



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

ESTUDIO, ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN MEDIANTE SAP 2000: TORRE HEARST

Alumno: DAVID LORENZO RODRÍGUEZ
Tutor: DAVID GALLARDO LLOPIS

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se pretende analizar y comprender el funcionamiento de una estructura singular como es la de la torre Hearst de Norman Foster, mediante SAP2000, llegando a valorar los resultados obtenidos e indicando el buen funcionamiento o no del modelo desarrollado en 3D, detectando los posibles errores cometidos.

Primero empezaremos por conocer un poco la biografía del arquitecto, así como el tipo de arquitectura que desarrolla y su forma de trabajar, para posteriormente, realizar un estudio del edificio a tratar en cuestión.

Para ello, una de las partes más importantes del trabajo, en mi opinión, es la búsqueda de información. En función de la fidelidad de los datos que se tengan de base, más realista será el modelo estudiado con SAP, con lo que se conseguirán unos resultados más fiables que si se hace una simple aproximación.

PALABRAS CLAVE:

Análisis, estructura, SAP2000, *diagrid*, torre Hearst.

INTRODUCCIÓ

En aquest treball es pretén analitzar i comprendre el funcionament d'una estructura singular com és la de la torre Hearst de Norman Foster, mitjançant SAP2000, arribant a valorar els resultats obtinguts i indicant el bon funcionament o no del model desenvolupat en 3D, detectant els possibles errors comesos.

Primer començarem per conèixer un poc la biografia de l'arquitecte, així com el tipus d'arquitectura que desenvolupa la seua forma de treballar, per a posteriorment, realitzar un estudi de l'edifici a tractar en qüestió.

Per això, una de les parts més importants del treball, al meu entendre, és la recerca d'informació. En funció de la fidelitat de les dades que es tinguen de base, obtindrem resultats més fiables que si fóra una simple aproximació.

PARAULES CLAU:

Anàlisi, estructura, SAP2000, *diagrid*, torre Hearst.

INTRODUCTION

This research aims to analyze and understand how works a singular structure, such as the Hearst Tower by Norman Foster, using SAP2000, in order to evaluate the results and indicating the proper functioning or not the model developed in 3D, detecting any kind of mistakes.

First of all, we begin to know the biography of the architect and the kind of architecture that develops and how they work, to then perform a study of the building.

In my opinión, one of the most important parts of the research, is looking for information. According to the accuracy of the data base have, more realistic could be the model studied with SAP, thus more reliable results than a simple approximation is done will be achieved.

KEY WORDS:

Analysis, structure SAP2000, diagrid, Hearst Tower.

CONTENIDOS

1. Objetivos del trabajo	03
2. Cuerpo principal	05
2.1. Análisis del arquitecto en su contexto histórico. Justificación del interés de analizar estructuralmente su obra.	
2.2. Análisis del edificio en su contexto histórico y tipológico. Justificación del interés de analizar estructuralmente el edificio.	
2.3. Análisis explicativo y justificativo del sistema estructural del edificio.	
2.4. Descripción del modelo de cálculo y análisis de los resultados obtenidos.	
3. Conclusiones	76
4. Bibliografía	78

1. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Con el presente trabajo, se pretenden lograr unos objetivos concretos, como son:

Modelizar mediante SAP2000 la estructura principal de la Torre Hearst, para poder analizar y comprender mejor el sistema estructural utilizado.

Tras un primer contacto básico de geometrías sencillas con el programa el curso anterior, uno de los objetivos principales del trabajo es un aprendizaje en mayor profundidad de las posibilidades que tiene el SAP2000 realizando un modelo de cálculo de geometría más compleja para, en un futuro próximo, poder llevar a cabo un análisis estructural en el proyecto final de carrera pudiendo utilizar esta herramienta como ayuda en el proceso de diseño del proyecto.

Comprender cómo funcionan este tipo de estructuras, las cuales tienen unas dimensiones y unas características propias que no son las habitualmente utilizadas en la carrera, para ello se pretende analizar el edificio con toda la información que pueda ser obtenida de la bibliografía disponible (libros, revistas, publicaciones científicas, internet...).

Esta labor de investigación es muy importante para poder desarrollar un modelo de cálculo lo más aproximado a la realidad constructiva del edificio, aunque la modelización mediante SAP2000 debe plantear una serie de simplificaciones que faciliten el análisis y la comprensión de la estructura. Sin embargo, sería recomendable siempre que se conozcan los detalles suficientes, tenerlos en cuenta para que el comportamiento del modelo sea siempre lo más aproximado a la realidad posible.

Por último, se debe llegar a unas conclusiones en función de los datos obtenidos por el cálculo con SAP2000, detectando posibles fallos en el modelo, comportamientos extraños en alguna zona de la estructura, deficiencias del sistema estructural estudiado, así como la valoración crítica de los resultados obtenidos.

2. CUERPO PRINCIPAL

2.1 Análisis del arquitecto en su contexto histórico. Justificación del interés de analizar estructuralmente su obra.

Norman Foster nació en Manchester en 1935. Tras graduarse en la Escuela de Arquitectura y Urbanismo en la Universidad de Manchester en 1961, consiguió la beca de investigación Henry para la Universidad de Yale, donde cursó un máster en Arquitectura. Es fundador y presidente de Foster + Partners. Establecido en Londres en 1967, en la actualidad es un estudio que se ha extendido por todo el mundo.

Desde su inicio, el estudio ha recibido más de quinientos premios y menciones de calidad y ha ganado alrededor de unos cien concursos internacionales y nacionales. Destaca el aeropuerto de Pekín, el edificio singular más grande del mundo; el viaducto Millau en Francia (el más grande del planeta), el edificio Swiss Re, el gran patio del British Museum de Londres, la torre Hearst en Nueva York, el Patio Robert y Arlene Kogod en la Smithsonian Institution de Washington.

Norman Foster recibió el premio Pritzker de arquitectura en 1999, y en 2002 obtuvo el Praemium Imperiale (Premio Mundial de la Cultura en memoria de Su Alteza Imperial el Príncipe Takamatsu). En 2009, le fue concedido el prestigioso Premio Príncipe de Asturias de las Artes. En 1990 se le otorgó el título de Caballero que concede la reina de Inglaterra, y en 1999 fue distinguido como miembro vitalicio de la Cámara de los Lores, pasando a ser Lord Foster of Thames Bank.

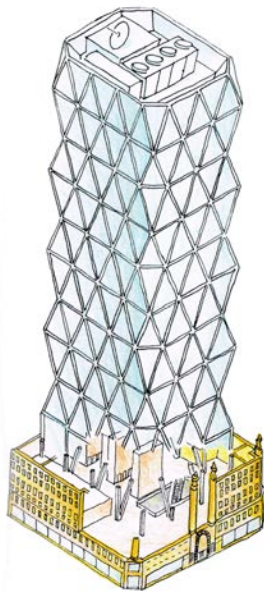


Figura 1: Axonometría general del edificio. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

2.2 Análisis del edificio en su contexto histórico y tipológico. Justificación del interés de analizar estructuralmente el edificio.



Figura 2: En estos bocetos, Norman Foster comienza a explorar la relación entre la base de la nueva torre y el edificio existente, así como los diferentes tratamientos de la cubierta del edificio. Fuente: Foster, N. *Obra completa - WORKS 6*.

La historia del edificio comienza en 1926, cuando William Randolph Hearst encarga al arquitecto y escenógrafo de origen vienés Joseph Urban la sede de su emporio, que contaba entonces con doce revistas. Desarrollado el proyecto junto con George B. Post and Sons, acabó de construirse en 1928, aunque su propietario siempre pensó que las seis plantas de su Internacional Magazine Building podrían aumentar paralelamente al crecimiento de su floreciente negocio.



Figura 3: El edificio original en 1928
Fuente: Foster, N. *Obra completa - WORKS 6*

De acuerdo con ello, George Post propuso en 1945 la ampliación del inmueble con nueve plantas sobre las existentes, pero el proyecto nunca llegó a realizarse. Hubo que esperar a 1997 para que la idea de reedificar en el 959 de la Octava Avenida tuviera visos de realidad. Fue entonces cuando los altos directivos de la empresa comenzaron a valorar la construcción de un gran edificio donde reunir a los muchos empleados que Hearst Corporation tenía dispersos en las numerosas oficinas abiertas en distintos lugares.

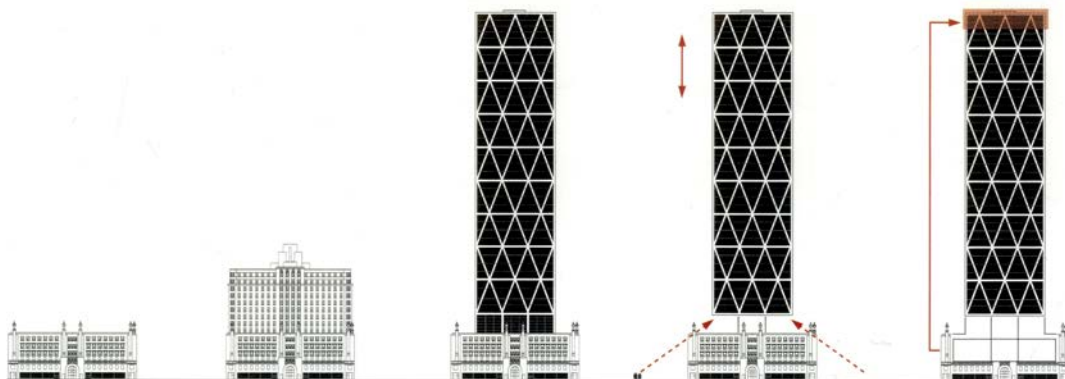
La compañía se había propuesto construir el primer rascacielos verde de la historia de Manhattan y para ello no dudaron en contar con Norman Foster, laureado en 1999 con el Premio Pritzker de Arquitectura y experto en el diseño de edificios brillantes y medioambientalmente exigentes como el Commerzbank de Frankfurt o el Reichstag de Berlín.

A principios de 2001 tienen lugar los primeros contactos y el consejo de administración de Hearst Corporation aprobó en octubre el plan para la construcción de la torre, elaborado durante los meses intermedios.

El 27 de noviembre del mismo año hacía lo propio la Landmarks Preservation Commission, que en 1988 había declarado el edificio original de Urban monumento a conservar.

El plan aprobado incluía la modernización y adecuación de la estación de metro en Columbus Circle, así como la reorganización del tránsito peatonal de su área inmediata.

La contribución social más importante del proyecto será la ejemplarizante actitud observada durante todo el proceso de concepción, ejecución y puesta en marcha de un edificio respetuoso con el medio ambiente y energéticamente sostenible.



- Figura 4: Los cinco estados en el desarrollo del proyecto: el edificio de Joseph Urban en 1928; La torre no realizada de George B Post & Sons en 1946; La nueva torre colocada directamente encima de la base; introduciendo la separación entre lo antiguo y lo nuevo, y la creación de la plaza. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

La torre de acero y vidrio de cuarenta y dos pisos de altura se dispone sobre la plataforma pétrea que representa el edificio de seis plantas diseñado por Joseph Urban en 1928 y que actúa como vestíbulo de acceso a la ampliación.

Hace tiempo que a la compañía Hearst se le quedó pequeño el antiguo edificio y trasladó a la mayoría de sus empleados a otro local. Cuando la compañía decidió reunir sus actividades bajo un mismo techo, sus ejecutivos concluyeron que el edificio Urban era demasiado singular como para abandonarlo.

Hearst contrató a Foster y, en octubre de 2001, realizó el proyecto de la torre que se iba a añadir. Fue el primer proyecto importante que se anunció en Nueva York tras el 11 de septiembre.



Figura 5: Imagen exterior del edificio.

Al igual que sucede con todos los edificios de Foster, la torre Hearst es brillante y pulida, refinada y llena de tecnología. La ampliación está revestida de vidrio y de acero inoxidable, como un brillante misil que despega de la pétrea plataforma de Urban.

La característica más destacada de la torre es el patrón geométrico de vidrio y acero, lo que el arquitecto llama un “*diagrid*”, una malla diagonal de estructuras trianguladas portantes que reviste la fachada con triángulos de cuatro plantas. Éstos configuran gran parte de la estructura del edificio con una impresionante economía: el patrón utiliza un veinte por ciento menos de acero de lo que requeriría el esqueleto estructural de un rascacielos convencional.

La brillantez de Foster se puede apreciar en la forma en que explota este truco ingenieril para producir placer estético. Los triángulos son los lúdicos antagonistas de las oscuras equis que atraviesan la fachada del John Hancock Center de Chicago y confieren al edificio una forma alegremente quebrada.

Foster empezó con una caja, después extrajo las esquinas y dispuso triángulos boca arriba y boca abajo por los lados, empujándolos hacia dentro y hacia fuera: un gigantesco ejercicio de poner y quitar. Las esquinas del torrente vertical se inclinan hacia adentro y hacia fuera a medida que la torre se eleva y toda su forma resplandece.



Figura 6: Trama que sigue la fachada. Fuente:

Un proyecto así podría haberse convertido en un ejercicio de exhibicionismo estructural, pero en manos de Foster representa el contraste perfecto al edificio de Urban.

A Foster se le da bien resolver rompecabezas como éste, no está obsesionado con crear sus propias formas puras. Su capacidad innata para establecer un diálogo entre la arquitectura nueva y la antigua se hizo patente hace seis años, cuando se inauguró el renovado Reichstag en Berlín: Foster colocó una cúpula de vidrio sobre un ornamentado edificio de mampostería del siglo XIX, reinterpretando la monumentalidad del mismo en términos modernos. Y en 2000, revitalizó el patio del British Museum con una cubierta de acero y vidrio que arroja una delicada y geométrica sombra sobre el suelo.

El proyecto evita los dos planteamientos mas obvios: imitar el estilo de la base o levantar una caja de vidrio neutra. El objetivo de Urban en el edificio original era crear una forma respetable de extravagancia, y Foster ha pensado cómo hacer lo mismo, pero de una forma moderna y sin faltar a su compromiso con la innovación estructural.

En algunos aspectos, la torre Hearst recuerda a un famoso proyecto no construido de la época de apogeo del Movimiento Moderno: un rascacielos de unos 180 metros en Filadelfia, propuesto por Louis Kahn y Anne Tyng en 1957, que hubiera tenido una forma de zigzag basada en un esqueleto de soportes triangulares. Kahn y Tyng no fueron los únicos proyectistas en comprender que el triángulo es una forma estructural intrínsecamente fuerte y eficiente; Buckminster Fuller y Robert Le Ricolais hicieron la misma reivindicación.

Figura 7: Maqueta. Fuente:Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*



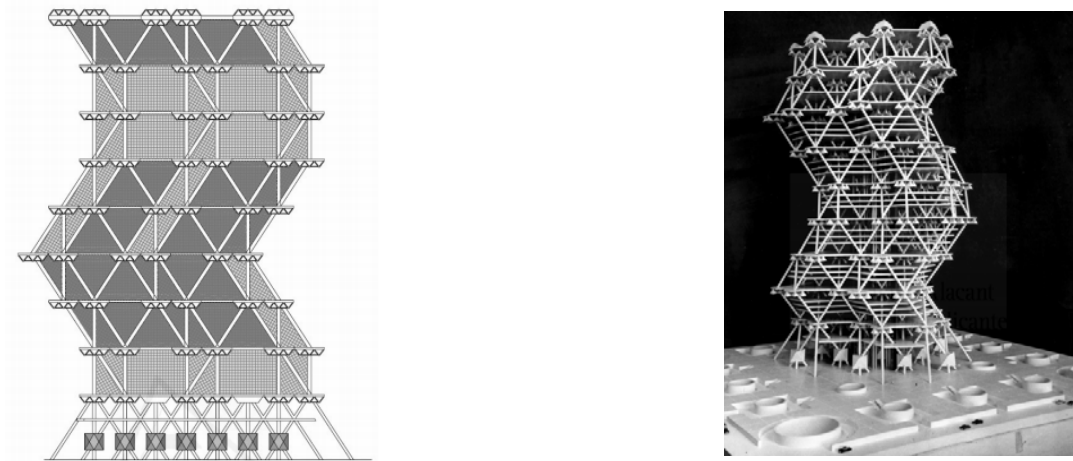


Figura 8: A la izquierda: Fachada de la Philadelphia City Tower, ilustración obtenida de internet a la derecha podemos observar la maqueta de la torre. Fuente: "Louis Kahn and space frames".

La utilización de los triángulos por parte de Foster es, en este sentido, una noción prestada. Sin embargo, la mayoría de los antiguos proyectos tienen el atractivo visual de una estructura hecha con un mecano. Foster cogió las ideas, las actualizó, y produjo un edificio auténtico y a la vez, excepcionalmente elegante.

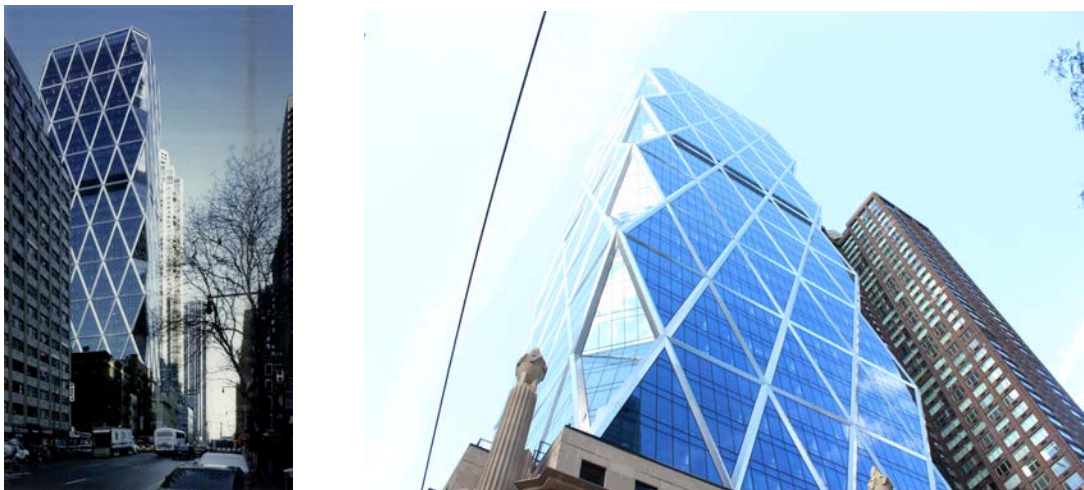


Figura 9: Imágenes exteriores del edificio, realizadas por el autor.

Una malla diagonal de estructuras trianguladas portantes configura gran parte del esqueleto estructural del edificio y genera un atrevido patrón geométrico en la fachada que le confiere la forma de un diamante facetado.

De hecho, la torre Hearst es el rascacielos más hermoso de los que se han levantado en Nueva York desde 1967, cuando Skidmore, Owins & Merrill terminaron el rascacielos del 140 de Broadway en el Bajo Manhattan.

Después del *collage* de imperfectos rascacielos que se han construido alrededor de Times Square en la última década, es refrescante ver un edificio de gran altura que procede claramente de un pensamiento racional.

La torre Hearst tiene una vitalidad de la que la mayoría de los edificios modernos carecen. La venerable tradición moderna de permitir que la estructura del edificio determine su forma ha conducido a menudo a una arquitectura devota y dominante. Si uno cree que hay algo noble en el hecho de que un edificio exprese su estructura, le gustará la torre Hearst; pero si cree que es más importante que anime el *skyline*, entonces la torre le gustará exactamente igual.



Figura 10: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

El placer de la torre Hearst no termina con el exterior. Tiene una de las entradas más impresionantes de todas las torres de Nueva York. Se entra a través del arco original de Urban, el cual, junto con el resto del exterior de la base, ha sido meticulosamente restaurado, y se asciende a través de unas escaleras mecánicas. Lo que viene a continuación es una sorpresa como no se había visto desde que Frank Lloyd Wright hiciera pasar a los visitantes de un vestíbulo bajo y estrecho a la rotonda del Guggenheim. Las escaleras mecánicas sitúan al visitante en un vasto atrio que contiene las plantas superiores del viejo edificio de Urban, que Foster ha suprimido en gran medida para cubrir el espacio con vidrio.

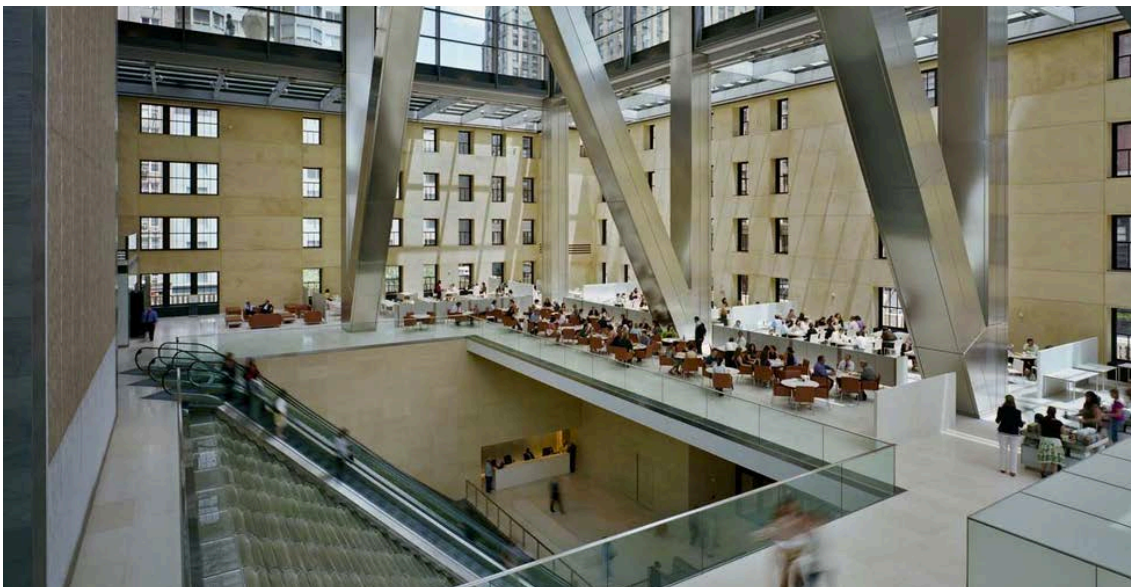


Figura 11: Vista interior zona de acceso. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Los arquitectos vaciaron el edificio existente hasta dejarlo en los muros exteriores originales de arenisca, con lo que crearon un espacioso vestíbulo que contiene una zona de ascensores, una cafetería y un auditorio, así como entreplantas para reuniones y usos especiales.

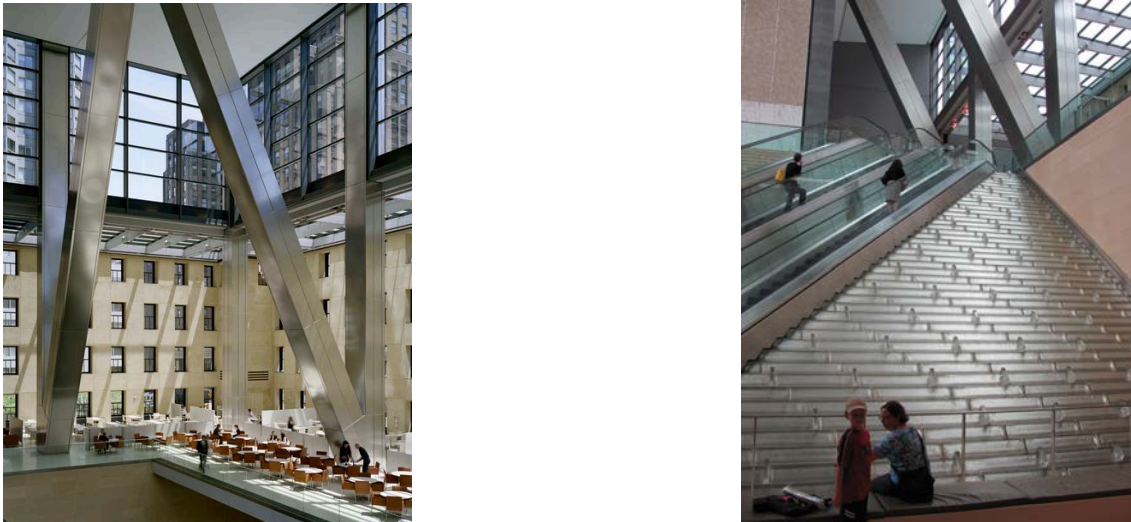


Figura 12: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

Junto con los dos ascensores que van a los niveles de las entreplantas, otros 13 proporcionan acceso a todas las partes del edificio. Cuenta además con dos montacargas.

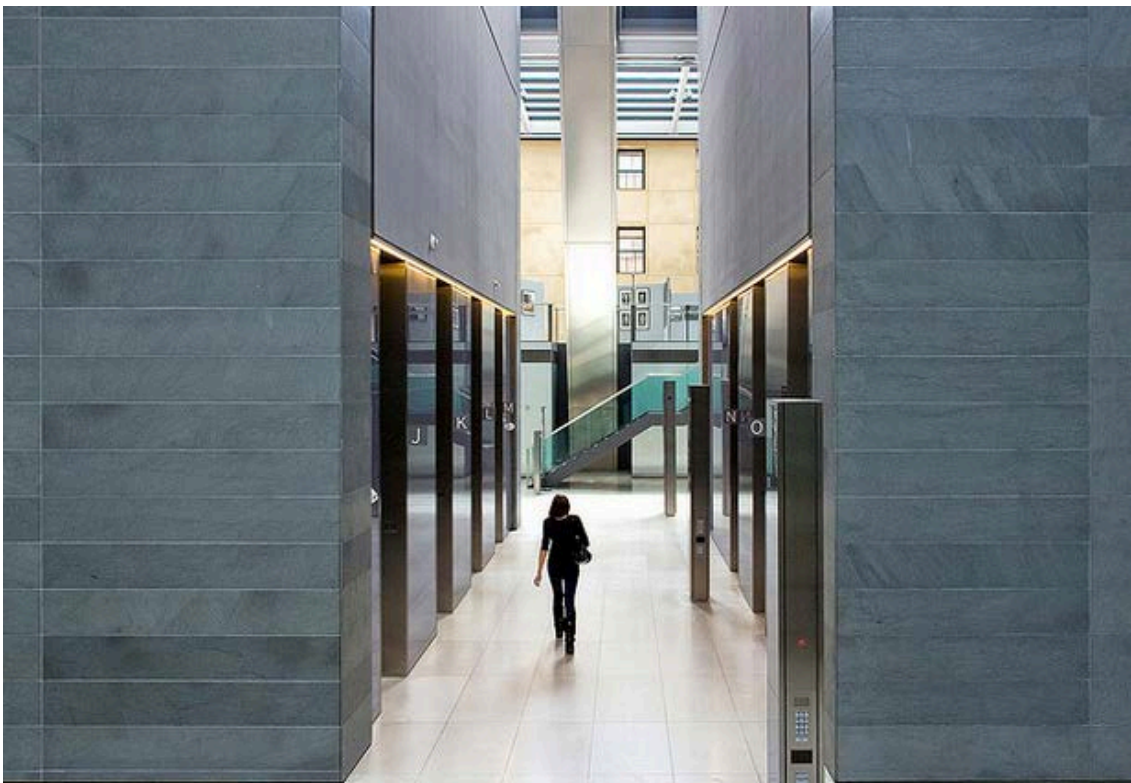


Figura 13: Vista interior del edificio, zona de núcleos verticales. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Los muros del edificio preexistente se han revestido de estuco, y se ven tres plantas de ventanas, lo que confiere al espacio la apariencia de una plaza al aire libre. Los empleados pueden comer en una cafetería dentro del atrio y así se equiparán a sus rivales del edificio Condé Nast, en Times Square, que dispone de una sensual cafetería diseñada por Frank Gehry, el espacio de Hearst es majestuoso.

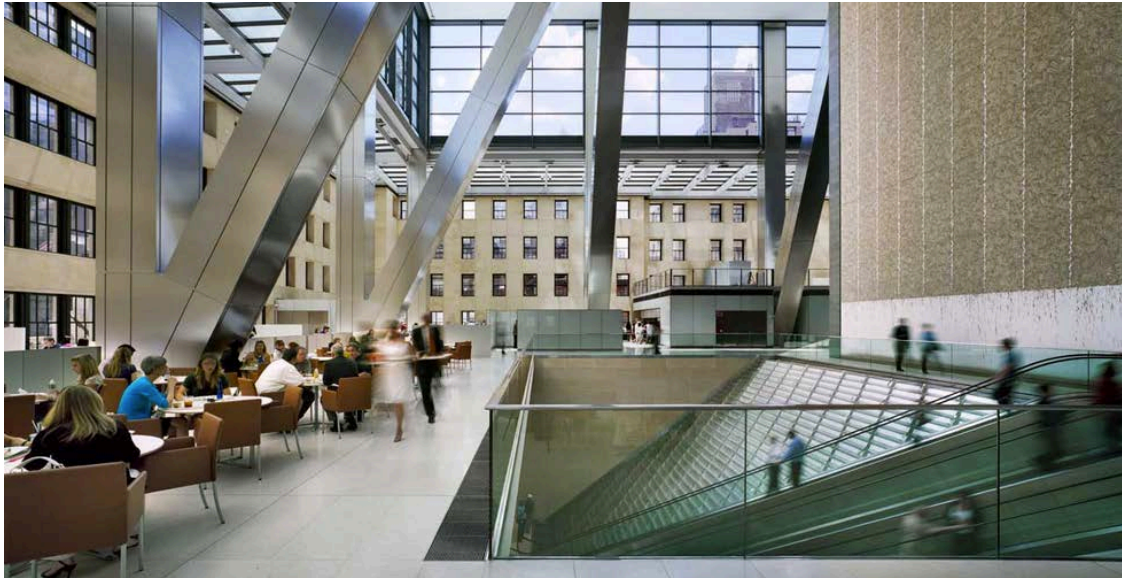


Figura 14: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

La nueva estructura se levanta sobre el vestíbulo, soportada por pilares de hormigón armado y unida al histórico zócalo por una franja acristalada.

