

Banco de China en Hong Kong

Aproximación arquitectónica y análisis estructural

TRABAJO FINAL DE GRADO

Grado en Fundamentos de Arquitectura

Autor: Jairo Bautista Esparcia
Tutor: Ernesto Jesús Fenollosa Forner
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Valencia
Departamento: Mecánica de los Medios continuos y Teoría de Estructuras
Curso: 2015/2016

Índice de contenidos

1_INTRODUCCIÓN	04
1.1 Resumen y palabras clave	05
1.2 Objetivos y metodología	06
2_IEOH MING PEI	07
2.1 Vida	08
2.2 Trayectoria y obras	09
3_PROYECTO ARQUITECTÓNICO	13
3.1 Entorno y contexto	14
3.2 Proyecto arquitectónico	15
4_ESTRUCTURA Y CONSTRUCCIÓN	19
4.1 Esquema estructural	20
4.2 Construcción	23
5_MODELO ESTRUCTURAL	25
5.1 Modelo estructural	26
5.2 Modelo de cargas	30
5.3 Características materiales	38
6_ANÁLISIS ESTRUCTURAL	39
6.1 Análisis de los resultados	40
7_CONCLUSIONES	60
8_BIBLIOGRAFÍA	63
9_REFERENCIA DE IMÁGENES	66



1_Introducción

1.1 Resumen y palabras clave

Construido en 1990 por el arquitecto internacional leoh Ming Pei, la Torre del Banco de China, representa un icono para la ciudad de Hong Kong, siendo uno de las más altas torres del mundo. El proyecto está determinado por la opción estructural sometida a un presupuesto limitado y por las extremas exigencias laterales derivadas del viento y el riesgo sísmico con un edificio de esa altura. La torre emerge triunfal hacia el cielo, con un adelgazamiento progresivo de su masa cristalina que simula el crecimiento del bambú. Mediante esta variación de geometría en altura, se crean líneas de excentricidades que se contrarrestan, creando una configuración estructural uniforme. La forma recuerda a los sistemas de viga cajón y diagrid. Tras su estudio se propone un modelo estructural adaptado para el posterior análisis y cálculo mediante el programa informático Architrave.

Palabras clave: Torre del Banco de China, leoh Ming Pei, análisis estructural, torre, Hong Kong.

Built in 1990 by the international architect leoh Ming Pei, the Bank of China Tower, represents an icon for the city of Hong Kong, being one of the highest towers in the world. The Project is determined to structural option with a limited budget and the extremely wind and quake requirements of a building of such a height. The tower emerges to the sky, with a progressive lose of glass mass the imitates the growth of bamboo. By this geometrical variation, excentrical lines created are counteracted between them, with the result of a solid structural configuration. Form reminds of spandrel beams and diagrid systems. After the study, a structural model is proposed for its later analysis and calculation, using the informatic program Architrave.

Key words: Bank of China Tower, leoh Ming Pei, structural analysis, torre, Hong Kong.

Construït en 1990 per l'arquitecte internacional leoh Ming Pei, la Torre del Banc de Xina, representa una icona per a la ciutat d'Hong Kong, sent una de les més altes torres del món. El projecte està determinat per l'opció estructural sotmesa a un pressupost limitat i per les extremes exigències laterals derivades del vent i el risc sísmic amb un edifici d'eixa altura. La torre emergix triomfal cap al cel, amb un aprimament progressiu de la seua massa cristal·lina que simula el creixement del bambú. Per mitjà d'esta variació de geometria en altura, es creen línies d'excentricitats que es contraresten, creant una configuració estructural uniforme. La forma recorda als sistemes de biga caixa i diagrid. Després del seu estudi es proposa un model estructural adaptat per a la posterior anàlisi i càlcul per mitjà del programa informàtic Architrave.

Paraules clau: Torre del Banc de Xina, leoh Ming Pei, análisis estructural, torre, Hong Kong.

1.2 Objetivos y metodología

El objeto del presente trabajo es estudiar y entender el comportamiento de la estructura de un edificio de gran altura, empleando como caso de estudio la Torre del Banco de China de I.M. Pei.

Se buscará conocer en detalle las soluciones estructurales empleadas por el arquitecto, analizando el planteamiento estructural del conjunto, así como el comportamiento de los elementos individuales que forman parte de la estructura. Todo esto, con la finalidad de poder extraer conclusiones sobre el funcionamiento de la estructura de esta tipología de edificios. Llegar a conocer la lógica estructural del proyecto y poderla aplicar en futuros planteamientos arquitectónicos es sin duda uno de los propósitos firmes de este trabajo.

La correcta comprensión de las limitaciones que esta tipología de edificios y consecuencias estructurales sobre el diseño arquitectónico es un valor importante en la formación del arquitecto, y mediante este estudio será posible aplicar el aprendizaje obtenido en futuros diseños de edificios similares.

Para ello, se seguirá la siguiente metodología. Previo al análisis y valoración estructural, se recopilará información acerca de la vida y obra del arquitecto, para posteriormente realizar la misma recopilación de información del edificio de estudio. Sintetizada la información estructural del proyecto, se realizará un modelo de su estructura, con la ayuda de un programa informático de análisis y cálculo estructural. Este modelo estructural será sometido a las cargas propias de la edificación, lo que arrojará luz sobre su comportamiento. Obtenidos los resultados, se extraerán conclusiones sobre el modelo, que se espera ayuden a comprender la realidad estructural del edificio. Estas conclusiones se intentará que sean aplicables, no sólo a un caso de estudio particular, sino en general, a edificios de similares características al seleccionado.



2_ Ieoh Ming Pei

2.1 Vida

leoh Ming Pei es un arquitecto y urbanista estadounidense de origen chino. Nacido el 26 de abril de 1917 en Cantón (China), emigró a Estados Unidos en 1935 para formarse en el conocido Instituto Tecnológico de Massachusetts. Tras graduarse como arquitecto en 1940, amplió su formación ejerciendo en Harvard como profesor adjunto, tutelado por Marcel Breuer y Walter Gropius. A raíz de esta experiencia Pei es considerado como uno de los sucesores americanos de los grandes maestros de la arquitectura europea.

En 1955 Pei adoptó la nacionalidad estadounidense y al año siguiente fundó su propio despacho de arquitectura, I. M. Pei and Partners (hoy conocido como Pei Cobb Freed & Partners). Desde ese entonces, son más de 60 años dedicados a crear hitos arquitectónicos por todo el mundo. En sus proyectos Pei busca la pureza de líneas, unida a una eficacia funcional, siguiendo el llamado "estilo internacional" y los criterios de Gropius. Utiliza frecuentemente formas abstractas, recurre a materiales fríos, como el acero, el cemento y el vidrio, e incorpora efectos que resultan impactantes para el observador. Sus obras se caracterizan en muchas ocasiones por unas estructuras que requieren soluciones valientes.

Su trabajo fue reconocido en 1983, año en que recibió el premio Pritzker, el galardón de mayor prestigio internacional en arquitectura. También ha recibido la Medalla de Oro del Instituto Americano de Arquitectos (1979), y otras muchas distinciones, como el Praemium Imperiale (1989), la Medalla Presidencial de la Libertad (1993) y la Royal Gold Medal (2010).

Hoy en día, con prácticamente la centena de años alcanzada, Pei mantiene un calendario laboral activo. En India tiene importantes proyectos en proceso, como la torre residencial "Lodha World Towers" en Bombai, India *[img 1]*, la torre residencial más alta del mundo, con 117 plantas para un total de 442 metros de altura. También trabaja en la Plaza del Centenario de Los Ángeles, en el campus central de la Universidad Fordham Lincoln, Nueva York *[img 2]*, y en el Centro Charles Darwin en Darwin, Australia *[img 3]*.



Img. 1: Lodha World Towers, Bombai (2011)



Img. 2: Fordham University's Center Campus, NY (2007)



Img. 3: Charles Darwin Centre, Darwin [Aus] (2015)



Img 4: Gulf Oil Factory, Atlanta (1949)



Img 5: Week-end House, Katonah (1952)



Img 6: L'Enfant Plaza, Washington (1960s)

2.2_Trayectoria y obras

En primavera de 1948 Pei fue reclutado por el magnate de Nueva York William Zeckendorf para unirse a un grupo de arquitectos para su firma Webb & Knapp, con la finalidad de diseñar edificios por todo el país. Su primer proyecto para Webb & Knapp fue un edificio de apartamentos, para el cual proyectó una torre circular con anillos concéntricos. A Zeckendorf le encantó el diseño e incluso presumió de él ante Le Corbusier. Sin embargo, el coste de tal diseño era demasiado elevado, y el proyecto nunca avanzó más allá de la fase de maqueta.

Pei finalmente vio materializada su arquitectura en 1949, cuando proyectó un edificio de 2 plantas para Gulf Oil en Atlanta (Img 4). El empleo del mármol para el revestimiento exterior le propició buenas críticas de la revista "Architectural Forum". Sus diseños al principio de su carrera hacían eco al trabajo de Mies van der Rohe, como también se puede apreciar en su propia casa de fin de semana en Katonah (1952) (Img 5).

La rápida fama que alcanzó pronto hizo que se viera solicitado de numerosos proyectos, por lo que Pei tuvo que pedir a Zeckendorf asistentes, momento en el cual comenzó a trabajar con Henry N. Cobb y Ulrich Franzen. Desde ese momento en adelante, el equipo abordaría numerosos proyectos de carácter residencial y urbano.

De esta primera fase de su carrera que abarcó desde 1948 hasta 1956, se pueden destacar proyectos como las intervenciones en áreas urbanas de Washington, que incluían desde plazas (Img 6) hasta centros comerciales, así como los proyectos residenciales en Philadelphia, formados por 3 torres de carácter cubista (Img 7). También intervinieron con carácter urbano en Oklahoma (Img 8) y Montreal (Img 9). Todos estos proyectos tenían en común los abundantes espacios verdes y el cuidado y especial atención a la transición entre la arquitectura clásica del lugar con la relación con su diseño moderno.



Img 7: Society Hill Towers, Philadelphia (1961)



Img 8: Pei y equipo trabajando en Oklahoma (1960s)



Img 9: Place Ville Marie, Montreal (1962)



Img 10: Biblioteca y Museo Presidencial John F. Kennedy (1963)



Img 11: Ayuntamiento de Dallas (1964)

Con una fama consolidada y habiendo abordado numerosos proyectos de manera satisfactoria, Pei comenzó a recibir encargos de entidad, como fue lo que él mismo considera el mayor encargo de su vida, la Biblioteca de John F. Kennedy (1963) *[img 10]*, que su familia solicitó a Pei tras el asesinato del presidente. La solución proyectada fue un gran atrio cuadrado de vidrio combinado con una torre triangular y una pasarela circular perimetral.

En 1964, el alcalde de Dallas, con la finalidad de dar un cambio de imagen a la comunidad por la mala visión que se tenía de ésta desde el asesinato de Kennedy, encargó a Pei el diseño del ayuntamiento *[img 11]*, como símbolo del pueblo. A su manera de entender el proceso proyectual, Pei inspeccionó y estudió el área cercana al emplazamiento del proyecto y trabajó para que su diseño encajara en estas preexistencias. Tomando como referente Chandigarh de Le Corbusier, la solución final fue un edificio con un techo mucho más ancho que la planta, con una serie de columnas que lo sostenían.

Otro proyecto de reconocida fama fue el edificio este de la Galería Nacional de Washington D.C. (1965) *[img 12]*. La creciente popularidad de los museos de arte y tras examinar sus proyectos para el Centro de Arte Des Moines (Iowa) y el Museo Johnson en la Universidad de Cornell *[img 13]*, hicieron que le fuera encargado este trabajo. Pei se tomó muy en serio este encargo, y entendiendo como espacio articulador el Hall del futuro museo, optó como era usual en él por una forma geométrica sencilla para una solución compleja, el triángulo. La materialidad del proyecto también fue estudiada al detalle y con gran acierto el resultado final fue muy bien valorado por los críticos.



Img 12: Galería Nacional, Washington D.C. (1965)



Img 13: Museo Johnson, Universidad de Cornell (1958)



Img 14: Museo Louvre



Img 15: Lobby Acceso

Pero si hay un proyecto por el que es conocido Pei, es por su actuación en el Louvre, París [Img 14]. En 1981, el presidente de Francia, tras conocer y valorar positivamente la Galería Nacional de Washington, le encargó a Pei que se uniera al equipo para la renovación del Museo de Louvre. De nuevo estudiando el contexto histórico del encargo antes de lanzarse a proyectar, la solución que empleó Pei giraba en torno al lobby central, como en la Galería Nacional. Propuso un acceso central a través del cual se articularían las circulaciones a las diferentes partes del museo. En el centro de la plaza, proyectó una pirámide de cristal y acero que sirviera de entrada, de nuevo una forma geométrica sencilla para una solución compleja. Su intervención suscitó numerosas críticas, pero fundadas desde el recelo de que un arquitecto internacional hubiera sido el encargado del proyecto. Más allá de estas críticas, el proyecto del Louvre es uno de los que más renombre dieron al arquitecto.

Otro encargo internacional de entidad, fue la torre del Banco de China, Hong Kong (1982) [Img 16]. Pei se mostró dubitativo de aceptar el encargo, debido a una mala experiencia con un proyecto anterior en China, el Hotel Fragrant Hill (1982), el cual, debido a falta de tecnología del país, experimentó muchos problemas y errores en la fase de construcción y el resultado no satisfizo a Pei. Aceptando finalmente el encargo para la torre del banco, su propuesta fue magistral en apariencia. Su propuesta era una estructura vista que ataba el edificio en altura y dirigía los esfuerzos a las esquinas de la base. Otra vez con una solución sencilla de formas en "X" en caja, resolvía un problema estructural complejo y liberaba la planta para la compartimentación de las oficinas del banco en las respectivas plantas del edificio. Además, partiendo de una base cuadrada, el edificio iba perdiendo cuadrantes en altura, lo que a parte de un aspecto estético llamativo, funcionaba estructuralmente como un edificio que se retorció sobre un eje central, compensándose los distintos esfuerzos que pudieran aparecer por la asimetría.



Img 16: Torre del Banco de China



Img 17: Museo Historia Berlín (1995)



Img 18: Museo Miho (1997)



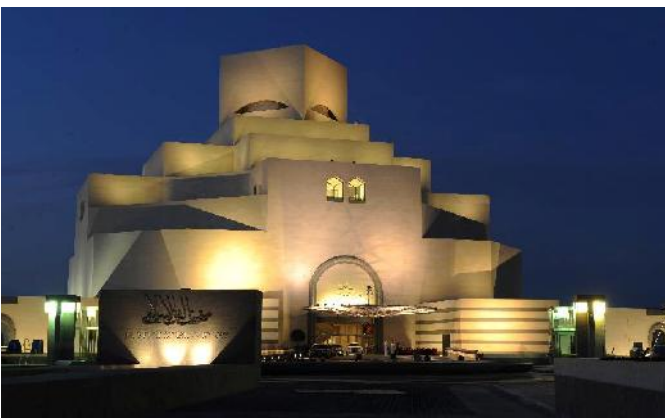
Img 19: Museo Suzhou (2000s)

De 1990 en adelante, Pei desconectó en parte de su firma para dedicarse a proyectos de menor envergadura, que le permitieran más creatividad. Iniciaba pues una fase en la que sus obras mayormente fueron museos. Entre sus proyectos más reconocidos de esta época cabe destacar la extensión del Museo de Historia de Berlín (1995) [img 17]. Una vez más, Pei trabajó para combinar una aproximación modernista con una estructura principal clásica.

Pei también trabajó en este tiempo en dos proyectos para un nuevo movimiento religioso en Japón llamado Shinji Shumeikai. La experiencia fue en palabras de Pei "muy gratificante", puesto que para poder concebir los proyectos tuvo que analizar y estudiar las creencias de este nuevo movimiento. Finalmente proyectó una Torre con campanario y más adelante el Museo Miho (1997) [img 18], para el cual tuvo que proyectar una solución compleja, dada la difícil accesibilidad. De nuevo la síntesis del diseño del exterior y la estructura fue de un acierto magnífico. Pei tuvo en cuenta la tradición de los templos japoneses para este diseño.

En la década del 2000, Pei proyectó varios museos más, como el Suzhou [img 19], cerca de su hogar de la infancia. También diseñó el Museo de Arte Islámico de Doha, Qatar [img 20], por encargo de una importante familia del país. Para este encargo, pasó hasta 6 meses estudiando las principales mezquitas de países como España, Siria y Túnez. Su propuesta final, una vez más combinaba el diseño de nuevos elementos con la estética clásica más apropiada del lugar, y el resultado fue perfecto. Cabe también destacar el Centro de la Ciencia de Macao (2001).

El estilo de Pei se ha mantenido firme en toda su obra. Es descrito como un estilo profundamente modernista, con notables temas cubistas. Reconocido por combinar elementos arquitectónicos con progresivos diseños basados en patrones geométricos simples, una buena frase que lo define en su biografía es "Pei ha sido acertadamente descrito como un combinador del sentido clásico de la forma con una maestría contemporánea del método".



Img 20: Museo Arte Islámico, Doha (2000s)



Img 21: Centro de la Ciencia de Macao (2001)



3_Proyecto Arquitectónico



Img 1. Perspectiva del entorno

3.1 Entorno y Contexto

En 1997, la isla de Hong Kong y el enclave continental concedido por 99 años volverán a la autoridad de la China popular. Pekín no espera a esta fecha para reforzar en la colonia una presencia vital para su economía. La construcción de la nueva sede del Banco de China –que hace de banco central para China popular- adquiere en este contexto un valor simbólico evidente por la proximidad de la catedral diseñada por Norman Foster para la Hong Kong & Shanghai Banking Corporation *[Img 2]*.

Invitado a proyectar la nueva sede del Banco de China, Pei no duda en el contexto internacional de Hong Kong, en proponer un rascacielos que batirá el récord de altura en esta región, con la particularidad de que el nuevo edificio no sólo tenía que ofrecer un sello distintivo considerable, sino además, que tendrían que destinar como mínimo 130.000 m² de espacios para oficinas; el 40% lo ocuparían las oficinas propias del banco, mientras que el resto de superficies podrían destinarse a alquiler.

El terreno elegido para el Banco de China, rodeado por vías de circulación elevadas, en una situación peor que el adjudicado a Foster, incita a la elevación de las plantas. Culminando a 315 metros de altura, la torre domina absolutamente a sus vecinos, cumpliendo así el deseo de sus promotores de que fuera visible desde el continente, sobre la otra orilla de la bahía Victoria *[Img 3]*.

El proyecto está determinado, ante todo, por la opción estructural sometida a un presupuesto limitado y por las extremas exigencias laterales derivadas del viento y el riesgo sísmico con un edificio de esa altura.



Img 2. Torre del Banco junto al proyecto de Norman Foster

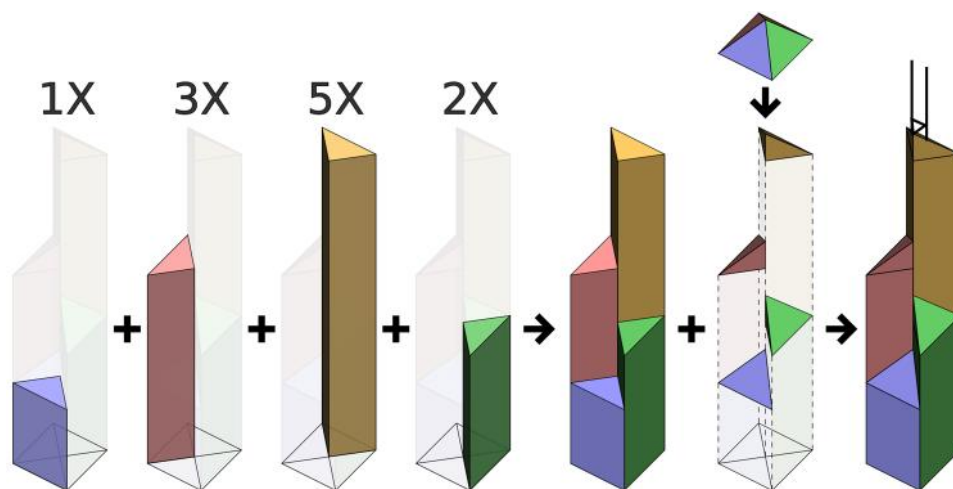


Img 3. Vista de la Torre del Banco de Hong Kong desde la bahía Victoria

3.2 Proyecto Arquitectónico

3.2.1. Concepto

El edificio consiste en cuatro torres triangulares de vidrio y aluminio, todas de alturas que varían, que emergen triunfales de un pódium hermoso de granito. Los cambios geométricos que ocurren en las subidas del edificio hacia el cielo son el aspecto más intrigante de la torre. Los ángulos y los puntos agudos hacen una estética interesante - un contraste con la arquitectura llana que domina la ciudad - el vidrio reflexivo de plata usado en la torre crea los puntos que reflejan la luz en días soleados así como en la noche, cuando Hong Kong es radiante con toda clase de luz artificial.



Img 4: Esquema conceptual

Las caras inclinadas de este poliedro complejo dramatizan las líneas oblicuas de las bandas de los contravientos laterales. El adelgazamiento progresivo de esta masa cristalina de vidrio contorneado de aluminio evoca para Pei el crecimiento del bambú. Éste simboliza tradicionalmente en China la ascensión espiritual, la adquisición gradual de la sabiduría representada por la sucesión de nudos del bambú. En lo alto de la torre una antena de 52 metros prolonga la metáfora del lugar entre la tierra y el cielo.

El conjunto refleja una concepción de las relaciones entre tradición y modernidad de la que se nutre el trabajo de Pei. La adaptación a las situaciones a base de pragmatismo y racionalismo, con la técnica sometida a la disciplina de la geometría, ilumina constantemente su obra.

Pei suscitó las críticas de los vecinos temerosos por no haber consultado - como es costumbre en China- a un maestro de *feng shui*.



Img 5: Vista de la Torre

3.2.2. Programa

En el nivel inferior, preocupado por el entorno desfavorable del terreno rodeado de vías de circulación, Pei quiso restituir una especie de umbral exterior que reinstaure una frontera visual y sonora. De este modo, la torre está retranqueada con respecto a la calle, lo que ayudó a crear un agradable paseo rodeado de zonas verdes y agua *(img 6)* que reducen notablemente la actividad y el ruido del tráfico rodado cercano de esta gran Metrópolis

Los contrafuertes macizos en granito del basamento *(img 7)*, o los detalles pintorescos de las entradas, sólo se comprenden en relación con el jardín de agua que los rodea.

