

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE A CORUÑA.  
GRADO EN ESTUDIOS DE ARQUITECTURA.

# TRABAJO FIN DE GRADO

## **EXO**ESQUELETOS DE ACERO EN EDIFICIOS EN ALTURA.

FORMA, FUNCIÓN, IMAGEN. ESTUDIO DE CASOS.

Alumno / Telyatnikov, Gleb  
NIE / y3303679-L  
Referencia de TFG / Exoesqueletos  
Tutora / Maria Dolores Otero Chans  
Curso académico / 2022-2023  
Fecha de entrega / 30.06.2023

CAPÍTULO	DESCRIPCIÓN	PÁGINA
01	Resumen/palabras clave	3
02	Introducción	4
03	Clasificación de las estructuras de acero en edificios altos.	4
04	Estructuras interiores	5
05	Estructuras exteriores	7
06	Exoesqueleto:	8
	Características estructurales	8
	Acciones a los que están sometidos edificios en altura	10
07	Casos de estudios	11
07.1	Diseño tradicional	
	John Hancock Center	13
	Bank of China Tower	17
	Hotel Arts	19
	Turning Torso	21
	Hearst Tower	24
07.2	Diseño paramétrico	26
	Hotel Morpheus	27
	181 Fremont Street	29
08	Análisis comparativo	32
09	Conclusiones	35
10	Referencias	37

## RESUMEN / ABSTRACT / RESUMO

---

El trabajo se centra en el estudio de los exoesqueletos en los edificios de gran altura, una tecnología que está revolucionando el campo de las estructuras portantes. Se examinan detalladamente ejemplos reales de edificios con exoesqueletos, tanto a nivel nacional como internacional, para comprender mejor su funcionamiento y los beneficios que aportan. Estos ejemplos permiten ilustrar las diversas aplicaciones y soluciones que los exoesqueletos pueden ofrecer en la práctica. El trabajo también investiga las ventajas y desafíos asociados con el uso de exoesqueletos en los edificios en altura.

La investigación proporciona una base para futuras investigaciones.

The work focuses on the study of exoskeletons in high-rise buildings, a technology that is revolutionizing the field of load-bearing structures. Real examples of buildings with exoskeleton, both nationally and internationally, are examined in detail to better understand how they work and the benefits they bring. These examples allow to illustrate the various applications and solutions that exoskeletons can offer in practice. The work also investigates the advantages and challenges associated with the use of exoskeletons in high-rise buildings.

The research provides a foundation for future research.

O traballo céntrase no estudo dos exoesqueletos en edificios de gran altura, unha tecnoloxía que está a revolucionar o campo das estruturas portantes. Examínanse en detalle exemplos reais de edificios con exoesqueleto, tanto a nivel nacional como internacional, para comprender mellor o seu funcionamento e os beneficios que aportan. Estes exemplos permiten ilustrar as diversas aplicacións e solucións que os exoesqueletos poden ofrecer na práctica. O traballo tamén investiga as vantaxes e os retos asociados ao uso de exoesqueletos en edificios de gran altura.

A investigación proporciona unha base para investigacións futuras.

## PALABRAS CLAVE / KEYWORDS / PALABRAS CLAVE

---

Exoesqueletos, estructuras de acero, diseño estructural, edificios en altura, diseño paramétrico /

Exoskeletons, steel structures, structural design, tall buildings, parametric design /

Exoesqueletos, estruturas de aceiro, deseño estrutural, edificios altos, deseño paramétrico.

“Los edificios altos surgieron a finales del siglo XIX en los Estados Unidos de América. Hoy, sin embargo, son un fenómeno arquitectónico mundial. Muchos edificios altos se construyen en todo el mundo, especialmente en países asiáticos, como China, Corea, Japón y Malasia.

Tradicionalmente, la función de los edificios altos ha sido la de edificios de oficinas comerciales. Otros usos, como desarrollos residenciales, de uso mixto y de torres hoteleras, han aumentado rápidamente desde entonces. Ha habido cierto escepticismo con respecto a la construcción de edificios altos desde el 11 de septiembre de 2001, sin embargo, se seguirán construyendo debido a sus importantes beneficios económicos en el uso de suelo urbano denso.

El desarrollo de edificios altos involucra varios factores complejos como la economía, la estética, la tecnología, las regulaciones municipales y la política. Entre estos, la economía ha sido el principal factor rector. Sin embargo, este nuevo tipo de edificio no habría sido posible sin el apoyo de las tecnologías. Una revolución estructural, la estructura esquelética de acero, así como los consiguientes sistemas de muros cortina de vidrio, que surgieron en Chicago, han llevado al actual rascacielos de última generación.” - *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects*

El presente trabajo se va a centrar solo en un tipo de estructura: edificios altos con exoesqueleto de acero. El exoesqueleto se va a entender como una estructura exterior vista. Puede ser un sistema estructural formado totalmente por el exoesqueleto o una combinación de sistemas estructurales donde el exoesqueleto proporciona rigidez frente cargas laterales y limitaciones de balanceo y el resto de las cargas son soportadas por la estructura interior.

El objetivo del presente trabajo es observar la tipología de los exoesqueletos, ver la evolución de la tecnología desde 1969, primer edificio en altura con estructura exterior, hasta proyectos contemporáneos y entender las ventajas de las estructuras visibles.

Para empezar se analiza la clasificación de las estructuras de acero en edificios en altura, distinguiendo entre estructura interior y exterior y se mencionan algunos ejemplos de cada tipo. Una vez establecida la clasificación, el análisis procede directamente al estudio de los exoesqueletos, sus características e introducción sobre las acciones principales a los que están sometidos.

Para el análisis detallado se escogen siete edificios de diferentes épocas. En cada ejemplo se explican los antecedentes del proyecto, la arquitectura y el sistema estructural del edificio. Al final, los datos obtenidos se formalizan en tablas y gráficos, lo que permite comparar los edificios y sacar conclusiones.

## CLASIFICACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO EN EDIFICIOS ALTOS.

03

Un concepto importante a la hora de analizar los edificios, llamado por Khan “premium for height”, consiste en la relación entre kilos de acero por m<sup>2</sup> y número de plantas. (Fig.1)

Entre varias clasificaciones de los sistemas estructurales se destaca la del libro “Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects” de Mir M. Ali and Kyoung Sun Moon - por ser una clasificación completa, integral y precisa. En el libro se plantea una definición de las tipologías estructurales para edificios en altura: “Los sistemas estructurales de edificios altos se pueden dividir en dos grandes categorías: estructuras interiores y estructuras exteriores. Esta clasificación se basa en la distribución de los componentes del sistema principal resistente a cargas laterales sobre el edificio. Un sistema se clasifica como una estructura interior cuando la mayor parte del sistema resistente a la carga lateral se encuentra dentro del interior del edificio. Asimismo, si la mayor parte del sistema resistente a cargas laterales está ubicado en el perímetro del edificio, un sistema se clasifica como una estructura exterior. Cabe señalar, sin embargo, que es probable que cualquier estructura interior tenga algunos

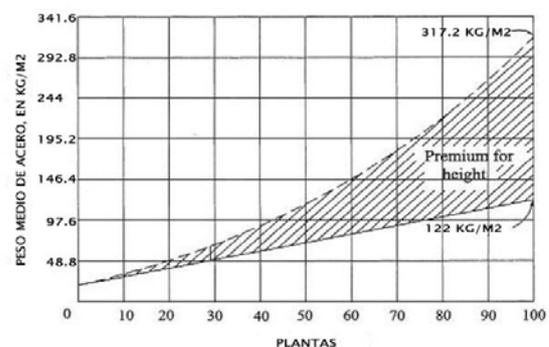


Fig. 1. Premium for height.

componentes menores del sistema de resistencia de carga lateral en el perímetro del edificio, y cualquier estructura exterior puede tener algunos componentes menores dentro del interior del edificio”.

La clasificación se realiza tanto para estructuras primarias como para sistemas de amortiguamiento auxiliares posteriores -componentes adicionales que se agregan a la estructura para mejorar su capacidad de resistencia a las fuerzas externas.

## ESTRUCTURAS INTERIORES.

04

Las tipologías más habituales para estructuras interiores de acero en edificios en altura son las siguientes:

**1. Estructura porticada**, proporciona flexibilidad en la planificación del suelo y construcción rápida. “El pórtico consta de vigas y columnas conectadas rígidamente entre sí en forma de rejilla plana. Dichos pórticos resisten la carga principalmente a través de la rigidez a la flexión de los miembros (Kowalczyk, Sinn y Kilmister, 1995).

Ejemplo - Edificio Seagram, New York, USA, 39 plantas, 157 m.

**2. Estructura porticada con núcleo reforzado.** El núcleo central funciona como voladizo vertical fijado en la base. De hecho, en muchos edificios altos, los muros verticales que conforman un núcleo sólido y encierran los servicios del edificio se pueden usar para estabilizar y reforzar el edificio contra las cargas laterales. Existen muchas posibilidades con núcleos simples o múltiples en un edificio alto con respecto a su ubicación, forma, número y disposición. Los muros del núcleo son esencialmente muros de corte.

Ejemplos - 311 South Wacker Drive, Chicago, USA, 75 plantas, 284m; Cook County Administration Building, former Brunswick Building, Chicago, USA, 38 plantas, 145m.

**3. Núcleo reforzado con voladizos (out rigger).**

Aunque esta estructura es principalmente un sistema interior, las cerchas de cinturón o megacolumnas ofrecen un perímetro más amplio, resistiendo así el empuje lateral. Para edificios de entre 30 y 70 pisos, los núcleos reforzados con acero o los muros de núcleo de hormigón armado son generalmente efectivos para resistir las cargas laterales.

Ejemplos - Taipei 101, Taipei, Taiwan, 2004, 101 plantas, 509m; Jin Mao Building, Shanghai, China, 1999, 88 plantas, 421m.



Edificio Seagram

Estructura porticada

New York, USA, 1958  
39 plantas, 157m



311 South Wacker Drive

Estructura porticada  
con núcleo reforzado

Chicago, USA, 1990  
75 plantas, 284m



Cook County Administ.

Estructura porticada  
con núcleo reforzado

Chicago, USA, 1964  
38 plantas, 145m



Taipei 101

Núcleo reforzado con  
voladizos (out riggers)

Taipei, Taiwan, 2004  
101 plantas, 509m,



Jin Mao Building

Núcleo reforzado con  
voladizos (out riggers)

Shanghai, China, 1999  
88 plantas, 421m

Tabla 1. Ejemplos de edificios en altura con estructura interior.

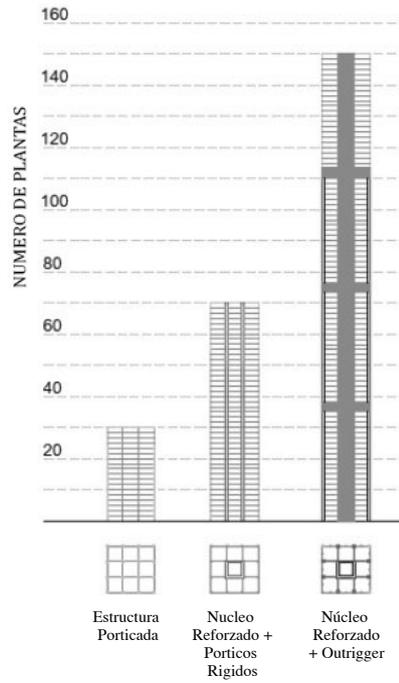


Fig. 2. Estructuras interiores de acero.

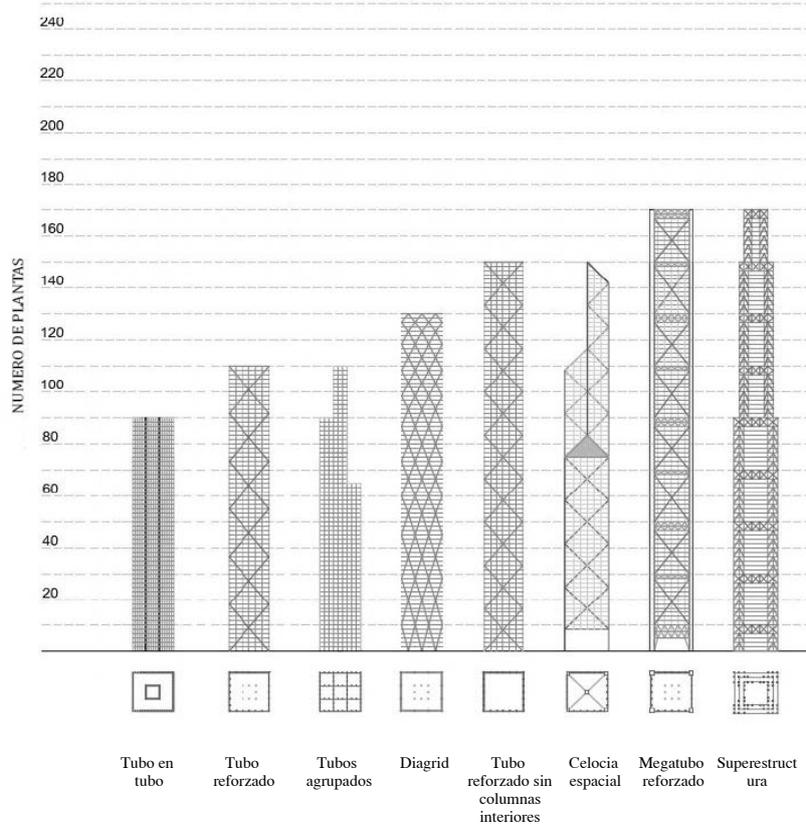


Fig. 3. Estructuras exteriores de acero.

La naturaleza de los perímetros de los edificios tiene más importancia estructural en los edificios altos que en cualquier otro tipo de edificio debido a su gran altura, lo que significa una mayor vulnerabilidad a las fuerzas laterales, especialmente las cargas de viento. La introducción de los sistemas de tubos ha sido revolucionaria ya que por primera vez se aprovechó directamente la respuesta tridimensional de los edificios, partiendo del sistema de pórticos rígidos convencional que consta de rejillas planas de vigas y columnas conectadas rígidamente.

Las tipologías más habituales para estructuras exteriores de acero en edificios en altura son las siguientes:

**1. Estructura porticada exterior.** En un sistema de pórticos en el perímetro del edificio que forman una estructura tubular rígida. El edificio se compone de pilares con reducida separación y vigas de canto, conectadas entre sí rígidamente.

Ejemplo - Aon Center, Chicago, USA, 1973, 83 plantas, 346m.

**2. Tubo reforzado.** Un tubo reforzado es una variación de la estructura porticada exterior que se aplicó por primera vez en el Centro John Hancock de 100 pisos de 1969 en Chicago (Ali, 2001). Este concepto se deriva del hecho de que en lugar de utilizar columnas perimetrales poco espaciadas, es posible reforzar las columnas colocadas con separación mayor mediante arriostramientos diagonales para crear características similares a las de un muro.

Ejemplo - John Hancock, Chicago, USA, 1969, 100 plantas 343m.

**3. Tubo agrupado.** Un tubo agrupado es un grupo de tubos individuales conectados entre sí para actuar como una sola unidad. Para estructuras muy altas, una sola estructura porticada exterior no es suficiente, ya que el ancho del edificio en su base debe ser grande para mantener una relación razonable de esbeltez de modo que el edificio no sea excesivamente flexible y no se balancee demasiado.

