



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR DE
ARQUITECTURA

ESTUDIO, MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DEL RASCACIELOS 432 DE PARK AVENUE DE RAFAEL VIÑOLY, MEDIANTE SAP2000

TRABAJO FINAL DE GRADO
GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA

Autor: Blanca Esperanza Larraz Sancho-Tello

Tutor: David Gallardo Llopis

Escuela Técnica Superior de Arquitectura | Curso 2020-2021

A mi familia y amigos, por no dudar de mí en ningún momento en todos estos largos años.

Resumen

En el presente Trabajo de Final de Grado se analiza la estructura del edificio 432 Park Avenue, un esbeltísimo rascacielos emplazado en Manhattan, Nueva York (Estados Unidos). En él se llevan al límite las posibilidades del hormigón armado, consiguiendo una simbiosis entre arquitectura y estructura, en la que el límite entre ambas disciplinas se difumina.

Para realizar el análisis y estudio del edificio se ha recopilado toda la información disponible para poder elaborar un modelo de la estructura a través de AutoCad, y posteriormente un cálculo de ésta con el software SAP2000. Con esta última herramienta, y definiéndose previamente la materialidad, secciones y acciones a las que se somete dicha estructura, es posible obtener su comportamiento frente a Estados Límite Últimos (ELU) y Estados Límite de Servicio (ELS) y con ello unas conclusiones sobre su estabilidad y la idoneidad de la solución adoptada.

Palabras clave: estructura, análisis, modelización, SAP2000, arquitectura, moderna, contemporánea, rascacielos, esbeltez

Resum

En el present Treball de Final de Grau s'analitza l'estructura de l'edifici 432 Park Avenue, un esveltíssim gratacels emplaçat a Manhattan, Nova York (Estats Units). S'hi duen al límit les possibilitats del formigó armat, aconseguint una simbiosi entre arquitectura i estructura, en la qual el límit entre les dues disciplines es difumina.

Per realitzar l'anàlisi i estudi de l'edifici s'ha recopilat tota la informació disponible per poder elaborar un model de l'estructura a través d'AutoCad, i posteriorment un càlcul d'aquesta amb el programa SAP2000. Amb aquesta última eina, i definint prèviament la materialitat, seccions i accions a les quals es sotmet aquesta estructura, és possible obtenir el seu comportament enfront d'Estats Límit Últims (ELU) i Estats Límit de Servei (ELS), i amb això unes conclusions sobre la seua estabilitat i la idoneïtat de la solució adoptada.

Paraules clau: estructura, anàlisi, modelització, SAP2000, arquitectura, moderna, contemporània, gratacels, esveltesa

Abstract

In this Final Degree Project, the structure of the 432 Park Avenue building is analyzed, a very slender skyscraper located in Manhattan, New York (United States). In it, the possibilities of reinforced concrete are pushed to the limit, achieving a symbiosis between architecture and structure, in which the boundary between both disciplines is blurred.

To carry out the analysis and study of the building, all the available information has been compiled to be able to elaborate a model of the structure through AutoCad, and later a calculation of it with the SAP2000 software. With this last tool, and having previously defined the materiality, sections and actions to which said structure is subjected, it is possible to obtain its behavior against Ultimate Limit States (ELU) and Service Limit States (ELS) and with it some conclusions about its stability and suitability of the solution adopted.

Keywords: structure, analysis, modeling, SAP2000, architecture, modern, contemporary, skyscraper, slenderness

Índice de contenidos

| | |
|--|----|
| 1 Introducción..... | 8 |
| 2 Introducción al proyecto..... | 9 |
| 2 Análisis arquitectónico | 11 |
| 2.1 Rafael Viñoly Architects | 11 |
| 2.2 Los "rascacielos cerilla" en Manhattan..... | 14 |
| 2.3 432 Park Avenue | 17 |
| Emplazamiento..... | 17 |
| Composición | 20 |
| Funcionalidad..... | 22 |
| Materialidad..... | 26 |
| Problemáticas..... | 27 |
| 3 Planos redibujados..... | 29 |
| 4 Análisis constructivo y estructural | 32 |
| 4.1 Viento..... | 36 |
| 5 Modelo de análisis..... | 38 |
| 5.1 Modelización | 38 |
| 5.2 Definición de materiales | 40 |
| 5.3 Definición de las secciones | 41 |
| 5.3.1 Pilares: otras cuestiones a tener en cuenta..... | 42 |
| 5.4 Cargas..... | 44 |
| 5.4.1 Cargas superficiales | 45 |
| 5.4.2 Cargas lineales | 47 |
| 5.5.3 Carga de viento..... | 47 |
| 6 Interpretación de resultados | 50 |
| 6.1 Estados Límite de Servicio (ELS) | 51 |
| 6.1.3 Desplazamientos horizontales | 51 |
| 6.1.1 Desplazamientos verticales | 59 |
| 6.2 Estados Límite Últimos (ELU)..... | 66 |
| 6.2.1 Comprobación de pilar grupo 1..... | 66 |
| 6.2.2 Comprobación de pilar grupo 2..... | 70 |
| 6.2.3 Comprobación de pilar grupo 3..... | 72 |
| 6.2.4 Comprobación losa grupo 1..... | 75 |
| 6.2.5 Comprobación losa grupo 2..... | 81 |
| 6.2.6 Comprobación losa grupo 3..... | 87 |

| | |
|---|-----|
| 6.2.7 Comprobación pantalla grupo 1 | 89 |
| 6.2.8 Comprobación pantalla grupo 2 | 97 |
| 6.2.9 Comprobación pantalla grupo 3 | 104 |
| Conclusiones | 108 |
| Bibliografía..... | 109 |
| Listado de imágenes | 111 |
| Listado de tablas..... | 119 |

1 | Introducción

El objetivo del presente trabajo es el análisis y el estudio del esbeltísimo rascacielos con una proporción 1:15 emplazado en Manhattan: el 432 Park Avenue, construido por Rafael Viñoly, utilizando para ello SAP2000.

La Arquitectura y la Estructura son elementos ligados, que surgen a partir del proceso proyectual; la primera no puede existir sin la segunda, ni la segunda sin la primera. **La Estructura es la que permite que la Arquitectura pueda materializarse en una forma concreta**, que debe derivarse de un estudio exhaustivo de las necesidades del programa propuesto.

Hoy en día es posible cumplir la función principal de la estructura, que es sustentar la arquitectura, así como combinarla con infinidad de materiales disponibles en el mercado, dando como resultados formas que hace apenas unas décadas parecían imposibles. Esta **liberación de la estructura**, que constituía una gran traba para la construcción en el pasado y limitaba la creatividad del arquitecto, permite ahora pueda proyectar, diseñar y construir con total libertad, sin las ataduras que tradicionalmente han existido sobre las estructuras.

Existen importantes obras de arquitectos a lo largo de la historia en los que la **arquitectura y estructura son una simbiosis**, son elementos inseparables, como ocurre por ejemplo con el famosísimo Félix Candela, quien estudiaba las formas estructurales más orgánicas y la posibilidad de generar un espacio con ellas. También se podría citar a Oscar Niemeyer, quien lleva hasta el extremo la posibilidad de las formas plásticas del hormigón para dotar de expresión a sus obras.

Así pues, el presente estudio del 432 Park Avenue no se centra en la concepción de una forma y posteriormente una estructura, sino en el pensamiento de ambas como un todo que da como resultado una arquitectura, fascinante desde cualquier campo que se analice: construcción, composición y estructura.

2 | Introducción al proyecto

La elección del rascacielos 432 Park Avenue, construido por el equipo Rafael Viñoly Architects, no es producto del azar, sino de la admiración hacia tal arquitectura o estructura (en este caso existe una coincidencia ente ambas) que es posible vislumbrar desde cualquier punto de Manhattan.

Desde un primer momento es un edificio que llama la atención, que deja al público deslumbrado, y todavía más a los entendidos en la materia, que nos preguntamos cómo es posible que dicha estructura sea estable.

No es tanto su altura lo más llamativo, sino la increíble esbeltez que se alcanza con dicho edificio, llegando a una relación 1:15 considerando base y altura. Para hacerse una idea de lo que expresa esta relación, un boli BIC puesto en vertical es de 1:17 aproximadamente, y difícilmente podrá mantenerse en equilibrio durante el tiempo de vida útil que se exige a una estructura.

La incidencia en su esbeltez es quizá el aspecto más interesante de este edificio, para lo cual se han dispuesto distintos mecanismos para que no esté constantemente oscilando con el viento.



Imagen 1. Panorámica edificios del entorno en Manhattan. Fuente: (Rafael Viñoly Architects, n.d.)

La estructura de esta enorme colmena, destinada principalmente a **uso residencial**, emplea únicamente hormigón armado para la construcción de su núcleo central y los pilares exteriores, que dan el aspecto tan racional y comedido a la fachada. Esta liberación de soportes intermedios hace posible que la vivienda se ajuste a los estándares de **flexibilidad** cada vez más demandados en la arquitectura, que ya hemos dejado de concebir como un espacio ya distribuido, fijo, estático, dando paso a un lugar en el que se pueden desempeñar distintas funciones, desde las tradicionales (descanso, higiene y alimentación) hasta cualquiera que pueda imaginar el usuario, puesto que los tabiques son meros separadores entre espacios, sin función estructural. Estas ideas, a pesar de finalizarse la construcción del edificio en 2015, están en auge hoy en día, ya que con la actual crisis sanitaria del Covid-19 desempeñamos muchas más funciones que antes estábamos acostumbrados a realizar en el exterior de nuestra vivienda, como trabajar o hacer ejercicio.

El edificio cuenta con **89 plantas** sobre rasante, incluyendo la planta baja y las plantas técnicas, y con 3 sótanos. Alberga, además de viviendas de muy diversa tipología y tamaño a partir de la planta 23,

un hotel de la planta 12 a la 18, y con espacios comunes en los niveles más bajos, como un gimnasio, una piscina, una sala de conferencias, entre otros.

Según el ranking de edificios más altos del mundo proporcionado por *Skyscrapercenter* (Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 2021) el 432 Park Avenue se encuentra en el puesto 27º alcanzando 425,5 metros.¹

Si se consideran únicamente los edificios construidos en Nueva York, éste se encuentra en cuarto puesto, superado por el One World Trade Center (2014; 541,3 m), el Central Park Tower (2020; 472,4 metros) y el One Vanderbilt (2020; 427 m). Por tanto, si tiene en consideración que el 432 Park Avenue se construyó en 2015, éste fue el **edificio residencial más alto de Nueva York hasta 2020**, puesto que el One World Trade Center únicamente contiene oficinas.

¹ Consultar Anexo 1 para conocer los 30 edificios más altos del mundo

2 | Análisis arquitectónico

2.1 | Rafael Viñoly Architects

El equipo de Arquitectos Rafael Viñoly Architects son los encargados de la construcción del edificio a analizar y estudiar: el 432 Park Avenue, emplazado en Manhattan. Este grupo de arquitectos tiene como diseñador principal a Rafael Viñoly, y como director y vicepresidente del estudio a Jay Bargmann. Además, el estudio cuenta con diez directores de proyecto actualmente.

Rafael Viñoly nació en Uruguay en 1944 y estudió Arquitectura en la facultad de Arquitectura y Urbanismo, acabando la carrera en 1968.



Imagen 2. Rafael Viñoly. Fuente: Elisabeth Lippman para el Wall Street Journal

Su primera obra se emplaza en Buenos Aires, Argentina, en 1977, y desde ese momento ha seguido construyendo numerosas obras hasta la actualidad. La mayoría de ellas se emplazan en Estados Unidos, aunque también cuenta con obras en Sudamérica, Europa y Asia.

En 1978 se muda a Estados Unidos y en 1983 funda Rafael Viñoly Architects, un estudio con sede en Nueva York que ha crecido hasta contar con oficinas en Londres, Manchester, Abu Dhabi, Buenos Aires, Chicago y Palo Alto.

Comenzó en 1983 como un pequeño estudio de construcción para promotores de Nueva York. Ya desde el principio no se especializaron en ninguna tipología o programa concreto de proyecto. Es en

este primer momento cuando construyen su primer gran proyecto en Nueva York: la facultad de derecho penal John Jay en 1988.

La obra que consagra a Viñoly como uno de los grandes arquitectos contemporáneos es **el Foro Internacional de Tokio** construido en 1996. En 1989 se organizó en Tokio un concurso internacional para edificar un centro cívico que constituiría el centro de la vida cultural de la ciudad. Era un proyecto muy ambicioso, pero que permitió el crecimiento y consolidación del estudio a nivel mundial, con distintas tipologías de proyecto.

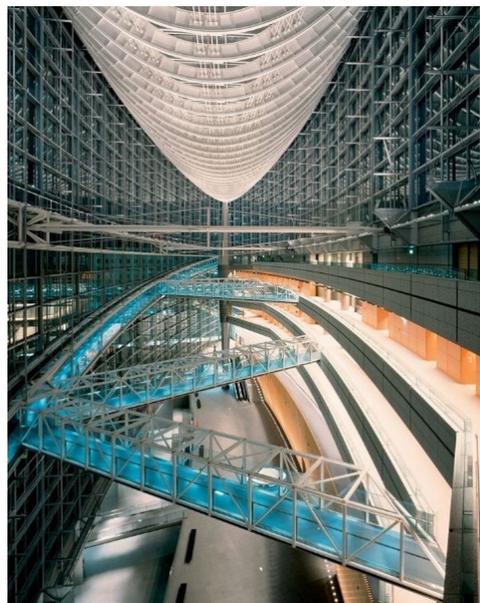


Imagen 3 (derecha). Foro Internacional de Tokio desde el exterior. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.)

Imagen 4 (izquierda). Foro Internacional de Tokio desde el interior. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.)

El edificio tiene un total de 27.100 metros cuadrados y sirve para realizar actuaciones y donde celebrar conferencias y ferias, Está situado en un entorno estratégico conectado con la red ferroviaria para servir como el emplazamiento idóneo donde realizar eventos internacionales. El objetivo principal que persigue es generar un espacio resguardado de una ciudad con un ritmo frenético como es Tokio, abierto al público y volcado sobre una plaza, que se adentra generando un gran espacio acristalado con pasarelas y arcos de acero y vidrio (ver imagen 4).

A finales de los años 90 el tamaño del estudio se estabiliza en 175 arquitectos y es durante la primera década del siglo XXI cuando construye el mayor volumen de obras, con un carácter muy variado. Entre ellos se puede destacar el Jazz en Lincoln Center en Nueva York (2004) y el Centro Kimmel de Artes Escénicas en Filadelfia (2001).

Es en esta segunda época cuando se desarrolla el sistema de gestión actual de proyecto de Rafael Viñoly Architects y que permite al equipo trabajar en la gran cantidad de encargos que reciben en estos momentos. Los directores de proyecto supervisan varios proyectos y trabajan junto con los gestores de proyectos, que se dedican a uno solo. Además, se conforma un grupo técnico centrado en la **investigación e innovación** en la arquitectura, con un equipo multidisciplinar con diseñadores, ingenieros, entre otros.



Imagen 5. Equipo completo de Rafael Viñoly Architects. Fuente: Rafael Viñoly (Rafael Viñoly Architects, n.d.)

El trabajo de Viñoly no queda reflejado en una sola **escala**, sino que abarca desde la inmensa magnitud de la nueva terminal del Aeropuerto Internacional de Carrasco emplazado en Montevideo (Uruguay), hasta viviendas unifamiliares, como la residencia Horsham, ubicada en Pensilvania (Estados Unidos). Tampoco queda relegado a una única **tipología**, sino que comprende desde centros de artes escénicas, laboratorios o bancos, hasta instalaciones residenciales o intervenciones urbanísticas; el equipo con el que cuenta es totalmente multidisciplinar, con respuestas creativas y apropiadas para cada proyecto que se les plantea. En palabras del propio Viñoly:

Cada proyecto es único en sí mismo porque las "fuerzas" que lo hacen posible son siempre específicas de él: cliente, sitio, limitaciones financieras, entorno tecnológico, aspiraciones culturales, etc. Debería ser evidente entonces que, si se consideran adecuadamente esas condiciones debe producir un resultado único, sin precedentes por naturaleza y, por lo tanto, libre de trabas estilísticas (Rafael Viñoly Architects, n.d.).

Por tanto, Rafael Viñoly Architects queda **libre de cualquier condicionante estilístico**, siendo sus obras el resultado de todos los condicionantes impuestos por la propia obra y el cliente. Para ellos, la arquitectura es el resultado de la combinación de la tecnología o la ingeniería, y el desafío hacia lo ya construido o establecido; es crucial para avanzar combinar ambos aspectos para pasar de un "cómo eran" a "cómo podrían llegar a ser" los edificios.

A continuación, se muestran tres ejemplos que representan la gran variedad de la obra de Viñoly los podemos encontrar en las obras:

El **punto de la Laguna Garzón**, construido en 2016 en Maldonado (Uruguay), es una carretera circular situada junto a la costa en un ecosistema protegido. El objetivo era alejarse de soluciones convencionales como puentes para crear un espacio de interés con vistas panorámicas para los conductores, ciclistas y peatones, empleando el menor número de pilares posible. Se trata de *“una laguna dentro de una laguna”* según explica Rafael Viñoly Architects.



Imagen 6. Puente de la Laguna Garzón. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.)

La **Nueva Terminal para el Aeropuerto Internacional de Carrasco**, ubicado en Montevideo (Uruguay) se construye en 2008 para aumentar la capacidad y modernizar las instalaciones del aeropuerto que constituye la principal forma de acceso a la capital. El diseño se centra en emular las dunas del paisaje local, reduciendo así su impacto visual.

De esta obra cabe destacar la importancia que se le da a los espacios públicos para despedir o recibir a los viajeros por parte de familiares y amigos, y a la luz natural y el tratamiento de los espacios exteriores en vinculación con los interiores.



Imagen 7. Aeropuerto Internacional de Carrasco. Nueva Terminal. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.)

El **teatro Curve** se construye en Leicester (Reino Unido) en 2008 se caracteriza por invertir los papeles en la configuración de un teatro, exponiendo las obras al exterior y dejando a la misma cota el

escenario, el vestíbulo y la acera. La fachada se compone de un muro cortina con aleros, dándole un aspecto más tecnológico y renovado. El espacio interior se puede modificar según las necesidades, abriendo o cerrando los auditorios al vestíbulo principal.



Imagen 8. Teatro Curve. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.)

Con esta larga trayectoria forma parte de numerosas afiliaciones, como al Instituto Americano de Arquitectos, al Royal Institute of British Architects, a la Sociedad Central de Arquitectos de Argentina, entre otras (Welch, 2021).

También ha recibido una gran cantidad de premios como el Design Honor del Salvardori Center en 2007 o el International Fellow de The Royal Institute of British Architects en 2006, entre otros muchos.

Rafael Viñoly, a pesar de su tan variada trayectoria, mantiene una coherencia en sus proyectos con una profunda relación entre la estructura, la construcción y la función².

Hoy en día, en el estudio trabajan explorando distintas alternativas de diseño y cómo se adaptan a la funcionalidad, los requisitos del proyecto, el coste de la construcción y el impacto urbanístico. Trabajan con modelos tridimensionales en maquetas, formando grupos de trabajo en los que rija la creatividad y se fomente el aprendizaje colectivo. **Buscan no solo un buen diseño arquitectónico, sino una estrecha relación con la ingeniería** en todas sus vertientes, como en las estructuras, la iluminación y la acústica. *“Las distintas cuestiones se abordan como un todo, compuesto por factores estéticos, funcionales, sociales, técnicos y económicos”* (Rafael Viñoly Architects, n.d.).

2.2 | Los “rascacielos cerilla” en Manhattan

Los rascacielos como tipología tienen un recorrido histórico que apenas abarca más de dos siglos. Como fruto del primer ascensor mecánico en el año 1857 y de los nuevos materiales que comenzaron a utilizarse para la construcción: el hierro y sus derivados, capaces de resistir tracciones, nace el primer rascacielos en Chicago con el *Home Insurance Building* de Le Baron Jenney en 1895.

El surgimiento en el siglo XIX de la tipología no significa que antes no se buscara construir en altura. Existen pirámides, catedrales, arcos, mucho anteriores, pero se trata de construcciones religiosas o conmemorativas. La superposición de plantas en altura no suponía ninguna ventaja práctica respecto a las construcciones tradicionales (Gallardo Llopis, 2005).

² En el anexo 2 se realiza una recopilación de todas las obras publicadas en la página oficial del estudio de Rafael Viñoly.

Los rascacielos llegaron acompañados de la Revolución Industrial, que supone otra de las razones para el desarrollo de estos. La población tendía a trasladarse a las ciudades, cerca de los nuevos puestos de trabajo. El incendio de Chicago de 1871 que acabó con edificios de poca altura con estructura de madera hizo que finalmente la balanza se decantara por edificios de mayor altura con materiales resistentes al fuego.

Los rascacielos proliferan en Chicago y Nueva York fundamentalmente, núcleos urbanos con poco espacio disponible para extenderse en horizontal. A lo largo de la breve historia de los rascacielos, los ingenieros y arquitectos han trabajado en el desarrollo de nuevos materiales de mayor resistencia hasta conseguir minimizar los elementos estructurales. Además, hoy en día se conoce de forma analítica el comportamiento de los edificios y no es necesario basarse en los antiguos ensayos de "prueba y error"; mediante programas informáticos se puede analizar la viabilidad estructural y constructiva de un proyecto.

Incluso hoy en día, se sigue innovando en el campo de los rascacielos: en la última década han surgido los "**rascacielos cerilla**" o "slender skyscrapers" que constituyen un subgrupo dentro de los rascacielos entre los que se encuentra el 432 Park Avenue, objeto de estudio.

Estos "rascacielos cerilla" han surgido en Manhattan fruto de la forma y condiciones particulares que tiene esta isla, principalmente debido al escaso espacio libre para edificar. Son producto de grandes inversiones y su ubicación se enfoca en el gran valor que tienen las vistas sobre Central Park; cada planta tiene un valor, por lo que **crecer en altura** es la mejor forma de rentabilizarlos y adecuarse a las demandas de los actuales "súper ricos", que son los únicos que tienen acceso a estas viviendas.

Estos rascacielos ya no se construyen para ser admirados desde la calle como peatón, sino para que desde su interior el propietario pueda ser partícipe de la calle como un observador en las alturas.

La mayoría de los "rascacielos cerilla" tiene un tratamiento continuo de fachada, con amplios vidrios o muros cortina, haciendo de sus **vistas el principal atractivo**. Es la esbeltez lo que los caracteriza y no tanto la altura, alcanzando proporciones que van de 1:10 a 1:23 (Willis, 2015); una torre puede ser muy alta y no por ello ser un rascacielos cerilla. El edificio más esbelto está actualmente en construcción y será el 111 57th Street, con 432 metros de altura y apenas 18 metros de base. Algunos ejemplos de esta tipología construida en Manhattan se encuentran en las siguientes imágenes.



Imagen 9 (derecha).
Render de la torre 111
West 57th Street.
Fuente: Torre 111
West (*Arquitectura
Viva, 2015*)

Imagen 10 (izquierda).
Foto aérea 53W53.
Fuente: Giles Ashford
(Ashford, 2020)



Imagen 11 (derecha). Render de Central Park Tower. Fuente: Central Park Tower (Extell, 2020)

Imagen 12 (centro). Render 100 East 53rd Street. Fuente: In Midtown East, the Seagram Building's New Neighbor (Gregor, 2015)

Imagen 13 (izquierda). Render de Madison Square Park Tower. Fuente: Williams New York (Finn, 2014)

La estrategia de este tipo de rascacielos es realizar **plantas pequeñas** y así elevar el mayor número de apartamentos posible con la finalidad de conseguir las mejores vistas de la zona. Estas plantas permiten limitar el número de apartamentos a uno o dos por planta³, haciendo de la exclusividad un lujo, sin importar la superficie de éstos. El hecho de que el acceso se produzca directamente a los apartamentos maximiza el área de venta y minimiza la zona destinada a la circulación vertical.

Otra característica común de los “rascacielos cerilla” es contar con **techos muy altos**, lo que también es una estrategia para crecer en altura; si se acumula a lo largo de toda la torre se aumenta su altura total. Todo el mecanismo de proyecto de estos edificios está dirigido a **incrementar la sensación de lujo y espacialidad**.

En las plantas bajas, que no cuentan con vistas tan espectaculares, se ubican algunos servicios para los residentes como gimnasios, piscinas, restaurantes y spas.

Se dice que son autóctonos de Nueva York por su legislación urbanística actual. Existe un concepto llamado FAR (Floor Area Ratio) por el que se fija un porcentaje de la parcela que se puede ocupar, pero sin limitar la altura; el resto de superficie pasa a ser un espacio público.

A pesar de que hoy en día constituyen el icono de la arquitectura de Manhattan, cuentan con importantes **movilizaciones contrarias** a su proliferación, apoyadas por la prensa local y los ciudadanos de clase media neoyorkina que llaman a estos rascacielos “torres de la desigualdad”.

³ Esta es una clara diferencia respecto a otros rascacielos del mundo. Por ejemplo, en Dubai se construyen altísimos rascacielos, pero con varios apartamentos por planta.

Estos “críticos” que han surgido en la última década fundamentan sus ideas en que estos altísimos rascacielos generan **sombras** los parques y calles adyacentes; sin embargo, estos edificios producen sombras muy largas y delgadas que cambian rápidamente de posición.

Otro punto en el que se apoyan es en que la mayoría de los propietarios no son residentes en Estados Unidos, por lo que **no tienen que pagar impuestos** a la ciudad si se encuentran en su residencia menos de la mitad del año. Es posible que, dado el aumento de estos edificios en los últimos años, se cambie esta ley a favor de los ciudadanos neoyorkinos.

Otro tema que preocupa a los ciudadanos es que este boom de edificios lujosos desmotiva a los promotores a centrarse en otro tipo de vivienda que sí sea accesible a los ciudadanos de Manhattan, pero generen un menor beneficio. Esta demanda de edificios ostentosos ha aumentado **los precios de las compras y alquileres** en toda la ciudad, gentrificando los barrios y obligando a la clase media a abandonar las viviendas que antes podían permitirse.

Sin duda alguna, nos encontramos ante **una de las grandes revoluciones arquitectónicas** contemporáneas, en las que la arquitectura acompañada de la técnica permite seguir innovando y creciendo en altura; los rascacielos cerilla, más que una proeza del proceso proyectual, lo son del proyecto estructural. Aunque hoy en día estos edificios se reserven a las clases más adineradas, es posible que en los próximos años aumente la oferta y, con ello, tengan precios accesibles para cualquier ciudadano. Sin embargo, es de esperar que entonces hayan surgido otras “torres de la desigualdad” aún más lujosa que levante una nueva ola de detractores.

2.3 | 432 Park Avenue

Emplazamiento

El edificio está situado en el barrio de **Midtown Manhattan**, en la isla de Manhattan en Nueva York, junto a la desembocadura del río Hudson. El barrio Midtown se encuentra entre Lower Manhattan, en el sur, y Uptown Manhattan, en el norte. El origen de estas tres zonas diferenciadas surge de los tres núcleos poblacionales de Manhattan en el siglo XVII unidos por Broadway, que todavía se conserva.

Se encuentra en un punto privilegiado de Manhattan; es posible desde esta gran estructura de hormigón poder ver toda la ciudad y levantarse sobre ella, dejando a los otros edificios como pequeños puntos sobre la retícula. En palabras de su promotor, Harry B. Macklowe “*es como la Mona Lisa. Excepto cuando no te mira él a ti, lo estás mirando desde donde sea que estés. No puedes escapar*” (Chaban, 2014).

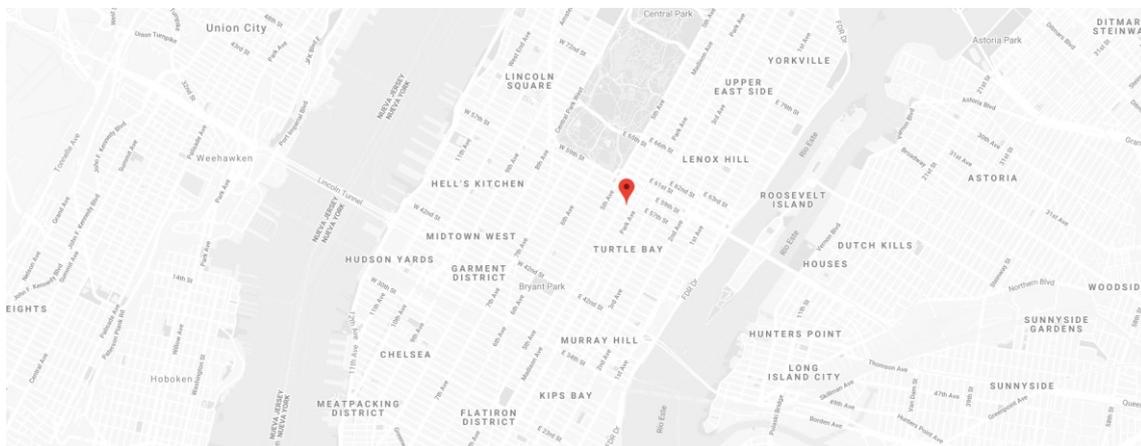


Imagen 14. Emplazamiento en la isla de Manhattan. Fuente: Google Maps

La ordenación urbanística de Manhattan resulta peculiar por su estricta retícula que surge fruto de la planificación urbanística de la ciudad en el siglo XIX. El plan contempla 12 avenidas principales norte-sur y una densa red de calles oeste-este (Gray, 2005).

El promotor Macklowe compró el edificio preexistente, el hotel Drake, durante el boom inmobiliario del 2006 y fue demolido en 2007. Este histórico hotel de 21 plantas se construyó en 1926 y era uno de los más lujosos de Nueva York durante el siglo XX. El solar quedó vacío hasta los inicios de la construcción de los cimientos del 432 Park Avenue en el año 2011.

