez y simplificación formal (normalmente un prisma de base rectangular), así como por su decoración externa. La evolución de esta tipología estructural, de cierta limitación en cuanto a altura se refiere, dió como resultado el diseño de la solución de fachada estructural conocida como tubo exterior, cuyo concepto se tratará posteriormente. En el caso de Le Corbusier destaca el tipo de edificios en altura previamente mencionados, como era el rascacielos lenticular que permite alojar los núcleos de comunicaciones, como por ejemplo en el edificio de Cap Le Marine, con una modulación de 6,25 metros, mientras que uno de los edificios más representativos de Mies van der Rohe, como es el *Seagram Building* en Nueva York dispone de una modulación geométrica en fachada de 8 metros ^[15].

Es de considerar que, en cuanto a los materiales utilizados para el diseño y construcción de las estructuras de sus proyectos, Mies van der Rohe optó por el estilo o tradición americana y utilizó, principalmente, estructuras de acero, mientras que Le Corbusier, influenciado por la escuela europea, caracterizó sus proyecto por el uso por lo general del hormigón armado, incluso en edificios en altura. En general, la estructura de acero permitía de acuerdo a su eficiencia un mayor número de plantas con una cantidad de material menor, en base a la mayor rigidez y resistencia del acero con respecto al hormigón armado. Esta mayor ligereza estructural, y por lo tanto menor masa, dotaba a los edificios desde un punto de vista sismorresistente de una mayor flexibilidad. En un pórtico de acero, conforme a la disminución de masa mencionada, el incremento de los periodos de vibración para pórticos es entre un 10 y un 15 por ciento mayores, a lo que cabe añadirle la mayor capacidad de amortiguación de la estructura de hormigón por fisuración ^[15].

Por lo tanto, ya fueran edificios con estructura de acero o de hormigón armado, fueron innumerables los edificios en altura que se proyectaron desde la concepción estructural. En el caso de Louis Kahn, quien siguió la estela de sus predecesores, destaca su proyecto de rascacielos de hormigón (1952-1957) compuesto por tetraedros, el cual se muestra en la figura 4.3-7.

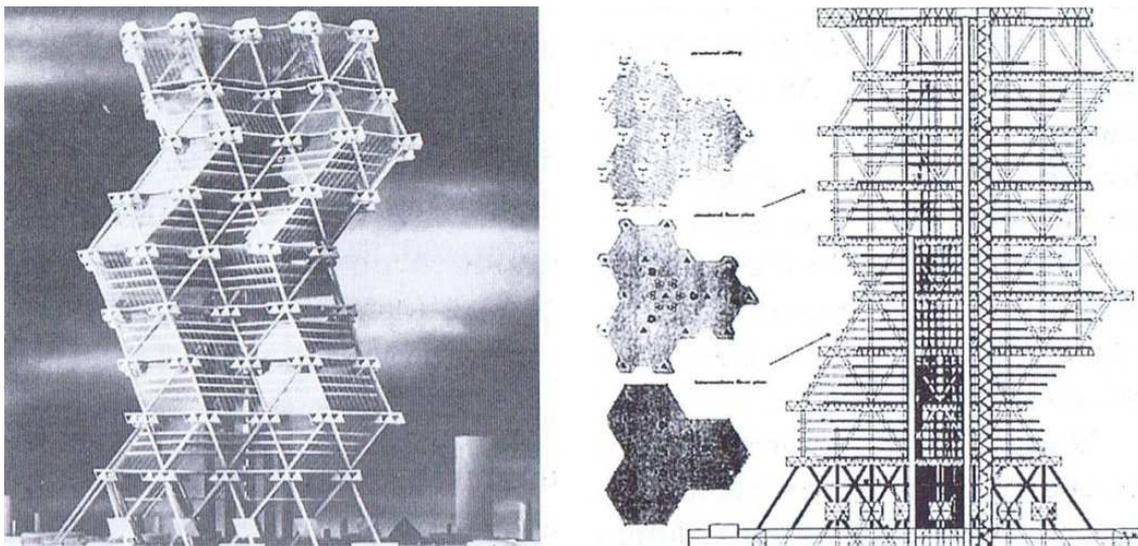


Figura 4.3-7. Rascacielos de hormigón de Kahn. (Imagen tomada de [Ábalos Vázquez et al. 2000, 57]).

^[15] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, pp. 35 y 36.

Louis Kahn y Tyng encontraron en la geometría espacial la solución para afrontar las deformaciones que sufrían los edificios en altura frente a las acciones laterales ^[16]. En cuanto al trabajo de Goldsmith, en relación a los tipos estructurales de edificios en altura, destaca su estudio acerca del principio de escala relacionado con la cuestión de la eficiencia, que se basa e inicia en la lectura de Galileo y d'Arcy Thompson acerca de este principio. Goldsmith llegó a algunas conclusiones, las cuales le sirvieron para el trabajo desarrollado de forma amplia dentro de la firma SOM. Destacó que a cada cambio de escala del edificio le corresponde un cambio de tipología estructural. Este planteamiento estructural del principio de la escala desde la eficiencia lo describe Miguel Ángel Cobreros Vime:

“El problema de la escala en las estructuras (Goldsmith) lo combina con la cuestión de la eficiencia. A partir de su lectura de Galileo y Thompson, Goldsmith propone como evidencia que el tipo estructural debe cambiar con el cambio de escala, un ejemplo claro son las diversas soluciones para puentes conforme la luz se hace más grande. En las torres el aumento de escala que le preocupa es por un lado la cuestión de la esbeltez y por otro la relación entre la planta y el conjunto, relación que se difumina cuando el número de plantas se hace muy grande. [...] Si el paso de un edificio de 10 plantas a uno de 100 supone triplicar el consumo de acero por metro cuadrado es necesario cambiar la solución. Si este mismo paso produce dificultades arquitectónicas debido al aumento excesivo de los soportes es necesario cambiar el tipo.”

[Cobreros Vime 2002, 43].

Las propuestas arquitectónico-estructurales realizadas por Goldsmith fueron el resultado de su Tesis titulada “Los efectos de la escala” ^[17], algunas de las cuales se han presentado al inicio del presente capítulo. El objetivo de la Tesis de Goldsmith se basaba en parte en el procedimiento de Le Corbusier, como indican Iñaki Ábalos Vázquez y Juan Herreros Guerra, según se desprende de la siguiente argumentación:

“La tesis de 1953 (de Goldsmith) repite en parte el procedimiento de Le Corbusier: estudiar la construcción en sus límites técnicos para identificar principios arquitectónicos extrapolables. Pero las conclusiones derivadas de un análisis científico de la estructura del rascacielos serán diferentes a las que Le Corbusier intuyó: ni la retícula ni la fachada libre de implicaciones tectónicas serán ya principios universales básicos. Sin embargo, la figura estratificada del rascacielos lenticular encuentra en Goldsmith una respuesta estructural que corrobora desde el plano técnico la intuición corbusieriana en torno al problema de la escala y el tamaño del rascacielos.

Con estas experiencias, la de Kahn y la de Goldsmith, se abre un nuevo campo de investigación para la construcción vertical, anunciando en la disolución de la retícula como sistema estático del rascacielos: la tridimensionalidad de los tipos estructurales será el programa desplegado de forma ejemplar por Skidmore, Owings and Merrill (SOM) a lo largo de los años sesenta.”

[Ábalos Vázquez et al. 2000, 60].

Una de las principales propuestas de Goldsmith es **la concepción de las estructura como elemento envolvente de edificios en altura dando, así, respuesta a las solicitaciones producidas por la acción del viento**. En la figura 4.3-8, se aprecia la macroestructura periférica de trabéculas de hormigón armado, absorbiendo los esfuerzos de flexión y cortante globales del edificio trabajando en ménsula ^[16]. La

[16] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, pp. 56-58.

[17] Goldsmith, M. (1953). *The effects of scale*.

combinación de la estructura perimetral de hormigón, junto con la estructura interior de pilares metálicos los cuales absorben, en parte, las cargas gravitatorias, permiten establecer una estructura resistente de hasta 80 plantas, mientras que la estructura reticular estaba limitada alrededor de las 40 plantas. Proponiendo, así, un cambio profundo en el paradigma para la concepción de edificios en altura en base a los puntos que, expresados literalmente, indican Ábalos y Herreros ^[18]:

- Descomposición estructural en función de las distintas solicitaciones.
- Ubicación periférica frente al viento.
- Adecuación escalar.
- Especialización del trabajo y material estructural.

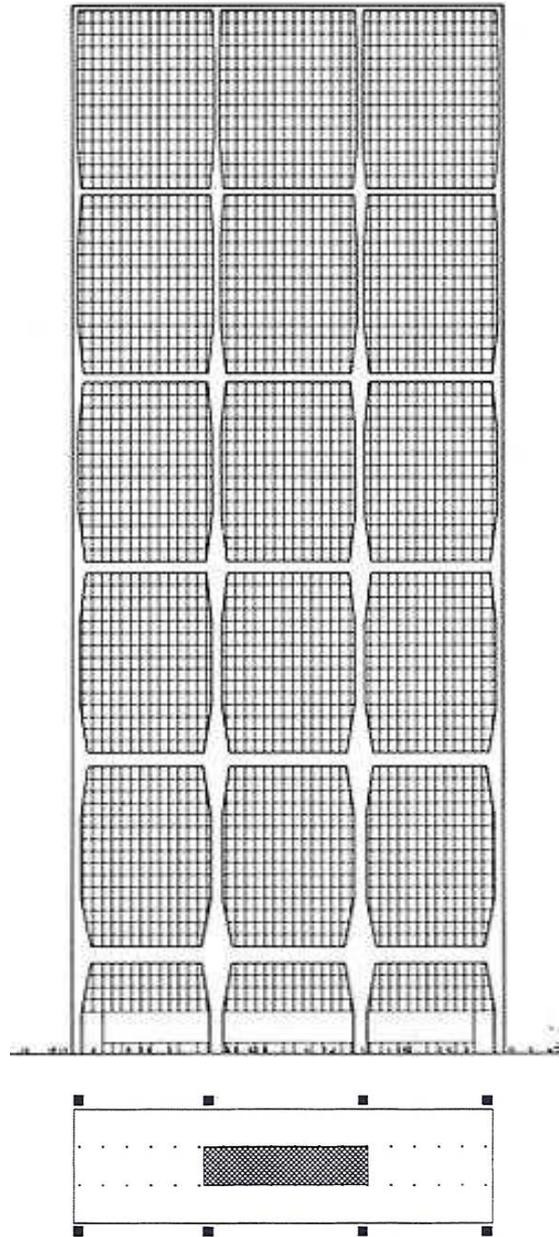


Figura 4.3-8. Superestructura de hormigón de Goldsmith para edificio en altura. (Imagen tomada de [Cobrerros Vime 2002, 35]).