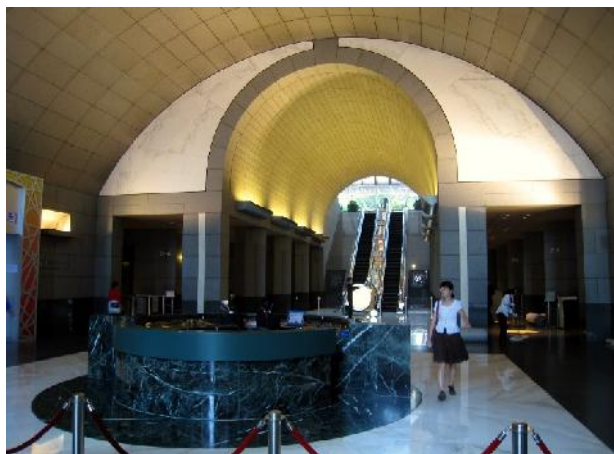


Img 6: Paseo a nivel de calle

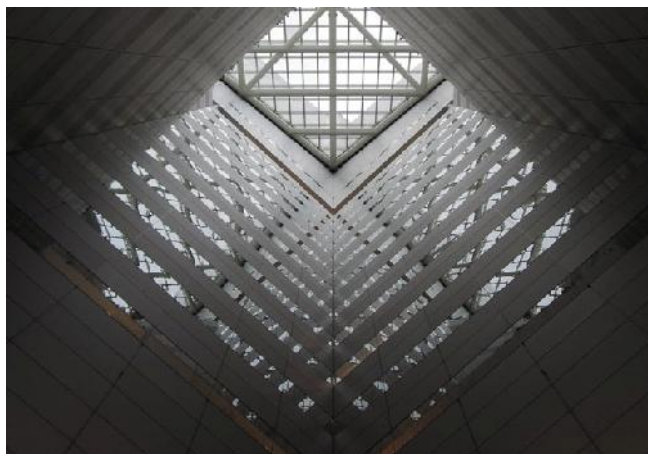


Img 7: Acceso por el macizo de granito

Una vez realizado el acceso al edificio, un potente atrio domina el espacio central a partir de la planta 4, elevándose un total de 15 plantas hasta una claraboya, concediendo así al lobby continuidad espacial a todas las actividades del banco y la incursión de luz natural al centro de éste. Esta manera de tratar el lobby o espacio central es muy recurrente en la arquitectura de Pei, y lo puso en práctica en proyectos como el Museo de Louvre o el Museo Johnson en la Universidad de Cornell.

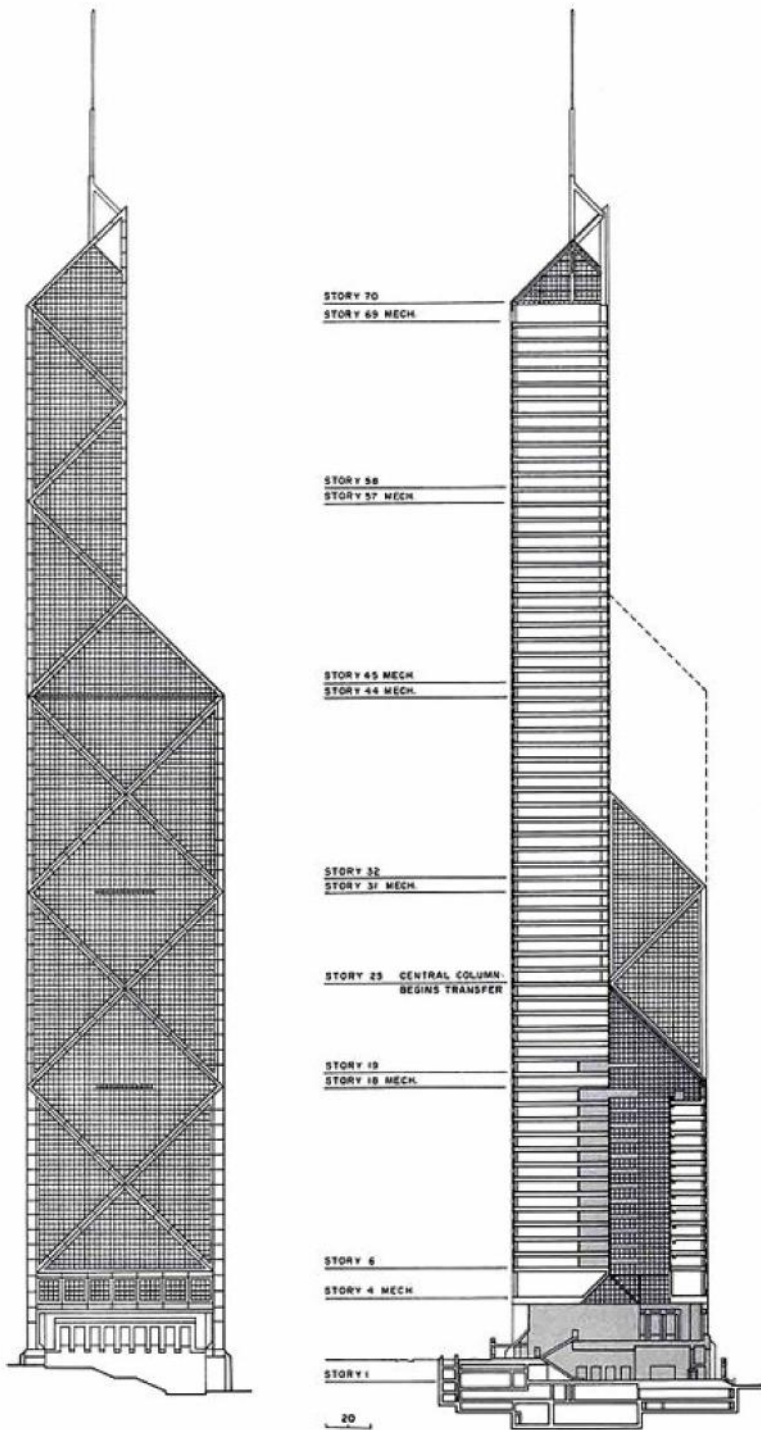


Img 8: Acceso al edificio

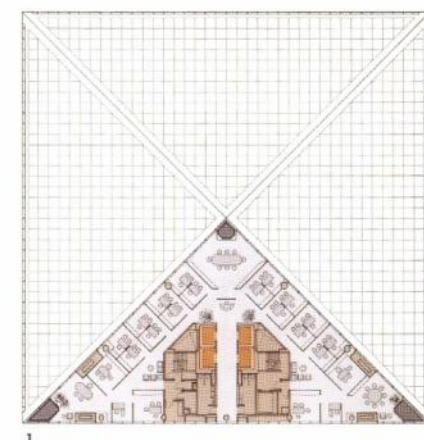
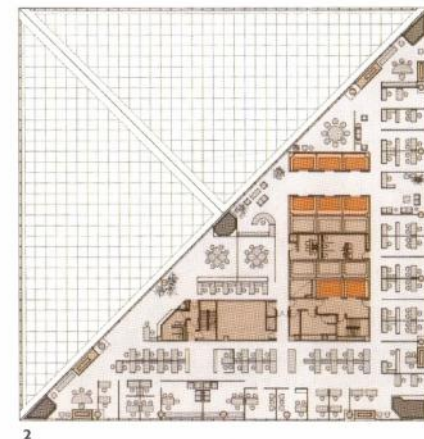
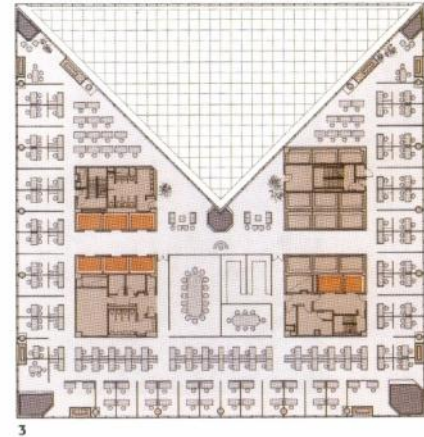


Img 9: Detalle del atrio central

El resto de plantas responden a la geometría característica que va adquiriendo a medida que gana en altura, y es en ellas donde se sitúan las oficinas del banco. La solución estructural permite liberar la planta y crear un espacio diáfano, que permite futuros cambios en la disposición de su uso, ahorrando de este modo energía y recursos.



Img 10: Alzado y sección transversal del edificio



Img 11: Tipologías de plantas

Algunos datos relevantes:

Plantas sobre rasante: 72
Plantas bajo rasante: 4 (370 plazas de parking)
Superficie total: 135.000 m² / 1.453,128 ft²
Número de ascensores: 49
Altura arquitectónica: 367,4 metros / 1.205 pies
Altura del piso más alto ocupado: 288,3 metros
Ranking Global: 20 en el mundo
Ranking Regional: 14 más alto de Asia (excluyendo el Medio Este)
Ranking de la ciudad: 4 más alto de Hong Kong
Ranking Nacional: 11 más alto de China

3.2.3. Materialidad

El hormigón reforzado es el elemento principal en los elementos estructurales verticales, los miembros horizontales son de acero. El aspecto exterior del marco estructural se expresa con paneles anodizados que forman parte de su muro cortina.

El edificio entero está cubierto por estos vidrios reflexivos en tonos plata azulados enmarcados en aluminio. Tal piel no sólo refleja las imágenes del cielo y de la ciudad que cambian, sino que también absorbe la luz del sol brillante de modo que el consumo de energía para iluminación y calefacción se reducen. En la planta baja, como ya se ha comentado anteriormente, el pódium es de granito.

Prácticamente todos los aspectos de este edificio fueron planeados y desarrollos con nuevas técnicas de material, desde moverlos a una altura nunca antes alcanzada fuera de los EE.UU., a trabajar con grandes y pesados acristalamientos en altura, 10.000 paneles de vidrio reflectante de 25 mm. de espesor.



Img 12: Imagen del acristalamiento en altura y paneles anodizados.



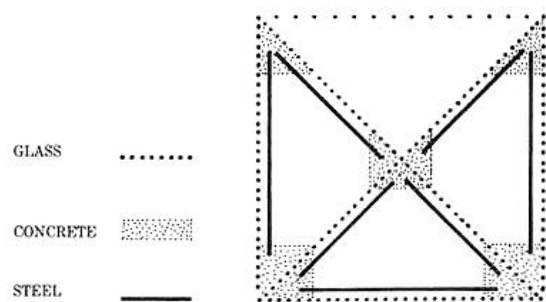
4_Estructura y Construcción

4.1 Esquema estructural

El principio es el de una inmensa viga cajón sometida a flexión (el John Hancock Center en Chicago *Img 1*, concebido por Bruce Graham, es el ejemplo más acabado de este tipo). También emplea el sistema diagrid *Img 2*. Para asegurar la inercia de la estructura de la torre del Banco de China, las masas son excéntricas al máximo. Cuatro inmensas pilas compuestas de acero y hormigón concentran en los ángulos los esfuerzos transmitidos por los tirantes contravientos.

A medida que la estructura crece en altura, el edificio va perdiendo cuadrantes hasta llegar a ser reducido a un único prisma triangular a 70 plantas de altura. Como las líneas estructurales son conducidas por la envolvente del edificio, y esta es variable, da como resultado columnas cargadas excéntricamente. La práctica común dice que no es posible realizar esto puesto que las cargas descentradas causarían demasiado estrés en las columnas. Pero el diseñador estructural, Les Robertson, ideó un sistema que acepta las excentricidades radicales de esta arquitectura.

En palabras del propio Robertson: “una única excentricidad en una columna causará pandeo, pero dos o más líneas de excentricidad, unidas por un mecanismo uniforme de esfuerzos cortantes, contrarrestarán y de ese modo eliminarán el pandeo. Este principio fue aplicado al Banco de China de la siguiente manera: las 5 columnas de hormigón del sistema soportan los armazones de acero estructural que se extienden sobre ellas. El centroide, figura y posición de estas columnas cambia a medida que se desplazan hacia abajo en el edificio, creando una excentricidad. Pero como el hormigón ata el acero a sí mismo, el pandeo es eliminado. Por tanto, el hormigón sirve como un mecanismo de esfuerzo cortante.

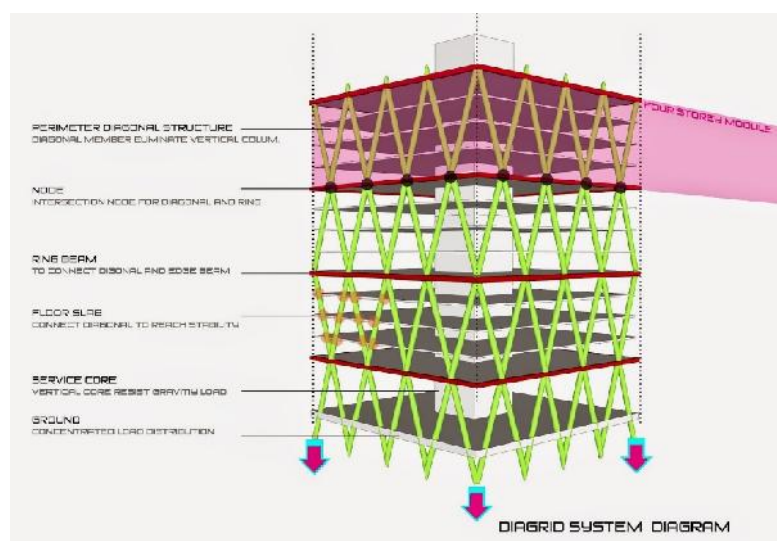


Img 3: Esquema conceptual estructural

El resultado es una configuración estructural uniforme. Además, el sistema es sobresaliente por su economía de material. Comparado con edificios de la misma altura y área, el Banco de China usa aproximadamente el 40 por ciento menos de acero estructural.



Img 1: John Hancock Tower



Img 2: Concepto de Diagrid

Los planos estructurales a la derecha representan las 4 tipologías fundamentales del edificio a medida que se eleva del suelo hasta la estructura aérea de la cima.

En orden ascendente, estas tipologías corresponden a las plantas cuarta, vigesimoquinta, trigésimo octava y quincuagésimo segunda.

El patrón estructural para el suelo metálico se aprecia en las plantas, como también las cerchas usadas en el sistema de fuerzas laterales.

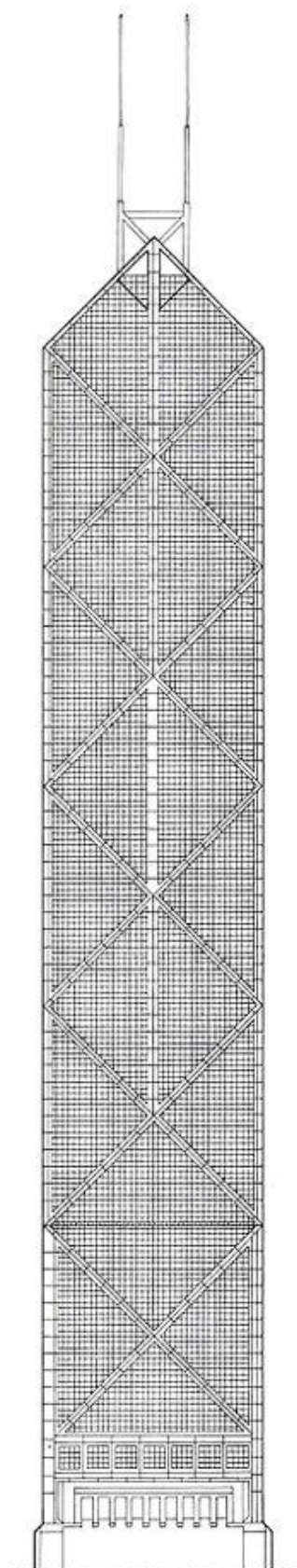
La carga, desciende desde la planta 70 a las columnas perimetrales entre las plantas 51 y 25. La fuerza adicional de la transferencia incrementa la resistencia a esfuerzos laterales del edificio.

En la planta cuarta, muy por debajo de la planta 24 donde la columna central desaparece, la torre prismática se une al basamento de granito.

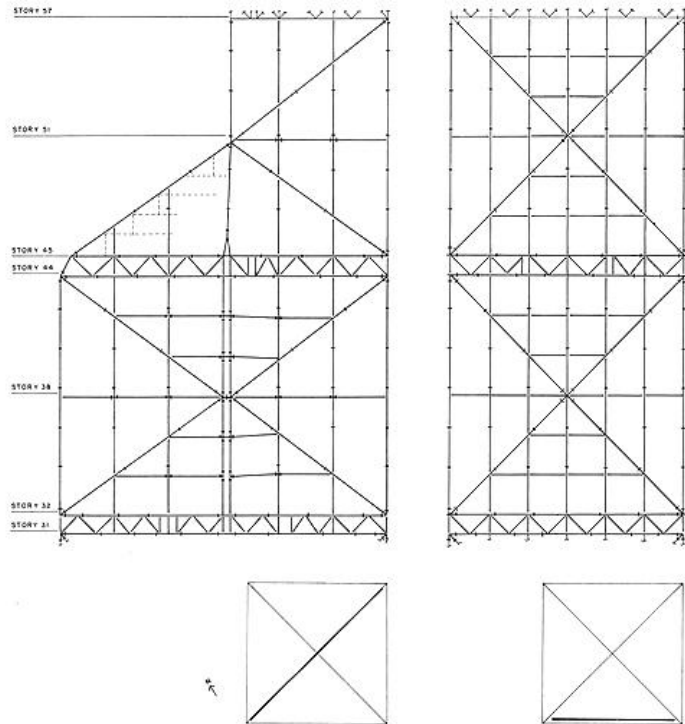
Es aquí donde Pei diseñó el espacio liberado con vistas que se extienden hacia todos lados. En el centro del hall, el atrio anteriormente mencionado se eleva 15 plantas hacia arriba. Este atrio configura espacialmente una conexión de todas las actividades que se realizan en el banco, y aporta luz natural.



Img 4: Plantas estructurales y alzado



La estructura metálica horizontal se eleva desde la quinta planta, siguiendo la geometría de la torre que se eleva. Estas estructuras están organizadas en módulos de 13 plantas. Cada plano horizontal o forjado tiene sus propios pilares metálicos, pero todos comparten entre ellos los grandes pilares de hormigón y acero. Esta técnica es más simple y barata y permite una construcción más rápida que una conexión tridimensional que uniera las diagonales de acero a los pilares particulares de cada planta.

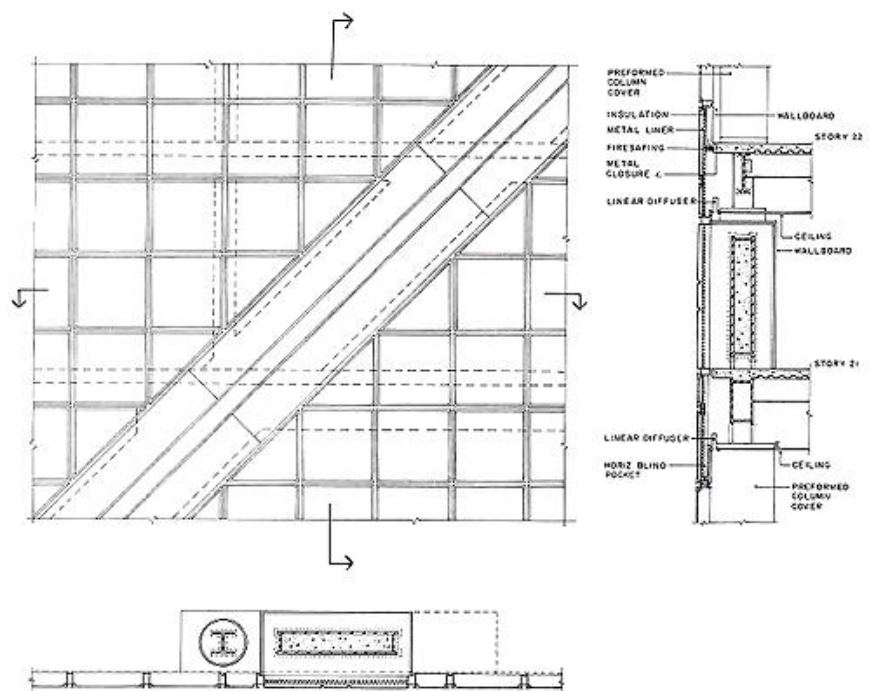


Img 5. Diagramas estructurales en alzado

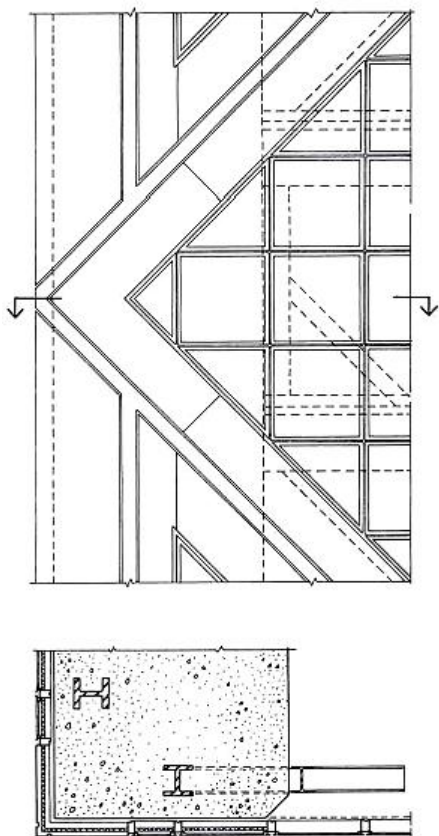
La expresión de la solución estructural en fachada es esencial para la estética del edificio. Ésta se expresa con un recubrimiento de aluminio que se funde con el plano de fachada y se relaciona directamente en posición y dimensión con las diagonales.

En cuanto al sistema de forjados, se emplea la tipología de chapa colaborante, una tipología muy recurrida en esta tipología de edificios. En este caso concreto, está compuesto por una capa de 10 cm de hormigón que descansa sobre las chapas de acero.

La altura entre forjados es de 4 metros, y las luces entre los pilares perimetrales de las subestructuras metálicas particulares de cada planta son del orden de 8 metros.



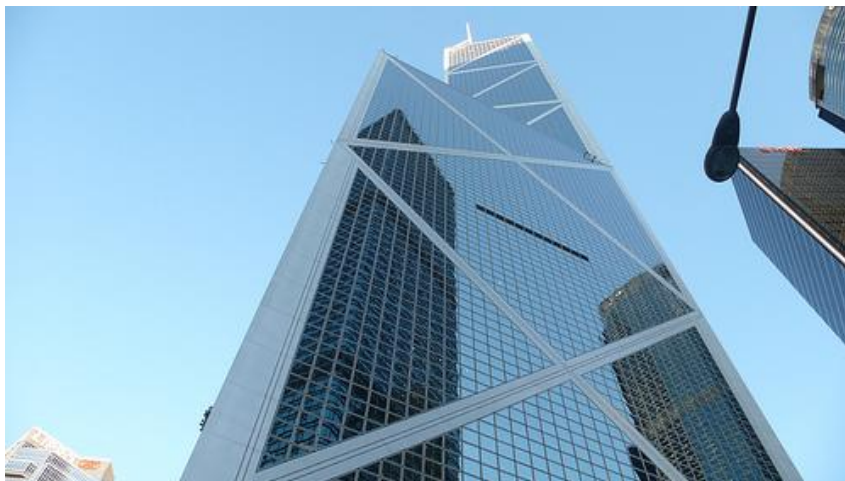
Img 6: Detalles constructivos



Img 7: Detalle constructivo

En la imagen adjunta (Img 7) se puede apreciar la dimensión de las columnas de hormigón reforzado con acero.

No se ha encontrado información acerca de la magnitud de estas columnas y diagonales, pero sí que puede apreciar cómo disminuye su sección a medida que aumenta la altura del edificio (Img 8). Esta reducción de tamaño es lógica puesto que en plantas superiores la carga soportada es mucho menor que en las plantas base.