El 432 Park Avenue se encuentra en esquina, recayendo a algunas de las avenidas principales de la isla, como se puede ver en el siguiente plano de emplazamiento.

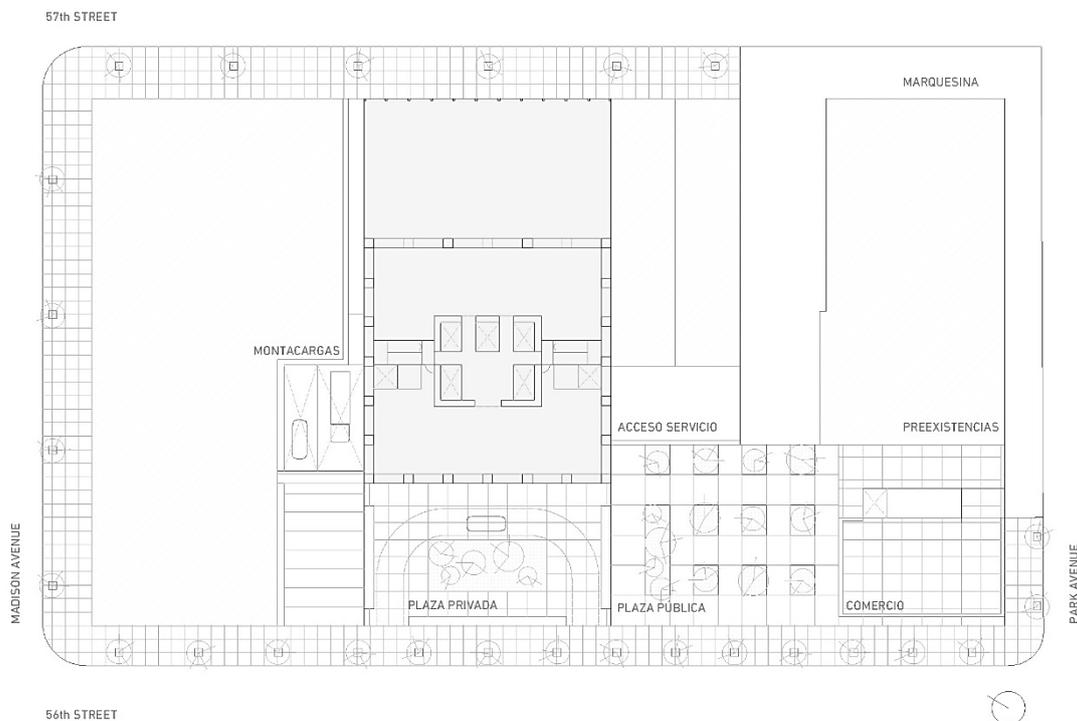


Imagen 15. Emplazamiento próximo. Fuente: reelaboración propia

Resulta de especial interés remarcar que el plan urbanístico de Nueva York obligó al equipo de arquitectos a dejar un amplio espacio público, retranqueando el edificio y haciendo que en su encuentro con el suelo se genere una gran plaza con pavimento duro con zonas ajardinadas en la 56th Street, que constituye el acceso principal al edificio. De forma opuesta, el encuentro con la calle 57th se realiza enrasando un volumen comercial a los edificios preexistentes que llega hasta la planta sexta, manteniendo una identidad propia, pero en constante diálogo con la torre que queda retranqueada.



Imagen 16. Vista desde 57th Street. Fuente: DBOX Portfolio (DBOX, 2013)

En la plaza de la 56th Street se encuentra un discreto elevador de coches que da acceso a un garaje privado y para los vehículos de abastecimiento. También cuenta con una plaza semi-privada con acceso rodado a los pies del edificio, marcando el acceso peatonal con una marquesina de vidrio que se extiende, acogiendo a los residentes, y se apoya en la estructura.

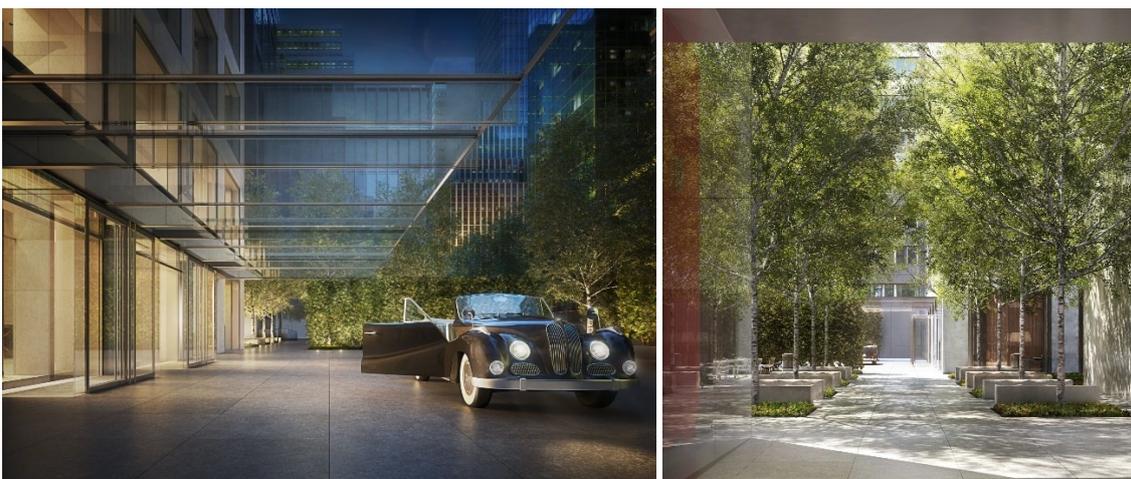


Imagen 17 (derecha). Acceso principal al edificio. Fuente: DBOX Portfolio (DBOX, 2013)

Imagen 18 (izquierda). Acceso al edificio y marquesina en voladizo. Fuente: DBOX Portfolio (DBOX, 2013)

Recayendo a Park Avenue existe un cubo transparente en su base y con vidrio coloreado en blanco que, a través de un voladizo, marca el acceso a la plaza.



Imagen 19 (derecha). Comercio desde la plaza pública. Fuente: Rafael Viñoly Architects (*Rafael Viñoly Architects, 2021*)

Imagen 20 (izquierda). Comercio desde Park Avenue con 56th Street. Fuente: Rafael Viñoly Architects (*Rafael Viñoly Architects, 2021*)

Composición

El esbelto “rascacielos cerilla” se levanta simétrico en sus cuatro caras, ofreciendo la misma fachada en todos los lados del prisma, sin ninguna variación, exceptuando los túneles de viento. Son **la simetría y la simplicidad** las características definitorias de este edificio. La estructura queda vista en el exterior construida con hormigón armado con cemento Portland blanco.



Imagen 21. Rascacielos 432 Park Avenue en una vista nocturna con el entorno. Fuente: Rafael Viñoly Architects (*Rafael Viñoly Architects, 2021*)

El empleo de una estructura tan ordenada y ortogonal da sensación de seguridad y estabilidad en un edificio tan extremadamente alto y delgado. En las plantas más altas en las que se puede apreciar el paisaje neoyorkino se tiene la sensación de "vivir en el aire".

Esta configuración geométrica de líneas rectas y esbeltas **emula la retícula de las calles de Manhattan**, con un volumen puro, dotando de una imagen inconfundible al 432 Park Avenue. Es la configuración estructural la que da una respuesta a la relación con el lugar y se levanta sobre la ciudad con un lenguaje puro propio.



Imagen 22
(derecha). Basura
para papel
Hoffmann
Gitterwerk.
Fuente: Neue
Galerie

Imagen 23
(izquierda).
Composición en
retícula del
rascacielos 432
Park Avenue.
Fuente: DBOX
Portfolio (DBOX,
2013)

También cabe citar que en algunas publicaciones se enuncia que el arquitecto Viñoly se inspiró en el **cuco de basura metálico** del diseñador austriaco **Josef Hoffmann** datado en el año 1905; ambos son diseños sencillos con una estructura en forma de rejilla cuadrada expuesta al exterior.

La composición del edificio se rige por su propia estructura, con una **modulación** estricta, siendo en planta un cuadrado de 28,35 metros⁴ de lado que se eleva hasta los 425,5 metros, llegando a contar con 89 plantas incluyendo la planta baja (Pomroy, 2015). La esbeltez que alcanza mantiene una relación de 1:15⁵.

En cada nivel existen **seis huecos cuadrados idénticos** de 3,05 metros⁶ (Pomroy, 2015) en cada lado separados por pilares de hormigón armado con una dimensión en fachada de 1,40 metros⁷, pero que varían en profundidad, desde 1,63 metros en la parte inferior hasta 51 centímetros en la parte superior.

El núcleo está centrado y está formado en planta por un cuadrado de 9,14 metros de lado, construidos con pantallas de hormigón armado (Alberts, 2014). Además, en él se concentran todas las instalaciones y la comunicación vertical del edificio, permitiendo así que la distancia del núcleo a la fachada sea constante y se genere un espacio completamente diáfano.

En un principio se concibe como un prisma cuadrado puro, pero, por razones estructurales, tuvo que subdividirse en seis partes, de doce plantas cada una, apiladas dejando un hueco dos plantas para

⁴ La modulación se realiza empleando el sistema anglosajón de unidades en la que 28,35 metros equivalen a 93 pies

⁵ $425,5/28,35 = 15,01$

⁶ $3,05 \times 3,05 \text{ m}^2$ equivalen a 10×10 pies cuadrados

⁷ El cálculo es orientativo a partir de planos y de la medida de un lado de la planta menos seis veces el lado de un hueco

dejar pasar el viento con una forma curva en su interior, haciéndolo más aerodinámico y reduciendo así el empuje que este podría tener al tener una terminación en aristas formando un ángulo recto.

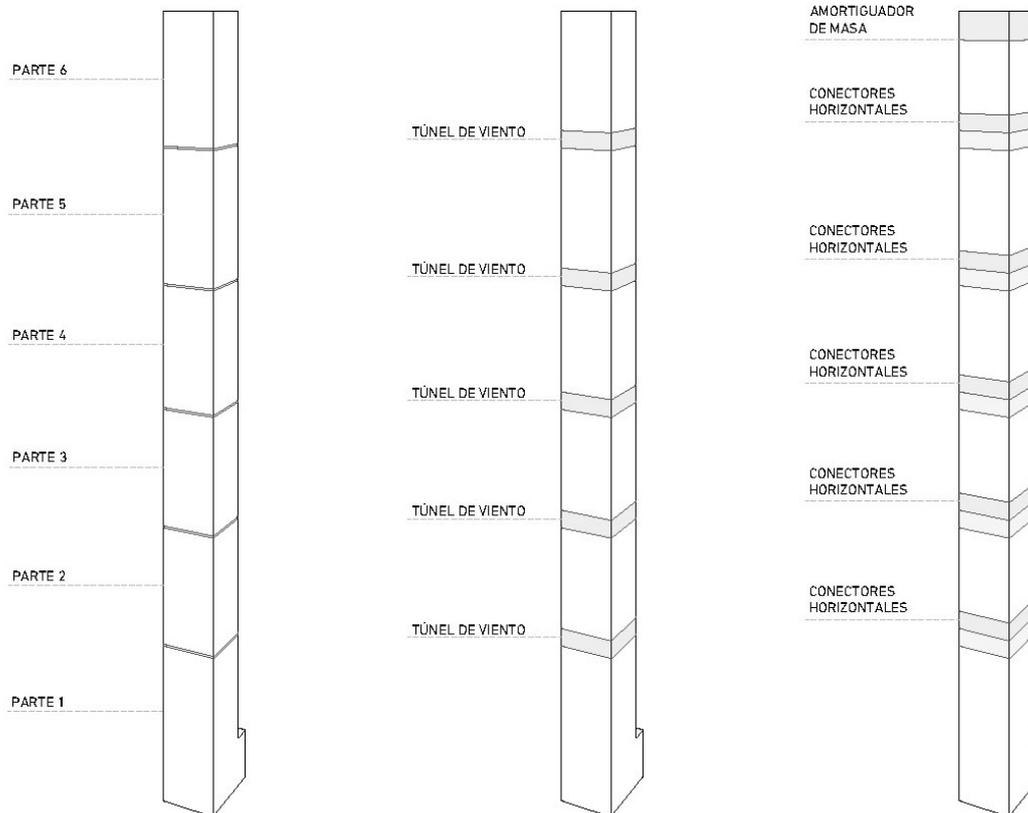


Imagen 24. Esquema partes del rascacielos. Fuente: reelaboración propia

Funcionalidad

El programa y altura del edificio varió desde la demolición del edificio anterior que se encontraba en el solar hasta la finalización de su construcción en 2015, que fue posponiéndose debido a la crisis del 2008, pasando por manos de distintos promotores y prestamistas. En un principio se proyectó como un edificio de oficinas, hotel y vivienda; hoy en día solo cuenta con viviendas y oficinas, aunque los planos publicados siguen incluyendo el hotel en sus alzados.

En la **parte inferior del edificio** se encuentran aquellos servicios destinados a los residentes, tales como: alojamiento para el personal, salas de reuniones, salas de conferencias, sala de proyecciones, un restaurante abierto a una terraza jardín recayente a la 57th Street, un spa, un gimnasio, una piscina, espacios de almacenamiento independientes, bodegas y un garaje subterráneo al que se accede desde 56th Street, como se ha indicado anteriormente (Rafael Viñoly Architects, n.d.).



Imagen 25. Piscina interior a doble altura. Fuente: DBOX Portfolio (DBOX, 2013)
Imagen 26. Lounge a doble altura. Fuente: DBOX Portfolio (DBOX, 2013)

Según el propio Rafael Viñoly, en la conferencia sobre el 432 Park Avenue en Nueva York (Viñoly, 2014), para proyectar viviendas de lujo en un entorno en el que cada pie cuadrado cuesta entre 6.000 y 8.000 dólares, “¿quién en el mundo con esa cantidad de dinero no querría hacer lo que quisiera con el espacio?”. Es por ello por lo que la **liberación del espacio de elementos estructurales y su flexibilización** para la libre distribución es una de las premisas fundamentales y generadoras de proyecto. La utilización del núcleo y los pilares en fachada permiten cumplir con este requisito.

La colocación del núcleo cuadrado en la zona central permite que alrededor de éste se genere una zona de tránsito, estableciendo una circulación clara en las zonas más interiores y menos iluminadas y dejando las estancias recayendo a fachada.

La retícula de la fachada se plasma en el interior, pero revestida con yeso laminado, extendiendo el carácter minimalista hasta las viviendas. Una de las características a destacar es la **altura libre de las viviendas de 3,8 metros**, muy relacionada con el aspecto lujoso y destinada al público tan exclusivo que quiere abarcar. El empleo de escaleras de ida y vuelta en el núcleo a las que se añade un tercer tramo permite alcanzar estas alturas en las viviendas.

El espacio que ocupan los grandes vidrios en fachada entre los pilares, lejos de parecer un obstáculo para la distribución interior, se aprovechan con un **zócalo** que sirve como lugar estancial desde el que disfrutar de las vistas de toda la ciudad.



Imagen 27 (derecha). Zócalo con acabado en piel. Fuente: DBOX Portfolio (DBOX, 2013)
Imagen 28 (izquierda). Zócalo con acabado en mármol blanco. Fuente: DBOX Portfolio (DBOX, 2013)

En cuanto al interior, lo más atractivo y en relación con el lujo en Manhattan es la posibilidad de **acceso a la luz natural y vistas lejanas**, elementos que casi nadie tiene en una ciudad tan densificada. A lo largo de la historia los ricos, quienes pueden acceder a las edificaciones más exclusivas, siempre han construido torres para “alejarse” de los pobres, pero el propio arquitecto señala que “*al final todo el mundo tiene que bajar y caminar por la calle*” (Pomroy, 2015).



Imagen 29. Ventanas en retícula de un apartamento. Fuente: DBOX Portfolio (DBOX, 2013)

El rascacielos cuenta con **147 viviendas**: 122 de lujo de uno a seis dormitorios en las plantas 34 a la 90, áticos de la 91 a la 96, y 25 estudios (las unidades más pequeñas que alberga con 32,6 m²) en las plantas 28 y 29. Las unidades con mayor superficie llegan a alcanzar 766,9 m².

Cada planta ofrece hasta un máximo de cuatro viviendas independientes a las que se accede a través de dos núcleos de comunicación vertical. Existen distintas tipologías repartidas en el edificio y a continuación se van a exponer algunas representativas.

Tipología de media planta

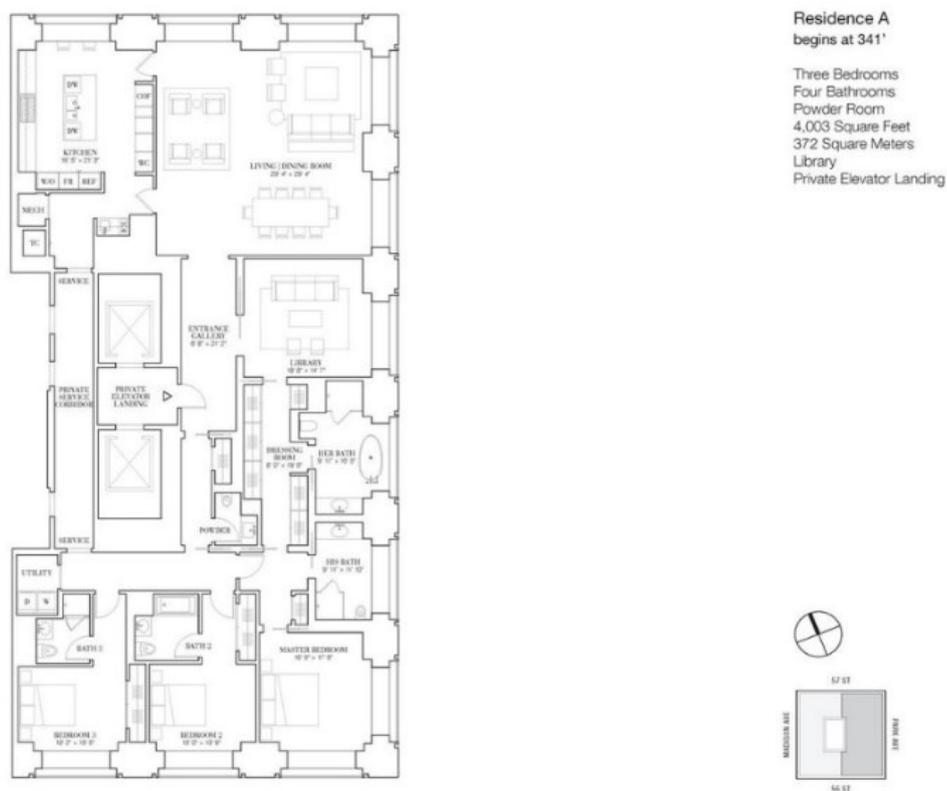


Imagen 30. Planta vivienda tipo A plantas 35-37. Fuente: Douglas Elliman/Buy (Douglas Elliman, n.d.)

Tipología de planta completa

432PARKAVENUE

**34th Floor
Proposed Floor Plan
Option A**

- Begins at 341'
- Approx. 8,088 sq ft
- 5 Bedrooms
- 6 Bathrooms
- 2 Powder Rooms
- Formal Dining Room
- Eat-in Kitchen
- Library/Den
- Private Elevator Foyer
- Private Service Entry with Elevator

Delivered in White Box Condition:

- Concrete Floors and Ceilings
- 15.5' High Ceilings
- 10x10 Windows

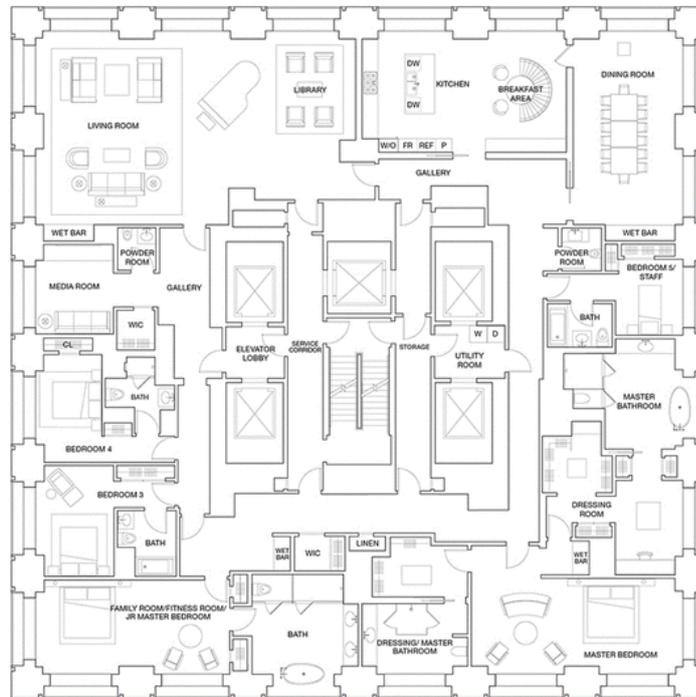


Imagen 31. Planta vivienda tipo A planta 34. Fuente: Douglas Elliman/Buy (Douglas Elliman, n.d.)

Tipología de un cuarto de planta

**Residence A
Floors 77-84**

- 2,633 sf
- 245 sm
- 3 Bedrooms
- 3 Baths
- Private Elevator Landing

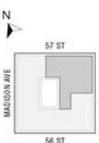


Imagen 32. Planta vivienda tipo A plantas 77-84. Fuente: Douglas Elliman/Buy (Douglas Elliman, n.d.)



Imagen 34 (derecha). Cocina diseñada por Deborah Berke Partners. Fuente: "432 Park — classically modern apartments offering remarkable vistas" (Deborah Berke Partners, 2020)

Imagen 35 (izquierda). Distribuidos y estares diseñados por Deborah Berke Partners. Fuente: "432 Park — classically modern apartments offering remarkable vistas" (Deborah Berke Partners, 2020)

Problemáticas

Cuando se realiza una sencilla búsqueda en internet sobre el 432 Park Avenue, más que información, te asaltan decenas de artículos periodísticos que ponen en el punto de mira los problemas que, tras la puesta en servicio del edificio, asaltan a sus residentes. La mayoría de ellos son meras opiniones de los vecinos que habitan el rascacielos y todas sus quejas se dirigen hacia la gran altura del edificio. Tratan de captar la atención con **titulares sensacionalistas** nombrando a personas de éxito, como Jennifer López, que vendió su vivienda en el 432 Park Avenue tras un año viviendo allí.

Las quejas han ido en aumento durante estos seis años en los que el edificio ha estado en servicio, a medida que los problemas empezaban a materializarse. Las más habituales tienen que ver con el **ruido** generado por el aire que hacen vibrar los tabiques y que se cuela en forma de ráfagas de aire por el hueco del ascensor. También se centran en el ruido al tirar la basura al vertedero desde alturas semejantes alturas.

Ha habido una serie de **inundaciones** en el edificio; la primera la planta 60 cuando falló una tubería; la segunda tan solo cuatro días después en el piso 74 que inundó el hueco de los ascensores y los dejó inutilizados durante días, obligando a los residentes a hacer cola para poder subir a sus viviendas de lujo durante semanas. Ambos problemas tuvieron su origen en plantas técnicas que, como muchos aseguran, son solo un mecanismo para construir viviendas cada vez más altas y, por tanto, más caras (Chen, 2021).

Es inevitable que un edificio no se mueva con el viento, pero la fuerza aumenta conforme lo hace la altura. Una noche un ascensor se paró e hizo que uno de sus residentes permaneciera allí hora y media; las oscilaciones del viento provocaron que los cables del hueco del ascensor se golpearan, frenándolo en seco.

Todos estos problemas han ido sumándose y se han traducido en **reparaciones millonarias**. Los gastos de comunidad se incrementaron en un 40% en 2019 y el seguro en 2020 subió un 300% (Peirón, 2021).

Muchos de estos problemas son comunes a los "rascacielos cerilla" en Nueva York, según afirman los ingenieros que han estado trabajando en estos edificios. Cabe esperar que, de cara a los nuevos rascacielos que ya colonizan el skyline de Manhattan, pueda ponerse solución y evitar todos estos problemas antes de que aparezcan.

3 | Planos redibujados

Hoy en día no existen publicaciones físicas ni en internet que contengan planos con la suficiente claridad o calidad, por lo que se ha decidido redibujar los planos en planta de la estructura y los alzados para su posterior modelado en AutoCad para exportarlo a SAP2000. Son una estimación a partir de algunos datos conocidos, como la dimensión de la huella de la planta y una reconstrucción de los alzados a partir de la planta y con la ayuda de otras herramientas como *Google Maps*.