^[18] Ábalos Vázquez, I.; Herreros Guerra, J. (2000). *Técnica y Arquitectura en la ciudad contemporánea, 1950-2000*, p. 59.

El trabajo de Goldsmith sobre el planteamiento estructural de edificios en altura, desde la eficiencia, fue de gran relevancia, y junto con la colaboración con Fazlur Khan a principios de los años 50 del siglo pasado, establecieron una de las investigaciones más fecundas en este ámbito arquitectónico-estructural, en busca de estructuras verticales de mayor eficiencia y racionalidad, pensamiento propio íntimamente relacionado con el Estilo Internacional o Modernismo ^[19].

El trabajo de Fazlur Khan, quien materializó distintas propuestas teóricas de Goldsmith, además de proponer nuevas formas, se aborda en el siguiente epígrafe acerca de tipologías estructurales de edificios verticales, dada su influencia y relevancia en esta temática.

4.3.1 Clasificación de los esquemas estructurales y sistemas resistentes de edificios en altura

El comportamiento estructural de un edificio en altura, de forma esquemática, equivale a un elemento resistente vertical en voladizo unido al suelo bajo la acción de fuerzas laterales que puede actuar en todas las direcciones ^{[19][20]}. No obstante, el esquema estructural que confiere un edificio en altura, conlleva una complejidad en el diseño y en el análisis mucho mayor, bajo las sollicitaciones a la cual está sometido, principalmente a las acciones gravitatorias (peso propio y sobrecargas de uso) y las acciones laterales dinámicas (sismo y viento). Cabe destacar la sensibilidad de este tipo de edificios frente a las acciones dinámicas.

Es oportuno destacar la importancia, en este tipo de edificaciones, de la altura o número de plantas de las cuales consta el edificio y, por lo tanto, de la esbeltez geométrica, ya que de estos aspectos depende la optimización estructural y, consecuentemente, la utilización del espacio interior.

En este contexto, es conveniente mencionar la relevancia del trabajo realizado por Fazlur Khan en la década de 1960 a 1970, quien estudió y propuso distintos sistemas estructurales para abordar el diseño y la construcción de edificios en altura, en busca de la optimización y la eficiencia estructural, junto con la aportación, en este ámbito, de la firma SOM ^[19]. Fazlur Khan fue responsable directo de edificaciones en altura tan emblemáticas como la *Sears Tower* o el *John Hancock Center* en Chicago, de acuerdo a los esquemas estructurales racionales para la ejecución de edificios en altura, introduciendo, entre otros aspectos, pantallas o muros de cortante incrementando de forma considerable la rigidez de los edificios en altura sin un aumento de coste significativo, especialmente si dichas pantallas trabajan de forma conjunta con los pórticos (conformando un sistema estructural combinado), como demostraron Khan y Sbarounis ^[21] en 1964.

Para edificios con alturas alrededor o superiores a los 200 metros (edificios «Super-altos» y «Mega-altos»), el sistema estructural debe dar respuesta a esfuerzos de una magnitud considerable. Para su sustentación es necesario el uso de sistemas o estructuras en tubo, tubo dentro de tubo, haz de tubos acoplados, así como estructuras espaciales o mega-estructuras, según las características formales del edificio, ya que es oportuna una integración total entre el sistema estructural y el diseño arquitectónico de los edificios ^[19].

^[19] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 89, 91 y 92.

^[20] Ali, M.M.; Moon, K.S. (2007). *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, p. 207.

^[21] Khan, F.R.; Sbarounis, J.A. (1964). *Interaction of Shear Walls and Frames*.

En las figuras 4.3-9 y 4.3-10, se muestran los distintos esquemas estructurales estudiados y analizados por Fazlur Khan ^{[22][23]}, para sistemas de estructuras de acero y hormigón, respectivamente, que fueron la continuación de su trabajo inicial ^[24]. Fazlur Khan, de acuerdo a su investigación, definió los sistemas estructurales más adecuados en función de la altura de coronación del edificio (número de plantas).

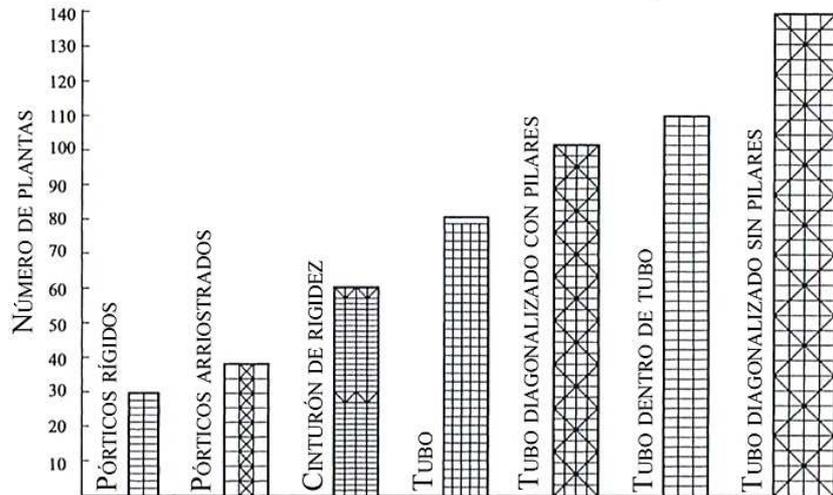


Figura 4.3-9. Clasificación de sistemas estructurales de edificios en altura según [Khan 1972, 1973] para estructura de acero. (Notación adaptada de [Ali 2001, 55]).

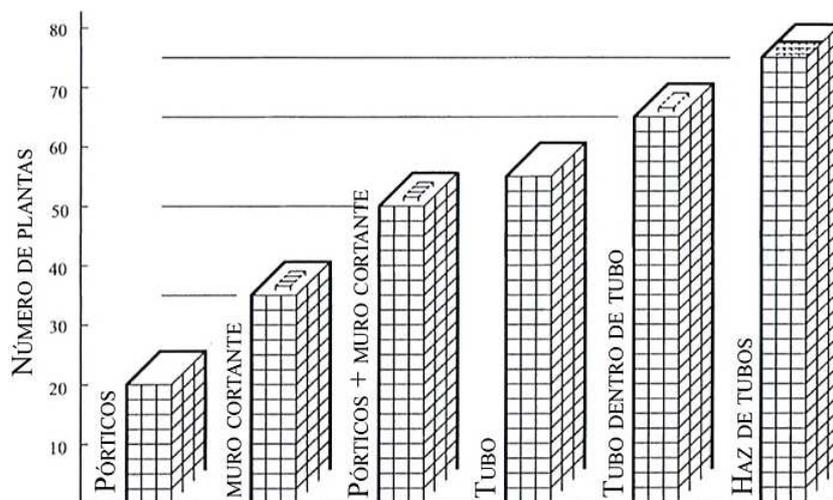


Figura 4.3-10. Clasificación de sistemas estructurales de edificios en altura según [Khan 1972, 1973] para estructura de hormigón. (Notación adaptada de [Ali 2001, 55]).

A continuación, se describen las principales características técnicas de los distintos sistemas resistentes o esquemas estructurales más frecuentes para la sustentación de los edificios en altura.

[22] Khan, F.R. (1972). *Influence of design criteria on selection of structural systems for tall buildings.*

[23] Khan, F.R. (1973). *Evolution of structural systems for high-rise buildings in steel and concrete.*

[24] Khan, F.R. (1969). *Recent structural systems in steel for high-rise buildings.*

4.3.1.1 *Pórticos semirrígidos o rígidos*

Estas primeras tipologías estructurales de pórticos semirrígidos o rígidos, las cuales se muestran en la figura 4.3-11, son las más frecuentes en el ámbito de la edificación por su fácil ejecución y las ventajosas prestaciones que ofrece para la posterior distribución de la planta o la colocación de los tabiques ^[25].

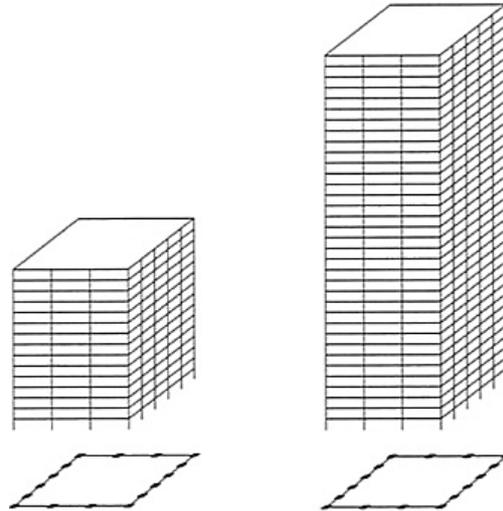


Figura 4.3-11. Esquemas estructurales de pórticos semirrígidos y rígidos respectivamente. (Imágenes tomadas de [Sarkisian 2012, 95]).