Ejemplo - Sears tower, Chicago, USA, 1973, 108 plantas, 442m.

**4. Tubo en tubo.** La rigidez de un tubo porticado exterior también se puede mejorar utilizando el núcleo para resistir parte de la carga lateral dando como resultado un sistema de tubo en tubo. El diafragma del piso que conecta el núcleo y el tubo exterior transfiere las cargas laterales a ambos sistemas. El núcleo en sí podría estar formado por un tubo sólido, un tubo arriostrado o un tubo porticado.

Ejemplo - 181 West Madison Street, Chicago, USA, 1990, 50 plantas, 207m.

**5. Celosía espacial.** Una celosía espacial es una estructura formada por barras rectas unidas entre sí por medio de articulaciones, tal que al estar sometida a fuerzas exteriores sus barras trabajan exclusivamente a esfuerzo axial.

Ejemplo - Bank of China Tower, Hong Kong, China, 1990, 72 plantas, 367m.

**6. Diagrid.** La idea principal detrás del desarrollo del sistema "diagrid" es la posibilidad de eliminar las columnas interiores. Si las estructuras exteriores descritas anteriormente requieren un núcleo para resistir el esfuerzo cortante, al generar la triangulación de los elementos creamos un sistema capaz de resistir el cortante por sí, sin necesidad de núcleo. Las barras son capaces de resistir tanto cargas gravitatorias como cargas laterales. De todos modos en edificios en altura hay necesidad de núcleos de comunicación potentes que se aprovechan para fortalecer el sistema estructural.

Ejemplo - Hearst tower, New York, USA, 2005, 42 plantas, 182m.



Aon Center	John Hancock	Sears tower	181 West Madison Street	Bank of China Tower	Hearst tower
Estructura porticada exterior	Tubo reforzado	Tubo agrupado	Tubo en tubo	Celosía espacial	Diagrid
Chicago, USA, 1973 83 plantas, 346m	Chicago, USA, 1969 100 plantas 344m	Chicago, USA, 1973 108 plantas, 442m	Chicago, USA, 1990 50 plantas, 207m	Hong Kong, China, 1990 72 plantas, 367m	New York, USA, 2005 42 plantas, 182m

Tabla 2. Ejemplos de edificios en altura con estructura exterior.

## EXOESQUELETOS.

06

Cada una de las estructuras exteriores mencionadas anteriormente puede ser un exoesqueleto, resistiendo toda la carga del edificio o formando parte del sistema estructural. El término “exoesqueleto” se refiere a una estructura externa, en plano o fuera de la fachada, que brinda soporte estructural a un edificio. Se aprovecha la respuesta tridimensional del edificio para aumentar su profundidad estructural y resistencia a las cargas laterales. Una de las estructuras exteriores más típicas es el sistema de tubos, que puede ser un tubo porticado, un tubo arriostrado o un haz de tubos. Estos sistemas de tubos utilizan todo el perímetro del edificio para resistir las cargas laterales y proporcionar una expresión estructural de la fachada. El objetivo del diseño óptimo es limitar el cortante y aspirar a un comportamiento más tipo voladizo de la estructura.

## CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES Y ARQUITECTÓNICAS DE LOS EXOESQUELETOS.

06.1

Ya que el exoesqueleto es una estructura exterior, va a tener características similares a estas pero con algunas particularidades.

### 1. MEJOR RESISTENCIA A DEFORMACIÓN. RIGIDEZ Y BALANCEO.

En general, la estructura sacada al exterior va a tener más inercia y como consecuencia va a ser más estable y más resistente. El artículo “Análisis estático y dinámico en el diseño de la estructura del exoesqueleto” (Olga Ivánkova, Dávid Méri y Eva Vojteková presenta un experimento numérico para comparar los sistemas exteriores de soporte de carga de un edificio de gran altura). La estructura portante del objeto analizado consiste en un núcleo reforzado, forjados y tubos de acero de un exoesqueleto.

Se comparan una estructura interior de núcleo reforzado (variante 1), variaciones de tubo reforzado (variantes 2-6) y el sistema diagrid (variante

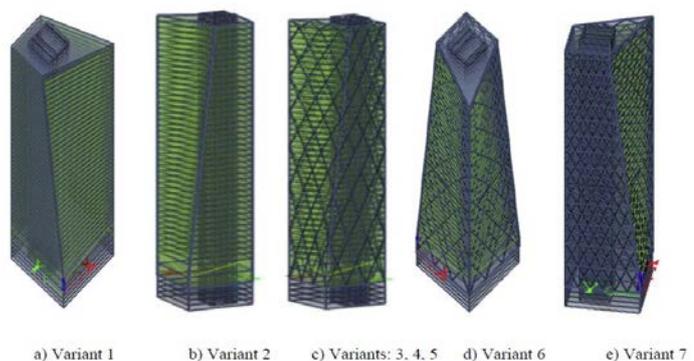


Fig. 4. Los modelos de análisis.

7). En los modelos se han considerado cargas debidas al peso propio, peso del acristalamiento exterior y al viento según norma.

En las gráficas se ve que con un diseño adecuado, una estructura en voladizo es efectiva para reducir el momento de vuelco del edificio. Sin embargo, estructuras de exoesqueletos aún requieren núcleos que tengan una rigidez al corte significativa (excepción - diagrid, la estructura diagrid proporciona rigidez tanto a la flexión como al corte).



Fig. 5a. Desplazamientos mínimos en la última planta.

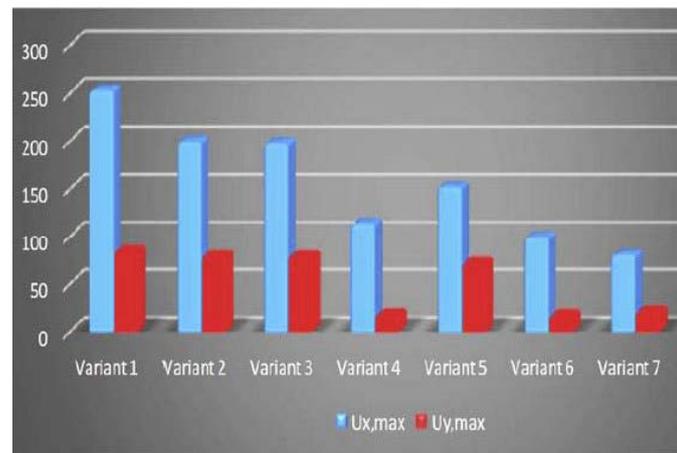


Fig. 5a. Desplazamientos máximos en la última planta.

## 2. DISEÑOS ICÓNICOS.

Las estructuras de exoesqueleto ubican sus principales componentes resistentes a la carga lateral en el perímetro del edificio donde se encuentran las fachadas del edificio, creando una dominación estructural en la expresión de los edificios. Esta yuxtaposición inducida por el rendimiento conduce naturalmente a un enfoque de diseño integrador entre el sistema estructural y el sistema de fachada. Por lo tanto, en los edificios altos que emplean este tipo de sistema estructural, los componentes tecnológicos y los componentes arquitectónicos de las fachadas de los edificios son inseparables y se complementan entre sí. Estas circunstancias requieren una búsqueda del equilibrio entre diseño formal y estructural.

Otro factor en la práctica del diseño de edificios altos es buscar las formas aerodinámicas para reducir las fuerzas del viento que soportan.

## 3. APROVECHAMIENTO DE ESPACIOS INTERIORES.

El exoesqueleto y el núcleo mínimo de hormigón permiten crear plantas sin columnas para ampliar el espacio útil. La utilización funcional del edificio de gran altura diseñado para usos múltiples se puede organizar como un espacio abierto flexible, que se puede modificar de acuerdo con las necesidades individuales de los futuros inquilinos.

#### 4. SENSIBILIDAD ESTRUCTURAL AL FUEGO Y LA VARIACIÓN TÉRMICA.

La protección contra incendios del sistema no es un problema grave debido a su ubicación fuera de la línea del edificio. Sin embargo, la expansión/contracción térmica del sistema, expuesto al clima exterior en constante cambio, y los puentes térmicos sistémicos deben considerarse cuidadosamente durante el diseño.

#### 5. SENSIBILIDAD A LAS ACCIONES EÓLICAS.

La velocidad y la presión del viento aumentan parabólicamente con respecto a la altura y, por lo tanto, las cargas de viento que afectan a los edificios altos se vuelven importantes a medida que aumenta la altura del edificio. En general, el diseño estructural comienza a estar controlado por las cargas de viento en edificios de más de 40 plantas. Los avances en los sistemas estructurales y los materiales de alta resistencia hacen que los edificios altos hayan aumentado en su relación altura-peso pero, por otro lado, han reducido su rigidez en comparación con sus precursores, por lo que se han visto muy afectados por el viento.

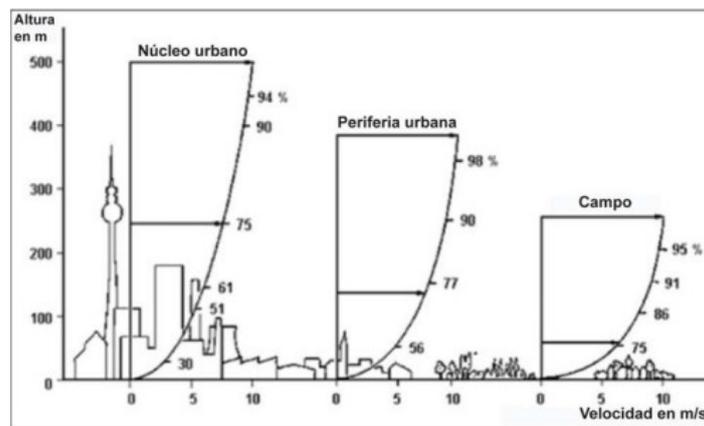


Fig. 6. Cargas de viento.

Con la rigidez reducida, aumenta la sensibilidad a las cargas laterales y, por lo tanto, el balanceo bajo cargas de viento. El balanceo, que no se puede observar fuera del edificio o en los pisos inferiores, puede causar molestias a los ocupantes de los pisos superiores de un edificio. Los enfoques de diseño arquitectónico, estructural y mecánico se utilizan para controlar la oscilación en edificios altos.

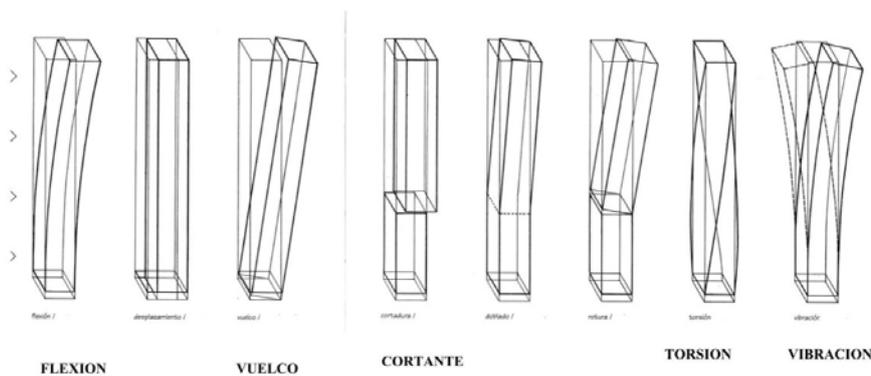


Fig. 7. Efectos de las acciones a las que están sometidos edificios en altura.

## 6. POSIBILIDADES PARA EL CRECIMIENTO URBANO.

Otra característica importante de las estructuras de acero son las uniones atornilladas, lo que, en las estructuras expuestas al exterior, facilita las uniones y permite construcción por partes, en función de la demanda.

Las pruebas realizadas por Buckminster Fuller en sus proyectos de Dymaxion House en 1927 o las cúpulas geodésicas patentadas en 1954 demostraron la eficiencia de las estructuras desmontables. Proyectos futuristas para su época han utilizado estas estructuras en muchas soluciones contemporáneas diferentes como alojamientos rurales, viviendas prefabricadas y modulares, etc.

Al día de hoy podemos pensar en estructuras desmontables móviles en una escala más grande.

Más abajo dos proyectos futuristas del concurso eVolo, una revista de arquitectura y diseño centrada en los avances tecnológicos, la sostenibilidad y el diseño innovador para el siglo XXI demuestran cómo las estructuras de exoesqueleto podrían ser una alternativa para el desarrollo urbano.

El concepto principal del hospital aéreo (Fig.8a) es llevar a cabo una producción y construcción rápidas a través de la modularización, reducir el tiempo de operación en el sitio a través de una plataforma elevadora autoconstruida y mejorar la eficiencia del transporte aéreo de emergencia a través de una plataforma de helicóptero.

El proyecto de la ciudad móvil (Fig.8b) ilustra un nuevo modelo de posible futura habitación. Una aglomeración metabólica que podría formar comunidades de todo tipo.

Obviamente el tema requiere un estudio más completo, pero nos permite pensar en futuras aplicaciones de los exoesqueletos.



*Fig. 8a. Self-built Air Hospital.*



*Fig. 8b. Nomad Metropolis*

Antes de seleccionar los edificios para el análisis se realizó un estudio previo de los edificios con exoesqueleto.

La construcción vertical, especialmente con exoesqueleto, se convierte en una solución óptima para aprovechar al máximo el espacio disponible en áreas urbanas densamente pobladas. Junto con esto, los exoesqueletos de acero se han vuelto cada vez más relevantes debido a su capacidad para proporcionar una resistencia estructural excepcional. Pero la utilización de estructura de exoesqueleto conlleva una serie de características que pueden hacer su uso no tan económico a largo plazo debido a la exposición directa al sol, necesidad de protección adicional o mantenimiento más costoso. Además, la estructura expuesta al exterior crea una imagen icónica para el edificio, pero requiere una búsqueda del equilibrio entre diseño formal y estructural más complejo que la estructura oculta.

Dicho esto se concluye que los mejores ejemplos de los edificios en altura con exoesqueleto se construyen en ciudades grandes y en parcelas pequeñas donde el valor del suelo juega un papel muy importante.

Tras analizar los cien edificios más altos en el mundo (según datos del 2023), se observa que sólo dos de ellos se han construido con exoesqueleto - John Hancock center, 1969 y el Bank of China Tower, 1992. La mayoría de los edificios en altura con exoesqueleto se aproximan a 150-200m.