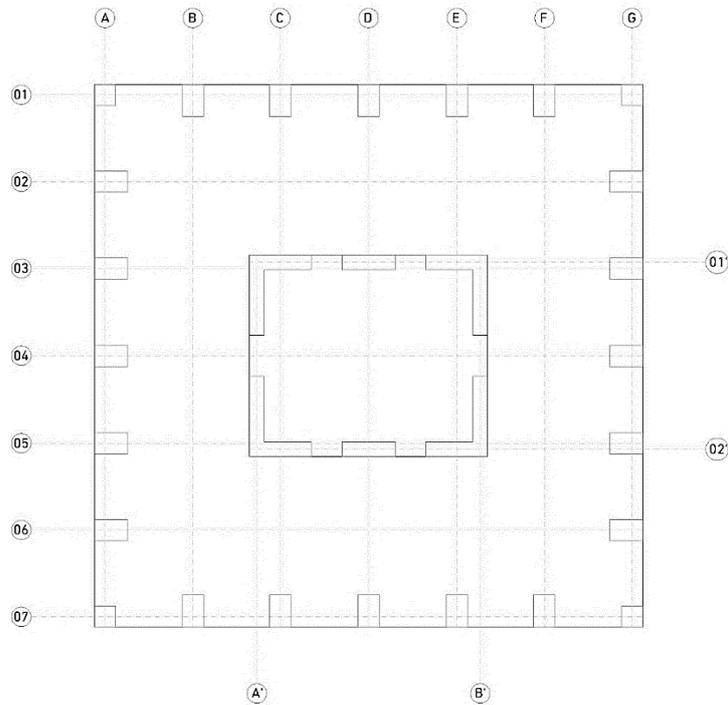


Imagen 36. Plantas estructurales inferiores. Fuente: reelaboración propia

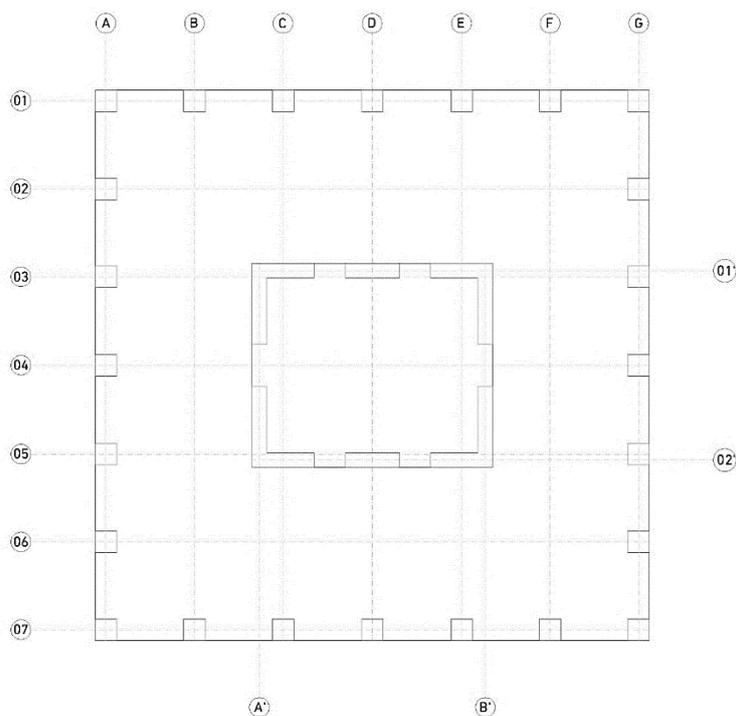
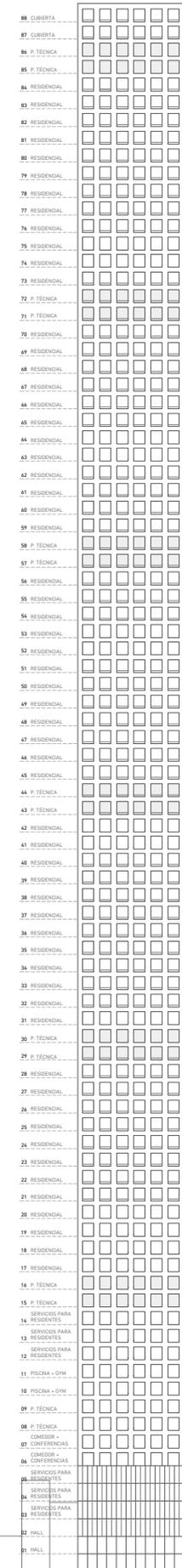
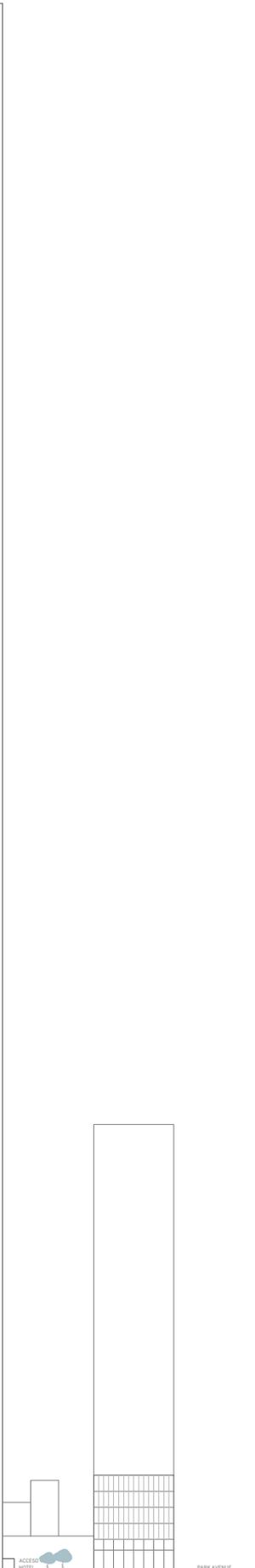
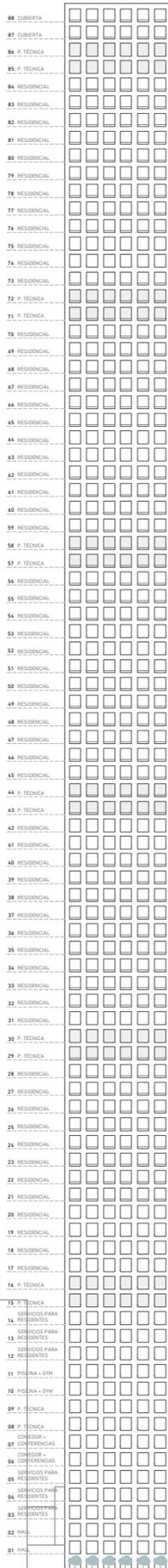
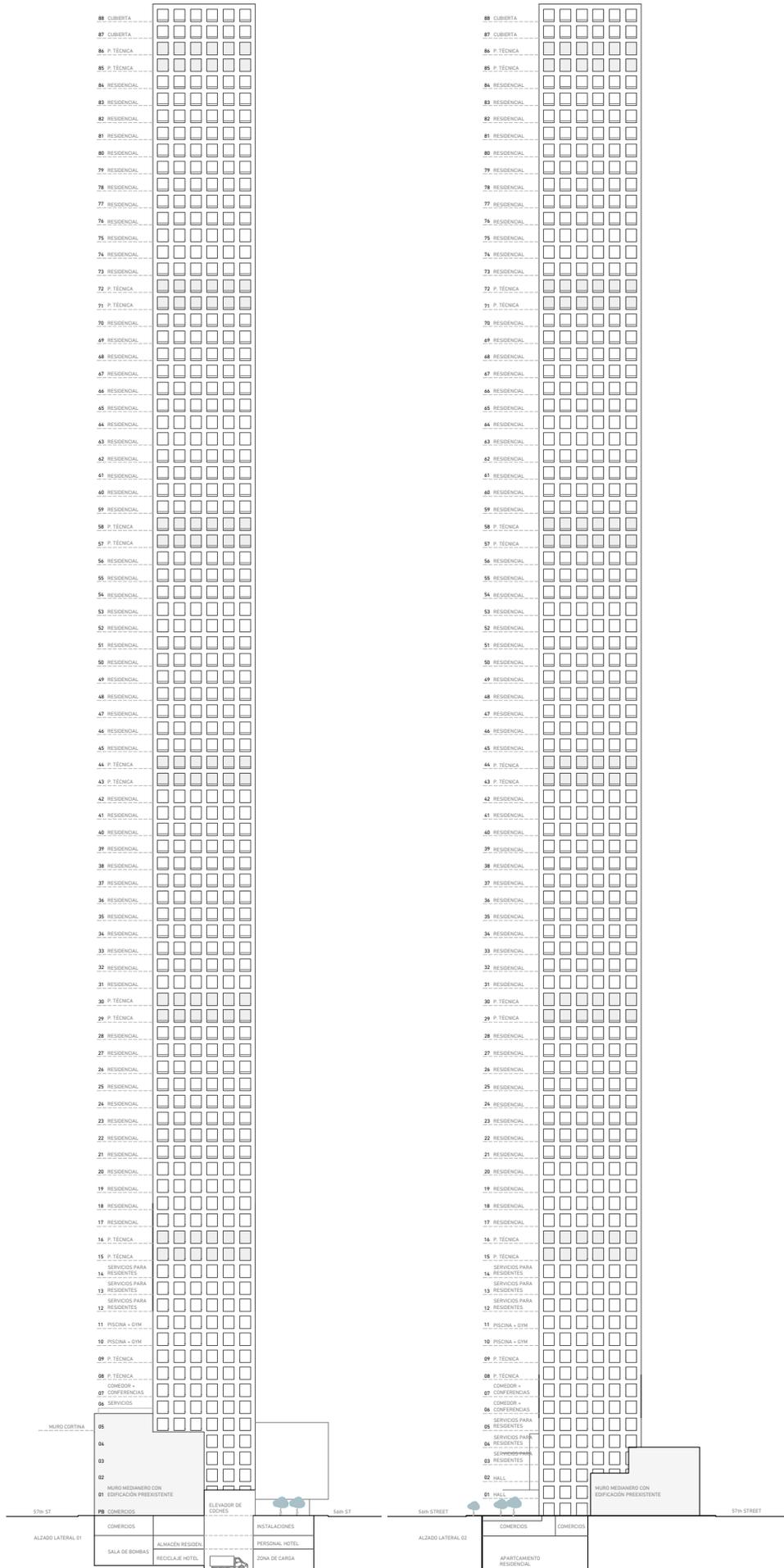


Imagen 37. Plantas estructurales superiores. Fuente: reelaboración propia





4 | Análisis constructivo y estructural

La estructura está compuesta por una “columna vertebral”, **el núcleo central** con las instalaciones y la comunicación vertical, y los **pilares** dispuestos en el perímetro, ambos construidos con hormigón armado. Además, cuenta con tres plantas de sótano construidas con muros pantalla sobre los que apoya el rascacielos y acaba con una cubierta plana.

Los cimientos son esenciales para la estabilidad de los “rascacielos cerilla”. En el caso del 432 Park Avenue las zapatas se anclan a la roca de Manhattan con una profundidad de entre 18 y 21 metros (Reid, 2019).



Imagen 38. Sótano y muros desde 57th Street. Fuente: 432 Park Avenue, New York City - timelapse of construction, minuto 0:19 (Construction News, 2015)



Imagen 39. Armaduras de espera en el sótano. Fuente: 432 Park (Marcus et al., 2018)

El concepto estructural consiste en un esqueleto exterior que queda visto y que configura **pórticos de vigas y pilares conectados al núcleo central** mediante estabilizadores cada doce plantas, en las áreas técnicas, evitando así invadir el espacio de los apartamentos (WSP, 2017). Como ya se ha enunciado anteriormente, la dimensión de fachada de los pilares de 1,40 metros, constante en toda su altura, variando la profundidad de éstos, con 1,63 metros de espesor en la parte inferior del edificio y de 0,51 metros de espesor en la parte superior.

Las **losas macizas de hormigón** de las plantas inferiores son de 25 cm y de las superiores son de 40 cm de espesor (Mazzara, 2016) para combatir la aceleración del viento. Los muros de hormigón armado del núcleo también varían su sección, desde 76 cm en las plantas inferiores hasta 30 cm en la parte superior (The Architect's Newspaper, 2014).



Imagen 40. Vista interior de la losa maciza y puntales. Fuente: 432 Park (Marcus et al., 2018)

Imagen 41. Andamiaje interior. Fuente: Fuente: 432 Park Avenue by Rafael Viñoly (Lalueta, 2013)

Puesto que se trata de un rascacielos de gran altura, la resistencia del hormigón no será constante en todas las plantas. Se emplea **HA-97** en las plantas inferiores y **HA-70** en las superiores; el empleo de hormigones de distinta calidad permite aumentar la rigidez y reducir el tamaño de los elementos de la estructura. En los elementos estructurales de fachada se emplea **cemento Portland blanco** y en los que quedan ocultos se emplearon **mezclas sostenibles con materiales puzolánicos** que reemplazan hasta el 70% del cemento Portland (Marcus et al., 2018). El hormigón debe ser lo suficientemente plástico para garantizar una compactación y bombeo adecuado. En total se emplean 12.500 toneladas de barras de acero (Marcus et al., 2018) y 57.000 metros cúbicos de hormigón (Rehana, 2015).

Todo el hormigón utilizado en la estructura del 432 Park Avenue se realiza con una relación agua-cemento de 0,25. Como la **estructura queda expuesta** se requería una muy buena colocación del hormigón en obra, requiriendo que éste fuera bombeable y con un bajo calor de hidratación; las bajas temperaturas permitieron una mínima contracción del hormigón (Marcus et al., 2018).

Trabajan conjuntamente dos empresas durante la construcción: Doka, encargada de los encofrados de la estructura, y la constructora Rogers & Sons, brindando la seguridad necesaria para la compleja construcción de este rascacielos.



Imagen 42 (derecha). Construcción del núcleo previa al perímetro y grúa. Fuente: 432 Park Avenue by Rafael Viñoly (Lalueta, 2013)
Imagen 43 (izquierda). Grúa conectada a la estructura y elevador. Fuente: 432 Park Avenue (Rafael Viñoly Architects, 2021)

Al comienzo de la obra, se utilizan dos grúas para los niveles inferiores y accesibles con éstas, pero en las plantas superiores, tal y como se puede apreciar en las fotografías, se emplea una pluma distribuidora de hormigón, que se desplaza de forma ascendente cada tres niveles de trabajo (Structurae, 2015). En todo momento el núcleo se construye con anterioridad a los pilares del perímetro (ver imagen 42).



Imagen 44. Vista aérea de la pluma en el núcleo. Fuente: Concrete homes; 432 Park Avenue (Rehana, 2015)
Imagen 45. Vista interior del amortiguador de masa y de la pluma. Fuente: Concrete homes; 432 Park Avenue (Rehana, 2015)

Se emplea el sistema de **cimbrado** "Staxo 100" diseñado para soportar grandes cargas y alturas, así como proporcionar la suficiente seguridad durante la construcción. Incorpora peldaños antideslizantes, elementos de seguridad frente a caídas para el personal y un montaje y desmontaje seguros (Rehana, 2015).

Los sistemas de **encofrado** Doka resultan esenciales para la construcción del 432 Park Avenue, el cual tiene una planta constante para todas las alturas. Se emplea el encofrado "Super Climber SCP" trepante y reutilizable, permitiendo ahorrar material y tiempo, y, en consecuencia, tener un menor coste.

El **encofrado de tipo trepante** es de acero inoxidable para los pilares y las vigas que, como permanecen sin tratar requieren de un elevado nivel de calidad del acabado del hormigón. La posibilidad de reutilizar el encofrado permite que se vaya desplazando en altura sin interrumpir la construcción gracias al trepado automático, permitiendo que cada nivel se construya en aproximadamente 3,5 días (aunque las plantas técnicas sí requirieron algo más de tiempo).

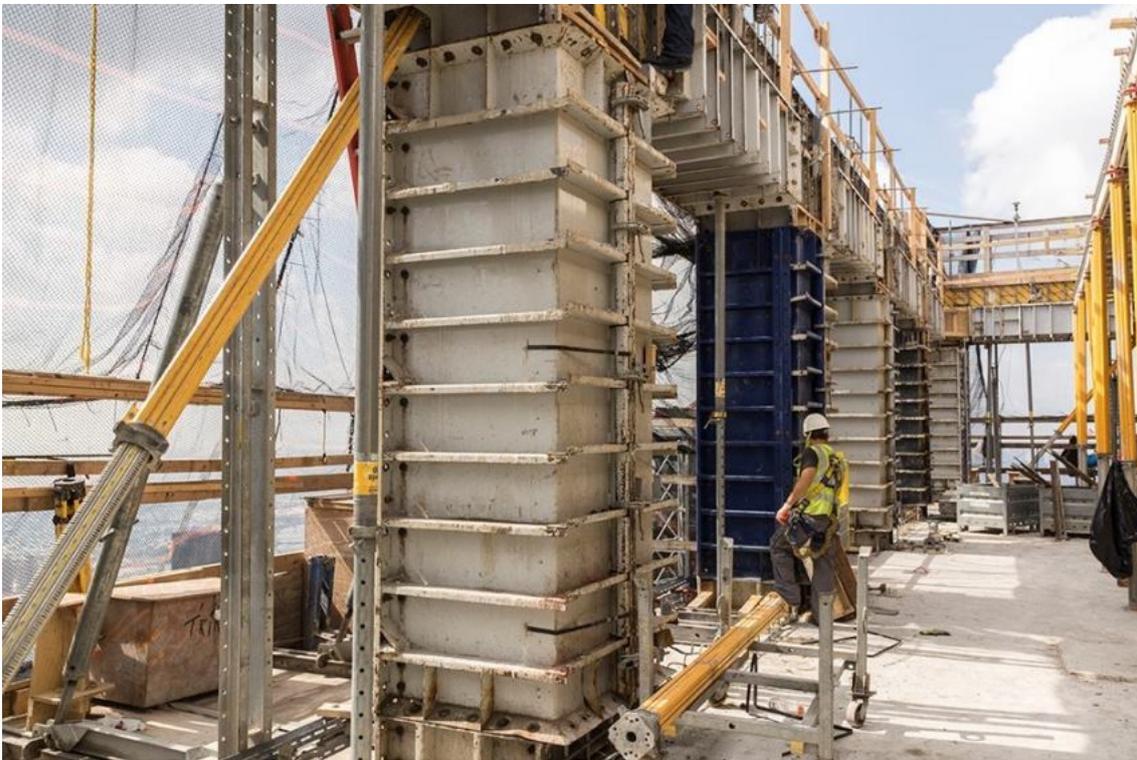


Imagen 46. Imagen encofrados metálicos en pilares y red de seguridad. Fuente: Concrete Construction (Rehana, 2015)

El sistema de encofrado requiere de cinco niveles: los dos inferiores para la instalación del sistema de elevación, un tercero los trabajos de limpieza y desencofrado, un cuarto para el vertido de hormigón y un quinto con una plataforma suspendida (Structurae, 2015).

Los **requisitos de seguridad** en la construcción en Nueva York son bastante estrictos, a lo que hay que sumar la gran altura del edificio y la escasez de espacio circundante a la obra, además situado en el corazón de Manhattan, en una zona de elevado tránsito. Se emplea una red que cubre los cinco niveles de trabajo señalados anteriormente.

4.1 Viento

La solución empleada para resistir las oscilaciones provocadas por el viento en este edificio tan alto y delgado requiere de un apartado exclusivo para la explicación de las soluciones adoptadas. Se aborda la problemática estructural de la incidencia del viento, como las vibraciones que provoca y la percepción de las oscilaciones por los ocupantes.

Para alcanzar los 425,5 metros que mide el rascacielos con una proporción 1:15 deben de emplearse soluciones particulares para que resista el empuje del viento, si no, en palabras jocosas de Viñoly, se movería como un *"gigante borracho... si te tomas un té, se derramaría por todo el espacio; y si tienes la suerte de tener un candelabro, estaría oscilando durante todo el rato"* (Viñoly, 2014). La **interacción entre el equipo de ingenieros y de arquitectos** es esencial en la toma de decisiones en esta fase del proyecto, implementando, como es característico del estudio de arquitectura, soluciones de ingeniería innovadoras.

La regularidad y simplicidad en el diseño del rascacielos son opuestas a la complejidad de su construcción, debiendo emplearse soluciones complejas como plantas técnicas que funcionan para el paso del viento, estabilizadores y/o espacios donde alojar amortiguadores de masa.

La solución tradicional consistiría en utilizar muros frente al esfuerzo cortante que influye en la estructura, pero esto no se ajusta a los objetivos del edificio, entre ellos la máxima flexibilidad posible en las plantas residenciales y las vistas sobre Manhattan desde todo el perímetro.

En un principio, Rafael Viñoly Architects proyecta una estructura prismática y cerrada, sin las plantas técnicas que hoy en día se aprecian. Realizando ensayos para los que tuvieron que trasladarse a Canadá, donde pudieron experimentar la aceleración a la que se verían sometidos, que en el peor de los casos sería de 590 m/s^2 ⁸.

Siguieron realizando ensayos con distintas soluciones y aceleraciones para que "el té no se derramara" hasta llegar a la adoptada actualmente; con el viento se generaban zonas de baja presión en la cara opuesta a la que incidía, haciendo que el edificio vibrase. Fue necesario modificar el diseño, dividiendo el edificio en grupos de 12 plantas apiladas y separadas por dos plantas técnicas, las cuales quedan abiertas, sin acristalamiento, al **paso del viento con unos recintos circulares** reduciendo el empuje que éste podría causar en el edificio, haciéndolo más aerodinámico; en estos espacios se colocan las instalaciones que sirven a los 6 pisos superiores y a los 6 inferiores (The Architect's Newspaper, 2014).

Con una aceleración de $78,5 \text{ m/s}^2$ ⁹ los habitantes ya no sentirían nada, pero sí vértigo al asomarse a las ventanas. Para evitar este problema se instalan en la azotea **dos amortiguadores de masa** que, junto con los túneles de viento, hacen que la aceleración sea inapreciable y se encuentre dentro de los límites establecidos por la normativa.

Los sistemas de amortiguación de masa sintonizada (AMS) se emplean normalmente como protección frente a sismos; uno de los primeros usos en una estructura esbelta se encuentra en el Highcliff, una torre construida en Hong Kong en 2003, aunque también su forma redondeada supone una ventaja frente al impacto que el viento pueda ejercer en su superficie (Reid, 2019).

El amortiguador de masa cuenta con dos cajas suspendidas de acero y hormigón, cada una con 650 toneladas, un peso pequeño respecto a la masa total de la estructura; estas cajas se apoyan sobre cables y cilindros hidráulicos. Se mueven con el edificio, pero su oscilación queda restringida por los sistemas de amortiguación, para impedir que puedan entrar en resonancia con el edificio y la estructura de éste pueda colapsar.

⁸ En el sistema de unidades anglosajón equivale a 60 mili-g

⁹ En el sistema de unidades anglosajón equivale a 8 mili-g

Pero *¿cómo está funcionando este amortiguador de masa?* Lo más sencillo es explicarlo de forma gráfica.

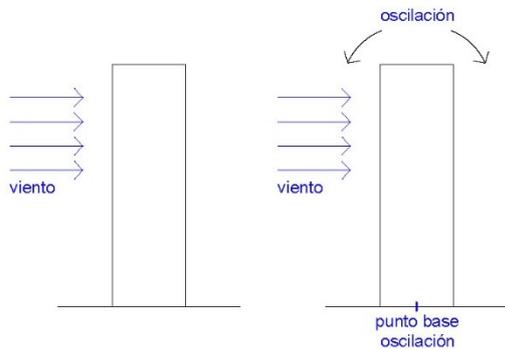


Imagen 47. Rascacielos sin amortiguador de masa. Elaboración propia

Si el edificio no cuenta con ningún mecanismo frente al viento, éste oscila en la dirección en la que se aplica esta fuerza respecto de su centro de gravedad en el suelo, pudiendo ocasionar graves daños en la estructura.

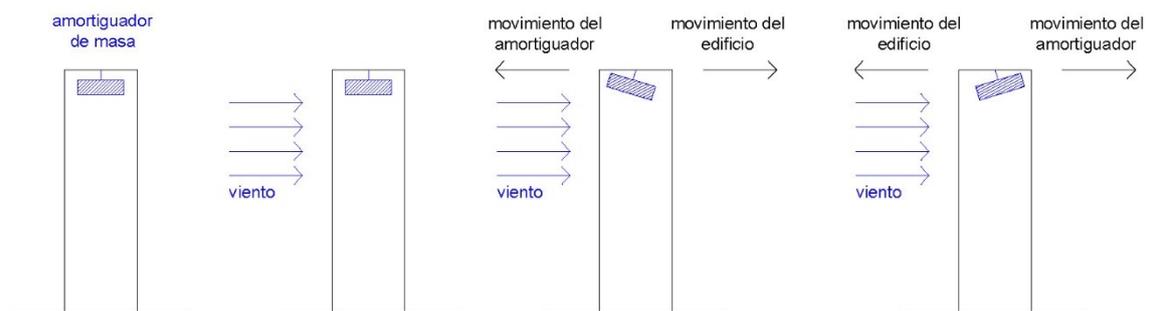


Imagen 48. Rascacielos con amortiguador de masa. Elaboración propia

Si se incorpora un amortiguador de masa, cuando se ejerce una fuerza sobre el edificio (viento) en una dirección y sentido, la inercia del amortiguador hace que aparezca una fuerza de sentido contrario, haciendo que la oscilación se reduzca. Cuando el edificio se mueve en el otro sentido el amortiguador se mueve en el opuesto, evitando así el balanceo del rascacielos.

5 | Modelo de análisis

Para poder analizar el edificio se ha tratado de plasmarlo con la mayor fidelidad posible. La **escasa información publicada** sobre el edificio, junto con sus grandes dimensiones (no en planta, sino en altura) hace que haya tenido que simplificarse su estructura, pero aproximándola lo máximo posible a la realidad. Para ello se ha dibujado la estructura de hormigón armado con líneas y elementos 3D para en AutoCAD para poder exportarlo posteriormente a SAP2000, el programa que permitirá conocer el comportamiento estructural del edificio.

5.1 | Modelización

Las plantas son todas ellas idénticas y se repiten en altura; la única distinción que se ha tenido en cuenta es que, en las últimas seis plantas, en las que se encuentran los áticos, no existirán tres huecos en el forjado (para los cinco ascensores), sino únicamente dos (ver imágenes 51 y 52). Se ha prescindido de la modelización del sótano entendiéndolo que funcionará como un empotramiento en la base del edificio.

Puede parecer sencillo, pero, sin embargo, se han generado un total de más de 46.000 elementos para la exportación, lo cual ha contribuido a ralentizar el cálculo y a evitar algunos cálculos más "pesados" para el ordenador.

El modelo de AutoCAD ha contemplado el dibujo de 3Dcaras para los forjados y las pantallas del núcleo central, y elementos lineales para los pilares, las vigas y los zunchos. Este procedimiento se ha llevado a cabo concienzudamente para evitar caer en errores de la geometría que después se traducirán en estructuras imposibles o mal modelizadas.

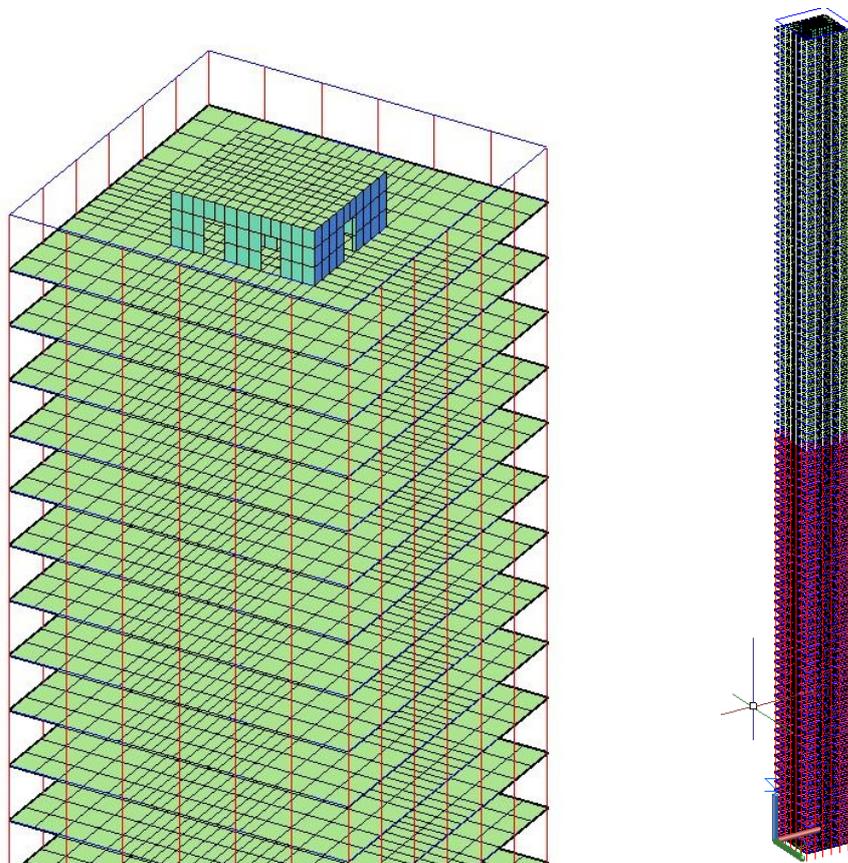


Imagen 49 (derecha). Modelización en AutoCAD: parte superior. Fuente: elaboración propia
Imagen 50 (izquierda). Modelización en AutoCAD. Fuente: elaboración propia

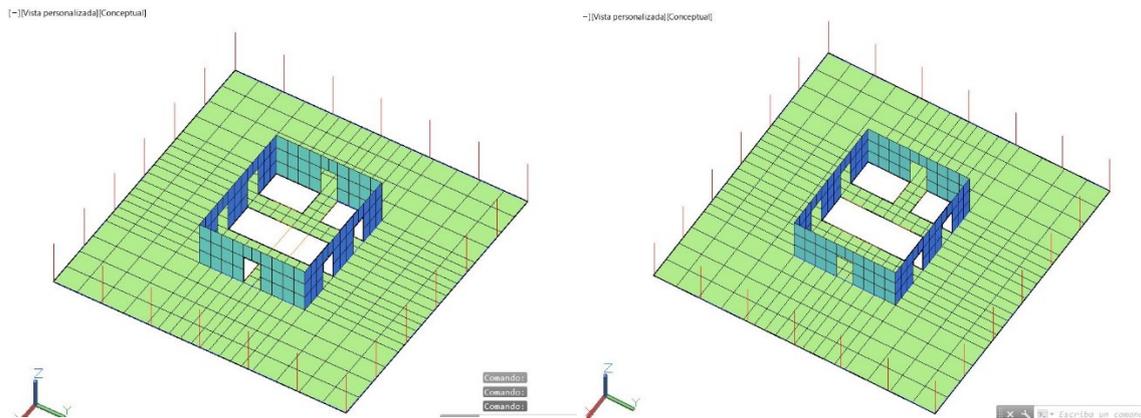


Imagen 51 (derecha). Modelización en AutoCAD: planta tipo. Fuente: elaboración propia
Imagen 52 (izquierda). Modelización en AutoCAD: planta ático. Fuente: elaboración propia

Se han separado todos los elementos en distintas capas de AutoCAD con colores diferenciados, aunque no es estrictamente necesario, puesto que en SAP2000 no se trabajará con estas capas, sino con grupos.

Una vez finalizado el modelo se ha procedido a su exportación a SAP2000 convirtiéndolo previamente a un formato de archivo con extensión .dxf.



Imagen 53. Captura SAP2000: resultado de la importación del dxf. Fuente: elaboración propia

5.2 | Definición de materiales

Se han definido cuatro tipos de hormigón que conforman la estructura del edificio: **HA-40, HA-70, HA-100 y HA-140**. No existe información suficiente sobre los materiales que se han empleado, por lo que el empleo de hormigón estructural con las resistencias características indicadas anteriormente son suposiciones que se hacen en el presente trabajo.

Se utiliza el hormigón HA-40 de menor resistencia para los elementos más extensivos, las losas. Para las vigas y pilares se emplea hormigón con una resistencia decreciente en altura, en la parte inferior se emplea HA-140, en la intermedia HA-100 y en la superior HA-70.