No obstante, su comportamiento se rige por el principio estructural de las grandes deformaciones, como se muestra en la figura 4.3-12, de forma que para edificios en altura, su limitación se estima ente 25 y 30 plantas, dependiendo de la esbeltez geométrica del edificio. Frente a las fuerzas horizontales, el comportamiento de esta tipología depende únicamente de la rigidez de los nudos, ya sean de hormigón armado, acero o estructura mixta. Dada la relevancia de las uniones en este tipo de estructuras, la opción del hormigón ofrece mayores ventajas constructivas, que disminuyen el coste de la ejecución y de la puesta en obra ^[26].

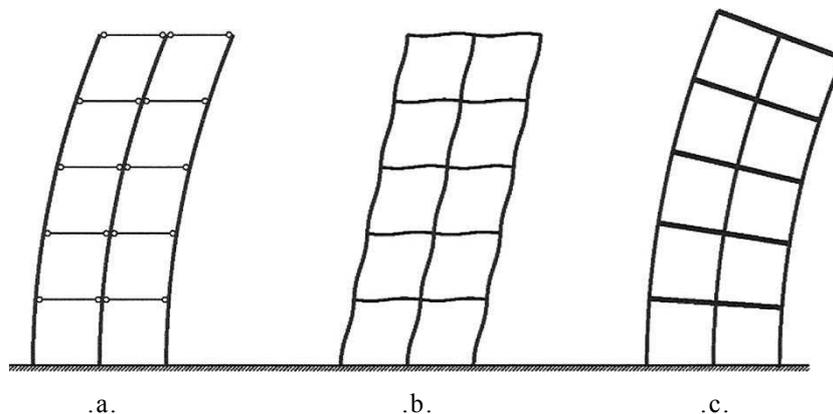


Figura 4.3-12. Deformaciones de pórticos frente a acciones laterales: a) Vigas de rigidez despreciable, b) Vigas de rigidez similar a la de los pilares y c) Vigas de gran rigidez. (Imagen tomada de [Gómez Hermoso et al. 2013, 260]).

^[25] Manterola Armisén, J. (1985). *La estructura resistente de los edificios altos*, p. 7.

^[26] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 260.

Como se infiere de la figura 4.3-12, dependiendo de las características mecánicas de los elementos viga que conforman los pórticos, las deformaciones globales serán distintas. En el caso de estructuras con vigas de rigidez despreciable o vigas muy rígidas la deformación se producirá por flexión (curvatura constante), mientras que, en el caso de vigas de rigidez similar a la de los pilares, la deformación será lineal, es decir, deformación por cortante global.

Para estructuras de pórticos semirrígidos se establece una altura límite, para una eficiencia estructural aceptable, de unos 60 metros (15 plantas), mientras que para pórticos rígidos la altura se limita a unos 140 metros (35 plantas) en el caso de estructura de acero, mientras que para estructura de hormigón el límite estaría alrededor de las 20 plantas, con una altura aproximada de 70 metros ^[27].

4.3.1.2 Pórtico arriostrado/diagonalizado (celosía a cortante)

El sistema estructural de pórtico arriostrado, el cual se muestra en la figura 4.3-13, es una extensión lógica del sistema resistente previamente expuesto, mejorando de forma significativa su eficiencia frente a las acciones determinantes en edificios en altura: las acciones horizontales o laterales. Su comportamiento estructural es el equivalente al de una viga de celosía, en la cual el arriostramiento actúa como las diagonales de la armadura, transmitiendo los esfuerzos de cortante, de forma que la deformación es la combinación de deformación a flexión (curvatura) y la deformación por cortante o tangencial (distorsión lineal), como se produce en la viga de Timoshenko, expuesta en el primer capítulo. Cabe destacar el alto rendimiento estructural de esta tipología, como prueba el que fuese el sistema resistente utilizado en los años 30 del siglo XX para la construcción de edificios tan imponentes, por sus alturas de coronación, como son el *Chrysler Building* y el *Empire State Building*, ambos en la ciudad de Nueva York ^[28].

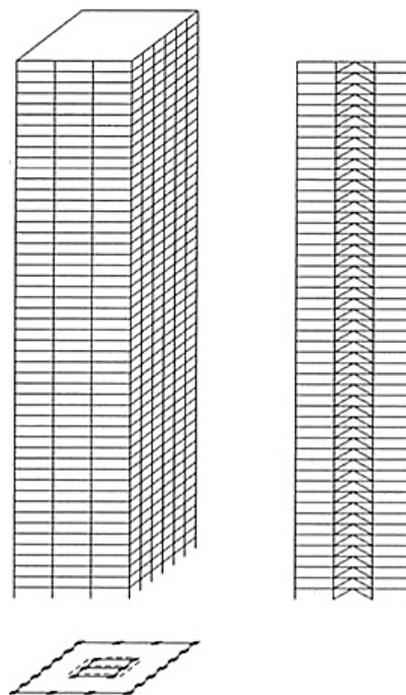


Figura 4.3-13. Esquema estructural de pórtico arriostrado/diagonalizado. (Imagen tomada de [Sarkisian 2012, 96]).

^[27] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, pp. 95 y 103.

^[28] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 261.

A igual que las vigas de celosía, el arriostramiento traduce los esfuerzos de flexión en esfuerzos axiales sobre los pilares, dependiendo del tipo de triangulación, la cual puede ser de varios tipos: “en K” (“en V”), “en X” o diagonales, y sus respectivas variantes, como se infiere de la figura 4.3-14. El principal inconveniente de esta tipología estructural para edificios en altura reside en que las triangulaciones pueden interferir en la actividad propia del edificio, ya que pueden disminuir espacios o pasos internos. Es necesario destacar que para no concentrar los esfuerzos axiales en una misma línea de pilares, es habitual poder colocar el arriostramiento en todo el ancho del edificio no concentrando, así, las diagonales en una única columna vertical de pórticos [29].

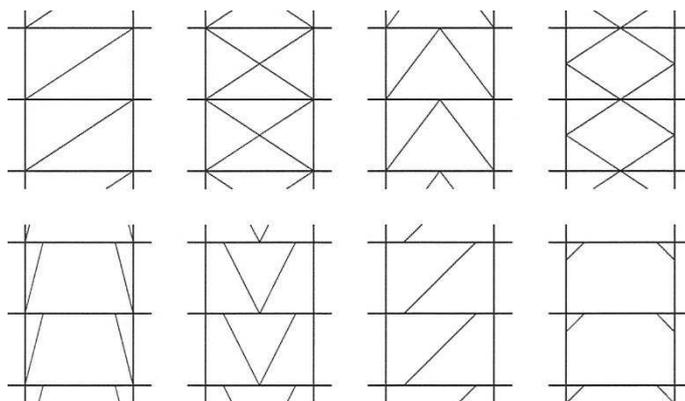


Figura 4.3-14. Posibles tipos de arriostramiento para pórticos rígidos. (Imagen tomada de [Gómez Hermoso et al. 2013, 262]).

De acuerdo a Sarkisian [30], la altura para estructura de acero se limita a 50 plantas, equivalente a unos 200 metros de altura. La mayoría de los edificios construidos en Nueva York a principios del siglo XX utilizaban el acero en pórticos rígidos arriostrados frente al viento como sistema estructural, como son ejemplo de ello, el *Woolworth Building* (1913) o el *Chrysler Building* (1930) [31], entre otros.

4.3.1.3 Pantallas o muros de cortante

El sistema estructural para edificios en altura conformado por pantallas o muros de cortante cuyo principio estructural es muy parecido al sistema de pórticos diagonalizados pero, en este caso, se macizan los vanos arriostrados con hormigón armado en lugar de riostras, de forma que se obtiene un elemento vertical continuo que recibe el nombre de pantalla o muro de cortante (*Shear Wall* en inglés), como se aprecia en las figuras 4.3-15 y 4.3-16.

El comportamiento estructural es similar al del marco arriostrado, de forma que su deformación, nuevamente, se asemeja a la viga de Timoshenko (deformación por flexión y por cortante), pero se dota al edificio de una mayor rigidez frente a las acciones laterales, especialmente las sísmicas, a la vez que transmiten una parte importante de las acciones gravitatorias que debe soportar la estructura.

Este sistema estructural conlleva el mismo inconveniente que el pórtico arriostrado, el paso a través de los pórticos que conforman las pantallas está impedido, de forma que se suele colocar muros de cortante alrededor de los núcleos de comuni-

[29] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 262 y 263.

[30] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, p. 96.

[31] Ali, M.M.; Moon, K.S. (2007). *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*, pp. 205 y 206.

cación, ya que en las fachadas o los perímetros donde su ubicación, en base a una distribución simétrica en planta, sería más lógica para mejorar su eficiencia a flexión así como a la torsión propios de este tipo edificatorio, dificultan la entrada de luz natural y la distribución interior ^{[32][33]}.

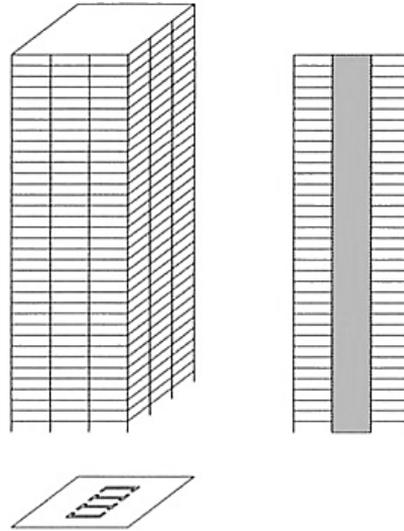


Figura 4.3-15. Esquema estructural con muros a cortante o pantallas. (Imagen tomada de [Sarkisian 2012, 104]).