Las plantas de oficinas, de una altura de cuatro metros en la mayor parte de los casos, proporcionan espacio para entre 1.800 y 2.200 empleados.

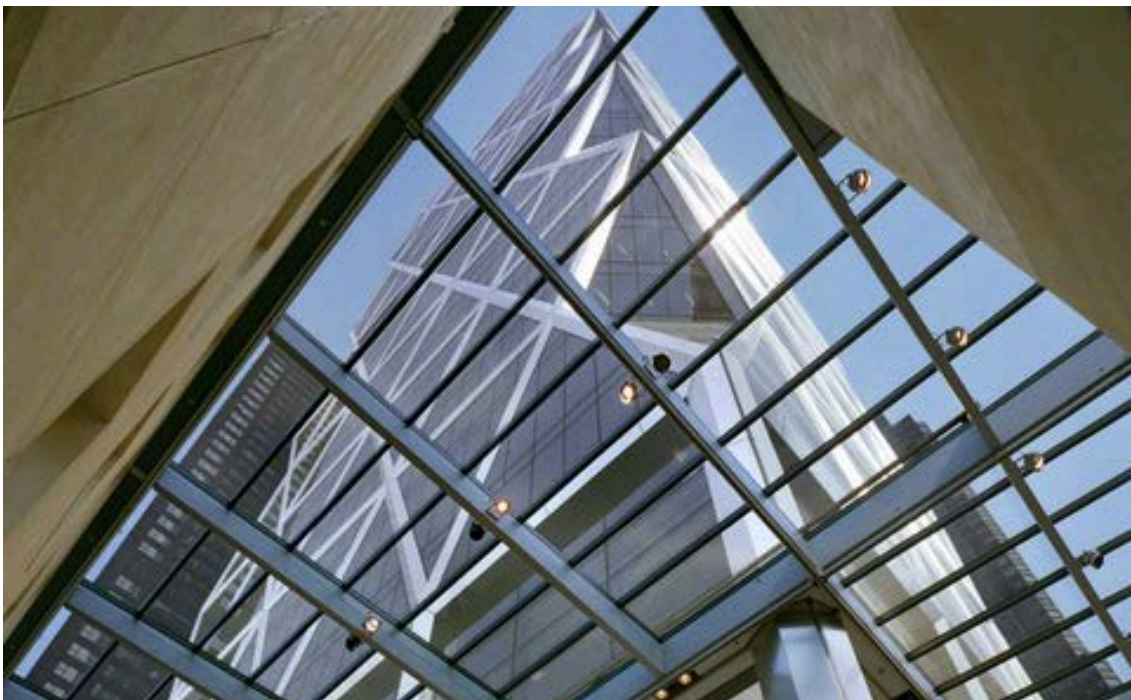


Figura 15: Vista a través del edificio. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

El atrio está realzado por los enormes soportes estructurales diagonales, que se ramifican en su interior, y por lucernarios que ofrecen vistas de la torre que se levanta sobre ellos.

Desafortunadamente, no es fácil ver el edificio Hearst en el paisaje urbano. Al oeste, queda tapado por un edificio de apartamentos, al norte por otra torre y, detrás de ella, por el nuevo Time Warner Center, en el Columbus Circle, que parece muy poco inspirado en comparación.

Esta situación no es muy diferente de la de la mayoría de los rascacielos más representativos de Nueva York. Pero las vistas parciales del edificio Hearst desde la Octava Avenida o a lo largo de la calle 57 son tan espectaculares que acaban por aumentar su encanto.

La mejor vista se produce desde el Upper East Side, cerca del Metropolitan Museum, puesto que nada interrumpe el edificio Hearst por el noreste. Desde la cubierta del Met, se puede ver cómo la torre emerge en todo su esplendor, elevándose por encima de Central Park, integrándose con facilidad en el *skyline* de Nueva York y transformándolo.

Los espacios situados en las esquinas, que en otras partes se reservan normalmente para los ejecutivos, están aquí disponibles como puntos de encuentro y áreas para el personal.

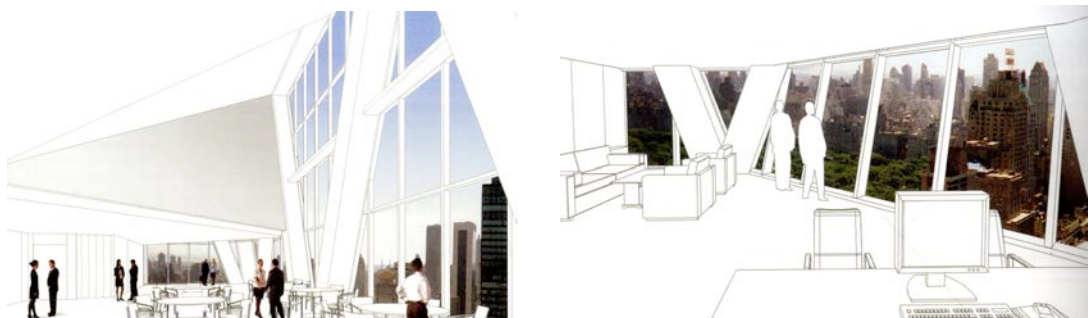


Figura 16: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Las piezas externas diagonales de la estructura de acero son visibles en la fachada, este eficiente sistema ayuda a ahorrar aproximadamente el 20% del acero que se necesitaría en una forma de construcción tradicional.

Los espacios triangulares de la retícula se han cerrado con vidrios de baja emisividad. Los entrantes en las esquinas de la fachada dotan al edificio de una llamativa y memorable silueta. El buen nivel energético de la torre debería asegurar un ahorro del 25% comparado con los edificios convencionales.

Figura 17: Vista aérea de La ciudad. Imagen tomada por el autor.



El agua que se pierde en la instalación de aire acondicionado a través de la evaporación es sustituida por agua de lluvia, con la que se alimenta también un sistema especial de bombeo para regar las plantas y los árboles situados en el interior y el exterior del edificio.

La cubierta de la torre está acondicionada para recoger el agua de la trasladada a un depósito subterráneo con 53.000 litros de capacidad utilizada para reponer el agua evaporada del sistema de climatización de plantas y árboles del interior y exterior del edificio, abastecer algún recircular en la gran cascada de cristal situada en el impresionante acceso. Además de refrescar el ambiente, este sistema permite la reutilización de agua para los fines señalados.

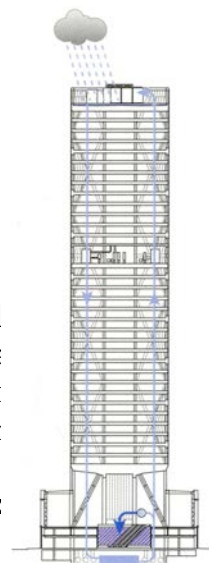


Figura 18: Reutilización del agua. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

La dominante estructura triangular adoptada requirió unas 10.000 toneladas de acero, un 20% menos que el convencional sistema de pilares verticales. Aunque Foster había ensayado con éxito esta malla diagonal en la londinense Swiss Re (1997-04), adquiere en este caso unas dimensiones colosales, con cuatro pisos de desarrollo en cada uno de sus módulos.

El revestimiento de vidrio que recubre el perfil facetado de la torre fue estudiado con minuciosidad para permitir el paso de la luz natural, evitando el sobrecalentamiento interior gracias a la baja emisividad del compuesto elegido. Todas las plantas de oficinas obtienen así abundancia lumínica. Cuando ésta decrece, los sensores automáticos encienden el sistema artificial, que se apaga cuando la luz es suficiente, o cuando los detectores de movimiento captan la ausencia de empleados; sus ordenadores son desconectados por idéntico procedimiento.

Refrigeración en verano: El aire caliente es aspirado por la parte central, se enfría y se distribuye a través de un intercambiador de calor para todas las plantas de oficinas. El lobby, se enfría principalmente por el suelo radiante, que absorbe la ganancia de calor de la exposición solar.

El enfriamiento adicional es proporcionado por aire de las oficinas y del *Icefall*. La radiación solar se reduce por el acristalamiento de alto rendimiento.

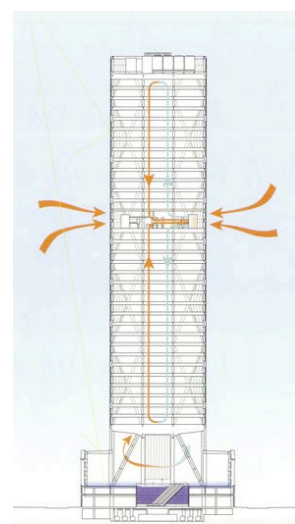


Figura 19: Sistema de Refrigeración. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Calefacción en invierno: El aire frío se absorbe en el nivel central y se deshumidifica y limpia antes de pasar a través de un intercambiador de calor.

El aire caliente se distribuye a los pisos de oficinas a través de conductos de suministro por el techo, que también extraen el aire usado.

En la planta del vestíbulo, el sistema de suelo radiante proporciona calefacción mientras el Icefall humidifica el aire.

El sistema de climatización utiliza equipos de alta eficiencia para producir frío y calor a partir del aire exterior durante tres cuartas partes del año. En su conjunto, el consumo energético de la torre Hearst es un 26% menor que un edificio de oficinas convencional, y sus bajas emisiones de dióxido de carbono equivalen anualmente a los escapes de 174 automóviles.

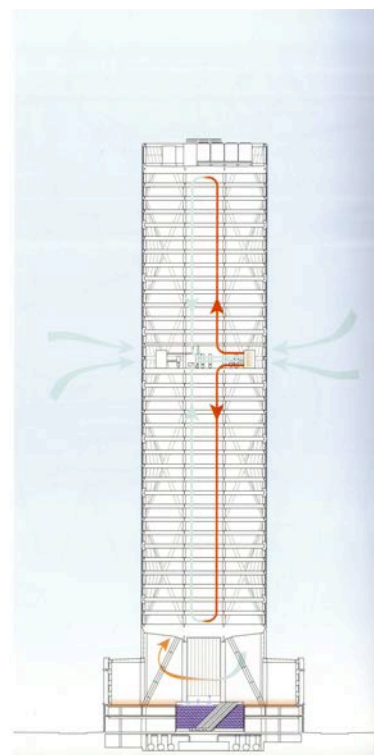


Figura 20: Sistema de calefacción.
Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Además de las cuestiones energéticas, la atención a la procedencia de los materiales y su reciclaje ha sido constante en el proceso de ejecución de la obra, comenzada en la primavera de 2003 con la demolición controlada de la construcción de Urban, excepto sus fachadas de piedra artificial que serían cuidadosamente restauradas. Todo el material procedente del derribo fue clasificado y trasladado a plantas de reciclaje especializadas.

La estructura metálica del edificio proviene en un 90% de acero reciclado y todos los revestimientos de suelos, paredes y techos contienen asimismo material procedente del reciclaje de componentes.

Concluida la obra a finales de abril de 2006, los primeros 1.000 trabajadores fueron trasladados el 4 de mayo a la nueva sede de la compañía inaugurada solemnemente el 9 de octubre del mismo año. Hoy alberga unos 2.000 empleados cuyos hábitos de reciclaje incluyen, además del material de oficina, los vasos, botellas y otros objetos de consumo que son reciclados en un 70%. No es de extrañar que la Torre Hearst haya sido el primer rascacielos habitado que ha obtenido el certificado de oro otorgado por el neoyorquino Green Building Council en su programa LEED: Leadership in Energy and Environmental Design.

El mérito más destacable del proyecto ideado por Foster es la conciliación de la etiqueta de *edificio verde* con los principios arquitectónicos de un autor comprometido con su tiempo y respetuoso con el pasado.

La conservación de parte de la obra de Urban supuso en la práctica la consolidación de sus fachadas y el respeto de su volumetría inicial, desde la que emerge la figura retranqueada de la nueva torre que se eleva hasta los 182 metros de altura.

El paseante no advierte el mecanismo por el que un edificio histórico se convierte en podio de un pilar contemporáneo hasta que accede al interior de la Hearst Corporation a través de una escenográfica secuencia de espacios que el propio Urban desearía haber ideado.

Atravesando el arco de entrada desde la Octava Avenida el visitante se hallará literalmente bajo la torre, sostenida por un imponente juego de estructuras verticales y diagonales revestidas de acero inoxidable que conforman un espacio de 30 metros de altura rebosante de luz.

Las escaleras mecánicas dispuestas oblicuamente sobre la cascada de vidrio conducen al *lobby*. En el vestíbulo, la textura de la piedra contrasta con el impresionante mural denominado *Riverlines* creado por Richard Long a base de nueve bandas verticales pintadas a mano empleando barro recogido del cauce del río Hudson.

Tan sobrecogedor tránsito desemboca en el verdadero corazón del edificio, percibido como una plaza pública cubierta gracias a la integración de los muros del edificio original, revestidos de estuco, con cuatro líneas de ventanas correspondientes a las plantas superiores de la construcción de 1928.

Allí se encuentran el café-restaurant, con capacidad para 380 comensales, y el teatro Joseph Urban, con un aforo de 168 espectadores.

Situada dos niveles por debajo del *lobby*, la planta de acceso se dedica a la entrega de mercancías y a los usos comerciales propios de los locales de las calles 56 y 57.



Figura 21: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster, N. *Obra completa - WORKS 6*

En el nivel 14, los empleados gozan de unas completas instalaciones para la práctica del fitness, yoga, danza y Pilates, y en los pisos superiores, con majestuosas vistas sobre Central Park, el Hudson o el perfil de la ciudad, se sitúan las salas de reuniones para directivos.

La nueva torre Hearst no ha pasado desapercibida para la crítica especializada y la valoración ciudadana. Ambas parecen coincidir en la distinguida sencillez de su apariencia, cuyos matices se multiplican en las vistas oblicuas de sus aristas y los cambiantes reflejos de sus pulidas superficies.

Evitando malabarismos formales innecesarios, el perfil sereno de la Hearst Corporation ha sumado su diamantina figura al skyline de la ciudad, afectado por la traumática desaparición de las torres de Yamasaki.



Figura 22: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Técnicas de vanguardias constructivas. *Hearst tower, un diamante High-Tech..*

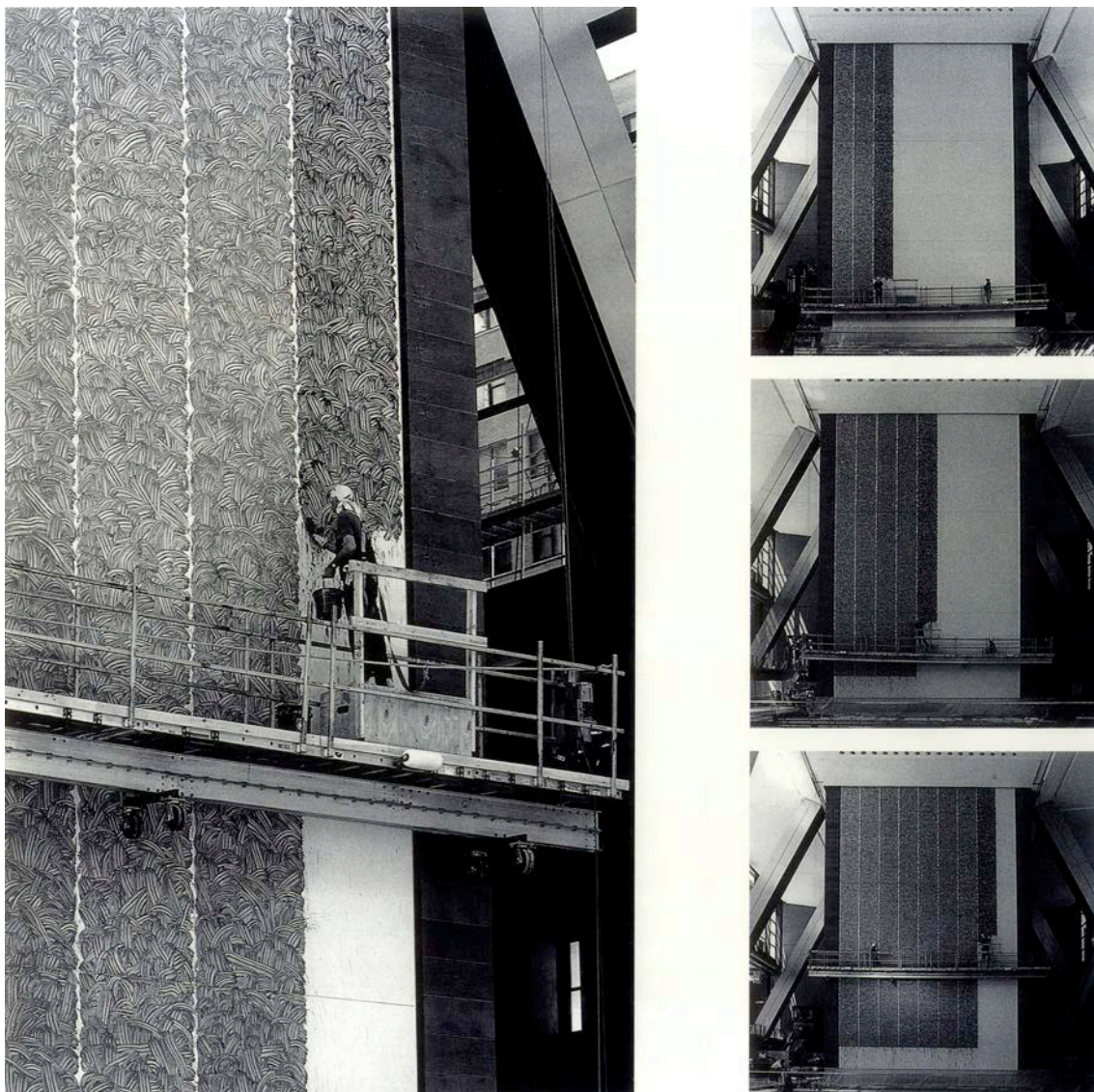


Figura 23: Proceso de creación del impresionante mural denominado Riverlines creado por Richard Long a base de nueve bandas verticales pintadas a mano empleando barro recogido del cauce del río Hudson. Fuente: Foster, N. *Obra completa - WORKS 6*

CONSTRUCCIÓN



Figura 24: Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

La fachada existente, en su estado final, se vio reforzada lateralmente con apoyos en su tercer y séptimo piso, relacionándolo a la parte superior de la pared junto con la nueva estructura.

Sin embargo, la fachada tuvo que ser estabilizada temporalmente, ya que su estructura interna se eliminó con el fin de construir la nueva torre. Esto se consigue manteniendo temporalmente la primera crujía de la estructura de todo el perímetro, incluyendo sus pilares y forjados, enmarcando la superficie donde irá ubicada la nueva torre, como un anillo.



Figura 25: Estructura que sustentó la fachada preexistente. Fuente: Rahimian, A., Eilon, Y. (2008) "Hearst Headquarters: Innovation and Heritage in Harmony." CTBUG 8th World Congress.

Esto también proporciona una plataforma de trabajo para reforzar la pared de la fachada existente, aunque el análisis de la primera crujía de la estructura de anillo con la condición de carga temporal mostró que también requiere de rigidez lateral temporal, por lo que se colocaron elementos auxiliares de arriostramiento dentro de todo el perímetro de la parcela. Estos refuerzos temporales permanecieron en este lugar hasta que se completó el mayor trabajo estructural hasta la décima planta y se restauró la estabilidad final del muro de fachada existente.



Figura 26: Fuente: Foster, N. *Obra completa* – WORKS 6



Figura 27: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Rahimian, A., Eilon, Y. (2008) "Hearst Headquarters: Innovation and Heritage in Harmony." CTBUG 8th World Congress.

En cuanto al estudio del terreno, las pruebas indicaron una fuerte caída en el estrato de roca de la parcela, la variación variaba entre 1 metro (unos pocos pies) hasta los 9 metros aproximadamente (30 ft). Por lo tanto, casi la mitad de la torre apoya sobre el estrato de la roca, mientras que la otra mitad lo hace sobre unos pozos de cimentación de resistencia equivalente empotrados en la roca.



Figura 28: Los grandes “cajones” de los pilares de 1,25 m² (44in-square box columns) se ensamblaron con pletinas de acero laminado de 10,6 cm (4in) de espesor. Fuente: Ficeto, M. *Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower*



Figura 29: Encuentro de los elementos principales que forman el *diagrid* en uno de los nudos. Fuente: Ficeto, M. *Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower*



Figura30: Estructura por debajo del atrio, arriostra lateralmente los grandes pilares y diagonales.
Fuente: Ficeto, M. Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower.

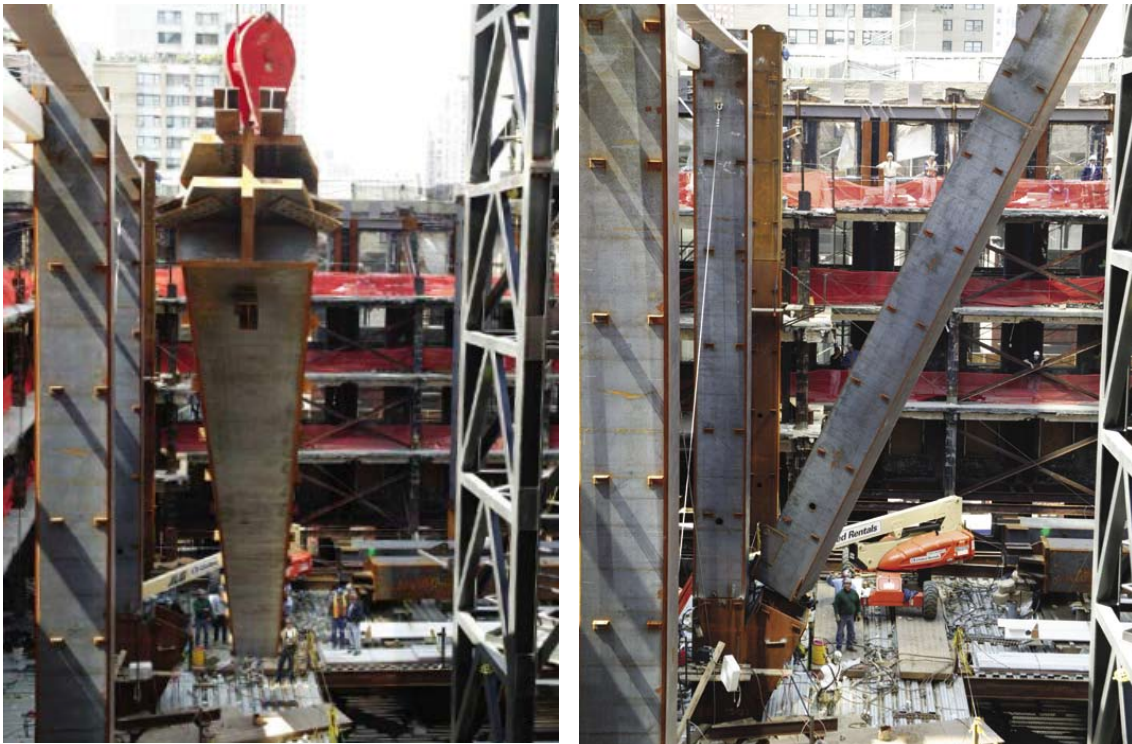


Figura 31: Los grandes pilares y diagonales soportan la torre, creando un atrio de 7 alturas.
Fuente: Ficeto, M. Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower

Una de las partes del edificio de la que menos información se dispone es la estructura intermedia que se encuentra en la parte superior del acceso.

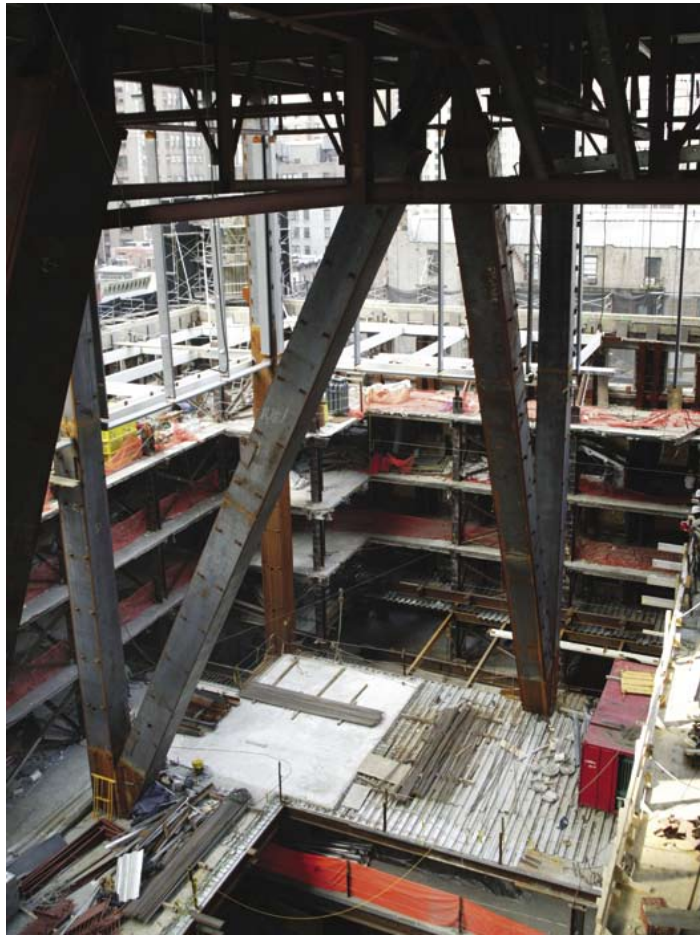


Figura 32: En la imagen se aprecia una especie de celosía de gran canto que distribuye los esfuerzos que llegan de la parte superior de la torre hacia los grandes pilares y de ahí hasta llegar a la cimentación. Fuente: Ficeto, M. Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower



Figura 33: Amplias luces se extienden dentro del interior, pudiendo llegar a ser de 12 metros (40 ft) o más. Fuente: Ficeto, M. Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower

La construcción del *diagrid* requiere una exactitud excepcional en el proceso de construcción. Se requiere una rigidez de la estructura con unas tolerancias permisibles reducidas de 5/8 de pulgada, en algunos casos a 1/8 de pulgada.

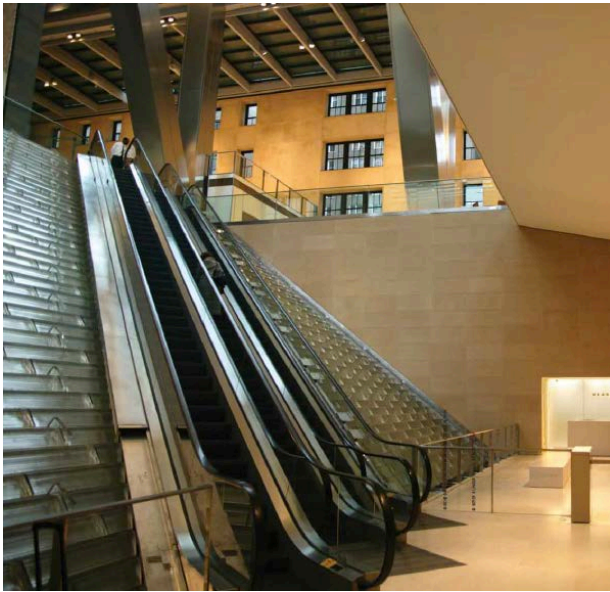


Figura 34: Izquierda: Imagen interior del Lobby. Fuente: Ficeto, M. Hearst Icefall. Lobby Water feature Shines On. Derecha : Detalle pilar diagonal. Fuente: Rahimian, A. New York's Hearst tower.

“Construimos un modelo 3D para determinar la forma en que se esperaba que deformase la estructura, flectando y desviando bajo las acciones de carga gravitatoria en diferentes etapas de construcción”.



Figura 35: “Icefall”, diferentes fotos de la construcción de la cascada del acceso principal. Fuente: Ficeto, M. Hearst Icefall. Lobby Water feature Shines On.

“El agua fluye a lo largo de los 9 metros de altura por la pared escalonada de vidrio fundido y acero inoxidable en una perfecta e hipnótica coreografía, como si fuese guiada por unas manos invisibles”.