De los cuatro hormigones empleados, en la plantilla del profesor David Gallardo Llopis únicamente figura el HA-40, por lo que los otros tres se tendrán que definir manualmente. Para poder definirlos en SAP2000 será necesario conocer para cada hormigón armado la resistencia característica (f_{ck}) y el módulo de deformación (E), definiéndose éste en la EHE-08 como:

$$E=8500 \times \sqrt[3]{f_{cm}}$$

Siendo f_{cm} la resistencia media del hormigón:

$$f_{cm}=f_{ck}+8$$

| Material | fck (N/mm2) | fcm (N/mm2) | E (kN/m ²) |
|----------|-------------|-------------|------------------------|
| HA-70 | 70 | 78 | 36317598.79 |
| HA-100 | 100 | 108 | 40478726.83 |
| HA-140 | 140 | 148 | 44961366.02 |

Tabla 1. Propiedades de los materiales empleados. Fuente: elaboración propia

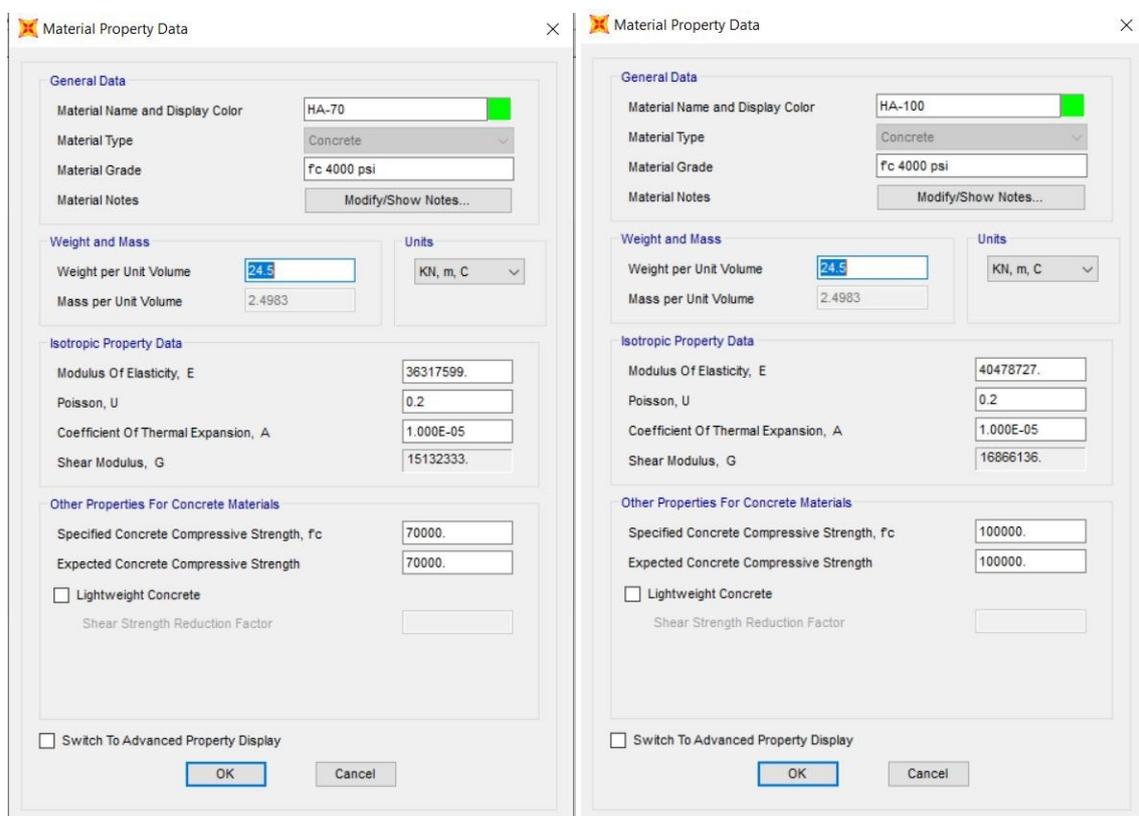


Imagen 54 (derecha). Captura SAP2000: Definición del material HA-70. Fuente: elaboración propia

Imagen 55 (izquierda). Captura SAP2000: Definición del material HA-100. Fuente: elaboración propia

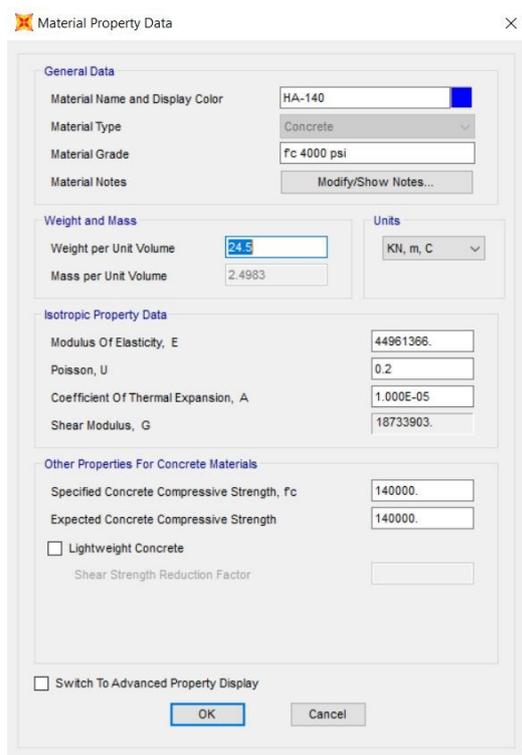


Imagen 56. Captura SAP2000: Definición del material HA-140. Fuente: elaboración propia

5.3 | Definición de las secciones

Para definir la sección de los elementos estructurales, de nuevo han tenido que realizarse una serie de hipótesis. La sección de los pilares, las vigas y las losas es conocida o deducible a partir de otros elementos y los planos redibujados (consultar apartado 2.3: Planos redibujados y 3: Análisis constructivo y estructural). Se ha optado por colocar vigas en torno al núcleo central que se conectarán con la losa y ésta a su vez con los pilares de la fachada, uniendo toda la estructura.

De la misma forma que se han distinguido tres partes en altura en el edificio para la asignación del hormigón armado, con las secciones ocurre lo mismo, y se obtienen las siguientes dimensiones de elementos con sus correspondientes materiales:

| Elemento | Grupo 01 | | Grupo 02 | | Grupo 03 | |
|--------------------------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| | Sección (m) | Material | Sección (m) | Material | Sección (m) | Material |
| Losa | 0,25 | HA-40 | 0,40 | HA-40 | 0,40 | HA-40 |
| Núcleo | 0,76 | HA-140 | 0,76 | HA-100 | 0,30 | HA-70 |
| Pilares | 1,63x1,40 | HA-140 | 1,63x1,40 | HA-100 | 0,51x1,40 | HA-70 |
| Vigas de fachada ¹⁰ | 1,63x1,20 | HA-140 | 1,63x1,20 | HA-100 | 0,51x1,20 | HA-70 |
| Vigas núcleo ¹¹ | 0,76x0,25 | HA-140 | 0,76x0,40 | HA-100 | 0,30x0,40 | HA-70 |
| Zunchos ¹² | 0,25x0,25 | HA-140 | 0,40x0,40 | HA-100 | 0,40x0,40 | HA-70 |

Tabla 2. Secciones de barras y 3Dcaras: dimensiones y materialidad. Fuente: elaboración propia

¹⁰ Se ha adoptado la misma dimensión *b* que para los pilares y la dimensión *a* definida gráficamente

¹¹ Se ha adoptado la misma dimensión *b* que las pantallas del núcleo y la dimensión *a* del espesor de la losa de forjado

¹² Se han adoptado las dimensiones *a* y *b* del espesor de la losa de forjado

Se empleará por defecto el armado de SAP2000 y, posteriormente, se evaluará el cumplimiento de las secciones conforme a la normativa.

Las uniones de todos los elementos entre ellos, que las genera automáticamente SAP2000 asignando un punto en cada encuentro entre barras, 3Dcaras y barras-3Dcaras, se consideran rígidas en esta primera hipótesis de partida.

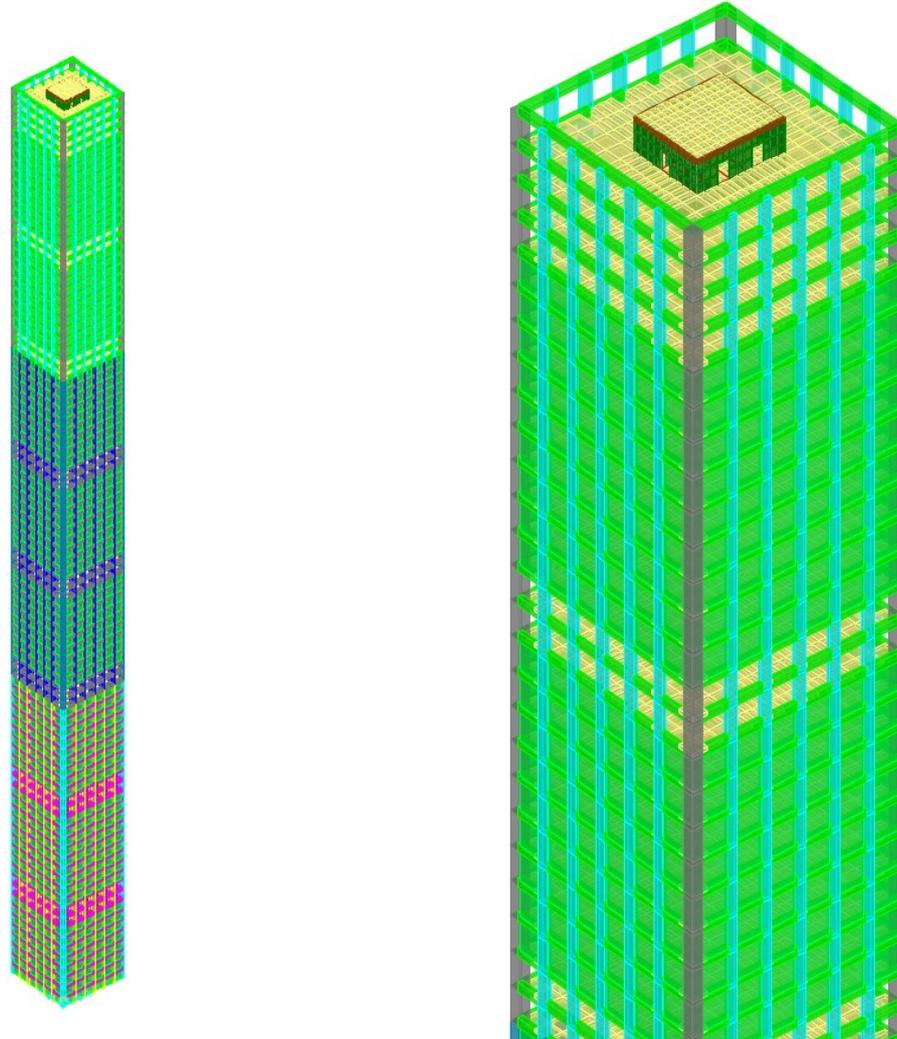


Imagen 57 (derecha). Captura SAP2000: Perspectiva general del edificio y sus grupos. Fuente: elaboración propia
Imagen 58 (izquierda). Captura SAP2000: Perspectiva en detalle del grupo 03. Fuente: elaboración propia

5.3.1 | Pilares: otras cuestiones a tener en cuenta

Para poder aplicar las secciones en primer lugar se definen en el menú *Define* y en segundo lugar se aplican a los elementos seleccionados con el menú *Assign*. Este proceso es relativamente sencillo. Sin embargo, los pilares, todos ellos orientados por defecto en la exportación en la misma dirección, deberán de tener en cuenta **tres consideraciones**:

- a. La dimensión de 1,40 m queda expuesta a fachada en todo momento
- b. Los pilares de distinta dimensión se alinean según su directriz, haciendo que quede un escalonamiento en fachada y debiendo corregir esta cuestión
- c. Los pilares deben quedar empotrados en la cimentación

Para orientar correctamente los pilares dejando la dimensión de 1,40 m vista desde el exterior se ha empleado la herramienta *Assign Frame Local Axes* girando los correspondientes ejes locales 90°. De esta forma, no ha sido necesario crear dos versiones de la misma sección, por ejemplo, unos pilares de 1,63x1x40 m y otros de 1,40x1,63m.

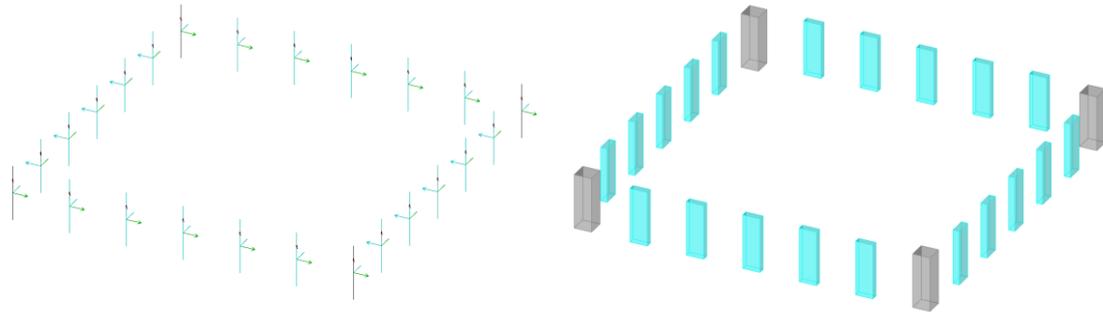


Imagen 59 (derecha). Captura SAP2000: Pilares de una planta tipo con ejes locales girados. Fuente: elaboración propia
Imagen 60 (izquierda). Captura SAP2000: Pilares de una planta tipo en vista extruida. Fuente: elaboración propia

Para abordar la segunda cuestión se ha hecho uso de la herramienta *Assign Frame Insertion Point*. Por defecto los pilares aparecen alineados en su centroide (ver imagen 61), lo que únicamente genera una transmisión de axil.

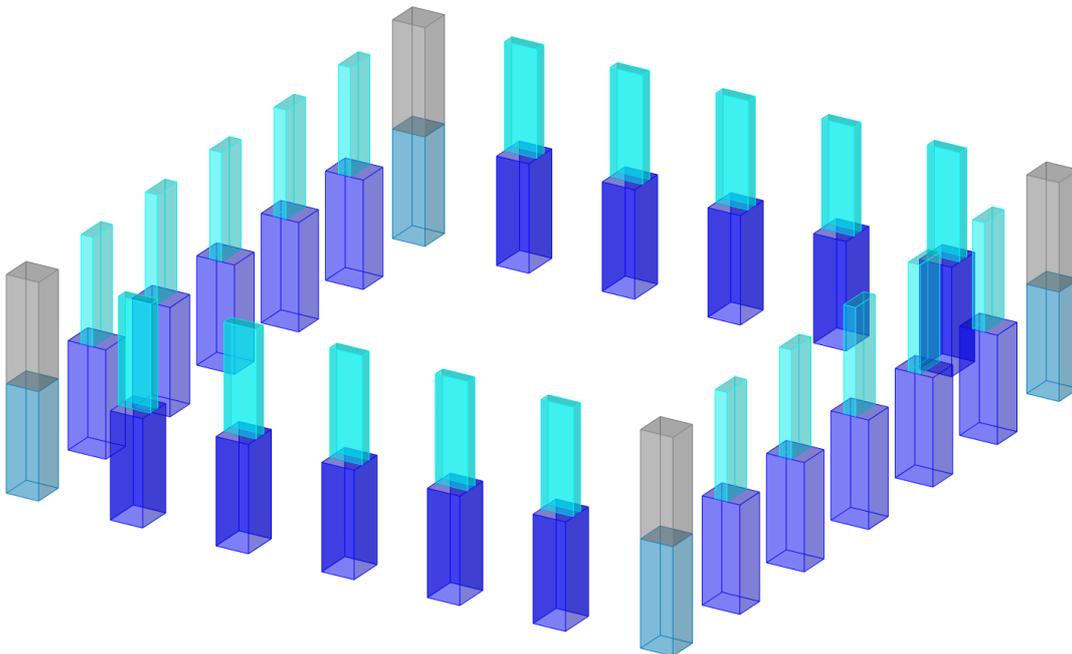


Imagen 61. Captura SAP2000: Pilares alineados según su centroide. Fuente: elaboración propia

No por cuestiones de modelización sino por el funcionamiento de la estructura, el *Insertion Point* permite colocar los pilares a línea de fachada (ver imagen 62), desplazándolos en ejes globales 56 cm (tanto su extremo inicial como final) en la dirección y sentido necesarios en cada caso. De esta forma, la transmisión del axil de los pilares de menor sección de las plantas superiores con un determinado valor de excentricidad también generará momento en los pilares inferiores.

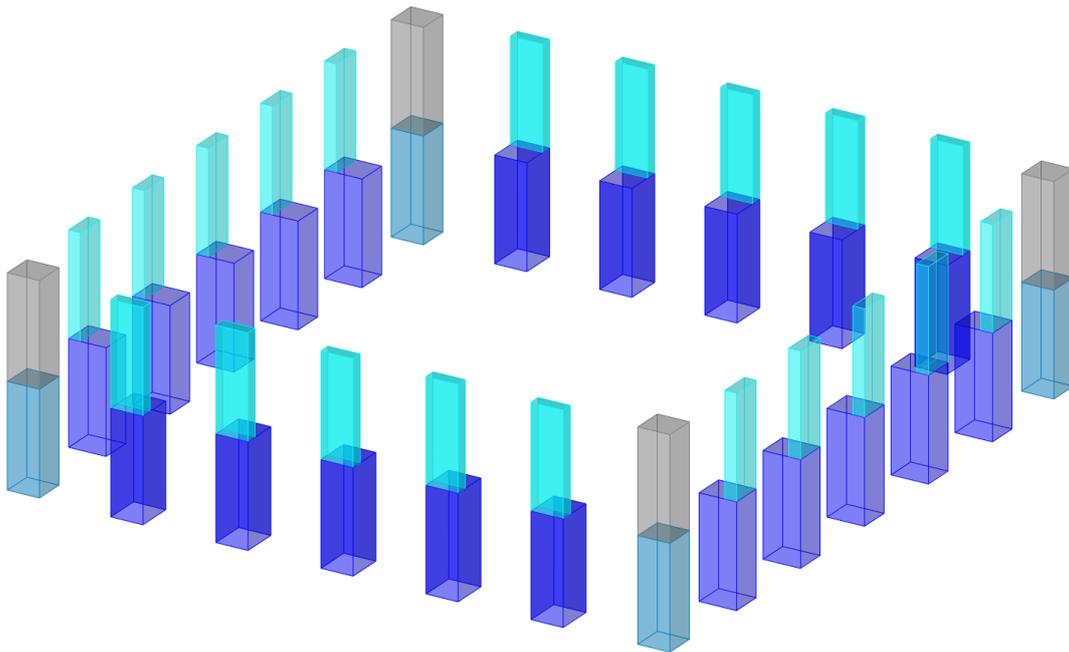


Imagen 62. Captura SAP2000: Pilares alineados con la fachada. Fuente: elaboración propia

En el encuentro de los pilares con el "suelo"¹³ se materializa un empotramiento, impidiendo el desplazamiento y giro de la estructura. Esto se realiza con el menú *Assign Joint Restraints*.

A los extremos de los 3Dcara del núcleo y de la fachada (ver apartado 4.3.3 para la modelización de fachada) también se aplican las mismas condiciones de enlace con el terreno.

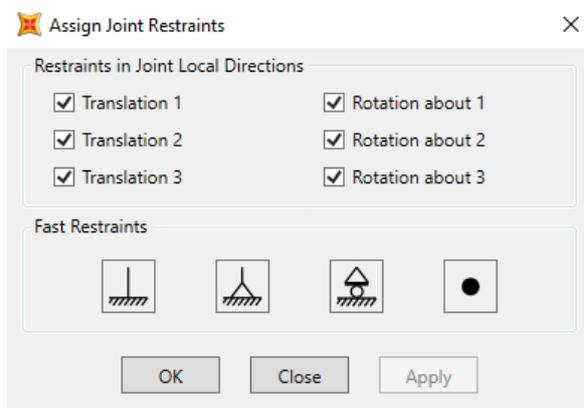


Imagen 63. Captura SAP2000: Asignación de empotramientos en la base de la estructura. Fuente: elaboración propia

5.4 | Cargas

En este apartado se van a desglosar las cargas a aplicar a la estructura en función de si son cargas superficiales, cargas lineales o carga de viento. Ésta última, aunque se trate de una carga aplicada en superficie cuenta con unas consideraciones especiales.

Para las cargas superficiales y lineales se han descrito únicamente los valores, ya que su aplicación es bastante sencilla con el menú *Define* y *Assign*.

¹³ En el espacio de SAP2000 no existe un suelo como tal, es decir, no importa en qué coordenada se coloque el edificio; serán las conexiones en la base las que materialicen y emulen las condiciones de unión con el terreno

Para el presente estudio no se han aplicado los efectos del sismo y la temperatura, simplificando los cálculos que el ordenador tendrá que llevar a cabo sobre una estructura con tantos elementos. Por otra parte, el amortiguador de masa situado en la cubierta asegura la estabilidad de la estructura frente a los efectos sísmicos.

5.4.1 | Cargas superficiales

Las cargas aplicadas superficialmente se han estimado a partir de valores tabulados típicos, teniendo en cuenta que el peso propio de la estructura lo calcula SAP2000 automáticamente a partir de los parámetros del material empleado (ver apartado 4.2).

Puesto que el edificio no se encuentra en España, para su dimensionado no se ha empleado la normativa especificada en el CTE ni en la EHE-08. Sin embargo, se ha hecho una aproximación a los valores que podrían haberse tomado si se hubieran aplicado los casos más desfavorables en España, siempre del lado de la seguridad.

| Planta viviendas | |
|---|-----------------------------|
| Elemento | Carga |
| Solado | 1 kN/m ² |
| Tabiquería | 1 kN/m ² |
| Falsos techos e instalaciones | 0,5 kN/m ² |
| Carga muerta permanente (CMP)¹⁴ | 2,5 kN/m² |
| Sobrecarga de uso | 2 kN/m ² |

Tabla 3. Cargas superficiales en planta de vivienda. Fuente: elaboración propia

| Plantas técnicas | |
|---|------------------------------|
| Elemento | Carga |
| Solado | |
| Acabado cerámico | 0,9 kN/m ² |
| Mortero | 0,2 kN/m ² |
| Impermeabilizante | 0,035 kN/m ² |
| Aislante térmico | 0,014 kN/m ² |
| Hormigón de pendientes | 2,55 kN/m ² |
| Barrera de vapor | 0,00 kN/m ² |
| | 3,70 kN/m² |
| Tabiquería | 1 kN/m ² |
| Falsos techos e instalaciones | 0,5 kN/m ² |
| Carga muerta permanente (CMP)¹⁵ | 2,5 kN/m² |
| Sobrecarga de uso | 1 kN/m ² |
| Sobrecarga de nieve | 1 kN/m ² |

Tabla 4. Cargas superficiales en plantas técnicas. Fuente: elaboración propia

Dado que se trata de viviendas se ha considerado una carga de tabiquería de 1 kN/m², siguiendo lo dispuesto en el CTE-DBSE-AE apartado 2.1. Del lado de la seguridad se ha considerado el mismo valor para las plantas técnicas, aunque estas no contarán con una compartimentación típica de vivienda.

¹⁴ Se obtiene como el sumatorio del solado, la tabiquería y los falsos techos e instalaciones. Son las cargas permanentes que se aplicarán sobre la estructura conforme se construye el edificio

¹⁵ Se obtiene como el sumatorio del solado, la tabiquería y los falsos techos e instalaciones. Son las cargas permanentes que se aplicarán sobre la estructura conforme se construye el edificio

En cuanto a la **sobrecarga de uso** se han considerado aquellas asociadas a un uso residencial vivienda (A1) y a cubiertas planas accesibles únicamente para conservación (G1).

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

| Categoría de uso | | Subcategorías de uso | | Carga uniforme [kN/m ²] | Carga concentrada [kN] |
|------------------|--|----------------------|---|--|---------------------------|
| A | Zonas residenciales | A1 | Viviendas y zonas de habitaciones en, hospitales y hoteles | 2 | 2 |
| | | A2 | Trasteros | 3 | 2 |
| B | Zonas administrativas | | | 2 | 2 |
| C | Zonas de acceso al público (con la excepción de las superficies pertenecientes a las categorías A, B, y D) | C1 | Zonas con mesas y sillas | 3 | 4 |
| | | C2 | Zonas con asientos fijos | 4 | 4 |
| | | C3 | Zonas sin obstáculos que impidan el libre movimiento de las personas como vestíbulos de edificios públicos, administrativos, hoteles; salas de exposición en museos; etc. | 5 | 4 |
| | | C4 | Zonas destinadas a gimnasio u actividades físicas | 5 | 7 |
| | | C5 | Zonas de aglomeración (salas de conciertos, estadios, etc) | 5 | 4 |
| D | Zonas comerciales | D1 | Locales comerciales | 5 | 4 |
| | | D2 | Supermercados, hipermercados o grandes superficies | 5 | 7 |
| E | Zonas de tráfico y de aparcamiento para vehículos ligeros (peso total < 30 kN) | | | 2 | 20 ⁽¹⁾ |
| F | Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente ⁽²⁾ | | | 1 | 2 |
| G | Cubiertas accesibles únicamente para conservación ⁽³⁾ | G1 ⁽⁷⁾ | Cubiertas con inclinación inferior a 20° | 1 ⁽⁴⁾⁽⁶⁾ | 2 |
| | | | Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) ⁽⁵⁾ | 0,4 ⁽⁴⁾ | 1 |
| | | G2 | Cubiertas con inclinación superior a 40° | 0 | 2 |

Imagen 64. Tabla 3.1 del CTE-BDSE-AE

Para la **sobrecarga de nieve** se ha escogido el valor más desfavorable de los que figuran en el documento equivalente a la que se podría encontrar en Ávila.

Tabla 3.8 Sobrecarga de nieve en capitales de provincia y ciudades autónomas

| Capital | Altitud m | s _k kN/m ² | Capital | Altitud m | s _k kN/m ² | Capital | Altitud m | s _k kN/m ² |
|--------------------|--------------|-------------------------------------|-------------------|--------------|-------------------------------------|----------------------------|--------------|-------------------------------------|
| Albacete | 690 | 0,6 | Guadalajara | 680 | 0,6 | Pontevedra | 0 | 0,3 |
| Alicante / Alacant | 0 | 0,2 | Huelva | 0 | 0,2 | Salamanca | 780 | 0,5 |
| Almería | 0 | 0,2 | Huesca | 470 | 0,7 | SanSebas- tián/Donostia | 0 | 0,3 |
| Ávila | 1.130 | 1,0 | Jaén | 570 | 0,4 | Santander | 0 | 0,3 |
| Badajoz | 180 | 0,2 | León | 820 | 1,2 | Segovia | 1.000 | 0,7 |
| Barcelona | 0 | 0,4 | Lérida / Lleida | 150 | 0,5 | Sevilla | 10 | 0,2 |
| Bilbao / Bilbo | 0 | 0,3 | Logroño | 380 | 0,6 | Soria | 1.090 | 0,9 |
| Burgos | 860 | 0,6 | Lugo | 470 | 0,7 | Tarragona | 0 | 0,4 |
| Cáceres | 440 | 0,4 | Madrid | 660 | 0,6 | Tenerife | 0 | 0,2 |
| Cádiz | 0 | 0,2 | Málaga | 0 | 0,2 | Teruel | 950 | 0,9 |
| Castellón | 0 | 0,2 | Murcia | 40 | 0,2 | Toledo | 550 | 0,5 |
| Ciudad Real | 640 | 0,6 | Orense / Ourense | 130 | 0,4 | Toledo | 0 | 0,2 |
| Córdoba | 100 | 0,2 | Oviedo | 230 | 0,5 | Valencia/València | 690 | 0,4 |
| Coruña / A Coruña | 0 | 0,3 | Palencia | 740 | 0,4 | Valladolid | 520 | 0,7 |
| Cuenca | 1.010 | 1,0 | Palma de Mallorca | 0 | 0,2 | Vitoria / Gasteiz | 650 | 0,4 |
| Gerona / Girona | 70 | 0,4 | Palmas, Las | 0 | 0,2 | Zamora | 210 | 0,4 |
| Granada | 690 | 0,5 | Pamplona/Iruña | 450 | 0,7 | Zaragoza | 0 | 0,5 |
| | | | | | | Ceuta y Melilla | 0 | 0,2 |

Imagen 65. Tabla 3.8 del CTE-BDSE-AE

Estas cargas superficiales se han aplicado como cargas uniformes sobre los forjados correspondientes.

5.4.2 | Cargas lineales

La única carga lineal que se encuentra en el modelo es el peso **propio de la fachada**. Éste hace referencia a las ventanas de $3,05 \times 3,05 \text{ m}^2$ en cada uno de los huecos de las plantas de vivienda. Estas ventanas representan una carga superficial de $2,5 \text{ kN/m}^2$ que se apoya sobre las vigas inferiores, es decir, la fachada no queda colgada, sino apoyada; esto se tiene en cuenta al modelizar la carga uniformemente repartida que transmiten las carpinterías a las vigas inferiores, que será de:

$$G_F = G_{\text{repartida}} \left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right] \cdot \text{Altura} [\text{m}^2] = 2,5 \cdot 3,05 = 7,625 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \approx 7,5 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Es importante tener en cuenta que esta carga se aplica únicamente en las plantas de vivienda y no en las técnicas, que quedan expuestas al exterior.

5.5.3 | Carga de viento

Al tratarse de un rascacielos extremadamente esbelto, se ha modelizado la carga de viento con la mayor exactitud posible, considerando que es creciente en altura. En primer lugar, ha tenido que modelarse la fachada del edificio con elementos finitos en SAP2000, aplicándole una sección que cuente con rigidez prácticamente nula *None2* para que no sea considerado un elemento estructural.

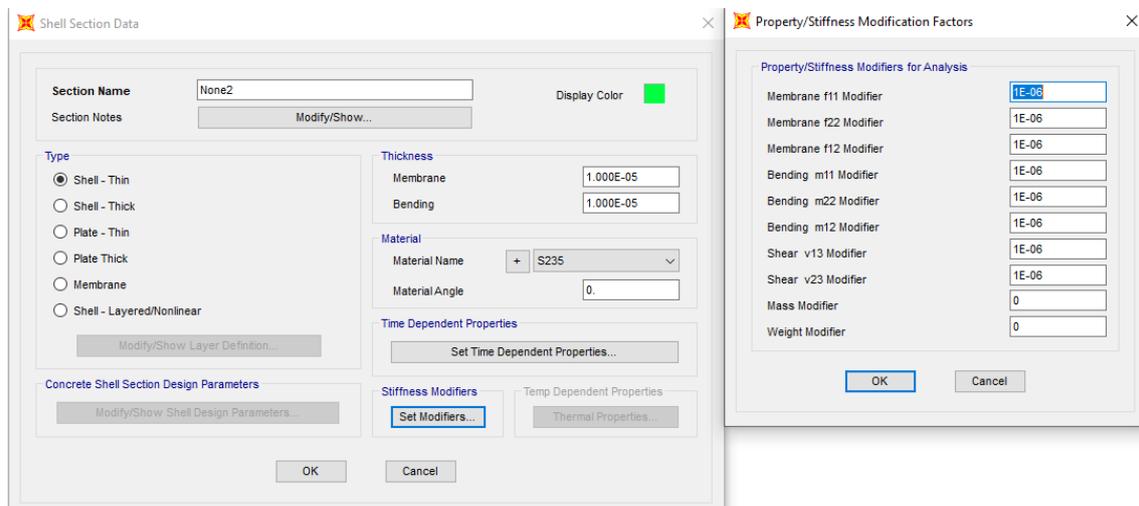


Imagen 66. Captura SAP2000: Sección None2 aplicada a la fachada. Fuente: elaboración propia

Para poder modelizar el viento se ha empleado la utilidad *Joint Pattern* con la que cuenta SAP2000, en la que a cada elemento *área* de fachada sobre los que va a incidir se le aplica un valor en cada vértice que posteriormente se asociará con una carga de presión (*Uniform Load to frame*).