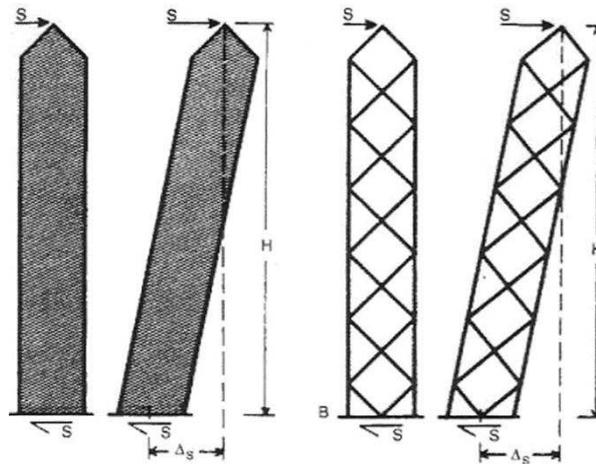


Figura 4.3-16. Sistemas resistentes a cortante de edificios en altura: a) Pantallas macizas de hormigón, b) Vigas trianguladas metálicas. (Imagen tomada de [Gómez Hermoso et al. 2013, 98]).

Como indica Sarkisian ^[34], para estructura de hormigón la limitación de altura se establece alrededor de 35 plantas, con una altura aproximada de 115 metros.

4.3.1.4 Pórtico y muros de cortante combinados

Es frecuente combinar las pantallas y los pórticos, unidos por los forjados, mejorando así las cualidades que poseen ambos sistemas por separado de forma que, en base al efecto diafragma (rigidez en el plano del forjado), las deformaciones trans-

[32] Manterola Armisen, J. (1985). *La estructura resistente de los edificios altos*, pp. 9-12.

[33] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 264 y 265.

[34] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, p. 104.

versales son las mismas para ambos sistemas como, resultado de la deformación a cortante, propia de la ménsula a cortante (típica del pórtico) y de la deformación de la ménsula a flexión (típica del muro a cortante) ^[35]. Produciendo un intercambio de fuerzas de acuerdo a las acciones horizontales, debido al comportamiento diferente que tienen ambas tipologías, como se aprecia en la figura 4.3-17, en la cual se representa la interacción entre la estructura aporticada y los muros a cortante o pantallas.

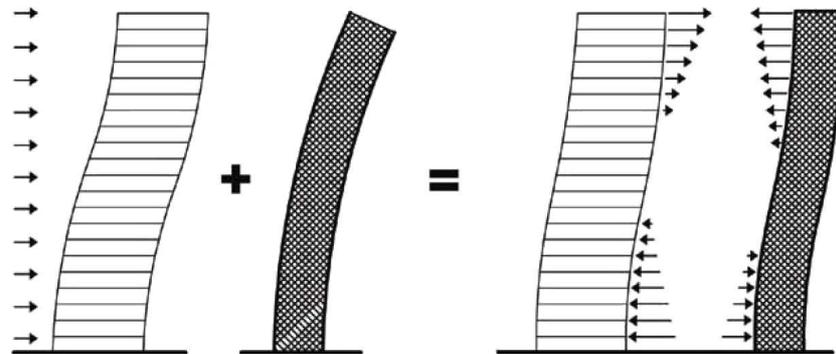


Figura 4.3-17. Interacción entre el muro de cortante y una estructura vertical de pórticos, correspondiente a un sistema combinado. (Imagen tomada de [Ali et al. 2007, 212]).

La elevada eficiencia estructural de esta solución combinada, la cual se muestra en la figura 4.3-17, junto con el comportamiento global que se caracteriza por un reparto de momentos flectores y cortantes equitativo en toda la altura debido a las cargas horizontales, permite que sea una estructura muy utilizada en edificios en altura de hasta 50 plantas, en la que los pórticos sean prácticamente un elemento repetitivo, como ocurre en, el *Seagram Building* en Nueva York, el cual tiene 38 plantas y es obra de Mies van der Rohe, en colaboración con su discípulo Philip Johnson. En la figura 4.3-18, se muestra el sistema estructural combinado conformado por pórticos y muros de cortante o pantallas.

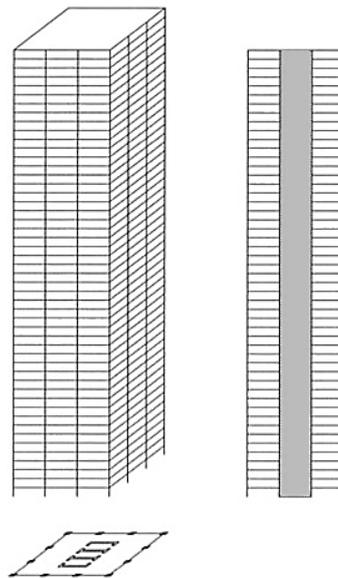


Figura 4.3-18. Esquema estructural con pórticos y muros a cortante o pantallas. (Imagen tomada de [Sarkisian 2012, 105]).

^[35] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 266.

En este caso, como indica Sarkisian ^[36], la altura para estructura exterior de acero (interior de hormigón), se limita a 50 plantas, el equivalente a unos 200 metros de altura, mientras que en estructuras de hormigón la limitación se establece alrededor de 50 plantas, con una altura aproximada de 160 metros.

4.3.1.5 *Tubo exterior*

El sistema estructural en tubo exterior lo introdujo por primera vez Fazlur Khan en 1963. Se caracteriza por disponer los elementos resistentes en el perímetro, como se muestra en la figura 4.3-19, convirtiéndose en un concepto especialmente eficaz en edificios en altura sometidos a flexión y torsión, principalmente en casos en que la torsión se puede producir por la incidencia del viento en unas direcciones no coincidentes con la posición del centro resistente de las distintas plantas del edificio, o en el caso de acciones sísmicas por la difícil coincidencia de la simetría geométrica del edificio con el centro de las distribuciones de masas y rigideces.

La gran ventaja de esta tipología estructural en tubo reside en que los elementos de contraviento se disponen a la máxima distancia respecto al centro de resistencia del edificio, aumentando así su inercia y su rigidez torsional ^[37].

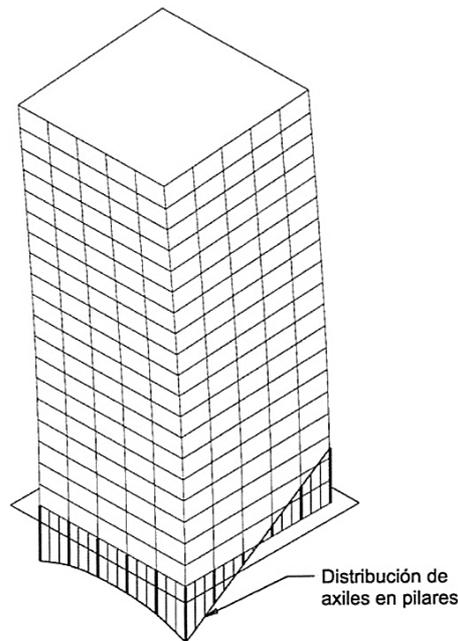


Figura 4.3-19. Comportamiento estructural sistema exterior en tubo frente a cargas laterales (distribución de axiles en la base). (Imagen tomada de [Gómez Hermoso et al. 2013, 268]).

El comportamiento estructural de esta tipología difiere del caso esquemático de una viga en voladizo cuya deformación teórica es plana de acuerdo a la hipótesis de Bernoulli, ya que se presentan alabeos producidos por la deformación en base el fenómeno del arrastre de cortante³⁸, concentrándose los esfuerzos de flexión en los elementos resistentes de las esquinas. Este fenómeno se hace más apreciable cuan-

^[36] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, pp. 96 y 105.

^[37] Señís, R.; Sastre, R.; Brufau, R.; Carbajal, E.C. (2014). *Estudio para la optimización de mallas estructurales de acero envolventes de edificios en altura según sus solicitaciones, en base al análisis de sus líneas isostáticas*. [In press]

³⁸ Según [Viñuela 1994, 9] “se conoce con el nombre del arrastre de cortante, el fenómeno de la no uniformidad de las tensiones normales en las alas, debidas a la flexión, que son introducidas por el rasante en la línea de unión ala-alma. Esta falta de uniformidad procede de la deformabilidad del ala en su plano.”

to mayor es el ancho del edificio en la dirección normal a las cargas horizontales, es decir, la separación entre las fachadas, las cuales serían el equivalente a las almas de los perfiles tubulares ^{[39][40]}.

Como indica Sarkisian ^[41], la altura para estructura exterior de acero, se limita a 90 plantas, el equivalente a unos 360 metros de altura, mientras que en hormigón la limitación se establece alrededor de 55 plantas, con una altura aproximada de 180 metros.

4.3.1.6 *Tubo dentro de tubo*

La tipología estructural tubo dentro de tubo es muy habitual en edificios en altura, ya que la necesidad de disponer, como mínimo, de un núcleo de comunicación vertical, da lugar a la aparición de un tubo interior, situado normalmente en la parte central de la planta, el cual influye en la rigidez lateral del edificio, mientras que el tubo exterior se dispone de acuerdo a las características estructurales previamente mencionadas ^{[39][40]}. En la figura 4.3-20, se aprecia el sistema tubo dentro de tubo, cuyo uso es frecuente en edificios en altura.

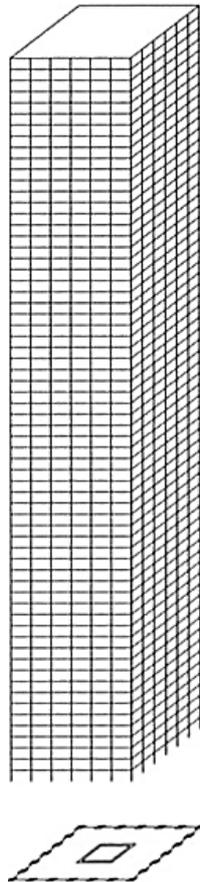


Figura 4.3-20. Estructura tubo dentro de tubo. (Imagen tomada de [Sarkisian 2012, 107]).

De acuerdo a Sarkisian ^[41], la altura para estructura de hormigón la limitación se establece alrededor de 65 plantas, con una altura aproximada de 215 metros.

[39] Manterola Armisen, J. (1985). *La estructura resistente de los edificios altos*, pp. 24 y 28.