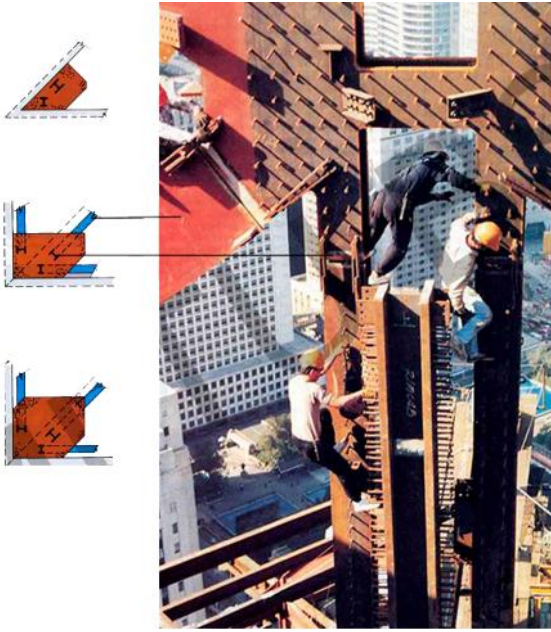


Img 8: Imagen donde se aprecia la reducción en sección de las columnas en altura

4.2 Construcción



Img 9: Imagen del proceso constructivo. Las obras finalizaron en 1990.



Img 10: Detalle del encuentro entre diagonales estructurales



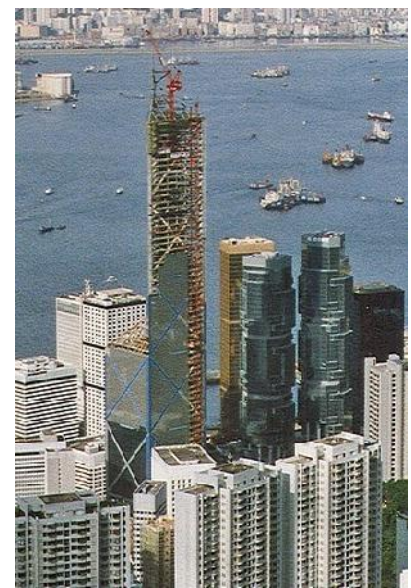
Img 11: Imagen del proceso constructivo



Img 12: Imagen del proceso constructivo



Img 13: Imagen del proceso constructivo



Img 14: Imagen del proceso constructivo



5_Modelo estructural

5.1 Modelo estructural

Para poder interpretar y comprender el comportamiento estructural del proyecto, tras haber hecho una primera parte de análisis y estudio de sus características, se realiza un modelo estructural del edificio a través de una herramienta informática. Para ello, mediante un proceso de modelizado, se realiza la conversión y simplificación de los elementos constituyentes de la estructura en elementos más sencillos, de los que extraer en adelante conclusiones. A este modelo, se le asignan unas cargas que lo solicitarán. Tras realizar este proceso, se pueden analizar los resultados y obtener conclusiones del comportamiento del modelo, que teniendo en cuenta las limitaciones del mismo, se podrán desarrollar como conclusiones también válidas para la propia estructura.

El proceso de modelado y asignación de cargas se realiza a través de la aplicación informática denominada Architrave.

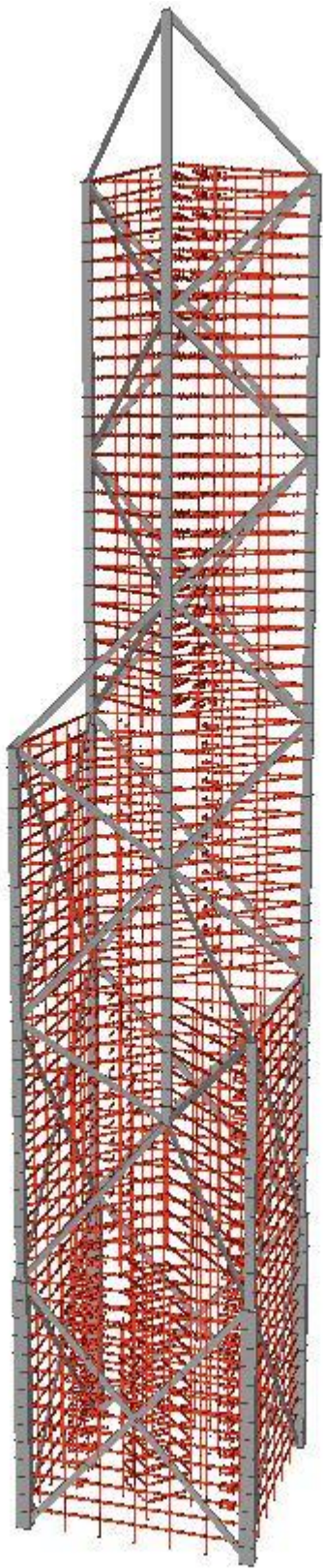
5.1.1. Simplificación y reducción

El modelo estructural se realiza únicamente de aquellos elementos estructurales de importancia primaria a la estructura, eliminando aquellos de carácter secundario. En este caso, se ha prescindido de la modelización de los niveles que quedan por debajo de la cota 0, así como del plinto de granito sobre el que se apoyan los prismas de la torre, para modelizarlo como un empotramiento a modo de cimentación.

Por otra parte, el uso del proyecto, torre de oficinas para un banco, le confiere un carácter privativo que a lo largo del trabajo ha hecho muy difícil encontrar planos y dibujos de las partes más restrictivas. De esta manera, no se ha encontrado información de las plantas técnicas para instalaciones que se suceden cada vez que el edificio perdía un cuadrante en altura y cambiaba la tipología de planta, por lo que no se ha podido modelizar, aunque sólo habían 3 plantas de este tipo, por lo que la desviación no se considera grave.

Por lo tanto, se realiza el modelo de los siguientes elementos:

- Macroestructura exterior
- Forjados
- Modelo de barras de estructura interior

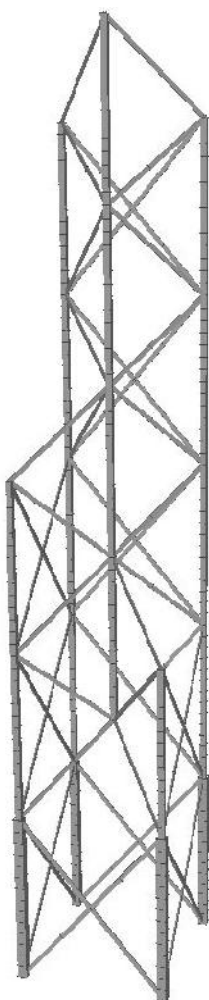


Img 1: Modelo sólido de la estructura modelizada



mg 2: Modelo sólido de las distintas tipologías de plantas del edificio

A. MACROESTRUCTURA EXTERIOR



De ahora en adelante definiremos a las grandes pilastras y sus diagonales exteriores como una macroestructura, para diferenciarla del modelizado de la estructura particular de cada tipología de plantas.

A la hora de modelizar estos elementos, se recurre a un modelo de barras, pero realizando una simplificación sustantiva respecto al modelo real. Si recordamos los detalles constructivos de estos elementos, eran una combinación de acero y hormigón, pero no se puede realizar una modelización de esta combinación para su posterior análisis en el programa de cálculo. Es por esto que se elige el hormigón para modelizar estos elementos, dada su gran resistencia a compresión a la hora de transmitir las cargas hasta la cimentación.

A las columnas verticales se les asigna una sección de 3,00 x 3,00 m. para las primeras plantas, puesto que han de soportar mayores esfuerzos, y para el resto se reduce a 2,00 x 2,00 m. Clase resistente HA-25.

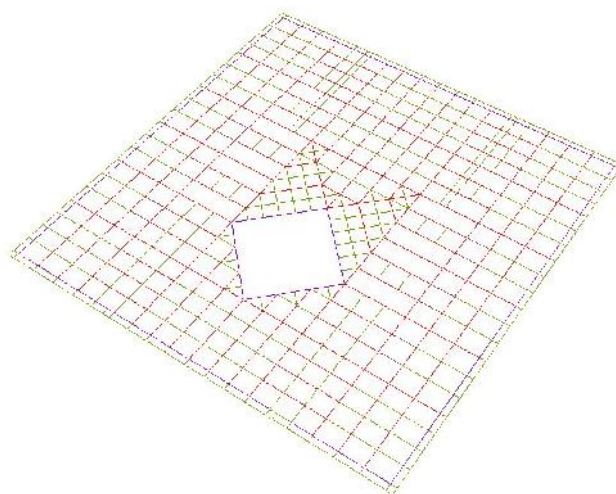
Las diagonales que conectan y distribuyen los esfuerzos hacia las esquinas, no están tan solicitadas como las grandes columnas, por lo que se les asigna una sección de 1,50 m x 1,50 m, también clase resistente HA-25.

Al haber eliminado el plinto de granito al que se entregaba esta estructura, se modelizan los apoyos como empotramientos contra el terreno, que a fin de cuentas simulan la misma función que el plinto de granito.

Img 3: Modelo de barras sólido de macroestructura

B. FORJADOS

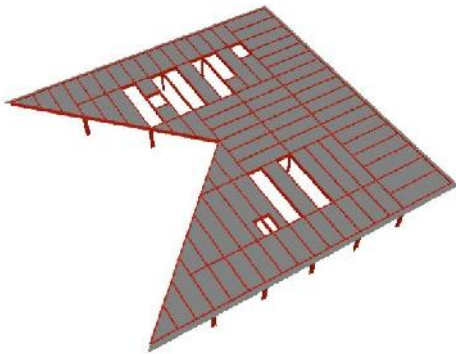
Los forjados son elementos de gran superficie, por lo que hay que recurrir a un modelizado superficial a partir de elementos finitos. Uno de los aspectos a tener en cuenta es que para que el modelo funcione correctamente se debe asegurar que las esquinas de los elementos finitos coincidan con el resto de geometrías del proyecto. En este caso, se debía asegurar que el forjado estuviera conectado con los elementos verticales.



Img 4: Modelo de elementos finitos para los forjados

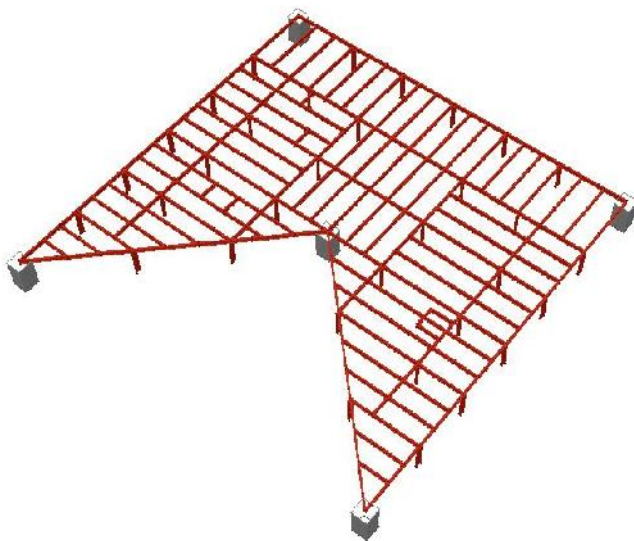
Se modeliza el forjado original de hormigón y chapa colaborante por estas piezas de HA-25 a las que se les asigna un espesor de 10 cm. Las dimensiones de estos elementos finitos son en torno a los 2 m, dado el gran número de elementos que componen el global del edificio, el programa de cálculo se saturaría si las dimensiones fueran más pequeñas. Se modelizan así los forjados de las 4 distintas tipologías de planta.

Cabe destacar en el caso de este edificio, que los huecos para el paso de elementos verticales como puedan ser comunicaciones o instalaciones, no actúan de rigidizadores de la estructura como ocurre en la mayoría de los casos en esta tipología de edificios en altura, en los que hace falta de elementos auxiliares que rigidicen la estructura para conferirle estabilidad frente a las solicitaciones. En este caso, la macroestructura exterior es la que se encarga de absorber los esfuerzos del viento, que son los que mayormente solicitan a los edificios en altura, por lo que no es necesario el empleo de pantallas rigidizadoras auxiliares.



Img 5: Modelo sólido de un forjado

C. MODELO DE BARRAS ESTRUCTURA INTERIOR



De nuevo en este caso se recurre a un modelo de barras para configurar la estructura particular de cada tipología de plantas que tiene la torre.

Se ha hecho una distinción entre los elementos perimetrales y los interiores, asignando una sección HEB-600 a los pilares perimetrales y HEB-300 a los interiores. Los zunchos perimetrales sí que comparten sección con el sistema de vigas y correas que sustentan el forjado, una sección grande de IPE-600, puesto que las luces que se llegan a salvar son de hasta 15 metros en algunos tramos, por lo que se encuentran muy solicitadas, dada la voluntad de

planta diáfana del proyecto, los pilares recaen sobre elementos como el perímetro de los núcleos de comunicación etc., siempre intentando mantener la planta libre. Con estos perfiles asignados, las relaciones canto/luz en los puntos de luz máxima es de $h/L = 0,04$.

La clase resistente del acero es S-275.

5.2 Modelo de cargas

5.2.1. Evaluación de cargas

Una vez realizado el modelo, se procede a la asignación de un modelo de cargas que represente de forma aproximada las cargas a las que pueda estar sometida la estructura real. Esta asignación de cargas se hace de acuerdo con lo establecido en el Código Técnico de la Edificación (CTE), específicamente en su apartado DB-SE-AE: Documento Básico. Seguridad Estructural. Acciones en la edificación.

Para la evaluación de cargas deberemos distinguir aquellas permanentes de las variables. Cabe mencionar que los pesos propios de los elementos estructurales ya los tiene en cuenta el propio programa a la hora de realizar el cálculo, por lo que no será necesario evaluar estas acciones.

Destacar que no se va a realizar el cálculo de la carga del sismo en este trabajo.

5.2.1.a) CARGAS VERTICALES

Consideramos cargas verticales todas aquellas que debido a la fuerza de la gravedad ejercen una fuerza en la dirección vertical que es recogida por los forjados y soportada por la estructura. Como ya se ha comentado, el peso propio de la estructura no se tiene en cuenta.

Por ello como cargas verticales PERMANENTES de la estructura únicamente tendremos.

- Peso propio de los pavimentos y falsos techos: $1,50 \text{ kN/m}^2$ *[tabla 5a]*

Asumimos unos materiales y pesos específicos que seguramente no se correspondan con los empleados en el momento constructivo de la obra, pero servirán para extraer conclusiones estructurales.

CARGAS VARIABLES:

1. Sobrecargas de uso *[tabla 5b]*

De acuerdo con el apartado 3.1 Sobrecargas de uso: se trata de una zona C2 debido a que a pesar de ser una zona de oficinas también cumple con las labores de banco. Por tanto como sobrecarga de oficinas tomamos 4 kN/m^2

2. Carga de nieve

En este proyecto en particular, la geometría que lo conforma con los cuadrantes de los prismas inclinados hace que no haya cubierta como tal, habiendo una continuidad entre cerramiento y cubierta que hace que no se sepa dónde acaba uno y donde empieza otro. Por lo tanto asumimos despreciable la sobrecarga de nieve.

Materiales y elementos	Peso kN/m ²	Materiales y elementos	Peso kN/m ²
Baldosa hidráulica o cerámica (incluyendo material de agarre)		Linóleo o loseta de goma y mortero	
0,03 m de espesor total	0,50	20 mm de espesor total	0,50
0,05 m de espesor total	0,80	Parque y tarima de 20 mm de espesor sobre rastreles	0,40
0,07 m de espesor total	1,10	Tarima de 20 mm de espesor rastreles recibidos con yeso	0,30
Corcho aglomerado tarima de 20 mm y rastrel	0,40	Terrazo sobre mortero, 50 mm espesor	0,80

Tabla 5a: Peso por unidad de superficie

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m ²]	Carga concentrada [kN]
A	Zonas residenciales	A1	Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles	2	2
		A2	Trasteros	3	2
B	Zonas administrativas			2	2
C	Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D)	C1	Zonas con mesas y sillas	3	4
		C2	Zonas con asientos fijos	4	4
		C3	Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc.	5	4
		C4	Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas	5	7
		C5	Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc)	5	4
D	Zonas comerciales	D1	Locales comerciales	5	4
		D2	Supermercados, hipermercados o grandes superficies	5	7
E	Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN)			2	20 ⁽¹⁾
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾	G1 ⁽⁷⁾	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 ⁽⁴⁾ (6)	2
		G2	Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾	0,4 ⁽⁴⁾	1
				0	2

Tabla 5b: Valores característicos de las sobrecargas de uso

5.2.1.b) CARGAS HORIZONTALES

Para el cálculo de la fuerza ejercida por el viento, se sigue lo descrito por el CTE en su apartado DBSE-AE, que trata sobre las acciones sobre la edificación y como realizar el cálculo de manera que se puedan llegar a tener en cuenta todas las variables ponderadas de una forma correcta.

En primer lugar se ha realizado el modelado completo de toda la estructura del edificio intentando asimilar al máximo los enlaces y los comportamientos reales con los del modelo informático. Por la complejidad del edificio se ha desarrollado más otras parcelas como por ejemplo puede ser el efecto del viento, un factor muy importante en los edificios de gran altura como es nuestro caso.

El análisis que haremos del viento será únicamente en una de las direcciones, concretamente la que hemos previsto más desfavorable, que es la fachada con más área expuesta al empuje del viento.

Una vez decidida la dirección de la actuación pasamos a calcular la fuerza del viento para cada planta, siendo los elementos de la estructura horizontal los encargados de absorber las fuerzas del viento. Concretamente serán las vigas perimetrales metálicas las que en primera instancia reciban la acción

para posteriormente transmitirla hasta los grandes pilares perimetrales, los cuales, mediante la ayuda de las diagonales, disiparán la carga hasta la cimentación.

Cada planta del edificio presenta en este alzado 7 frentes de vigas metálicas, que serán los puntos encargados de absorber para posteriormente transmitir el esfuerzo. El siguiente paso será determinar en cada punto cual es el área de influencia del esfuerzo, siendo ésta la definida por el cuadrado que se forma al contabilizar la mitad de la distancia que existe entre cada punto analizado y el inmediatamente posterior en horizontal y en vertical (en caso de ser un punto que se encuentre en un extremo, la distancia a contabilizar por el lado extremo será la que haya hasta el límite de la fachada).

3.3.2 Acción del viento

- 1 La acción de viento, en general una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto, o presión estática, q_e , puede expresarse como:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p \quad (3.1)$$

siendo:

- q_b la presión dinámica del viento. De forma simplificada, como valor en cualquier punto del territorio español, puede adoptarse $0,5 \text{ kN/m}^2$. Pueden obtenerse valores más precisos mediante el anejo D, en función del emplazamiento geográfico de la obra.
- c_e el coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado, en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción. Se determina de acuerdo con lo establecido en 3.3.3. En edificios urbanos de hasta 8 plantas puede tomarse un valor constante, independiente de la altura, de 2,0.
- c_p el coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento, y en su caso, de la situación del punto respecto a los bordes de esa superficie; un valor negativo indica succión. Su valor se establece en 3.3.4 y 3.3.5.

Tabla 5c: Acción del viento

Llegado a este punto del proceso de cálculo de la carga de viento, resulta imposible continuar debido a la falta de información sobre los parámetros de cálculo del emplazamiento del edificio, en este caso Hong Kong. Tras valorar y consultar posibles soluciones, se decide realizar una estimación de carga de viento resultado de la multiplicación de 1 kN/m^2 por el ámbito de aplicación anteriormente descrito, y a su vez, ir mayorando este valor de 1 kN/m^2 conforme el edificio vaya ganando en altura. De esta manera, se obtienen unos valores de carga de viento que permiten continuar con el proceso de cálculo, y aunque se alejen de los estándares de cálculo del CTE en España, los resultados obtenidos son bastante coherentes dada la envergadura del edificio, con hasta 367 metros de altura de cota máxima, y las características del lugar, famoso por sus tifones y sus potentes vientos.

A continuación se muestra una tabla resumen de la aplicación de las cargas puntuales de viento sobre las vigas perimetrales de la estructura. La carga se ve mayorada hasta en 3 ocasiones, una por cada cambio de tipología de planta.

(m)		(m)	(m)	(m ²)		(kN)
Rango de aplicación	Punto	Alto	Ancho	Superficie	Coef. Mayoración	qv
0-56	1	4,00	4,47	17,88	1,00	17,88
0-56	2	4,00	8,34	33,36	1,00	33,36
0-56	3	4,00	7,74	30,96	1,00	30,96
0-56	4	4,00	7,74	30,96	1,00	30,96
0-56	5	4,00	7,74	30,96	1,00	30,96
0-56	6	4,00	8,34	33,36	1,00	33,36
0-56	7	4,00	4,47	17,88	1,00	17,88
56-112	8	4,00	4,47	17,88	1,25	22,35
56-112	9	4,00	8,34	33,36	1,25	41,70
56-112	10	4,00	7,74	30,96	1,25	38,70
56-112	11	4,00	7,74	30,96	1,25	38,70
56-112	12	4,00	7,74	30,96	1,25	38,70
56-112	13	4,00	8,34	33,36	1,25	41,70
56-112	14	4,00	4,47	17,88	1,25	22,35
112-168	15	4,00	4,47	17,88	1,50	26,82
112-168	16	4,00	8,34	33,36	1,50	50,04
112-168	17	4,00	7,74	30,96	1,50	46,44
112-168	18	4,00	7,74	30,96	1,50	46,44
112-168	19	4,00	7,74	30,96	1,50	46,44
112-168	20	4,00	8,34	33,36	1,50	50,04
112-168	21	4,00	4,47	17,88	1,50	26,82
168-280	22	4,00	4,47	17,88	1,75	31,29
168-280	23	4,00	8,34	33,36	1,75	58,38
168-280	24	4,00	7,74	30,96	1,75	54,18
168-280	25	4,00	7,74	30,96	1,75	54,18
168-280	26	4,00	7,74	30,96	1,75	54,18
168-280	27	4,00	8,34	33,36	1,75	58,38
168-280	28	4,00	4,47	17,88	1,75	31,29

Tabla 5d: Cálculo de estimación de cargas de viento

5.2.2. Combinación de cargas

La combinación de cargas la realiza de forma automática el programa de cálculo de acuerdo con el Código Técnico de la Edificación (CTE), en concreto el DB-SE: Documento Básico. Seguridad Estructural. 4 Verificaciones basadas en coeficientes parciales. 4.2.2 Combinación de acciones. Se establece que la combinación de acciones para situaciones persistentes es:

4.2.2 Combinación de acciones

- 1 El valor de cálculo de los efectos de las acciones correspondiente a una situación persistente o transitoria, se determina mediante combinaciones de acciones a partir de la expresión

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.3)$$

es decir, considerando la actuación simultánea de:

- todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_k$), incluido el pretensado ($\gamma_P \cdot P$);
- una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ($\gamma_Q \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
- el resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación ($\gamma_Q \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_k$).

Los valores de los coeficientes de seguridad, γ , se establecen en la tabla 4.1 para cada tipo de acción, atendiendo para comprobaciones de resistencia a si su efecto es desfavorable o favorable, considerada globalmente.

Para comprobaciones de estabilidad, se diferenciará, aun dentro de la misma acción, la parte favorable (la estabilizadora), de la desfavorable (la desestabilizadora).

Los valores de los coeficientes de simultaneidad, ψ , se establecen en la tabla 4.2

Tabla 5.e: Combinación de acciones

Tabla 4.1 Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

Tipo de verificación ⁽¹⁾	Tipo de acción	Situación persistente o transitoria	
		desfavorable	favorable
Resistencia	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,35	0,80
	Empuje del terreno	1,35	0,70
	Presión del agua	1,20	0,90
	Variable	1,50	0
Estabilidad		desestabilizadora	estabilizadora
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

Tabla 5.f: Coeficientes parciales de seguridad (γ) para las acciones

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)		(1)	
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento	0,6	0,5	0
Temperatura	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno	0,7	0,7	0,7

Tabla 5.g: Coeficientes de simultaneidad

5.2.2.a Combinaciones E.L.U.