El valor que se aplica en cada vértice se hace servir del CTE-DBSE-AE aplicado a una tabla Excel del profesor David Gallardo Llopis en que se introducen las celdas marcadas en amarillo:

| VIENTO EN EDIFICIOS EN ALTURA SEGÚN CTE | | | |
|---|------|-----------|-----------------------|
| Cota del último forjado | z | 425,50 | [m] |
| Número de plantas | N | 87 | [] |
| 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 | 128.83 | [kN/m ²] |
| Momento/m ² total presiones | Mp | 30627.92 | [kNm/m ²] |
| Presión de viento equivalente en base | qp0 | 0.96 | [kN/m ²] |
| Presión de viento equivalente en cabeza | qpz | 2.00 | [kN/m ²] |
| Cortante/m ² total succiones | Qs | 112.73 | [kN/m ²] |
| Momento/m ² total succiones | Ms | 26799.43 | [kNm/m ²] |
| Succión de viento equivalente en base | qs0 | 0.84 | [kN/m ²] |
| Succión de viento equivalente en cabeza | qsZ | 1.75 | [kN/m ²] |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| presion | Dsap | 0.9590 | D |
| | Csap | 0.0024526 | C |
| | | | |
| succion | Dsap | 0.8391 | D |
| | Csap | 0.0021460 | C |

Imagen 67. Cálculo viento en edificios en altura. Fuente: elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis

La presión básica o presión dinámica del viento se toma como 0,5 kN/m², aplicando la simplificación que permite la normativa en el apartado 3.3.2 del DBSE-AE.

Los coeficientes de presión y succión, a fin de simplificar los cálculos, se obtienen de la tabla 3.5 del DBSE-AE considerando una esbeltez mayor de 5.

Tabla 3.5. Coeficiente eólico en edificios de pisos

| | Esbeltez en el plano paralelo al viento | | | | | |
|--|---|------|------|------|------|--------|
| | < 0,25 | 0,50 | 0,75 | 1,00 | 1,25 | ≥ 5,00 |
| Coefficiente eólico de presión, c _p | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,8 |
| Coefficiente eólico de succión, c _s | -0,3 | -0,4 | -0,4 | -0,5 | -0,6 | -0,7 |

Imagen 68. Tabla 3.5 del CTE-BDSE-AE

El grado de aspereza del entorno es V, ya que el rascacielos se encuentra en el corazón de Manhattan.

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición c_e

| Grado de aspereza del entorno | Altura del punto considerado (m) | | | | | | | |
|--|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 | 24 | 30 |
| I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud | 2,4 | 2,7 | 3,0 | 3,1 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,7 |
| II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia | 2,1 | 2,5 | 2,7 | 2,9 | 3,0 | 3,1 | 3,3 | 3,5 |
| III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas | 1,6 | 2,0 | 2,3 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,9 | 3,1 |
| IV Zona urbana en general, industrial o forestal | 1,3 | 1,4 | 1,7 | 1,9 | 2,1 | 2,2 | 2,4 | 2,6 |
| V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura | 1,2 | 1,2 | 1,2 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,9 | 2,0 |

Tabla 5. Tabla 3.4 del CTE-BDSE-AE

Los resultados a introducir en *Joint Pattern* son los que tienen un fondo verde en el Excel. Puesto que las fachadas son idénticas en los cuatro lados, se ha escogido una en cada dirección (X e Y) para aplicar presión y las otras dos restantes para aplicar succión. Se definen las dos constantes y, como se observa en la imagen 69, los valores serán crecientes con la coordenada z.

Assign Joint Pattern Data

General

Joint Pattern Name: VientoY

Pattern Assignment Type

X, Y, Z Multipliers (Pattern Value = Ax + By + Cz + D)

Z Coordinate at Zero Pressure and Weight per Unit Volume

Pattern Value = Ax + By + Cz + D

Constant A: 0 1/m

Constant B: 0 1/m

Constant C: 0.002 1/m

Constant D: 0.959

Restrictions

Use All Values

Zero Negative Values

Zero Positive Values

Options

Add to Existing Values

Replace Existing Values

Delete Existing Values

Reset Form to Default Values

OK Close Apply

Imagen 69. Captura SAP2000: Ejemplo Joint Pattern de presión en la dirección Y

Una vez definido el *Joint Pattern*, se aplica una carga de presión de 1kN/m^2 ¹⁶ con la herramienta *Assign Uniform Load to frame* sobre cada una de las fachadas, teniendo en cuenta su dirección, que hará que cada valor asociado a los vértices del elemento finito se interprete como la carga de viento creciente en altura; de esta forma resulta una carga de viento aplicada sobre la superficie de fachada dependiente de su coordenada z con forma de prisma de base trapezoidal.

¹⁶ Se multiplica por la unidad en valor positivo o negativo según si se considera presión o succión en cada fachada

6 | Interpretación de resultados

Una vez modelizado correctamente el edificio y habiendo aplicado las cargas se puede proceder a la obtención de los resultados del análisis de la estructura.

La estructura tiene las siguientes cargas:

Cargas permanentes (G)

Peso propio de la estructura (DEAD)

Carga muerta permanente (CMP)

Cargas variables (Q)

Sobrecarga de uso (SCU)

Sobrecarga de nieve (SCN)

Sobrecarga de viento

En la dirección x (SCVx)

En la dirección y (SCVy)

Tabla 6. Cargas permanentes y variables aplicadas a la estructura. Fuente: elaboración propia

La deformación que producen estas cargas puede visualizarse con el menú *Show Deformed Shape*.

Siguiendo lo prescrito en el CTE-DBSE apartado 4 *Verificaciones basadas en coeficientes parciales* será necesario verificar los estados límite para asegurar el cumplimiento de dicha estructura. Para ello hay que aplicar una serie de **combinaciones de las acciones** que dependerán del estado límite a analizar: Estado Límite Último (ELU) o Estado Límite de Servicio (ELS).

El **Estado Límite Último (ELU)** es un estado límite asociado al colapso u otra forma de fallo estructural que pueda poner en peligro la seguridad de las personas. El **Estado Límite de Servicio (ELS)** es aquel que si se sobrepasa dejan de cumplirse los criterios que aseguran el correcto funcionamiento de la estructura (confort, bienestar, apariencia) durante su uso normal (Monfort Lleonart, 2006)

Para el análisis de los ELS se utiliza el valor característico de las cargas, sin mayorarlas. Sin embargo, para los ELU se utilizan coeficientes de seguridad parciales de $\gamma_G=1,5$ para las cargas permanentes (G) y $\gamma_Q=1,35$ para las cargas variables (G).

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

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

⁽¹⁾ Los coeficientes correspondientes a la verificación de la resistencia del terreno se establecen en el DB-SE-C

6.1 | Estados Límite de Servicio (ELS)

En este apartado se van a comprobar que las deformaciones de los elementos de hormigón armado se encuentran por debajo de los valores establecidos por la normativa. Para ello se van a analizar los desplazamientos, tanto verticales como horizontales.

6.1.3 | Desplazamientos horizontales

Siguiendo las comprobaciones especificadas en el DBSE, se van a evaluar los desplazamientos horizontales para garantizar el adecuado cumplimiento de las condiciones de integridad de los elementos constructivos y la apariencia de la obra. Estos desplazamientos resultan de **mayor interés para un edificio en altura que los verticales**.

6.1.3.1 | Integridad de los elementos constructivos

Con los desplazamientos horizontales se evalúa la integridad de los elementos constructivos, en este caso la tabiquería y las carpinterías exteriores, que se consideran elementos rígidos, frente a desplazamientos horizontales.

Resulta de especial interés evaluar este ELS en la estructura, puesto que la deformación predominante en esta estructura tan esbelta es la horizontal.

Para producirse los desplazamientos horizontales hay que tener en cuenta la deformación horizontal de los elementos una vez se han puesto en obra la tabiquería y las carpinterías¹⁷, la sobrecarga de uso y el efecto del viento sobre la estructura en las dos direcciones; para ello se emplea una combinación característica de acciones que se definen como:

$$\sum G + P + Q_1 + \sum_{i>1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad [1]$$

donde:

G son las cargas permanentes

P es el peso propio de la estructura

Q son las acciones variables y Q₁ hace referencia a la acción variable principal¹⁸

De entre las acciones variables hay que evaluar la **sobrecarga de uso combinada con el viento** en la dirección más desfavorable, de esta forma se reducen el número de hipótesis. Si se analizan únicamente las cargas de viento se podrá saber cuál es la dirección más desfavorable que considerar, es decir, SCVx o SCVy. Para ello se lleva a cabo el análisis de la estructura y únicamente se evalúa la deformación para SCVx y SCVy.

Para SCVx la flecha máxima es de 726 mm y para SCVy la flecha máxima es de 749mm. Aunque la diferencia es pequeña, **tomar el viento en la dirección Y reduce el número de hipótesis a considerar**, pasando a combinar únicamente la sobrecarga de uso y el viento en Y.

¹⁷ Corresponde a una fracción de carga muerta permanente (CMP) de los falsos techos que se construyen posteriormente a las carpinterías y tabiques interiores y se estima que constituyen un 25% de la CMP total

¹⁸ Se emplea esta nomenclatura del CTE a lo largo del trabajo

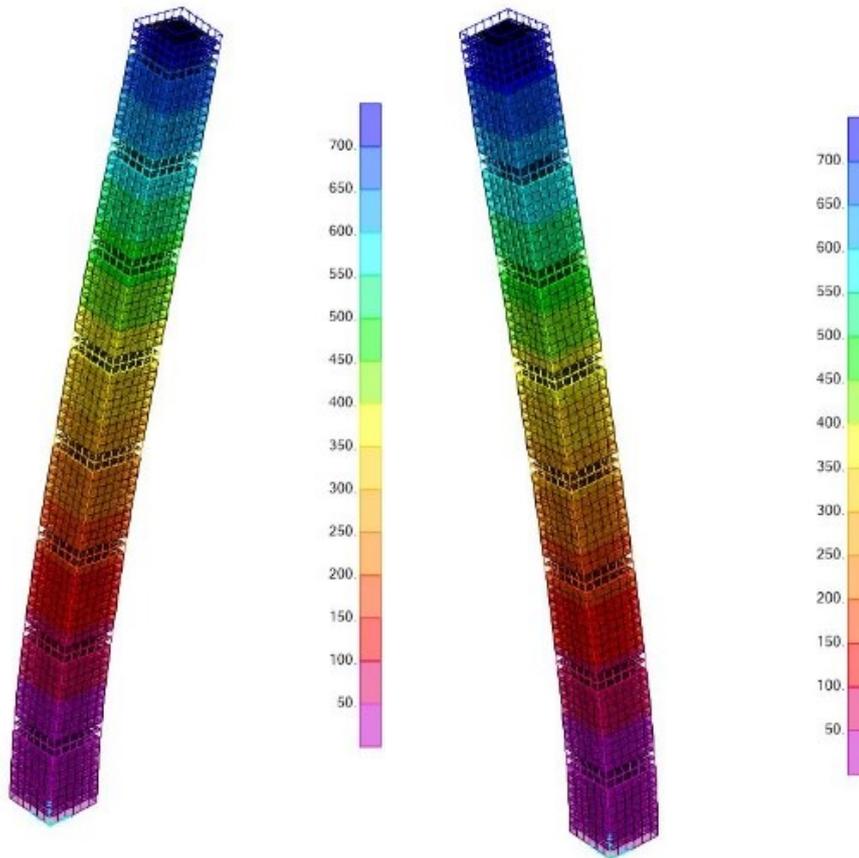


Imagen 71 (derecha). Captura SAP2000: Deformación escalada x100 y en milímetros de SCVx. Fuente: elaboración propia
Imagen 72 (izquierda). Captura SAP2000: Deformación escalada x100 y en milímetros de SCVy. Fuente: elaboración propia

Hipótesis 1: sobrecarga de uso como acción variable principal

Esta hipótesis supone tomar la sobrecarga de uso sin minorar y la sobrecarga de viento en la dirección y (SCVy) afectada por un coeficiente de simultaneidad especificado en la normativa.

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

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

(1) En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Imagen 73. Tabla 4.2 del CTE-DBSE-AE

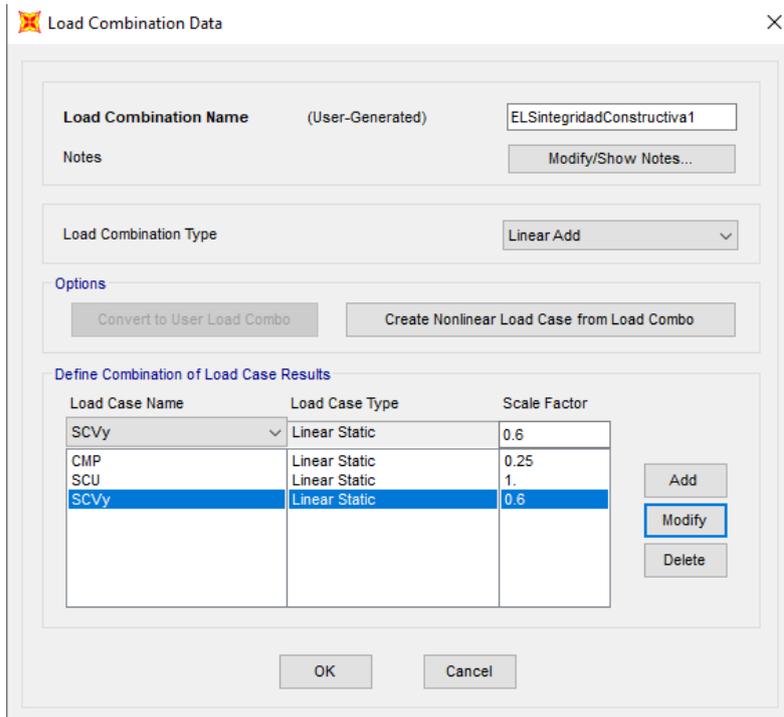


Imagen 74. Captura SAP2000: ELS integridad de los elementos constructivos hipótesis 1. Fuente: elaboración propia

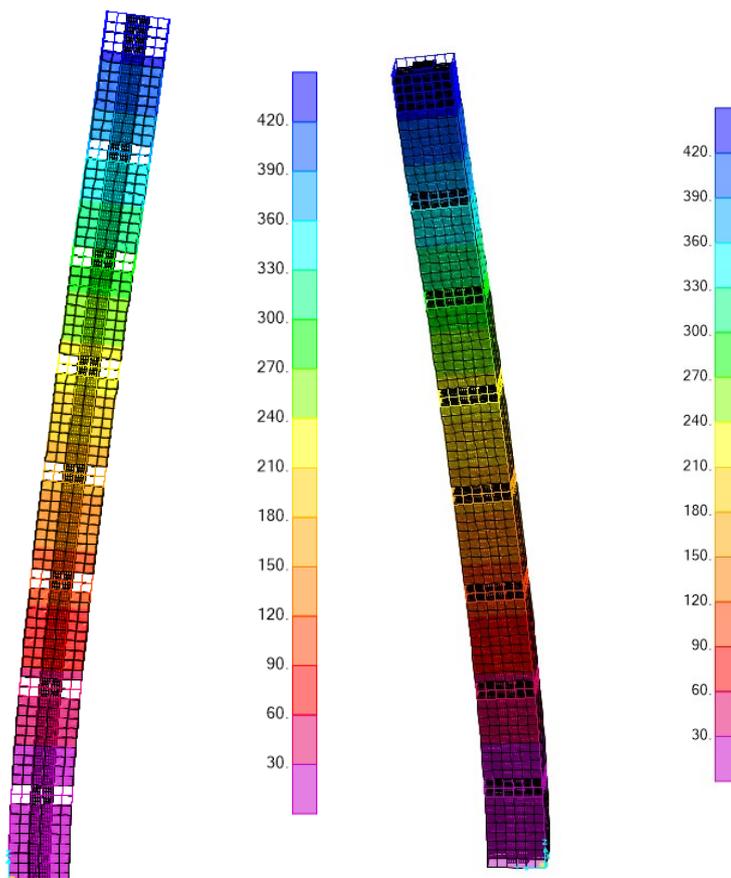


Imagen 75 (derecha). Captura SAP2000: Alzado del desplazamiento horizontal en hipótesis 1 en milímetros. Fuente: elaboración propia

Imagen 76 (izquierda). Captura SAP2000: Perspectiva axonométrica del desplazamiento horizontal en hipótesis 1 en milímetros. Fuente: elaboración propia

Los elementos horizontales más afectados por esta combinación de carga se encuentran en la parte superior, donde se ha empleado el hormigón de menor resistencia: HA-70 y HA-40, así como secciones más reducidas. El desplazamiento máximo que se produce es de 450 mm.

Esta es la **hipótesis más favorable**, ya que el viento está actuando bajo un coeficiente de minoración. No es necesario seguir con la comprobación ya que será la hipótesis 2 la que ofrecerá los desplazamientos horizontales más condicionantes este ELS.

Hipótesis 2: viento en y como acción variable principal

En esta segunda hipótesis se va a considerar la carga de viento como acción variable principal sobre la estructura y la sobrecarga de uso se verá afectada por el coeficiente de simultaneidad que se encuentra a continuación:

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

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

(1) En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Imagen 77. Tabla 4.2 del CTE-DBSE-AE

Load Combination Name (User-Generated) ELSIntegridadConstructiva2

Notes Modify/Show Notes...

Load Combination Type Linear Add

Options

Convert to User Load Combo Create Nonlinear Load Case from Load Combo

Define Combination of Load Case Results

| Load Case Name | Load Case Type | Scale Factor |
|----------------|----------------|--------------|
| SCU | Linear Static | 0.7 |
| CMP | Linear Static | 0.25 |
| SCU | Linear Static | 0.7 |
| SCVy | Linear Static | 1 |

Add Modify Delete

OK Cancel

Imagen 78. Captura SAP2000: ELS integridad de los elementos constructivos hipótesis 2. Fuente: elaboración propia

De nuevo, como era de esperar, los elementos horizontales más afectados por esta combinación de carga se encuentran en la parte superior. Conocidos los desplazamientos horizontales en la dirección y de la estructura, se procede al cálculo del desplome.

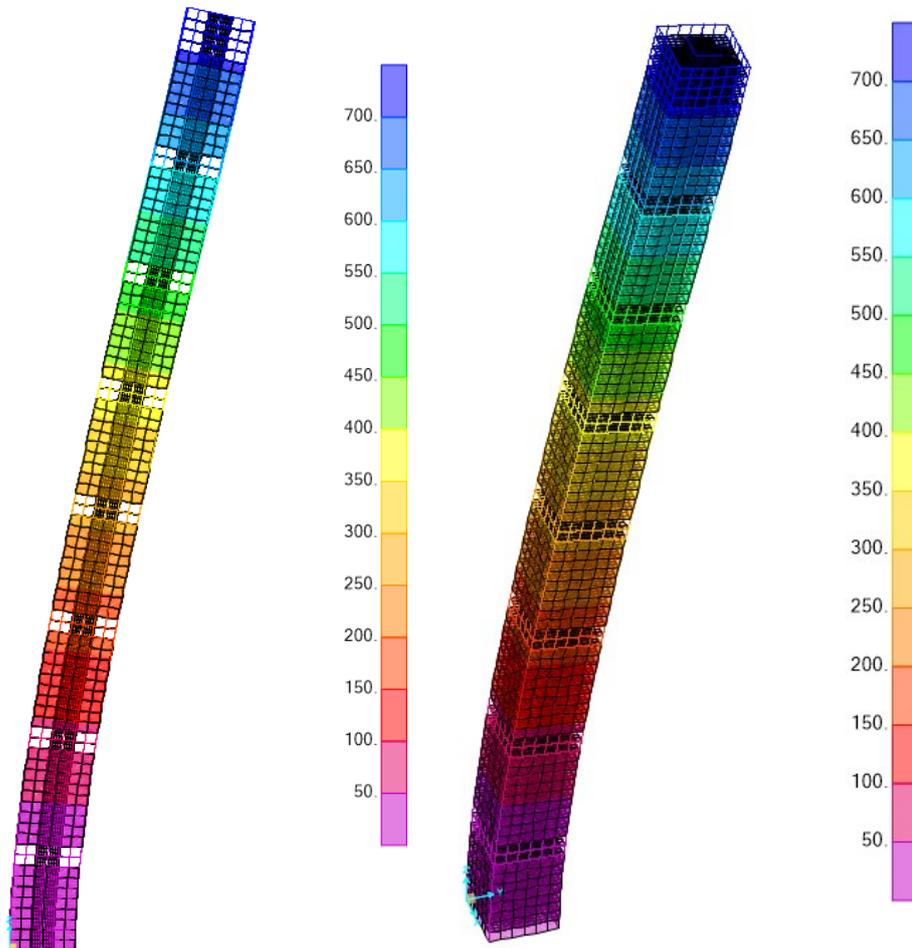


Imagen 79. Captura SAP2000: Alzado del desplazamiento horizontal en hipótesis 2 en milímetros. Fuente: elaboración propia

Imagen 80. Captura SAP2000: Perspectiva axonométrica del desplazamiento horizontal en hipótesis 2 en milímetros. Fuente: elaboración propia

El desplome, empleando un factor de ampliación 100, es significativo.

Para medir el **desplome total** se toma la arista superior izquierda del alzado de la imagen 61 y debe verificarse que es menor de 1/500 de la altura total del edificio.

La flecha se define como:

$$F = \frac{\Delta dy}{\text{Distancia}} < \text{Limitación} \quad [2]$$

Como forma de simplificar los cálculos:

$$\frac{\text{Distancia}^{19}}{\Delta dy} > \text{Limitación} \quad [3]$$

¹⁹ Es posible medir distancias directamente en SAP2000 con Ctrl+L

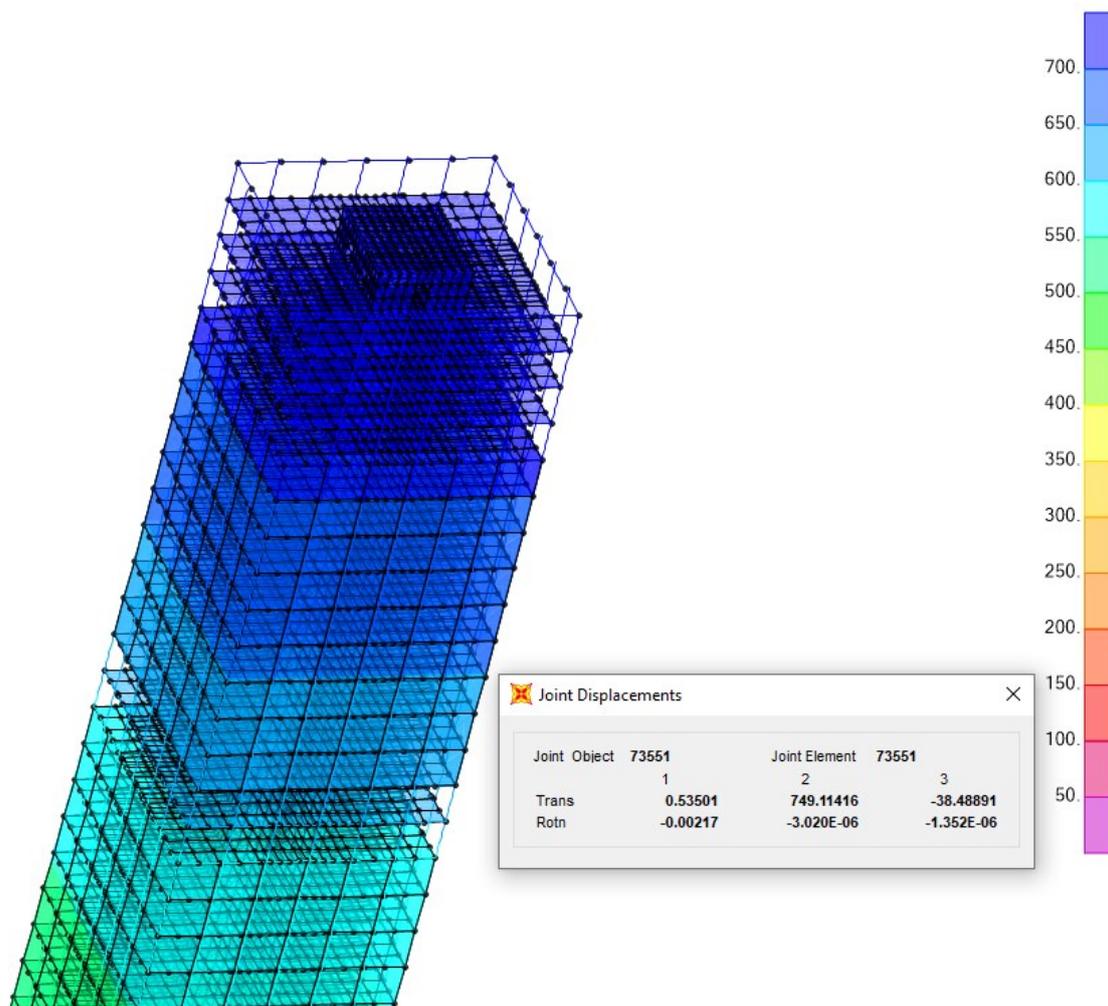


Imagen 81. Captura SAP2000: Desplome total de la estructura en dirección y. Fuente: elaboración propia

| | |
|--------|----------|
| dy1 | 0 mm |
| dy2 | 749.1 mm |
| Δdy | 749.1 mm |
| Altura | 425.5 m |

Tabla 7. Desplome total de la estructura. Fuente: elaboración propia

$$L = \frac{425.5 \cdot 1000}{749.1} = 568 > 500 \rightarrow \text{CUMPLE} \quad [3]$$

A pesar de que el movimiento de casi 75 cm pueda parecer excesivo, se encuadra dentro de la normativa; esto se debe a la increíble altura alcanzada por el rascacielos.

Para medir el **desplome local** se puede seleccionar cualquiera de las plantas, en este caso se escoge la última. Éste debe ser menor de 1/250. Basta con medir la distancia horizontal entre el nuevo punto medido (ver imagen 82) y tomar la altura entre plantas.

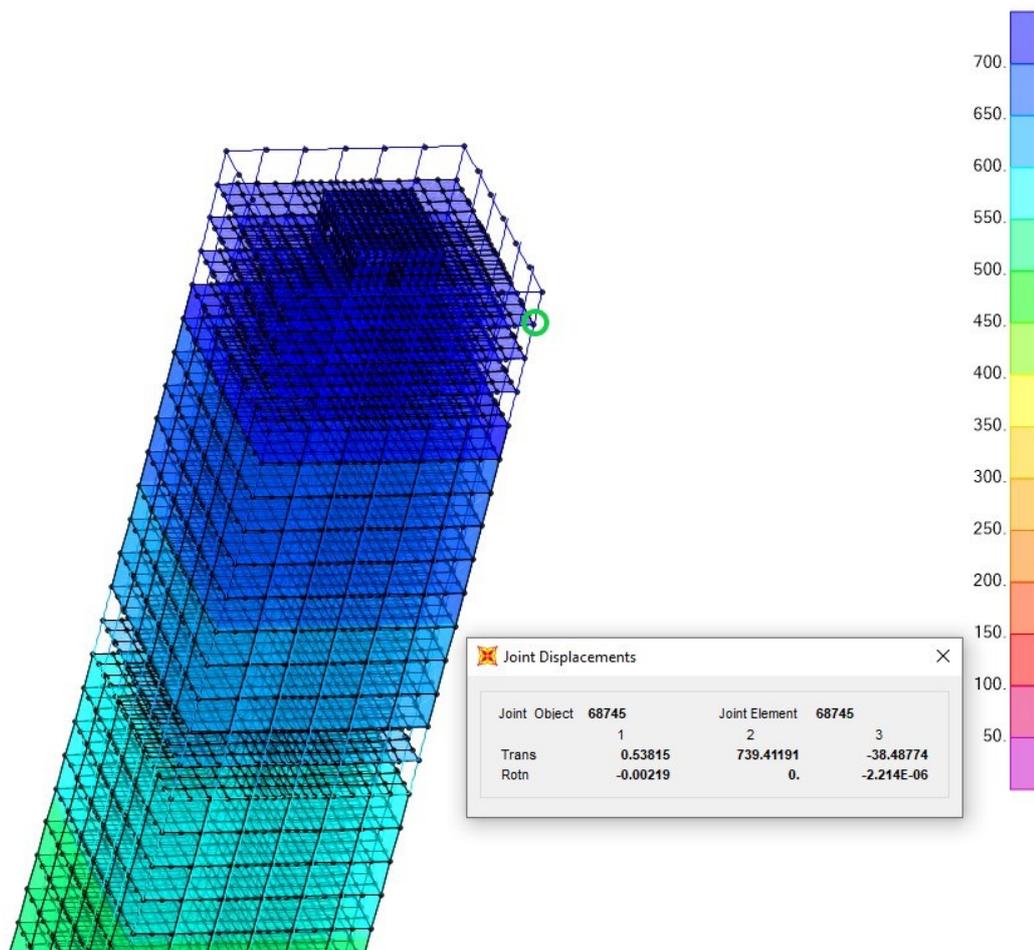


Imagen 82. Captura SAP2000: Desplome local de la estructura en dirección y. Fuente: elaboración propia

| | |
|---------------|----------|
| dy1 | 739.4 mm |
| dy2 | 749.1 mm |
| Δdy | 9.70 mm |
| Altura | 4.25 m |

Tabla 8. Desplome local de la estructura. Fuente: elaboración propia

$$L = \frac{4,25 \cdot 1000}{9,70} = 438 > 250 \rightarrow \text{CUMPLE} \quad [3]$$

Ambos desplazamientos laterales cumplen, por lo que se asegura la integridad de los elementos constructivos.