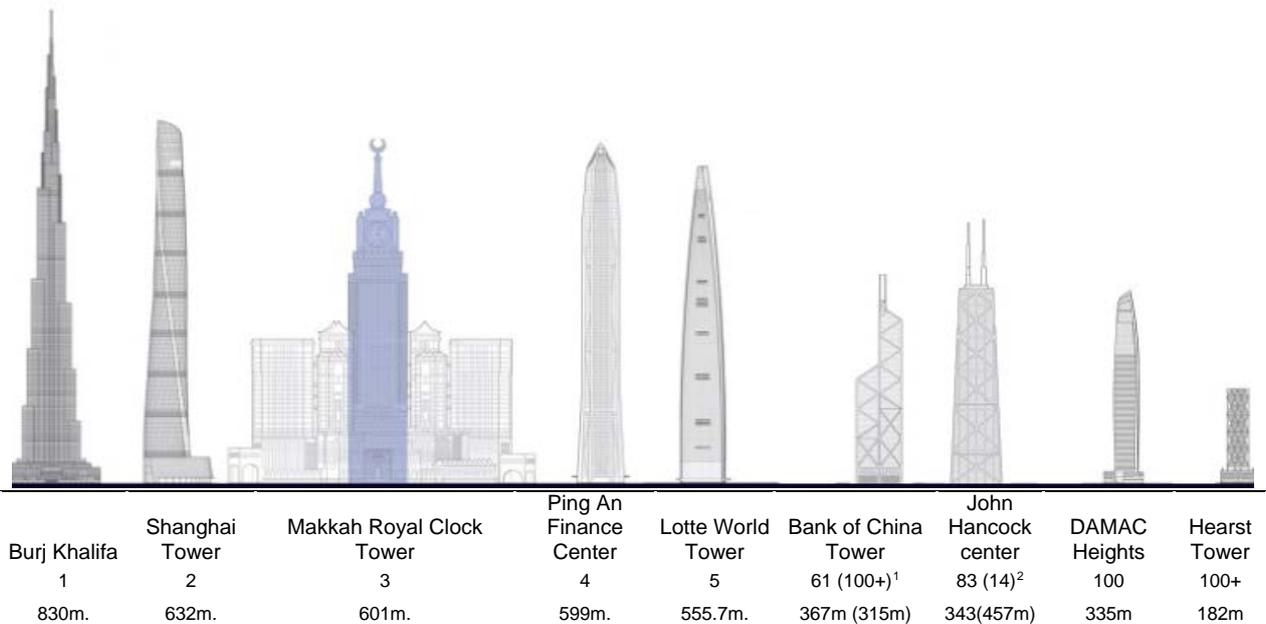


Tabla 3. Tabla comparativa de los cinco edificios más altos en el mundo con dos más altos de exoesqueleto. Se indica en cada caso: edificio, n° que ocupa en el ranking global de altura y altura total del edificio.

En la tabla 3<sup>3</sup> de los cien edificios más altos del mundo se representan 5 primeros - Burj Khalifa, Shanghai Tower, Makkah Royal Clock Tower, Ping an Finance Center y Lotte World Tower. Se comparan con los dos edificios más altos de exoesqueleto - Bank of China Tower y John Hancock Center (n° 61 y n° 83 en el ranking global respectivamente).

Por último se añaden dos ejemplos más, DAMAC Heights que cierra el centenar de edificios más altos y Hearst Tower, un ejemplo de edificio con exoesqueleto de altura media.

De los numerosos edificios correspondientes a la tipología de exoesqueleto con la estructura de acero, por ejemplo: **Burj Al Arab**, Dubai, 1999 de 200/321m, **30 St Mary Axe**, London, 2004 de 167/180m, **HSBC Headquarters**, Hong Kong, 1985 de 180m, **CCTV Headquarters**, Beijing, 2012 de 210/240m, **Capital Gate Tower**, Abu Dhabi, 2007 de 150/165m o **Poly International Plaza**, Beijing, 2016, de 140/160m de altura se han seleccionado siguientes ejemplos:

<sup>1</sup> En el ranking global es el edificio n° 61 más alto del mundo, ya que las antenas formaban parte del proyecto.

<sup>2</sup> En el ranking global es el edificio n° 3 más alto del mundo, no se cuentan las antenas como parte del edificio. Si se considerasen como parte de la altura global, ocuparía el n° 14.

<sup>3</sup> Datos según <https://www.skyscrapercenter.com/buildings>, 100 edificios más altos del mundo.

Edificio	Año	País	Ciudad/Región	Población (hab)	Densidad (hab/km <sup>2</sup> )	Clasificación
John Hancock center	1969	EEUU	Chicago	2.800.000	4.700	3ª ciudad más poblada en EEUU
Bank of China Tower	1992	China	Hong Kong	7.400.000	6.668	Región totalmente urbanizada
Hotel Arts	1992	España	Barcelona	1.600.000	16.100	2ª ciudad más poblada en España
Turning Torso*	2005	Suecia	Malmo	350.000	41	3ª ciudad más poblada en Suecia
Hearst tower	2006	EEUU	Nueva York	8.800.000	10.800	1ª ciudad más poblada en EEUU
Hotel Morpheus	2018	China	Macao	665.000	22.167	Región totalmente urbanizada
181 Fremont Street	2018	EEUU	San-Francisco	884.000	6.800	4ª ciudad más poblada en EEUU

\* Con una población de 350.000 habitantes y una densidad tan pequeña como 41 hab/km<sup>2</sup>, Malmo es 3ª ciudad más poblada e Suecia y la 6ª más poblada en Escandinavia. El Turning Torso es el edificio más alto en Escandinavia.

Tabla 4. Edificios escogidos para el análisis.

Entre los criterios adoptados para la selección de los casos de estudio, destacan los edificios con altura mayor de 150m en ciudades grandes y densamente pobladas. Como criterio principal se ha tomado la aplicación de soluciones innovadoras en cada nuevo ejemplo. Se presta especial atención a los detalles estructurales: en la revista "Arquitectos1985, Arquitectos/Exoesqueleto" se destaca la importancia de los detalles constructivos y estructurales para construcciones de acero.

Los ejemplos seleccionados constituyen cuatro grupos separados por aproximadamente 15 años: 1969-1992-2005-2018 lo que permite analizar las diferentes tipologías desarrolladas y la evolución no solo en perfilaría, uniones o sistema estructural sino en la propia forma de proyectar los edificios. Dichos ejemplos han aparecido como respuesta a las condiciones exteriores, como falta de espacio, búsqueda de nuevo símbolo de la ciudad o condiciones climáticas extremas.

John Hancock center constituye el primer edificio con la estructura vista; Bank of China Tower es el primer edificio mayor de 300m fuera de EE.UU.; el Hotel Arts es un ejemplo paradigmático de exoesqueleto; Turning Torso es el primer edificio alto "retorcido" en el mundo; el Hearst tower supone un ejemplo de modelo a seguir de diagrid; el Hotel Morpheus es el primer edificio sin tener columna interior alguna; el 181 fremont aporta soluciones muy novedosas (2018) en condiciones extremas de alta carga sísmica.

Para cada caso se analiza la tipología y diseño estructural, la proporción en planta entre superficie construida, núcleos de comunicación y la estructura portante. Se medirá la eficacia de la estructura a través del criterio denominado "premium for height", ligeramente modificado (Fig.30)

La metodología consiste en explicar brevemente las variables ante las cuales se enfrenta el autor del proyecto, luego se explican las ideas principales de diseño y las soluciones adoptadas en el proyecto. La primera parte de cada obra se concentra en la descripción arquitectónica y la segunda en el análisis estructural. Empezando por la cimentación y continuando con el exoesqueleto, el análisis en caso necesaria se complementa con las partes pertenecientes a la estructura de hormigón.

Al final, con los datos obtenidos se formalizan tablas y gráficos con la finalidad de realizar un análisis comparativo de las plantas, alturas, uniones, perfilaría, etc.



Tabla 5. Edificios correspondientes a la tipología de exoesqueleto con la estructura de acero.

## JOHN HANCKOK

### CHICAGO, ESTADOS UNIDOS

<b>Año:</b>	1969	<b>Altura:</b>	457m / 100 plantas
<b>Sup. const.:</b>	260.000m <sup>2</sup>		
<b>Arquitecto:</b>	Bruce Graham, Skidmore, Owings & Merrill		
<b>Ingeniero estructural:</b>	Fazlur Rahman Khan, SOM		



John Hancock es un edificio con altura arquitectónica del proyecto de 343m y con altura total de 457m. Los esquemas iniciales habían previsto un complejo de edificios múltiples con un edificio para la oficina y otro para los apartamentos. Este proyecto dejaba muy poco espacio de plaza al nivel del suelo. Por lo tanto, se decidió durante las etapas preliminares de planificación que sería deseable una torre única que incorporara los dos usos. La solución propuesta por Khan ha permitido cumplir con las exigencias - la introducción de cruces en el perímetro de la fachada ha permitido construir una torre de 100 plantas, mezclando las funciones, aumentar la distancia entre columnas perimetrales y proyectar espacios grandes abiertos en el interior.

Es el primer edificio alto con la estructura vista que aprovecha todo el perímetro del edificio para resistir las cargas laterales.

### VARIABLES

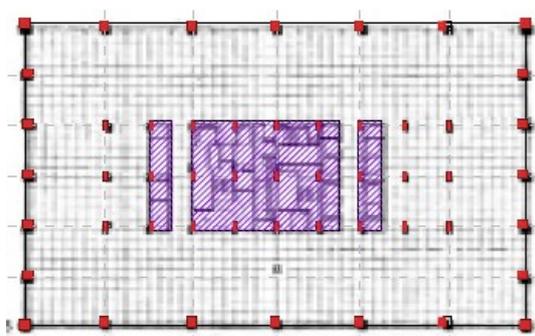
---

- Edificio multiusos - apartamentos y oficinas.
- Plantas más grandes para las oficinas, con menos demanda de luz y ventilación natural.
- Plantas más pequeñas en zona residencial para garantizar la iluminación y ventilación natural en todas las estancias habitables.
- Diseño contra grandes cargas de viento.
- Precio alto del suelo.
- Problemas de balanceo y vibraciones.

### ARQUITECTURA.

---

La planta rectangular va disminuyendo en altura de, aproximadamente, 80 x 50m hasta 50 x 30m., con núcleos de comunicación agrupados en el centro. La distancia entre columnas perimetrales es aproximadamente de 8.4m y de 13.5m. En la planificación de apartamentos, la distancia desde la ventana hasta el núcleo del edificio no se puede usar de manera efectiva, ya que la iluminación y ventilación naturales son factores clave. Los espacios de oficina, sin embargo, podrían ocupar un espacio mucho más profundo desde la pared de la ventana. La consecuencia natural era crear un edificio ancho para oficinas en la parte inferior y uno estrecho para apartamentos en la parte superior.

Área de la planta baja:	4000m <sup>2</sup>	
Núcleos:	570m <sup>2</sup> (14%)	
Altura de la planta:	3.3m	
Plantas sobre rasante:	100	
Ranking Global (altura):	83 en el mundo	
John Hancock center . Planta baja		

## CIMENTACIÓN.

Para combatir todos los efectos de carga, Fazlur Kahn utilizó 239 pozos para los cimientos. Dado que el Centro John Hancock está construido cerca del lago Michigan, el suelo es un tipo de arcilla con baja capacidad de carga. Kahn necesitaba cimientos que alcanzaran el lecho rocoso a profundidades de 36.5-57.9m. A medida que se excavaban los pozos se colocaron encofrados en forma de tubo para retener el suelo y el agua. A medida que se vertía el hormigón, se retiraban los tubos para su reutilización. Además, el sistema de cimentación se compuso de una losa de hormigón en el sótano, una compactación del suelo y una losa de hormigón bidireccional reticulada.

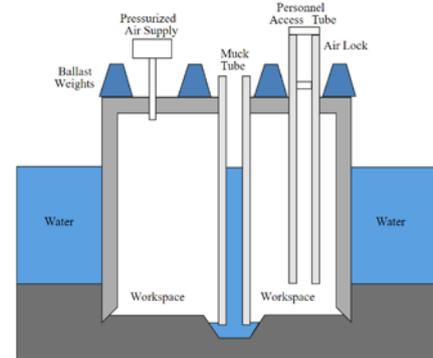


Fig. 9. Cimentación

## SISTEMA ESTRUCTURAL. ESBELTEZ.

SISTEMA ESTRUCTURAL: tubo reforzado  
 ESBELTEZ: 6.9 (343m / 50m)

La forma cónica permite utilizar una estructura continua en las caras exteriores del edificio.

El Sistema estructural consiste en pórticos exteriores arriostrados diagonalmente que actúan juntos como un tubo único. La singularidad del sistema radica en el hecho de que algunas diagonales añadidas en el plano de las columnas exteriores crearon un efecto de caja rígida. Las diagonales de cada cara intersectan en un punto de esquina común para que el cortante, provocado por el viento y transportado axialmente en las diagonales del lado del alma, pudiera transferirse efectivamente a las diagonales del lado del ala del tubo. Las diagonales están conectadas con las columnas exteriores para transferir carga de las diagonales a las columnas. Se colocaron vigas de atado en los niveles donde las diagonales se cruzan con las columnas para que las diagonales pudieran distribuir efectivamente la carga gravitatoria entre las columnas. En consecuencia, las diagonales permanecieron comprimidas bajo la presión del viento, lo que simplificó las conexiones de los miembros. Debido a esta distribución, todas las columnas exteriores de cada cara se hicieron del mismo tamaño. La dimensión total máxima de una columna es de 91,5cm x 91,5cm. en su base y se reduce con altura. La distribución casi uniforme de la tensión en la cara del ala y la disminución lineal aproximada de la tensión en el alma indican un modo de voladizo predominante y un efecto de cortante muy pequeño en el comportamiento de la torre. La adopción del concepto de tubo rígido diagonalmente arriostrado resultó en una cantidad total de acero de 145kg/m<sup>2</sup> (Fig. 30), lo que representa un sistema estructural eficiente y de bajo costo. El forjado consta de una losa de hormigón de 12,7cm colocada directamente sobre vigas de acero.

Las columnas, diagonales y tirantes se fabricaron en una sección en I compuesta por tres placas independientes soldadas entre sí lo que simplifica enormemente los detalles de la unión.

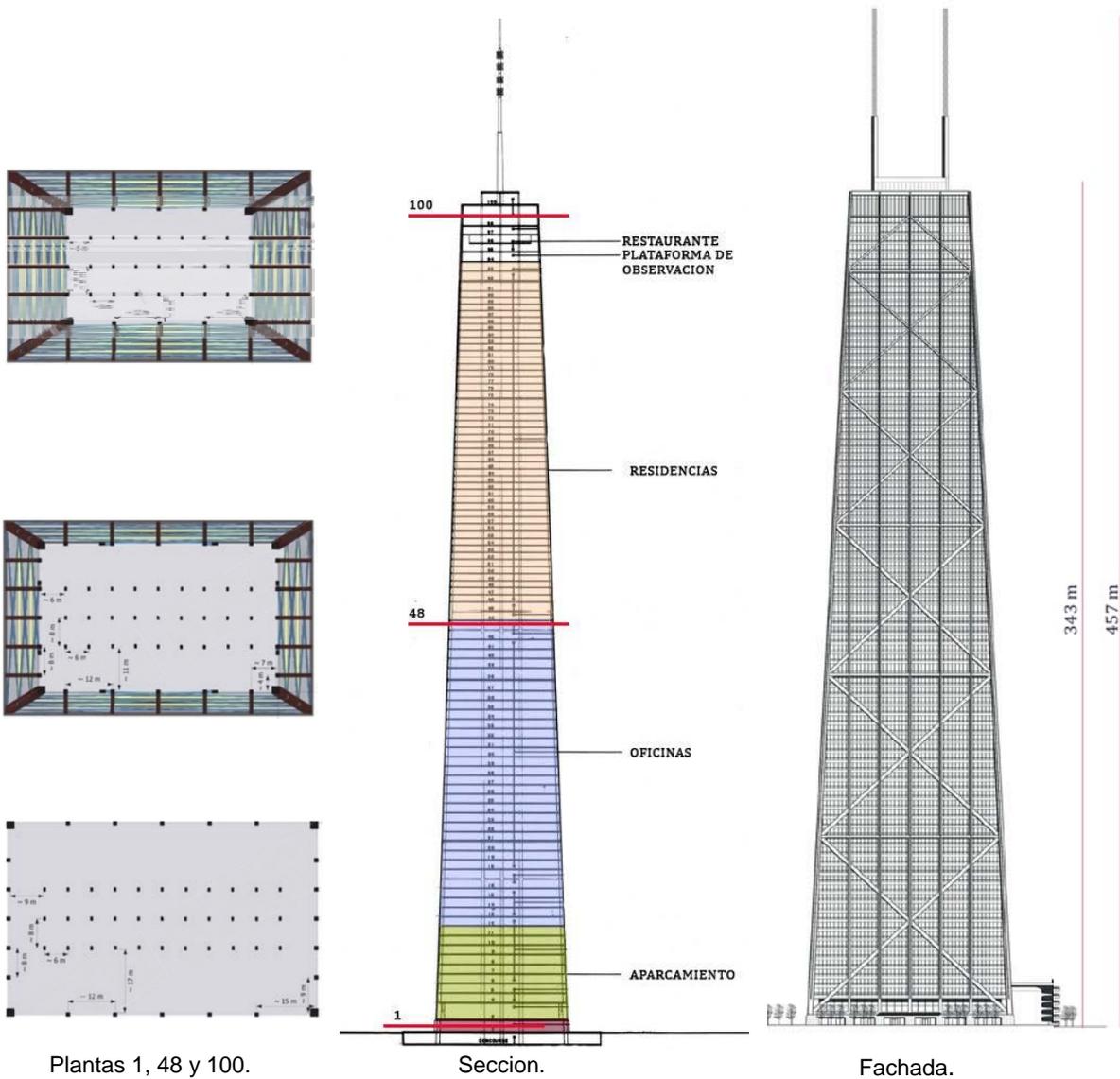


Fig. 10. Edificio John Hancock

Las columnas interiores se diseñaron para cargas de gravedad. La mayor parte de la estructura se fabricó con acero S275JR. La única excepción fueron las placas de refuerzo en las diagonales de las juntas de las columnas. La soldadura se aplicó solo con los tirantes principales y empalmes de columnas. La Fig. 11 muestra detalles de una unión central de arriostramientos y soportes. La unión consta de placas de refuerzo dobles a las que los miembros diagonales están conectados con pernos. Los detalles simplificados dieron como resultado una velocidad de construcción de la estructura de 3 plantas por semana.