[40] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 268 y 269.

[41] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, pp. 98, 106 y 107.

4.3.1.7 Tubos múltiples (haz de tubos acoplados)

El sistema estructural de tubos múltiples para edificios en altura, (aunque sería más correcto denominarlo sistema en tubo con almas intermedias), se caracteriza por una relevante ventaja con respecto al sistema en tubo, dado que se reduce de forma considerable el efecto del arrastre de cortante, como se aprecia en la figura 4.3-21a, en la cual se muestra la deformación de dicho esquema estructural y la correspondiente distribución de esfuerzos axiales en la base. De esta forma, se obtiene un sistema más eficaz frente a los esfuerzos de flexión generales, producidos en las caras laterales ^[42].

Atendiendo a Sarkisian ^[43], la altura para estructura de acero, se limita a 110 plantas, el equivalente a unos 450 metros de altura, según se desprende de la figura 4.3-21b, correspondiente a la estructura resistente de la *Sears Tower* de Chicago de 442 metros de altura.

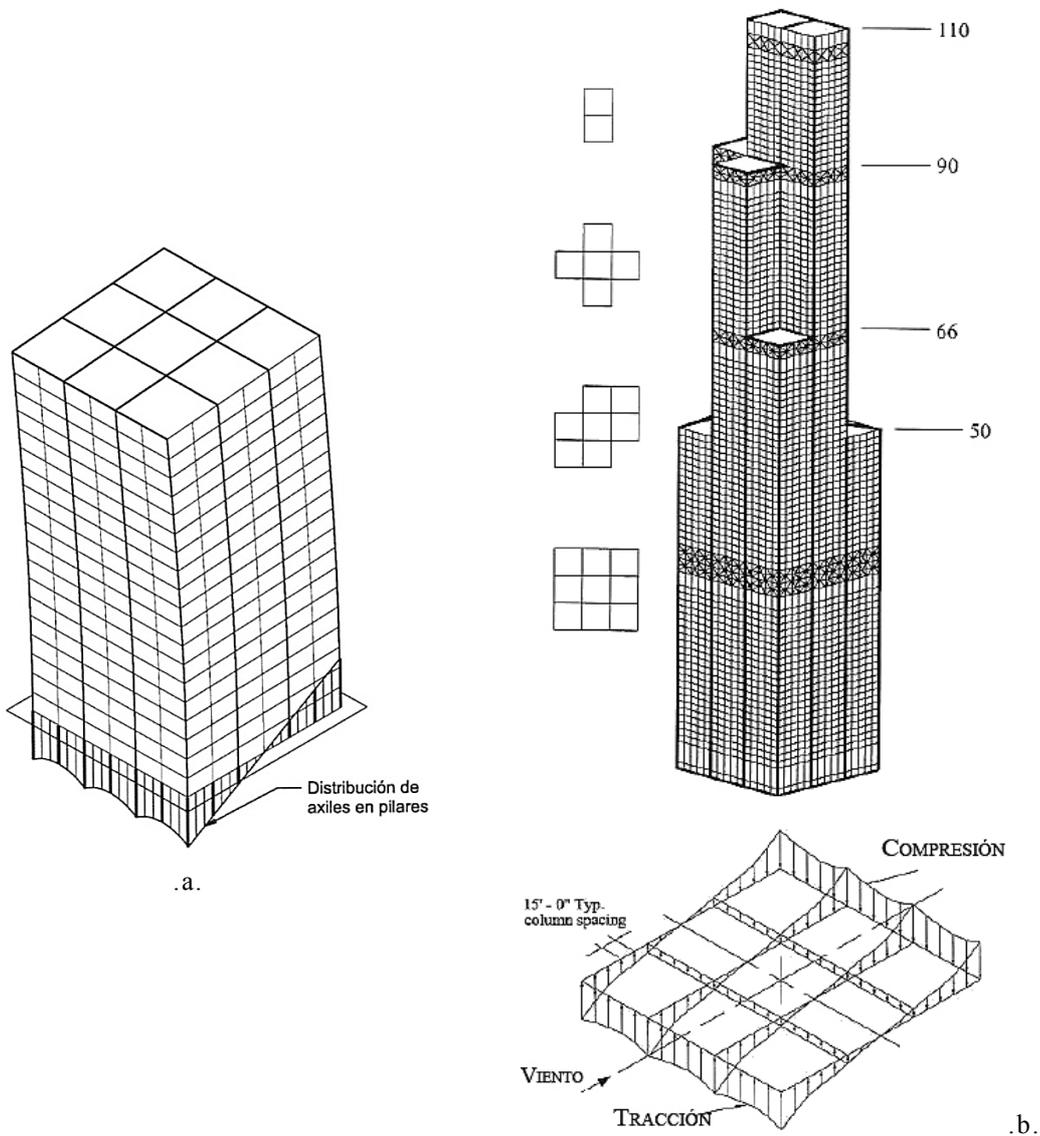


Figura 4.3-21. Esquema estructural sistema de haz de tubos acoplados. (Imágenes tomadas de [Gómez Hermoso et al. 2013, 270] y [Ali et al. 2007, 214], respectivamente).

[42] Manterola Armisén, J. (1985). *La estructura resistente de los edificios altos*, p. 28.

[43] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, p. 99.

4.3.1.8 Tubo arriostrado/diagonalizado

El esquema estructural que confiere el tubo arriostrado es una evolución y alternativa de la estructura exterior en tubo, con la cual se obtiene una mayor rigidez global a la vez que se reduce los esfuerzos de flexión en los pórticos. Esta característica estructural permite que los pórticos que conforman la estructura envolvente de los edificios en altura puedan estar más separados entre ellos mejorando, así, uno de los aspectos de la estructura tubular, que requiere de una separación menor entre pórticos para mejorar su comportamiento estructural. En cuanto a la mejora de eficiencia estructural de esta tipología es rotunda, siendo su comportamiento parecido al de una viga en celosía pero con la diferencia de que las diagonales están unidas también a los pilares centrales, de forma que los esfuerzos axiales se redistribuyen a lo largo de la fachada ^{[44][45]}.

El edificio emblema de esta tipología estructural es el *John Hancock Center* de Chicago de Fazlur Khan, para un total de 100 plantas y una altura de 344 metros, cuyo comportamiento estructural se muestra en la figura 4.3-22.

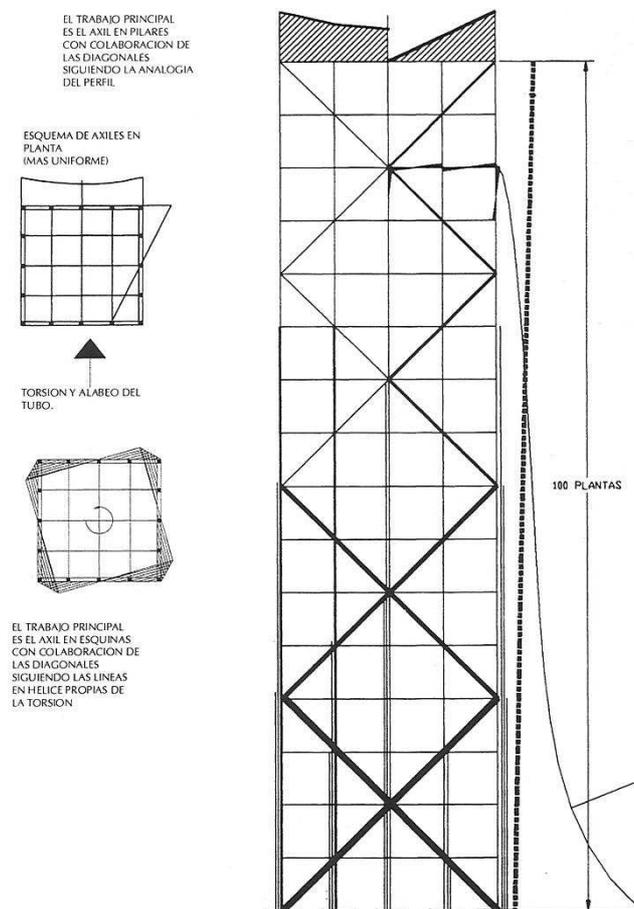


Figura 4.3-22. Comportamiento estructural del esquema en tubo diagonalizado del *John Hancock Center* de Chicago. (Imagen tomada de [Cobrerros Vime 2002, 64]).

Atendiendo a Sarkisian ^[46], la altura para estructura de acero, se limita a 120 plantas, el equivalente a unos 490 metros de altura, mientras que en hormigón la limi-

[44] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 270 y 271.

[45] Cobrerros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 66.

[46] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, pp. 100 y 109.

tación se establece alrededor de 90 plantas, con una altura aproximada de 300 metros.

4.3.1.9 *Núcleo central*

Como se ha expuesto anteriormente, la necesidad de un núcleo central que permita las comunicaciones verticales, conlleva que este elemento pueda ser un elemento resistente mediante su configuración con muros o pantallas. Una posibilidad es que el núcleo central sea el único elemento estructural del edificio, tanto para cargas verticales como para cargas laterales o de torsión, despojando las fachadas de cualquier función resistente, permitiendo liberar la planta baja. La limitación de altura para este sistema estructura se estima en unas 40 plantas.

Ello requiere que los forjados se sujeten, además de en el núcleo, en el perímetro exterior para evitar que trabajen en ménsula (cuya construcción sería muy costosa), ya sea mediante pilares que se apoyan en plataformas de gran canto para un determinado número de plantas, como se muestra en la figura 4.3-23a o a través de tirantes colgados de una estructura rígida situada en la coronación ^[47], como se aprecia en la figura 4.3-23b. Para esta tipología estructural es necesario un núcleo central de grandes dimensiones para resistir los esfuerzos propios de este tipo edificatorio. Cabe destacar que esta tipología estructural transmite la flexión a la cimentación, con la consecuente problemática constructiva que conlleva ^[48]. Ejemplos conocidos de esta tipología estructural son las torres Colón, obra del arquitecto **Antonio Lamela Martínez** (1926-) y los ingenieros **Javier Manterola Armisén** (1936-) y **Leonardo Fernández Troyano** (1938-), así como las oficinas BBVA, ambos situados en la ciudad de Madrid ^[49].