6.1.3.2 | Apariencia de la obra

Para tener en consideración la apariencia de la obra es necesario tener en cuenta las combinaciones de acciones casi permanentes que puedan provocar desplome relativo, que debe ser menor de 1/250.

La fórmula de la normativa para las acciones de larga duración en una combinación casi permanente es:

$$\sum G + P + \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad [4]$$

Para este análisis se consideran todas las cargas aplicadas en la estructura: el peso propio, la carga muerta permanente, la fracción casi permanente de la carga de uso y la fracción casi permanente de la carga de viento. Es una combinación ya definida en la plantilla de SAP2000 y recibe el nombre de "ELSqup".

Todas las acciones variables quedan afectadas por el coeficiente de simultaneidad. El resultado es una única hipótesis, ya que el viento queda anulado en esta combinación.

Tabla 4.2 Coeficientes de simultaneidad (ψ)

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

(1) En las cubiertas transitables, se adoptarán los valores correspondientes al uso desde el que se accede.

Imagen 83. Tabla 4.2 del CTE-DBSE

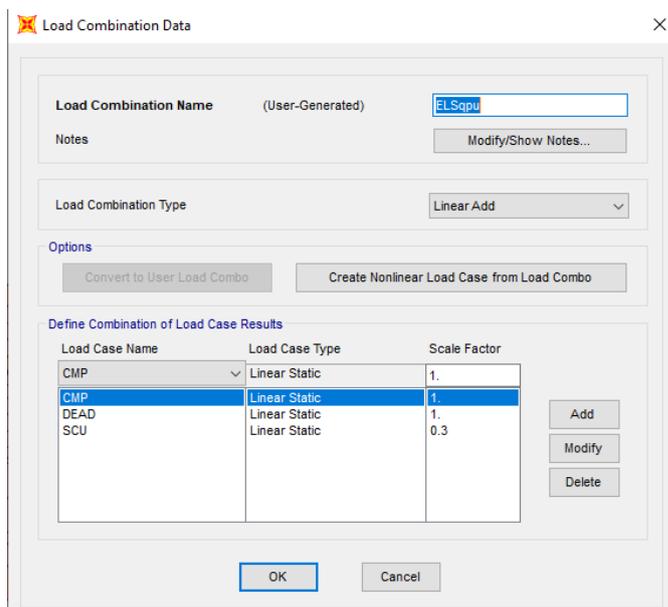


Imagen 84. Captura SAP2000: ELS apariencia de la obra. Fuente: elaboración propia

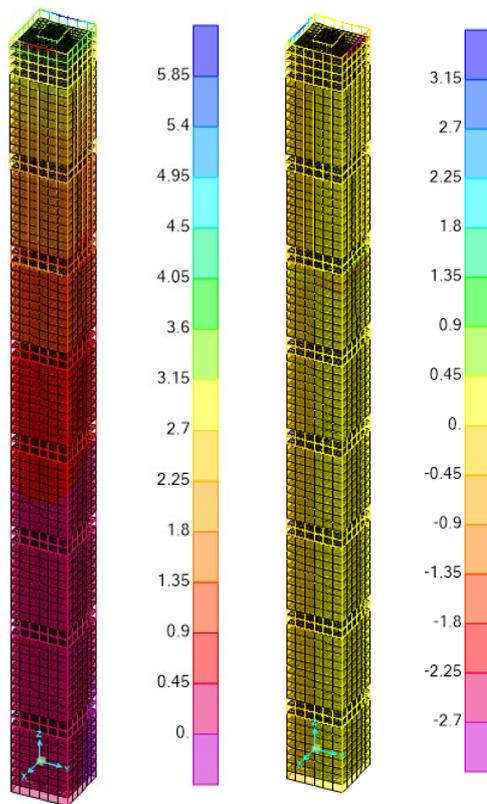


Imagen 85 (derecha). Captura SAP2000: ELSqpu deformación de la estructura en dirección x en milímetros. Fuente: elaboración propia
Imagen 86 (izquierda). Captura SAP2000: ELSqpu deformación de la estructura en dirección y en milímetros. Fuente: elaboración propia

La deformación global, aun cuando se encuentra con un factor de ampliación de 100, es prácticamente despreciable. Como se observa en la escala, los desplazamientos no varían más de 6 mm. Por tanto, al ser más restrictivo el desplome local de la estructura medido para la integridad de los elementos constructivos, se cumple con el ELS de la apariencia de la obra.

6.1.1 | Desplazamientos verticales

6.1.1.1 | Integridad de los elementos constructivos

Se analiza que la **flecha de los elementos horizontales**, ante cualquier combinación de acciones característica (ver ecuación [1]), considerando la flecha que se produce una vez se ha puesto en obra el elemento a analizar, no superan el valor de **1/400**, el valor que se establece para plantas con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas. Puesto que SAP2000 ofrece una flecha instantánea y no diferida, **se multiplica este valor límite por cinco** para tener en cuenta los efectos de la deformación del hormigón a largo plazo.

En este apartado se analizará la flecha que se produce en los forjados con la finalidad de que cuando deformen no provoquen la rotura o daños ni en los tabiques ni en las carpinterías exteriores. Para ello se tendrá en cuenta la flecha que se produce una vez se han construido estos elementos, que es la producida por la sobrecarga de uso y parte de la carga muerta permanente. El viento, en este caso, no es objeto de análisis, puesto que mayoritariamente producirá desplazamientos horizontales.

La sobrecarga de uso es la única acción variable; en cuanto a las CMP se considera solo un 25% (ver nota al pie 17). Se emplea una combinación de cargas característica

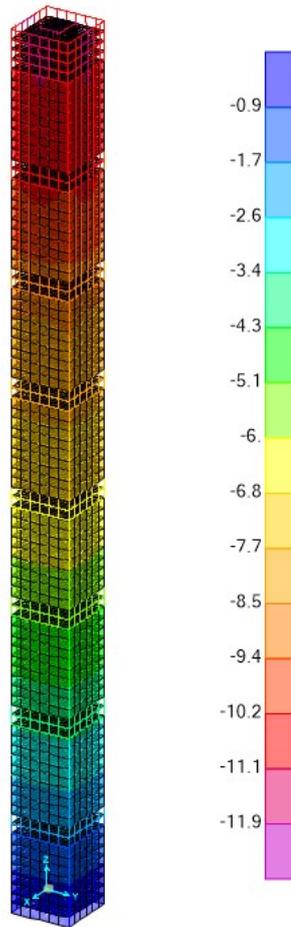


Imagen 87. Captura SAP2000: Deformación vertical para integridad de los elementos constructivos en milímetros. Fuente: elaboración propia

Los elementos más afectados por la deformación vertical son los superiores, por lo que se va a analizar el forjado superior de la última planta de viviendas tomando dos puntos, uno perteneciente a la fachada y otro en un punto intermedio entre la fachada y el núcleo central.

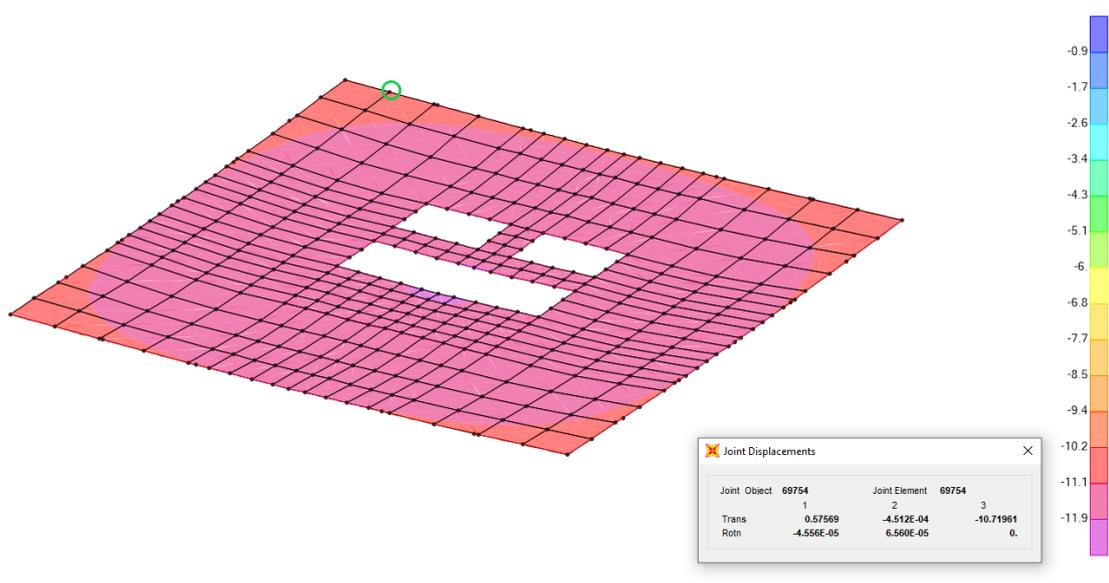


Imagen 88. Captura SAP2000: Punto de deformación vertical mínima del forjado de última planta en milímetros. Fuente: elaboración propia

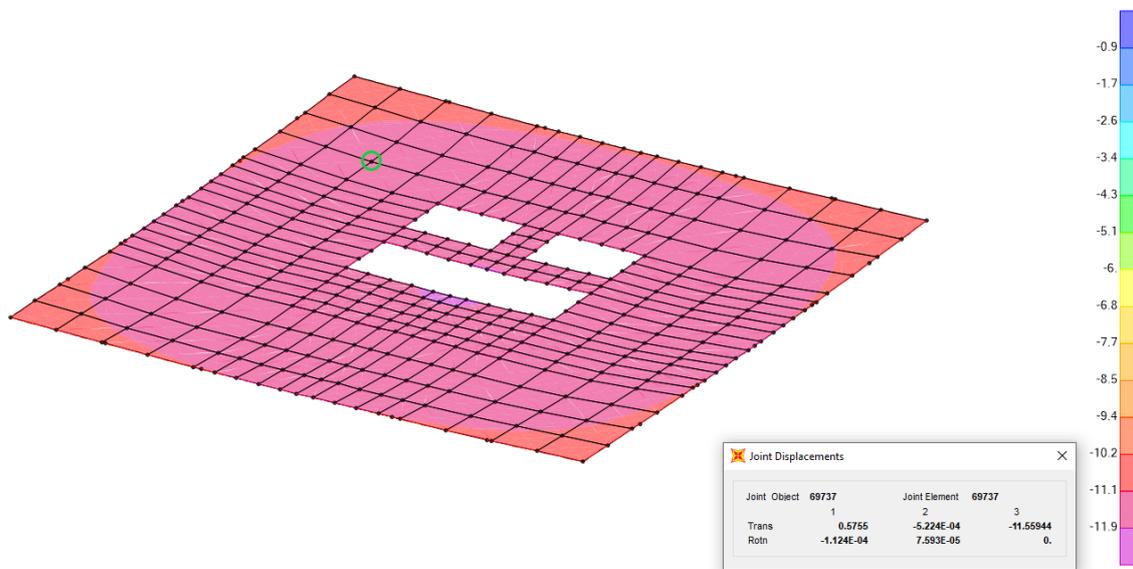


Imagen 89. Captura SAP2000: Punto de deformación vertical máxima del forjado de última planta en milímetros. Fuente: elaboración propia

| | |
|------------------|---------|
| dz1 | 10,7 mm |
| dz2 | 11,6mm |
| Δdz | 0.9 mm |
| Distancia | 6,3 m |

Tabla 9. Integridad constructiva para desplazamientos verticales. Fuente: elaboración propia

$$\frac{2 \cdot 6,3 \cdot 1000}{0,9} = 14000 > 2000 \rightarrow \text{CUMPLE} \quad [3]$$

Por tanto, **CUMPLE**. Incluso, llegaría a cumplir con la hipótesis más desfavorable de la normativa que indica una flecha máxima de 1/2000. Esto se debe al empleo de hormigones de alta calidad y un espesor de losa de 40 cm.

6.1.2 | Confort de los usuarios

Se aplica a los forjados y a acciones de corta duración, es decir, con la sobrecarga de uso (SCU). El uso del forjado o la presencia de vientos no debe de producir deformaciones apreciables en el forjado o hacerlo entrar en vibración.

Se deberá utilizar una combinación frecuente, que se define como:

$$\sum G + P + \psi_{1,1} \cdot Q_1 + \sum_{i>1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \quad [5]$$

En este caso, el peso propio de la estructura y las cargas permanentes no se tendrán en cuenta, puesto que son acciones de larga duración. Además, existe una única hipótesis ya que solo se considera una acción variable; por tanto, corresponde a la medida de la carga SCU sobre los forjados.

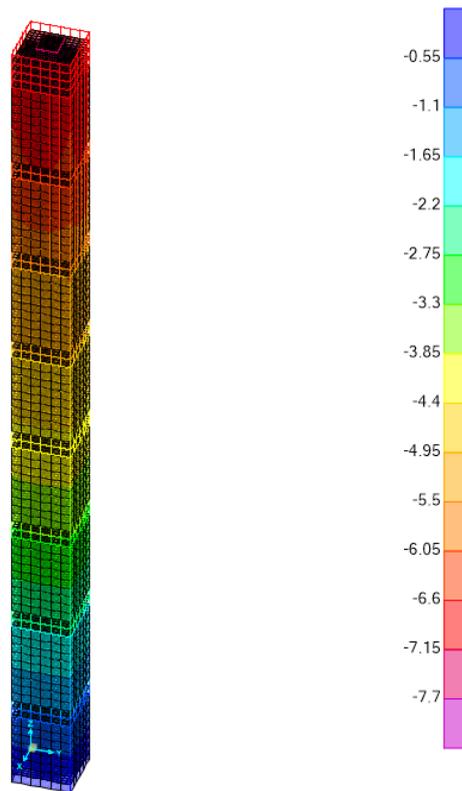


Imagen 90. Captura SAP2000: Deformación vertical bajo SCU. Fuente: elaboración propia

La zona más afectada por las deformaciones es la parte superior. Se aísla el forjado inferior de la planta superior de vivienda, ya que es una comprobación que únicamente se aplicará para el caso de vivienda, y las plantas superiores son cubiertas a las que se accede para mantenimiento.

Se escoge un punto intermedio del forjado y otro de fachada para medir los desplazamientos verticales máximos y mínimos, respectivamente.

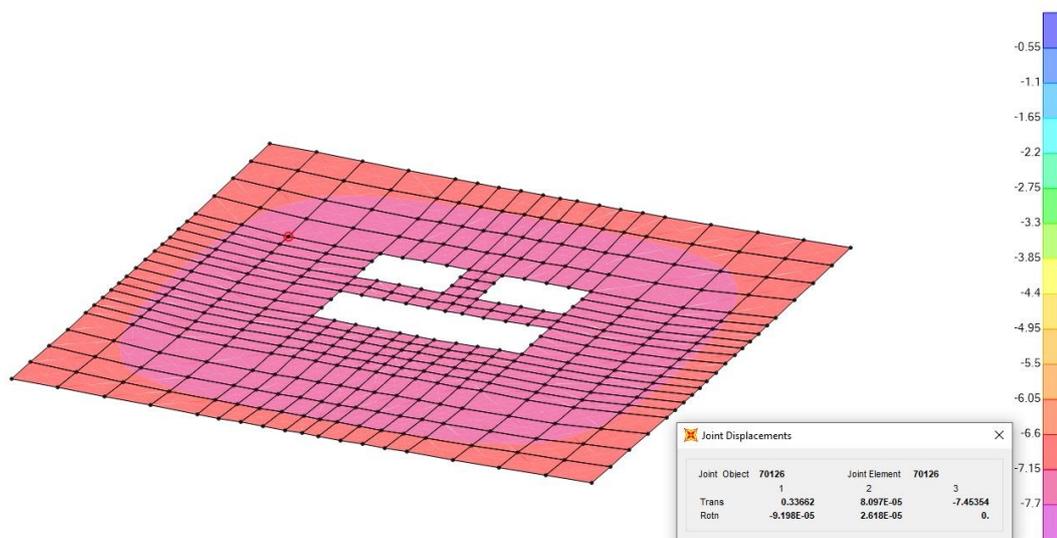


Imagen 91. Captura SAP2000: Punto de deformación vertical máxima del forjado de última planta en milímetros. Fuente: elaboración propia

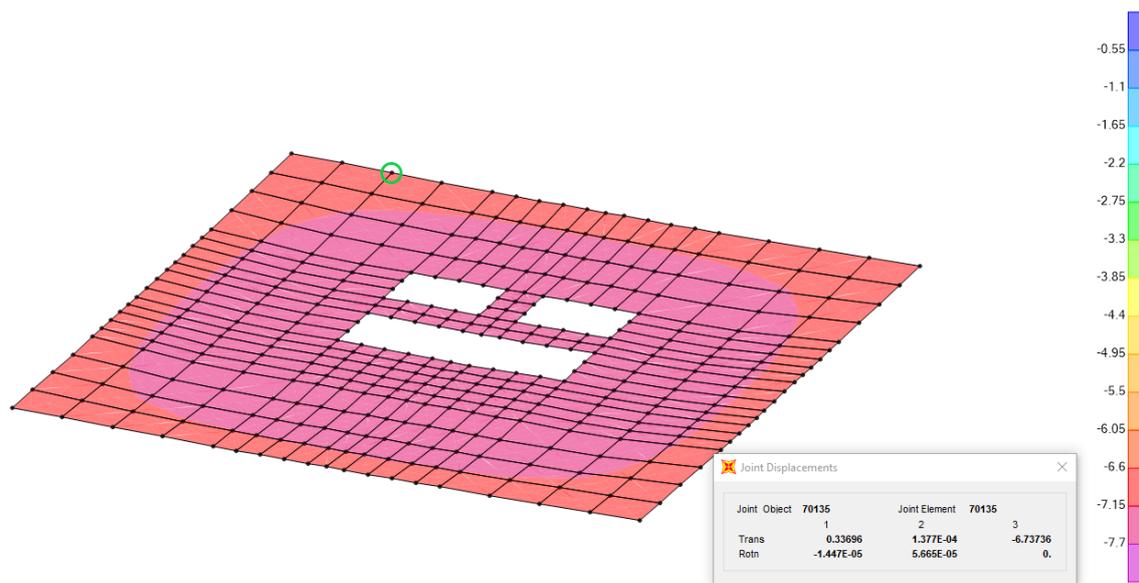


Imagen 92. Captura SAP2000: Punto de deformación vertical mínima del forjado de última planta en milímetros. Fuente: elaboración propia

| | |
|------------------|--------|
| dz1 | 7.5 mm |
| dz2 | 6.7 mm |
| Δdz | 0.8 mm |
| Distancia | 7.9 m |

Tabla 10. Confort de los usuarios para desplazamientos verticales. Fuente: elaboración propia

$$\frac{2 \cdot 7,9 \cdot 1000}{0,8} = 27313 > 350 \rightarrow \text{CUMPLE} \quad [3]$$

La deformación que se produce queda muy por debajo de la limitación marcada por la normativa. Esto se debe a la escasa extensión de la planta, haciendo que quede una distancia reducida entre el núcleo y la fachada, que constituyen los elementos resistentes de la estructura. Este factor reduce considerablemente la flecha que se produce.

No se puede garantizar que no se estén produciendo vibraciones en el forjado superior de esta vivienda en el que se encuentra el amortiguador de masa.

6.1.3 | Apariencia de la obra

Evalúa la sensación de seguridad en la obra y la normativa fija el límite en 1/300. Como se trata de una estructura de hormigón hay que tener en cuenta la flecha diferida, no únicamente la instantánea; esto lleva a aumentar el límite fijado por la normativa en un valor mucho menor, como 1/1500.

Se aplica la combinación ELS_{qu} (ver ecuación [4]), pero evaluando desplazamientos verticales.

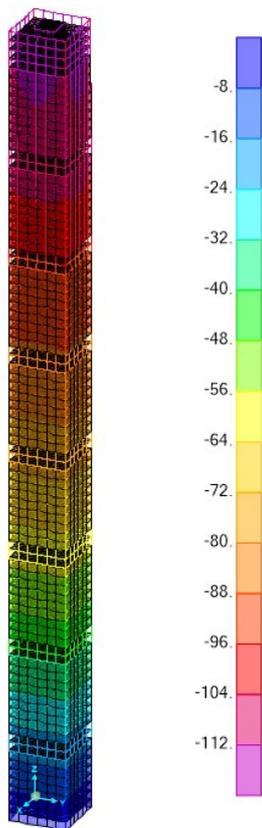


Imagen 93. Captura SAP2000: ELSqpu deformación de la estructura en dirección z en milímetros. Fuente: elaboración propia

Los elementos horizontales más afectados son los forjados superiores y la flecha máxima es de 112mm. Puesto que no tiene que ser un uso vivienda los elementos horizontales que se analizan se escoge el **forjado de la planta de cubierta**, que corresponde a una zona de instalaciones.

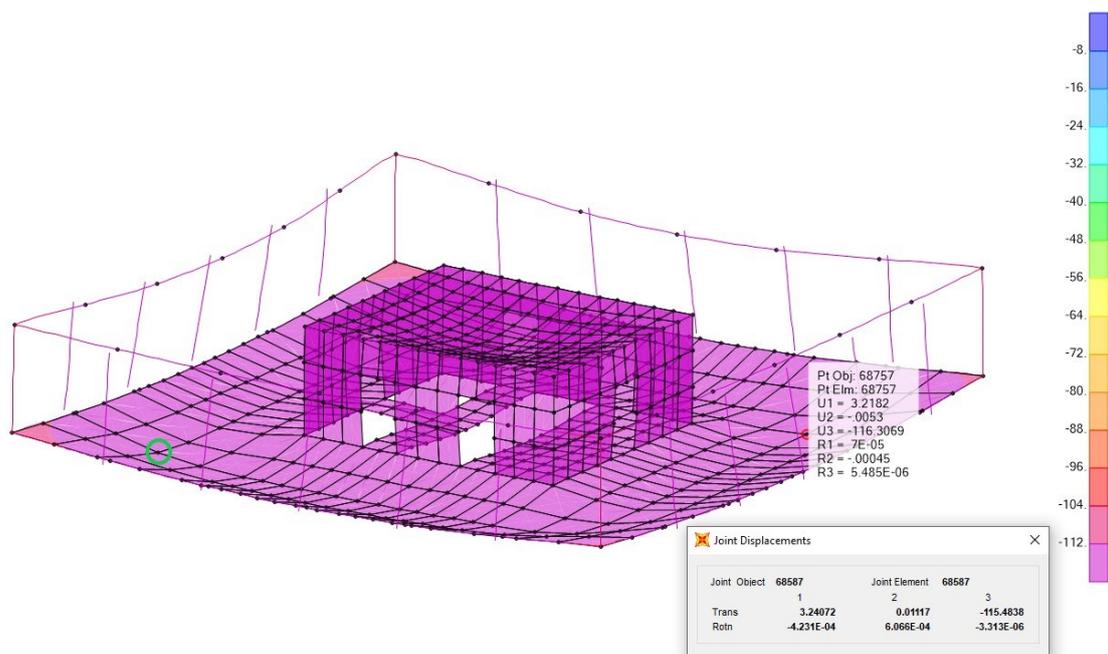


Imagen 94. Captura SAP2000: Resultado de la apariencia de la obra en milímetros; desplazamiento vertical máximo. Fuente: elaboración propia

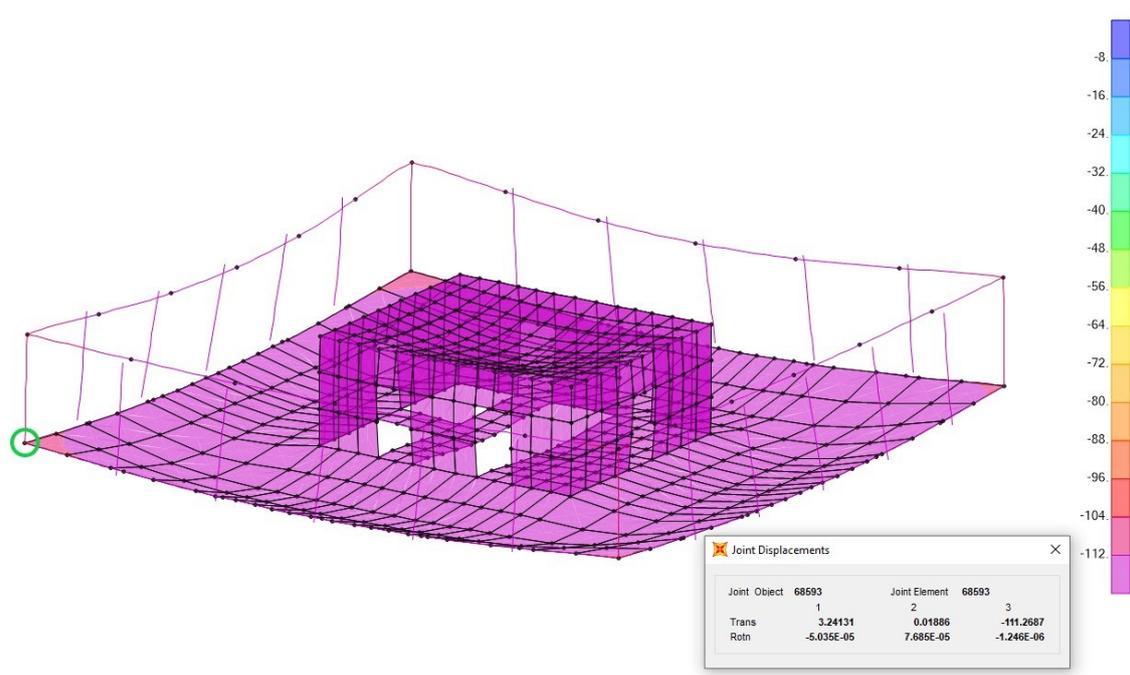


Imagen 95. Captura SAP2000: Resultado de la apariencia de la obra en milímetros; desplazamiento vertical mínimo. Fuente: elaboración propia

| | |
|------------------|----------|
| dz1 | 111.3 mm |
| dz2 | 115.5 mm |
| Δdz | 4.2 mm |
| Distancia | 5.89 m |

Tabla 11. Apariencia de la obra para desplazamientos verticales. Fuente: elaboración propia

$$L = \frac{2 \cdot 5,89 \cdot 1000}{4,2} = 2805 > 1500 \rightarrow \text{CUMPLE} \quad [3]$$

Con el resultado obtenido, podríamos concluir que incluso para un factor de seguridad mayor de 1/1500 (ya mayorado respecto de la normativa) la estructura seguiría cumpliendo este tercer requisito de ELS.

6.2 | Estados Límite Últimos (ELU)

El SAP2000 para las estructuras de hormigón armado **no nos ofrece una peritación directa** de los elementos, sino que tendremos que comprobar elemento a elemento el cumplimiento de acuerdo con la normativa. Por tanto, emplearemos el programa como una herramienta de análisis, pero no de comprobación. Por otra parte, se emplean tablas de David Gallardo Llopis para comprobar los elementos y, en caso de que no cumplan frente a ELU, proponer una sección distinta.

Resulta de especial interés la comprobación de un elemento de cada grupo definido: un pilar, un forjado y una pantalla. Esto daría lugar a un total de 9 comprobaciones y propuestas de armado, que debe de cumplir a cálculo.

6.2.1 | Comprobación de pilar grupo 1

Se escoge el pilar de planta baja central de una de las fachadas, que va a recibir la carga de la estructura y transmitirla a la cimentación. Es una sección sometida a flexocompresión y para dimensionarlo se utilizará una combinación ELU definida en la plantilla de SAP2000.

Se pueden obtener sus esfuerzos con el diálogo *Display Frame Forces/Stresses* o bien mediante tablas seleccionando la combinación ELU y el elemento.