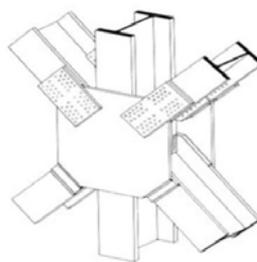


Fig 11. Union central arriostramientos.

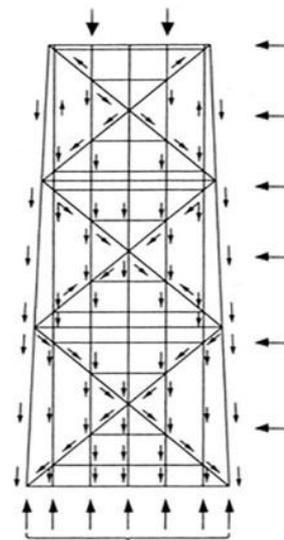


Fig 12. Esquema parcial de distribucion de cargas.

## BANK OF CHINA TOWER

### HONG KONG, CHINA

<b>Año:</b>	1990	<b>Altura:</b>	367 / 70 plantas
<b>Sup. const.:</b>	135.000m <sup>2</sup>		
<b>Arquitecto:</b>	leoh Ming Pei Sherman Kung		
<b>Ingeniero estructural:</b>	Leslie E. Robertson Associates RLLP		



Bank of China Tower es un edificio que alcanza los 288m con su última planta y tiene una altura total de 367m. Constituye el primer edificio de altura superior a 300m fuera de Estados Unidos. En Hong Kong hay muchas tormentas tropicales y el viento suele ser el doble de fuerte que el de Nueva York.

A diferencia del tubo reforzado propuesto por Kahn, en este edificio se combinan varias tipologías estructurales. El edificio consiste en cuatro torres triangulares de alturas variadas.

### VARIABLES

---

- Edificio multiusos - apartamentos y oficinas.
- Búsqueda de expresión.
- El edificio más alto fuera de EE.UU en el momento de construcción.
- Plantas más pequeñas en la zona residencial para garantizar la iluminación y ventilación natural en todas las estancias habitables.
- Diseño contra grandes cargas de viento.
- Precio alto del suelo.
- Problemas de balanceo y vibraciones debido a la distribución de cargas no uniforme.

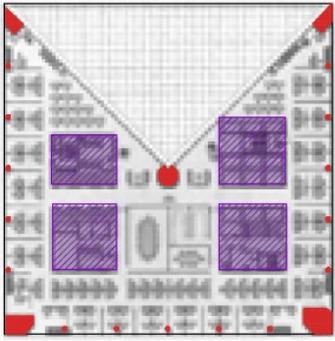
### ARQUITECTURA

---

La superficie base del edificio del Banco de China es de aproximadamente 2500m<sup>2</sup>, con dimensiones en planta aproximadamente 50x50m y con una superficie total construida de 135 000m<sup>2</sup>. El edificio tiene 70 plantas de altura y 4 plantas de estacionamiento en el sótano.

La entrada principal norte es el vestíbulo, que está diseñado con un pasillo de doble arco, que recuerda al símbolo de China: el arco de la Gran Muralla. A ambos lados del vestíbulo se encuentra la zona de ascensores. Hay un total de 45 ascensores.

La tercera planta es el salón de negocios, la 17 es un restaurante y salón de banquetes para el personal senior, y el resto son espacios de oficinas bancarias. En la planta 43, hay una pequeña zona de observación abierta al público. Pei planteó la sala de máquinas del edificio del Banco de China en Hong Kong en el piso 69, creando una sala de vidrio en el piso superior, una plataforma de observación, introduciendo la luz del sol y el paisaje.

Área de la planta tipo:	2500m <sup>2</sup>	
Núcleos:	420m <sup>2</sup> (14.9%)	
Altura de la planta:	4m	
Plantas sobre rasante:	70	
Ranking Global:	61 en el mundo	
Bank of China Tower. Planta baja		

## CIMENTACIÓN

Para resistir las cargas gravitatorias y laterales a nivel de suelo se plantea un sistema de pozos de cimentación. Consta de pilotes de hormigón de 6m de lado construidos bajo la ubicación de las columnas estructurales (en esquinas). El hormigón se coloca (vierte) en moldes de acero.

## SISTEMA ESTRUCTURAL

SISTEMA ESTRUCTURAL: Celosía espacial, megatubo reforzado, tubo agrupado.

ESBELTEZ: Variable porque presenta cuatro diferentes alturas. Si consideramos dimensiones totales en la base en relación con la altura obtenemos: 367/50: 7.3.

I. M. Pei adoptó una nueva forma como estructura, apoyándose en cuatro grandes columnas ubicadas en las cuatro esquinas de todo el edificio de planta cuadrada para soportar todo el peso, y grandes "X" de acero en las paredes exteriores. Como parte integral de toda la estructura, la carga vertical se distribuye a las grandes columnas en las cuatro esquinas, eliminando así la necesidad de muchos pilares dentro del edificio. En las esquinas los perfiles metálicos están recubiertos con hormigón para reducir el pandeo y se complementan con una columna central a partir de la planta 19 para unificar la distribución de cargas no lineales debido a diferentes alturas de las partes del edificio. Esta estructura no sólo dota al edificio de un soporte fuerte y estable, sino que también consume casi la mitad del acero en comparación con los edificios tradicionales de la altura correspondiente. Las cuatro torres triangulares están levantadas a diferentes alturas y las cargas van de la columna central a las que se encuentran en los ángulos, formando un armazón triangular, a la vez que la estructura de tres dimensiones unidas en el plano horizontal ofrecen una planta diáfana.

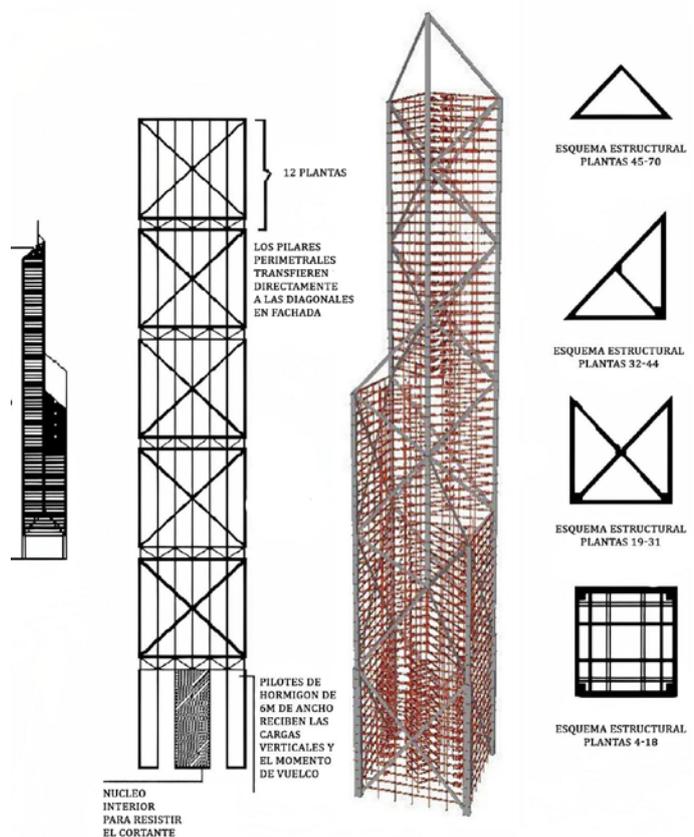


Fig 13. Sistema estructural.

HOTEL ARTS			
BARCELONA, ESPAÑA			
<b>Año:</b>	1992	<b>Altura:</b>	154m / 44 plantas
<b>Sup.const.:</b>	51.100m <sup>2</sup>		
<b>Arquitecto:</b>	Bruce Graham		
<b>Ingeniero estructural:</b>	Bruce Graham, Skidmore, Owings & Merrill		



Constituye el único caso de estudio del oeste del Europa en el análisis, representado por un hotel construido en Barcelona en 1992. En el proceso de grandes transformaciones de la ciudad ha surgido la necesidad de un hotel que a la vez sería un hito arquitectónico. Si en los ejemplos anteriores la estructura estaba pegada a la fachada, en Barcelona encontramos un ejemplo de una estructura de exoesqueleto paradigmático ya que la estructura portante se encuentra totalmente exterior y se separa de la fachada 1,5m.

## VARIABLES

- Uso hotelero.
- Programa Olímpico de 1992 en Barcelona.
- Necesidad de establecer un “skyline” reconocible para la ciudad.
- Papel importante en el planeamiento urbanístico.

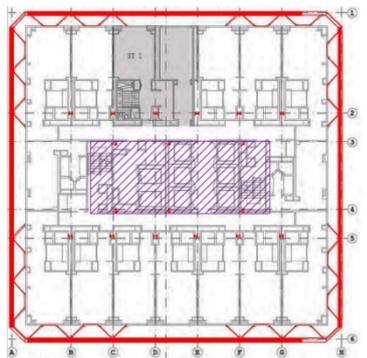
## ARQUITECTURA

Es una torre que alberga un hotel de cinco estrellas con 44 plantas, 154m de altura y una planta de 33x33m, donde se concentran habitaciones, núcleos de comunicación, zonas de mantenimiento y superficies técnicas.

El Hotel Arts Barcelona es un edificio emblemático de Barcelona (Cataluña, España). Fue construido entre 1991 y 1992 a la entrada del puerto olímpico que se construyó en la ciudad con motivo de los Juegos Olímpicos de 1992.

Es una torre de vidrio de colores verdes y grises, rodeada de una estructura de acero de color blanco, que fue diseñada por el arquitecto colombiano Bruce Graham.

El hotel alberga media docena de restaurantes, entre ellos el del chef Sergi Arola. En los bajos de la torre se encuentran varios locales de ocio, entre ellos el Casino de Barcelona. Frente a la fachada sur de la torre se levanta la escultura de un gran pez metálico dorado, obra de Frank Gehry, otro de los elementos emblemáticos del entorno del edificio.

Área de la planta tipo:	1090m <sup>2</sup>	
Núcleos:	150m <sup>2</sup> (13.8%)	
Altura de la planta:	3m	
Plantas sobre rasante:	44	
Ranking Global(altura):	5859 en el mundo	
Hotel Arts. Planta 2		

## SISTEMA ESTRUCTURAL

### SISTEMA ESTRUCTURAL: Megatubo reforzado ESBELTEZ: 4.7

El exoesqueleto de acero del Arts compone una gran malla tridimensional que confiere una imagen sólida al edificio. Esta mega estructura se dispone en las 4 fachadas con una modulación de 11x3. Los módulos en esquina están arriostrados en "X" en toda la altura, mientras que los módulos centrales sólo en tres alturasal de cada fachada, que se corresponden con los tramos 1, 7 y 11. Para los tramos restantes, se dispusieron elementos de refuerzos verticales secundarios, que se proyectan a través de las columnas en dirección ortogonal, para mejorar la estabilidad del marco exterior. Las cruces formadas por las vigas de las esquinas actúan como las barras de una viga Pratt en voladizo, o sea que actúan contra los esfuerzos de flexocompresión provocados por los empujes horizontales, como el viento. Las fachadas están conectadas entre sí por vigas continuas a lo largo de las esquinas, generando una expresión achaflanada, que sirven para establecer la eficacia en voladizo de un sistema tubular equivalente. Para maximizar la articulación del armazón, todos los elementos son de secciones abiertas para las vigas y columnas y, a diferencia de los dos ejemplos anteriores, secciones cruciformes para arriostramientos. El exoesqueleto en acero se separa aproximadamente 1,50 metros del perímetro de la edificación. Esto responde a determinados criterios que son de estricto cumplimiento de las normas de incendios.



Fig 14. Arriostramientos Hotel Arts.

La mega estructura para evitar la torsión se conecta, según sea necesario, a nivel del forjado por diagonales tipo barra en un plano horizontal. En el interior, el diseño dispone de dos ejes de columnas, separadas a 4.6 metros. El forjado está compuesto por un forjado colaborante de 75mm y 115mm de hormigón con acabado en piedra.

Como resultado se obtiene que el peso de acero en la mega estructura de la torre es de 87 kg/m<sup>2</sup>.(Fig.30)

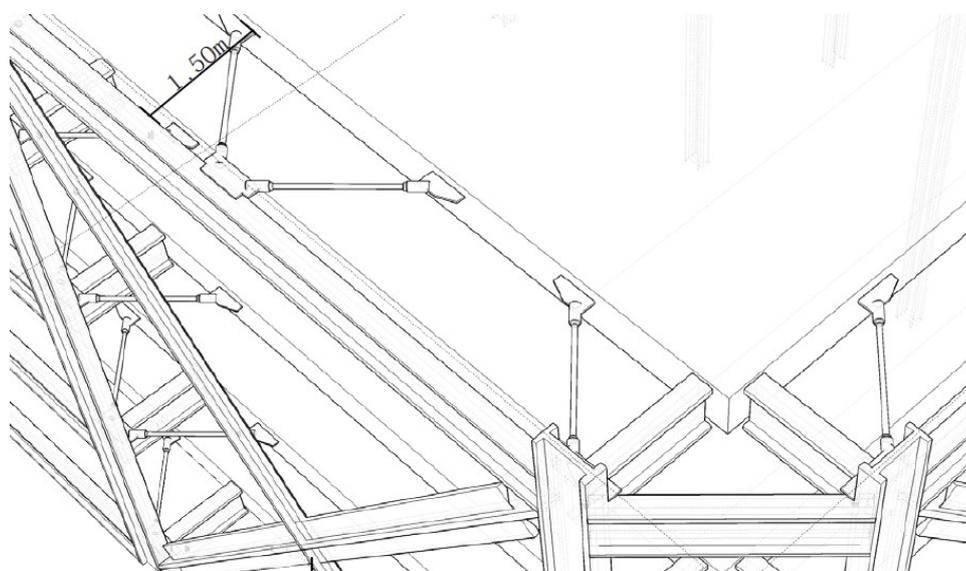


Fig 15. Sistema estructural Hotel Arts. Vinculacion de los forjados con el exoesqueleto.