De esta forma, se establecen tres combinaciones principales (las más desfavorables) para ELU, considerando en cada caso una carga variable principal: la sobrecarga de uso la de nieve y la de viento. Señalar que, como ya se comentó en la asignación de cargas, debido a la geometría del edificio no se tienen en cuenta las acciones de nieve, no obstante se formulará la combinación a modo de ejemplo para un caso en el que sí hubiera carga de nieve.

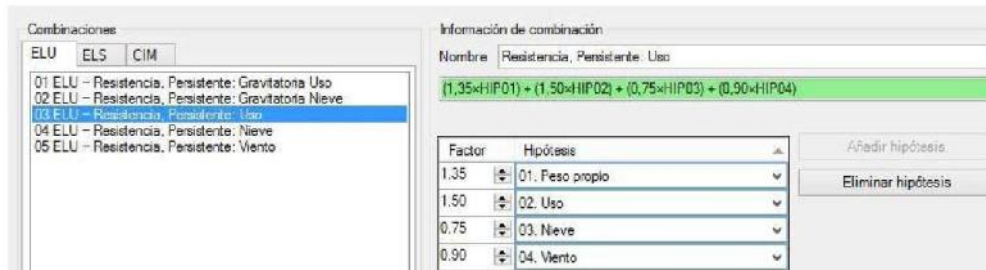


Tabla 5.h: Combinación 03-ELU

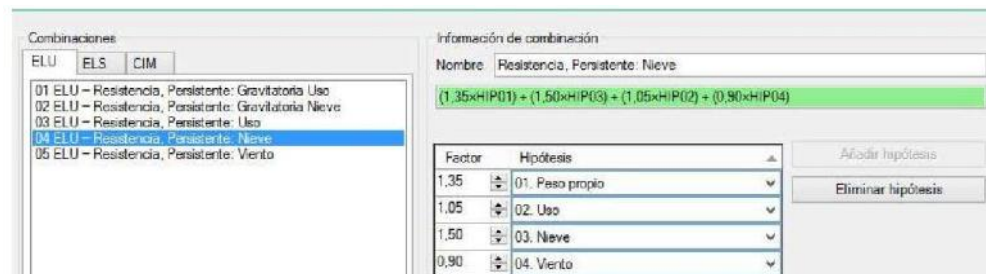


Tabla 5.i: Combinación 04-ELU

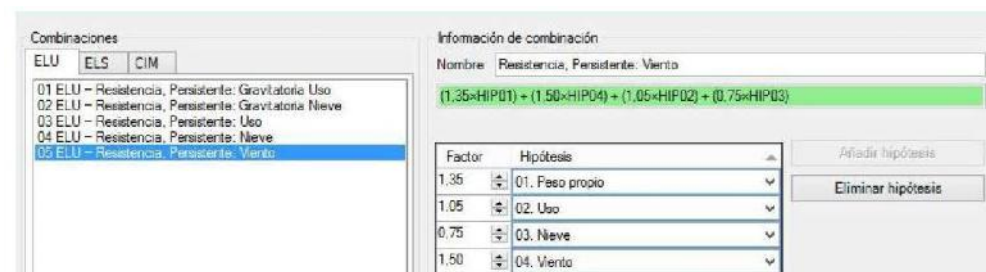


Tabla 5.j: Combinación 05-ELU

5.2.2.b Combinaciones E.L.S.

4.3.2 Combinación de acciones

- 1 Para cada situación de dimensionado y criterio considerado, los efectos de las acciones se determinarán a partir de la correspondiente combinación de acciones e influencias simultáneas, de acuerdo con los criterios que se establecen a continuación.
- 2 Los efectos debidos a las acciones de corta duración que pueden resultar irreversibles, se determinan mediante combinaciones de acciones, del tipo denominado característica, a partir de la expresión

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.6)$$

Es decir, considerando la actuación simultánea de:

- a) todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);
- b) una acción variable cualquiera, en valor característico (Q_k), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
- c) el resto de las acciones variables, en valor de combinación ($\psi_0 \cdot Q_k$).

Tabla 5.k: Combinación característica de acciones para ELS

Por lo tanto, se establecen tres combinaciones características, tomando cada vez una carga variable principal distinta.

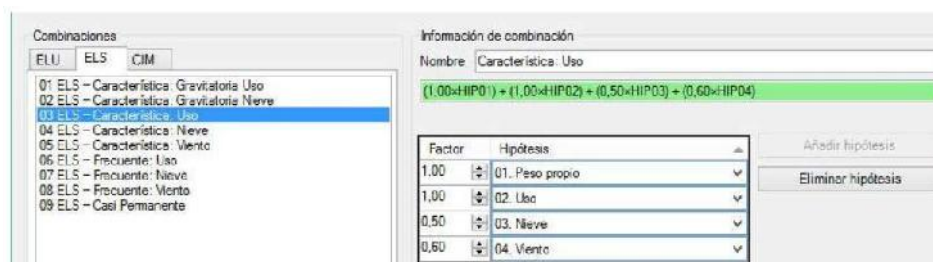


Tabla 5.l: Combinación 03-ELS

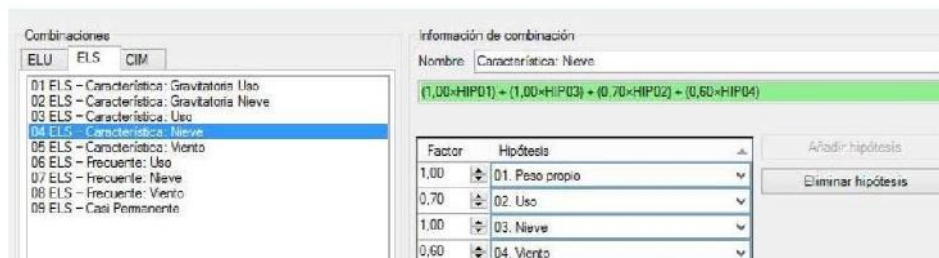


Tabla 5.m: Combinación 04-ELS

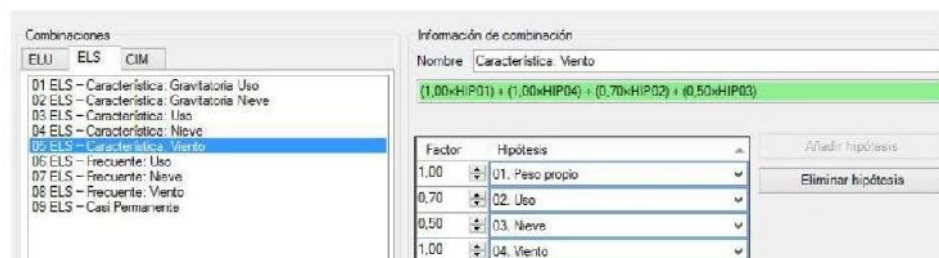


Tabla 5.n: Combinación 05-ELS

Por otro lado, se establecen tres combinaciones frecuentes, de nuevo tomando cada vez una carga variable principal.

- 3 Los efectos debidos a las acciones de corta duración que pueden resultar reversibles, se determinan mediante combinaciones de acciones, del tipo denominado frecuente, a partir de la expresión

$$\sum_{j=1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i=2} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.7)$$

siendo

Es decir, considerando la actuación simultánea de:

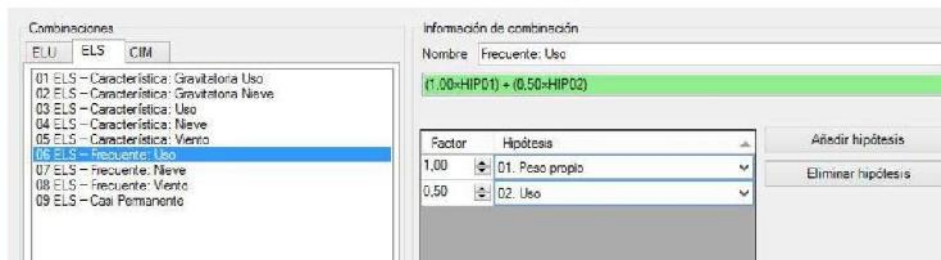
- todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);
 - una acción variable cualquiera, en valor frecuente ($\psi_1 Q_k$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
 - el resto de las acciones variables, en valor casi permanente ($\psi_2 \cdot Q_k$).
- 4 Los efectos debidos a las acciones de larga duración, se determinan mediante combinaciones de acciones, del tipo denominado casi permanente, a partir de la expresión

$$\sum_{j=1} G_{k,j} + P + \sum_{i=2} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad (4.8)$$

siendo:

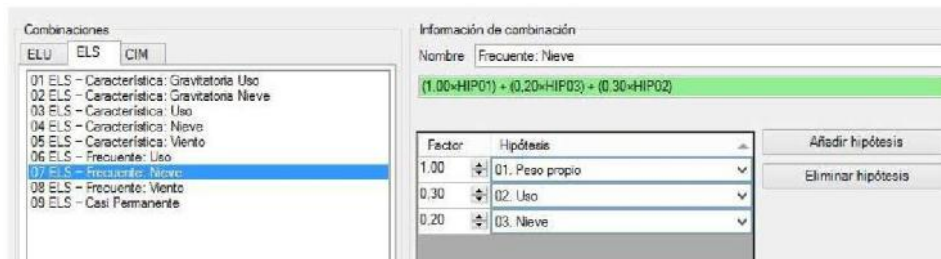
- todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);
- todas las acciones variables, en valor casi permanente ($\psi_2 Q_k$).

Tabla 5.o: Combinación frecuente y casi permanente de acciones para ELS



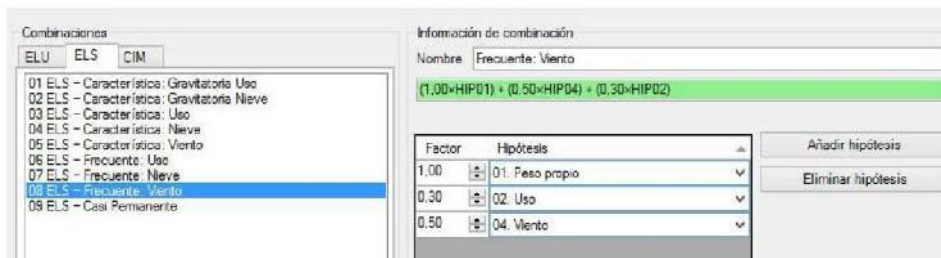
Factor	Hipótesis
1.00	01. Peso propio
0.50	02. Uso

Tabla 5.p: Combinación 06-ELS



Factor	Hipótesis
1.00	01. Peso propio
0.30	02. Uso
0.20	03. Nieve

Tabla 5.q: Combinación 07-ELS



Factor	Hipótesis
1.00	01. Peso propio
0.30	02. Uso
0.50	04. Viento

Tabla 5.r: Combinación 08-ELS

Por último, la combinación casi permanente, con todas las acciones permanentes en valor característico, y las cargas variables en valor casi permanente.

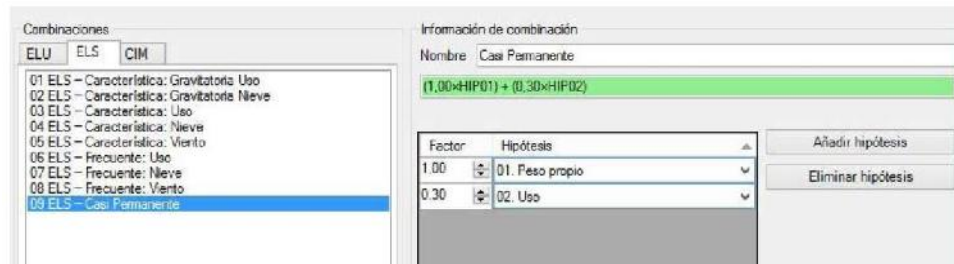


Tabla 5.s: Combinación 09-ELS

5.3 Características materiales

Se establecen las siguientes características de materiales para el hormigón y el acero:

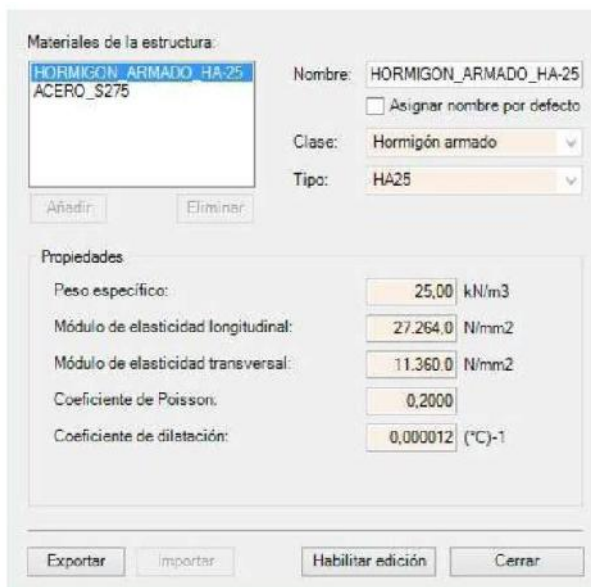


Tabla 5.t: Características hormigón armado

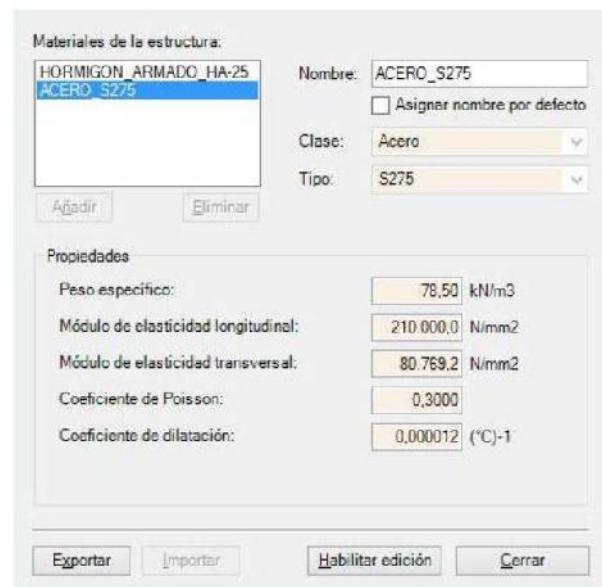
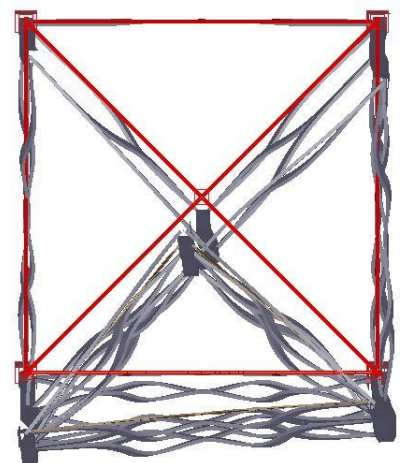


Tabla 5.w: Características acero



6_Análisis estructural

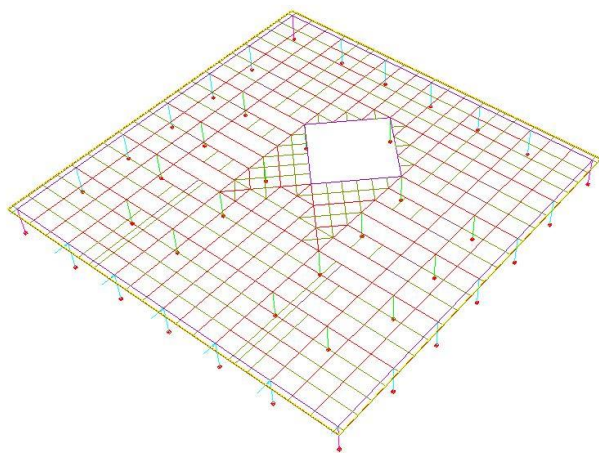
6.1 Análisis de los resultados

Tras poner en carga el modelo en el apartado anterior, la última fase del estudio de este proyecto consiste en analizar los resultados obtenidos del cálculo con el programa Architrave para tratar de entender el funcionamiento y la lógica estructural de las diferentes partes constituyentes del modelo, así como del modelo en conjunto.

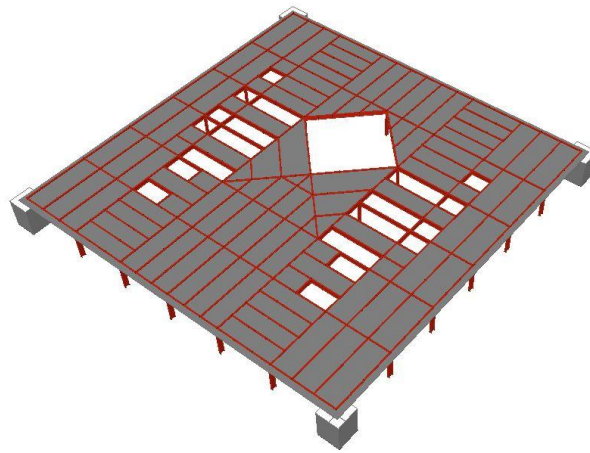
Para intentar pues comprender el funcionamiento estructural, se empezará analizando el comportamiento de las diferentes plantas tipo aisladas, con lo que se espera conseguir entender cuáles son sus partes más solicitadas y cómo le afectan las cargas. Seguidamente, con una idea de este funcionamiento ya formada, se pasará a analizar el conjunto del edificio, para comprobar si la concepción estructural de Pei para este proyecto fue acertada y efectivamente cumple con su cometido.

6.1.1. Comportamiento de planta tipo

TIPOLOGÍA 1. PLANTAS 1 - 14



Img 1: Modelo alámbrico de la estructura



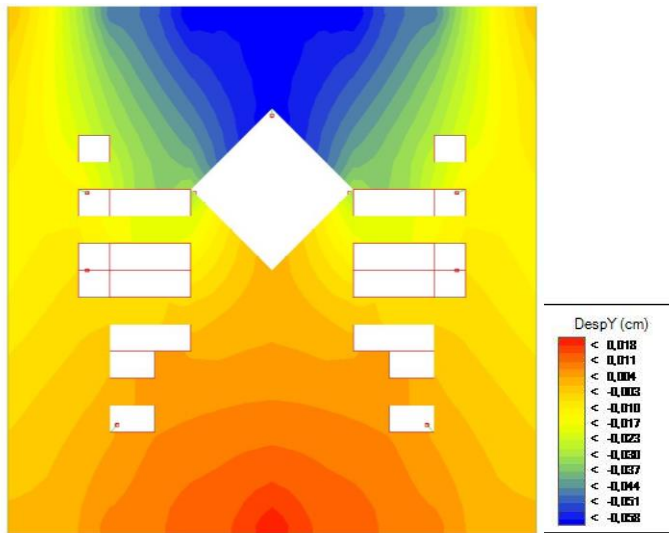
Img 2: Modelo sólido de la estructura



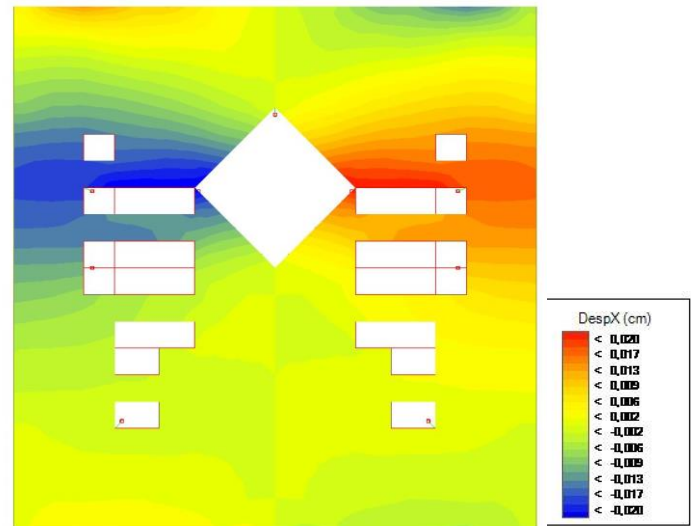
Img 3: Deformada. Combinación ELS característica: gravitatoria uso

Se comienza el análisis, verificando para las futuras plantas tipo, que al comprobarlas de manera aislada, las deformaciones producidas por el viento no son apenas significativas, dada la dimensión de los enormes pilares perimetrales característicos de este proyecto.

De esta manera atendiendo a los desplazamientos D_x y D_y con la combinación ELS característica: viento, vemos como los resultados son prácticamente nulos, no rebasando el desplome local máximo permitido por la normativa de $H/250$.

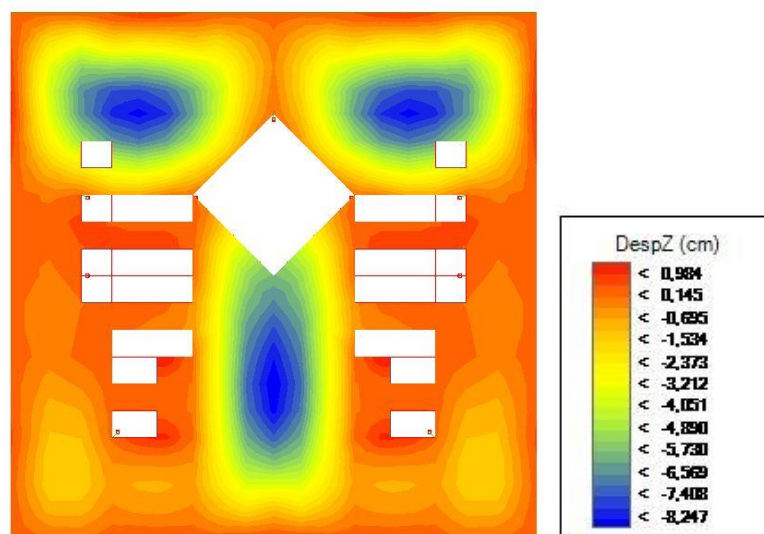


Img 4: Desplazamientos en Y



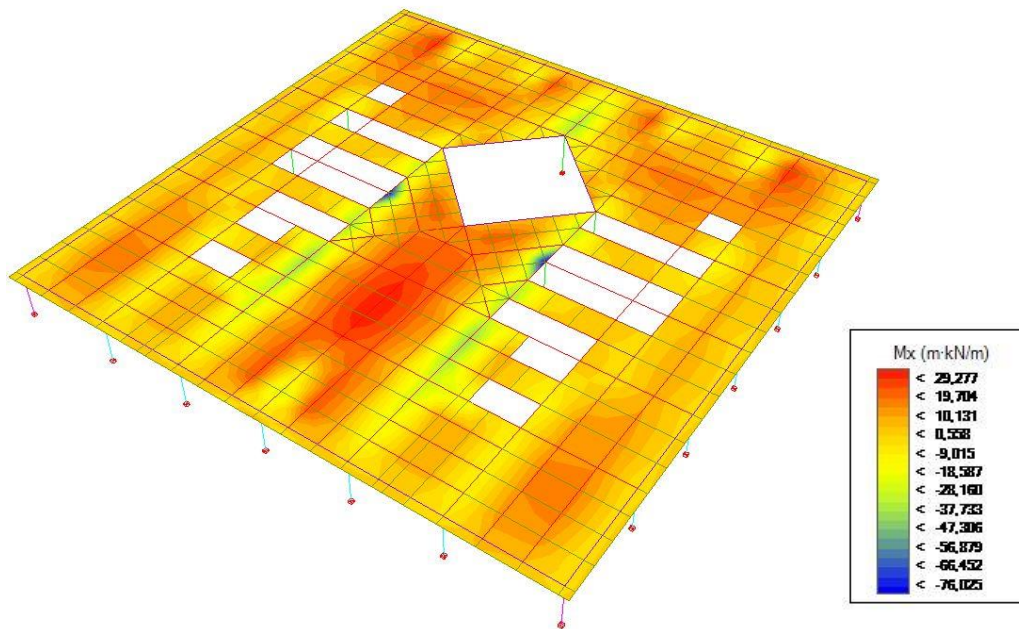
Img 5: Desplazamientos en X

Comprobamos como, efectivamente, las acciones del viento son absorbidas por los grandes pilares perimetrales y los desplazamientos son mínimos, no llegando apenas ni a 1 centímetro. Por lo tanto para futuras plantas tipo, no se realizará esta comprobación, al asumir el comportamiento de las demás tipologías igual al de ésta.