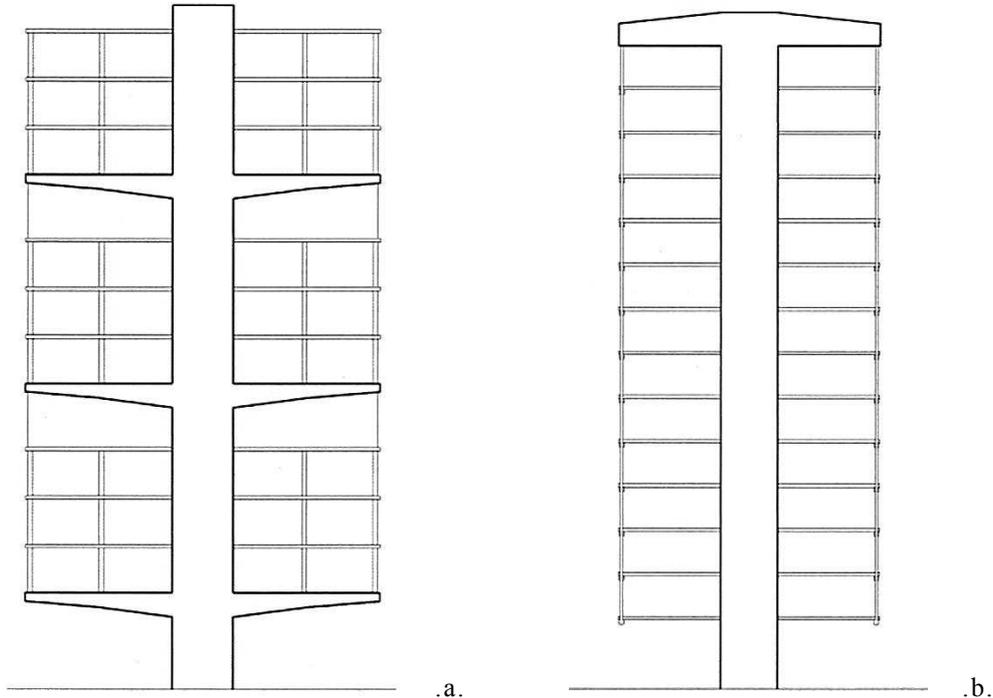


Figura 4.3-23. Edificios con núcleo central: a) Plantas apoyadas, b) Plantas colgadas. (Imagen tomada de [Gómez Hermoso et al. 2013, 273]).

^[47] Manterola Armisén, J. (1985). *La estructura resistente de los edificios altos*, pp. 15 y 16.

^[48] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 272.

^[49] Hormigón Estructural, U.D. (2005). *Notas para una historia del Hormigón Estructural*, p. 96.

4.3.1.10 Núcleo central con apoyos perimetrales (cinturones de rigidez)

Se ha argumentado previamente que, la elección de un único núcleo central tiene una limitación importante, entre otras, en cuanto a la altura se refiere. Una alternativa para mejorar la eficiencia estructural de este sistema, caracterizado por un núcleo central como elemento resistente principal, es añadir vigas de gran rigidez (cinturones de rigidez o *outriggers*) que unan las pantallas centrales con las columnas o tirantes exteriores. Esta solución constructiva coacciona el giro del núcleo, en la cual su limitación en cuanto a rigidez y resistencia se debe más a la flexión que al cortante global. El funcionamiento estructural de esta tipología resistente de edificios en altura se muestra en la figura 4.3-24.

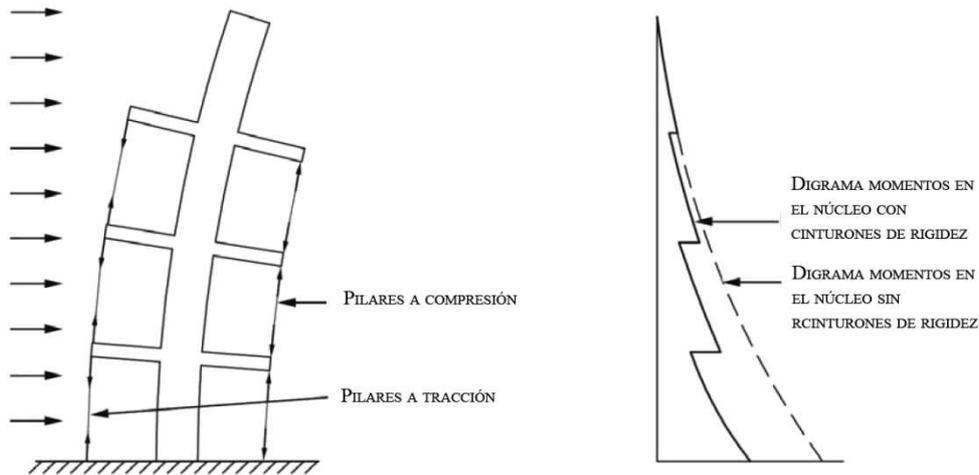


Figura 4.3-24. Comportamiento estructural del núcleo central con cinturones de rigidez unidos a las estructura perimetral. (Notación adaptada de [Ali et al. 2007, 212]).

Como indica Sarkisian ^[50], la altura de esta solución con estructura metálica, queda limitada alrededor de 65 plantas, con una altura aproximada de 215 metros.

4.3.1.11 Entramado de malla diagonalizada

El sistema de entramado de malla diagonalizada es un sistema resistente ampliamente utilizado en edificios en altura debido a sus altas prestaciones estructurales, en base a la disposición del entramado en el perímetro del edificio. Además, la rigidez de los forjados en su plano (efecto diafragma) así como la separación entre ellos, la cual es de una dimensión no relevante dentro de la escala del edificio, acorta la longitud de los pilares o soportes verticales que conforman la estructura o entramado en tubo, disminuyendo de forma considerable de longitud de pandeo reduciendo, consecuentemente, los problemas de inestabilidad o efectos de segundo orden propios de las barras comprimidas, permitiendo optimizar sus dimensiones transversales.

En este contexto, cabe destacar que cuando se diseñan las geometrías de las mallas, es habitual plantear que cada tramo de malla pueda abarcar varias plantas, es decir, los niveles de las plantas en su mayoría no coinciden con las uniones de las mallas, como se aprecia en la figura 4.3-25a, correspondiente a la *Hearst Tower* de Nueva York, ya mostrada al inicio del presente capítulo dada su relevancia arquitectónica y estructural. Las prestaciones que ofrece este sistema resistente, han permitido

[50] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, p. 107.

que este concepto arquitectónico-estructural, haya sido suficientemente tratado con resultados que arrojan un buen comportamiento en el ámbito de la ingeniería estructural arquitectónica, siendo ésta la tipología estructural que se utiliza en el estudio comparativo realizado en el quinto capítulo, para la optimización de mallas envolventes de edificios, permitiendo así una distribución constante en toda la altura, aunque la posible malla optimizada vaya decreciendo para adaptar su geometría a la trayectoria de las líneas isostáticas según las acciones solicitantes, como se aprecia en la figura 4.3-25b.

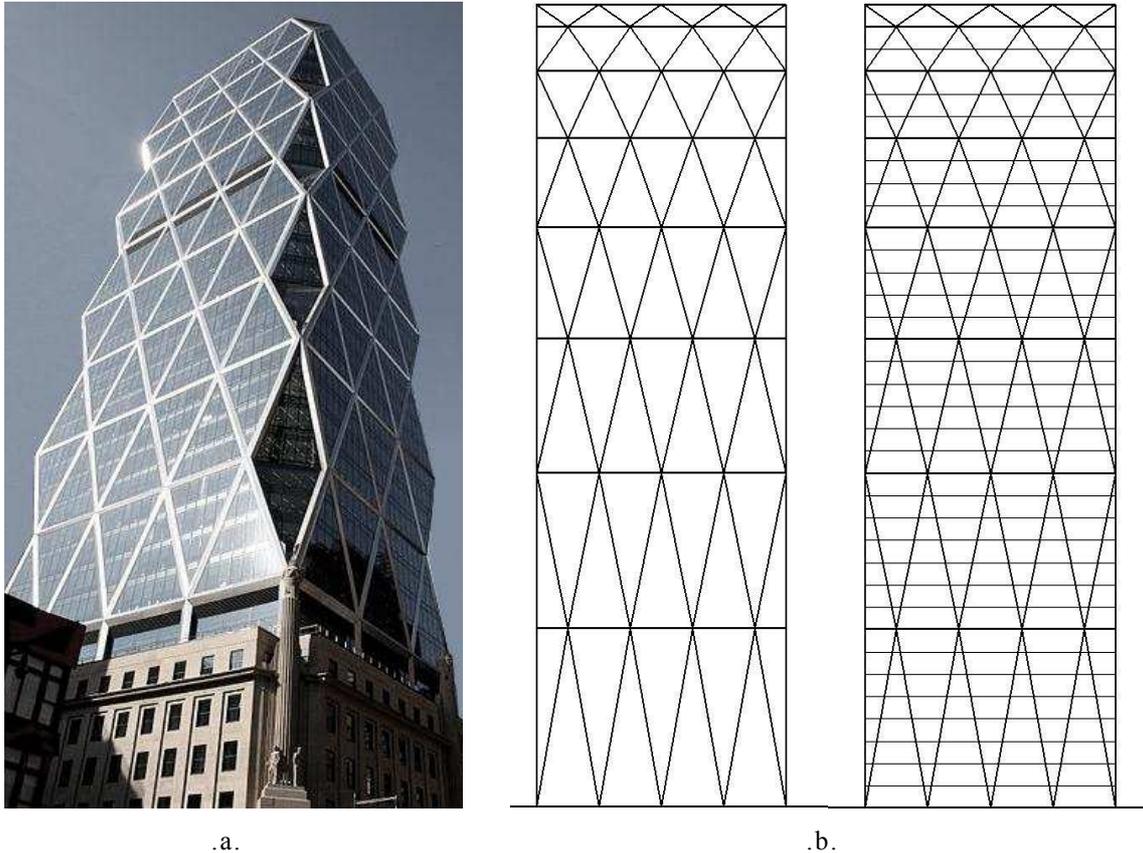


Figura 4.3-25. a) La *Hearst Tower* en Nueva York de malla estructural de doble diagonal, con plantas intermedias, b) Propuesta de distribución de plantas para la geometría adaptada según las líneas isostáticas. (Imágenes propias, 2008 y 2013 respectivamente).