TURNING TORSO			
MALMO, SUECIA			
Año:	2005	Altura:	190m / 59 plantas
Sup.const.:	31.500m <sup>2</sup>		
Arquitecto:	Santiago Calatrava		
Ingeniero estructural:	Santiago Calatrava		



J.E. Gordon en el libro “Estructuras o por que las cosas no se caen” habla de que la necesidad de resistir esfuerzos de torsión grandes, está prácticamente confinada a las estructuras artificiales como los barcos y los aviones. La naturaleza casi siempre consigue evitar la torsión, y por lo tanto, al menos en lo que concierne a animales grandes, son poco comunes los exoesqueletos, como estructuras menos resistentes a la torsión.

Tras 13 años, igual que Bruce Graham en Barcelona, Santiago Calatrava fue encargado de una torre con necesidad de crear un nuevo “skyline”, hacer un símbolo reconocible en una ciudad importante de origen industrial.

Construido en 2005, el Turning Torso es un rascacielos ubicado en Malmö, Suecia y se considera el primer edificio de gran altura retorcido y el edificio más alto en Escandinavia.

A pesar de que la naturaleza intenta evitar los exoesqueletos con formas retorcidas, Santiago Calatrava ha encontrado la forma de resolver el problema estructural de un edificio de 190 m uniendo el edificio “retorcido” con una estructura de acero exterior.

## VARIABLES

- ◆ Edificio multiusos - apartamentoss y oficinas.
- ◆ Necesidad de reestablecer un “skyline” reconocible para la ciudad.
- ◆ Necesidad de nuevo símbolo al desaparecer la enorme grúa que simbolizaba, las raíces de Malmö como ciudad industrial.
- ◆ Suecia, relación con el medio ambiente (100% de energía renovable).

## ARQUITECTURA

El edificio de 59 plantas tiene 190m de altura y está compuesto por 9 unidades de cajas

llamadas módulos, cada una de 5 plantas. Entre cada módulo existe una planta vacía, lo que crea la ilusión de módulos flotantes. Uno de los aspectos más distintivos del edificio es que tiene un exoesqueleto de acero.

Las oficinas se sitúan en los dos primeros módulos de la construcción. Los módulos de tres a nueve albergan 147 viviendas. Cada planta, de forma pentagonal apuntada, tiene dimensiones de 34 x 24 m. Está rotada respecto al eje del núcleo central, de manera que el giro total entre las plantas extremas del edificio es 90°. Las dos últimas plantas (desde las que se puede ver Copenhague, a 28km del Malmo) están dedicadas a reuniones de negocios, encuentros políticos y visitas oficiales.

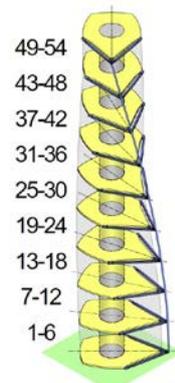
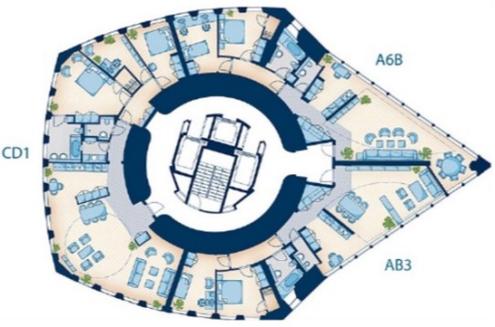


Fig 16. Concepto Turning Torso.

Área de la planta tipo:	400m <sup>2</sup>	
Núcleos:	90m <sup>2</sup> (22.5%)	
Altura de la planta:	3m	
Plantas sobre rasante:	59	
Ranking Global:	2515 en el mundo	
Turning torso. Planta tipo.		

## CIMENTACIÓN

La cimentación del núcleo central de la torre Turning Torso es una losa cilíndrica con un diámetro de 30m y una profundidad de 7m. La cimentación de la celosía exterior es de pilotes clavados en una base de roca caliza sólida a aproximadamente 15m bajo el nivel del suelo. La cimentación está formada por pilotes cuadrados prefabricados que se anclan al estrato rocoso. La fuerza de pretensado de los anclajes debe ser superior a la máxima tracción sobre la cimentación, para que los pilotes estén permanentemente en compresión. Las cargas externas variables provocan en la cimentación únicamente una variación de la compresión en los pilotes y en la tracción de los anclajes.

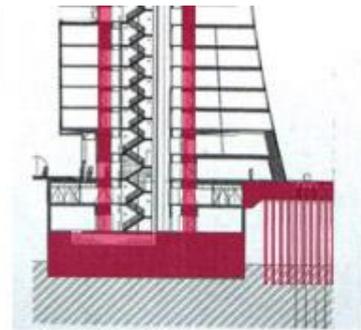


Fig 17. Cimentacion Turning Torso

## SISTEMA ESTRUCTURAL

SISTEMA ESTRUCTURAL: Celosía metálica  
ESBELTEZ: 7.9

Una diferencia clave entre este edificio y la mayoría de los demás es la ubicación de las columnas. Para entender el funcionamiento del exoesqueleto, una breve explicación del proyecto:  
En lugar de tener todas las columnas en el perímetro, tiene una enorme columna en el medio que se lleva casi toda la carga. Este “mega núcleo” es un cilindro de hormigón cuyo centro hueco proporciona espacio para el sistema de ascensores y escaleras. Tiene un diámetro interior constante de 10,6m y las paredes de 2.5m de espesor abajo y 0.4m arriba.

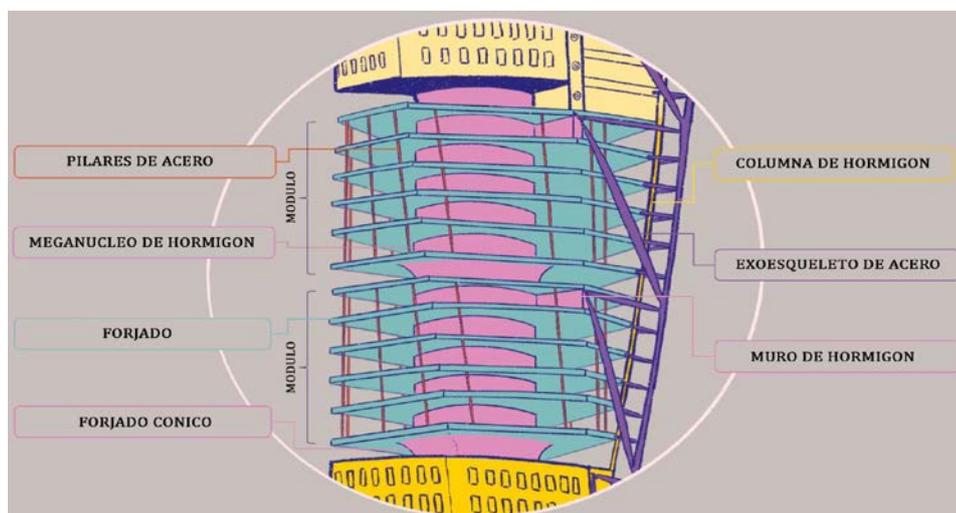


Fig 18. Sistema estructural Turning Torso

Cada planta está conectada al mega núcleo y se soporta por columnas de acero. Las columnas de acero están ligeramente inclinadas, lo que crea una "desalineación", pero solo soportan parte de la carga de su módulo respectivo.

A diferencia de otros ejemplos donde el exoesqueleto se lleva toda la carga del edificio, en este proyecto la celosía metálica exterior es solo para proporcionar estabilidad horizontal al edificio.

Está formada por un cordón principal o "espina" (tubo de diámetro 900mm), a la que se unen elementos diagonales y horizontales de diámetro variable, desde los 750mm en el centro hasta un diámetro de 300mm en los extremos. Estos elementos de diagonalización se anclan a la estructura de hormigón. Adicionalmente, el cordón principal está arriostrado en cada planta por medio de un elemento lineal (estabilizador), que se ancla en la zona de la punta de las losas de hormigón, y que evita la inestabilidad de Fig 16. Sistema estructural T en compresión.

En cada cubo el cordón principal está articulado mediante uniones bulonadas para proporcionarle mayor flexibilidad e impedir la aparición de esfuerzos hiperestáticos debido a la proximidad entre arriostramientos y uniones de diagonales. Las diagonales y horizontales están unidas en sus extremos por cartelas soldadas.

Frente a las acciones de viento, el exoesqueleto agrega rigidez para asegurarse de que el edificio no se mueva demasiado.

Otro aspecto para reducir el efecto de las cargas de viento sobre el edificio fue la forma. Por lo general, los edificios tienen forma cuadrada o rectangular, pero en este caso, el edificio tiene forma pentagonal. Esta configuración fue desarrollada para ser más aerodinámica y, de esta manera, reducir las cargas de viento en algunas direcciones del edificio. Debido a esta forma, el exoesqueleto solo debe colocarse en un lado del edificio en lugar de en todo el perímetro.



*Fig 19. Imagen del cordón principal del exoesqueleto y sus elementos de conexión con los forjados.*

HEARST TOWER			
MANHATTAN, NUEVA YORK, EE.UU.			
Año:	2006	Altura:	182m / 46 plantas
Sup.const.:	80.000m <sup>2</sup>		
Arquitecto:	Foster + Partners		
Ingeniero estructural:	WSP Cantor Seinuk		



Hearst tower es una de las mejores aplicaciones del sistema diagrid en edificios en altura. Los ángulos, las achaflanadas “bocas de pájaro”, los triangulaciones, etc.

## VARIABLES

- Preexistencia: una fachada existente de piedra de seis pisos que se conserva.
- Pequeña parcela.
- La nueva Torre Hearst tenía que servir como un poderoso símbolo de progreso empresarial en un mundo posterior al 11 de septiembre de 2001.
- Importancia de la sostenibilidad.

## ARQUITECTURA

Norman Foster vació por completo el antiguo edificio diseñado por John Urban respetando tan sólo la antigua fachada. El espacio que queda entre la antigua fachada y el nuevo edificio de Foster fue aprovechado para permitir la luz natural en su interior haciendo uso de grandes paneles acristalados; a través de este importante espacio del Lobby se conectan todos los servicios del edificio.

El edificio cuenta con planta baja de aproximadamente de 60 x 60m (edificio antiguo) sobre cual emerge una torre con planta de 38x52m. Con 46 plantas y 182m de altura cuenta con 80.000m<sup>2</sup> construidos. El volumen principal descansa sobre 12 pilares arriostrados con diagonales en el vestíbulo.

La característica más destacada de la torre es el patrón geométrico de vidrio y acero, una malla diagonal de estructuras trianguladas portantes que reviste la fachada con triángulos de cuatro plantas.

Gracias a la capacidad del diagrid de resistir esfuerzos cortantes, Foster ha podido mover el núcleo de ascensores hacia el oeste, donde la torre limita con otro edificio.

Área de la planta tipo:	2000m <sup>2</sup>	
Núcleos:	235m <sup>2</sup> (12%)	
Altura de la planta:	4m	
Plantas sobre rasante:	46	
Ranking Global:	3015 en el mundo	
Hearst tower. Planta baja		

## CIMENTACIÓN

En cuanto al estudio del terreno, las pruebas indicaron una fuerte caída en el estrato de roca de la parcela con una variación de 1 a 9 metros aproximadamente. Por lo tanto, casi la mitad de la torre apoya sobre el estrato de la roca, mientras que la otra mitad lo hace sobre unos pozos de cimentación de resistencia equivalente empotrados en la roca.

## SISTEMA ESTRUCTURAL

SISTEMA ESTRUCTURAL: Diagrid  
ESBELTEZ: 4.8

La estructura debajo de la planta 10 está diseñada para sostener una gran altura no arriostrada mediante el uso de un sistema de megacolumnas. Las megacolumnas se fabrican principalmente con secciones de tubos rectangulares de acero y se rellenan con hormigón. Se proporcionan superdiagonales interiores adicionales debajo del piso 10 para ayudar al sistema.

El sistema estructural de la torre es una malla triangulada que interconecta las cuatro caras de la torre, creando así una estructura tubular altamente eficiente.

La resistencia de la rejilla diagonal proporcionaron una ventaja significativa para el requisito de estabilidad general de la torre bajo cargas sísmicas, de viento y de gravedad, al mismo tiempo dando un sistema estructural altamente eficiente, de  $125\text{kg/m}^2$ , que consume un 20% menos de material de acero en comparación con las estructuras de pórtico resistente a momento convencionales. Los miembros de diagrid son típicamente secciones de acero laminado de ala ancha. El sistema lateral secundario en este proyecto está definido por un pórtico arriostrado en el área del núcleo de servicio, hormigonado hasta la décima planta.

Los nodos son uno de los elementos de diseño clave tanto estructural como arquitectónicamente. Todos los nodos están prefabricados y son instalados en el sitio utilizando conexiones atornilladas en todos los casos.

El diseño de las esquinas achaflanadas, que se denominan "boca de pájaro", fueron la evolución natural del refinamiento de las opciones estructurales y arquitectónicas. Esto no solo acentúa el carácter estético de la diagrid, sino que también mejora el comportamiento vibracional mediante voladizos de 6m en las esquinas de cada ocho plantas.

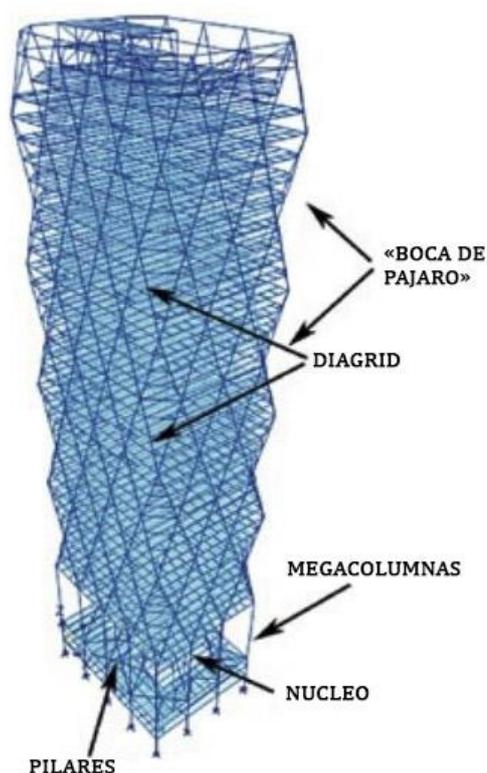


Fig 20. Sistema estructural Hearst Tower



Fig 21. Nudo Hearst Tower

Para continuar el análisis es necesario hacer una pequeña digresión. El diseño de edificios de gran altura en el siglo XXI está muy relacionado con el desarrollo de la tecnología, los medios informáticos y la aparición de programas como Grasshopper, etc.