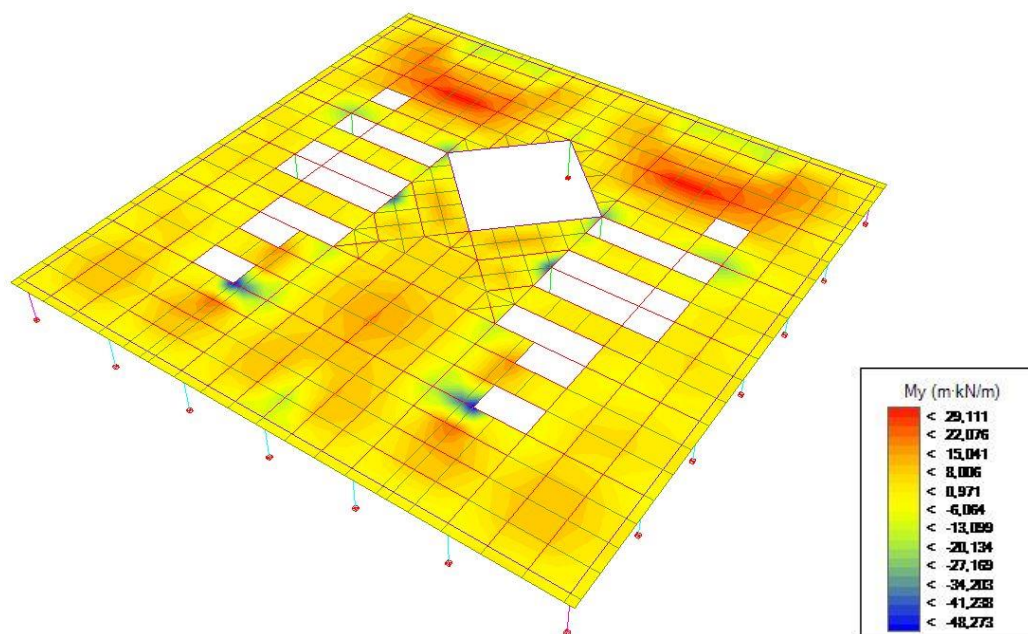


Img 6: Desplazamientos en Z. Combinación ELS característica: gravitatoria, uso

No obstante, las deformaciones verticales debido a las cargas en los elementos finitos del forjado sí que son de magnitud, como se puede apreciar en la imagen superior [img 6]. Vemos como las deformaciones máximas se producen en los vanos que salvan mayores luces, de hasta 25 metros. Por lo tanto, se procederá a peritar mediante el programa de cálculo las vigas más desfavorables de este forjado.

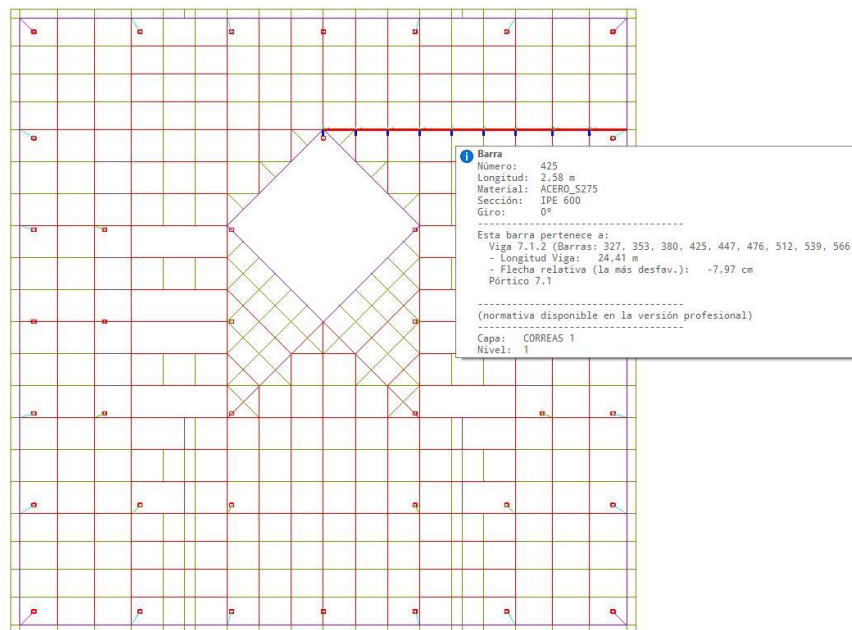


Img 7: Mapa de isovalores de momentos en x. Combinación ELU: resistencia, persistente: gravitatoria uso

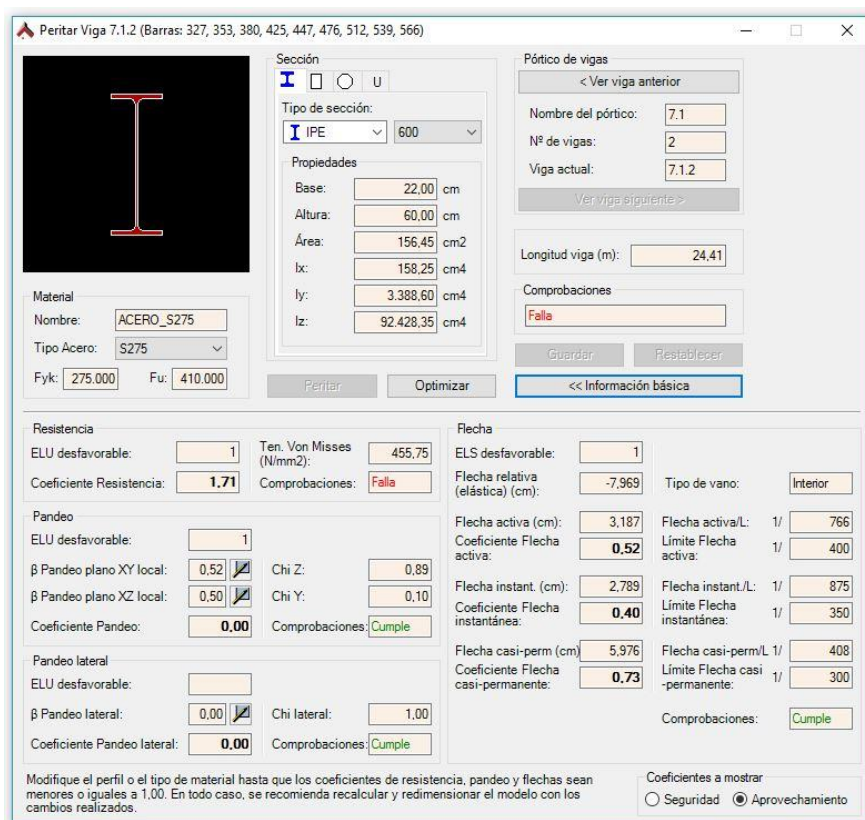


Img 8: Mapa de isovalores de momentos en y. Combinación característica ELU: resistencia, persistente: gravitatoria uso

Se seleccionará para comprobar y peritar, la viga más desfavorable de la planta, que corresponde con la elegida en la imagen siguiente.



Img 9: Viga más desfavorable. Combinación ELS característica: gravitatoria, uso



Peritar Viga 7.1.2 (Barras: 327, 353, 380, 425, 447, 476, 512, 539, 566)

Sección
Tipo de sección: IPE 600

Propiedades
Base: 22,00 cm
Altura: 60,00 cm
Área: 156,45 cm²
I_x: 158,25 cm⁴
I_y: 3.388,60 cm⁴
I_z: 92.428,35 cm⁴

Material
Nombre: ACERO_S275
Tipo Acero: S275
F_{yk}: 275.000 F_u: 410.000

Pórtico de vigas
Nombre del pórtico: 7.1
Nº de vigas: 2
Viga actual: 7.1.2
Longitud viga (m): 24,41

Comprobaciones
Falla

Resistencia
ELU desfavorable: 1
Ten. Von Mises (N/mm²): 455,75
Coeficiente Resistencia: 1,71
Comprobaciones: **Falla**

Pandeo
ELU desfavorable: 1
β Pandeo plano XY local: 0,52
β Pandeo plano XZ local: 0,50
Coeficiente Pandeo: 0,00
Chi Z: 0,89
Chi Y: 0,10
Comprobaciones: **Cumple**

Pandeo lateral
ELU desfavorable: 0,00
β Pandeo lateral: 0,00
Coeficiente Pandeo lateral: 0,00
Chi lateral: 1,00
Comprobaciones: **Cumple**

Flecha
ELS desfavorable: 1
Flecha relativa (elástica) (cm): -7,969
Tipo de vano: Interior
Flecha activa (cm): 3,187
Flecha activa/L: 1/ 766
Coeficiente Flecha activa: 0,52
Limite Flecha activa: 1/ 400
Flecha instant. (cm): 2,789
Flecha instant./L: 1/ 875
Coeficiente Flecha instantánea: 0,40
Limite Flecha instantánea: 1/ 350
Flecha casi-perm (cm): 5,976
Flecha casi-perm/L: 1/ 408
Coeficiente Flecha casi-permanente: 0,73
Limite Flecha casi-permanente: 1/ 300
Comprobaciones: **Cumple**

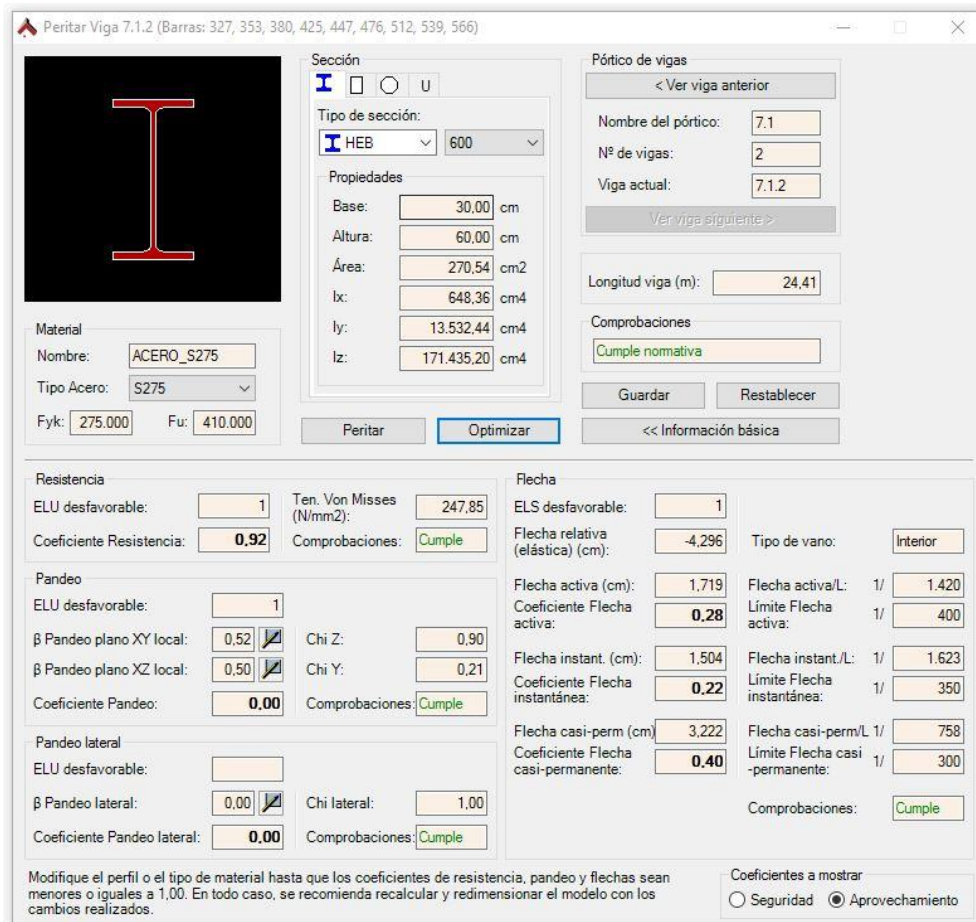
Modifique el perfil o el tipo de material hasta que los coeficientes de resistencia, pandeo y flechas sean menores o iguales a 1,00. En todo caso, se recomienda recalcular y redimensionar el modelo con los cambios realizados.

Coeficientes a mostrar
 Seguridad Aprovechamiento

Img 10: peritación de elemento mediante programa Architrave

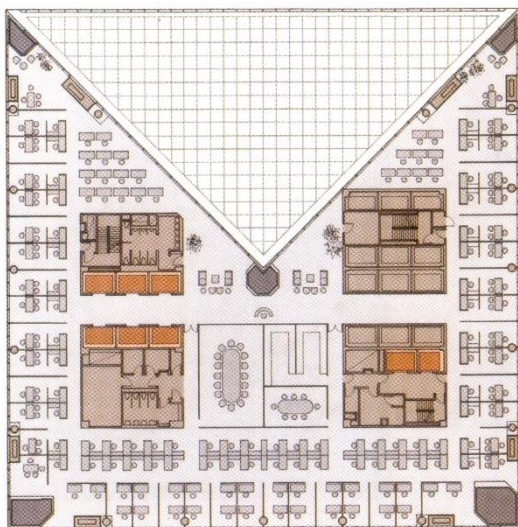
Mediante la herramienta de peritaje que facilita el programa Architrave, se analiza la viga y se puede comprobar en la imagen anterior [Img 10] como falla a resistencia, con un coeficiente bastante superior al aceptable que es 1. El programa también posibilita la optimización del perfil para seleccionar uno que cumpla con la normativa. En este caso el perfil seleccionado era un IPE-600 S275, perfil máximo que admite el programa, por lo que las opciones de optimización podrían ser o seleccionar un perfil distinto, o una clase resistente de acero superior. Se opta por optimizar con un perfil HEB.

Tras optimizar esta viga, se concluye que un perfil HEB-600 S275 cumpliría, y quedaría realizada la peritación de la tipología de plantas 1.

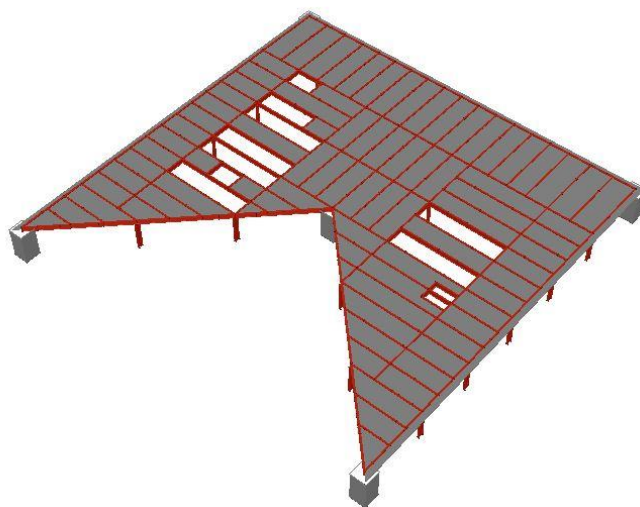


Img 11: peritación de elemento mediante programa Architrave

TIPOLOGÍA 2. PLANTAS 14 – 28



Img 12: planta tipo 2

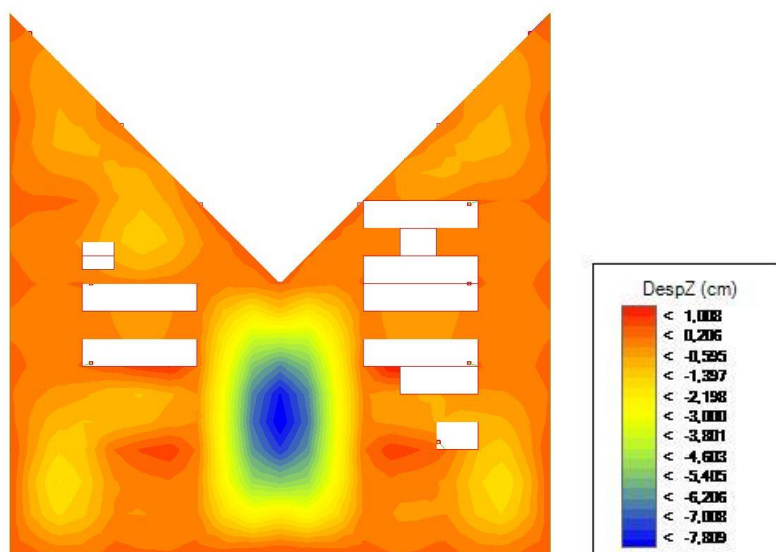


Img 13: Modelo sólido de la estructura

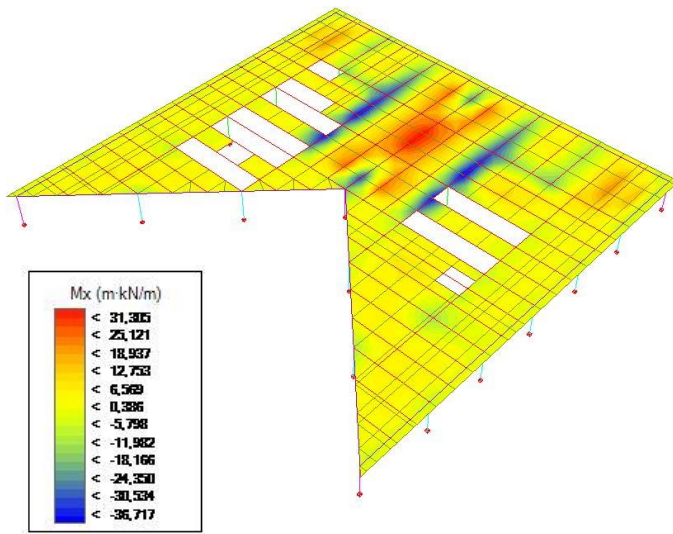


Img 14: Deformada. Combinación ELS característica: gravitatoria uso

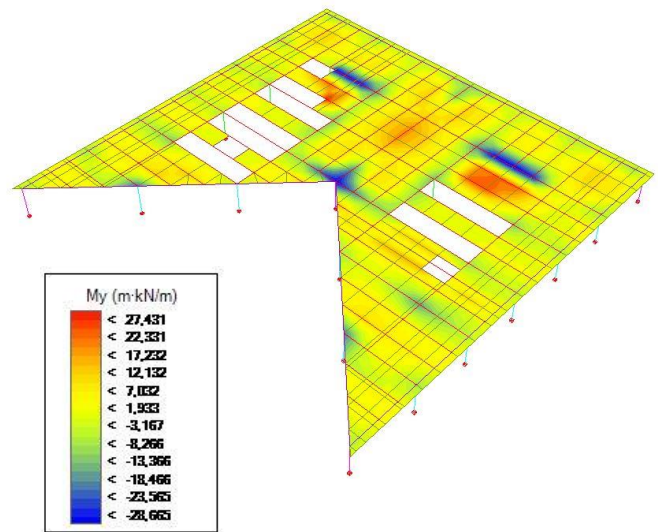
En este caso, los desplazamientos verticales más importantes se producen en la viga que salva el vano central, siendo éstos como se puede ver en la siguiente imagen de casi 8 cm.



Img 15: Desplazamientos en Z. Combinación ELS característica: gravitatoria, uso

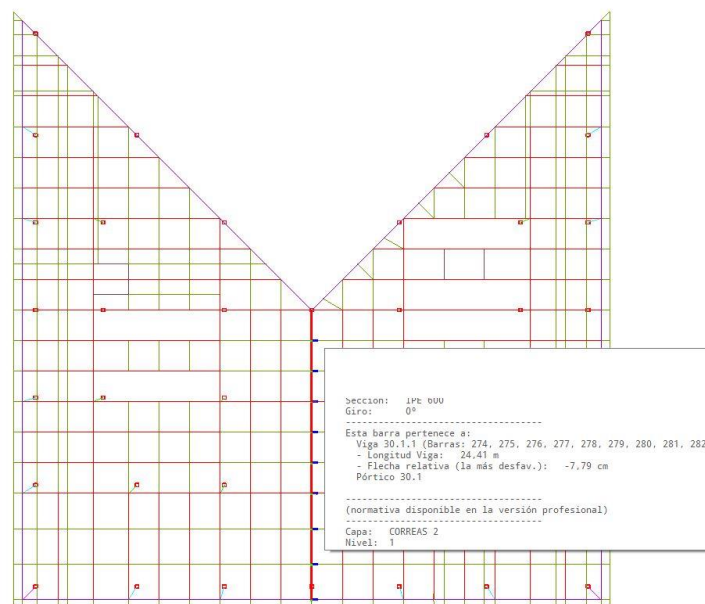


Img 16: Mapa de isovalores de momentos en x. Combinación ELU: resistencia, persistente: gravitatoria uso



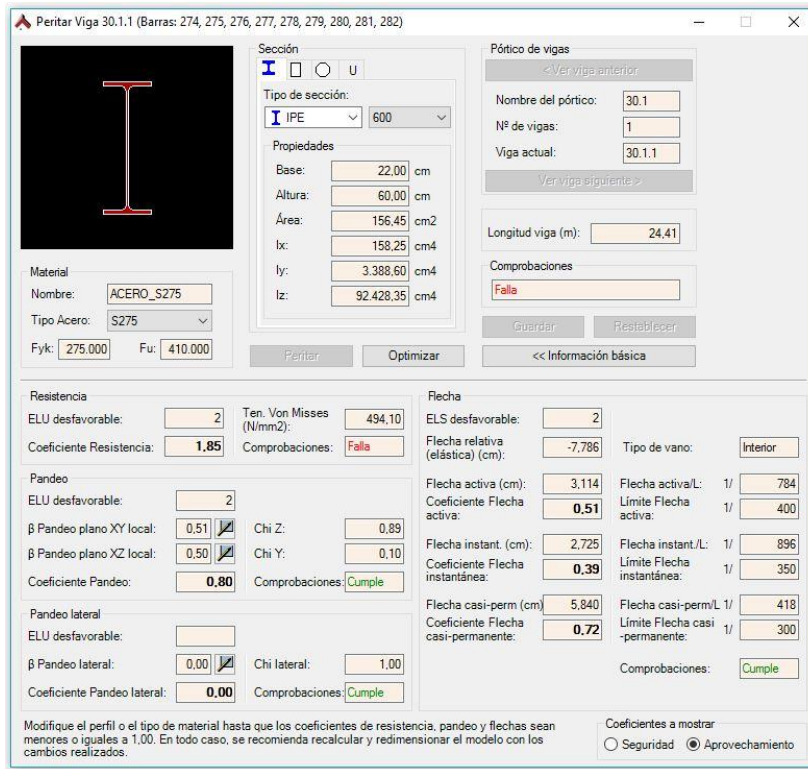
Img 17: Mapa de isovalores de momentos en y. Combinación ELU: resistencia, persistente: gravitatoria uso

Se procede pues, a peritar la viga más desfavorable.