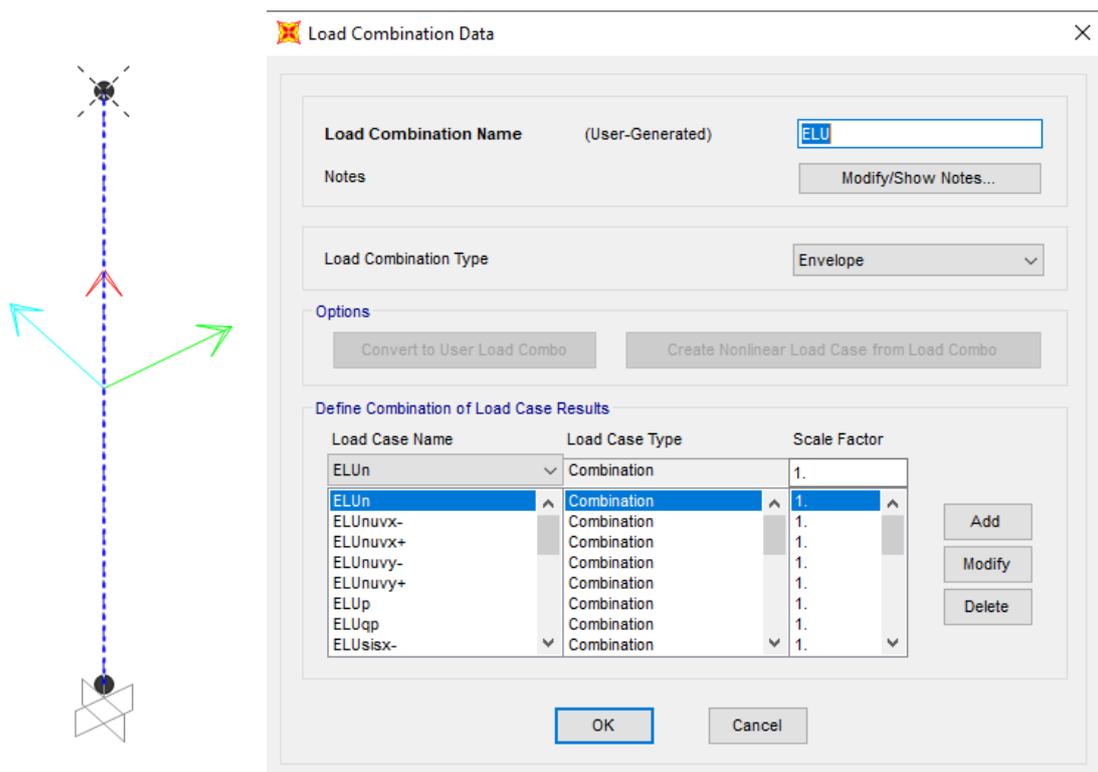


Imagen 96 (derecha). Captura SAP2000: disposición de los ejes locales en pilar 01. Fuente: elaboración propia

Imagen 97 (izquierda). Captura SAP2000: envolvente de combinaciones definidas para ELU. Fuente: plantilla de David Gallardo Llopis

Puesto que se trata de una envolvente se pueden obtener dos curvar por cada barra y esfuerzo; el programa muestra el valor máximo y mínimo de las combinaciones definidas. No significa que la barra esté sometida a los esfuerzos de forma simultánea, sino que según la situación trabaja entre esos dos valores.

| | OutputCase | CaseType Text | StepType Text | P KN | V2 KN | V3 KN | T KN-m | M2 KN-m | M3 KN-m | FrameElem Text | ElemStation | |
|---|------------|---------------|---------------|------|-------------|----------|----------|----------|------------|----------------|-------------|-------|
| | 0 | ELU | Combination | Max | -46277.106 | 873.97 | 175.164 | 11.0274 | 2266.7733 | 2909.5324 | 189-1 | 0 |
| | 225 | ELU | Combination | Max | -46109.17 | 873.97 | 175.164 | 11.0274 | 1880.6861 | 964.9503 | 189-1 | 2.225 |
| | 4.45 | ELU | Combination | Max | -45941.233 | 873.97 | 175.164 | 11.0274 | 1520.7124 | 981.1023 | 189-1 | 4.45 |
| ▶ | 0 | ELU | Combination | Min | -101009.873 | -873.983 | -427.735 | -11.0559 | -2880.4367 | -2908.1976 | 189-1 | 0 |
| | 225 | ELU | Combination | Min | -100841.937 | -873.983 | -427.735 | -11.0559 | -1932.3791 | -963.588 | 189-1 | 2.225 |
| | 4.45 | ELU | Combination | Min | -100674 | -873.983 | -427.735 | -11.0559 | -1010.4348 | -979.7126 | 189-1 | 4.45 |

Imagen 98. Captura SAP2000: Esfuerzos en pilar 01. Fuente: elaboración propia

En primer lugar, se va a analizar **la flexión respecto al plano de fachada**, contenedor de los ejes rojo verde, por lo que se tomarán los momentos M2, alrededor del eje verde, y los cortantes V3, en la dirección del eje 3. La información de interés que nos ofrece la tabla para poder introducir los esfuerzos de cálculo en la tabla Excel son los siguientes:

| Esfuerzo | Min | Max |
|--------------|---------------|----------------|
| P (axil) | -46.277,11 kN | -101.009,87 kN |
| Md (momento) | 2.266,77 kN-m | -2.880,44 kN-m |
| Cortante | 175,74 kN | -427,73 kN |

Tabla 12. Esfuerzos comprobación ELU pilar 01. Fuente: elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla, hay que tomar los **valores máximos**, que son los más desfavorables para poder dimensionar la sección.

Todo elemento estructural de hormigón armado debe cumplir unas cuantías geométricas mínimas y cuantías mecánicas especificadas en la EHE-08. Como se trata de un pilar y un elemento sometido a compresión simple o compuesta debe cumplir las siguientes limitaciones:

| | |
|------------------------|---|
| Limitación geométrica | $A_s \geq 0,004 \cdot A_c$ |
| Limitación mecánica | $A_{s1} \cdot f_{yd} \geq 0,05 \cdot N_d$ |
| | $A_{s1} \cdot f_{yd} \leq 0,5 A_c \cdot f_{cd}$ |
| Distancia entre barras | $D \leq 350 \text{ mm}$ |

Tabla 13. Limitaciones geométrica y mecánicas de los pilares. Fuente: elaboración propia a partir de la EHE-08

De partida ya conocemos todos los datos excepto A_s , el área de armadura. Se han mecanizado los cálculos de las limitaciones en una nueva hoja Excel para poder ir comprobando secciones rápidamente.

Es una sección fuertemente comprimida, se trabaja en **dominio 5**. Únicamente es necesaria armadura para cumplir con los requisitos mínimos de la normativa.

La disposición resultante del armado es la siguiente:

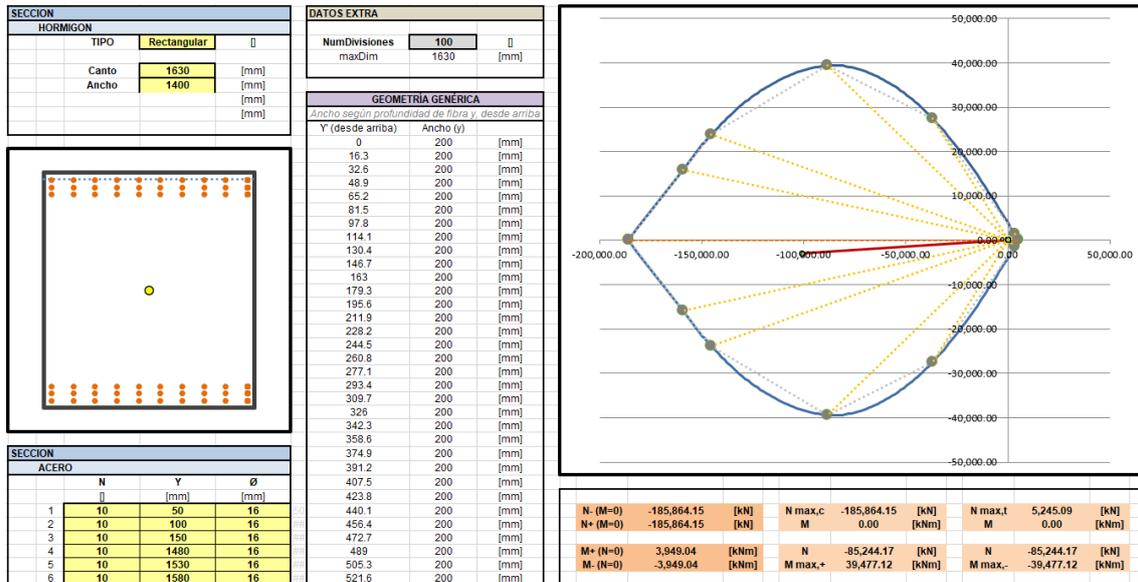


Imagen 99. Primer esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 01. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis

| | | |
|------------------------|---|---------------------------|
| Limitación geométrica | $A_s \geq 0,004 \cdot A_c$ | $12.063,36 \geq 9.128$ |
| Limitación mecánica | $A_{s1} \cdot f_{yd} \geq 0.05 \cdot N_d$ | $2.413 \geq 2.252,82$ |
| | $A_{s1} \cdot f_{yd} \leq 0.5 A_c \cdot f_{cd}$ | $2.252,82 \leq 106.493,3$ |
| Distancia entre barras | $D \leq 350 \text{ mm}$ | $130 \leq 350 \text{ mm}$ |

Tabla 14. Limitaciones del primer esquema de armado en pilar 01. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en el gráfico de la imagen 99 la sección está bastante desproporcionada; es decir, la línea roja que marca la posición del axil y el momento está muy lejos del contorno del diagrama, de optimizar la sección. Además, también puede verse este resultando con el coeficiente de seguridad o de saturación.

| FLEXIÓN SIMPLE | | | DOMINIO | | | ESFUERZOS DE CÁLCULO | | |
|---------------------------------------|----------|------|----------|---------|------|----------------------|------------|--------|
| DOM+ | 2 | | C. SEG. | 1.7626 | | Md | -2,880.4 | [kNm] |
| FN+ | 89.59 | [mm] | C. SATU. | 0.5673 | | Nd | -101,009.9 | [kN] |
| DOM- | 2 | | FIB. NT. | 3583.44 | [mm] | | CUMPLE | |
| FN- | 1,540.41 | [mm] | | | | Vrd1 | -427.7 | [kN] |
| | | | Øst | 8 | [mm] | Vrd2 | -427.7 | [kN] |
| | | | Nst | 10 | | | | CUMPLE |
| | | | st | 140 | [mm] | Vu1 | 77,420.00 | [kN] |
| | | | stmax | 145 | [mm] | Vu2 | 6,537.61 | [kN] |
| | | | | | | | | CUMPLE |
| | | | | | | | | CUMPLE |
| | | | | | | | | CUMPLE |
| CRITERIO SEGURIDAD PEREPÉREZ CORTANTE | | | | SI | | CUMPLE | | |

Imagen 100. Resultados primer esquema de armado de la sección del pilar 01. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis

En cuanto al cortante, para poder emplear barras de Ø8, armado típico de los estribos, se emplean 10 barras de estribo con una distancia de 14 cm.

En caso de que esta distancia se considere muy pequeña y complique las labores de montaje y ferralla, existen varias soluciones. Bien podrían emplearse barras de un mayor diámetro, pero también haría más compleja la puesta en obra, bien podrían emplearse más ramas de estribo. Si se opta por esta segunda solución, hay que acompañarla de más barras verticales para recoger las barras horizontales.

Para optimizar el uso de hormigón en la sección se propone reducirla, no en la dimensión de fachada, que da el aspecto al edificio, pero sí en el ancho de la sección.

Se propone una sección de 1,40x0,95 m con los siguientes resultados de armado:

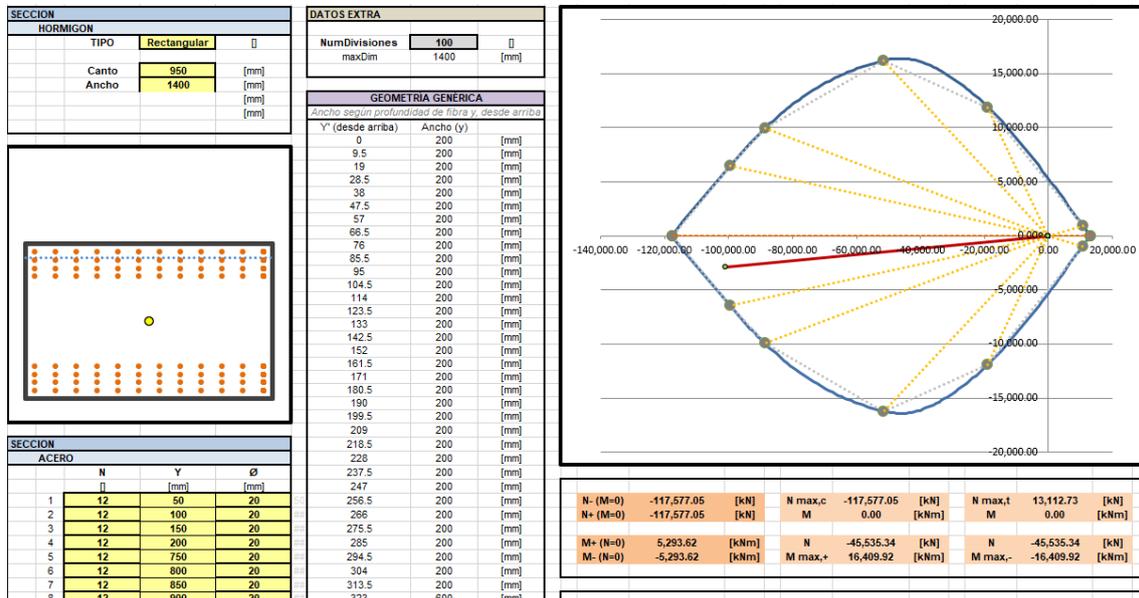


Imagen 101. Segundo esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 01. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis

| | | | | | | | | |
|--|-------------|------|----------------|-----------|-----------------------------|---------------|---------------|------|
| FLEXIÓN SIMPLE | | | DOMINIO | 5 | ESFUERZOS DE CÁLCULO | | | |
| DOM+ | 2 | | C. SEG. | 1.0850 | Md | -2,880.4 | [kNm] | |
| FN+ | 114.09 | [mm] | C. SATU. | 0.9217 | Nd | -101,009.9 | [kN] | |
| DOM- | 2 | | FIB. NT. | 2087.17 | | CUMPLE | | |
| FN- | 835.91 | [mm] | | | Vrd1 | -427.7 | [kN] | |
| | | | Øst | 8 | [mm] | Vrd2 | -427.7 | [kN] |
| | | | Nst | 12 | [mm] | Vu1 | 24,151.53 | [kN] |
| Nult (-) | -117,577.05 | [kN] | st | 150 | [mm] | Vu2 | 3,907.41 | [kN] |
| Nult (+) | -117,577.05 | [kN] | stmax | 174 | [mm] | | | |
| | | | | | | | CUMPLE | |
| | | | | | | | CUMPLE | |
| | | | | | | | CUMPLE | |
| CRITERIO SEGURIDAD PEREPÉREZ CORTANTE | | | | SI | CUMPLE | | | |

Imagen 102. Segundo esquema de armado de la sección del pilar 01. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis

| | | |
|-------------------------------|---|-------------------------------------|
| Limitación geométrica | $A_s \geq 0,004 \cdot A_c$ | $30.158,4 \geq 5.320$ |
| Limitación mecánica | $A_{s1} \cdot f_{yd} \geq 0.05 \cdot N_d$ | $6.032 \geq 5.050,5$ |
| | $A_{s1} \cdot f_{yd} \leq 0.5 A_c \cdot f_{cd}$ | $6.032 \leq 62.066,7$ |
| Distancia entre barras | $D \leq 350 \text{ mm}$ | $99 \text{ mm} \leq 350 \text{ mm}$ |

Tabla 15. Limitaciones del segundo esquema de armado en pilar 01. Fuente: elaboración propia

El coeficiente de seguridad es prácticamente 1, por lo que la sección escogida está lo más optimizada posible, repartiendo un armado simétrico entre ambas caras. Se pueden emplear estribos de 12 ramas con Ø8 separadas cada 15cm.

6.2.2 | Comprobación de pilar grupo 2

Se escoge un pilar de las plantas intermedias y se obtienen sus esfuerzos en el punto inicial, intermedio y final a partir de las tablas que genera SAP2000.

| Frame Text | Station m | OutputCase | CaseType Text | StepType Text | P KN | V2 KN | V3 KN | T KN-m | M2 KN-m | M3 KN-m | FrameElem Text | ElemStation |
|------------|-----------|------------|---------------|---------------|------------|-----------|----------|---------|-----------|------------|----------------|-------------|
| 1197 | 0 | ELU | Combination | Max | -24397.443 | 1422.302 | 40.777 | 0.3446 | 186.5432 | 3256.7422 | 1197-1 | 0 |
| 1197 | 2.225 | ELU | Combination | Max | -24229.507 | 1422.302 | 40.777 | 0.3446 | 97.5443 | 92.1204 | 1197-1 | 2.225 |
| 1197 | 4.45 | ELU | Combination | Max | -24061.57 | 1422.302 | 40.777 | 0.3446 | 320.262 | 3073.8751 | 1197-1 | 4.45 |
| 1197 | 0 | ELU | Combination | Min | -45056.35 | -1422.259 | -204.427 | -0.3447 | -589.4403 | -3255.2512 | 1197-1 | 0 |
| 1197 | 2.225 | ELU | Combination | Min | -44888.414 | -1422.259 | -204.427 | -0.3447 | -136.32 | -90.7258 | 1197-1 | 2.225 |
| 1197 | 4.45 | ELU | Combination | Min | -44720.477 | -1422.259 | -204.427 | -0.3447 | 5.0835 | -3072.5769 | 1197-1 | 4.45 |

Imagen 103. Captura SAP2000: Esfuerzos en pilar 01. Fuente: elaboración propia

En este caso, se opta por **dimensionar el pilar en el plano de flexión perpendicular a fachada**, es decir, que contiene los ejes 1 y 3, por lo que hay que conocer momento M3 y su cortante asociado, el V2.

| Esfuerzo | Max |
|--------------|----------------|
| P (axil) | -45.056,35 kN |
| Md (momento) | -3.255,25 kN·m |
| Cortante | -1.422,26 kN |

Tabla 16. Esfuerzos comprobación ELU pilar 02. Fuente: elaboración propia.

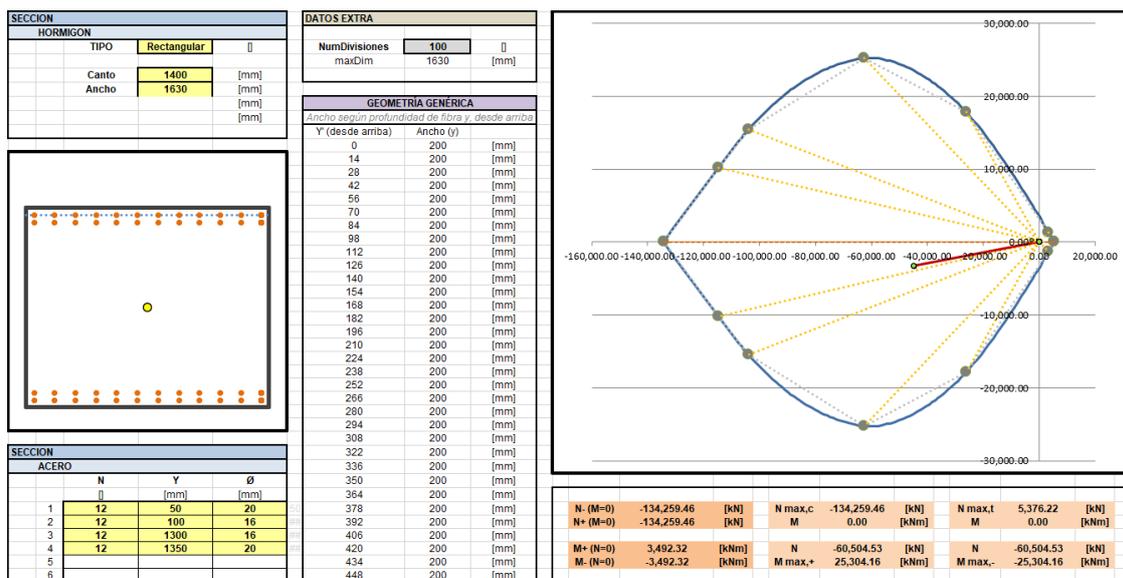


Imagen 104. Primer esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 02. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis

| FLEXIÓN SIMPLE | | | DOMINIO 5 | | | ESFUERZOS DE CÁLCULO | | |
|---------------------------------------|-------------|------|-----------|---------|------|----------------------|-----------|-------|
| DOM+ | 2 | | C.SEG. | 2.6252 | [] | Md | -3,255.3 | [kNm] |
| FN+ | 87.87 | [mm] | C. SATU. | 0.3809 | [] | Nd | -45,056.4 | [kN] |
| DOM- | 2 | | FIB. NT. | 1543.01 | [mm] | | CUMPLE | |
| FN- | 1,312.13 | [mm] | | | | Vrd1 | -1422.3 | [kN] |
| | | | Øst | 8 | [mm] | Vrd2 | -1422.3 | [kN] |
| | | | Nst | 12 | [] | Vu1 | 55,012.50 | [kN] |
| AXIL SIMPLE | | | st | 150 | [mm] | Vu2 | 6,278.24 | [kN] |
| Nult (-) | -134,259.46 | [kN] | stmax | 187 | [mm] | | | |
| Nult (+) | -134,259.46 | [kN] | | | | | | |
| CRITERIO SEGURIDAD PEREPÉREZ CORTANTE | | | | SI | | CUMPLE | | |

Imagen 105. Resultados primer esquema de armado de la sección del pilar 02. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis

| | | |
|------------------------|---|--------------------------------------|
| Limitación geométrica | $A_s \geq 0,004 \cdot A_c$ | $12.364,94 \geq 9.128$ |
| Limitación mecánica | $A_{s1} \cdot f_{yd} \geq 0.05 \cdot N_d$ | $2.473 \geq 2.252,82$ |
| | $A_{s1} \cdot f_{yd} \leq 0.5 A_c \cdot f_{cd}$ | $2.473 \leq 76.066,7$ |
| Distancia entre barras | $D \leq 350 \text{ mm}$ | $120 \text{ mm} \leq 350 \text{ mm}$ |

Tabla 17. Limitaciones del primer esquema de armado en pilar 02. Fuente: elaboración propia

De nuevo, es una sección **muy sobredimensionada** como se puede observar en la gráfica y en el coeficiente de saturación, que queda lejos de llegar a la unidad. Se está dimensionando en dominio 5, con una sección totalmente comprimida.

Se va a optar por dimensionarla con una sección menor de hormigón, manteniendo la dimensión de 1,40 m en fachada, de forma que no se altere la apariencia del proyecto.

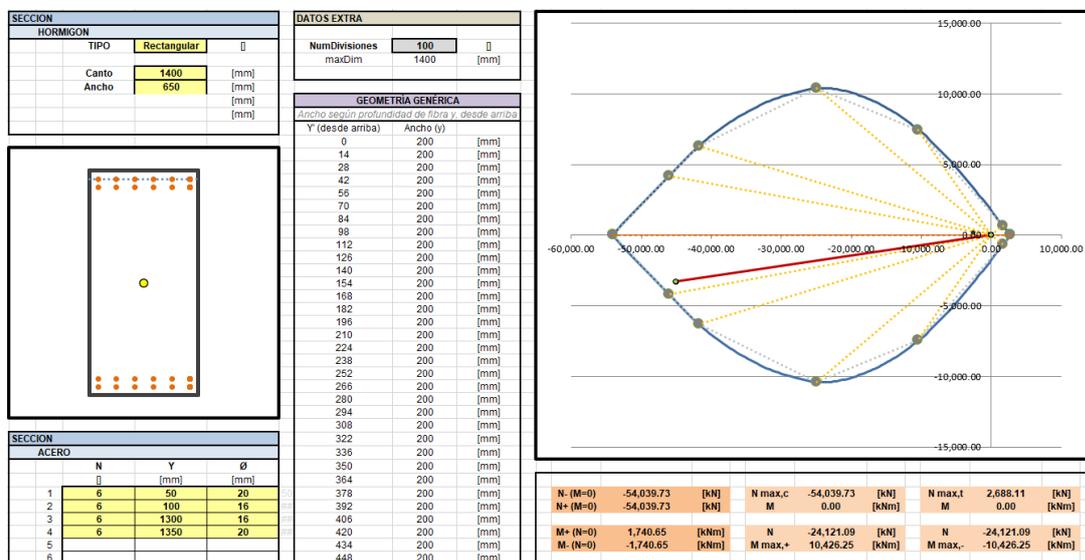


Imagen 106. Segundo esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 02. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis

| FLEXIÓN SIMPLE | | DOMINIO 5 | | ESFUERZOS DE CÁLCULO | | | |
|---------------------------------------|------------|-----------|---------|----------------------|-----------|-------|--------|
| DOM+ | 2 | C. SEG. | 1.0582 | Md | -3,255.3 | [kNm] | |
| FN+ | 97.06 | C. SATU. | 0.9450 | Nd | -45,056.4 | [kN] | |
| DOM- | 2 | FIB. NT. | 1543.35 | | CUMPLE | | |
| FN- | 1,302.94 | | | Vrd1 | -1422.3 | [kN] | CUMPLE |
| | | Øst | 8 | [mm] | | | |
| | | Nst | 6 | | | | CUMPLE |
| | | st | 200 | [mm] | | | CUMPLE |
| | | stmax | 234 | [mm] | | | |
| AXIL SIMPLE | | | | | | | |
| Nult (-) | -54,039.73 | | | | | | |
| Nult (+) | -54,039.73 | | | | | | |
| CRITERIO SEGURIDAD PEREPÉREZ CORTANTE | | | SI | | | | CUMPLE |

Imagen 107. Resultados segundo esquema de armado de la sección del pilar 02. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis

| | | |
|------------------------|---|-------------------------------------|
| Limitación geométrica | $A_s \geq 0,004 \cdot A_c$ | $12.364,9 \geq 3.360$ |
| Limitación mecánica | $A_{s1} \cdot f_{yd} \geq 0.05 \cdot N_d$ | $2.473 \geq 2.252,8$ |
| | $A_{s1} \cdot f_{yd} \leq 0.5 A_c \cdot f_{cd}$ | $2.473 \leq 30.333,3$ |
| Distancia entre barras | $D \leq 350 \text{ mm}$ | $92 \text{ mm} \leq 350 \text{ mm}$ |

Imagen 108. Limitaciones del segundo esquema de armado en pilar 02. Fuente: elaboración propia

6.2.3 | Comprobación de pilar grupo 3

De forma análoga, se obtienen los esfuerzos actuantes sobre una barra perteneciente a las que se encuentran en la cubierta del edificio realizadas con HA-70.

| | OutputCase | CaseType Text | StepType Text | P KN | V2 KN | V3 KN | T KN-m | M2 KN-m | M3 KN-m | FrameElem Text | ElemStation |
|--|------------|---------------|---------------|------|----------|---------|--------|---------|----------|----------------|-------------|
| | 0 | ELU | Combination | Max | -91.814 | 21.354 | 12.912 | 2.3317 | 22.5893 | 2109-1 | 0 |
| | 225 | ELU | Combination | Max | -52.892 | 21.354 | 12.912 | 2.3317 | -3.7003 | 2109-1 | 2.225 |
| | 4.45 | ELU | Combination | Max | -6.338 | 21.354 | 12.912 | 2.3317 | -20.8785 | 2109-1 | 4.45 |
| | 0 | ELU | Combination | Min | -139.046 | -15.125 | 7.577 | -1.6179 | 9.9672 | 2109-1 | 0 |
| | 225 | ELU | Combination | Min | -86.501 | -15.125 | 7.577 | -1.6179 | -10.8971 | 2109-1 | 2.225 |
| | 4.45 | ELU | Combination | Min | -33.957 | -15.125 | 7.577 | -1.6179 | -38.4792 | 2109-1 | 4.45 |

Imagen 109. Esfuerzos en pilar 03. Fuente: elaboración propia

El pilar se va a dimensionar **en su plano perpendicular a fachada**, por lo que se toman los momentos M3 y los cortantes V2. Los esfuerzos a tener en cuenta son los siguientes:

| | |
|----|-------------|
| Nd | -139,05 kN |
| Md | -74.90 kN·m |
| Vd | 7,58 kN |

Tabla 18. Esfuerzos comprobación ELU pilar 03. Fuente: elaboración propia

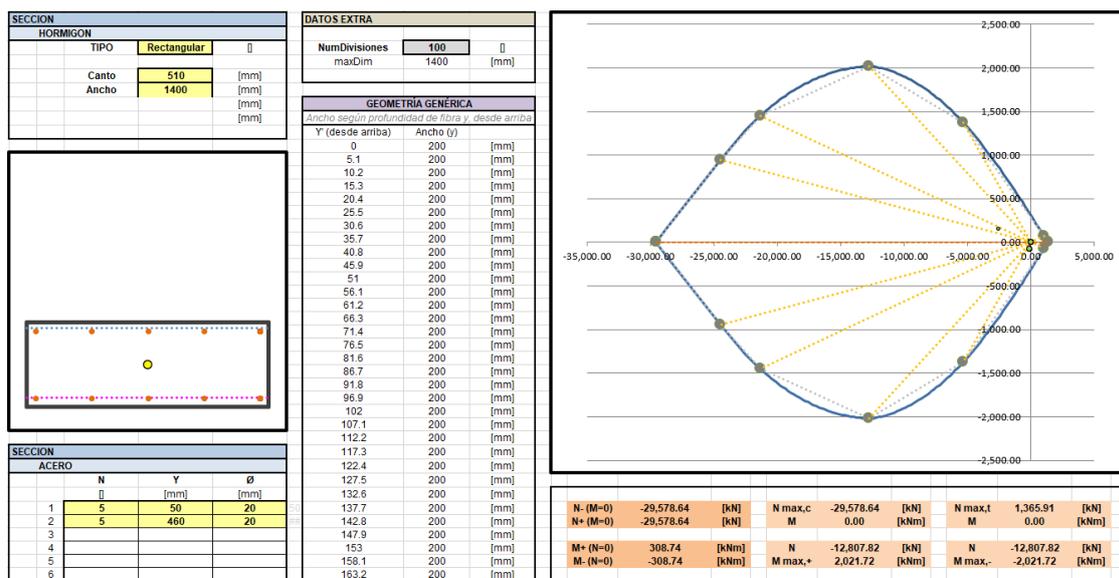


Imagen 110. Primer esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 03. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis

| FLEXIÓN SIMPLE | | DOMINIO | | ESFUERZOS DE CÁLCULO | |
|---------------------------------------|-----------------|----------|------------|----------------------|---------------|
| DOM+ | 2 | 2 | | Md | -74.9 [kNm] |
| FN+ | 37.24 [mm] | C.SEG. | 7.1100 [] | Nd | -139.1 [kN] |
| DOM- | 2 | C. SATU. | 0.1406 [] | CUMPLE | |
| FN- | 472.76 [mm] | FIB. NT. | 55.46 [mm] | Vrd1 | 7.6 [kN] |
| AXIL SIMPLE | | Øst | 8 [mm] | Vrd2 | 7.6 [kN] |
| Nult (-) | -29,578.64 [kN] | Nst | 5 [] | Vu1 | 9,042.71 [kN] |
| Nult (+) | -29,578.64 [kN] | st | 110 [mm] | Vu2 | 810.34 [kN] |
| | | stmax | 115 [mm] | CUMPLE | |
| CRITERIO SEGURIDAD PEREPÉREZ CORTANTE | | | SI | CUMPLE | |

Imagen 111. Resultados primer esquema de armado de la sección del pilar 03. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis

| | | |
|------------------------|---|--------------------------------------|
| Limitación geométrica | $A_s \geq 0,004 \cdot A_c$ | $3.141,5 \geq 2.856$ |
| Limitación mecánica | $A_{s1} \cdot f_{yd} \geq 0.05 \cdot N_d$ | $628 \geq 6,95$ |
| | $A_{s1} \cdot f_{yd} \leq 0.5 A_c \cdot f_{cd}$ | $628 \leq 16.660$ |
| Distancia entre barras | $D \leq 350 \text{ mm}$ | $120 \text{ mm} \leq 350 \text{ mm}$ |

Tabla 19. Limitaciones del primer esquema de armado en pilar 03. Fuente: elaboración propia

Se propone un armado con 5 barras del Ø20 simétricas en ambas caras. Como se puede observar, la sección no es óptima para los esfuerzos a considerar. El coeficiente de seguridad es aproximadamente de 7, lo que no tiene sentido.