Emplazamiento



Figura 36: Fachadas Sur y Este. Fuente: Bing maps.



Figura 37: Fachadas Norte y Este. Fuente: Bing maps.

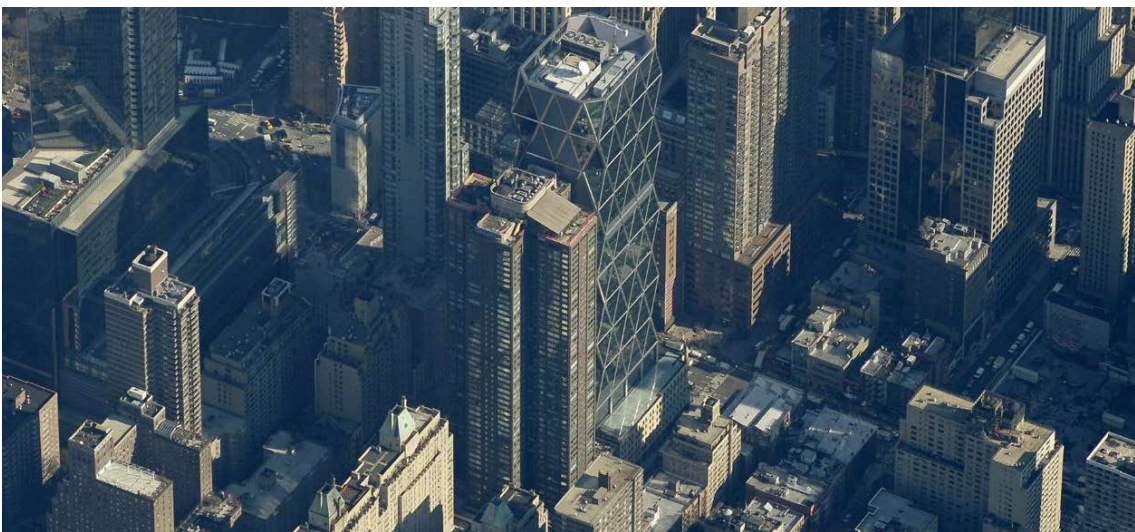


Figura 38: Fachada Oeste. Fuente: Bing maps.

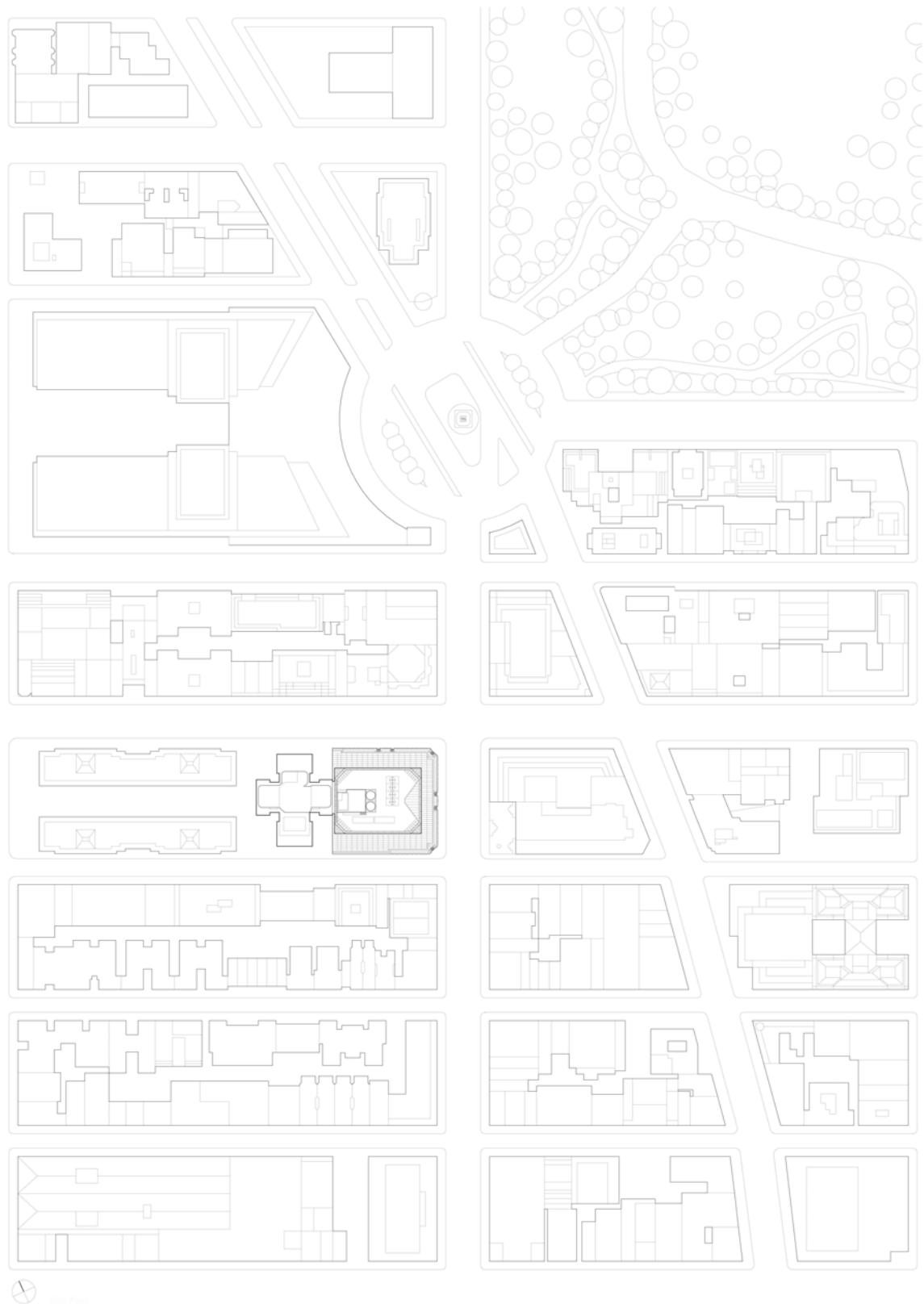


Figura 39: Plano de emplazamiento. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

La Torre Hearst está situada justo debajo de Columbus Circle, en el corazón de Midtown de Manhattan, tiene fachadas a la Octava Avenida, la calle 56 y la calle 57. Al oeste, colinda con The Sheffield, un edificio de apartamentos de gran altura.

1.2 Plantas

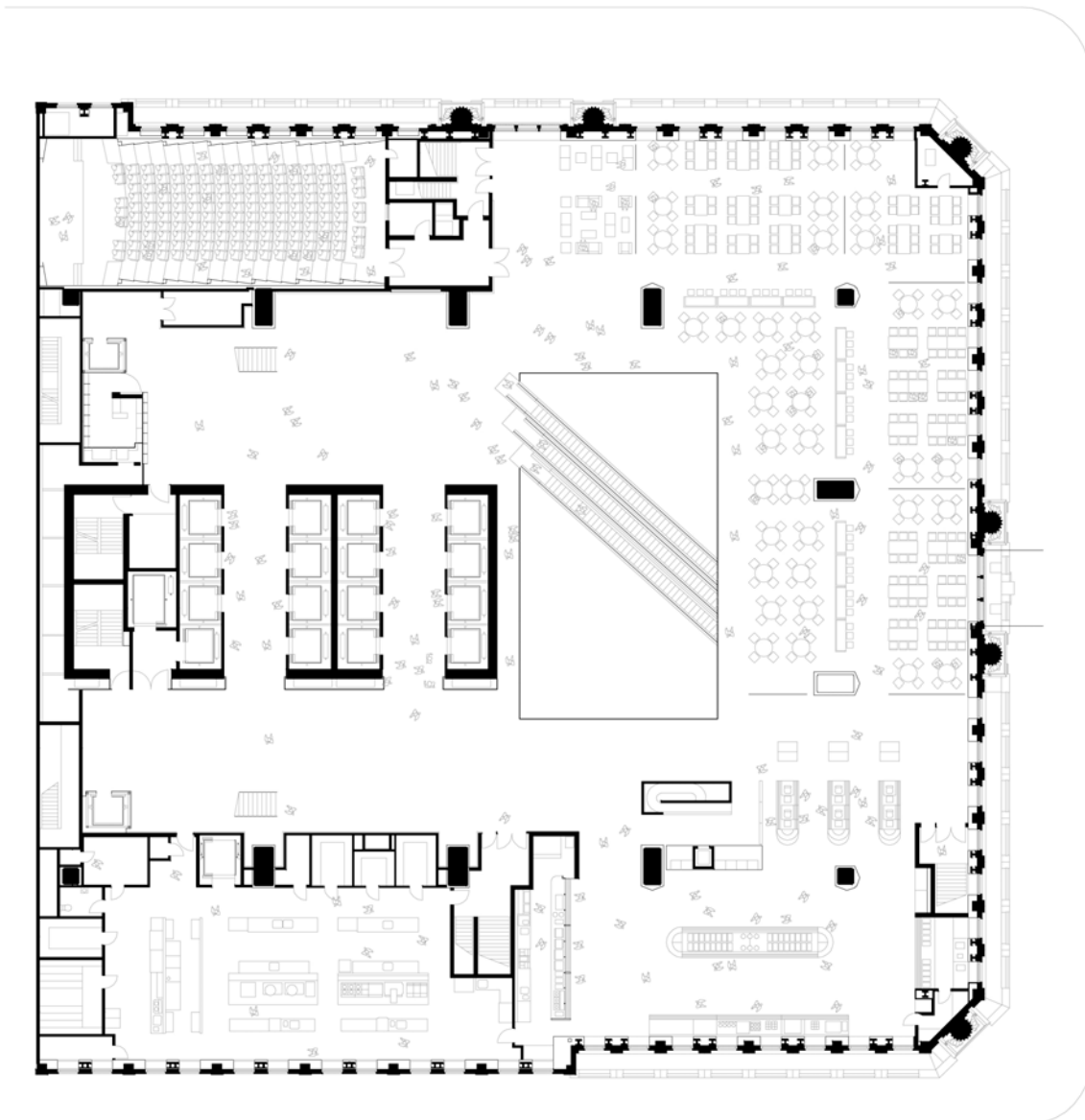


Figura 40: Fuente: Foster, N. *Obra completa* – WORKS 6

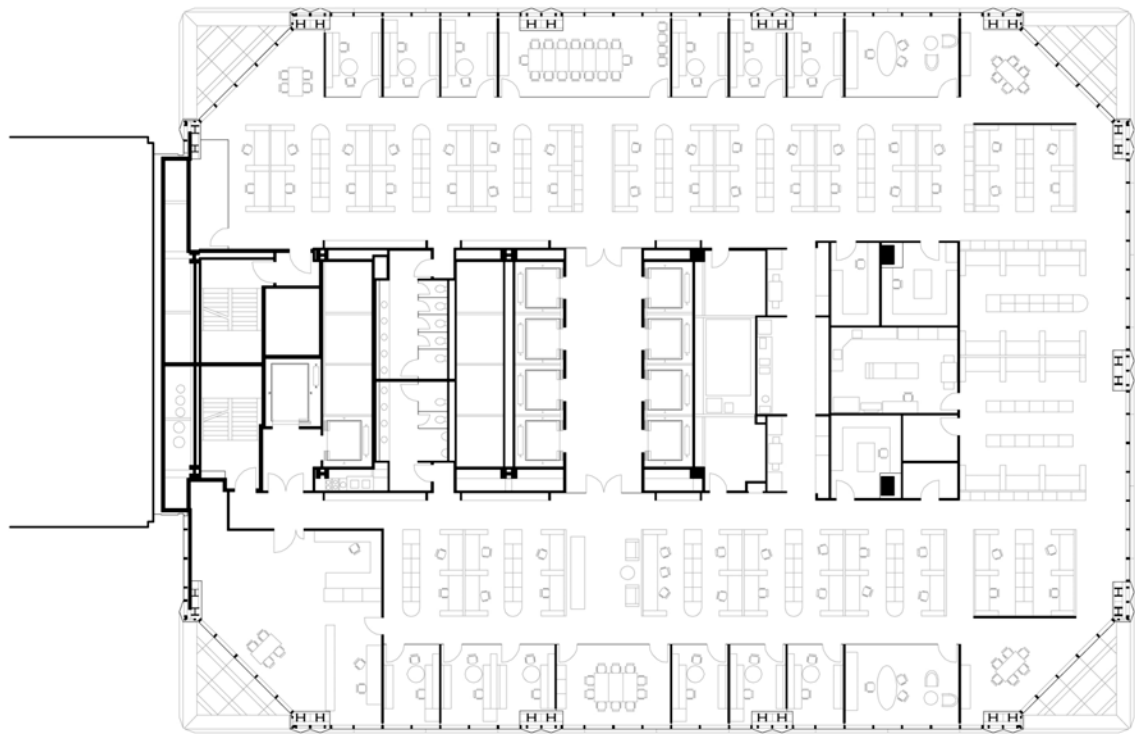


Figura 41: Planta de acceso. Fuente: Foster, N. *Obra completa* – WORKS 6



Figura 42: Planta de acceso. Fuente: Foster, N. *Obra completa* – WORKS 6

1.4 Alzados

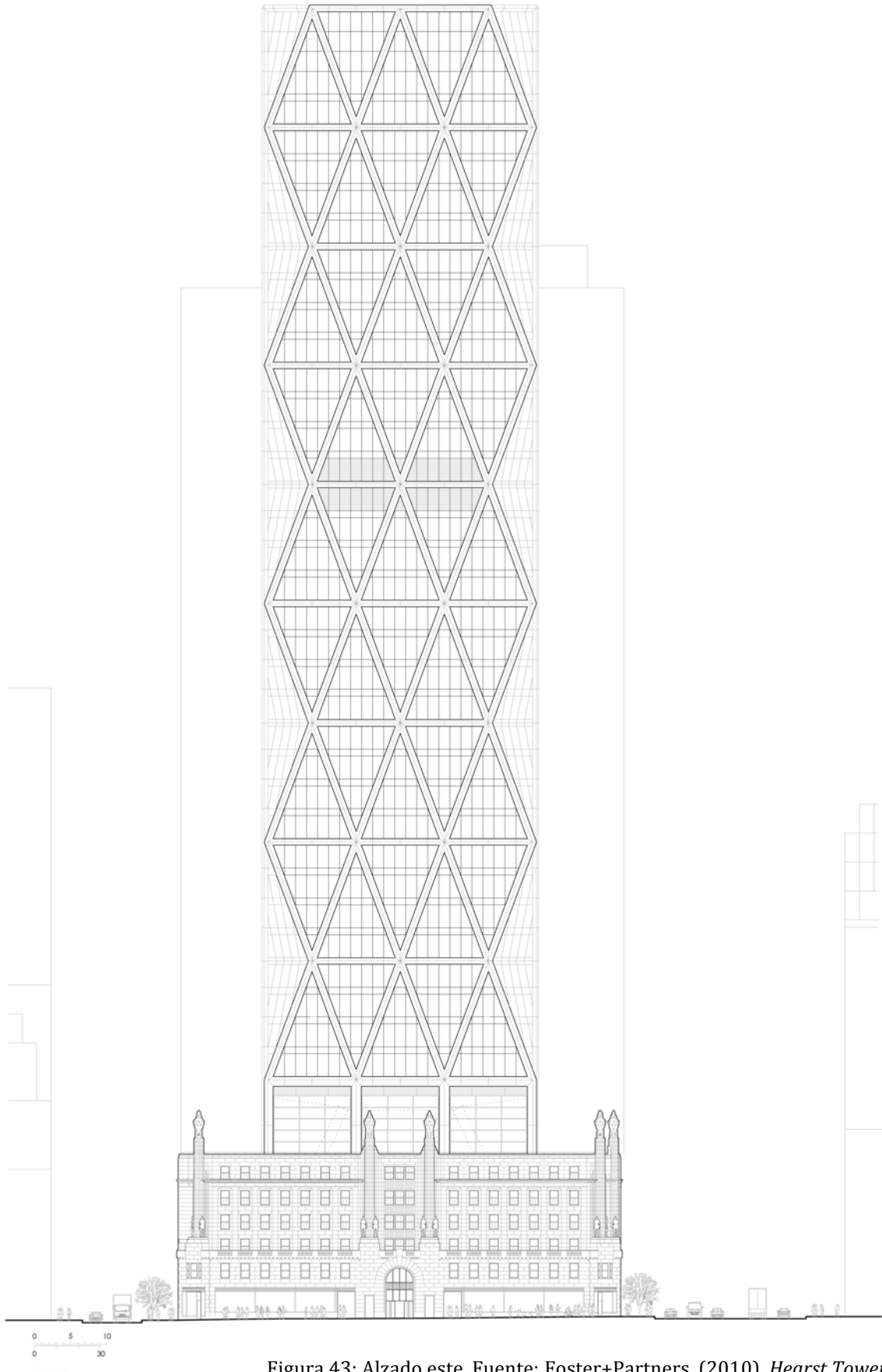
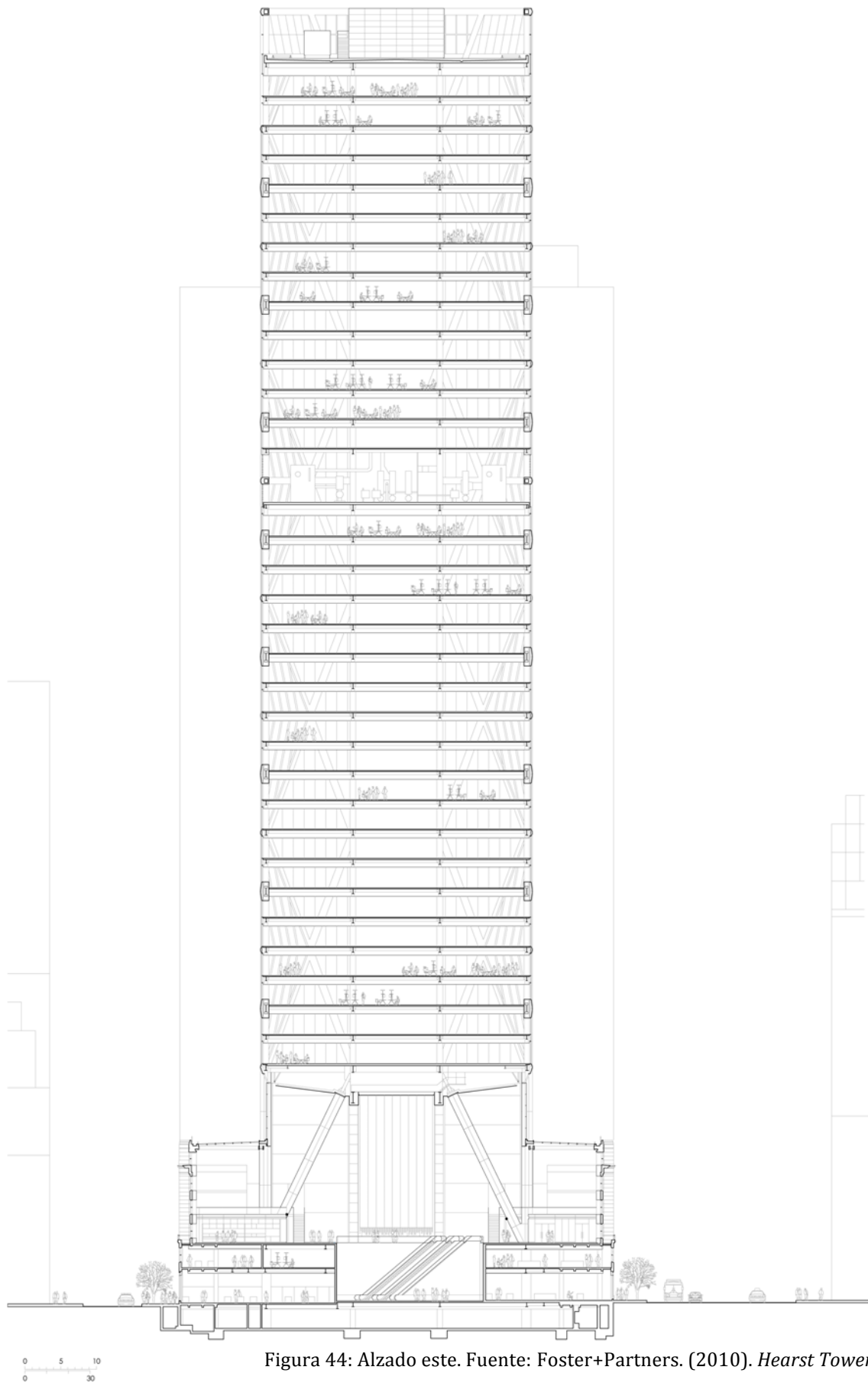


Figura 43: Alzado este. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

1.5 Secciones



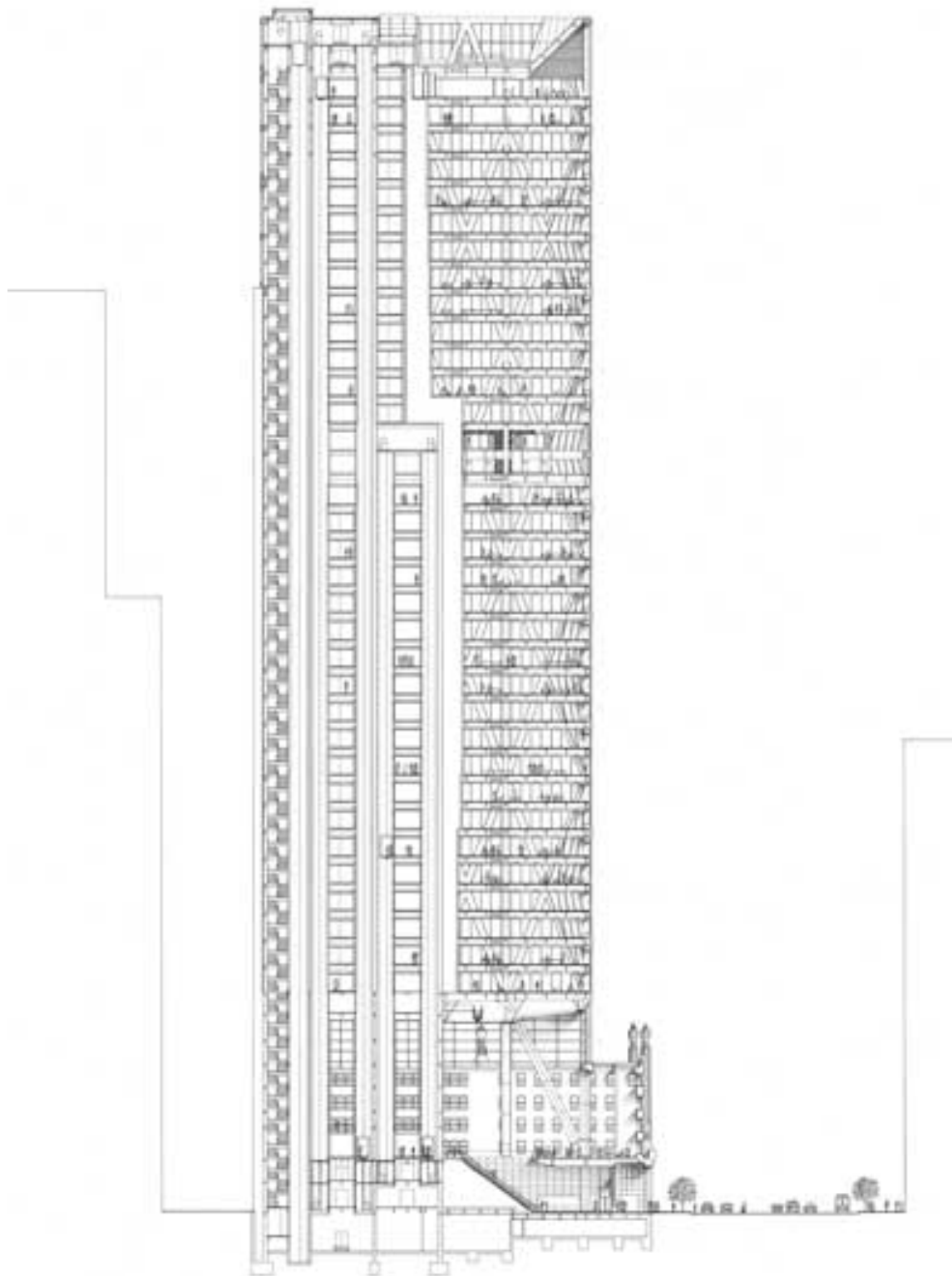


Figura 45: Alzado este. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

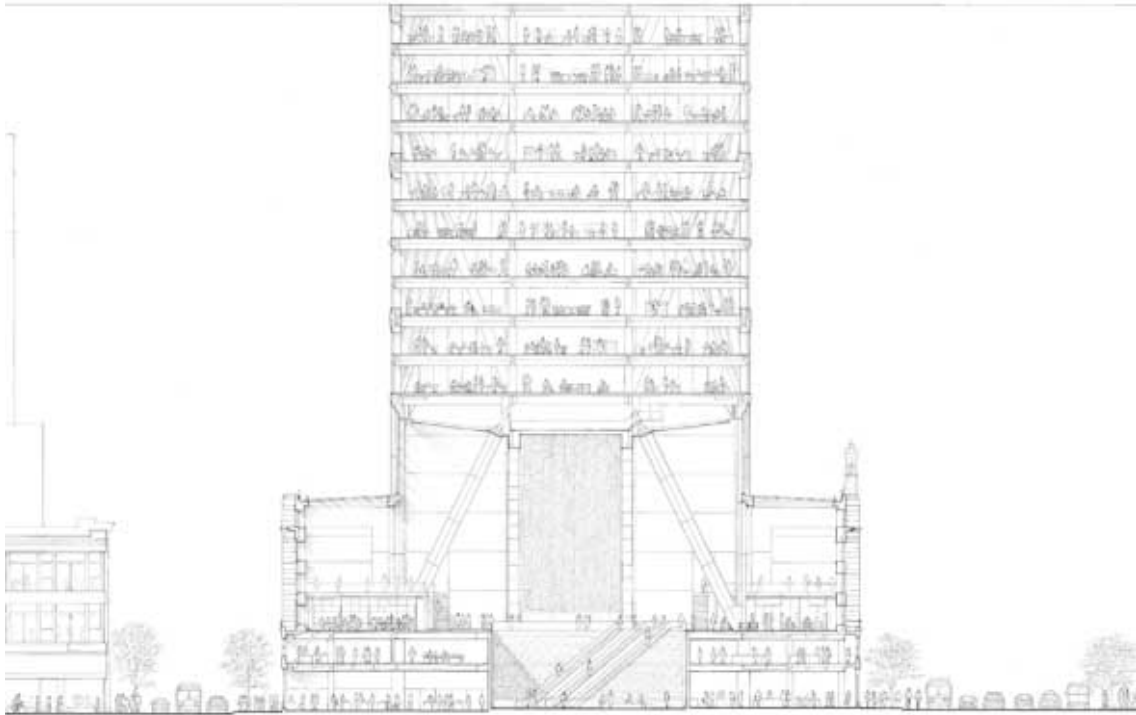


Figura 46: Alzado este. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

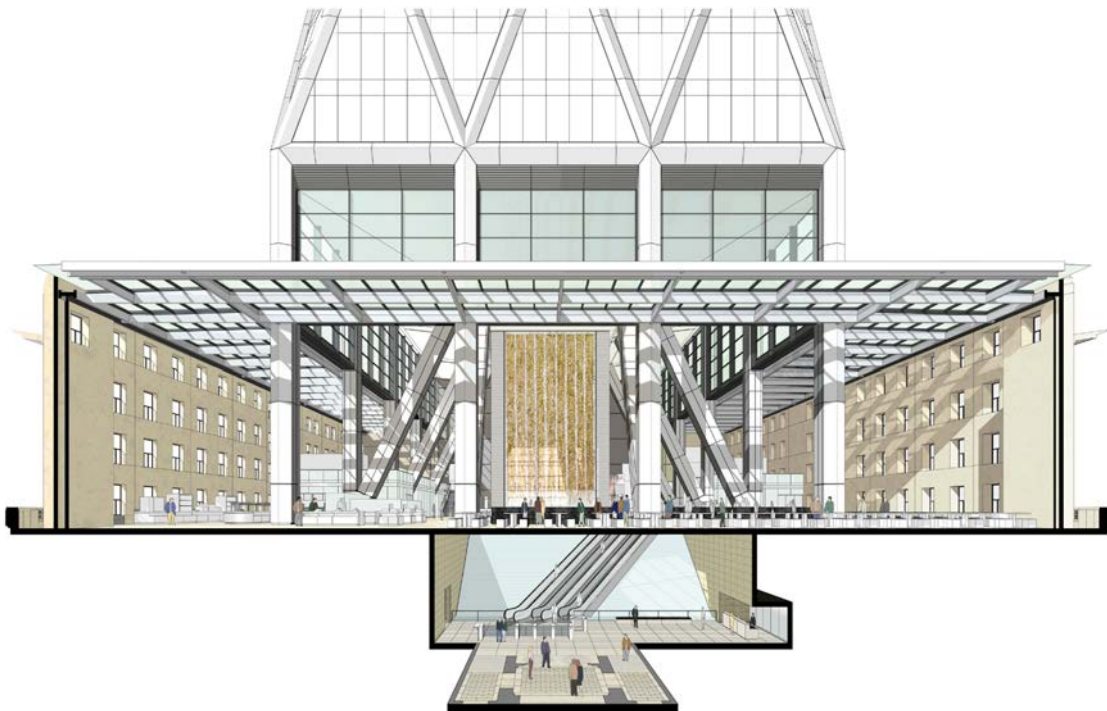


Figura 47: Alzado este. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

2.3 Análisis explicativo y justificativo del sistema estructural del edificio

Concepto de *DIAGRID* – Definición general

El término “diagrid” es una mezcla de las palabras “diagonal” y “grid”(rejilla), es algo confuso, se utiliza comúnmente para describir una rejilla estructural diagonal. El sistema se compone de los elementos diagonales, normalmente fabricados a partir de acero estructural, que se unen en los nudos. La rejilla diagonal presenta a menudo la función visual dominante en el diseño de edificios *diagrid*, pero es por sí mismo inestable.