Img 18: Viga más desfavorable. Combinación ELS característica: gravitatoria, uso

Tras su peritación [img 18], llama la atención como a pesar de tener una deformación de casi 8 cm, no da problemas de flecha, sino que falla por criterios resistentes. Esto es debido a la gran longitud del vano, de casi 25 m. Atendiendo a los criterios de flechas, cumple la relación $L/300$ establecida por el CTE, sin embargo es importante ser consciente del hecho de que, aun siendo admisible, se trata de un valor bastante alto. Esto tendrá impacto en el proceso constructivo de la obra, y conlleva un cuidado especial a la hora de prever los posibles movimientos de elementos constructivos.

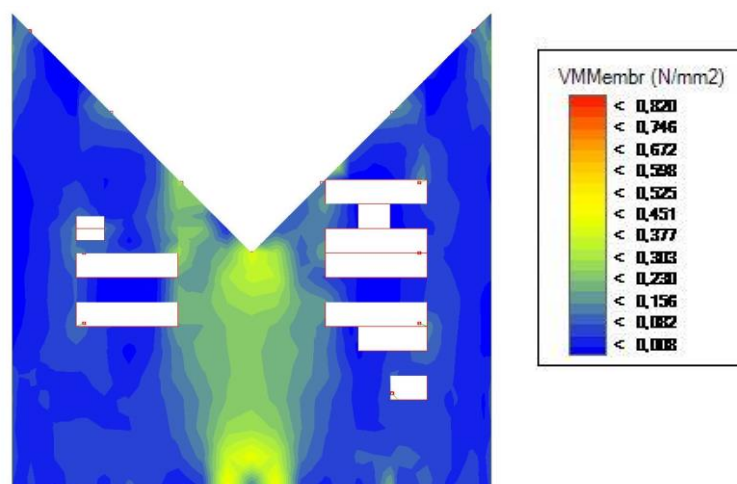


Img 19: peritación de elemento mediante programa Architrave

De nuevo utilizando las posibilidades que brinda el programa, se optimiza el perfil y se concluye que con un HEB-600 S275, cumpliría la condición por la que falla en un principio, los criterios de resistencia.

COMPROBACIÓN TENSIONES VON MISES

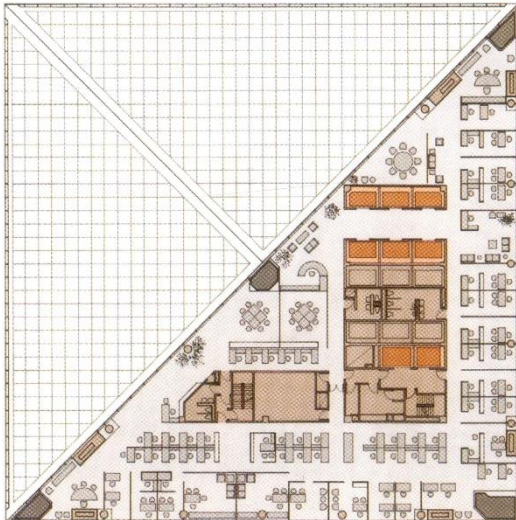
En esta planta, es donde desaparece el gran pilar central, que viene desde la última planta distribuyendo cargas de la macroestructura. En el punto de encuentro entre la lámina del forjado y el pilar, pueden aparecer tensiones de valor superior a la admisible por el hormigón, por lo que conviene comprobar este valor. Las tensiones de Von Mises se utilizan como criterio de rotura para el dimensionado de elementos.



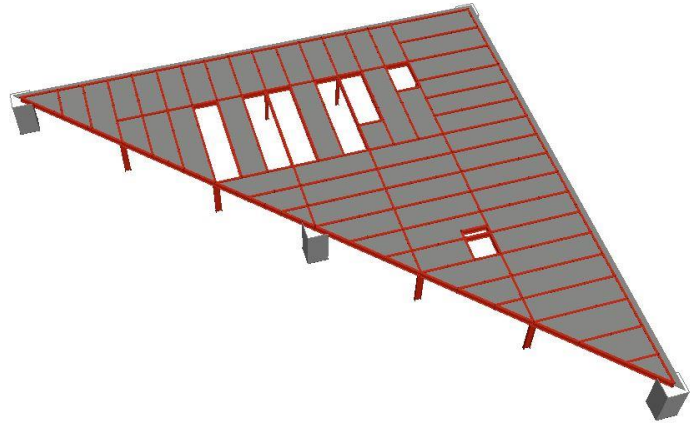
Img 20: Tensiones Von Mises. Combinación ELU resistencia, resistente: gravitatoria, uso

Observando las tensiones von Mises, se concluye que la mayor parte de la lámina queda casi sin tensiones, se transmiten directamente entre pilares. No se presume riesgo de rotura de lámina.

TIPOLOGÍA 3. PLANTAS 28 – 42



Img 20: planta tipo 3

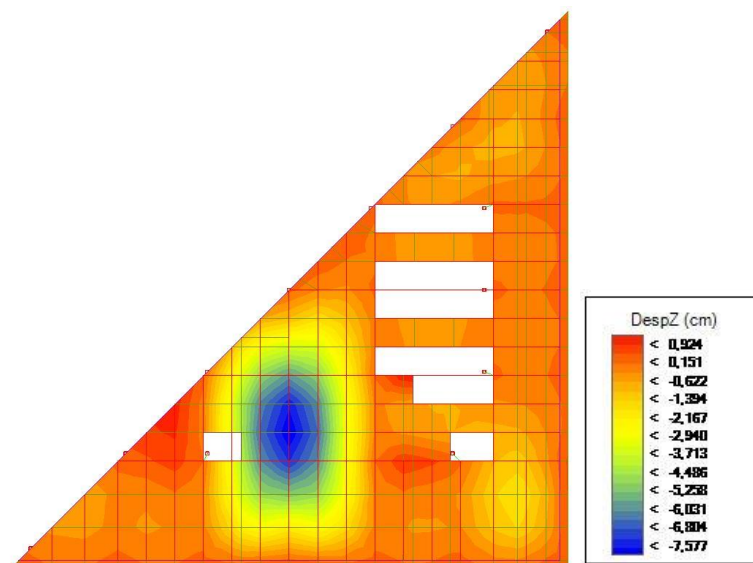


Img 21: Modelo sólido de la estructura

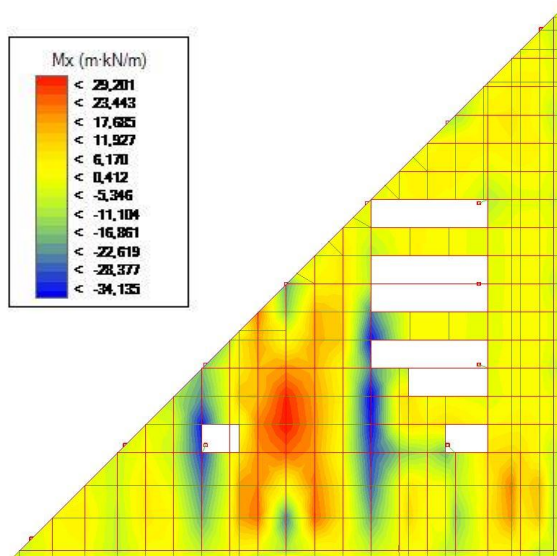


Img 22: Deformada. Combinación ELS característica: gravitatoria uso

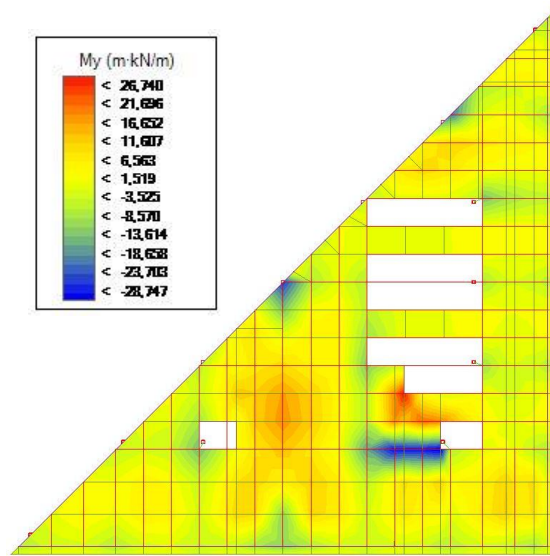
Nuevamente, las deformaciones mayores se producen en el vano central, como en la tipología anterior.



Img 23: Desplazamientos en Z. Combinación ELS característica: gravitatoria, uso

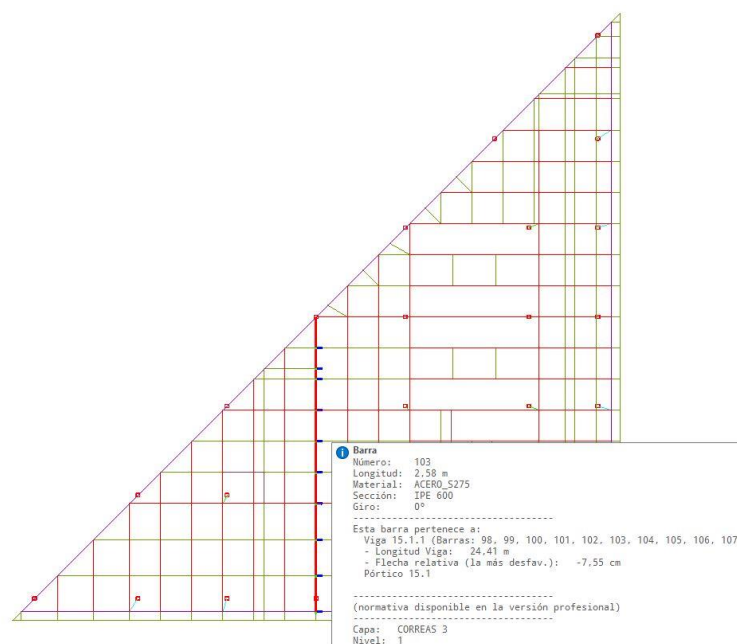


Img 24: Mapa de isovalores de momentos en x. Combinación ELU: resistencia, persistente: gravitatoria uso



Img 25: Mapa de isovalores de momentos en y. Combinación ELU: resistencia, persistente: gravitatoria uso

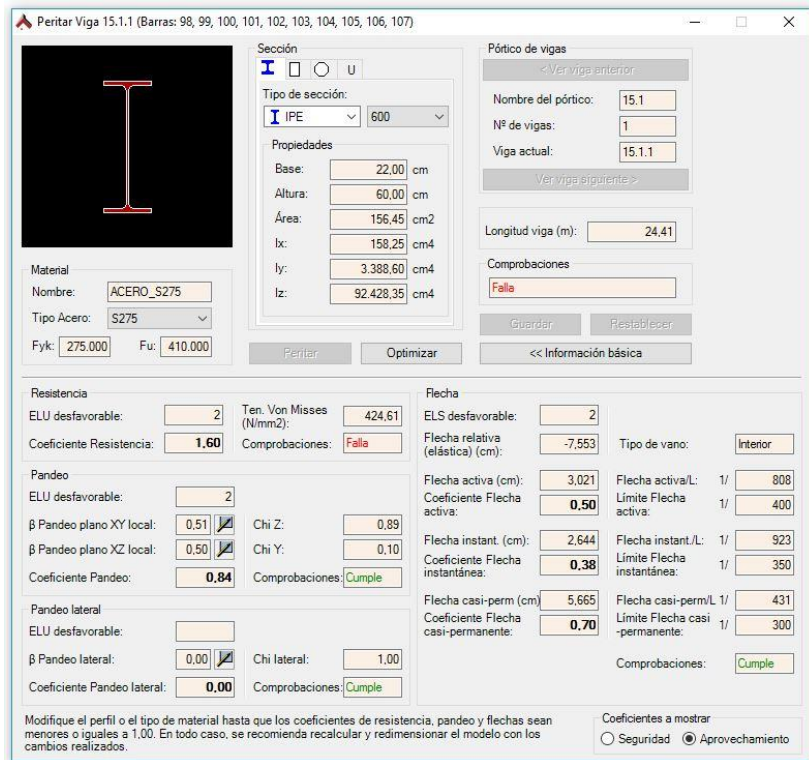
Se selecciona la viga más desfavorable.



Img 26: Viga más desfavorable. Combinación ELS característica: gravitatoria, uso

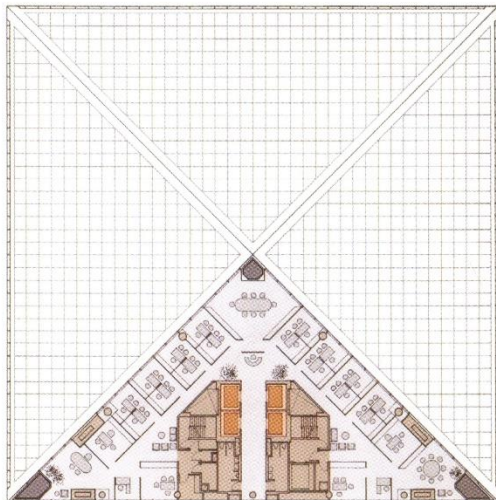
Al ser esta tipología, la mitad simétrica de la anterior, resulta ser el mismo vano y la misma viga la solicitada a mayores esfuerzos, con prácticamente el mismo desplazamiento. Sirvan pues las reflexiones enunciadas en el anterior cálculo para esta viga.

Tras peritar y optimizar, obtenemos que un perfil HEB-450 S275 sería válido.

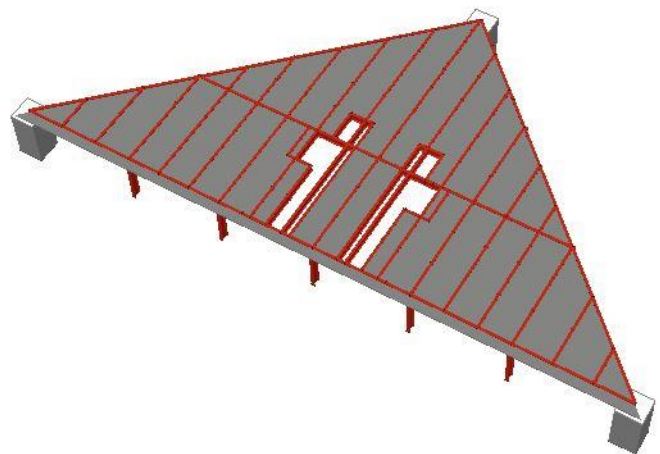


Img 27: peritación de elemento mediante programa Architrave

TIPOLOGÍA 4. PLANTAS 42 – 60



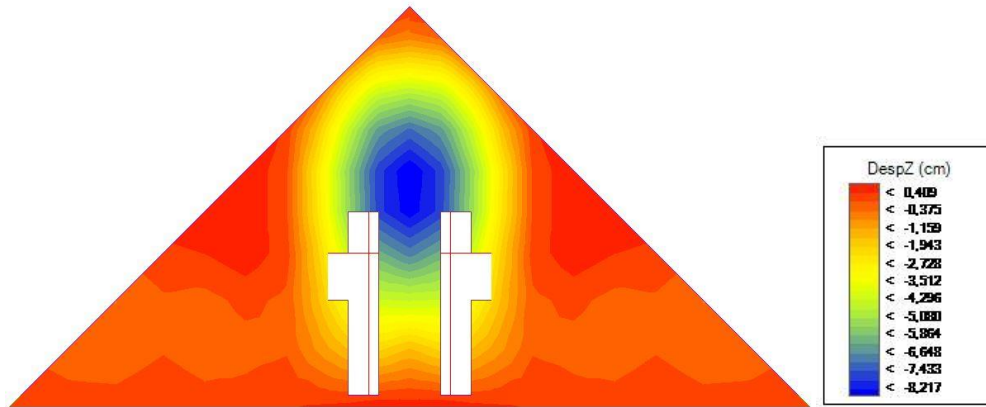
Img 28: planta tipo 3



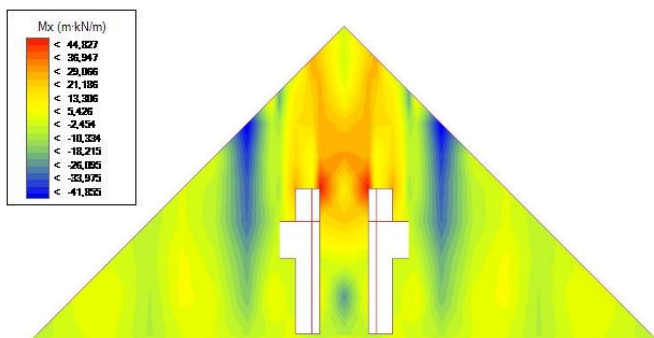
Img 29: Modelo sólido de la estructura



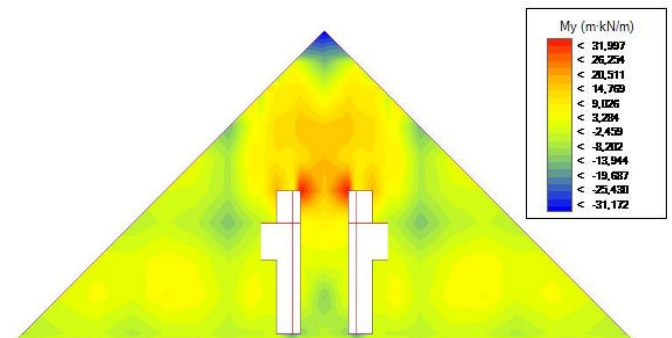
Img 30: Deformada. Combinación ELS característica: gravitatoria uso



Img 31: Desplazamientos en Z. Combinación ELS característica: gravitatoria, uso

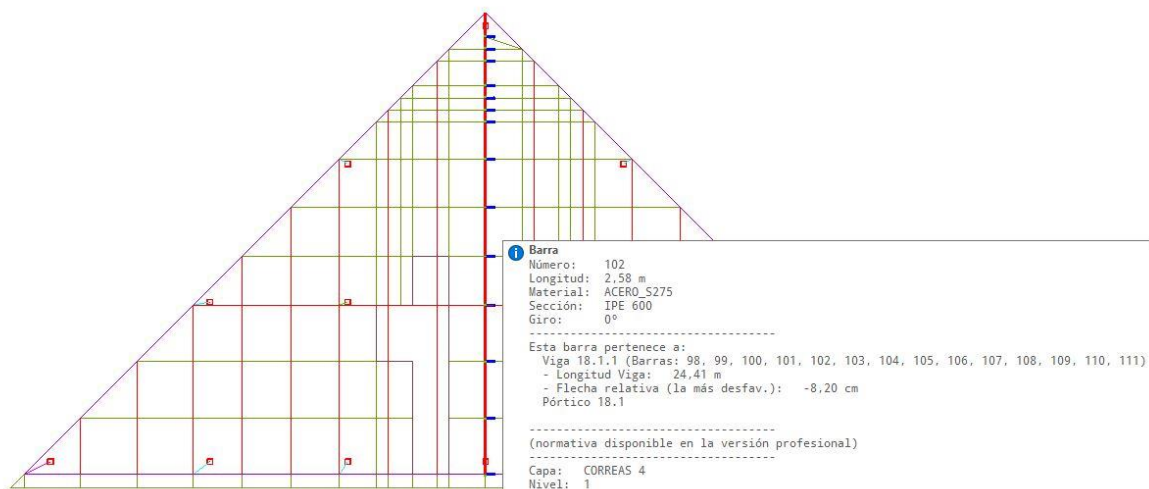


Img 32: Mapa de isovalores de momentos en x. Combinación ELU: resistencia, persistente: gravitatoria uso

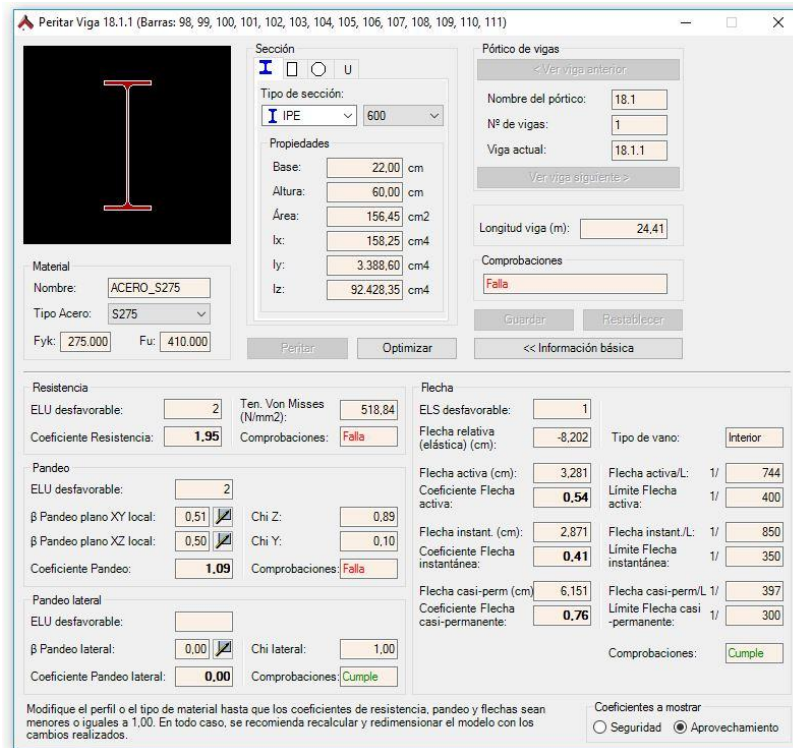


Img 33: Mapa de isovalores de momentos en y. Combinación ELU: resistencia, persistente: gravitatoria uso

Se selecciona la barra más desfavorable y se perita.



Img 34: Viga más desfavorable. Combinación ELS característica: gravitatoria, uso



Img 27: peritación de elemento mediante programa Architrave

A diferencia de las tipologías anteriores, esta viga no cumple las condiciones de pandeo, muy probablemente debido a la carga de viento, que en las últimas plantas es muy elevada. Tras optimizar mediante el programa el perfil, se verifica que un perfil HEM-500 S275 cumpliría las condiciones.

6.1.2. Comportamiento de la macroestructura

Analizadas pormenorizadamente las diferentes tipologías de plantas, se estudia ahora el comportamiento de la macroestructura, los grandes pilares y diagonales que absorben las cargas y las transportan hacia el suelo. Cabe recordar antes de analizar resultados, que Pei apostó por este sistema estructural porque estaba convencido de que absorbería los grandes esfuerzos de viento de Hong Kong, así como la geometría del edificio haría que las excentricidades quedaran compensadas.