Como indica Sarkisian ^[51], la altura para estructura de acero, se limita a 150 plantas, el equivalente a unos 610 metros de altura, mientras que en hormigón la limitación se establece alrededor de 120 plantas, con una altura aproximada de 390 metros.

4.3.1.12 *Otros sistemas resistentes*

En cuanto a sistemas estructurales de edificios en altura se refiere, es oportuno mencionar el sistema en celosía espacial y los super-pórticos, ya que ambas tipologías permiten alcanzar grandes alturas. Como indica Sarkisian ^[51], la altura para estructura de acero, se limita a 130 plantas, el equivalente a unos 530 metros de altura, mientras que en hormigón la limitación se establece alrededor de 110 plantas, con una altura aproximada de 360 metros.

^[51] Sarkisian, M. (2012). *Designing tall buildings. Structure as architecture*, pp. 102 y 111.

Una síntesis de interés de los aspectos fundamentales en este epígrafe, se aporta como estudio en cuanto a las características de los distintos sistemas estructurales interiores y exteriores, respectivamente, de edificios en altura, en las siguientes tablas 4.3-1 y 4.3-2:

Categoría	Material	Límite altura eficiente (plantas)	Ventajas	Desventajas	Ejemplos de edificios
Pórticos rígidos	Acero	30	Flexibilidad de distribución en planta. Rápida ejecución.	Ejecución costosa (uniones rígidas / protección contra el fuego).	<i>860 & 880 Lake Shore Drive Apartments</i> , Chicago, 26 pl., 82 m.
	Hormigón	20	Flexibilidad de distribución en planta. Fácil adaptación.	Encofrado costoso. Ejecución lenta.	<i>Ingalls Building</i> , Cincinnati, 16 pl., 65 m.
Pórticos articulados y arriostramiento (celosías trianguladas)	Acero: pórticos y arriostramiento	10	Resistencia eficiente a cargas laterales por el arriostramiento (esfuerzos axiales).	Limitación de distribución por las diagonales de la celosía. Uniones de las diagonales costosas.	Edificios de baja altura.
Pórticos articulados y pantallas	Acero: pórticos / Hormigón: pantallas	35	Resistencia eficiente a cortante por las pantallas.	Limitación de distribución en planta por las pantallas.	<i>77 West Wacker Drive</i> , Chicago, 50 pl., 203,6 m. <i>Casselden Place</i> , Melbourne, 43 pl., 160 m.
Pórticos rígidos y arriostramiento (celosías trianguladas)	Acero: pórticos y arriostramiento	40	Resistencia eficaz a cargas laterales por las celosías.	Limitación de distribución interior por las celosías.	<i>Empire State</i> , Nueva York, 102 pl., 381 m. <i>Seagrams Building</i> : de la planta 17 a la 29, Nueva York, 38 pl., 157 m.
Pórticos rígidos y arriostramiento (pantallas)	Acero: pórticos / Hormigón: pantallas	60	Resistencia eficaz a cargas laterales por las pantallas.	Limitación de distribución interior por las pantallas.	<i>Seagrams Building</i> , hasta la planta 17, Nueva York, 38 pl., 157 m.
	Hormigón: pórticos y pantallas	70			<i>311 South Wacker Drive</i> , Chicago, 75 pl., 284 m.
Estructuras con cinturones de rigidez	Acero	150	Resistencia a flexión de los pilares exteriores unidos al núcleo con los cinturones de rigidez	Los cinturones de rigidez no aportan resistencia a cortante.	<i>Taipei 101</i> , Taipei, 101 pl., 509 m. <i>Jin Mao Building</i> , Shanghai, 88 pl., 421 m.

Tabla 4.3-1. Sistemas estructurales interiores de edificios en altura. (Tabla adaptada de [Ali et al. 2007, 209]).

Categoría	Material	Límite altura eficiente (plantas)	Ventajas	Desventajas	Ejemplos de edificios
Entramado en tubo exterior	Acero	80	Resistencia eficiente a cargas laterales.	Un espaciado estrecho entre las columnas obstruyen las vistas.	<i>Aon Center: Chicago, 83 pl., 346 m.</i>
	Hormigón	60			<i>Water Tower Place: Chicago, 74 pl., 262 m.</i>
Tubo diagonalizado	Acero	100/150 (con/sin pilares interiores)	Resistencia eficiente a cortante por las diagonales (esfuerzos axiales).	Las diagonales obstruyen las vistas.	<i>John Hancock Center: Chicago, 100 pl., 344 m.</i>
	Hormigón	100			<i>Onterie Center: Chicago, 58 pl., 174 m.</i>
Haz de tubos	Acero	110	Reduce el arrastre por cortante.	Limitación de distribución interior por la configuración del haz de tubos.	<i>Sears Tower: Chicago, 108 pl., 442 m.</i>
	Hormigón	110			<i>Carnegie Hall Tower: Nueva York, 62 pl., 230,7 m.</i>
Tubo dentro de tubo	Acero y Hormigón: entramado exterior y núcleo	80	Resistencia eficiente a cargas laterales en base al núcleo a cortante.	Limitación de distribución interior por la configuración del núcleo a cortante.	<i>181 West Madison Street: Chicago, 50 pl., 207 m.</i>
Doble diagonal	Acero	100	Resistencia eficiente a cortante por las diagonales (esfuerzos axiales)	Uniones complejas. Construcción lenta.	<i>Hearst Building: Nueva York, 42 pl., 182 m.</i> <i>Axe (Swiss Re Building: Londres, 41 pl., 181 m.</i>
	Hormigón	60		Dificultad de encofrado.	<i>O-14 Building: Dubai.</i>
Estructuras de celosía espacial	Acero	150	Resistencia eficiente a cortante por las barras de las celosías espaciales.	Obstrucción de las vistas.	<i>Bank of China: Hong Kong, 72 pl., 367 m.</i>
Mega estructuras	Acero	160	Permite construir mega edificios.	La forma del edificio depende en gran medida del sistema estructural.	<i>Chicago World Trade Center: Chicago, 168 pl.</i>
	Hormigón	100			<i>Parque Central Tower: Caracas, 56 pl., 221 m.</i>
Sistemas puente exteriores	Acero	100	El interior está libre de pilares.	Dilatación/contracción térmica.	<i>Hotel Arts: Barcelona, 43 pl., 137 m.</i>

Tabla 4.3-2. Sistemas estructurales exteriores de edificios en altura. (Tabla adaptada de [Ali et al. 2007, 210]).

4.4 Fenómenos dinámicos en edificios: el viento y el sismo. Influencia de la forma

En cuanto a edificios en altura se refiere, tal y como se ha ido destacando a lo largo del presente trabajo, las acciones de mayor influencia o determinantes en este tipo de edificación son las acciones horizontales: el viento y el sismo (acciones dinámicas), las cuales producen oscilaciones y vibraciones que los edificios deben soportar. La sección necesaria a determinar, del edificio, para resistir dichas acciones es netamente superior a la que le corresponde exclusivamente a las acciones gravitatorias (peso propio y sobrecargas). La incidencia del viento sobre un edificio en altura, se muestra en la figura 4.4-1.

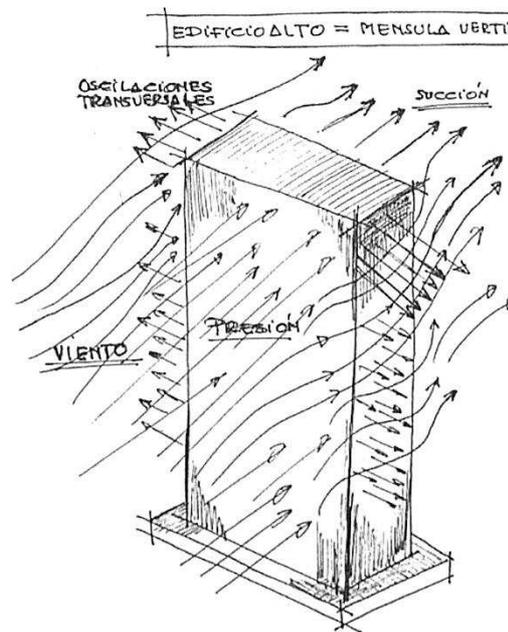


Figura 4.4-1. Incidencia del viento sobre un edificio (ménsula vertical). (Imagen tomada de [Gómez Hermoso et al. 2013, 93]).

En ambos casos, bajo la acción del viento y del sismo, los edificios en altura deben soportar esfuerzos significativos de flexión y de cortante, que se pueden ver incrementados por los esfuerzos de torsión producidos por la incidencia del viento en unas direcciones no coincidentes con la posición del centro resistente de las distintas plantas del edificio, como se ha expuesto anteriormente, así como por la acción del sismo al no coincidir el centro de inercia del edificio con la resultante del empuje del sismo actuando sobre éste ^[1].