El sistema en forma de diamante requiere la triangulación con el fin de crear suficiencia en la estructura, son una estrategia de diseño estructural para la construcción de edificios que combinan resistencia a la gravedad y las cargas laterales en un sistema triangular de elementos que elimina la necesidad de pilares verticales. Se coloca generalmente en el perímetro del edificio y la triangulación se logra normalmente donde las vigas de borde se atan a la red.

La idea principal detrás del desarrollo del sistema *diagrid* fue el reconocimiento del posible ahorro debido a la eliminación de la mayoría de pilares verticales. Los pilares verticales diseñados para soportar cargas gravitatorias, son incapaces de proporcionar suficiente estabilidad lateral por sí mismos. La rejilla diagonal, si está adecuadamente espaciada, es capaz de asumir todas las cargas debidas a la gravedad, así como proporcionar estabilidad lateral por su configuración triangular. Una estructura *diagrid* pura no requiere del uso de hormigón o núcleo de acero reforzado para proporcionar estabilidad frente a esfuerzos laterales.

Una torre diagrid se modela como un voladizo vertical, el tamaño de los módulos de la rejilla diagonal se determina normalmente dividiendo uniformemente la altura de la torre. Numerosos estudios se han realizado hacia la optimización del tamaño del módulo en función de la altura del edificio y los ángulos de los elementos inclinados.

Los módulos en forma de diamante normalmente abarcan entre seis y ocho plantas de punta a punta, aunque los módulos más cortos se utilizan para edificios con geometrías irregulares o curvas más estrictas.

Normalmente, la altura del módulo se extenderá sobre varias plantas, de esta manera las vigas que definen el borde de los forjados también se pueden enmarcar en los elementos diagonales, estas vigas de borde se suelen conectar al núcleo.

Como una parte significativa del gasto de la estructura se encuentra en la fabricación de los nudos, se hace un gran esfuerzo por minimizar su variación y la frecuencia, simplificando la conexión entre nudo y elementos diagonales para agilizar su ejecución.

Las principales intersecciones estructurales ocurren en los nudos, los elementos diagonales son continuos de nudo a nudo, aunque esto variará de un proyecto a otro en función de la altura del módulo.

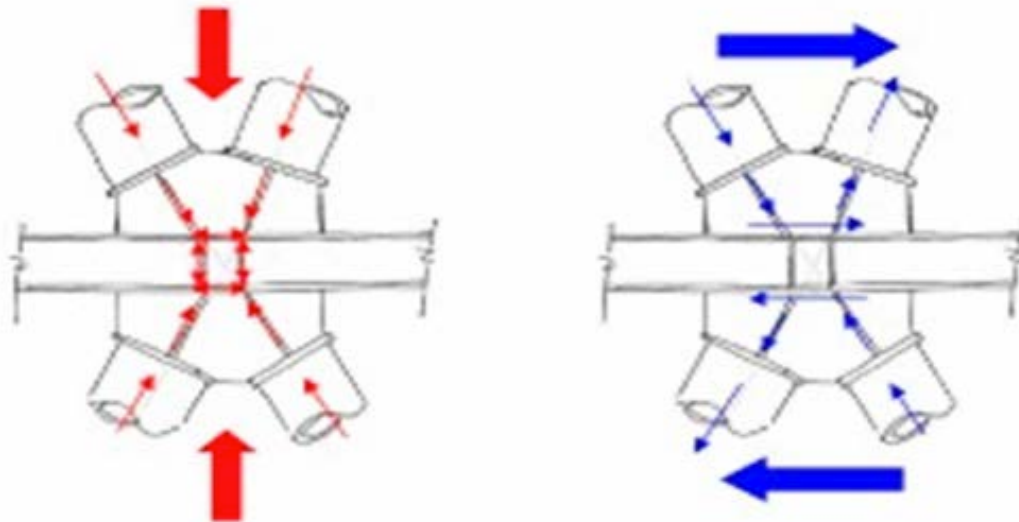


Figura 48: Esquemas de transmisión de cargas en función de si reciben acciones verticales o horizontales. Fuente: Pipola, J., Legarda, C., Multani, G. *Glass Curtain Wall*.

Los módulos en forma de diamante deben ser arriostrados por lo menos en su punto más ancho, utilizando una conexión de nudo a nudo para completar su triangulación estructural básica.

Dependiendo de la geometría global del edificio, el arriostramiento horizontal o anillos pueden ser obligados a actuar en tensión (donde las cargas de gravedad haría que el *diagrid* empujara hacia el exterior). El arriostramiento horizontal se forma a menudo por la viga de borde de la estructura del forjado, que enmarca el nudo para completar el triángulo. Alternativamente, un elemento de acero estructural adicional puede fijarse entre los nudos.

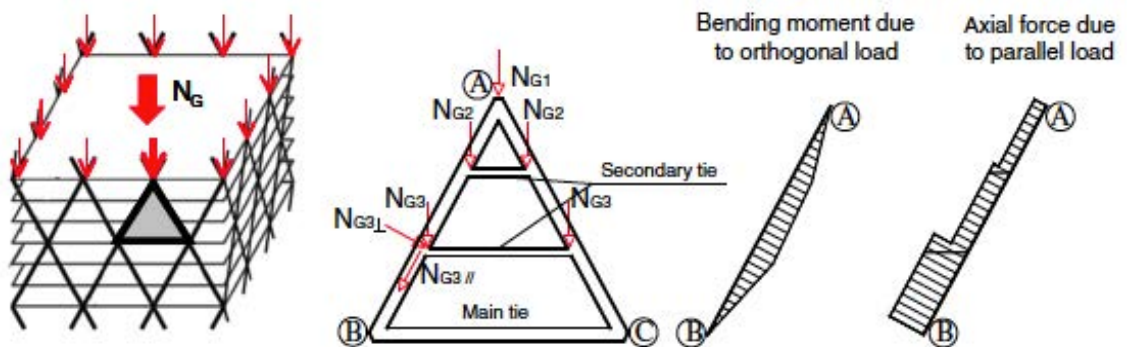


Figura 49: Módulo del *diagrid*: efecto de la carga gravitatoria a lo largo de la diagonal. Fuente: Mele, E., Toreno, M. (2014) *Diagrid structures for tall buildings: Case studies and design considerations*.

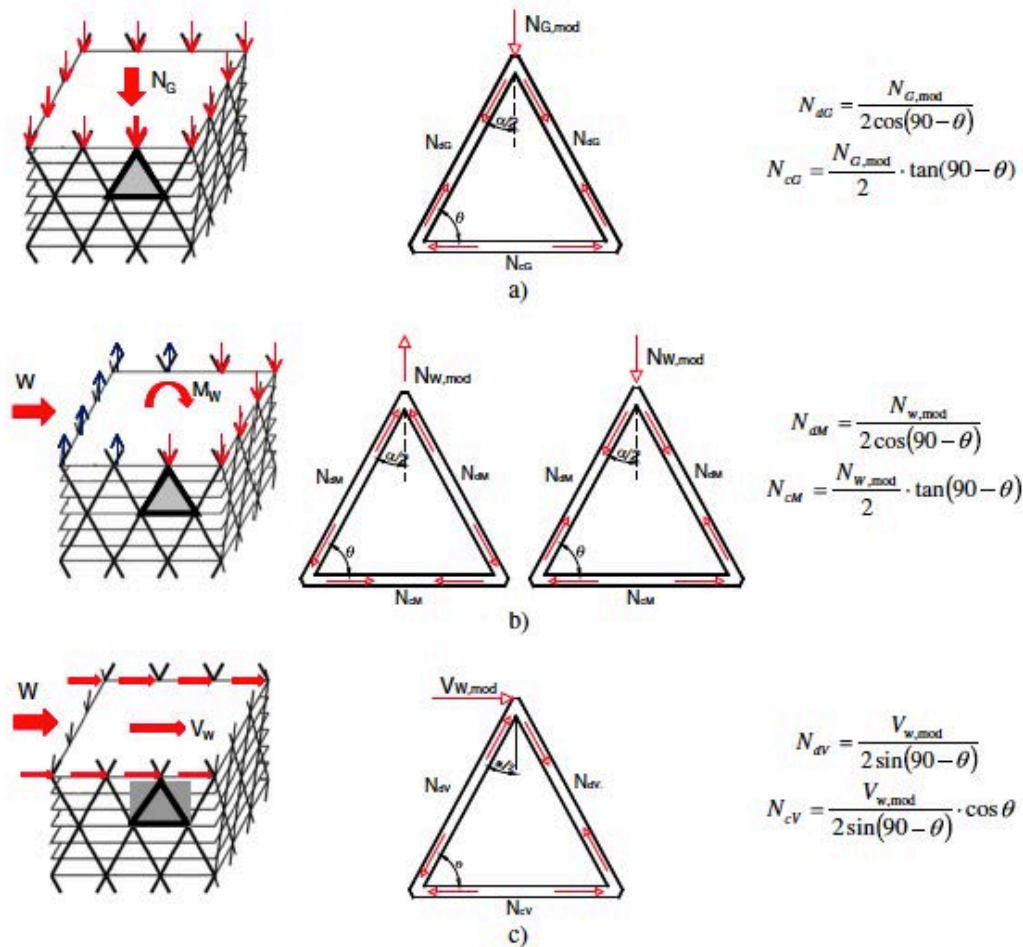


Figura 50: Esquema del módulo del *diagrid*, efectos con a) acción vertical, b) momento y c) horizontal. Fuente: Mele, E., Torenó, M. (2014) *Diagrid structures for tall buildings: Case studies and design considerations*.

Las fórmulas que aparecen en el gráfico se utilizar para derivar/conducir las fuerzas internas en los elementos del *diagrid*. Se supone implícitamente que la carga externa se transmite al módulo en el nudo, vértice del propio módulo.

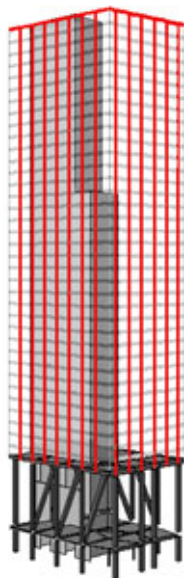
Sin embargo, ya que el módulo triangular por lo general abarca un número de plantas, la transferencia de cargas al módulo se produce en cada nivel de suelo, y por tanto también concentra cargas a lo largo de la longitud diagonal (presentes en el siguiente esquema), como consecuencia del momento de flexión y cizallamiento.

La introducción de un elemento horizontal en cada viga correspondiente a cada forjado, permite la absorción de la fuerza de componente ortogonal a la dirección diagonal, preservando así la condición de fuerza axial predominante.

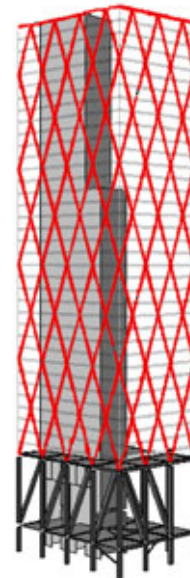
El sistema estructural del edificio

La torre Hearst fue, como ya se ha comentado anteriormente, diseñada por Foster + Partners y dirigida por WSP Cantor Sinuk.

La estructura del nuevo edificio se asienta encima de una histórica fachada de piedra creando un contraste notable en el estilo, una yuxtaposición que llevó mucho diseño y decisiones estructurales.



Estructura tradicional
(10.756 T)



Diagrid completo – más eficiente
(8.453 T)

Figura 51: Alzado este. Fuente: Foster, N. *Obra completa* – WORKS 6

Es quizás la más normalizada de las primeras estructuras *diagrid*, dada la forma rectangular de la torre, modificada ligeramente en las esquinas con una particular forma conocida como “*bocas de pájaro*”, las cuales sirven para acentuar la expresión de la estructura en el edificio.



Figura 52: “Bocas de pájaro”. Fuente: Rahimian, A., Eilon, Y. (2008) “Hearst Headquarters: Innovation and Heritage in Harmony.” CTBUG 8th World Congress.

La elección y el detalle de la fachada fueron el resultado de problemas de diseño muy específicos. Se enfrentaron a la necesidad de mantener al menos la fachada del monumento histórico Hearst Headquarters, al tiempo que aumentaban sustancialmente el área de la construcción.

Colaborando en esta ocasión con los ingenieros estructurales de WSP Cantor Seinuk, se decidió utilizar una estructura triangulada o *diagrid* del piso 10 al 44, la cual se apoyaría en la planta baja del edificio histórico existente.

Esto permitió una separación de ambos, el trabajo y la estructura requerida para el nuevo edificio a partir del trabajo de restauración del edificio preexistente. El interior fue demolido y la fachada de piedra se mantuvo y se reforzó según la normativa sísmica de Nueva York.

Otros factores que contribuyeron a la elección de este sistema estructural fueron el acceso a la luz natural, sobretodo en las plantas inferiores y conseguir plantas libres y diáfanos para oficinas.

Este tipo estructural puede proporcionar una estabilidad suficiente en el perímetro sin necesidad de pilares adicionales entre la fachada y el núcleo de comunicaciones.

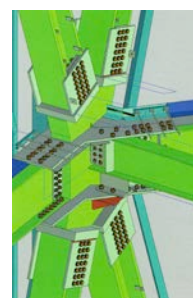
Como la parcela daba a la calle por tres de sus cuatro fachadas, se decidió situar el núcleo hacia la parte trasera del edificio, para poder utilizar la planta con la mayor eficiencia posible en cuanto a luz y vistas. Cuando el núcleo no está centrado en la planta, pierde gran parte de su capacidad para ser uno de los elementos principales que aporte estabilidad al edificio.

El equipo estudió, desde diferentes puntos de vista, la estructura perimetral antes de decidir la solución del *diagrid*. Fue elegido específicamente por su capacidad para transmitir las cargas gravitatorias y las laterales sin necesidad de utilizar el núcleo principal para resistir los esfuerzos laterales.

Finalmente, el núcleo fue diseñado en una estructura de acero como un marco arriostrado para transmitir las cargas laterales que recibe el edificio.

El diseño de los núcleos de edificios varía geográficamente en términos de preferencias de materiales. La ciudad de Nueva York tiene una larga historia en el uso casi exclusivamente del acero para la construcción del núcleo, que se remonta a la época de los edificios “The Singer” (1908), “Woolworth”(1913) y “Empire State Building” (1930).

Figura 53: Este modelo de un nudo ilustra la complejidad de las conexiones atornilladas. Las placas que proporcionan la transmisión de carga entre los elementos del *diagrid* a través del nudo están precisamente para asegurar una correcta y plena trayectoria de carga. Las placas se utilizan para permitir que los pernos que hay a los lados de los elementos del *diagrid*, mantienen la unión apretada para adaptarse a las líneas arquitectónicas del revestimiento de acero inoxidable. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*



Muy recientemente, como una reacción a las consecuencias del 11-S, se ha empezado a utilizar el hormigón para proporcionar una protección adicional a la base de estructura de acero. Este sistema compuesto ha sido utilizado para reforzar el núcleo arriostrado de las 10 plantas más bajas de la torre Hearst en respuesta a los grandes espacios abiertos y las importantes transmisiones de carga entre los grandes pilares y los grandes tirantes y el edificio superior y su núcleo de más de 12 metros creado por el gran lucernario en forma de herradura que se envuelve alrededor de tres lados de la base de la parte del *diagrid* de la torre.

Los ingenieros eligieron este sistema estructural por su redundancia estructural y su capacidad inherente de *diagrid* para proporcionar múltiples trayectorias de carga. También fue citado por Ahmad Rahimian de WSP Cantor Seinuk como la utilización de un 20% menos de acero que una estructura convencional.

En busca de la certificación LEED, el acero tiene un contenido del 90% reciclado. Se tomó la decisión desde el principio de no mostrar la estructura *diagrid* por protección contra incendios y por estética. En lugar de ello, el arquitecto pretende expresar la estructura en fachada desde el interior y el exterior a través de la utilización de un sistema de revestimiento de acero inoxidable. Esto significaba que los nudos y las conexiones de los elementos del *diagrid* en los nudos, necesitaban estar muy centrados en cuanto a los tamaños de perfiles. La intención era que la conexión entre los nudos y las diagonales no fuese mayor que las dimensiones exteriores de los elementos diagonales, con el fin de evitar que la estructura adquiriese una percepción excesivamente voluminosa. En el diseño detallado final de la estructura, fue concebida como un sistema oculto.

Se utilizan secciones de acero laminado de ala ancha (secciones universales) para los elementos del *diagrid*. Sus extremos se terminaron con placas grandes para transmitir las cargas a placas similares en los extremos de los nudos. Estos fueron mecanizados con tolerancias muy ajustadas para asegurar una buena transmisión de carga.

Los nudos se fabricaron a partir de secciones de placas soldadas en forma de X para satisfacer el ángulo del *diagrid* mientras que también proporciona unión para las vigas de los anillos horizontales que actúan en tensión para arriostrar la torre de fuerzas que empujan hacia el exterior, y proporcionando la unión de las vigas exteriores del forjado en la parte posterior del nudo a través de una pestaña de cizallamiento.

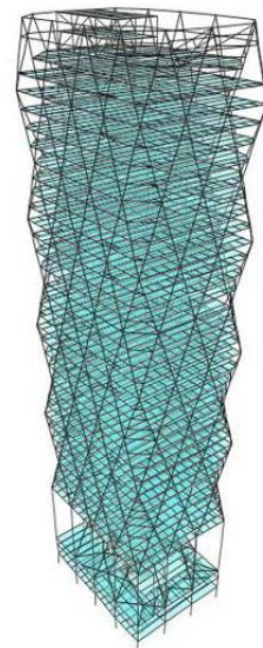


Figura 54: La imagen global de la estructura de acero muestra la excentricidad del núcleo, así como el uso de los grandes pilares y elementos diagonales para los pisos inferiores de la torre. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*

Que la estructura del *diagrid* quede oculta permite el montaje de los pernos en los nudos durante la construcción sin que se aprecien al exterior, también significa que la elección y el tratamiento del acero no necesita ser acero estructural arquitectónicamente expuesto (*AESS – Architecturally Exposed Structural Steel*), esto permitió que la construcción fuese realmente rápida.

Para este proyecto, el constructor señaló que se debía de utilizar una combinación de agujeros estándar y de gran tamaño, para permitir algún tipo de ajuste a la hora de ser construido y el proyecto se llevó a cabo sin muchos problemas de alineación o ajuste.

Las dimensiones exteriores del edificio existente son (60,96 x 60,96)m y las dimensiones de la nueva torre son (35,56 x 48,77)m. Los nudos se colocaron a 12,12m en el centro para adaptarse a las dimensiones del edificio.

Trabajar con esta geometría en la fachada significaba que los nudos siguen un patrón de desplazamiento cada cuatro plantas. Los elementos diagonales abarcan distancias de cada cuatro plantas, encontrándose en cada nudo junto con las vigas de los forjados intermedios, las cuales se unen para proporcionar arriostramiento y reducir su longitud portante.

El módulo general del *diagrid* es entonces de ocho plantas, que hasta hoy figura como una de las estructuras *diagrid* de mayor módulo.

Hay tres tipos básicos de nudos que forman la sección media de la torre. Los nudos en la parte superior e inferior son únicos en sus configuraciones a medida que comienzan y terminan la estructura.

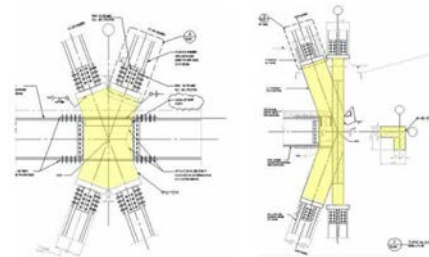


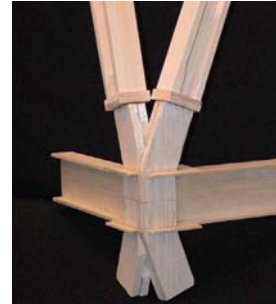
Figura 55: Detalles tipo de nudo interior y de esquina. Fuente: Rahimian, A., Eilon, Y. (2008) "Hearst Headquarters: Innovation and Heritage in Harmony." CTBUG 8th World Congress.

Los nudos interiores transmiten cargas en un espacio bidimensional, mientras que los de esquina lo hacen en un espacio tridimensional y por lo tanto son más complejos. Como las dimensiones de los nudos podrían tener un efecto significativo sobre la viabilidad del concepto global respecto del revestimiento, la estética y en última instancia, sobre el sistema estructural, se decidió que los nudos debían ser diseñados desde el principio durante la fase de diseño conceptual o ideación, en lugar de diseñarse en la fase de diseño de detalle, como suele ser habitualmente.

El tipo de nudo primario que más a menudo se replica está posicionado en el plano de la pared, los nudos de las esquinas de forjados rectangulares completos fueron diseñados para acomodar la condición de esquina específica, ya que los elementos entrantes y su transmisión de carga crean una situación que es significativamente diferente de la condición de la pared.

A pesar de disponer de software informático bastante avanzado, se utilizaron modelos hechos a mano para estudios alternativos de los nudos de esquina.

Figura 56: Modelo de madera de uno de los nudos de esquina, hecho en el proceso de diseño del edificio. Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*.



Las esquinas del edificio se han achaflanado para crear “bocas de pájaro” con el fin de evitar grandes voladizos entre los nudos de esquina. Los nudos en la condición de esquina también se han mejorado de acuerdo con la geometría de los miembros entrantes.

A pesar de estas razones funcionales para la creación de este detalle, también fue reconocido por el equipo para proporcionar una característica arquitectónica distinta, acentuando la forma de *diagrid* de la estructura. Debido a las esquinas con forma de “bocas de pájaro” se hace muy evidente la ausencia de pilares en esquina. El desarrollo de la estructura, la conexión y detalles era muy dependiente de la -utilización de modelado digital. Los requisitos de diseño están ajustados para la instalación de un muro cortina exterior del *diagrid* requerían mucha exploración de los detalles, ya que nunca se había desarrollado antes.

El equipo del proyecto volvió a modelos de madera física para explorar la geometría de los nudos, que fue divulgado para haber sido un proceso muy exitoso y gratificante.

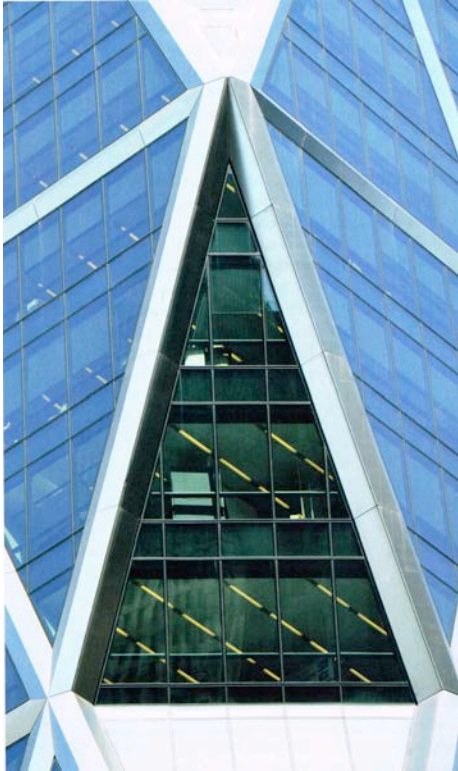


Figura 57: Imagen de una “boca de pájaro” en la esquina de la torre, que muestra el uso del revestimiento de acero inoxidable para resaltar la estructura de *diagrid*. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*.



Figura 58: Montaje, instalación de protección contra incendios y el revestimiento en curso de construcción. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*

La construcción es una preocupación fundamental de cualquier proyecto de acero y particularmente para un sitio urbano apretada con poco en el camino de la zona de concentración. Ciudad de Nueva York, Manhattan, en particular, también tiene problemas con el transporte de secciones de acero pesadas a través de los puentes de la isla.

Esto puede aumentar considerablemente los costes del proyecto si el transporte requiere muchos permisos especiales. Si las secciones son muy grandes sólo pueden venir a través de algunos puentes durante la noche, ya que no impiden el flujo normal de tráfico.

Hay restricciones de peso y tamaño en todos los puentes que impactan la logística en el diseño de estructuras de acero. En este caso, rompiendo el *diagrid* en pequeños nudos prefabricados y diagonales que podrán ser atornillados juntos de manera muy regular sistematizando el proceso, lo cual fue uno de los beneficios de la forma en que el *diagrid* trabajó para este proyecto en particular.

El alto grado de repetición en términos de secuencias y detalles de ejecución, así como el alto nivel de colaboración entre el arquitecto, ingeniero, constructor y detallista del acero, hicieron uso de la estructura de *diagrid* en la torre Hearst con gran éxito.

Figura 59: Los trabajadores reciben un nudo durante la construcción, los nudos son básicamente simétricos así como repetitivos, así se asegura un ajuste en el descenso de la pieza en el ángulo correcto para permitir que sea atornillado correctamente con poco esfuerzo y se puedan ajustar y alinear los diferentes elementos. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*



El tratamiento y revestimiento de fachada de la torre Hearst es notablemente diferente de la experiencia previa de Foster con Swiss Re, la cual utiliza un sistema de acristalamiento triangulado, adecuados a su forma curva, y mantiene la expresión de los elementos estructurales mínimos en el revestimiento del *diagrid*.

El carácter rectilíneo de la torre Hearst no parecía el más idóneo para el uso de acristalamiento triangular para adaptarse a la geometría. La gran escala del módulo del *diagrid* permite el uso de un muro cortina estándar de aspecto, manteniendo los fragmentos triangulares o trapezoidales a un mínimo donde el muro cortina se encuentra con la estructura. Los elementos trapezoidales también se repiten de forma regular a lo largo de la fachada, lo que permite la fabricación más eficaz.

La torre Hearst utiliza un módulo de cuatro plantas. El ángulo de las diagonales con respecto a la horizontal es de $69,7^\circ$. Esto crea una verticalidad visual al *diagrid* que acentúa la altura del edificio. La fachada exterior, se extiende por encima del nivel de cubiertas para ocultar las máquinas de instalaciones.



Figura 60: Diagonales vistas en fachada. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*.

Esta parte del modelo fue producida por el detallista de acero Cives Steel and Mountain Enterprises, muestra la disposición general del *diagrid*, así como las vigas de borde que arriostran las diagonales en sus conexiones con los nudos.

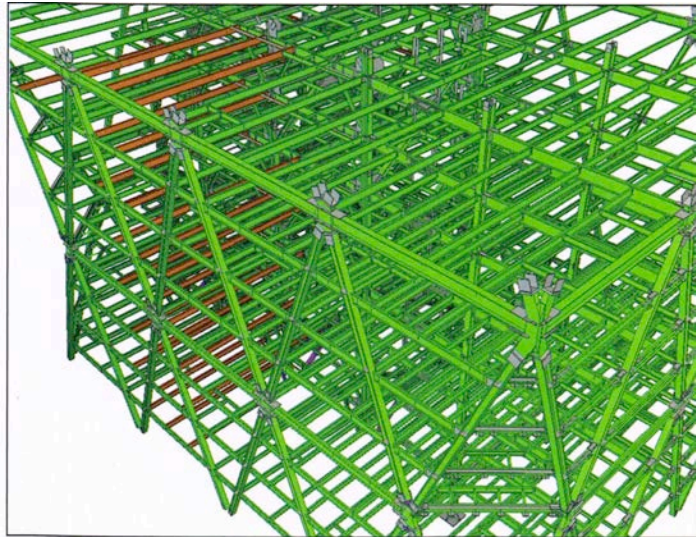


Figura 61: Detalle. Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*

Una serie de grandes pilares soportan la estructura exterior de *diagrid* en el décimo piso, continuando hasta los cimientos. El sistema lateral por debajo de este nivel, es proporcionado por un núcleo robusto compuesto de marcos de acero arriostrados con muros de hormigón armado. Dos conjuntos de grandes diagonales mejoran aun más la rigidez de las paredes laterales del núcleo.