La aparición del diseño paramétrico en la arquitectura contemporánea ha generado un debate sobre el material utilizado para construir estas nuevas estructuras y su sostenibilidad en relación con la materialización de una idea arquitectónica.

En el artículo "El potencial creativo de la estructura en la arquitectura actual" del Alejandro Bernabeu Larena, de la revista "Arquitectos/Esqueletos" de 2008, se examina cómo el desarrollo de nuevas formas estructurales y arquitectónicas está relacionado con la aparición de nuevos materiales y sistemas estructurales, desde la utilización del hierro en el siglo XIX hasta la aparición de materiales como el PVC o polímeros en el siglo XX. Se destaca la importancia de la experimentación y el conocimiento del nuevo material para lograr la adecuación de materiales, estructuras y formas. El artículo también señala cómo en algunos casos, la búsqueda de una plasticidad personal ha llevado a alejarse de las propiedades y características intrínsecas del material, en busca de una estética única.

La libertad arquitectónica actual describe la situación actual en la arquitectura y la ingeniería, en la que la ausencia de nuevos materiales se contrapone al intenso desarrollo informático y tecnológico. Esto ha generado un control sin precedentes sobre las estructuras y una situación en la que prácticamente cualquier planteamiento formal puede ser resuelto y construido.

La componente creativa de la estructura está definida por la indeterminación del problema estructural, ya que no existe una única solución a una cuestión estructural determinada, sino que existen numerosas estructuras posibles. Además, se resalta que la estructura tiene un ritmo preciso y determinado que afecta al espacio en el que se sitúa. Por lo tanto, la estructura no es solo capaz de garantizar la estabilidad del proyecto, sino que también puede desarrollar una función primordial en la definición del espacio en el que se sitúa. Los profesionales deben proponer nuevos recursos y estrategias de diseño estructural para encauzar y guiar el desarrollo creativo de los proyectos, ofreciendo una mayor integridad conceptual, desarrollando herramientas de diseño y recuperando y promoviendo la relevancia de la estructura en el proyecto arquitectónico.

# HOTEL MORPHEUS

<b>MACAO, CHINA</b>			
<b>Año:</b>	2018	<b>Altura:</b>	154m / 42 plantas
<b>Sup.const.:</b>	150.000 m2		
<b>Arquitecto:</b>	Zaha Hadid		
<b>Ingeniero estructural:</b>	Zaha Hadid		



El edificio de una forma irregular sin columnas interiores dio un impulso al desarrollo del diseño paramétrico. El equipo de ingenieros desarrolló durante 4 meses unas herramientas informáticas para poder resolver la complejidad del sistema. Una forma de proyectar diferente a lo visto anteriormente.

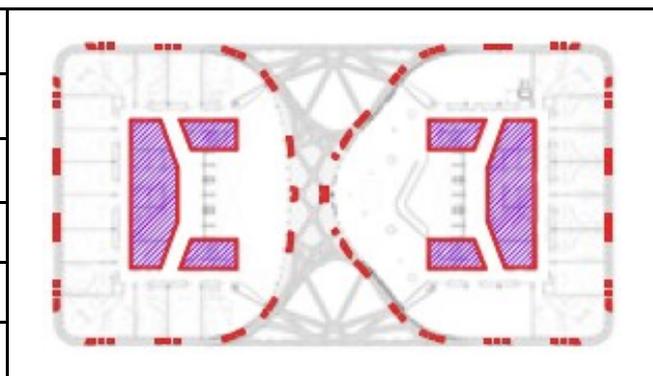
## VARIABLES

- Edificio multiusos.
- Imagen de una ciudad turística.
- Diseño contra grandes cargas de viento (viento de tifón).
- Trayectorias de carga complejas.
- Aprovechamiento del espacio.

## ARQUITECTURA

Morpheus es un hotel insignia en el complejo 'City of Dreams' en Macao, un complejo de ocio y entretenimiento de primer nivel. Dentro de sus aproximadamente 150.000m<sup>2</sup> de superficie hay un atrio de siete pisos, 780 habitaciones de hotel, suites y villas, varios restaurantes, tiendas de lujo, puntos de venta, instalaciones para juegos y eventos y una piscina bajo el cielo. La estructura de 42 plantas tiene dos núcleos, una forma exterior muy irregular y un exoesqueleto estructural de acero revestido con aluminio, con conexiones de tal escala y complejidad que posiblemente sean las conexiones de acero a gran escala más desafiantes desde el punto de vista analítico y geométrico jamás construidas (2018). El trabajo de diseño estructural enfrentó desafíos de ingeniería que surgieron de las condiciones climáticas asociadas a vientos tifones, los requisitos de diseño sísmico, las trayectorias de carga complejas y la geometría altamente irregular del edificio.

Área de la planta baja:	5500m <sup>2</sup>
Núcleos:	530m <sup>2</sup> (9.5%)
Altura de la planta:	3.5m
Plantas sobre rasante:	42
Ranking Global(altura):	5924 en el mundo
Hotel Morpheus. Planta 23.	



## CIMENTACIÓN

No hay mucha información del tipo de la cimentación pero se conoce que cuando el equipo de Zaha Hadid se incorporó al proyecto promovido por Melco Resorts & Entertainment en 2012, la parcela ya contaba con una cimentación de un proyecto previo. En lugar de convertirse en un inconveniente para el nuevo proyecto, el estudio diseñó un edificio que aprovechaba los mismos cimientos para erigir 42 plantas, que disponen de dos núcleos de comunicación que se conectan en la base del edificio y en su azotea.

## SISTEMA ESTRUCTURAL

### SISTEMA ESTRUCTURAL: ESBELTEZ: 3

El concepto de diseño del Morpheus Hotel se envuelve alrededor de los dos núcleos de 160m de altura, uniéndolos con una estructura exterior curvada irregular.

En términos estructurales, el exoesqueleto de acero y dos núcleos internos de hormigón actúan juntos para proporcionar resistencia a la carga lateral, compartiendo las cargas sísmicas y de viento en proporción a la rigidez. Los forjados están compuestos por vigas y losas que se extienden entre el exoesqueleto y los núcleos. Los miembros y las conexiones se fabricaron con chapa de acero de hasta 150mm de espesor y generalmente se atornillaban juntos en las conexiones en las regiones planas.

Con una geometría tan compleja e irregular, quedó claro desde el principio que los métodos tradicionales basados en código para el diseño de conexiones de estructuras de acero y los paquetes de software de dibujo estándar no proporcionarían un enfoque adecuado para el diseño detallado de las conexiones del exoesqueleto. Por tanto, el equipo de BuroHappold decidió que el análisis de elementos finitos (AEF) sería la única alternativa viable para analizar los estados de tensión complejos que existen en las uniones y verificar su adecuación estructural. También quedó claro que los paquetes de software estándar no tendrían la funcionalidad requerida para crear la documentación de construcción. Para complicar aún más las cosas, dado que el exoesqueleto estaría revestido de aluminio, todas las conexiones y las placas y pernos asociados tendrían que estar ubicados dentro de la zona de revestimiento definida por el arquitecto.

Para cumplir con el agresivo programa de construcción del proyecto hotelero 'City of Dreams', BuroHappold necesitaba desarrollar un enfoque de vanguardia para el complejo diseño y la documentación de las conexiones del exoesqueleto. Esto implicó un análisis de elementos finitos completo de más de 2500 conexiones para 105 casos de carga. Todo el proceso se ejecutó utilizando scripts Grasshopper paramétricos personalizados, que integraron con éxito MIDAS, RSA, Rhino3d y Excel.

La decisión inicial de pasar los primeros cuatro meses del programa de 12 meses desarrollando el proceso y escribiendo/probando los scripts paramétricos fue audaz, pero valió la pena más tarde cuando algunas de las conexiones se crearon, analizaron y documentaron en menos que una hora.



Fig 22. Sistema estructural Hotel Morpheus



Fig 23. Union Hotel Morpheus

## 181 FREMONT STREET

SAN-FRANCISCO, CALIFORNIA, EE.UU

**Año:** 2018    **Altura:** 250m (210m)/57 plantas

**Sup.const.:** 63.500m<sup>2</sup>

**Arquitecto:** Heller Manus Architects

**Ingeniero estructural:** Arup



Al mismo tiempo que BuroHappold estaban desarrollando métodos informáticos para el cálculo del edificio Morpheus, la empresa multinacional británica ARUP se centraban en la búsqueda de mecanismos que les permitiesen ahorrar en material, espacio y concentrar toda la estructura portante en el perímetro. Es un ejemplo donde en la estructura se incorporan medios mecánicos, como arriostramientos reforzados o amortiguadores viscosos, para resistir las cargas de viento y del sismo. Dichas soluciones se buscan para el máximo aprovechamiento del espacio en una parcela tan pequeña como de 36x27m.

### VARIABLES

---

- ◆ Edificio multiuso, oficinas y residencias.
- ◆ Precio alto del suelo.
- ◆ Problemas de balanceo y vibraciones.
- ◆ Muy alta carga sísmica.
- ◆ Pequeña parcela que requiere la ubicación de toda la estructura en perímetro.

### ARQUITECTURA

---

Una torre de 57 plantas, 36x27m en su base, 181 Fremont es el tercer edificio de uso mixto más alto al oeste del río Mississippi. Combina 37 niveles de oficinas y 20 niveles que se reparten en 67 apartamentos de lujo en los pisos superiores y con espacio comercial en el primer y séptimo piso. Se propuso desarrollar un edificio exclusivo que ofreciera la sensación de un espacio de oficinas con calidad de Silicon Valley y con todas las comodidades del centro de San Francisco, incluida la integración con el nuevo centro de tránsito.

Los promotores tuvieron que reducir la altura del proyecto original para cumplir con el límite de altura de 213m de la parcela.

La torre fue diseñada para exceder los objetivos de rendimiento sísmico exigidos por el "Código de Construcción de California" para nuevos edificios altos siguiendo un enfoque de "diseño basado en la resiliencia" - reocupación inmediata y una interrupción limitada de la funcionalidad después de un terremoto con frecuencia de 475 años<sup>4</sup>, es decir, la funcionalidad se restablece una vez que se restauran los servicios públicos.

---

<sup>4</sup> nivel de evento sísmico con entradas de movimiento del suelo correspondientes a un período de frecuencia de 475 años.

Área de la planta tipo:	1080m <sup>2</sup>	
Núcleos:	250m <sup>2</sup> (23%)	
Altura de la planta:	3.5m	
Plantas sobre rasante:	57	
Ranking Global(altura):	640 en el mundo	
181 Fremont Street. Planta 5		

## CIMENTACIÓN

Los pozos de cimentación se anclaron al lecho de roca a una profundidad de 80m. La conexión con el lecho rocoso ayuda al edificio a evitar problemas de asentamiento con las capas de suelo circundantes y, al mismo tiempo, proporciona suficiente espacio para que los cimientos se muevan durante un evento sísmico.



Fig 24. Boceto esquema cimentación

## SISTEMA ESTRUCTURAL. ESBELTEZ.

SISTEMA ESTRUCTURAL: celosía espacial  
ESBELTEZ: 9.1

Con solo 1,400m<sup>2</sup> de la parcela, los equipos de diseño e ingeniería fueron obligados a pensar en nuevas formas de construir una estructura esbelta de 57 plantas que pudiera cumplir con los requisitos sísmicos de San Francisco.

El edificio tiene un núcleo de acero y una estructura perimetral con forjados de chapa colaborante sobre una estructura de acero. La Figura 25 muestra el sistema estructural con el mega-marco resaltado en amarillo de megacolumnas y mega-arriostramientos, que resisten las cargas laterales. En los niveles de oficinas, los mega-arriostramientos de acero se extienden desde el nivel del suelo hasta el Nivel 20 y desde los niveles 20 al 37. Entre los Niveles 37 y 39 un pórtico arriostrado en forma de "cheurón" invertido proporciona continuidad a las fuerzas laterales desde los niveles de apartamentos hasta los niveles de oficina para albergar los servicios y la maquinaria.

Grandes secciones en I conforman las riostras perimetrales sobre el Nivel 39. En general, las cargas axiales verticales son resistidas por megacolumnas de acero de sección cuadrada de 91.44 x 91.44cm en la base y disminuyendo en altura hasta el nivel 39. A partir de la planta 39 son secciones en I. El hormigón rellena las columnas hasta el nivel 21.

Un sistema secundario transfiere las cargas de los forjados individuales hacia abajo a las ubicaciones de mega-nodos (en los niveles 3, 20 y 37).

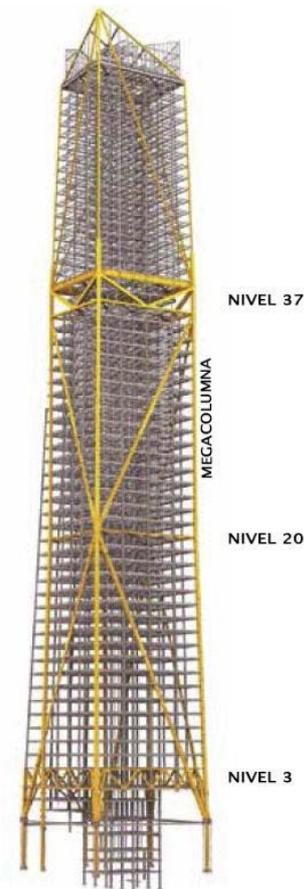


Fig 25. Sistema estructural 181 Fremont

El tamaño reducido del edificio (aproximadamente 36 x 27m en la base y se reduce a 29 x 24m en el techo) no permitió un sistema central en los niveles de oficinas, por lo que el sistema portante está ubicado completamente en el perímetro.

En los niveles de apartamentos, el núcleo está arriostrado con BRB<sup>5</sup> - riostra con restricción de pandeo. Otro elemento innovador utilizado fueron disipadores de fluido viscoso<sup>6</sup>.

La combinación de ambos requirió hasta 3000 toneladas menos de acero en la estructura comparando con una sistema tradicional de arriostramientos. Estos amortiguadores reemplazan un amortiguador de masa sintonizado de techo<sup>7</sup> liberando 650m<sup>2</sup> de valioso espacio en el techo, suficiente para permitir la ubicación de la residencia penthouse que se puso en el mercado por \$42 millones.

El sistema "mega-brace" de arriostramiento son tres elementos en uno (Fig.27). La riostra central BRB y las dos riostras exteriores compuestas por placas ensambladas unidas a dos amortiguadores viscosos en un extremo. A medida que el edificio se flexiona lateralmente en caso de viento o terremoto, se desarrollan grandes deformaciones (elásticas) en los arriostramientos primarios muy largos. Dado que las abrazaderas secundarias están conectadas a los mismos meganodos a través de amortiguadores, este movimiento relativo se utiliza para activar los amortiguadores y disipar energía. Para que el mecanismo descrito anteriormente funcione correctamente, se permitió el movimiento relativo de las mega-riostras en la dirección axial deslizándose libremente a medida que cruzan cada forjado, pero se impidió que se pandeara en todos los demás grados de libertad mediante la incorporación de componentes de baja fricción.

Los sistemas eléctricos y de fontanería del edificio también se diseñaron para absorber los impactos sísmicos y moverse libremente con el edificio durante un terremoto, lo que reduce las reparaciones que los sistemas tradicionales podrían enfrentar después de un evento sísmico.