La **influencia de la forma** del edificio, frente a este tipo de acciones, es determinante para su comportamiento y respuesta estructural, generalmente ante esfuerzos globales de cortante y de flexión, pero también de torsión según la distribución en planta del edificio, producidos por la acción del viento, sin olvidar que el cortante sigue una ley parabólica, mientras que la del momento flector es cúbica. En la figura 4.4-2, se muestra el comportamiento estructural (desplazamientos horizontales con respecto la altura: d/H) en edificios de 200 metros de altura de igual esbeltez geométrica, pero distinta geometría en planta considerando la misma área de ésta.

[1] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, p. 93.

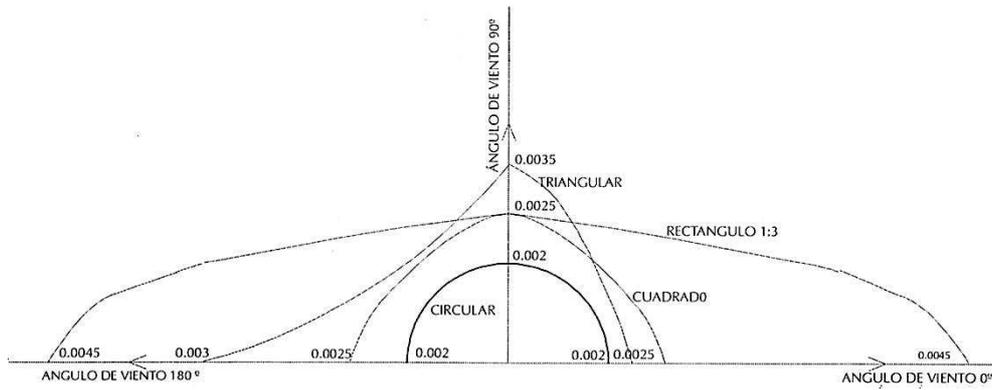


Figura 4.4-2. Desplazamientos horizontales (d/H) para edificios de 200 metros de igual esbeltez, pero distinta geometría en planta. (Imagen tomada de [Cobrerros Vime 2002, 22]).

En cuanto al sismo, la respuesta del edificio depende, básicamente, de la distribución interna de masas. Como se infiere de la figura 4.4-3, a partir de una cierta altura y, en definitiva, de la esbeltez geométrica del edificio, sin embargo la influencia del viento según el régimen de vientos, y dependiendo de la sismicidad, generalmente resulta más determinante que el sismo, como expone Cobrerros [2].

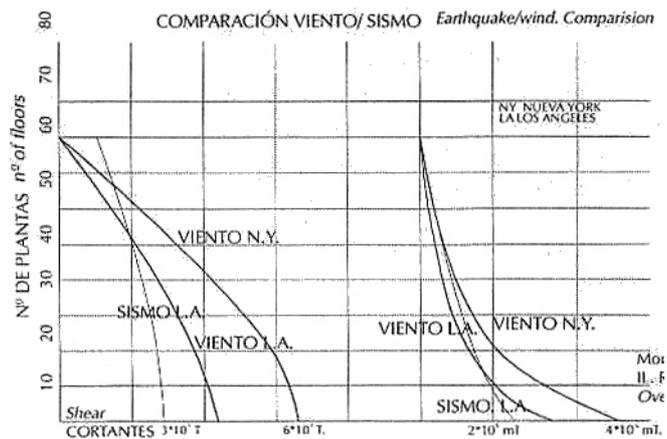


Figura 4.4-3. Influencia de la forma frente a las acciones dinámicas, viento y sismo. (Imagen tomada de [Cobrerros Vime 2002, 22]).

La geometría del edificio, así como el sistema resistente que lo sustenta, debe garantizar que las deformaciones frente a estas acciones no sean excesivas (deformaciones máximas en la coronación entre $H/500$ y $H/1000$), dando así cumplimiento a las condiciones de funcionalidad y confort de las personas, con seguridad, a la vez que se debe evitar el colapso del edificio, conforme a los siguientes tres requisitos básicos que expone Gómez [3]:

- Estabilidad global del edificio que, frente al vuelco, debe actuar en su conjunto como un sólido rígido.
- Comportamiento elástico del edificio frente a las acciones laterales, recuperando la posición inicial después de producirse los desplazamientos.

[2] Cobrerros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 21.

[3] Gómez Hermoso, J.; et al. (2013). *Proyecto de edificios altos*, pp. 93 y 94.

- Los pilares o soportes verticales deben resistir las compresiones adicionales o las tracciones producidas por el vuelco del edificio.

En este sentido, como se ha tratado anteriormente, las características o aspectos básicos propios de la **forma** o **geometría** de los edificios en altura como son la **rigidez** global, la **esbeltez** geométrica y la **estabilidad** de la construcción, los cuales se han destacado en la primera parte del presente capítulo, van íntimamente relacionados con la **función** estructural resistente de los edificios en altura.

Para abordar la resolución de este problema es necesario, en el mismo instante que se plantea el diseño del edificio, considerar el esquema estructural más adecuado y óptimo. Un sistema que cumple dichos prerequisites es el sistema de entramado en tubo, el cual se propone en el estudio principal de la presente Tesis y que se caracteriza por disponer los pilares o soportes verticales en el perímetro del edificio en vez de en toda la planta, lo que conlleva, en sí mismo, una respuesta más eficaz a flexión y a torsión frente a las acciones laterales. Ambas disposiciones de pilares en planta se muestran en la figura 4.4-4.

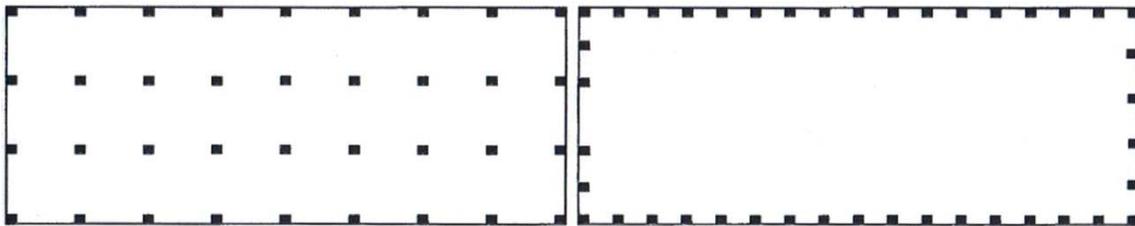


Figura 4.4-4. Disposición de los pilares en planta: a) Pilares distribuidos en toda la planta, b) Pilares concentrados en el perímetro. (Imagen tomada de [Gómez Hermoso et al. 2013, 95]).

Sin duda, la característica de mayor influencia sobre un edificio relacionada con la altura es la esbeltez geométrica, ya que los esfuerzos generalizados se incrementan de forma exponencial, tal y como se ha expuesto previamente. A su vez, es de suma relevancia considerar que la influencia de las cargas horizontales producidas por las acciones dinámicas del viento, y del sismo, inciden de forma muy distinta sobre los edificios en altura. El viento es una acción dinámica que actúa sobre los cerramientos y fachadas de los edificios, durante periodos de tiempo que pueden ser prolongados, mientras que la acción del sismo suele ser por lo general de corta duración y actúa sobre las masas. Esta diferenciación en cuanto a su duración, así como su influencia sobre el edificio, es de suma relevancia, ya que la respuesta del mismo frente a dichas acciones es muy distinta.

La respuesta estructural de una edificación frente al viento se debe caracterizar por un comportamiento elástico del edificio frente a los desplazamientos horizontales recibidos, los cuales deben ser de la menor magnitud posible, por lo tanto el edificio se debe caracterizar por ofrecer la máxima rigidez posible en su globalidad. No obstante, frente al sismo es aceptable un comportamiento elástico-plástico del edificio hasta el punto que se puedan tolerar desperfectos en la estructura y/u otros elementos del edificio, siempre y cuando se cumplan las premisas fundamentales: la estabilidad del edificio y seguridad de las personas. Para ello, el edificio se debe caracterizar frente a la acción sísmica por su flexibilidad ^[4].

[4] Cobreros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 21.

En este contexto, es conveniente incidir en que para el viento es importante la forma externa, por lo tanto es importante la regularidad en planta y la relación entre la superficie de la fachada con la superficie construida (siendo conveniente que sea del menor valor posible, es decir, edificios compactos). Mientras que en el caso del sismo es importante la regularidad en la distribución de las masas en sección, ya que la influencia del sismo depende de dicha distribución interna y del centro de gravedad. En la figura 4.4-5, se muestra la influencia de las acciones del viento y del sismo para edificios de la misma superficie construida, pero distinta forma en planta y, consecuentemente, con una superficie de fachada también distinta. En concreto, las cargas actuantes corresponden a una zona de elevada sismicidad, como es Granada, y para una velocidad del viento de 120 Km/h.



Figura 4.4-5. Influencia de las fachadas y la esbeltez frente a acciones del viento y sísmica. Valores de las cargas en Granada para una velocidad del viento de 120Km/h. (Imagen tomada de [Cobrerros Vime 2002, 22]).

La relevancia de la acción del viento sobre los edificios reside en que sus efectos pueden llegar a ser devastadores si se produce el acoplamiento con la estructura, al igualarse la frecuencia de vibración del edificio con la frecuencia de acción del viento, fenómeno conocido como resonancia. La importancia en considerar este fenómeno es que se puede producir el colapso de dicha estructura, ya que los desplazamientos dinámicos tienden a ser infinitos ^[5]. La definición de las cargas para el estudio de edificios en altura se presenta en el siguiente capítulo. Como se expone posteriormente no se considerará la acción del sismo en este trabajo de investigación, centrándose exclusivamente en la acción del viento.

Todas estas consideraciones frente a las acciones dinámicas, junto con las características propias de los edificios en altura, conforme al recorrido histórico-formal-estructural realizado, en los capítulos precedentes, establecen una sólida base para abordar el estudio final referente a la optimización de mallas envolventes (estructuras en tubo), como sistema resistente de edificios en altura, objeto principal de estudio de la presente Tesis, y el cual se aborda a continuación.

^[5] Cobrerros Vime, M.A. (2002). *Tipologías estructurales de edificios en altura*, p. 22.