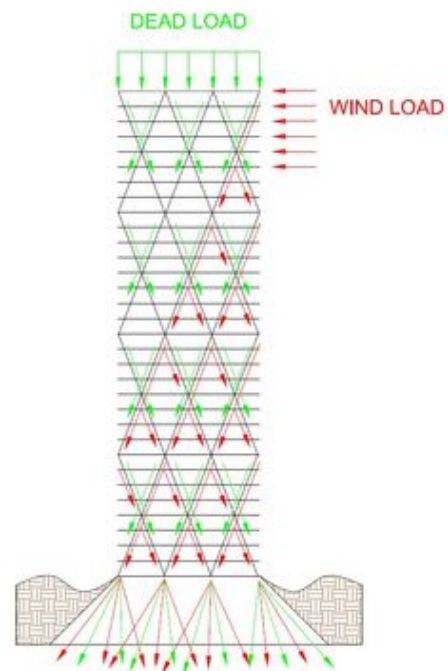


Figura 62: Esquema de la estructura frente a las diferentes acciones. Fuente: internet

Los grandes pilares están hechos principalmente de secciones de acero en forma de H, rellenos a su vez con hormigón, con el fin de crear el espacio interior abierto para el vestíbulo, dos de los pilares interiores de la torre también transmiten carga a los grandes pilares laterales a través de grandes diagonales por debajo del piso 10. La componente horizontal de la carga en las diagonales que se cruzan con los pilares, se resiste a través de vigas y cerchas situadas alrededor de la abertura del vestíbulo interconectando todos los puntos de empuje en el plano del anillo.

El módulo del *diagrid* es de 12,12 metros de ancho y 16,54 metros de altura, abarcando, como ya se ha comentado anteriormente, 4 plantas. La sección transversal de las diagonales son como forma de H, con la máxima sección de W14x370, en la base del *diagrid* en la planta 10, mientras que los grandes pilares entre el décimo nivel y el suelo se realiza con pilares de sección 1100x1100x10 mm rellenos de hormigón.

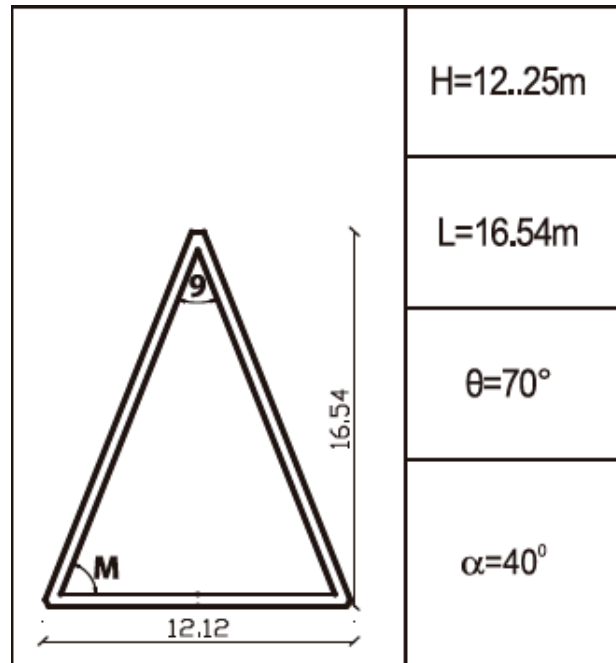


Figura 63: Subdivisión módulo del *diagrid*. Fuente: International Journal of SEWC. Structural Engineers Work Congress.

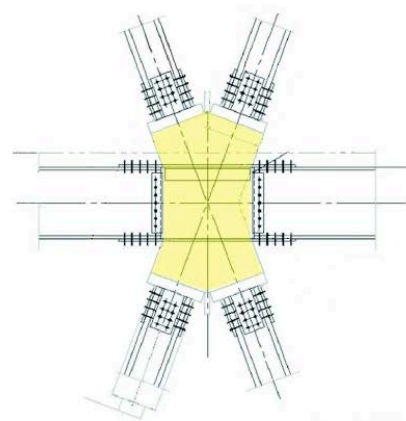
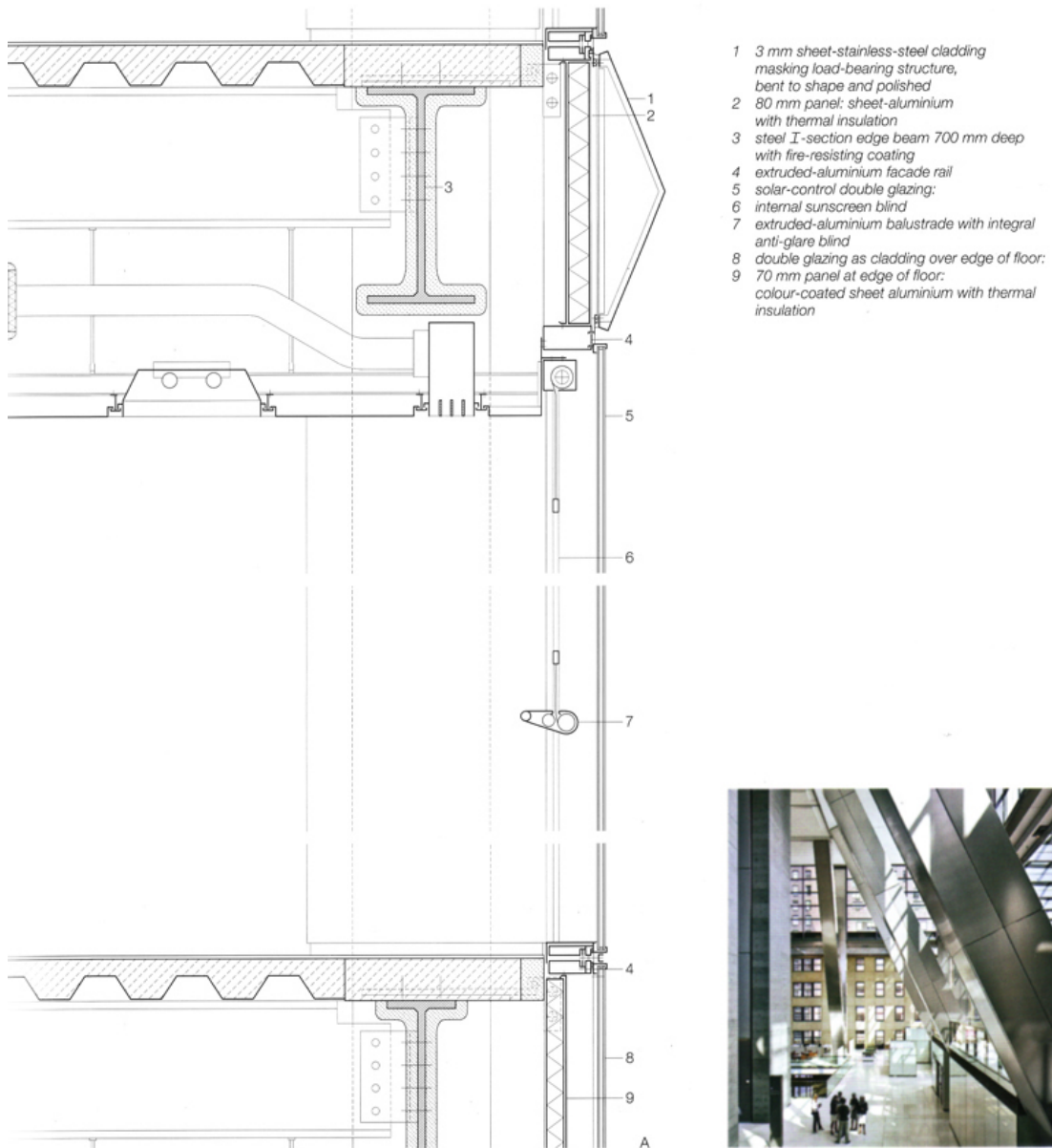


Figura 64: Imagen y esquema de uno de los nudos de la estructura. Fuente: McCain, Ian. *Diagrid: Structural Efficiency & Increasing Popularity*

Forjados utilizados



Se emplean forjados de chapa grecada colaborante, que trabajan unidireccionalmente, transmitiendo las cargas que reciben a las correas y éstas a su vez a las vigas, las cuales las reparten o bien al *diagrid* o al núcleo excéntrico de acero reforzado con muros de hormigón.

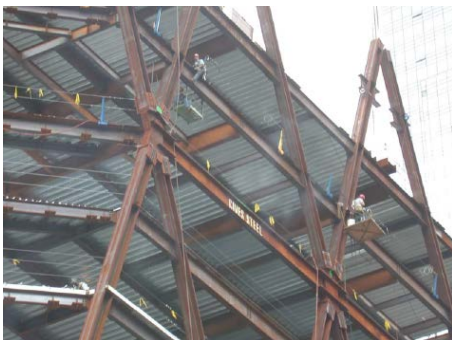
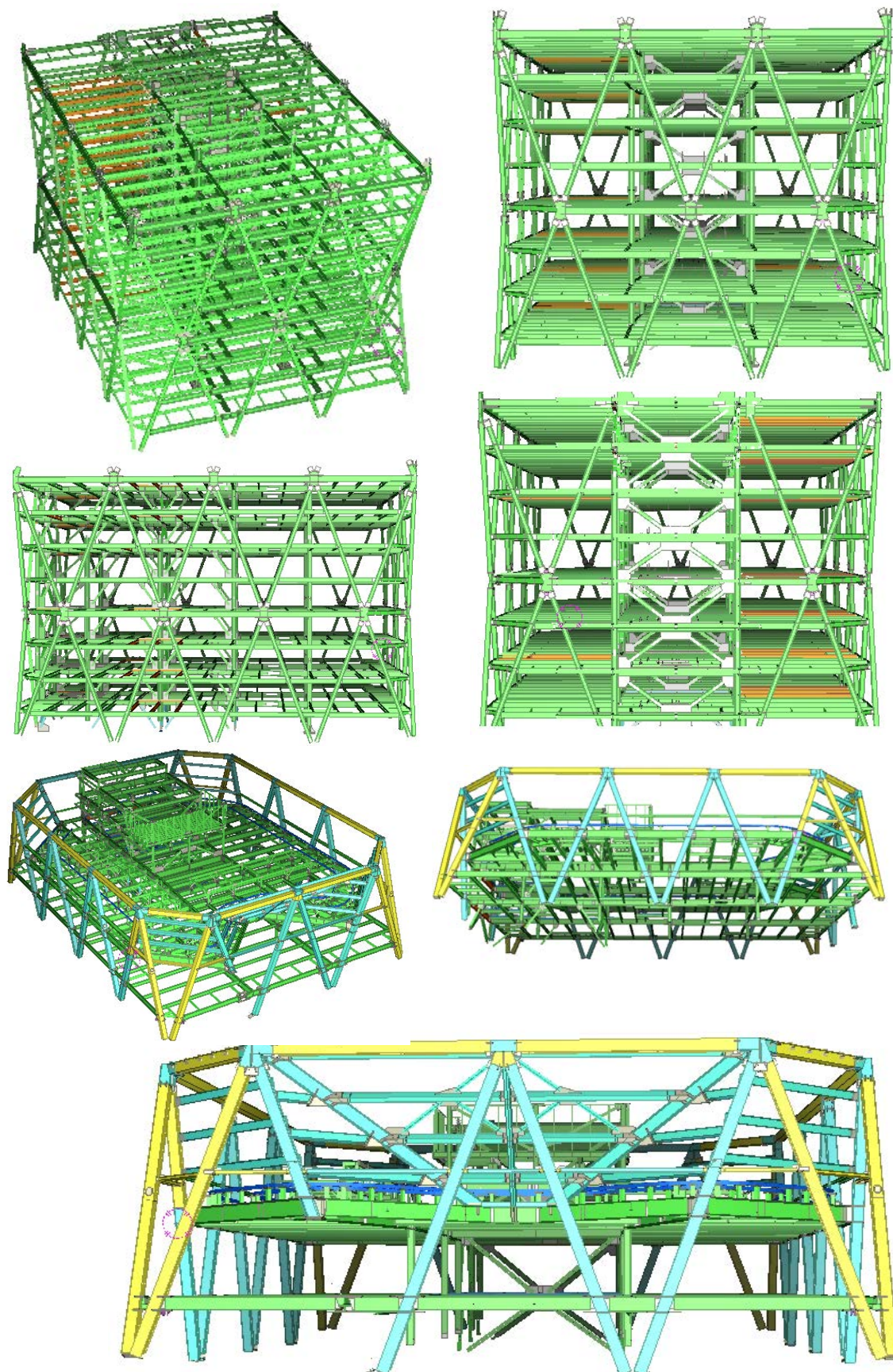


Figura 65: Imágenes donde se aprecia la modulación del forjado, cantidad de correas y geometrías generadas. Fuente: internet. Mountain Enterprises Web.

Figura 66: Diferentes vistas del modelo realizado por Cives Steel and Mountain Enterprises en Tekla, el cual me ha servido para realizar un modelo de cálculo lo más aproximado posible a la realidad. Fuente: internet - Mountain Enterprises Tekla Web Viewer.



2.4 Descripción del modelo de cálculo

Primero de todo, se deben conocer, con toda la información detallada anteriormente, diferentes aspectos sobre el edificio que se pretende analizar.

En el modelo que se desea analizar con SAP2000, se deben representar los elementos como pilares, vigas o correas como líneas en el dibujo de AutoCAD, las cuales se importan a SAP2000 como *frames*.

Ocurre lo mismo con los elementos de forjados y muros, los cuales se realizan con 3dcaras y se importan a SAP2000 como *shells*.

Para la realización del modelo de cálculo del edificio se realiza una simplificación de acuerdo a las siguientes facetas:

Figura 67: Modelo de la estructura. Fuente: Elaboración propia

2.4.1 Geometría

En cuanto a la geometría del edificio, se han realizado una serie de simplificaciones para la realización del modelo:

Las dimensiones reales de la nueva torre son (35,56 x 48,77)m, pero en el modelo de cálculo se ha hecho una aproximación a (36 x 48), con lo que quedan 3 módulos de 12 metros en un sentido y 4 en el otro. Esta acción nos facilitará posteriormente la subdivisión de los forjados y el reparto de los elementos estructurales en una modulación concreta.

Los nudos en la realidad están colocados a 12,12m, sin embargo, en el modelo realizado están a 12 metros.

En cuanto a la inclinación de las diagonales exteriores, que forman un ángulo con respecto a la horizontal de 69,7°, se ha simplificado a 70°.

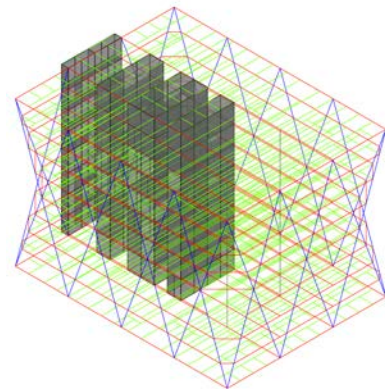
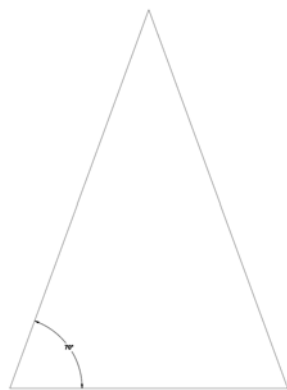


Figura 68: Módulo *diagrid*-estructura. Fuente: Elaboración propia

La distancia entre forjados se ha mantenido en 4,11 metros en la parte superior y de 29,6 metros el espacio de recepción (medidos desde la planta de acceso hasta el comienzo de la torre superior).

En el forjado que genera este gran espacio de recepción, según la información consultada, se deduce que hay una gran estructura de cerchas, pero se desconoce la geometría exacta de la misma, ya que las secciones existentes no tienen el suficiente detalle.

Por tanto, se han realizado las cerchas siguiendo la inclinación de las diagonales que reciben y manteniendo la forma exterior que aparece en las secciones. Para la geometría de la misma, me han servido de apoyo las imágenes de obra comentadas anteriormente.

A pesar de que en la sección aparecen vigas de mayor canto en el perímetro de los forjados intermedios de cada módulo del *diagrid*, en el modelo realizado no se han tenido en cuenta, quedando del lado de la seguridad, se ha realizado como si todas las vigas tuviesen el mismo canto.

También se han homogeneizado los perfiles de sección cuadrada que aparecen en la planta de instalaciones y en la coronación del *diagrid*, quedando todas las vigas con el mismo tipo de sección.

Para la modelización de los forjados de chapa grecada colaborante se ha realizado una equivalencia Losa – Forjado de chapa de la siguiente manera:

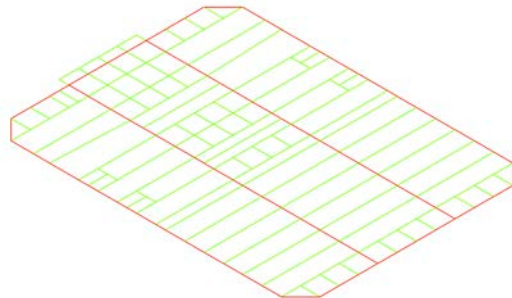


Figura 69: Elementos del modelo, detalle forjado.
Fuente: Elaboración propia.

EQUIVALENCIA CHAPA GRECADA - LOSA (MATERIAL HORMIGON)			
	ALTO GRECA	7,50	cm
	ALTO CAPA COMPRESION	5,50	cm
	INTEREJE GRECA	30,00	cm
	ANCHO MEDIO GRECA	10,00	cm
RETICULAR (7,5+5,5)x30	CENTRO DE GRAVEDAD	8,22	cm
	INERCIA	2946,02	cm ⁴
	INERCIA POR METRO	9820,05	cm ⁴
	AREA	240,00	cm ²
	AREA POR METRO	800,00	cm ²
	MEMBRANE (AREA)	0,0800	m
	BENDING (INERCIA)	0,1056	m

Figura 70: Equivalencia chapa-forjado para modelización en SAP2000. Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Materiales y secciones de los elementos

Para la elección de los perfiles a utilizar en el modelo de cálculo, se empezó contactando con la empresa suministradora (ArcelorMittal) para solicitar información detallada sobre aspectos importantes de la estructura.

La información que se me facilitó es la siguiente:

Utilizaron perfiles tipo HD400x145 a HD400x1299, en EEUU como W14 de entre 145 lbs/ft a 730 lbs/ft.

HISTAR 460 – El acero utilizado: ASTM-A913 Gr.65, el cual es equivalente al S-450, por tanto, se analizará la estructura utilizando esta calidad de acero (véase Anejo 1, fichas constructivas)

Las secciones utilizadas en el modelo para el análisis son las siguientes:

Para las correas de los forjados, se han utilizado perfiles H400x237.

Vigas principales y perimetrales: HEx700x418

Pilares interiores: H400x1299

Cerchas: HEB-300

Pilares de planta baja, tal y como aparece en las imágenes de detalle, se han utilizado secciones de 1100x1100x10,6, aunque como en su interior se ha rellenado con hormigón, se ha realizado la equivalencia del área de la sección de hormigón en acero y se obtienen unos perfiles de 1100x1100x14.

En cuanto a los muros de hormigón, se ha utilizado HA-35.

En los muros inferiores del núcleo, de mayor sección, se han empleado muros de 40 cm de espesor. En plantas superiores, secciones de 30 cm de espesor.

En cuanto a los forjados de chapa grecada colaborante, se ha realizado la equivalencia tal y como se explica en este trabajo, obteniendo una sección equivalente en hormigón de 8 cm de canto.



Figura 71: Secciones tipo Super Jumbo de ArcelorMittal. (anejo 1)

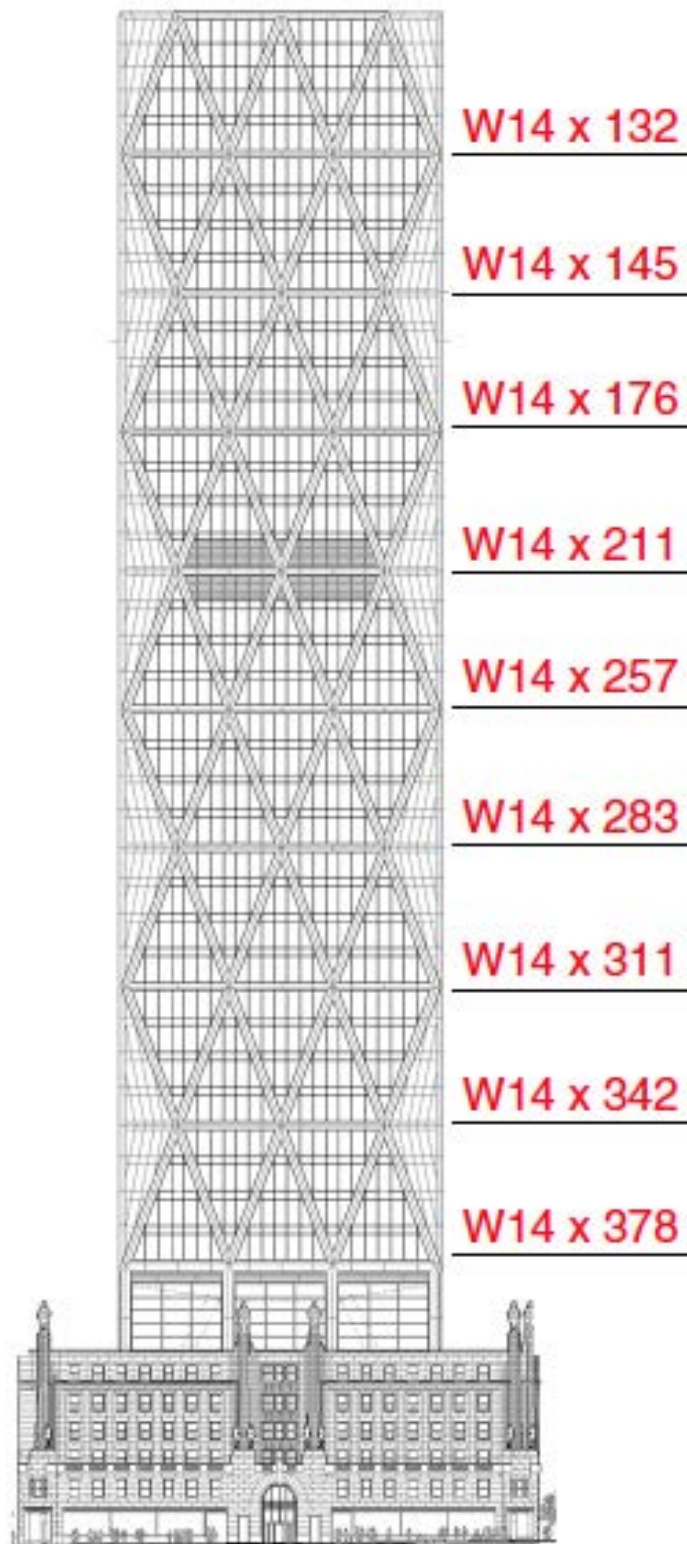


Figura 72: Secciones utilizadas en el modelo de cálculo para los elementos diagonales del *diagrid*
Fuente: Mele, E., Toreno, M. (2014) Diagrid structures for tall buildings: Case studies and design considerations..

2.4.3 Condiciones de enlace de la estructura con el exterior y de los elementos entre sí:

En el modelo realizado, se han tenido en cuenta que los elementos están empotrados en el suelo.

Los elementos entre sí también han sido considerados como empotrados debido a las uniones atornilladas que se generan entre los diferentes elementos y los nudos de la estructura, tal y como hemos visto en imágenes anteriores.



Figura 73: Detalle del nudo. Uniones atornilladas: empotramiento. Fuente: Rahimian, A., Elion, Y. (2006). "New York's Hearst Tower."

2.4.4 Cargas aplicadas, hipótesis y combinaciones:

Para el análisis de la estructura se han tenido en cuenta las siguientes cargas aplicadas:

ESTIMACIÓN DE ACCIONES

El peso propio de la estructura ya lo tiene en cuenta SAP2000 con los materiales y secciones que apliquemos, por tanto, no habrá que tenerlos en cuenta en la estimación de acciones.

Cargas permanentes (CMP)

- Pavimento técnico 0,50 kN/m²
- Falsos techos 0,25 kN/m²
- Instalaciones 0,25 kN/m²
- Tabiquería ligera 0,50 kN/m²

Total: 1,50 kN/m²

Sobrecarga de Uso (SCU)

- Oficinas 3,00 kN/m²
- Zonas de paso 4,00 kN/m²

Sobrecarga de Viento (SCV)

VIENTO EN EDIFICIOS EN ALTURA SEGÚN CTE

Cota del último forjado	z	181,46	[m]
Número de plantas	N	44,00	[]
Presión básica	qb	0,52	[kN/m ²]
Coefficiente de presión	cp	0,80	[]
Coefficiente de succión	cs	0,70	[]

Grado de aspereza del entorno

V

Parámetros del entorno	k	0,240	
Parámetros del entorno	L	1,000	[m]
Parámetros del entorno	Z	10,000	[m]

Cortante/m ² total presiones	Qp	52,25	[kN/m ²]
Momento/m ² total presiones	Mp	5425,79	[kNm/m ²]

Presión de viento equivalente en base	qp0	0,67	[kN/m ²]
Presión de viento equivalente en cabeza	qpz	1,70	[kN/m ²]

Cortante/m ² total succiones	Qs	45,72	[kN/m ²]
Momento/m ² total succiones	Ms	4747,56	[kNm/m ²]

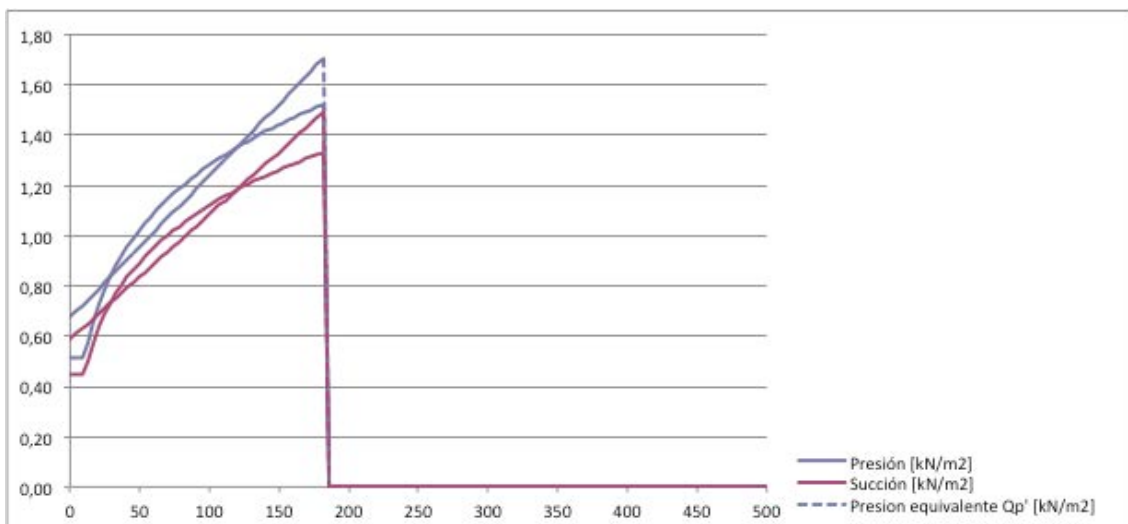
Succión de viento equivalente en base	qs0	0,59	[kN/m ²]
Succión de viento equivalente en cabeza	qsZ	1,49	[kN/m ²]

presion

Dsap 0,67
Csap 0,0056778

succion

Dsap 0,59
Csap 0,0049681



Sobrecarga de Nieve (SCN)

Para tener en cuenta la sobrecarga de nieve en el edificio, he consultado la normativa americana obteniendo un valor de 1 kN/m^2 aprox.