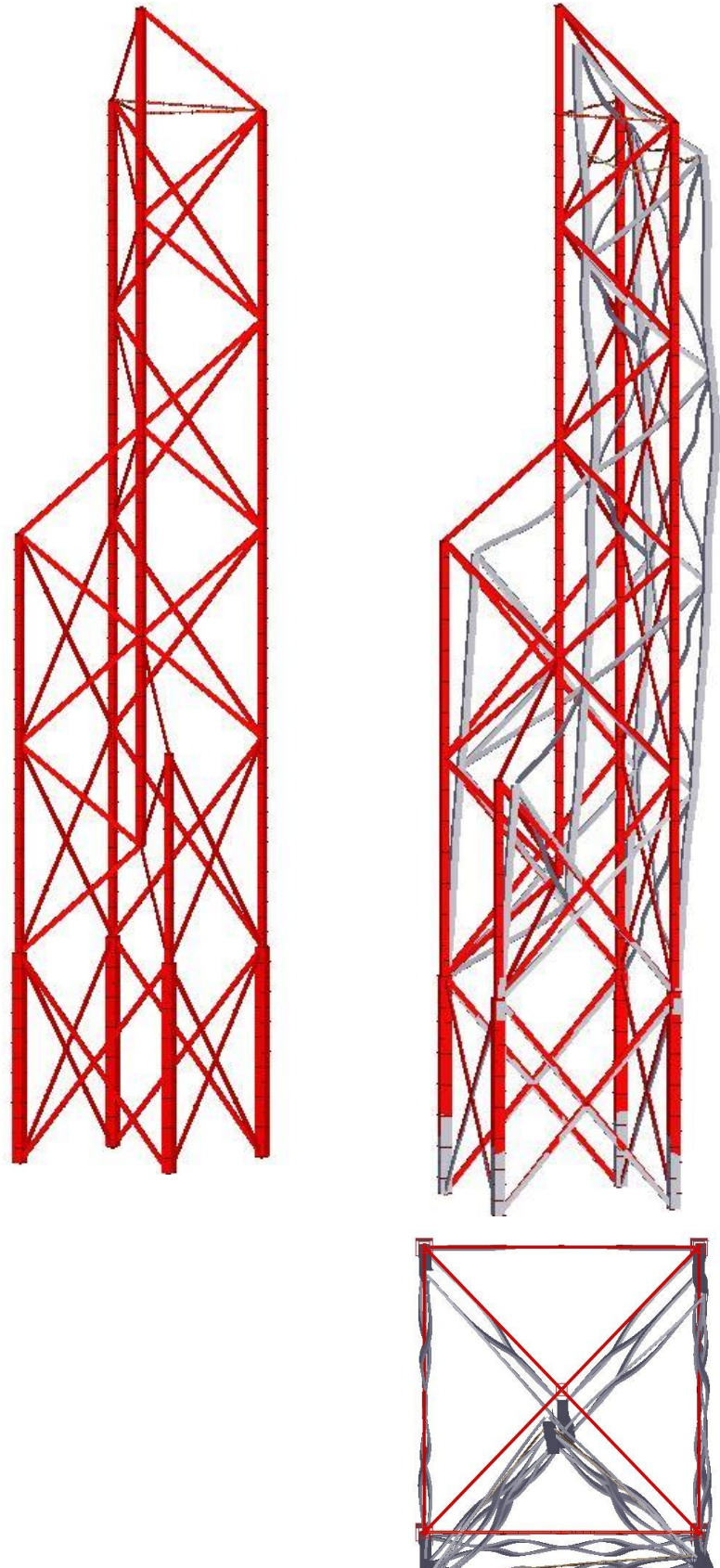
Estudiamos pues esta macroestructura para obtener resultados y concluir si su fue o no válida la concepción estructural de Pei.

La imagen de la deformada del modelo sólido, puede ser la que mejor explique el funcionamiento de la macroestructura que planteó Pei para el proyecto.

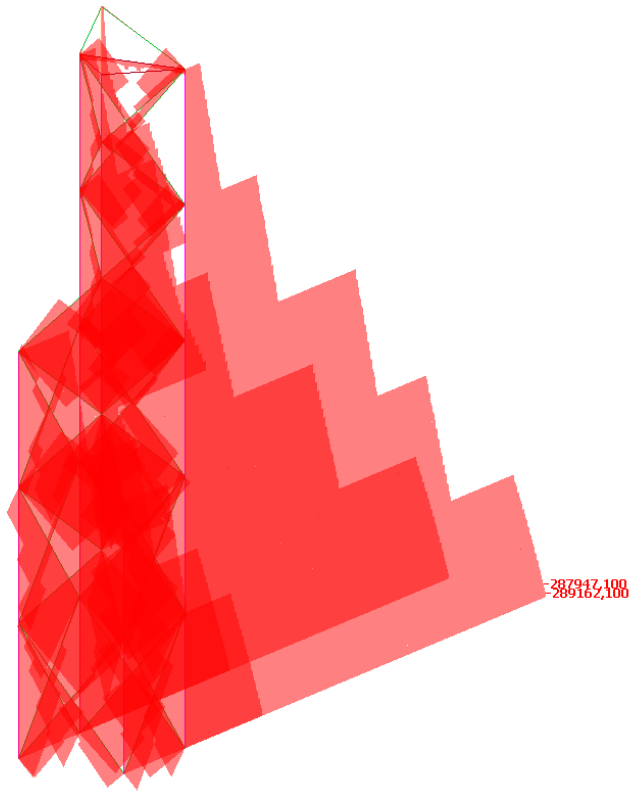
Se puede apreciar cómo el edificio se retuerce sobre sí mismo, verificando el planteamiento estructural por el cual la pérdida de geometría en altura del bloque, hace que se creen unas excentricidades que quedan compensadas entre ellas, y crea este efecto.

Si se observa la deformada en planta, se ve como el edificio apenas se desplaza del eje central, la columna encargada de distribuir todos los esfuerzos hacia las 4 columnas en las esquinas.

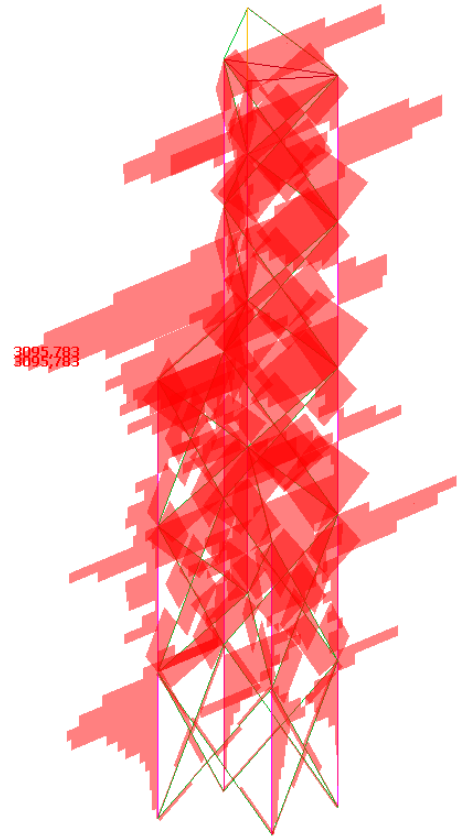
Esta solución es magistral, pues resolvía múltiples cuestiones del proyecto. Por una parte, aseguraba la inercia de un edificio en altura récord para su época. También absorbía las potentes cargas de viento de una ciudad como Hong Kong, con sus tifones característicos del continente asiático. Por otro lado, esta estructura tridimensional de diagonales, permitía a Pei liberar la planta de las oficinas, dejando espacios diáfanos. Pero lo más sorprendente de todo es que Pei fue capaz de resolver todo esto mediante geometrías simples, que le acompañaron durante toda su obra. Con un prisma que perdía cuadrantes y formaba pirámides, y una macroestructura con ramificaciones en X, resolvió un proyecto de forma magistral.



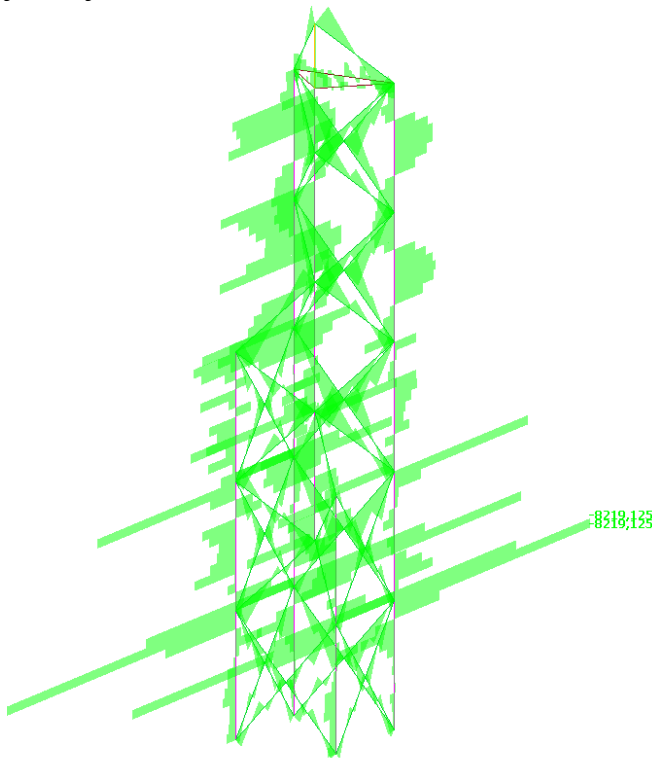
Img 28: Modelo sólido original (izq) y deformada (dcha) Combinación ELS 01



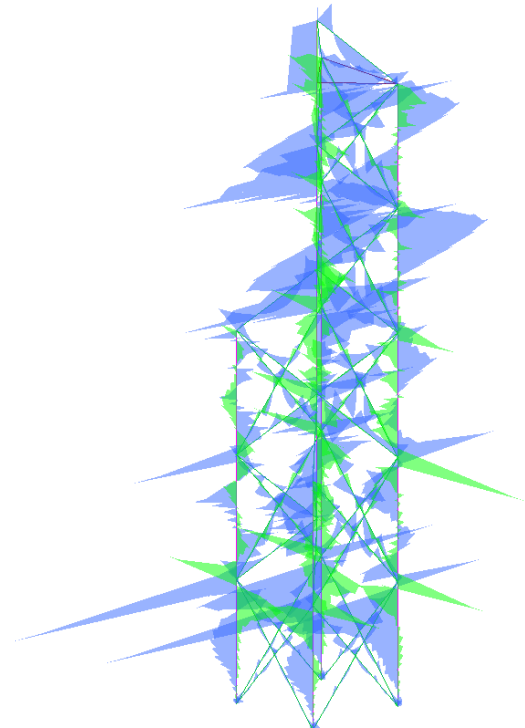
Img 29: Diagrama Axiles. Combinación ELU 01



Img 30: Diagrama Torsor. Combinación ELU 01



Img 31 Diagrama Cortantes Vy. Combinación ELU 01



Img 32: Diagrama Momentos My y Mz. Combinación ELU 01

Analizando en conjunto los diferentes diagramas de solicitaciones que el programa de cálculo aporta sobre el modelo se puede ver cómo se cumplen las premisas estructurales de la concepción del proyecto de Pei.

En primer lugar, observando los axiles, se aprecia como las cargas se van distribuyendo de arriba hacia abajo, aumentando el axil soportado por los pilares en las plantas inferiores. Es por eso que generalmente en todos los edificios en altura, los pilares de las plantas inferiores tienen una sección mayor. Se observa también en este diagrama, como los elementos verticales de la macroestructura son los que soportan la mayor carga, llegando a alcanzar casi los 300.000 kN. En este comportamiento tuvo Pei también un acierto en la concepción del mismo, pues las diagonales que reparten las cargas tienen menor sección porque se les intuía una menor sollicitación de esfuerzos.

El diagrama de esfuerzos torsores nos muestra como vuelven a ser los grandes pilares perimetrales y la columna central los que más acusan este esfuerzo debido a las excentricidades geométricas del edificio. Estos esfuerzos son los que crean el efecto visto anteriormente en la deformada, de un edificio que se retuerce sobre sí mismo.

Los grandes momentos crean unos esfuerzos cortantes en los nudos de valor muy elevado. Además, hay momentos en ambas direcciones, dato deducible por el carácter tridimensional de la estructura. Habrá pues que dimensionar los pilares a flexocompresión compuesta, con unos valores de momentos y axiles enormes.

6.1.3. Comportamiento del conjunto

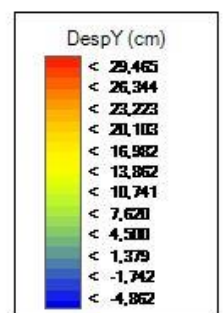
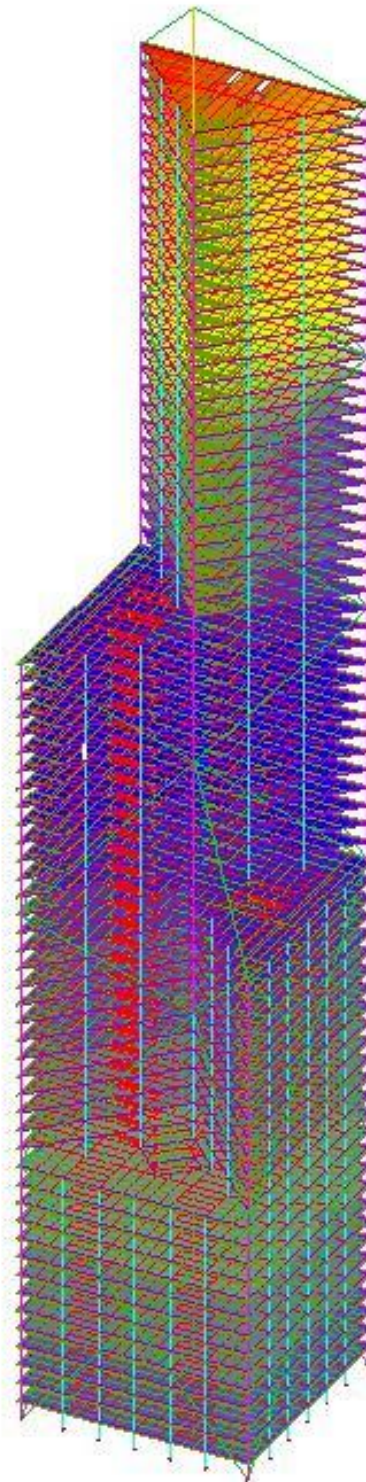
Tras analizar por separado diferentes partes constituyentes del edificio, se realiza un estudio del modelo completo. En este tipo de edificios de gran altura, una de las comprobaciones más importantes es el efecto que provoca el viento, por ello se estudiará la combinación ELS, característica: viento. También se verificará si se cumple el planteamiento estructural de transmitir las cargas a través de la macroestructura.

COMPROBACIÓN E.LS., CARACTERÍSTICA: VIENTO

Como ya se ha comentado, se procede a analizar directamente la comprobación de los desplazamientos producidos por el viento, al ser estos más desfavorables que otras combinaciones que pudieran tener en cuenta las sobrecargas de uso, gravitatorias o nieve por ejemplo. Tras la comprobación se valorará o no su admisión con respecto a la normativa.



Img 33: modelo final completo



Img 33: diagrama desplazamientos combinación ELS característica: viento

Como podemos ver en el mapa de desplazamientos de los elementos finitos, el desplazamiento de la torre en la dirección del viento (dirección y) tiene un valor máximo en el extremo más desfavorable de la planta última de 29,465 cm.

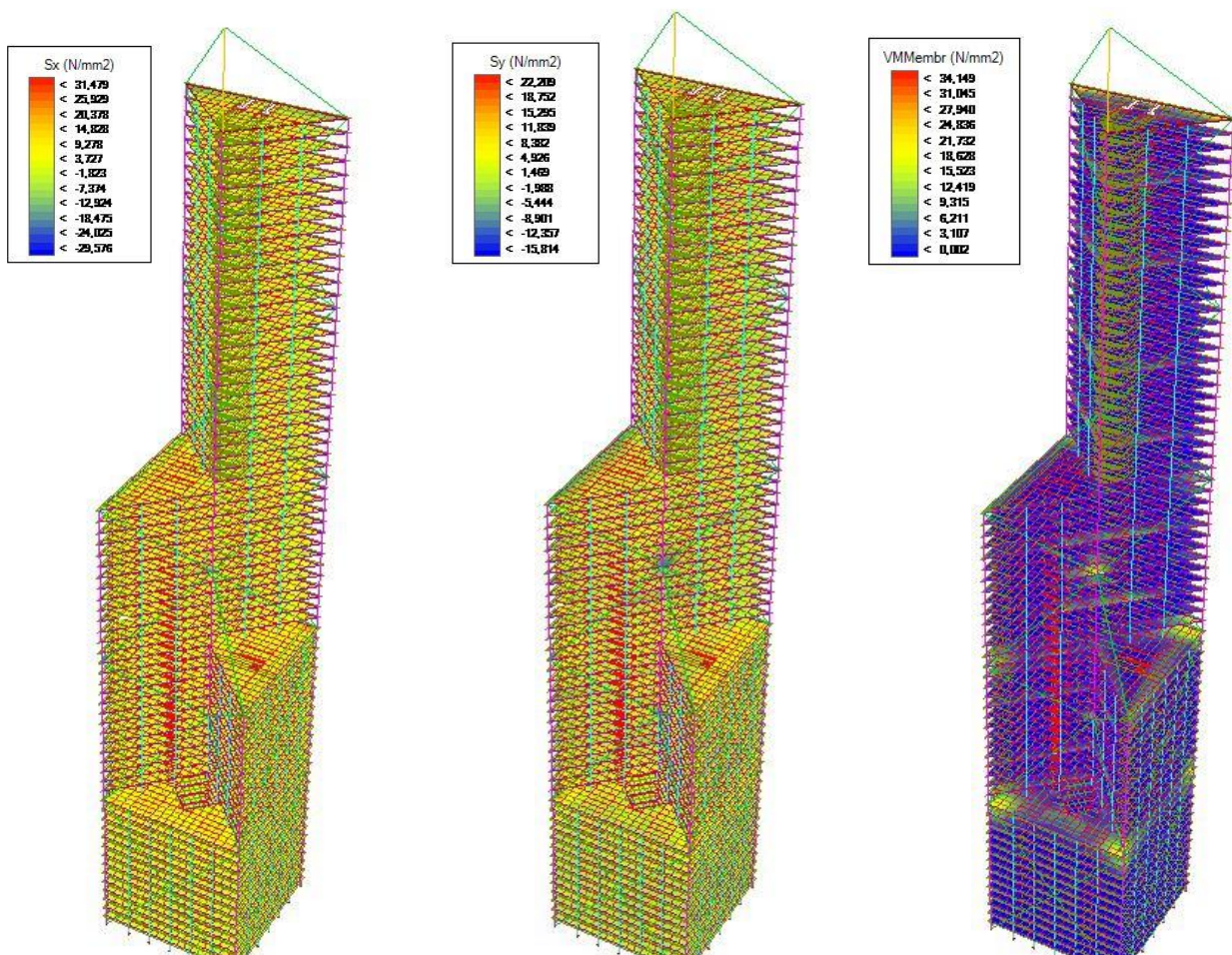
Los valores admisibles para desplomes de edificios según la norma son los que cumplen con esta relación. $H_{total}/500$. En el caso de este edificio la altura total es de 280 m. por lo que:

- $280 / 500 = 0,56$ cm admisibles, mucho por encima de los prácticamente 30 cm que se desplaza debido al viento.

Queda pues validada la estructura respecto a los desplazamientos más desfavorables, los producidos por el viento. Se puede entonces verificar que el diseño de Pei absorbe los grandes esfuerzos de viento, un acierto más en el diseño de este edificio.

COMPROBACIÓN DE TENSIONES EN LOS ELEMENTOS DE HORMIGÓN

Se procede a analizar las tensiones que pueden generarse en puntos de gran acumulación de esfuerzos, como el encuentro de los grandes pilares y los forjados. Para realizar esta comprobación, se toma la combinación más desfavorable, ELU: resistencia, persistente: gravitatoria uso.



Img 34: De izquierda a derecha. Tensiones S_x , S_y y von Mises. Combinación ELU, resistencia, persistente: gravitatoria uso

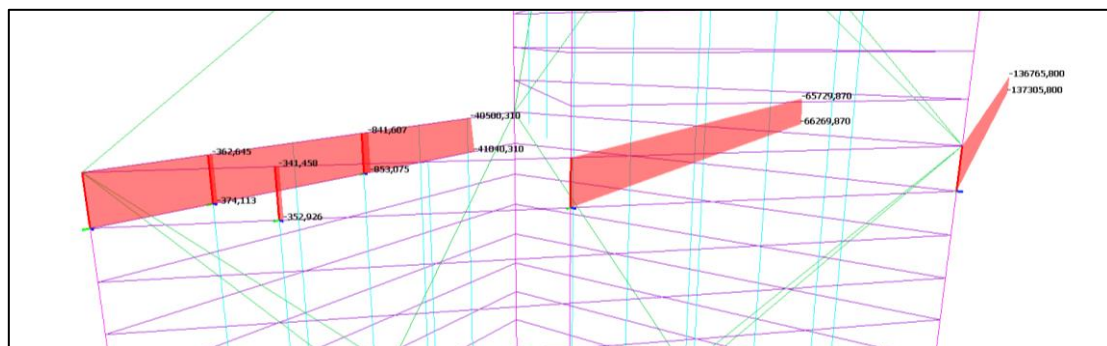
El mapa de tensiones obtenido presenta una variación bastante uniforme en ambas direcciones x, y. No obstante, se aprecian concentraciones de tensiones en determinados puntos del conjunto.

Esta concentración se da principalmente en los puntos en los que los grandes pilares se encuentran con los forjados, pero también en la apertura de huecos en los forjados que interrumpen la continuidad de las vigas y correas. Con el diagrama de von Mises se aprecia mejor cuáles son los puntos donde se generan estas tensiones destacadas.

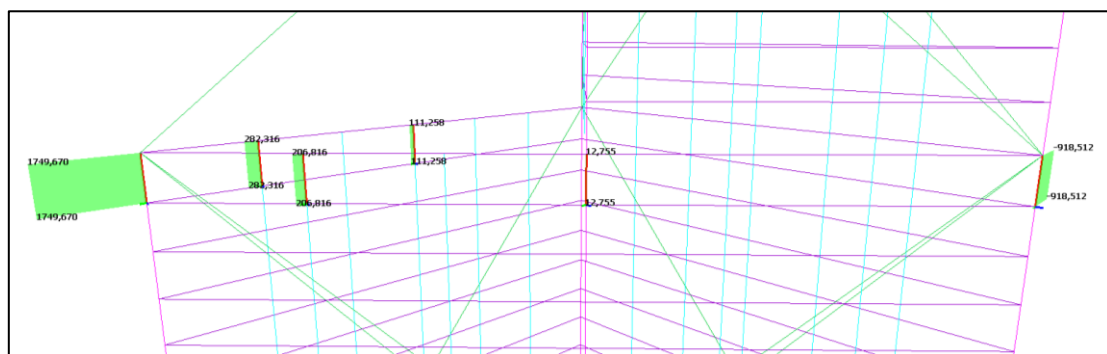
En las zonas en las que las tensiones superen la resistencia del hormigón habrá que colocar armaduras para que estos puntos de concentración de tensiones puedan repartir éstas de una forma homogénea.

COMPROBACIÓN EFECTIVIDAD DEL PLANTEAMIENTO ESTRUCTURAL

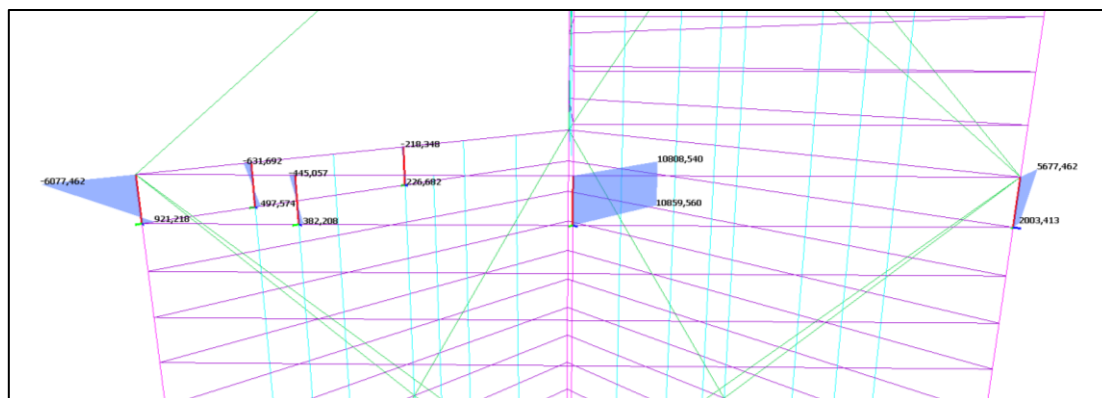
Por último, se va a realizar una rápida comprobación para verificar si el planteamiento estructural del edificio funciona. Como se ha repetido varias veces a lo largo de este trabajo, la macroestructura de grandes pilares y diagonales absorbía las cargas y las conducía hasta la cimentación, de manera que se puede verificar comprobando un pilar cualquiera de una planta, y el tramo de pilar de la macroestructura que corresponda a esa planta para ver si efectivamente esto se cumple.