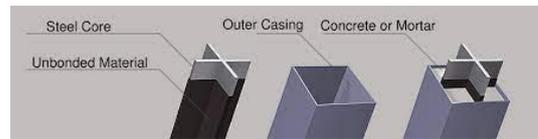


Fig 26. Riostra mixta para limitar el pandeo.



Fig 27. Sistema "Mega-brace".

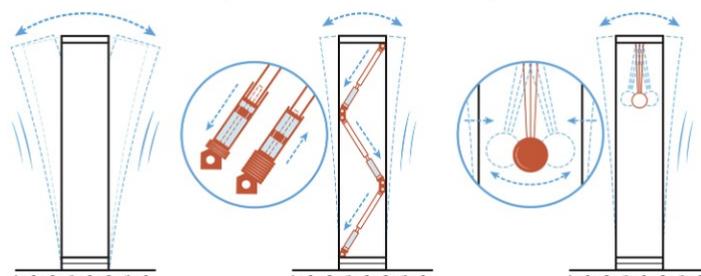


Fig. 28. Esquemas de deformación sin amortiguador(1), con disipadores de fluido viscoso(2) o con amortiguador de masa(3). Se observa el comportamiento similar del edificio entre soluciones (2) y (3), pero la solución con disipadores de fluido ocupan menos espacio.

<sup>5</sup> Un núcleo de acero delgado, una carcasa de hormigón diseñada para soportar continuamente el núcleo y evitar el pandeo bajo compresión axial, y un recubrimiento de interfaz que evita interacciones no deseadas entre los dos.

<sup>6</sup> Dispositivos que brindan amortiguamiento estructural sin aumentar la rigidez del sistema, reduciendo la demanda de un movimiento sísmico. La fuerza de amortiguamiento en un amortiguador viscoso o un amortiguador viscoelástico depende de la velocidad de cambio de la deformación en el tiempo. La amortiguación se logra a través del cambio de fase entre la fuerza y el desplazamiento.

<sup>7</sup> Es un dispositivo que consta de una masa, un resorte y un amortiguador que se une a una estructura para reducir la respuesta dinámica de la estructura.



JOHN HANCKOK CENTER

BANK OF CHINA TOWER

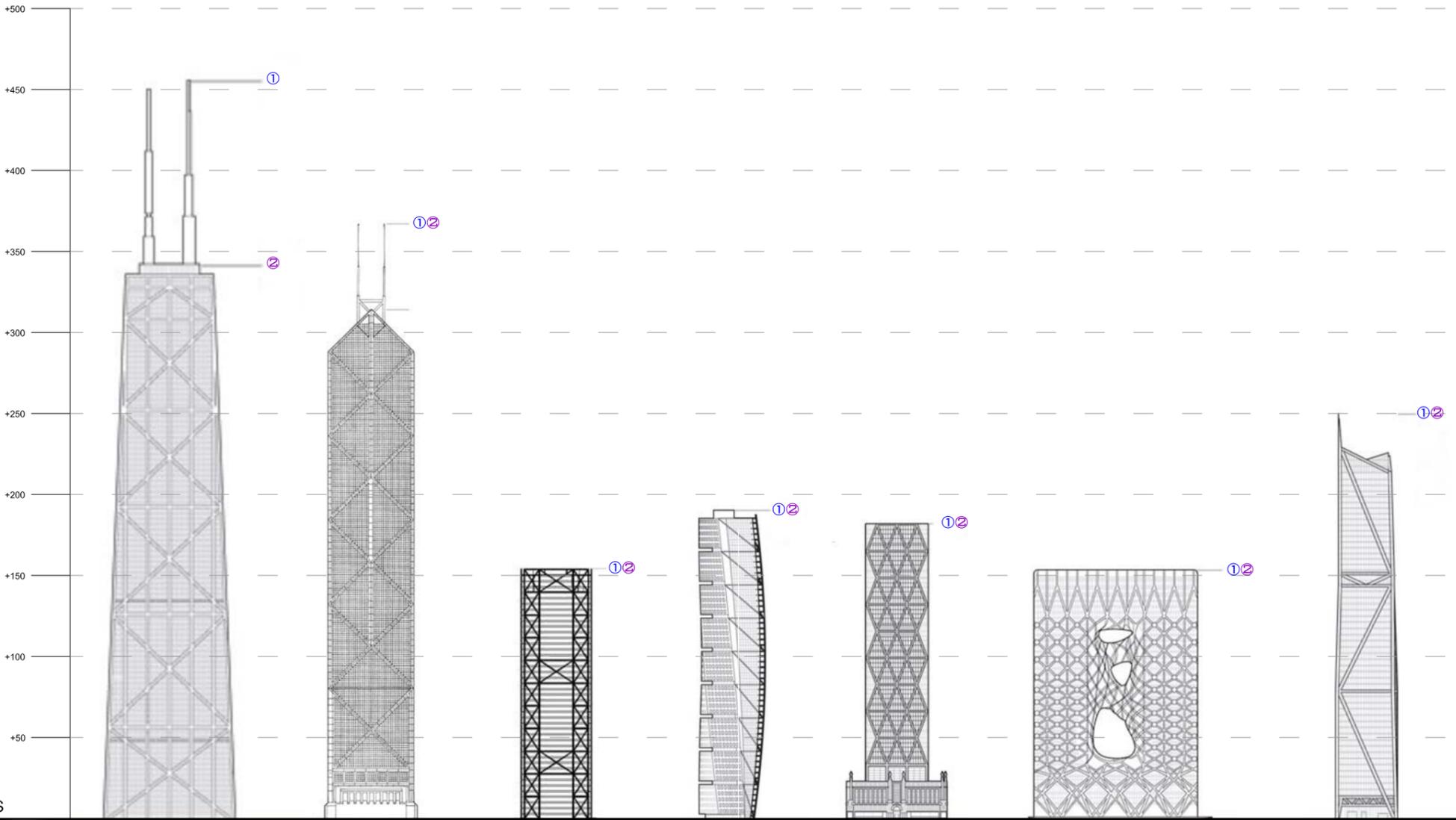
HOTEL ARTS

TURNING TORSO

HEARST TOWER

HOTEL MORPHEUS

181 FREMONT STREET



ALZADOS

PLANTAS	ESTRUCTURA PORTANTE		NUCLEO DE COMUNICACION				
SUPERFICIES	TOTAL: 260.000M2 PLANTA BAJA: 4000M2 NUCLEOS: 570M2 (14%) ESTRUCTURA: 75M2 (2%)	TOTAL: 135.000M2 PLANTA BAJA: 2500M2 NUCLEOS: 420M2 (15%) ESTRUCTURA: 56M2 (2%)	TOTAL: 51.100M2 PLANTA BAJA: 1090M2 NUCLEOS: 150M2 (13.8%) ESTRUCTURA: 40M2 (7%)	TOTAL: 31.500 M2 PLANTA BAJA: 400M2 NUCLEOS: 90M2 (22.5%) ESTRUCTURA: 80M2 (20%)	TOTAL: 80.000M2 PLANTA BAJA: 2000M2 NUCLEOS: 235M2 (12%) ESTRUCTURA: 105M2 (5.2%)	TOTAL: 150.000 M2 PLANTA BAJA: 5500M2 NUCLEOS: 530M2 (9.5%) ESTRUCTURA: 200M2 (3.6%)	TOTAL: 63.500 M2 PLANTA BAJA: 1080M2 NUCLEOS: 250M2 (23%) ESTRUCTURA: 30M2 (2.8%)
AÑO	1969	1990	1992	2005	2006	2018	2018
ALTURAS 1. En punta 2. Arquitectonica	1: 457 m. 2: 343m.	1,2: 367m.	1,2: 154 m.	1,2: 190 m.	1,2: 182 m.	1,2: 154 m.	1,2: 250 m.
N. DE PLANTAS	100	70	44	59	46	42	57
ESBELTEZ	6.9	7.3	4.7	7.9	4.8	3	9.1
SISTEMA ESTRUCTURAL	TUBO REFORZADO	CELOSÍA ESPACIAL/ MEGATUBO REFORZADO/ TUBO AGRUPADO	MEGATUBO REFORZADO	CELOSÍA ESPACIAL	DIAGRID		CELOSÍA ESPACIAL
UNIONES							
PERFILES (arriostramientos)							
USO	RESIDENCIAL+OFICINAS	OFICINAS	HOTEL	RESIDENCIAL+OFICINAS	OFICINAS	HOTEL	OFICINAS
PESO TOTAL APROXIMADO DE ACERO EN ton.	46.000		4.500	820	10.000	28.000	12.000
ACERO EN kg/m2	145		87		125	187	189
CIMENTACION	POZOS DE CIMENTACION	POZOS DE CIMENTACION	-	LOZA + PILOTES	CIMENTACION DIRECTA + POZOS DE CIMENTACION	-	POZOS DE CIMENTACION
TIEMPO DE CONSTRUCCION (AÑOS)	4	4,5	2	4	3	4	5
PAIS	EE.UU	CHINA	ESPAÑA	SUECIA	EE.UU	MACAO	EE.UU

Se han analizado en detalle edificios con estructura de exoesqueleto de acero construidos entre 1969 y 2018 en diferentes partes del mundo. A pesar de que en su origen los problemas se reducen al aprovechamiento del espacio y búsqueda de la expresión, debido a la ubicación en diferentes partes del mundo, a las características culturales y el desarrollo de la tecnología, se observa gran variedad de soluciones tanto a nivel arquitectónico como a nivel estructural. La altura en los edificios analizados varía entre los 152m en el Hotel Morpheus y los 343m en el John Hancock Center, con el número de plantas entre 42 y 100. Los edificios analizados en general están ligados a limitaciones de superficie (parcelas pequeñas), lo que da lugar a esbelteces entre 3 en Hotel Morpheus de 152m y 9.1 en 181 Fremont street de 250m. No se ha encontrado una relación directa entre la altura y la esbeltez.



Fig. 29. Mapa de ubicación de los edificios de análisis.

En cuanto a la eficiencia del uso del espacio, analizando la planta baja, la más desfavorable a nivel de cargas tanto estructurales como proyectuales se obtiene que la estructura ocupa del 2 al 5 % y los núcleos del 10 al 15 % (menos el 181 Fremont, en el que alcanzan hasta un 23%), dejando hasta un 80% del espacio libre para su uso global (están excluidos los valores obtenidos en el edificio turning torso ya que el exoesqueleto solamente es una parte del sistema estructural).

El tiempo de construcción varía entre 2 y 5 años, lo que supone un ritmo de construcción bruto (sin descontar el tiempo de la ejecución de la cimentación y los acabados) de entre 0.88 y 2.1 plantas al mes. Se conoce la tipología de cimentación en cinco de las siete obras analizadas, y en cuatro de ellas se han usado pozos de cimentación, y solo en una obra particular, el Turning Torso, se han usado pilotes.

En los ejemplos analizados se observa como con la intención de ahorrar espacio, la construcción de una sola torre de uso mixto en lugar de dos torres diferenciadas, se ha convertido en una nueva forma de proyectar edificios en altura.

En los ejemplos analizados se han visto los siguientes sistemas estructurales de exoesqueleto: tres tipos de celosía espacial - en el Bank of China Tower, en el Turning Torso y en el 181 Fremont street; dos ejemplos del tubo y megatubo reforzados - en el John Hancock center y en el hotel Arts; un ejemplo del sistema diagrid utilizado en Hearst Tower; un edificio de forma irregular basado en el diseño paramétrico Hotel Morpheus.

Se aprecia la evolución en el diseño de los arriostramientos, con un camino empezado con el uso de grandes arriostramientos en I unidos rígidamente que ha llegado hasta formas muy irregulares, arriostramientos reforzados y amortiguadores viscosos.

La sencilla disposición de diagonales de arriostramiento se resuelve a través de dos placas de acero atornilladas en el John Hancock center y se reforzó con hormigón en las esquinas del Bank of China Tower, aumentando la rigidez global del edificio, dando lugar a un edificio de mayor esbeltez. En ejemplos posteriores a las uniones se dedica especial atención, desarrollando diferentes formas: en cruz, bulonadas o piezas prefabricadas y colocadas en el sitio.

Se puede apreciar la evolución viendo como los perfiles en I en las primeras obras que requieren más acero para resistir pandeo en dirección transversal se cambian por secciones en cruz para resistir el pandeo en cuatro direcciones principales y facilitar la unión, o mediante el uso de tubulares resistentes

igualmente en todas las direcciones. En obras posteriores se han desarrollado perfiles más especiales: placas de hasta 15 centímetros de espesor dobladas formando nodos muy complejos o riostras con reducción a pandeo.

El peso de la estructura por sí habría que compararlo con otros edificios del mismo tamaño, pero el análisis permite sacar un valor de acero estructural por metro cuadrado y ubicando los valores obtenidos en un gráfico “premium for height” se ve que dichos edificios tienen alta eficiencia y relación peso/altura. Lamentablemente, no se ha podido encontrar la información del peso de la estructura del edificio Bank of China Tower. Igualmente en la gráfica de la Fig.30 no está representado el edificio Turning Torso debido a que, como se ha mencionado anteriormente, el exoesqueleto es solo una parte del sistema estructural global.

En el gráfico (Fig.30) se relacionan la altura del edificio con los kilos de acero estructural por  $m^2$  construido. A modo de comparación, en la gráfica se marcan dos obras famosas de Norman Foster con la estructura de exoesqueleto: **30 St Mary Axe**, London, 2004 de 167/180m, **HSBC Headquarters**, Hong Kong, 1985 de 180m (citadas anteriormente en la Tabla 5), que tienen una altura similar al Hearst Tower pero con uso de acero muy superior, 210 y 305  $kg/m^2$  respectivamente.

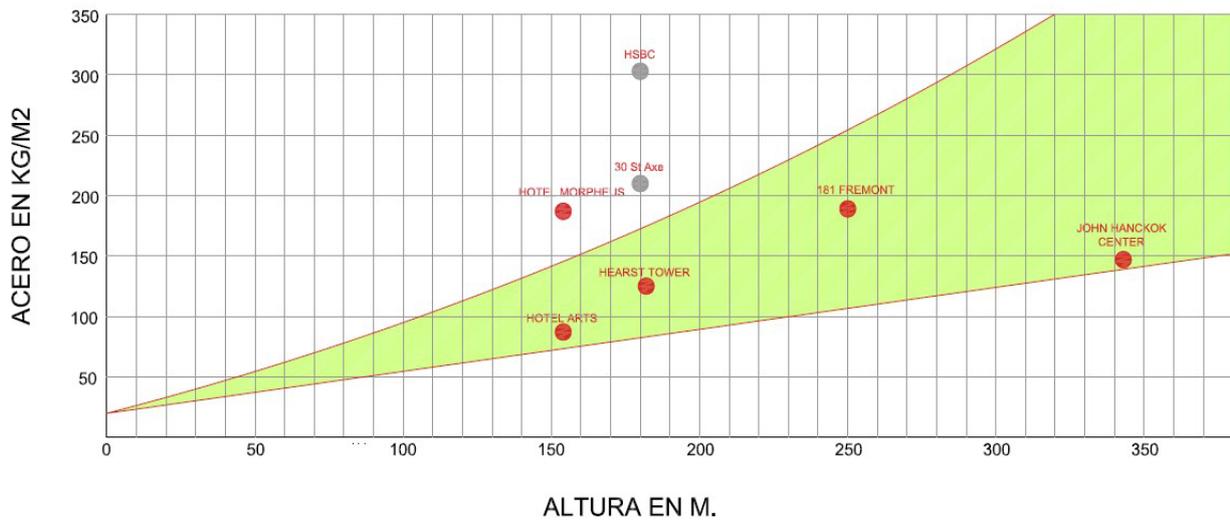


Fig. 30. La grafica muestra la relacion de kilos de acero estructural por cada  $m^2$  construido.