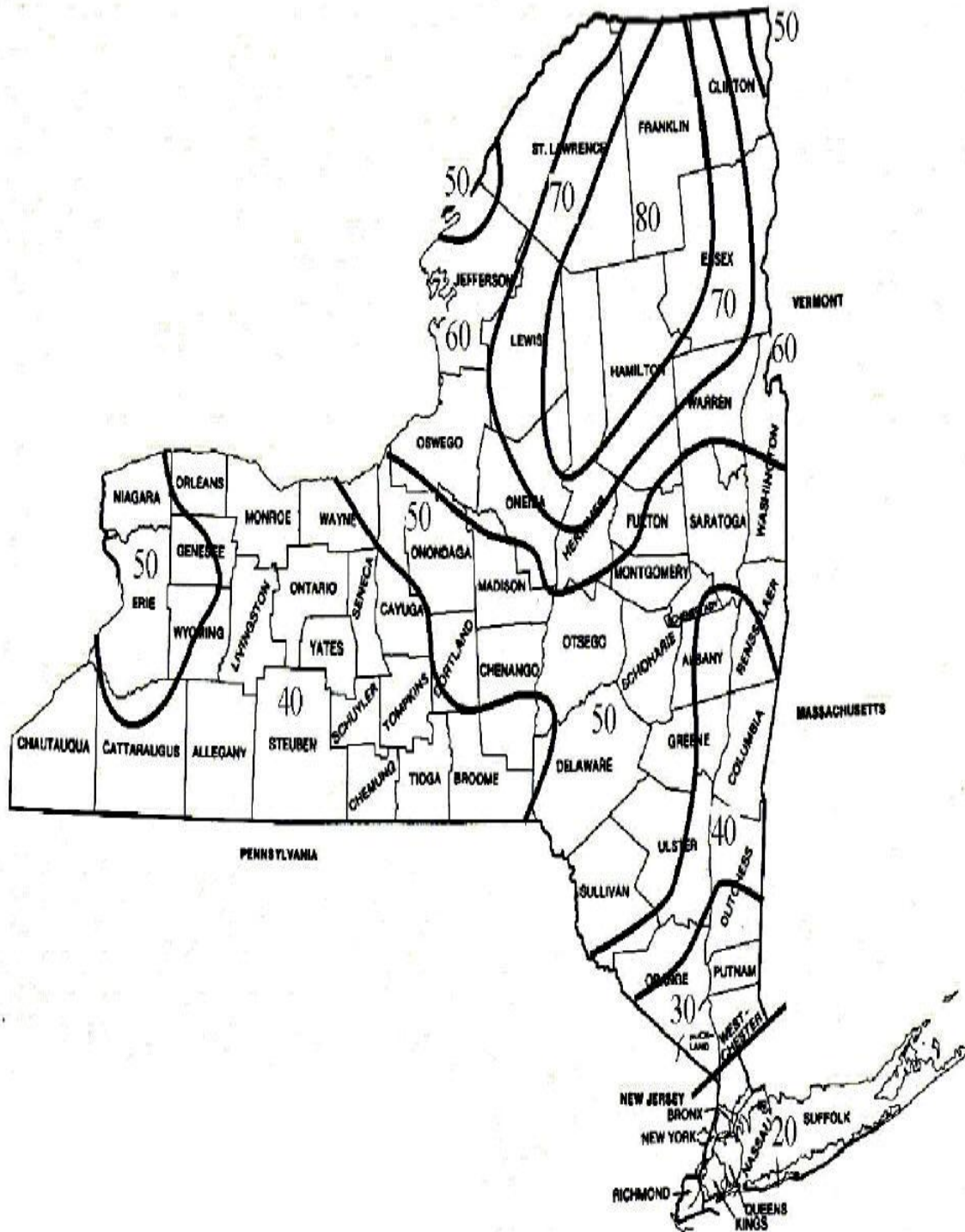
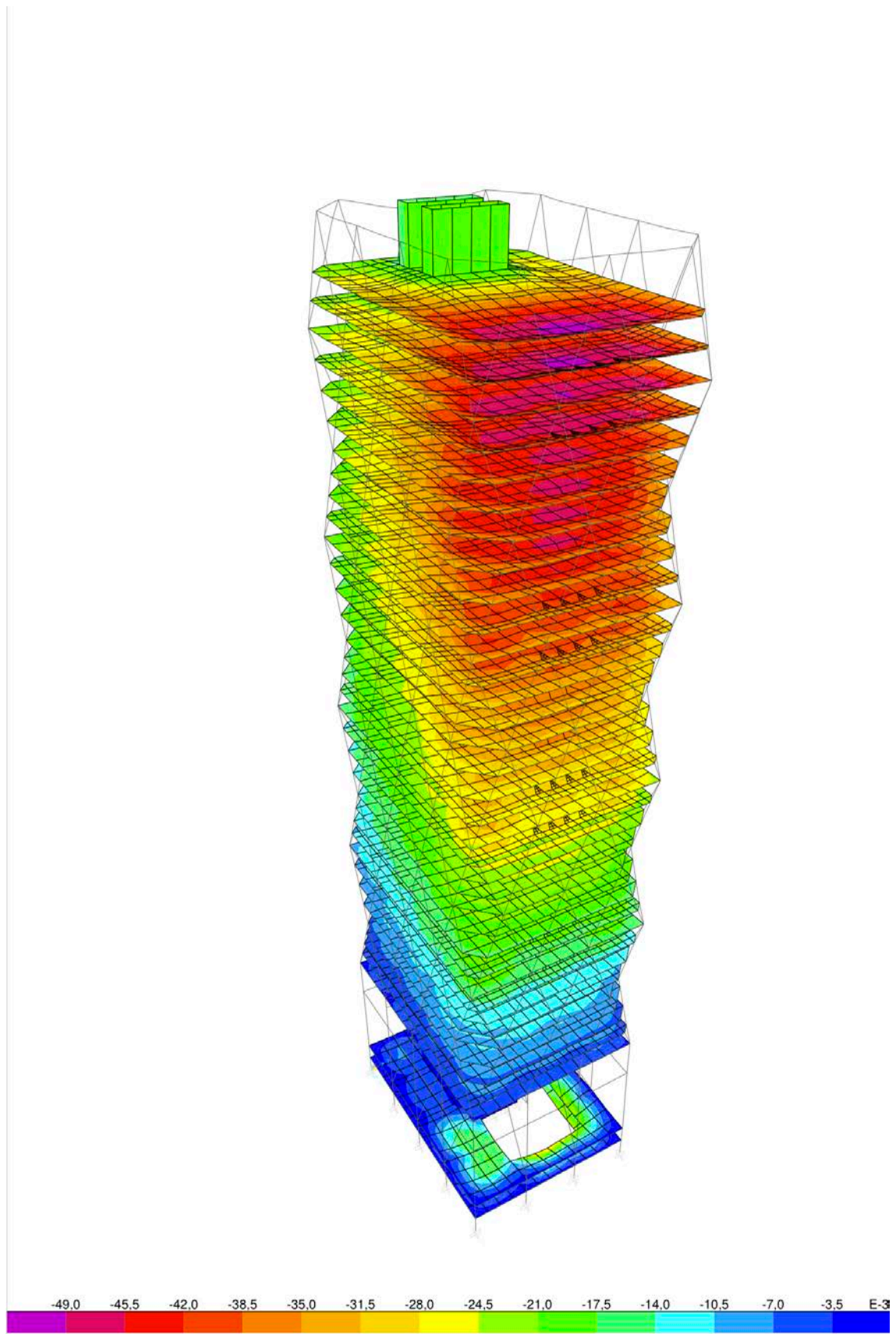


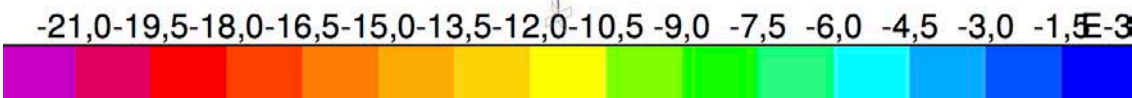
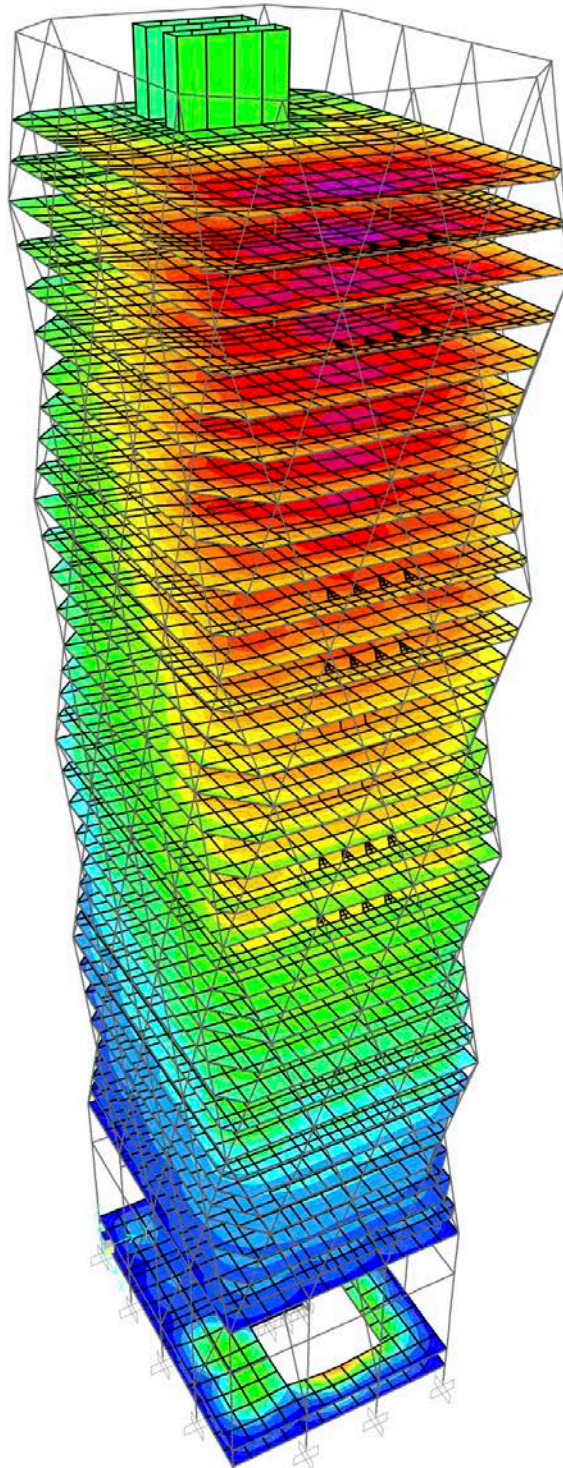
Figura 74: Sobrecarga de nieve para la ciudad de Nueva York (snow overload NYC). Fuente: 2007 Building Code of New York State. Chapter 16 Structural Design. Section 1608 – snow loads

1 pound per square foot = $0,0479 \text{ kN/m}^2$, entonces $20 \text{ psf} = 0,958 \approx 1 \text{ kN/m}^2$.

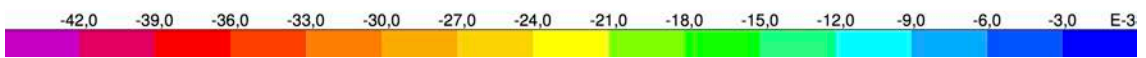
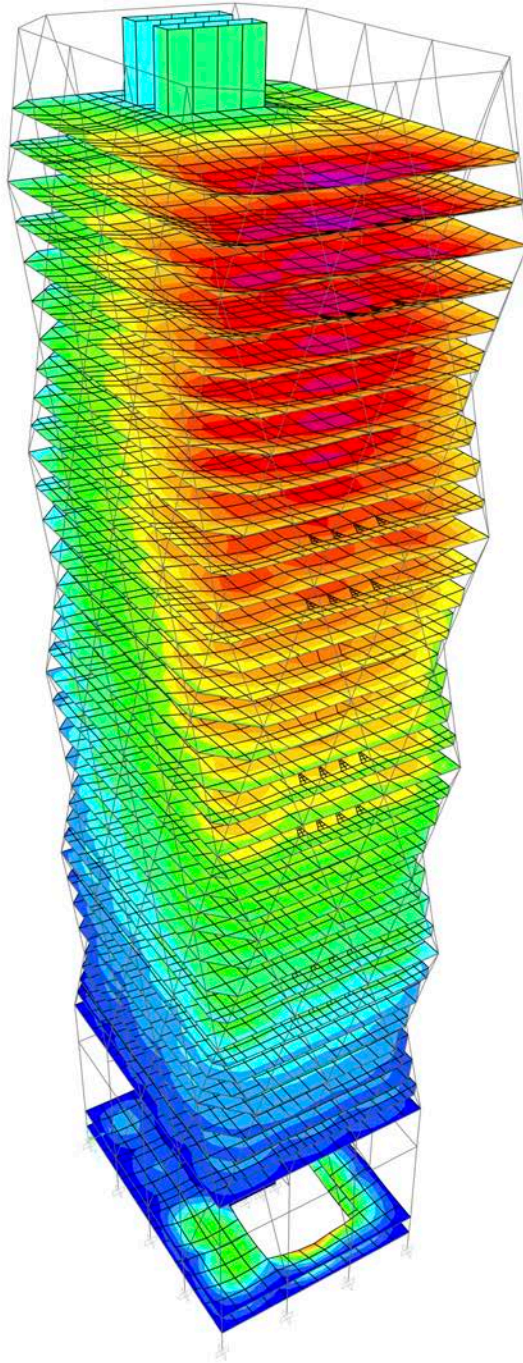
DEFORMADA - HIPÓTESIS BÁSICAS



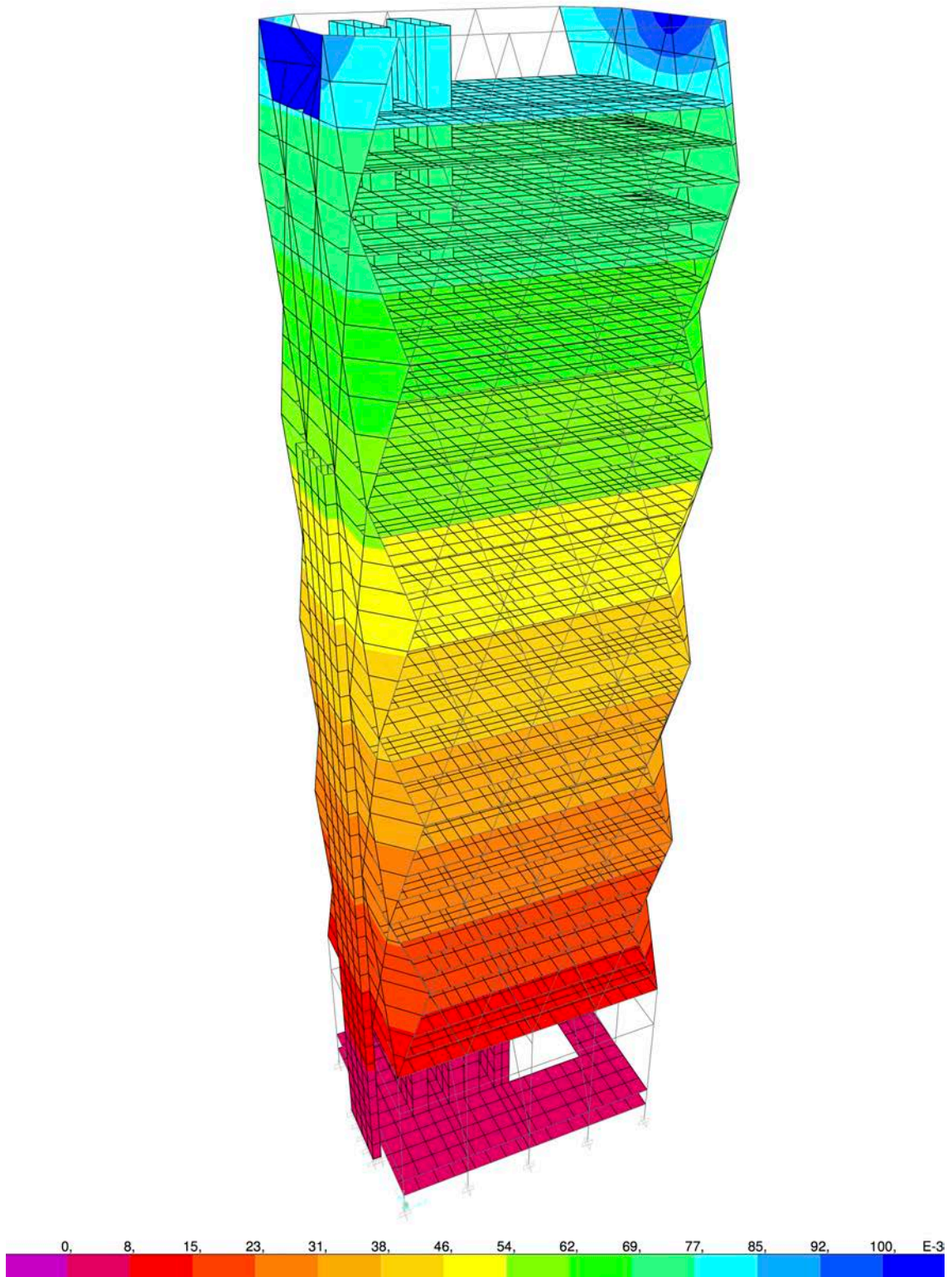
DEAD - Peso Propio



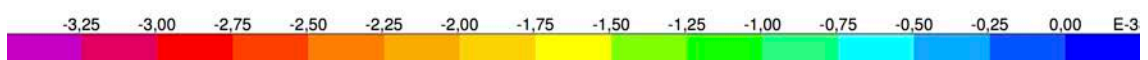
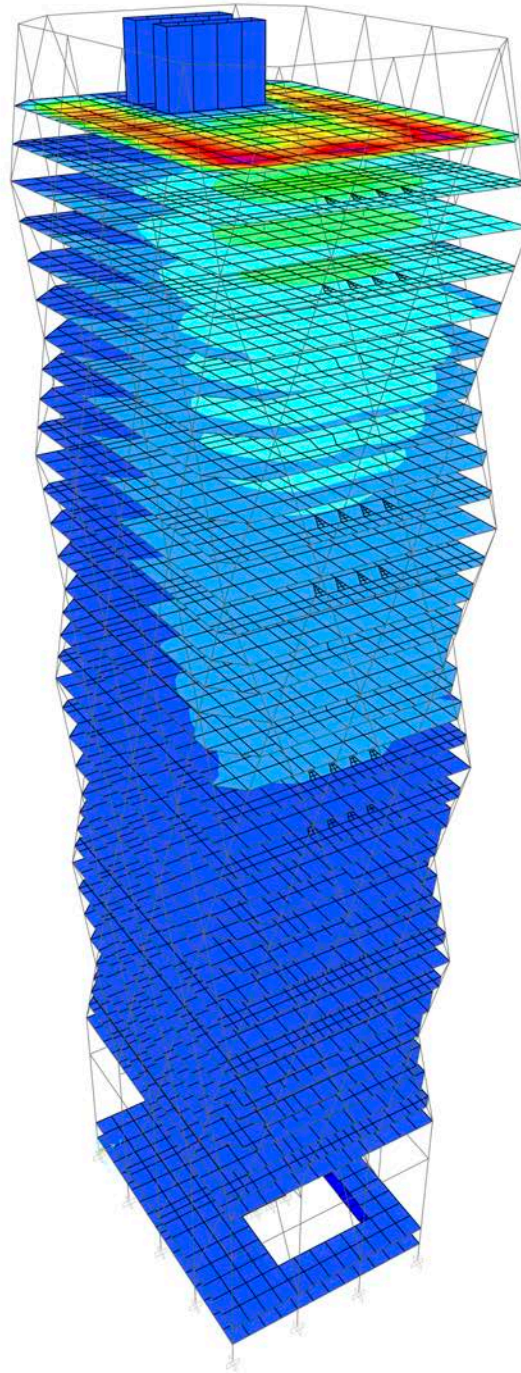
CMP – Cargas Permanentes



SCU – Sobrecarga de Uso

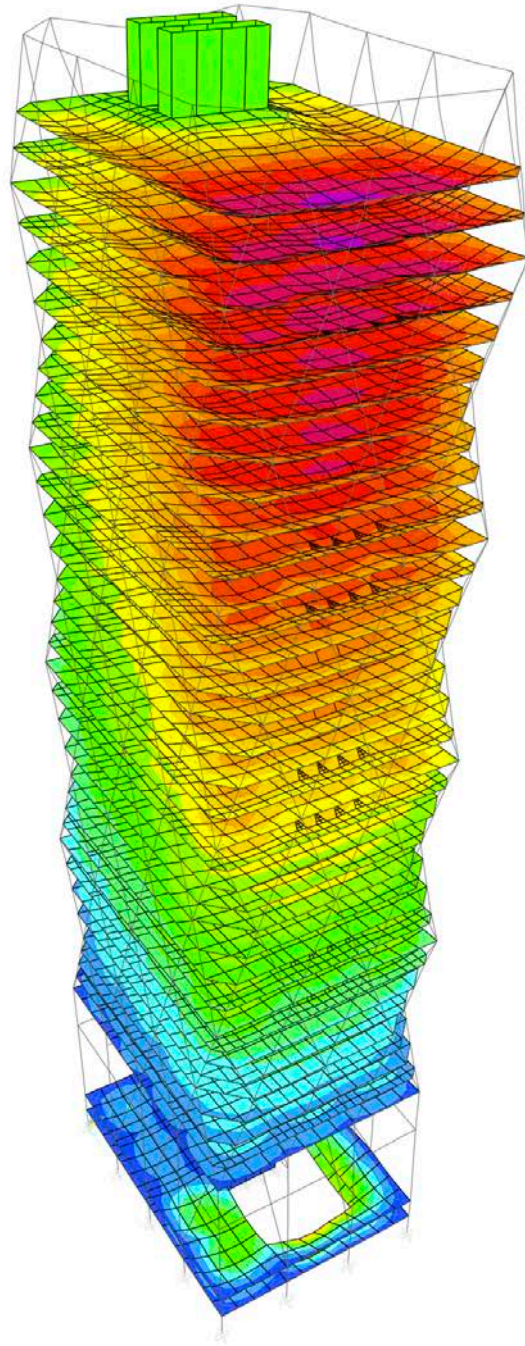


SCV – Sobrecarga de Viento

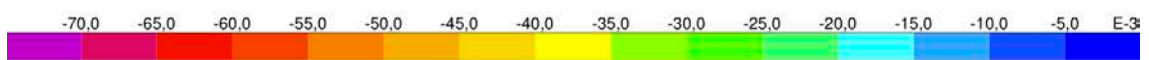
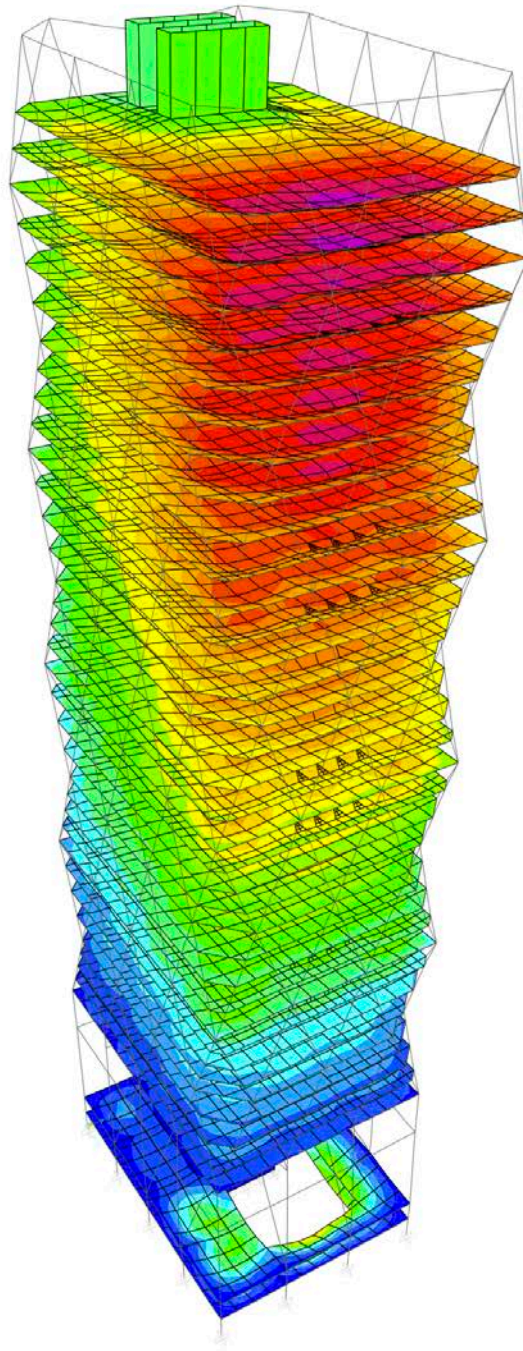


SCN – Sobrecarga de Nieve

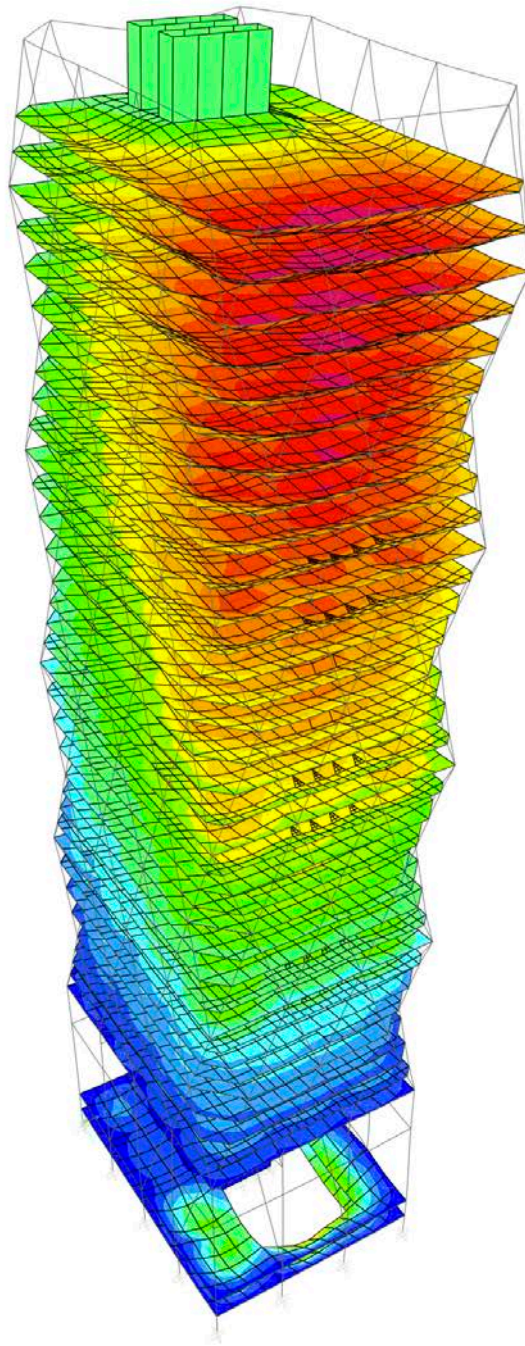
Deformada en diferentes combinaciones de hipótesis



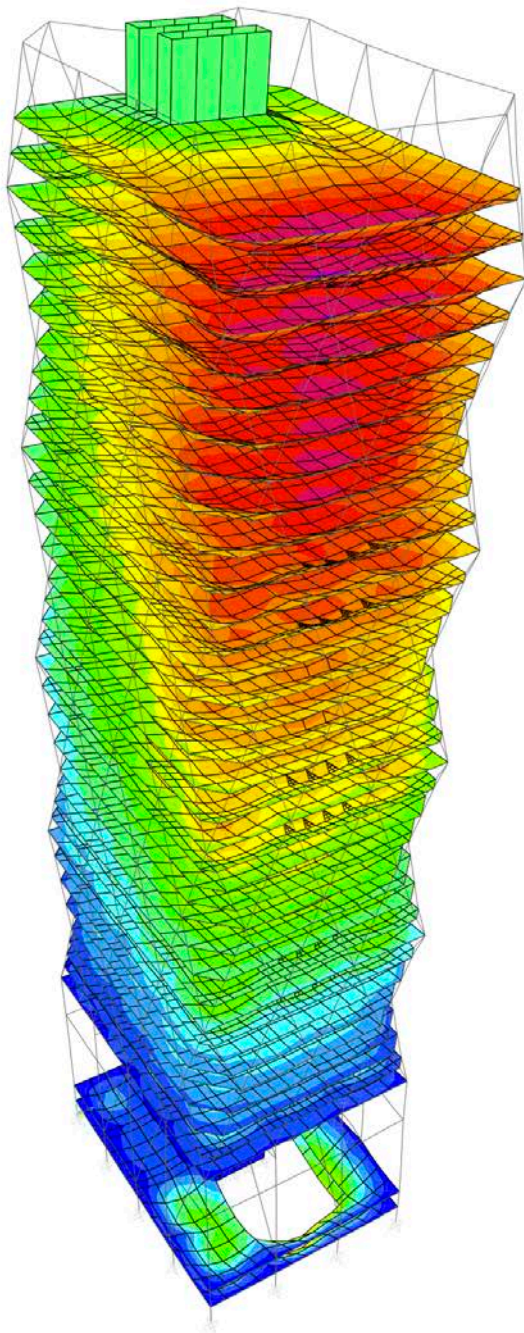
ELSn



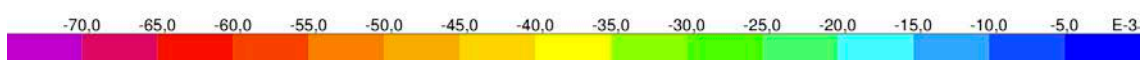
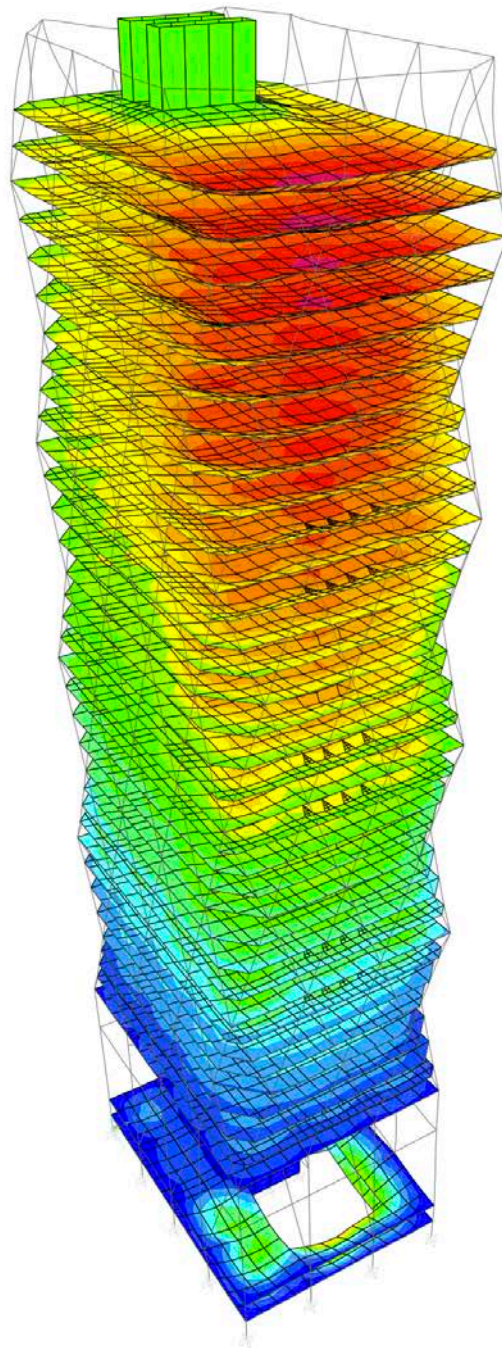
ELSp