Img 35: Diagrama Axiales. Combinación ELU, resistencia, persistente: gravitatoria uso



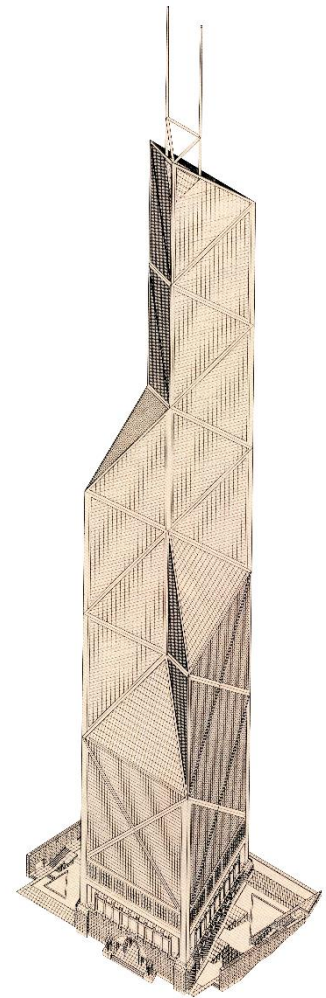
Img 36: Diagrama Cortantes Vy. Combinación ELU, resistencia, persistente: gravitatoria uso



Img 37: Diagrama Momentos Mz. Combinación ELU, resistencia, persistente: gravitatoria uso

Como bien se puede apreciar en los testigos tomados para realizar esta comprobación, el planteamiento estructural está funcionando, quedando validada la propuesta de Pei. Si analizamos por ejemplo los axiles, un pilar perimetral metálico absorbe alrededor de 350 kN, mientras que los grandes pilares encargados de conducir las cargas, llegan a absorber en este ejemplo casi 140.000 kN, una diferencia 400 veces mayor. Lo mismo sucede si se toman como ejemplos cortantes o momentos.

Queda pues demostrado que el planteamiento estructural funciona y además es un acierto, puesto que como se mencionó en las características del proyecto, permitió reducir hasta el 40% la cantidad de acero requerida habitualmente para una torre de esta altura.



7_Conclusiones

7.1 Conclusiones

En el presente trabajo se ha realizado un estudio del comportamiento estructural de la Torre del Banco de China en Hong Kong, obra del internacional arquitecto leoh Ming Pei.

Tras una síntesis de la vida y obra del arquitecto, se ha procedido a describir el edificio desde puntos de vista geométricos, formales, compositivos, constructivos y funcionales por ejemplo, ocupándose con más profundidad de los elementos constructivos. Se han localizado y expuesto los datos estructurales necesarios para poder elaborar su modelo de cálculo.

Con estos datos recopilados se ha podido modelizar un modelo estructural simplificado del edificio. En este punto hay que añadir las constantes dificultades que se han ido encontrando a la hora de realizar el modelo de cálculo, para las cuales se han tenido que ir encontrando soluciones puntuales. Para realizar la asignación de cargas de viento, no se encontraron datos acerca del emplazamiento, por lo que tuvo que hacerse una estimación. Tampoco se encontró información de las plantas más privadas del banco, dada la lógica seguridad que un edificio de esta entidad debe tener, y no pudieron modelizarse. La estructura principal era mixta, pero para poder analizarla con el programa de cálculo, tuvo que simplificarse a una estructura de hormigón. Con respecto a las acciones consideradas cabe indicar que, debido a la gran envergadura del trabajo y a las limitaciones del programa de cálculo, no se ha realizado el estudio sísmico del edificio.

El análisis estructural se ha realizado con el programa Architrave. Los resultados del modelo de cálculo muestran que la propuesta estructural cumple con su cometido. La gran macroestructura que abraza y recorre todo el edificio en altura, recoge y transporta las cargas hasta la cimentación. A su vez, otorga al edificio de resistencia frente al viento, un elemento muy presente en las zonas costeras asiáticas debido a los tifones que anualmente azotan el litoral. Este planteamiento estructural permitió un ahorro de hasta el 40% del material, y al haberse probado válido, se puede concluir que la concepción estructural del proyecto es coherente.

Analizando de forma individual cada elemento, se han ido estudiando las diferentes tipologías de plantas que tiene la torre, y con los movimientos y solicitaciones obtenidos, se ha peritado cada planta. Las grandes luces entre los apoyos han producido que algunas vigas no cumplieran por criterios de resistencia con el perfil modelizado en primera instancia. Architrave tiene la opción de optimizar estos perfiles no válidos y aportar sugerencias para un nuevo perfil que cumpla con la normativa.

En esta parte del análisis llama la atención como las grandes luces que salvan los vanos hacen que la relación $L/300$ se cumpla hasta para flechas consideración. A pesar de ser válidas estas flechas, esto tiene un enorme impacto en el proceso constructivo de la obra, y conlleva un cuidado especial a la hora de prever los posibles movimientos de elementos constructivos. Se deberán tener en cuenta

estas flechas a la hora del diseño de elementos del interior: carpinterías, despieces interiores, pavimentos, tabiquería. Un estudio posterior más exhaustivo debería considerar en qué momentos se producen estas flechas para conocer el efecto real sobre el resto de elementos constructivos.

Una posible solución para este asunto sería el empleo de contraflechas, un método muy recurrido en estos casos. Conocida la carga permanente gravitatoria que va a actuar sobre un forjado o parte de él, se puede compensar esta futura flecha con una contraflecha que absorba el valor de esta carga permanente. De este modo, sólo actuarían las cargas variables y los valores de deformación quedarían reducidos, pudiéndose eliminar así los conflictos constructivos que derivan de grandes flechas.

Los resultados obtenidos del estudio individualizado de la macroestructura muestran como el planteamiento del arquitecto era correcto. Las excentricidades que se van creando conforme el edificio pierde geometría en altura se ven compensadas unas con otras, creando un efecto de retorcerse sobre su eje central, apreciable al observar la deformada extraída de Architrave. De esta forma, la macroestructura de la torre aparte de absorber las cargas y transmitir las a la cimentación, le aporta al edificio estabilidad e inercia, probando la solución de Pei como válida.

Por último, tras estudiar y entender el funcionamiento de las partes individuales del modelo, se ha estudiado el bloque en conjunto. El comportamiento global de la estructura, como edificio de altura, se ha mostrado mediante las deformaciones de la torre frente a cargas de viento, que han probado ser las más restrictivas. De esta manera, con la combinación E.L.S. característica: viento, se ha verificado que cumple la relación $h/L < 500$ que establece la norma. De nuevo queda así probada la efectividad de la macroestructura frente a su propósito inicial.

Además, se ha demostrado cierto también que los grandes pilares perimetrales y la columna central recogen las cargas y las conducen hasta la cimentación. Al ver los diagramas de partes aleatorias del boque, se ha podido comprobar cómo las cargas transmitidas por la macroestructura son hasta 400 veces mayor que para los elementos estructurales propios de las plantas tipo. Hay que validar otra vez en este caso la propuesta estructural de Pei.

Como valoración final del trabajo, afirmar que el edificio presenta, en general, un comportamiento estructural óptimo frente a los esfuerzos analizados y esperar que el trabajo realizado pueda servir como base para continuación del estudio de no sólo la Torre del Banco de China en concreto, sino de la tipología de edificio en altura.



8_Bibliografía

LIBROS Y REVISTAS

1. Suner, B., Calatrava, J., López Jiménez, J. and Beaud, N. (1999). Ieoh Ming Pei. Tres Cantos, Madrid, España: Akal Ediciones.
2. Jodidio, P. and Strong, J. (n.d.). I.M. Pei.
3. Wiseman, C. (1990). I.M. Pei. New York: H.N. Abrams.
4. Wiseman, C. and Pei, I. (2001). The architecture of I.M. Pei. London: Thames & Hudson.
5. Pei, I., Yoshida, K. and Yokoyama, K. (2008). I.M. Pei: words for the future. Tokyo: A + U.
6. Benevolo, L. (1974). Historia de la arquitectura moderna. [Barcelona]: G. Gili.
7. Chueca Goitia, F. (1979). Historia de la arquitectura occidental. Madrid: Dossat.
8. Frampton, K. and Sainz, J. (1998). Historia crítica de la arquitectura moderna. Barcelona: Gustavo Gili.
9. VV.AA. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico - Seguridad Estructural- Acciones en la Edificación. Madrid. Ministerio de Fomento, Gobierno de España, abril 2009.
10. VV.AA. Código Técnico de la Edificación. Documento Básico - Seguridad Estructural. Madrid. Ministerio de Fomento, Gobierno de España, abril 2009.

PÁGINAS WEB

1. Es.wikipedia.org. (2016). Bank of China Tower.
https://es.wikipedia.org/wiki/Bank_of_China_Tower
2. Jmhdezhdz.com. (2016). Bank of China Tower, Hong Kong, China, 1985 — 1990.
<http://www.jmhdezhdz.com/2012/05/bank-of-china-tower-hong-kong-drawings.html>
3. Skyscrapercenter.com. (2016). Bank of China Tower - The Skyscraper Center.
<https://skyscrapercenter.com/building/bank-of-china-tower/287>

4. ArchDaily. (2016). AD Classics: Bank of China Tower / I.M. Pei.
<http://www.archdaily.com/153297/ad-classics-bank-of-china-tower-i-m-pei>
5. Es.wikiarquitectura.com. (2016). Torre del Banco de China - WikiArquitectura - Arquitectura del Mundo.
https://es.wikiarquitectura.com/index.php/Torre_del_Banco_de_China
6. Web Megaconstrucciones. (2016). Torre del Banco de China.
<http://megaconstrucciones.net/?construccion=torre-del-banco-china>
7. Arkiplus. (2016). Torre del Banco de China en Hong Kong.
<http://www.arkiplus.com/torre-del-banco-de-china-en-hong-kong>
8. Ecured.cu. (2016). Torre del Banco de China – EcuRed.
https://www.ecured.cu/Torre_del_Banco_de_China

PROGRAMA DE CÁLCULO

Architrave Versión 2015 Académica (v1.8).
<http://www.architrave.es/index.php>

Autores:

Grupo de Investigación en Grid y Computación de Altas Prestaciones (GRyCAP)

HERNÁNDEZ GARCÍA, Vicente.

ALONSO ÁBALOS, José Miguel.

CAMPOS BERGA, Francisco Javier.

LOZANO LLORET, Pau.

DE LA FUENTE ARAGÓN, Pedro.

Grupo de Investigación CiD

PÉREZ GARCÍA, Agustín. Doctor Arquitecto.

ALONSO DURÁ, Adolfo. Doctor Arquitecto.

GUARDIOLA VÍLLORA, Arianna. Doctor Arquitecto.

GÓMEZ MARTÍNEZ, Fernando. Arquitecto.

9_Referencias de imágenes

9.1. Introducción

Img. 0: <http://2.bp.blogspot.com/-0CMXTAwpKml/VI05IV8ny7I/AAAAAAAAAJA/u8aZsY4BxYM/s1600/banco-china-iluminado.JPG>

9.2. Ieoh Ming Pei

Img. 0: http://catalogo.artium.org/sites/default/files/imagenesbody/09/2013/im_pei00.jpg

Img. 1: http://i.dailymail.co.uk/i/pix/2015/02/15/25B3FBD000000578-0-image-a-19_1424024785887.jpg

Img. 2: http://www.di.net/almanac/site/assets/files/1131/web_fordham_online.jpg

Img. 3: <http://www.charlesdarwincentre.com.au/images/exterior.jpg>

Img. 4: [https://cdn0.vox-cdn.com/thumbor/QatQNSVPnob1yZUzRI28ZaU0tcA=/800x0/filters:no_upscale\(\)/cdn0.vox-cdn.com/uploads/chorus_asset/file/4461447/3.ext.EOrr.5001_E01_00-thumb.0.jpg](https://cdn0.vox-cdn.com/thumbor/QatQNSVPnob1yZUzRI28ZaU0tcA=/800x0/filters:no_upscale()/cdn0.vox-cdn.com/uploads/chorus_asset/file/4461447/3.ext.EOrr.5001_E01_00-thumb.0.jpg)

Img. 5: http://67.media.tumblr.com/b459cf50f69727693661126a1c688ce9/tumblr_o5tsvwjEJL1twhq1io3_1280.jpg

Img. 6: https://spacesinpublic.files.wordpress.com/2010/12/Img_0528.jpg

Img. 7: <http://cdnassets.hw.net/dims4/GG/81c9733/2147483647/thumbnail/876x580/quality/90/?url=http%3A%2F%2Fcdnassets.hw.net%2F9b%2F1f%2F6628bb3248038986f328d68378fd%2F36ff019f-a29c-4ec3-adde-29b10b0d6b23.jpg>

Img. 8: http://archgened.oucreate.com/wp-content/uploads/2016/05/I.M._Pei.jpg

Img. 9: http://www.memorablemontreal.com/document/image/original/HM_ARC_003073-001.jpg

Img. 10: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/16/JFK_library_Stitch_Crop.jpg

Img. 11: <http://www.bluffton.edu/homepages/facstaff/sullivanm/texas/dallas/cityhall/angledistant.jpg>

Img. 12: <http://images.arq.com.mx/eyecatcher/590590/12697.jpg>

Img. 13: http://sandstead.com/images/cornell/Herbert_F_Johnson_Museum_Cornell_University_LS_d2h_06.jpg

Img. 14: <http://www.roundalia.com/wp-content/uploads/2015/04/Museo-del-Louvre.jpg>

Img. 15: https://c2.staticflickr.com/4/3738/10029344106_1600006c12_b.jpg

Img. 16: http://4.bp.blogspot.com/-PzA6JJvilKo/Udv_10ylsYI/AAAAAAAAHTw/Gu3HKL-DSv0/s1600/bank+of+china+to+wer+pei+cobb+freed+&+partners+skyscrapers+asia+facade+city+hong+kong+china+record+spire+fен+shui+rascacielos+3.jpg

Img. 17: http://elpais.com/diario/imagenes/2003/10/24/cultura/1066946403_850215_0000000000_sumario_normal.jpg

Img. 18: <http://www.chenlusheng.com/museumworld/Public/images/museumworld/52/images/3.jpg>

Img. 19: http://www.floornature.es/media/photos/30/4826/wr635_3_popup.jpg

Img. 20: <http://www.quiacreativa.org/wp-content/uploads/2015/05/museo-de-arte-islamico-2.jpg>

Img. 21: https://www.google.es/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&ved=0ahUKewjbkta61pLQAhXI-fxoKHcqVDdcQjBwIBA&url=http%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fwikipedia%2Fcommons%2F%2F6%2FCentro_de_Ciencia%2C_Macao%2C_2013-08-08%2C_DD_12.jpg&psig=AFQjCNEYIYpXLELUzXZa-9vZ-OK_pCLRPQ&ust=1478471707910074

9.3. Proyecto arquitectónico

Img. 0: [http://legacy.skyscrapercenter.com/class-image.php/userpics/10005/?width=636&height=800&cropratio=636:800&image=/images/albums/userpics/10005/BankofChina_Ext-Main_\(c\)LeslieERobertson.jpg](http://legacy.skyscrapercenter.com/class-image.php/userpics/10005/?width=636&height=800&cropratio=636:800&image=/images/albums/userpics/10005/BankofChina_Ext-Main_(c)LeslieERobertson.jpg)

Img. 1: [captura de pantalla realizada en www.google.es/maps](#)

Img. 2: <http://footage.framepool.com/shotImg/qf/365213417-victoria-peak-central-plaza-two-international-finance-centre-bank-of-china-tower.jpg>

Img. 3: http://4.bp.blogspot.com/-t0m9h1rnFlq/Udv_seUpqII/AAAAAAAAHsk/F7pqqBjK2zA/s1600/bank+of+china+tower+pei+cobb+freed+&+partners+skyscrapers+asia+facade+city+hong+kong+china+record+spire+fenshui+rascacielos+1.jpg

Img. 4: <http://3.bp.blogspot.com/-zIMLiVv6oR4/UVnCs6VKMZI/AAAAAAAAH3g/yFThZ4M38mk/s1600/mode-los+banco+china.png>

Img. 5: <http://4.bp.blogspot.com/-7P35h7QpoJY/UVnT8yurkNI/AAAAAAAAH2o/LYqZo08zIBU/s1600/torre+Banco+de+china.jpg>

Img. 6: http://4.bp.blogspot.com/-gQsU0qkz-ns/Udv_v8HjtAI/AAAAAAAAHS4/rbkqdtBOQ6s/s1600/bank+of+china+tower+pei+cobb+freed+&+partners+skyscrapers+asia+facade+city+hong+kong+china+record+spire+fenshui+rascacielos+15.jpg

Img. 7: http://4.bp.blogspot.com/-u6eh9RWVE6I/Udv_vXhIPel/AAAAAAAAHSw/jDeers8qvKo/s1600/bank+of+china+tower+pei+cobb+freed+&+partners+skyscrapers+asia+facade+city+hong+kong+china+record+spire+fenshui+rascacielos+14.jpg

Img. 8: http://c1038.r38.cf3.rackcdn.com/group1/building2547/media/media_3.jpg

Img. 9: http://www.kleptography.com/images-angles/boc/crw_7468.jpg

Img. 10: [escaneado propio](#)

Img. 11: [escaneado propio](#)

Img. 12: http://4.bp.blogspot.com/-T62rADI9oWk/Udv_vxPYEcl/AAAAAAAAHS8/wwY2dS2SLeI/s1600/bank+of+china+tower+pei+cobb+freed+&+partners+skyscrapers+asia+facade+city+hong+kong+china+record+spire+fenshui+rascacielos+13.jpg

9.4. Estructura y construcción

Img. 0: http://2.bp.blogspot.com/-gWKJaHV2UJs/Udv_1M7aIEI/AAAAAAAAHTo/Mmkv4csH3a8/s1600/bank+of+china+tower+pei+cobb+freed+&+partners+skyscrapers+asia+facade+city+hong+kong+china+record+spire+fenshui+rascacielos+26.jpg

Img. 1: http://www.som.com/FILE/14187/johnhancock_1400x800_ezra_stolleresto_01.jpg.jpg

Img. 2: <http://3.bp.blogspot.com/-m8Y4WNNASu0/T7JT5XuD0DI/AAAAAAAAABYs/hhVAWQEPxU/s1600/drawing+bank+of+china+tower+6.jpg>

Img. 3: http://1.bp.blogspot.com/-5EpcNaDo_Uw/U3JAvantNHI/AAAAAAAAAUE/Ti_omxq1p3Y/s1600/diagram+model+2.jpg

Img. 4: <http://2.bp.blogspot.com/-rrvsvTJYgk/T7JT1IHRTVI/AAAAAAAAABYQ/Vz4GYzAblyY/s1600/drawing+bank+of+china+tower+2.jpg>

Img. 5: <http://3.bp.blogspot.com/-2bjxrbptsw/T7JT6s280hl/AAAAAAAAABY4/JvrCbVyOy5A/s1600/drawing+bank+of+china+tower+7.jpg>

Img. 6: <http://3.bp.blogspot.com/-YrXO1Br5fEA/T7JT4RZD3TI/AAAAAAAAABYo/yTA-wrt0wNp4/s1600/drawing+bank+of+china+tower+5.jpg>

Img. 7: http://2.bp.blogspot.com/-CKNjivKTPw/T7JT3TDiEUI/AAAAAAAAABYg/g_zu9SfKRUK/s1600/drawing+bank+of+china+tower+4.jpg

Img. 8: http://farm5.static.flickr.com/4076/4767260257_f8905c3531.jpg

Img. 9: <http://i.imgur.com/3dpwtXil.jpg>

Img. 10: <http://industrialhistoryhk.org/wp-content/uploads/2014/04/Bank-of-China-2.jpg>

Img. 11: http://www.som.com/FILE/14187/johnhancock_1400x800_ezra_stolleresto_01jpg.jpg

Img. 12: <http://industrialhistoryhk.org/wp-content/uploads/2014/04/Bank-of-China-4.jpg>

Img. 13: <http://industrialhistoryhk.org/wp-content/uploads/2014/04/Bank-of-China-3.jpg>

Img. 14: <http://industrialhistoryhk.org/wp-content/uploads/2014/04/Bank-of-China-Tower-1.jpg>

9.5. Modelo estructural

Img. 0: [escaneado](#)

Img. 1: [imagen de autor](#)

Img. 2: [imagen de autor](#)

Img. 3: [imagen de autor](#)

Img. 4: [imagen de autor](#)

Img. 5: [imagen de autor](#)

Img. 6: [imagen de autor](#)

Código Técnico de la Edificación. Documento Básico - Seguridad Estructural. Bases de Cálculo. CTE DB-SE. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Abril 2009: http://www.codigotecnico.org/cte/export/sites/default/web/galerias/archivos/DB_SE_abril_2009.pdf

[Tabla a](#)

[Tabla b](#)

[Tabla c](#)

[Tabla e](#)

[Tabla f](#)

[Tabla g](#)

[Tabla k](#)

[Tabla o](#)

[Tabla h: imagen de autor](#)

[Tabla i: imagen de autor](#)

[Tabla j: imagen de autor](#)

[Tabla l: imagen de autor](#)

Tabla m: imagen de autor

Tabla n: imagen de autor

Tabla p: imagen de autor

Tabla q: imagen de autor

Tabla r: imagen de autor

Tabla s: imagen de autor

Tabla t: imagen de autor

Tabla w: imagen de autor

Tabla x: imagen de autor

9.6 Análisis estructural

Img. 0: imagen de autor

Img. 1: imagen de autor

Img. 2: imagen de autor

Img. 3: imagen de autor

Img. 4: imagen de autor

Img. 5: imagen de autor

Img. 6: imagen de autor

Img. 7: imagen de autor

Img. 8: imagen de autor

Img. 9: imagen de autor

Img. 10: imagen de autor

Img. 11: imagen de autor

Img. 12: escaneado

Img. 13: imagen de autor

Img. 14: imagen de autor

Img. 15: imagen de autor

Img. 16: imagen de autor

Img. 17: imagen de autor

Img. 18: imagen de autor

Img. 19: imagen de autor

Img. 20: escaneado

Img. 21: imagen de autor

Img. 22: imagen de autor

Img. 23: imagen de autor

Img. 24: imagen de autor

Img. 25: imagen de autor

Img. 26: imagen de autor

Img. 27: imagen de autor

Img. 28: escaneado

Img. 29: imagen de autor

Img. 30: imagen de autor

Img. 31: imagen de autor

Img. 32: imagen de autor

Img. 33: imagen de autor

Img. 34: imagen de autor

Img. 35: imagen de autor

Img. 36: imagen de autor

Img. 37: imagen de autor

9.7. Conclusiones

Img. 0: imagen de autor

9.8. Bibliografía

Img. 0: <https://es.pinterest.com/pin/29695678766260167/>