De los edificios analizados, solo el Hotel Morpheus se sale de la denominada “zona de eficiencia” (en verde), lo que indica un uso de acero elevado para el número de plantas construidas. Esto es especialmente significativo si tenemos en cuenta que este edificio presenta también la menor esbeltez de todos los estudiados. Hotel Morpheus es un edificio donde el diseño formal dominante se aleja del razonamiento estructural, otra vez confirmando la importancia de la búsqueda de un equilibrio entre diseño formal y diseño estructural, especialmente en edificios con exoesqueleto.

Este trabajo ha presentado una revisión general de los sistemas estructurales de acero en edificios altos. Se ha utilizado la clasificación propuesta por Ali y Moon de estructuras interiores y exteriores para, en base de esta clasificación, resaltar las estructuras de exoesqueleto.

Se han analizado las características estructurales y arquitectónicas de los exoesqueletos y las acciones principales a los que están sometidos los edificios altos.

Se han analizado los cien edificios más altos del mundo, de los cuales solo dos tienen la estructura exterior de exoesqueleto. De los numerosos ejemplos con estructura de exoesqueleto existentes, para realizar el análisis se han escogido las siguientes obras: John Hancock center constituye el primer edificio con la estructura vista; Bank of China Tower es el primer edificio mayor de 300m fuera de EE.UU.; el Hotel Arts es un ejemplo paradigmático de exoesqueleto; Turning Torso es el primer edificio alto "retorcido" en el mundo; el Hearst tower supone un ejemplo de modelo a seguir de diagrid; el Hotel Morpheus es el primer edificio sin tener columna interior alguna; el 181 fremont aporta soluciones muy novedosas (2018) en condiciones tan extremas de alta carga sísmica.

En total se han analizado 7 edificios representativos con la estructura vista de acero. Se ha estudiado la situación inicial, la composición interior, la cimentación y el sistema estructural de cada edificio.

Los datos obtenidos se han estructurado creando una tabla que representa alturas, plantas, superficies, tipos de uniones, perfiles, pesos, etc. para facilitar la lectura y realizar una comparación.

Se ha rastreado la evolución de los exoesqueletos junto con las formas, métodos de proyección o sistema estructural desde el pórtico rígido convencional hasta los sistemas más recientes. Se demuestra que los sistemas estructurales han recorrido un largo camino desde los años 70 del siglo XX, cuando fue construido el John Hancock center y que existen multitud de respuestas tipología y formales que pueden responder eficientemente en este tipo de edificios. Las innovaciones tecnológicas utilizadas en los edificios analizados pueden manifestarse en muchas áreas: forma geométrica, construcción y sistemas de amortiguación de vibraciones. Se ha visto como el desarrollo de la tecnología informática facilita el diseño de exoesqueletos en edificios de gran altura con estrategias estructurales y funcionales más complejas. Esto no significa que las soluciones estructurales de hace 55 años se hayan quedado obsoletas. En el análisis comparativo se ve que el diseño de las estructuras del John Hancock center sigue siendo eficiente tanto en su estructura como en aprovechamiento de espacio.

Considero que se ha cumplido la intención de demostrar la eficacia de los sistemas estructurales de exoesqueleto de acero en edificios en altura, siempre y cuando estén bien planificados desde punto de vista formal y estructural. Se ha visto que los edificios con un planteamiento estructural que atiende a criterios mecánicos consiguen un ahorro de material frente a soluciones más condicionadas por los aspectos formales.

Aly & Moon en el artículo "Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects" de la revista "Architectural Science Review" de 2007 hacen una reflexión sobre edificios altos y el desarrollo urbano: "El desarrollo de nueva tecnología se produce en función de la necesidad, y la tecnología evoluciona hacia una mayor eficiencia. El desarrollo de estructuras arriostradas para producir espacios más rentables en terrenos urbanos densos mediante la construcción de edificios altos en el pasado y sus caminos evolutivos hasta el presente hacia estructuras aún más altas y más eficientes para maximizar los usos del suelo de manera más económica están dentro de esta vía.

Las ciudades más densas con megaestructuras son más eficientes en términos de consumo de energía y uso del suelo. Al hacer una ciudad más pequeña y más densa, la red eléctrica se vuelve más pequeña, lo que hace que la transferencia de energía eléctrica sea más eficiente. La necesidad de transporte por automóvil disminuye, así como la necesidad de transporte personal, que es un gran contribuyente a los problemas de consumo eficiente de energía y contaminación."

Junto con las conclusiones del análisis se puede creer que el desarrollo de los exoesqueletos responde a las necesidades de "mañana" y por eso requieren más atención de los arquitectos.



Fig. 31. Panorama de San-Francisco. Edificio 181 Fremont street.

## REFERENCIAS

10

### BIBLIOGRAFÍA

- ◆ I. Almufti, S.E., J.Krolicki, S.E. and A. Crowther / The Resilience-Based Design of the 181 Fremont Tower / 2016.
- ◆ Mir M. Ali y Kyoung Sun Moon / Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects – Art. en Architectural Science Review / 2007.
- ◆ E.Piermarini, H. Nuttall, R. May, V Janssens, W. Manglesdorf, T. Kelly / “Morpheus Hotel, Macau – a paradigm shift in computational engineering” - Steel Construction, Volume 11, Issue 3, Art. / 2018.
- ◆ Ficeto / M.Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower / 2015.
- ◆ A. Rahimian and Y. Eilon / New York Hearst tower. A restoration, an Adoptive Reuse and a Modern Steel Tower Rolled Into One / 2006.
- ◆ N. G Gore y Purva Mhatre / Outrigger Structural System – A Review and Comparison of the Structural System, International Journal of Engineering Trends and Technology / 2018.
- ◆ O. Ivankova, D. Meri y E.Vojtekova / Static and Dynamic Analysis in Design of Exoskeleton Structure / 2017.
- ◆ J.Gordon / Estructuras o por que las cosas no se caen / 1999.
- ◆ A. Bernabeu Larena / El potencial creativo de la estructura en la arquitectura actual – revista “Arquitectos Esqueletos” / 2008.
- ◆ J. Donaire / Contemporánea indefinición tectónica del esqueleto – revista “Arquitectos Esqueletos” / 2008.

## PÁGINAS WEB.

- ▶ <https://www.ctbuh.org/?redirect=true>
- ▶ [https://www-cityanatomy-com.translate.goog/articles/turning-torso?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=wapp](https://www-cityanatomy-com.translate.goog/articles/turning-torso?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wapp)
- ▶ <https://www.mdpi.com/2075-5309/8/8/104>
- ▶ <https://users.metu.edu.tr/archstr/BS536/documents/Projects/John%20Hancock%20Center%20-%20Olkan%20Namli.pdf>
- ▶ <https://www.yumpu.com/es/document/read/14295882/apuntes-de-edificios-en-altura>
- ▶ <https://sites.google.com/site/johnhancockcenterae390/structure/disscussion>
- ▶ <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/edificio-875-n-michigan-ave-john-hancock-center/>
- ▶ <https://www.e-periodica.ch/digbib/view?pid=bse-pe-002:1982:6::55#159>
- ▶ [https://www-wikiwand-com.translate.goog/zh-sg/%E4%B8%AD%E9%8A%80%E5%A4%A7%E5%BB%88\\_%28%E9%A6%99%E6%B8%AF%29?\\_x\\_tr\\_sl=auto&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=wapp&\\_x\\_tr\\_hist=true](https://www-wikiwand-com.translate.goog/zh-sg/%E4%B8%AD%E9%8A%80%E5%A4%A7%E5%BB%88_%28%E9%A6%99%E6%B8%AF%29?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wapp&_x_tr_hist=true)
- ▶ [https://tw-nxjy-edu-cn.translate.goog/info/1166/2001.htm?\\_x\\_tr\\_sl=auto&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=wapp](https://tw-nxjy-edu-cn.translate.goog/info/1166/2001.htm?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wapp)
- ▶ [https://www.ecured.cu/Torre\\_del\\_Banco\\_de\\_China](https://www.ecured.cu/Torre_del_Banco_de_China)
- ▶ <https://www.jmhdezhdz.com/2013/07/bank-of-china-tower-hong-kong-drawings.html>
- ▶ <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/99216/BAUTISTA%20-%20MES-F0076.%20Banco%20de%20China%20en%20Hong%20Kong.%20Aproximaci%c3%b3n%20arquitect%c3%b3nica%20y%20an%c3%a1lisis%20estruct....pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- ▶ <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/hsb-turning-torso/>
- ▶ [https://www-cityanatomy-com.translate.goog/articles/turning-torso?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=wapp](https://www-cityanatomy-com.translate.goog/articles/turning-torso?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wapp)
- ▶ <https://mariamamanas.wordpress.com/2015/05/25/turning-torso-minimal-surface/>
- ▶ <https://www.archdaily.cl/cl/901563/flashback-hearst-tower-foster-plus-partners>
- ▶ <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/oficinas-hearst/>
- ▶ <https://www.skyscrapercenter.com/building/hearst-tower/2245>
- ▶ [https://www-cibsejournal-com.translate.goog/case-studies/engineering-facades-at-zaha-hadids-morpheus-hotel/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=wapp](https://www-cibsejournal-com.translate.goog/case-studies/engineering-facades-at-zaha-hadids-morpheus-hotel/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wapp)
- ▶ <https://arquitecturayempresa.es/noticia/hotel-morpheus-en-macao-china-zaha-hadid-architects>
- ▶ <https://developingresilience.uli.org/case/181-fremont/>
- ▶ <https://www.architectmagazine.com/design/181-fremont-san-francisco>
- ▶ <http://www.disipaing.com/fvd/>,
- ▶ [https://engineering.purdue.edu/~ce573/Documents/Intro%20to%20Structural%20Motion%20Control\\_Chapter4.pdf](https://engineering.purdue.edu/~ce573/Documents/Intro%20to%20Structural%20Motion%20Control_Chapter4.pdf)
- ▶ <https://www.architectmagazine.com/design/181-fremont-san-francisco>
- ▶ <https://www.evolu.us/category/competition/>

## IMÁGENES.

- ◆ (Fig. 1) *(Modificado por autor)* /  
[https://www.researchgate.net/figure/Premium-for-height-23\\_fig1\\_329029370](https://www.researchgate.net/figure/Premium-for-height-23_fig1_329029370)
- ◆ (Fig. 2) *(Modificado por autor)* / Mir M. Ali y Kyoung Sun Moon / Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects – Art. en Architectural Science Review / 2007
- ◆ (Fig. 3) *(Modificado por autor)* / Mir M. Ali y Kyoung Sun Moon / Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects – Art. en Architectural Science Review / 2007
- ◆ (Fig. 4) O. Ivankova, D. Meri y E.Vojtekova / Static and Dynamic Analysis in Design of Exoskeleton Structure / 2017
- ◆ (Fig. 5) *(Modificado por autor)* / O. Ivankova, D. Meri y E.Vojtekova / Static and Dynamic Analysis in Design of Exoskeleton Structure / 2017
- ◆ (Fig. 6) [https://www.researchgate.net/figure/Figura-N-5-Efecto-de-la-rugosidad-del-terreno-sobre-el-perfil-de-velocidad-de-la-capa\\_fig5\\_320542817](https://www.researchgate.net/figure/Figura-N-5-Efecto-de-la-rugosidad-del-terreno-sobre-el-perfil-de-velocidad-de-la-capa_fig5_320542817)
- ◆ (Fig. 7) <https://www.yumpu.com/es/document/read/14295882/apuntes-de-edificios-en-altura>
- ◆ (Fig. 8) <https://www.evolo.us/category/competition/>
- ◆ (Fig. 9) [https://en.wikipedia.org/wiki/Caisson\\_%28engineering%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Caisson_%28engineering%29)
- ◆ (Fig. 10) *(Modificado por autor)* / John Hancock Center - Olkan Namli, 2015.
- ◆ (Fig. 11) <https://primarystructure.net/john-hancock-center/>
- ◆ (Fig. 12) <https://www.jmhdezhdz.com/2011/05/john-hancock-center-chicago-som.html>
- ◆ (Fig. 13) *(Modificado por autor)* / <https://www.jmhdezhdz.com/2013/07/bank-of-china-tower-hong-kong-drawings.html>
- ◆ (Fig. 14) <https://www.shutterstock.com/es/image-photo/skyscraper-metallic-structure-barcelona-583182>
- ◆ (Fig. 15) I. Darío Velandia / TFM “la conquista de la altura -estructura y superficie- hotel Arts”
- ◆ (Fig. 16) [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Turning\\_Torso\\_structure.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Turning_Torso_structure.svg)
- ◆ (Fig. 17) *(Modificado por autor)* /  
<https://mariamamanas.wordpress.com/2015/05/25/turning-torso-minimal-surface/>
- ◆ (Fig. 18) *(Modificado por autor)* /  
[https://www-cityanatomy-com.translate.google/articles/turning-torso?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=wapp](https://www-cityanatomy-com.translate.google/articles/turning-torso?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=wapp)
- ◆ (Fig. 19) <https://www.archilovers.com/projects/475/turning-torso-gallery?2640>
- ◆ (Fig. 20) *(Modificado por autor)* /  
[http://faculty.arch.tamu.edu/anichols/courses/applied-architectural-structures/projects-631/Files/HearstTower\\_1.pdf](http://faculty.arch.tamu.edu/anichols/courses/applied-architectural-structures/projects-631/Files/HearstTower_1.pdf)
- ◆ (Fig. 21) [http://faculty.arch.tamu.edu/anichols/courses/applied-architectural-structures/projects-631/Files/HearstTower\\_1.pdf](http://faculty.arch.tamu.edu/anichols/courses/applied-architectural-structures/projects-631/Files/HearstTower_1.pdf)
- ◆ (Fig. 22) <https://www.studioseed.net/blog/software-blog/parametric-generative-design-blog/grasshopper/morpheus-hotel-el-primer-edificio-del-mundo-sin-columnas/>
- ◆ (Fig. 23) <https://altair.com/customer-story/zaha-hadid-morpheus-hotel-macau>
- ◆ (Fig. 24) <https://www.architectmagazine.com/design/181-fremont-san-francisco>

- ◆ (Fig. 25) I. Almufti, S.E., J.Krolicki, S.E. and A. Crowther / The Resilience-Based Design of the 181 Fremont Tower / 2016.
- ◆ (Fig. 26) <http://en.roadjz.com/show.asp?id=17>
- ◆ (Fig. 27) I. Almufti, S.E., J.Krolicki, S.E. and A. Crowther / The Resilience-Based Design of the 181 Fremont Tower / 2016.
- ◆ (Fig. 28) <https://www.architectmagazine.com/design/181-fremont-san-francisco>
- ◆ (Fig. 29) *Hecho por autor* / la herramienta <https://snazzymaps.com/explore>
- ◆ (Fig. 30) *Hecho por autor* /
- ◆ (Fig. 31) <https://hellermanus.com/projects/181-fremont>