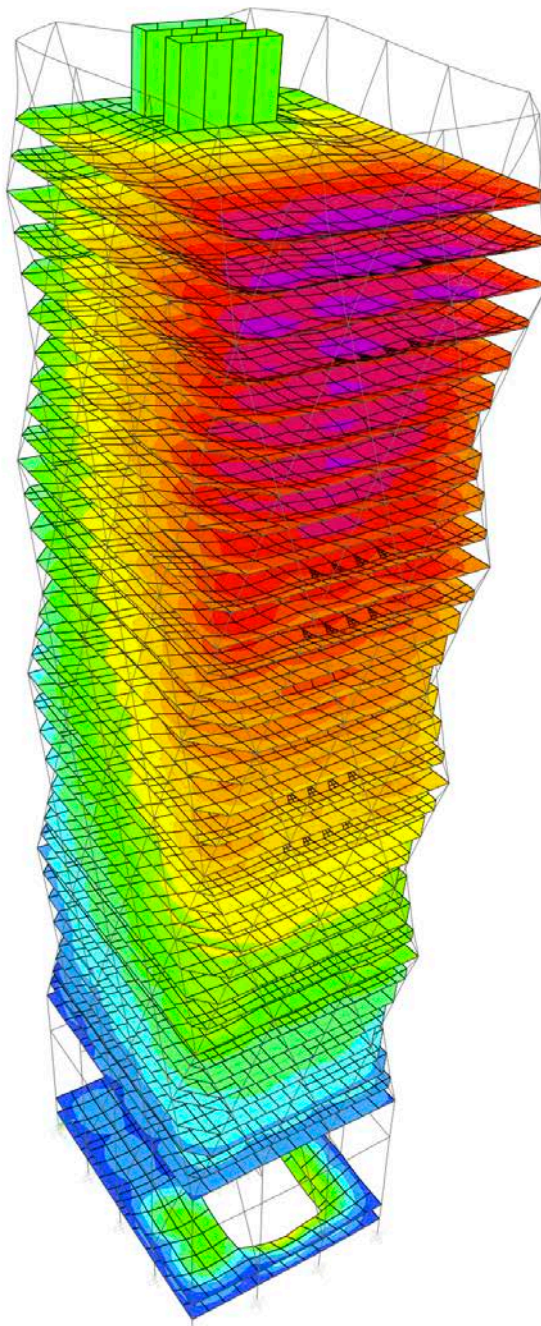
ELSqpu



ELSu



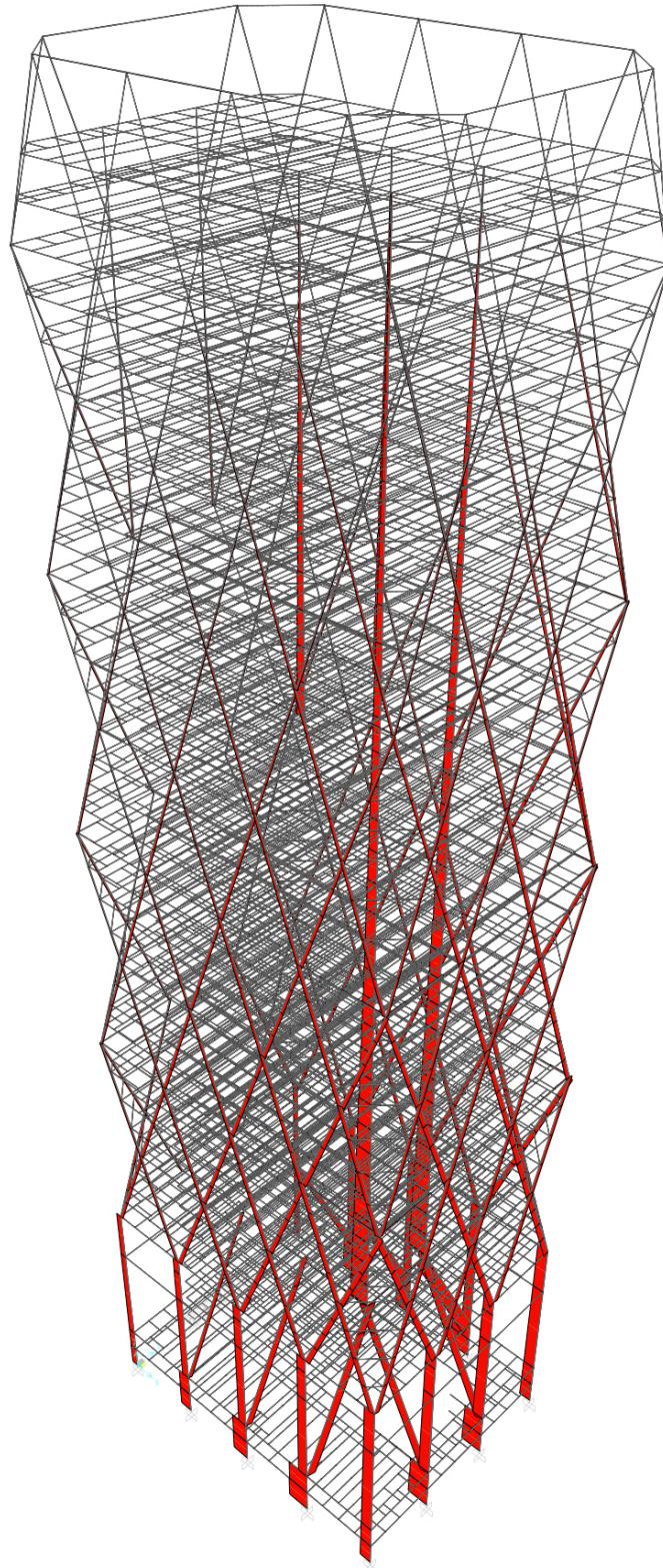
ELSV-



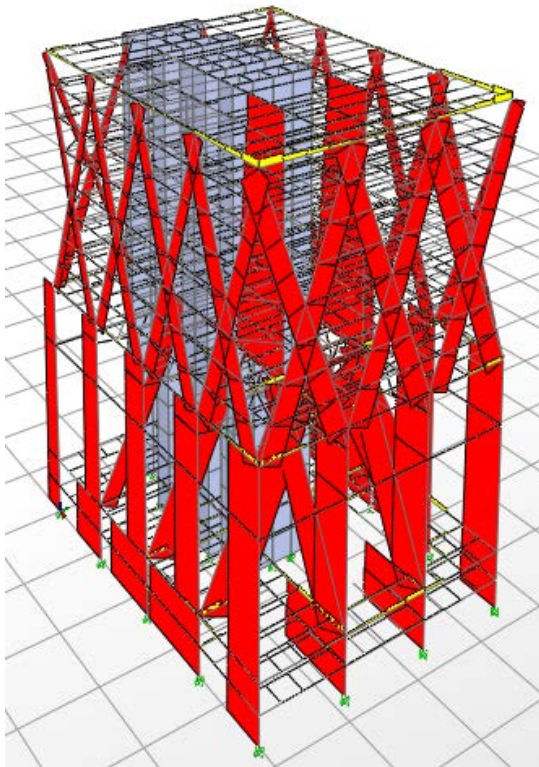
ELSV+

Resultados estáticos de barras (ELUunv+)

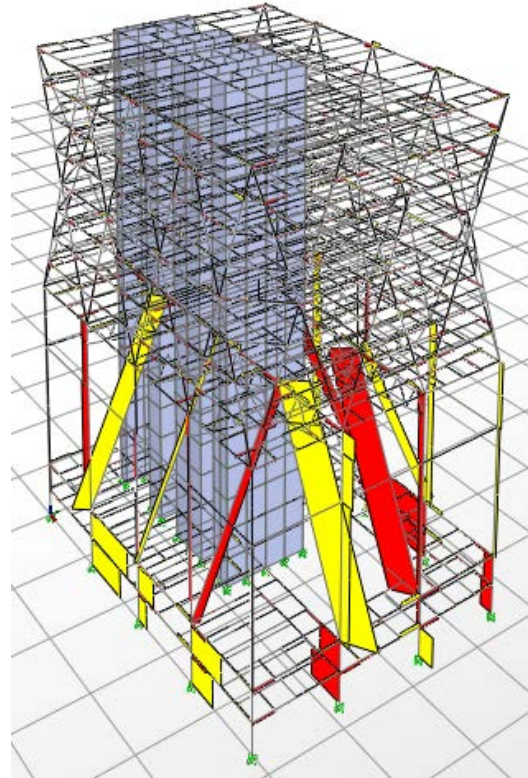
SAP2000 rellena los diagramas con dos colores diferenciando los valores negativos y positivos, de manera que sea más fácil detectar las tracciones (axiles positivos, en amarillo) de las compresiones (axiles negativos, en rojo), o el cortante o la flexión positiva, respecto de la negativa.



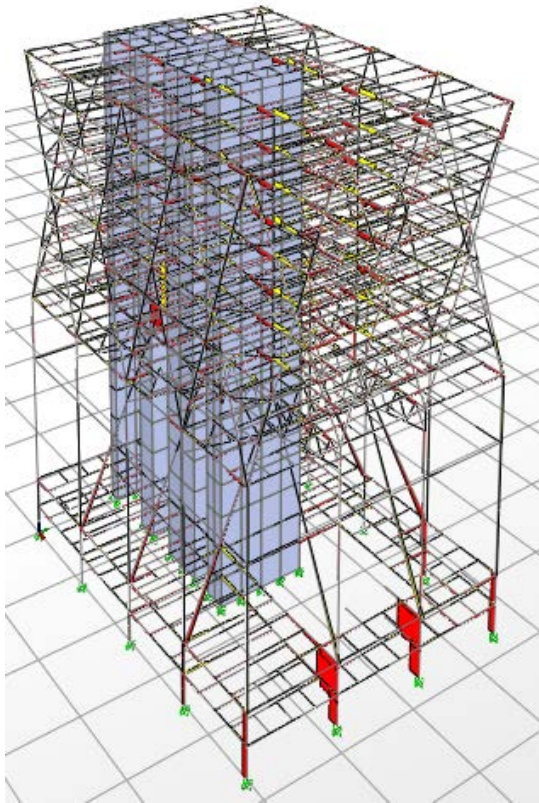
Se detallan los diagramas de un módulo de estructura del *diagrid*, el cual se repite en altura, más concretamente se ha elegido el primer módulo junto con la planta baja, que es donde se generan las mayores solicitaciones.



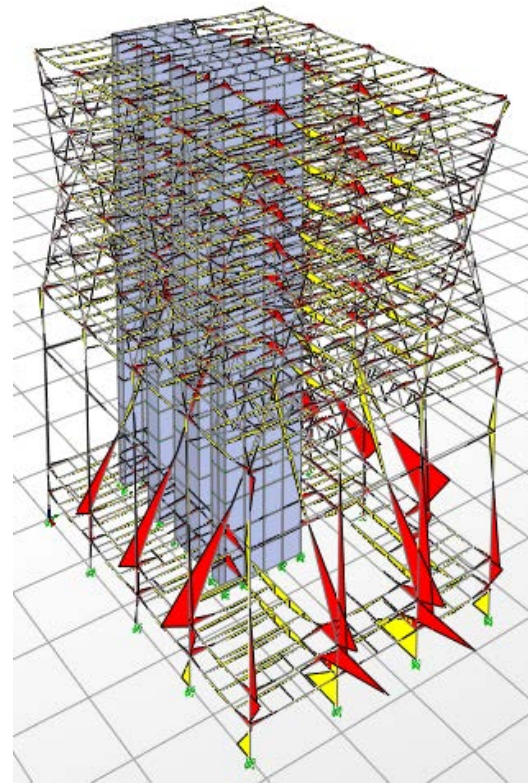
AXILES



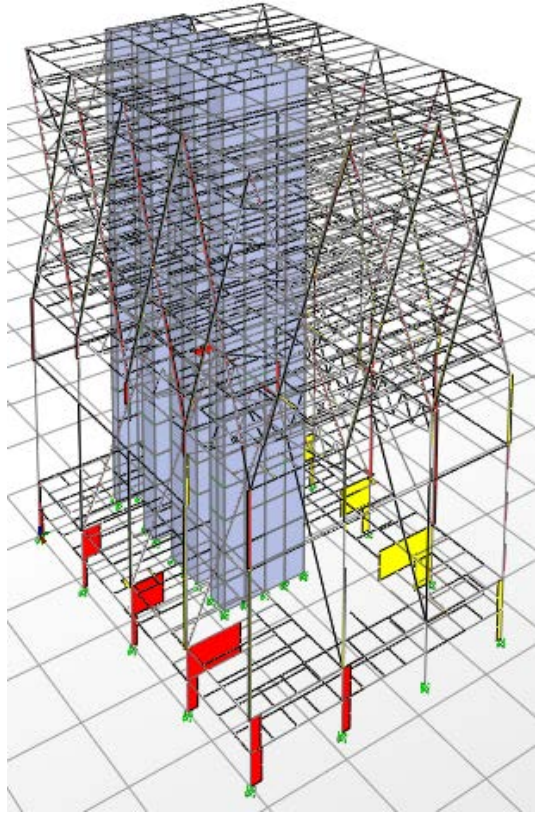
TORSIONES



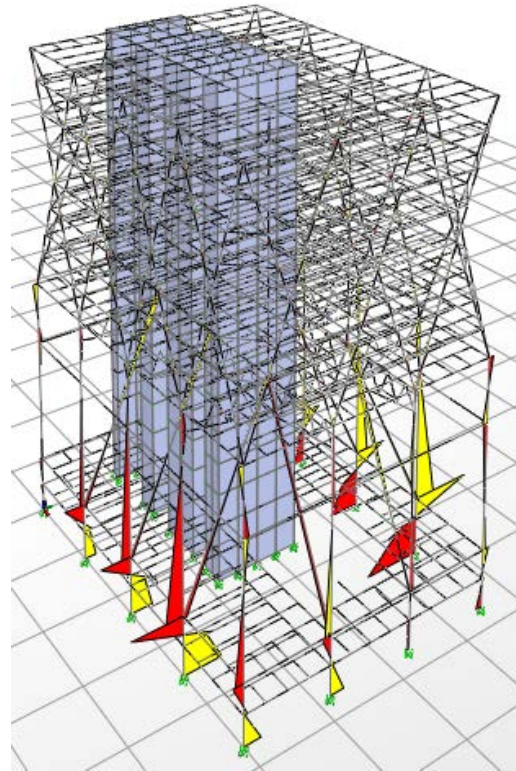
CORTANTES (eje 2-2)



MOMENTOS (eje 3-3)

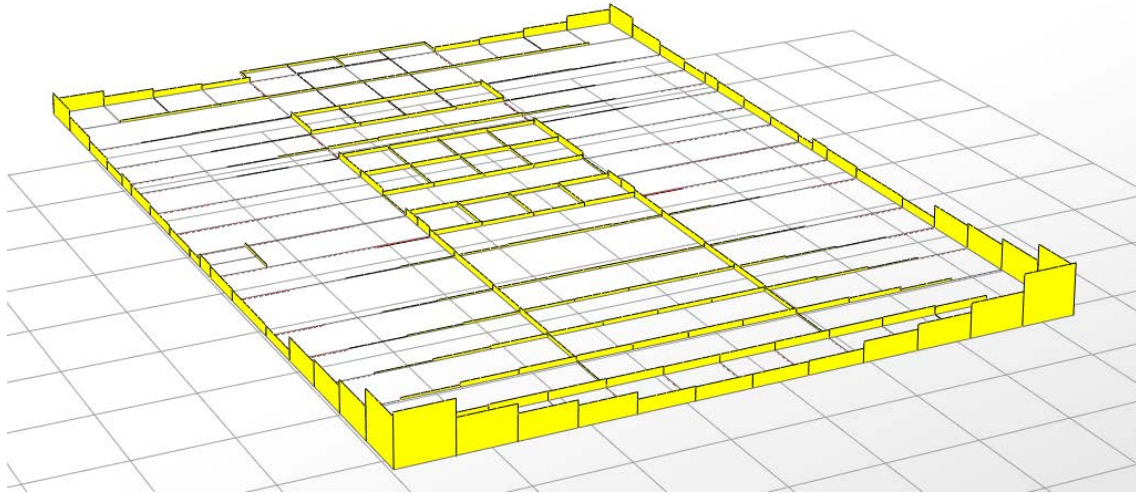


CORTANTES (eje 3-3)

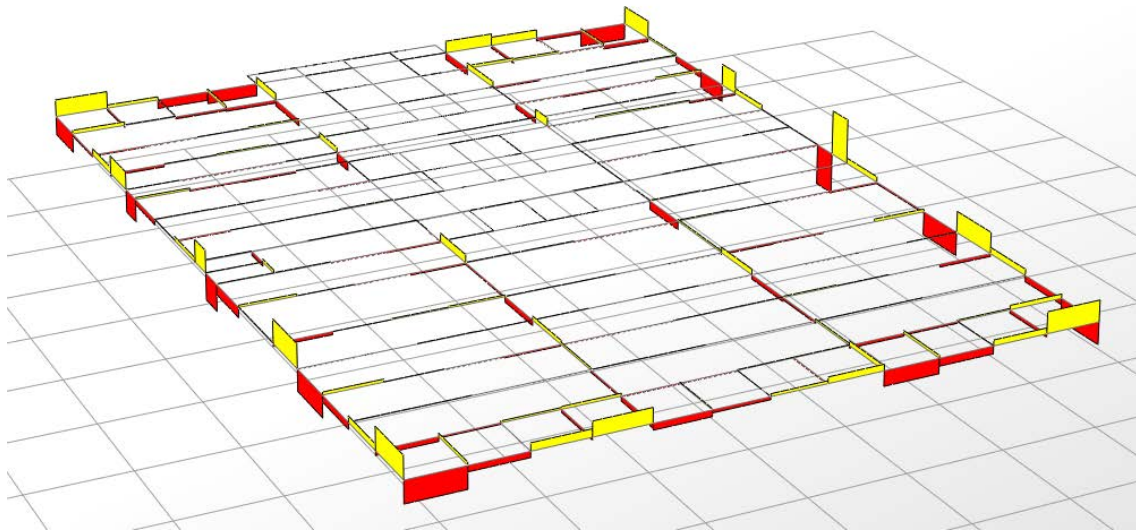


MOMENTOS (eje 2-2)

Se muestran también los diagramas de axiles, torsiones, cortantes 2-2 y 3-3 y momentos 2-2 y 3-3 que se generan en un forjado tipo,



AXILES

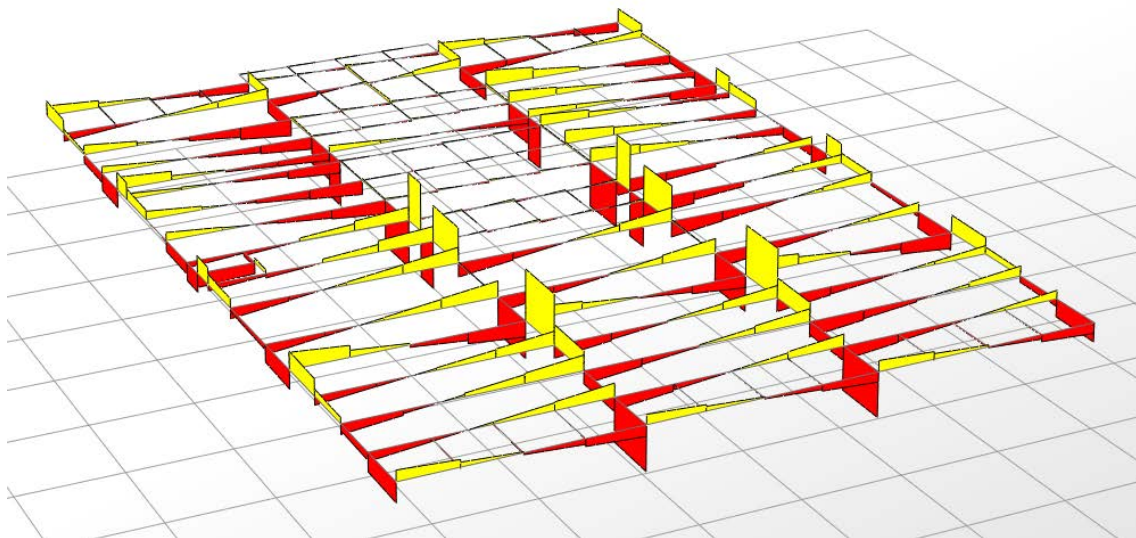


TORSIÓN

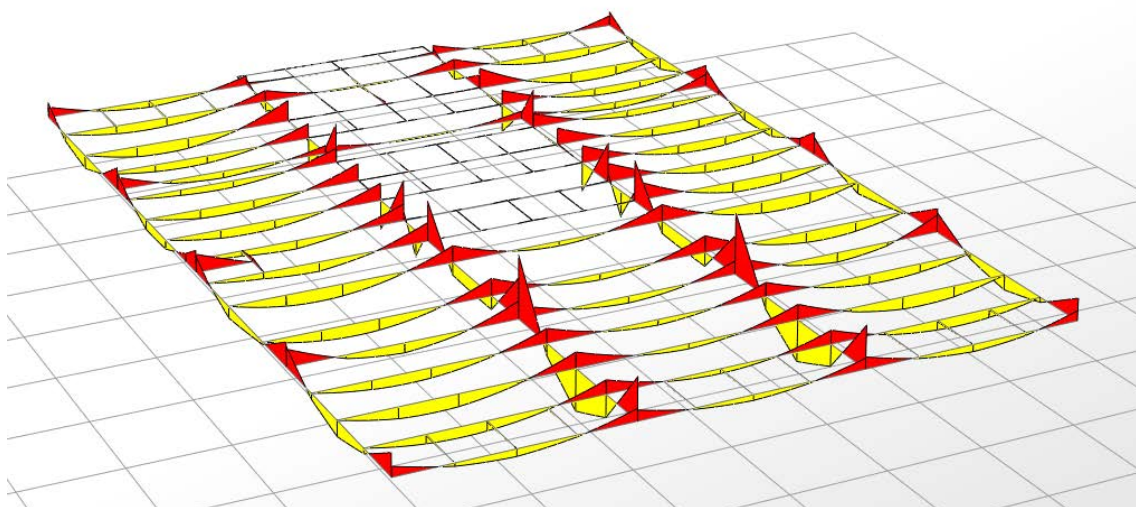
La flexión siempre va acompañada de cortante, siempre se han de emparejar de la siguiente manera:

Un tema a tener en cuenta es que los diagramas de cortante se dibujan en el lado opuesto al que utilizamos según el criterio que empleamos en España, por las convenciones propias americanas.

El cortante en el plano 2-2, con el momento alrededor del eje 3.

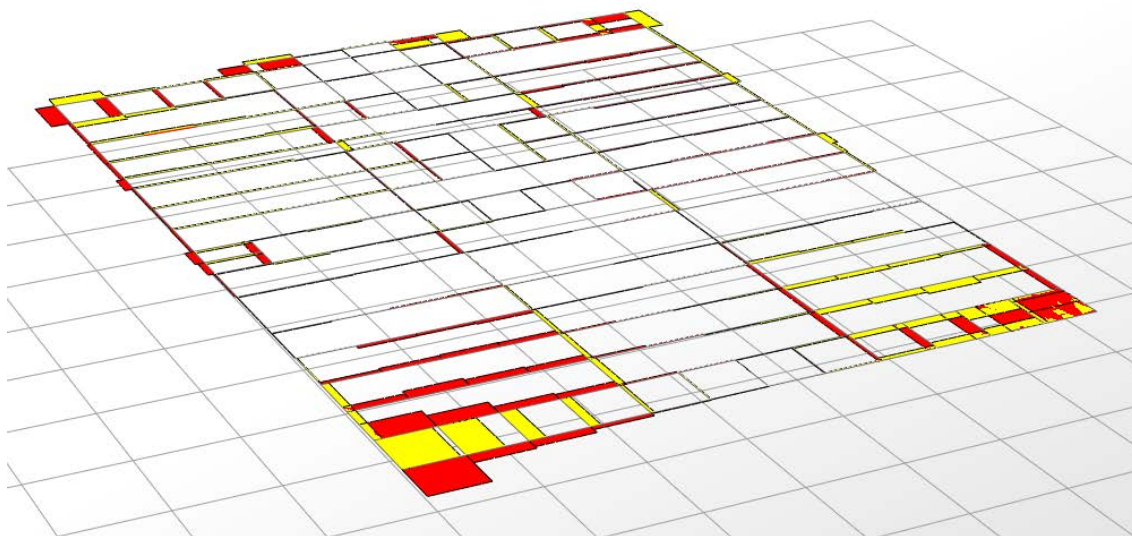


CORTANTES (eje 2-2)

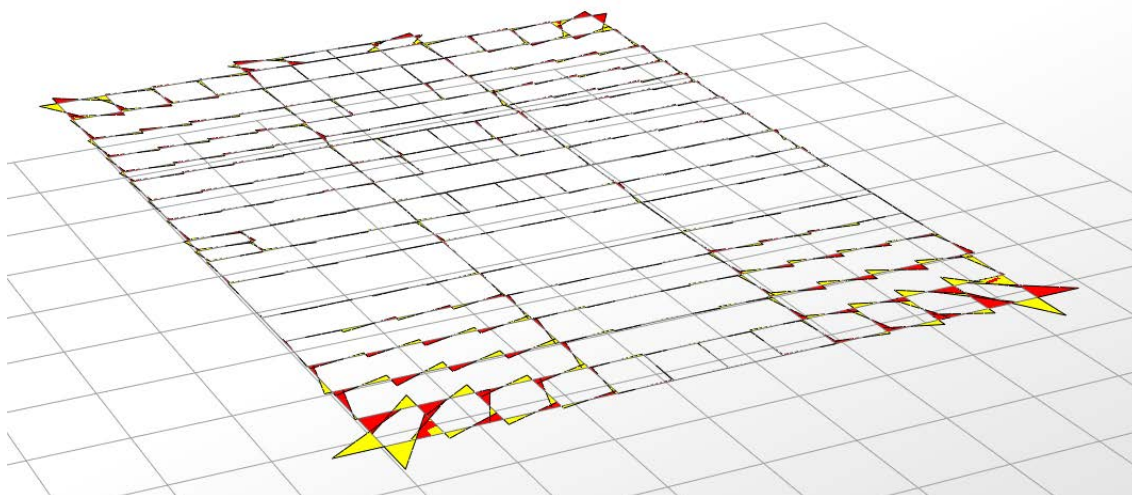


MOMENTOS (eje 3-3)

Por otro lado, el cortante en el plano 3-3, con el momento alrededor del eje 2.



CORTANTES (eje 3-3)



MOMENTOS (eje 2-2)

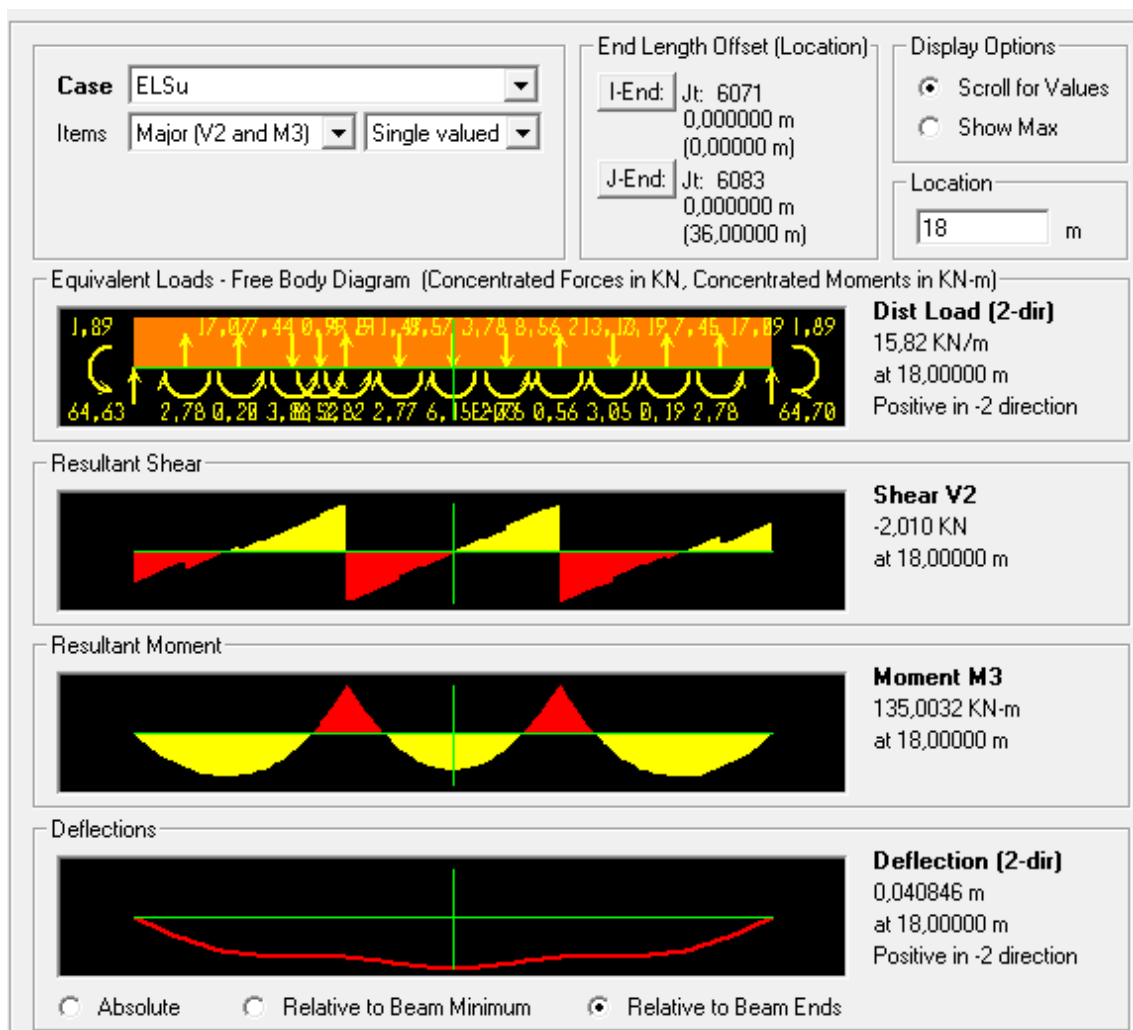
Comprobación a ELS:

La combinación de ELS más desfavorable es ELSu, en la cual se obtiene una flecha de 14 mm

Según la limitación de flecha establecida por la norma, debe ser como menor a $L/500$. Sustituyendo el valor de la luz (12m), los elementos estructurales del edificio deben tener una flecha máxima de:

$$f_{m\acute{a}x} = \frac{L}{500} = \frac{12000}{500} = 24 \text{ mm}$$

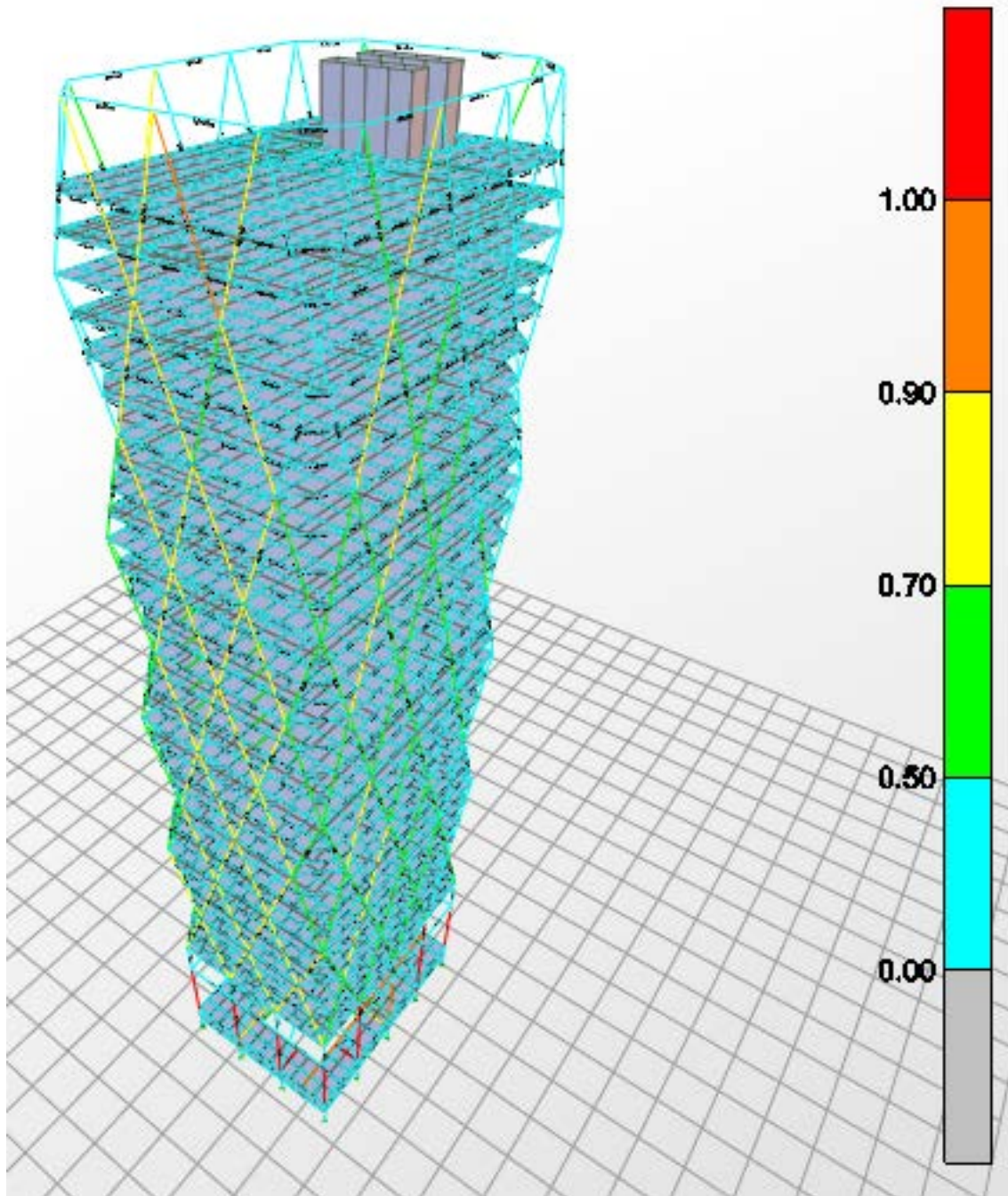
En el elemento más desfavorable, se obtienen los siguientes resultados:



Teniendo una flecha en el vano interior de 40 mm y de 26 mm en los extremos, debemos calcular la diferencia de movimiento vertical entre estos dos puntos, con lo que nos quedaría una flecha de:

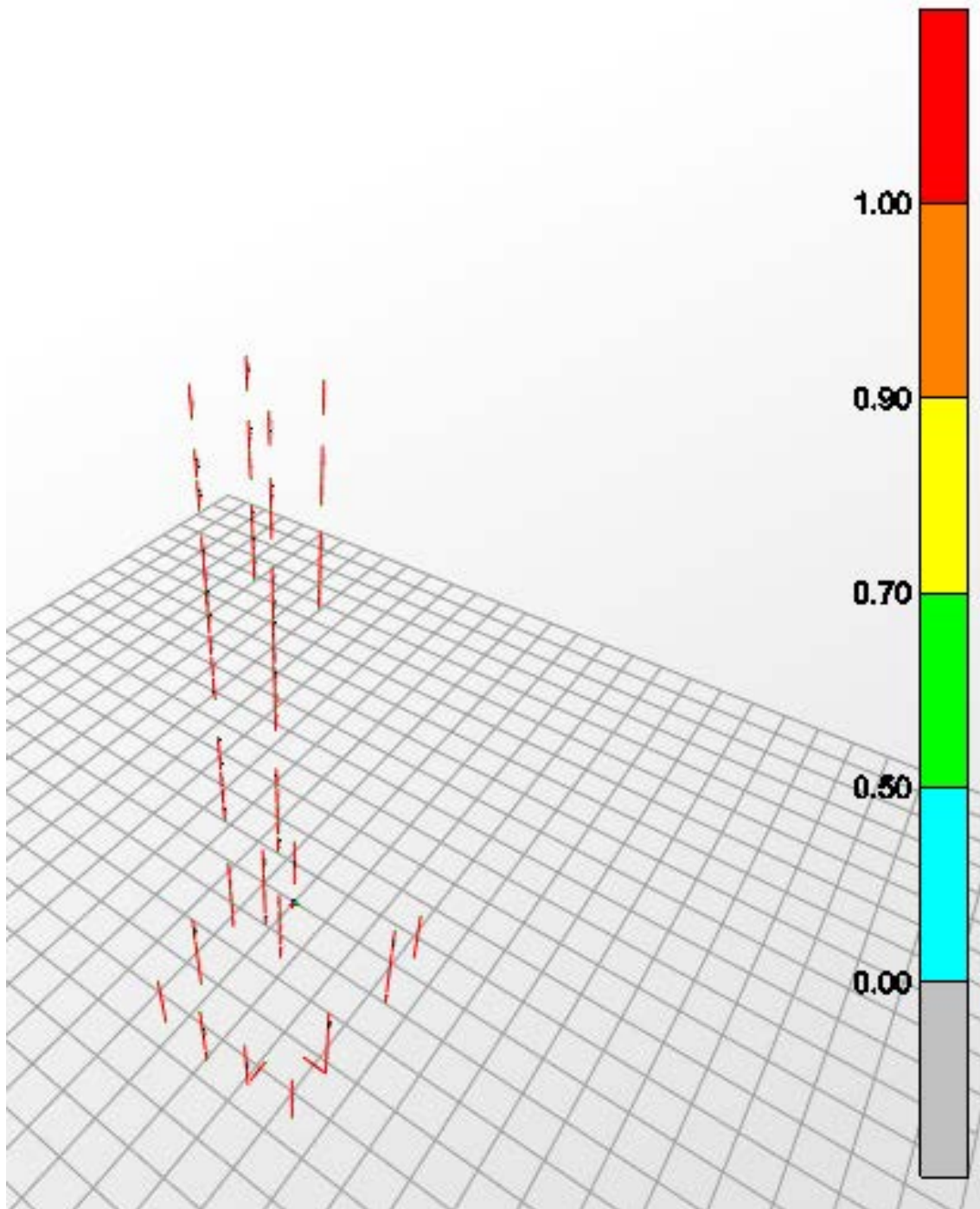
$$f_{real} = 40 - 26 = 14 \text{ mm} < f_{m\acute{a}x} = 24 \text{ mm} \quad \text{CUMPLE}$$

Comprobación a ELU:



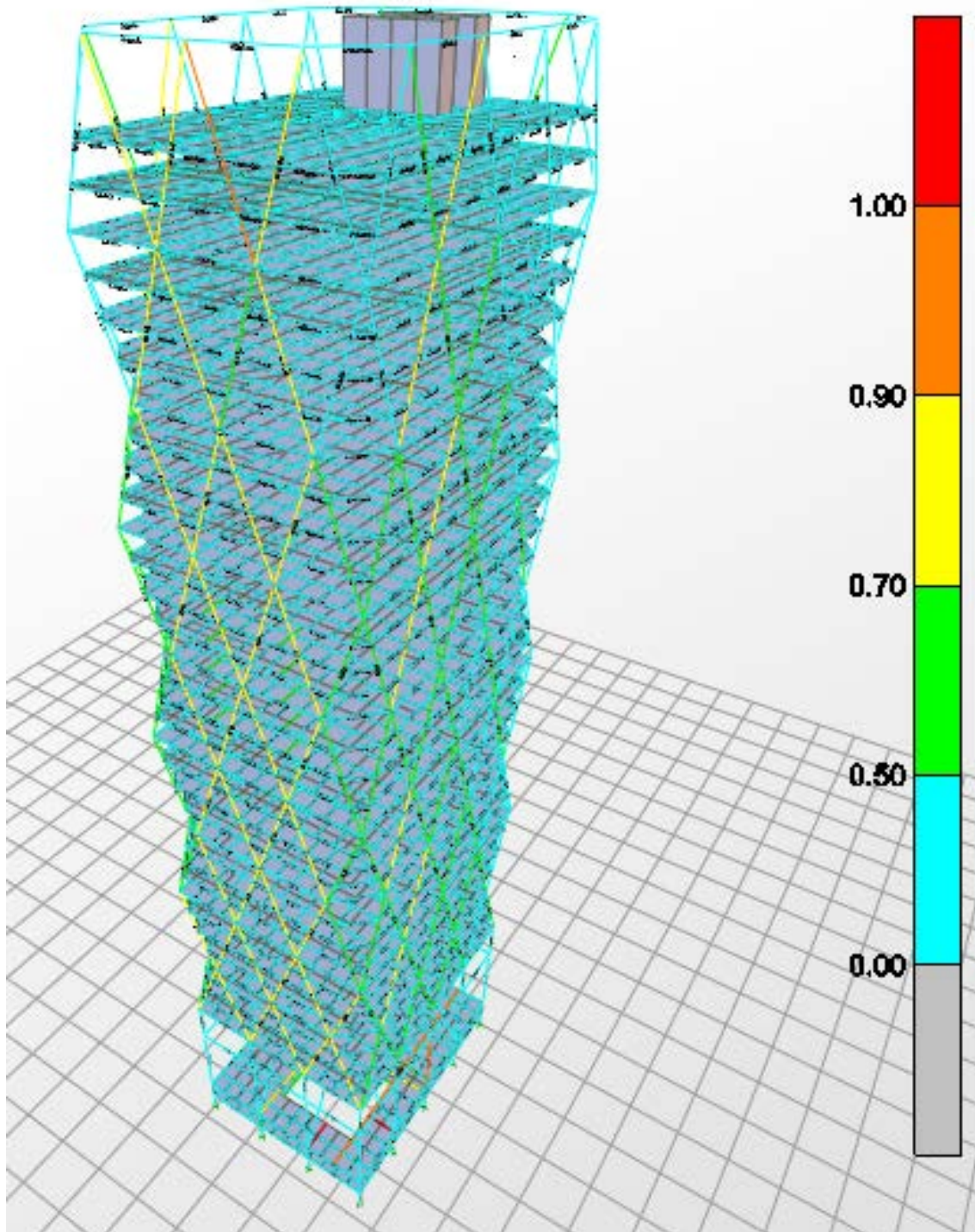
Tal y como se aprecia en el gráfico, el SAP2000 nos identifica qué elementos no cumplen a resistencia según la normativa.

Podemos aislar estos elementos para proceder a redimensionar dichos elementos cuando sea necesario.



Una vez realizada la comprobación, aislando los elementos, nos aparecería un gráfico como este.

Sin embargo, observando los resultados obtenidos, se llega a la conclusión de que el SAP2000, cuando existe un momento en la base de un pilar de un valor muy alto, según lo que se contempla en la normativa, entiende que este momento reduce enormemente la capacidad a resistencia a axil de la sección, lo cual no es correcto.



Una vez realizados los cambios necesarios de dimensionado de las secciones que no cumplían la normativa y la calidad de los materiales empleados, se obtiene un gráfico como este, el cual nos indica, que los elementos no superan un valor de 1.

Esto significa que cumplen a resistencia con las secciones y materiales empleados.

3. CONCLUSIONES

En primer lugar, a la hora de realizar el modelo en CAD de la torre Hearst, tuve que realizar algunas modificaciones de geometría, ya que es muy importante, sobre todo en edificios de geometrías complejas, que todas las 3dcaras realizadas, así como las líneas que corresponden a vigas y pilares, estén perfectamente conectadas entre sí, sin existir ningún tipo de desconexión o conexión con algún lado de otra 3d cara o línea.

Una vez desarrollado el modelo de la estructura, es muy importante al importar los datos al SAP2000, crear grupos para después asignarles materiales, secciones y las diferentes cargas. (CMP,SCU, SCV, SCN). Sin olvidar, que el programa, ya tiene en cuenta el peso propio de la estructura en función de las secciones y materiales asignados (DEAD).

Observando los diagramas de axiles, tanto en el modelo general como en los diagramas de detalle, se aprecia como está trabajando la estructura de *diagrid*, repartiendo los esfuerzos hasta la zona más baja, la cual recibe unas grandes solicitaciones de axil, lo que era de esperar conociendo las secciones empleadas.

Al realizar la comprobación de ELU, en un principio me surgieron algunas dudas, ya que el programa me indicaba que había una serie de elementos (pilares) que no cumplían a resistencia, en este caso, pudiendo ser por pandeo.

Sin embargo, esta situación era debida a una confusión por parte del SAP2000, ya que interpretaba, según la norma utilizada, que aquellos elementos que tuviesen un gran momento en su base, éste hacía que se redujese mucho su resistencia a axil, indicando que no cumplían a resistencia.

La comprobación a ELS se puede hacer de dos formas con SAP2000, situando el puntero del ratón sobre el punto más desfavorable del elemento a estudiar para conocer la flecha. O bien, como se ha realizado en este trabajo, analizando los elementos más desfavorables mediante sus diagramas y su deformada. Este último método nos permite conocer las solicitaciones y deformaciones en cada punto.

Al investigar las secciones utilizadas en el edificio, la calidad del acero y conociendo sus dimensiones, los resultados obtenidos al analizar la estructura con SAP2000, parecen razonables, no me he encontrado con situaciones demasiado extrañas al realizar el trabajo.

Podrían establecerse algunas líneas futuras de trabajo como el estudio de los nudos en detalle o, en caso de obtener más información, realizar un estudio más detallado de la cercha que existe entre el gran acceso y la primera planta de la torre Hearst.

El sistema estructural empleado, el cual se conoce como *diagrid*, tiene gran cantidad de variaciones de una obra a otra en función del módulo empleado, pudiendo ser la base de un futuro trabajo en el cual se investigase cómo afecta el ángulo de inclinación del módulo base triangular en el comportamiento estructural del edificio, pudiendo llegar a unas conclusiones que indiquen que opciones serían las más adecuadas.

4. BIBLIOGRAFÍA

Revistas:

- *A&V Monografías nº122*
- *Detail nº3 (2008) – Edificios en altura*
- *Modern Steel Construction(2007). “Something Old, something new”*

Libros:

- Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*
- Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*
- Goitia, A. (2010). *Norman Foster*
- Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*
- Parker, D., Wood, A. *The Tall Buildings Reference Book*

Papers – publicaciones:

- Deane, M. (2008) “Delivering Sustainable Tall Buildings”
- Ficeto, M. *Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower.*
- Ficeto, M. *Hearst Icefall. Lobby Water feature Shines On.*
- Gustafson, K. (2006). “A New Angle: Conversation with the Steel Fabricator of Hearst Tower”. *Modern Steel Construction*
- Hart, S. (2005). “Norman Foster and the Hearst Corporation Complete an 80 Year Vision”. *Architectural Record Innovation.*
- *International Journal of SEWC. Structural Engineers Work Congress.*
- Lebovich, William. “Hearst Tower.”
- *McCain, Ian. Diagrid: Structural Efficiency & Increasing Popularity*
- Mele, E., Toreno, M. (2014) *Diagrid structures for tall buildings: Case studies and design considerations.*
- Pipola, J., Legarda, C., Multani, G. *Glass Curtain Wall.*
- Rahimian, A. (2007). “Something Old, Something New.” *Modern Steel Construction.*
- Rahimian, A., Eilon, Y. (2008) “Hearst Headquarters: Innovation and Heritage in Harmony.” *CTBUG 8th World Congress.*
- Rahimian, A., Eilon, Y. (2006). “New York’s Hearst Tower.”
- *Steel Institute of New York, (2006). “Hearst Tower.” Metals in Construction.*
- *Técnicas de vanguardias constructivas. Hearst tower, un diamante High-Tech.*

ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1: Axonometría general del edificio. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 2: En estos bocetos, Norman Foster comienza a explorar la relación entre la base de la nueva torre y el edificio existente, así como los diferentes tratamientos de la cubierta del edificio. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*.

Figura 3: El edificio original en 1928
Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 4: Los cinco estados en el desarrollo del proyecto: el edificio de Joseph Urban en 1928; La torre no realizada de George B Post & Sons en 1946; La nueva torre colocada directamente encima de la base; introduciendo la separación entre lo antiguo y lo nuevo, y la creación de la plaza. Fuente: Foster+Partners. (2010). Hearst Tower.

Figura 5: Imagen exterior del edificio.

Figura 6: Trama que sigue la fachada. Fuente:

Figura 7: Maqueta. Fuente: Foster, N. *Obra completa*

Figura 8: A la izquierda: Fachada de la Philadelphia City Tower, ilustración obtenida de internet a la derecha podemos observar la maqueta de la torre. Fuente: “Louis Kahn and space frames”. *WORKS 6*

Figura 9: Imágenes exteriores del edificio, realizadas por el autor.

Figura 10: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 11: Vista interior zona de acceso. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 12: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

Figura 13: Vista interior del edificio, zona de núcleos verticales. Fuente: Foster, N. *Obra*

Figura 14: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

Figura 15: Vista a través del edificio. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 16: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 17: Vista aérea de La ciudad. Imagen tomada por el autor.

Figura 18: Reutilización del agua. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 20: Sistema de calefacción. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 19: Sistema de Refrigeración. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 22: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Técnicas de vanguardias constructivas. *Hearst tower, un diamante High-Tech..*

Figura 21: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 23: Proceso de creación del impresionante mural denominado Riverlines creado por Richard

Long a base de nueve bandas verticales pintadas a mano empleando barro recogido del cauce del río Hudson. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 24: Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 27: Vista aérea de La ciudad. Fuente: Rahimian, A., Eilon, Y. (2008) "Hearst Headquarters: Innovation and Heritage in Harmony." CTBUG 8th World Congress.

Figura 25: Estructura que sustentó la fachada preexistente. Fuente: Rahimian, A., Eilon, Y. (2008) "Hearst Headquarters: Innovation and Heritage in Harmony." CTBUG 8th World Congress.

Figura 28: Los grandes "cajones" de los pilares de 1,25 m² (44in-square box columns) se ensamblaron con pletinas de acero laminado de 10,6 cm (4in) de espesor. Fuente: Ficeto, M. *Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower*

Figura 29: Encuentro de los elementos principales que forman el *diagrid* en uno de los nudos. Fuente: Ficeto, M. *Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower*

Figura 31: Los grandes pilares y diagonales soportan la torre, creando un atrio de 7 alturas. Fuente: Ficeto, M. *Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower*

Figura 32: En la imagen se aprecia una especie de celosía de gran canto que distribuye los esfuerzos que llegan de la parte superior de la torre hacia los grandes pilares y de ahí hasta llegar a la cimentación. Fuente: Ficeto, M. *Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower*

Figura 33: Amplias luces se extienden dentro del interior, pudiendo llegar a ser de 12 metros (40 ft) o más. Fuente: Ficeto, M. *Diagrid Framing system lifts historic building into skyline Hearst Tower*

Figura 34: Izquierda: Imagen interior del Lobby. Fuente: Ficeto, M. *Hearst Icefall. Lobby Water feature Shines On*. Derecha : Detalle pilar diagonal. Fuente: Rahimian, A. *New York's Hearst tower*.
Figura 35: "Icefall", diferentes fotos de la construcción de la cascada del acceso principal. Fuente: Ficeto, M. *Hearst Icefall. Lobby Water feature Shines On*.

Figura 36: Fachadas Sur y Este. Fuente: Bing maps.

Figura 37: Fachadas Norte y Este. Fuente: Bing maps.

Figura 38: Fachada Oeste. Fuente: Bing maps.

Figura 39: Plano de emplazamiento. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 40: Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 41: Planta de acceso. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 42: Planta de acceso. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 43: Alzado este. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

Figura 44: Alzado este. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

Figura 45: Alzado este. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

Figura 46: Alzado este. Fuente: Foster+Partners. (2010). *Hearst Tower*

Figura 47: Alzado este. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 48: Esquemas de transmisión de cargas en función de si reciben acciones verticales o horizontales. Fuente: Pipola, J., Legarda, C., Multani, G. *Glass Curtain Wall*.

Figura 49: Módulo del *diagrid*: efecto de la carga gravitatoria a lo largo de la diagonal. Fuente: Mele, E., Toreno, M. (2014) *Diagrid structures for tall buildings: Case studies and design considerations*.

Figura 50: Esquema del módulo del *diagrid*, efectos con a) acción vertical, b) momento y c) horizontal. Fuente: Mele, E., Toreno, M. (2014) *Diagrid structures for tall buildings: Case studies and design considerations*.

Figura 51: Alzado este. Fuente: Foster, N. *Obra completa – WORKS 6*

Figura 52: “Bocas de pájaro”. Fuente: Rahimian, A., Eilon, Y. (2008) “Hearst Headquarters: Innovation and Heritage in Harmony.” CTBUG 8th World Congress.

Figura 53: Este modelo de un nudo ilustra la complejidad de las conexiones atornilladas. Las placas que proporcionan la transmisión de carga entre los elementos del *diagrid* a través del nudo están precisamente para asegurar una correcta y plena trayectoria de carga. Las placas se utilizan para permitir que los pernos que hay a los lados de los elementos del *diagrid*, mantienen la unión apretada para adaptarse a las líneas arquitectónicas del revestimiento de acero inoxidable. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*

Figura 54: La imagen global de la estructura de acero muestra la excentricidad del núcleo, así como el uso de los grandes pilares y elementos diagonales para los pisos inferiores de la torre. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*

Figura 55: Detalles tipo de nudo interior y de esquina. Fuente: Rahimian, A., Eilon, Y. (2008) “Hearst Headquarters: Innovation and Heritage in Harmony.” CTBUG 8th World Congress.

Figura 56: Modelo de madera de uno de los nudos de esquina, hecho en el proceso de diseño del edificio. Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*.

Figura 57: Imagen de una “boca de pájaro” en la esquina de la torre, que muestra el uso del revestimiento de acero inoxidable para resaltar la estructura de *diagrid*. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*.

Figura 58: Montaje, instalación de protección contra incendios y el revestimiento en curso de construcción. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*

Figura 59: Los trabajadores reciben un nudo durante la construcción, los nudos son básicamente simétricos así como repetitivos, así se asegura un ajuste en el descenso de la pieza en el ángulo correcto para permitir que sea atornillado correctamente con poco esfuerzo y se puedan ajustar y alinear los diferentes elementos. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*

Figura 60: Diagonales vistas en fachada. Fuente: Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details*.

Figura 61: Detalle. Meyer Boake, T. (2014). *Diagrid structures: systems, connections, details* Engineers Work Congress.

Figura 62: Esquema de la estructura frente a las diferentes acciones. Fuente: internet

Figura 63: Subdivisión módulo del *diagrid*. Fuente: International Journal of SEWC. Structural

Figura 64: Imagen y esquema de uno de los nudos de la estructura. Fuente: *McCain, Ian. Diagrid:*

Structural Efficiency & Increasing Popularity

Figura 65: Imágenes donde se aprecia la modulación del forjado, cantidad de correas y geometrías generadas. Fuente: internet. Mountain Enterprises Web.

Figura 66: Diferentes vistas del modelo realizado por Cives Steel and Mountain Enterprises en Tekla, el cual me ha servido para realizar un modelo de cálculo lo más aproximado posible a la realidad. Fuente: internet – Mountain Enterprises Tekla Web Viewer.

Figura 67: Modelo de la estructura. Fuente: Elaboración propia

Figura 68: Módulo *diagrid*-estructura. Fuente: Elaboración propia

Figura 69: Elementos del modelo, detalle forjado.
Fuente: Elaboración propia.

Figura 70: Equivalencia chapa-forjado para modelización en SAP2000. Fuente: Elaboración propia.

Figura 71: Secciones tipo Super Jumbo de ArcelorMittal. (anejo 1)

Figura 72: Secciones utilizadas en el modelo de cálculo para los elementos diagonales del *diagrid*
Fuente: Mele, E., Toreno, M. (2014) *Diagrid structures for tall buildings: Case studies and design considerations.*

Figura 73: Detalle del nudo. Uniones atornilladas: empotramiento. Fuente: Rahimian, A., Elion, Y. (2006). "New York's Hearst Tower."

Figura 74: Sobrecarga de nieve para la ciudad de Nueva York (snow overload NYC). Fuente: 2007 Building Code of New York State. Chapter 16 Structural Design. Section 1608 – snow loads