Sin dejar de lado los condicionantes estilísticos se va a dimensionar el pilar manteniendo una dimensión de 1,40 m en fachada, como en los casos anteriores.

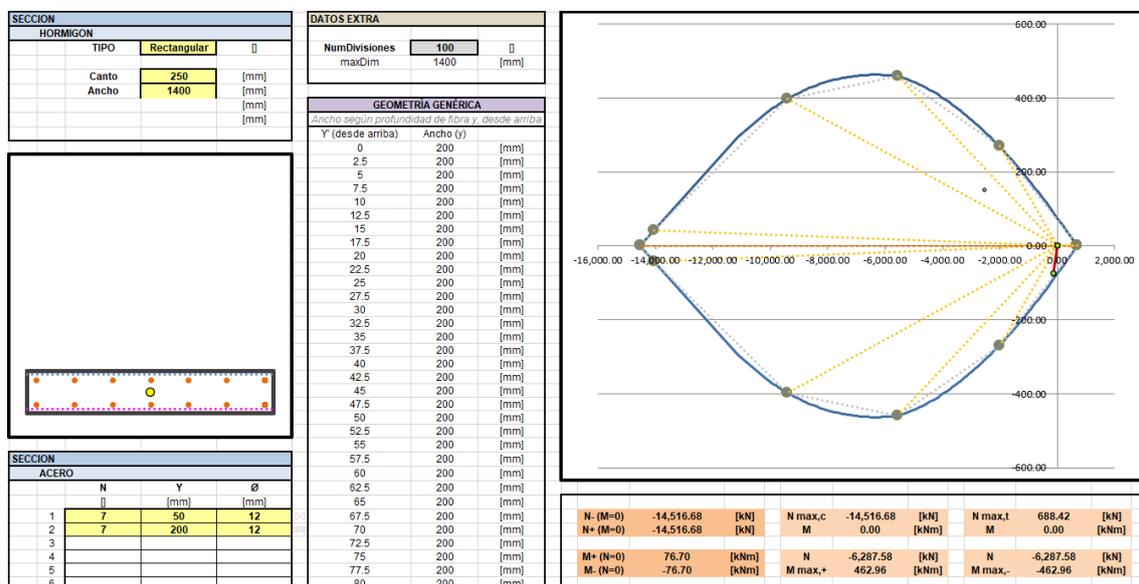


Imagen 112. Segundo esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 03. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis

| | | | | | | | | |
|---------------------------------------|------------|------|-----------|--------|------|----------------------|----------|-------|
| FLEXIÓN SIMPLE | | | DOMINIO 2 | | | ESFUERZOS DE CÁLCULO | | |
| DOM+ | 2 | | C.SEG. | 1.3796 | | Md | -74.9 | [kNm] |
| FN+ | 21.89 | [mm] | C. SATU. | 0.7248 | | Nd | -139.1 | [kN] |
| DOM- | 2 | | FIB. NT. | 25.16 | [mm] | CUMPLE | | |
| FN- | 228.11 | [mm] | Øst | 8 | [mm] | Vrd1 | 7.6 | [kN] |
| AXIL SIMPLE | | | Nst | 7 | | Vrd2 | 7.6 | [kN] |
| Nult (-) | -14,516.68 | [kN] | st | 140 | [mm] | Vu1 | 3,953.37 | [kN] |
| Nult(+) | -14,516.68 | [kN] | stmax | 150 | [mm] | Vu2 | 434.36 | [kN] |
| CRITERIO SEGURIDAD PEREPÉREZ CORTANTE | | | SI | | | CUMPLE | | |

Imagen 113. Resultados segundo esquema de armado de la sección del pilar 03. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis

| | | |
|-----------------------|----------------------------|----------------------|
| Limitación geométrica | $A_s \geq 0,004 \cdot A_c$ | $1.583,3 \geq 1.400$ |
|-----------------------|----------------------------|----------------------|

| | | |
|-------------------------------|---|--------------------------------------|
| Limitación mecánica | $A_{s1} \cdot f_{yd} \geq 0.05 \cdot N_d$ | $317 \geq 6,95$ |
| | $A_{s1} \cdot f_{yd} \leq 0.5 A_c \cdot f_{cd}$ | $317 \leq 8.166,7$ |
| Distancia entre barras | $D \leq 350 \text{ mm}$ | $207 \text{ mm} \leq 350 \text{ mm}$ |

Tabla 20. Limitaciones del primer esquema de armado en pilar 03. Fuente: elaboración propia

Empleando 7 barras $\emptyset 12$ simétricas respecto al eje de flexión se consigue trabajar en dominio 2. Los estribos de $\emptyset 8$ se colocan cada 14 cm, si bien es posible colocarlos cada 15 cm.

6.2.4 | Comprobación losa grupo 1

Se va a comprobar la losa del forjado de primera planta frente a Estados Límite Últimos. Primero se procede a un tanteo rápido de los valores de momento expresados en [kN·m/ma] para obtener un orden de magnitud para dicha losa en la hipótesis ELUu.

Es importante tener en cuenta en todo momento la **posición de los ejes locales** en los elementos finitos, que se mantendrán en las tres comprobaciones de losas; en este caso coinciden con los globales.

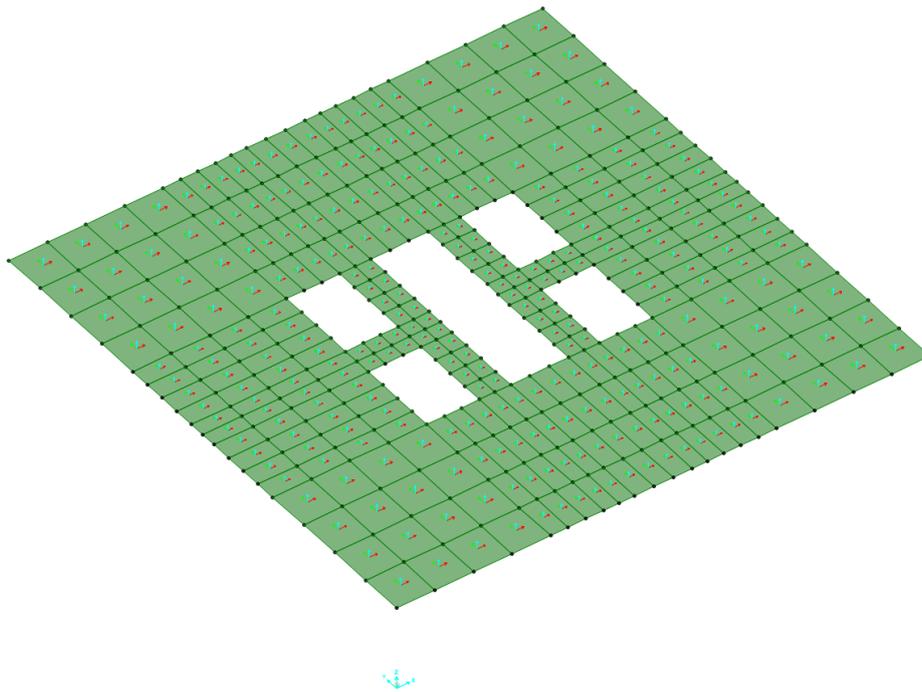


Imagen 114. Captura SAP2000: Posición de los ejes locales en los elementos finitos de la losa. Fuente: elaboración propia

En la dirección **M11**, es decir, en la dirección en la que es necesaria armadura en la dirección del eje local 1 (rojo), hay un momento negativo máximo de aproximadamente -131 kN·m/ma, en la zona de apoyo de las pantallas, y un momento positivo máximo de 48 kN·m/ma.

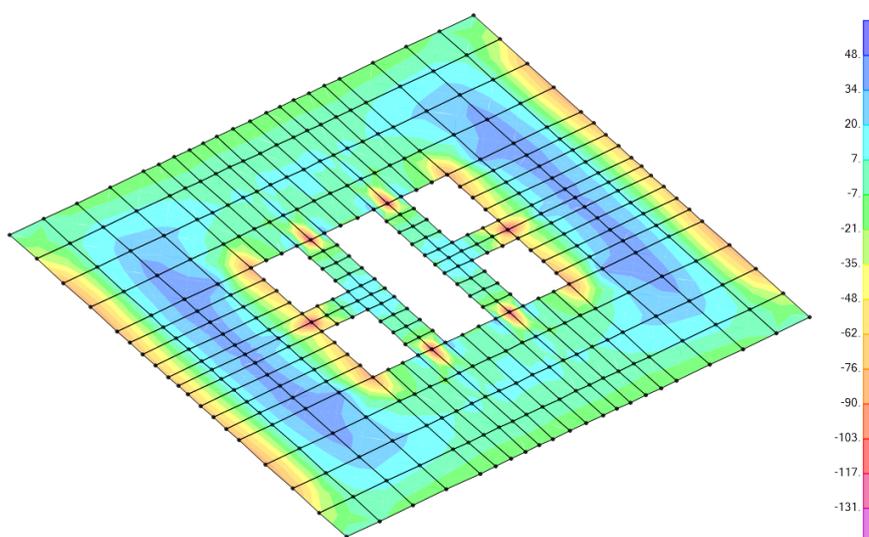


Imagen 115. Captura SAP2000: Momentos M11 en forjado grupo 01 en kN·m/ma acotados por máximo y mínimo. Fuente: elaboración propia

En la dirección **M22** se puede observar que las losas tienen mayores esfuerzos. En la dirección que requiere armado en el eje 2 (verde) hay un momento negativo máximo de aproximadamente de -127 kN·m/ma, también en el apoyo de las pantallas, y un momento positivo máximo de 57 kN·m/ma.

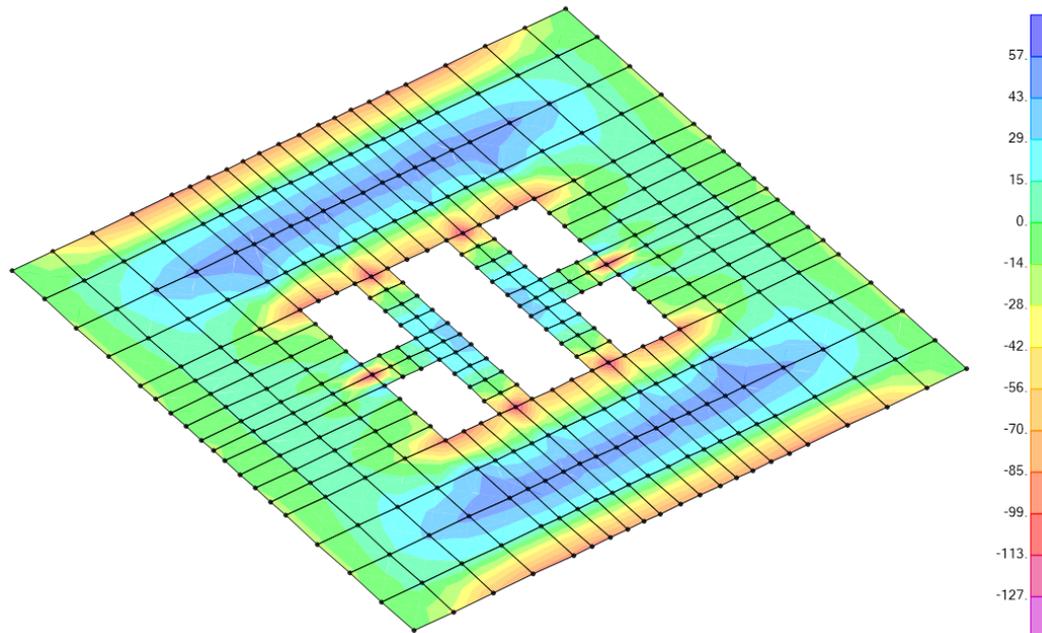


Imagen 116. Captura SAP2000: Momentos M22 en forjado grupo 01 en kN·m/ma acotados por máximo y mínimo. Fuente: elaboración propia

En primer lugar, para el empleo del Excel de ELU para elementos finitos de hormigón armado, se rellenan los datos conocidos en la tabla; es posible adoptar recubrimientos netos de 3.5cm ya que, independientemente del tipo de ambiente, irá revestida con pavimento, lo que protegerá las armaduras más exteriores.

| DATOS DE PARTIDA | | |
|---------------------------|---------|-------|
| Materiales y geometría | | |
| Fck | 40 | N/mm2 |
| Gc | 1.50 | |
| Fcd | 26.67 | N/mm2 |
| Fyk | 500 | N/mm2 |
| Gy | 1.15 | |
| Fyd | 434.78 | N/mm2 |
| Tipo de elemento | FORJADO | |
| Canto Losa Maciza | 20 | cm |
| Recubrimiento Neto | 3.5 | cm |
| Cuantía mínima geométrica | 78.26 | kN |
| Cuantía mínima mecánica | 213.33 | kN |

Imagen 117. Definición constructiva losa01. Fuente: elaboración propia a partir Excel aportado por David Gallardo Llopis

En la dirección M11 se colocará la armadura exterior y en la M22 la interior.

En la **dirección del eje 1 se colocan redondos del Ø20 cada 15 cm**, armado con un momento último de 122,33 kN·m/ma. Si se aplica una visualización con límites en 122 kN·m/ma, tanto en positivo como en negativo se obtiene el resultado siguiente:

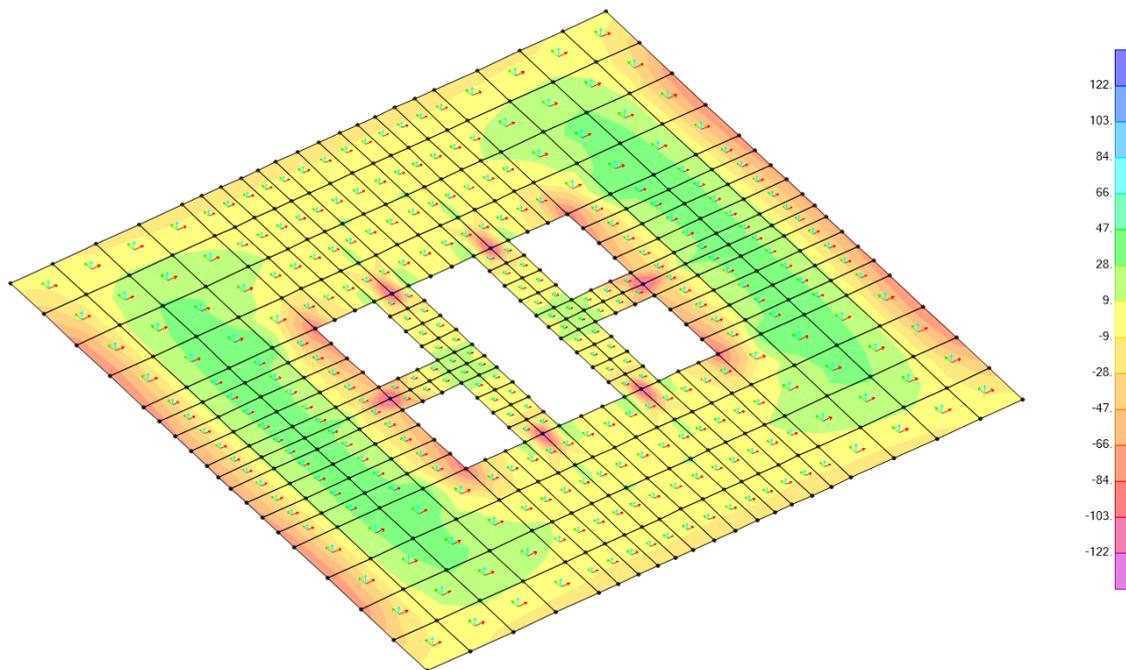


Imagen 118. Captura SAP2000: Resultado de momentos en dirección 1 acotados según M último. Fuente: elaboración propia

Hay algunas zonas que no cumplen con el armado grafiadas en magenta, en el apoyo de las pantallas. Dado que son zonas bastante concentradas podríamos afirmar que el armado propuesto sí que cumple. Si embargo, se van a integrar los esfuerzos en el punto más desfavorable para obtener una resultante con la herramienta *Section Cut*.

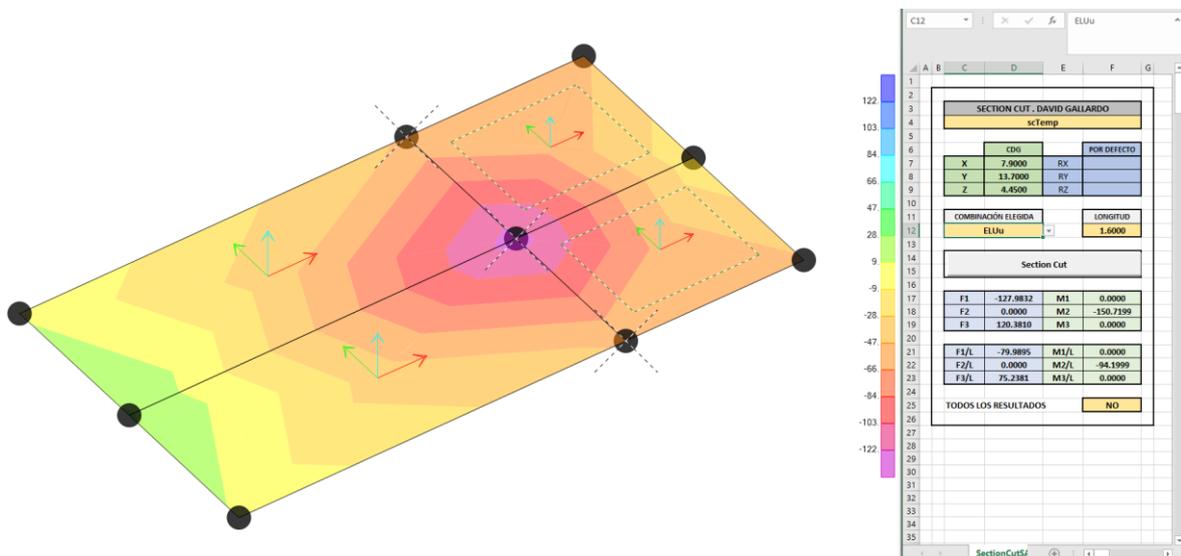


Imagen 119. Section cut para apoyo de las pantallas en losa01 en la dirección 1. Fuente: elaboración propia

El resultado respecto al CDG es un momento de $-94,2 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$, inferior al momento último de la sección, por lo que se puede considerar un armado válido.

En la **dirección del eje 2** se va a emplear el mismo armado y se va a aplicar la misma forma de visualización para ver si cumple.

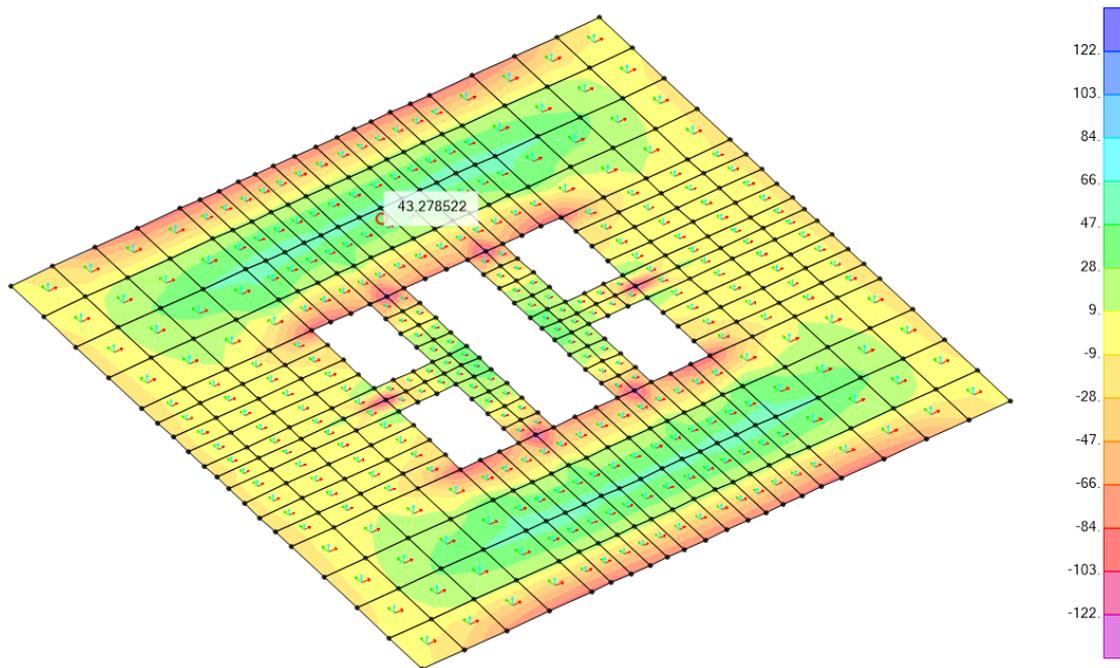


Imagen 120. Captura SAP2000: Resultado de momentos en dirección 2 acotados según M último. Fuente: elaboración propia

De nuevo, son las zonas en las que se apoyan las pantallas las que tienen momentos que exceden el momento último de la sección. Se va a comprobar con el *Section Cut* si es necesario colocar refuerzos o se debe a un efecto muy puntual.

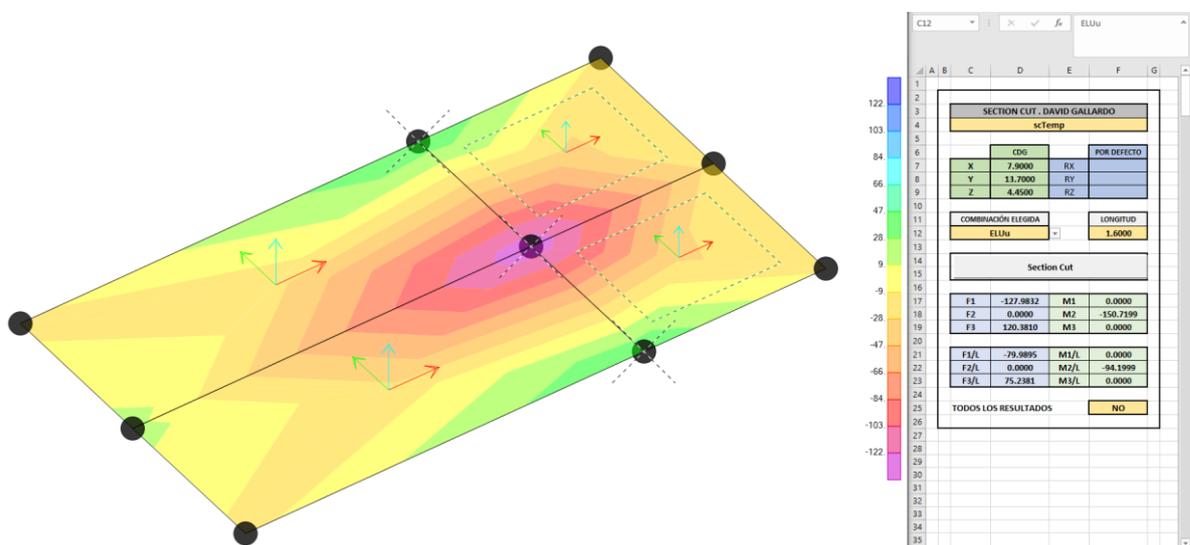


Imagen 121. Section cut para apoyo de las pantallas en losa01 en la dirección 2. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

El momento respecto al CDG de la selección es de $-94,15 \text{ kN}\cdot\text{m/ma}$, también por debajo del momento último de la sección, por lo que no requerirá de ningún armado adicional.

También es necesaria realizar una comprobación a cortante. El cortante asociado al momento M11 es el V13 y el asociado al M22 es el V23. Para la visualización se aplica como límite el **cortante último obtenido para la sección de $140 \text{ kN}\cdot\text{m/ma}$** . Es importante para la adecuada visualización del esfuerzo cortante mantener desactivado el *Sress Averaging*.

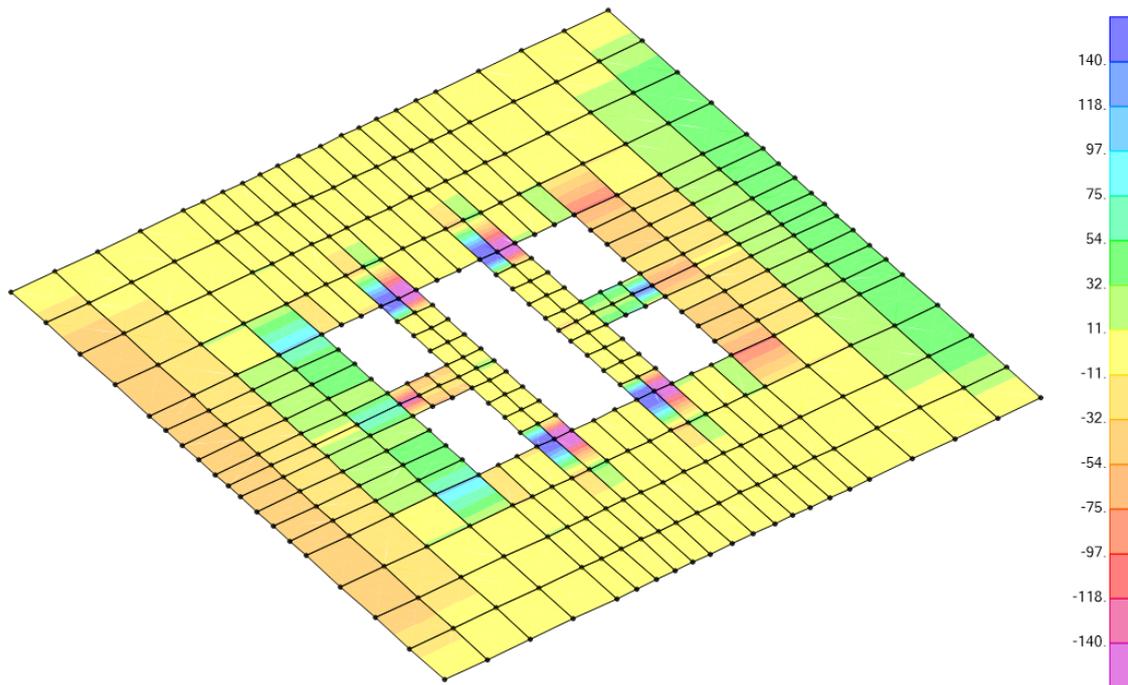


Imagen 122. Captura SAP2000: Cortante V13 en losa01 acotados según V último. Fuente: elaboración propia

Son zonas muy reducidas las que se exceden y con un valor sobre el cortante último muy pequeño, por lo que no requerirá de ningún armado adicional frente a cortante. Sin embargo, se puede aplicar la herramienta *Section Cut* para comprobar cuál es el cortante resultante en el CDG de la sección.

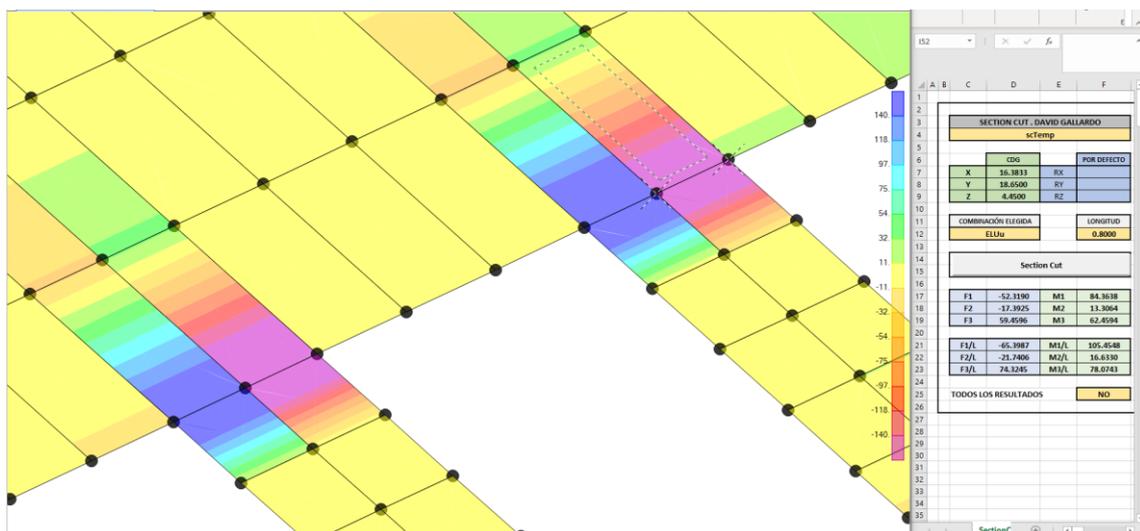


Imagen 123. Captura SAP2000: Section Cut para cortante V13. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

El cortante en ejes globales que se obtiene es de $-74,3 \text{ kN/ma}$ (F3/L), por debajo del cortante último de 140 kN/ma .

También es necesario conocer qué ocurre en la zona de cortantes V13 positivos.

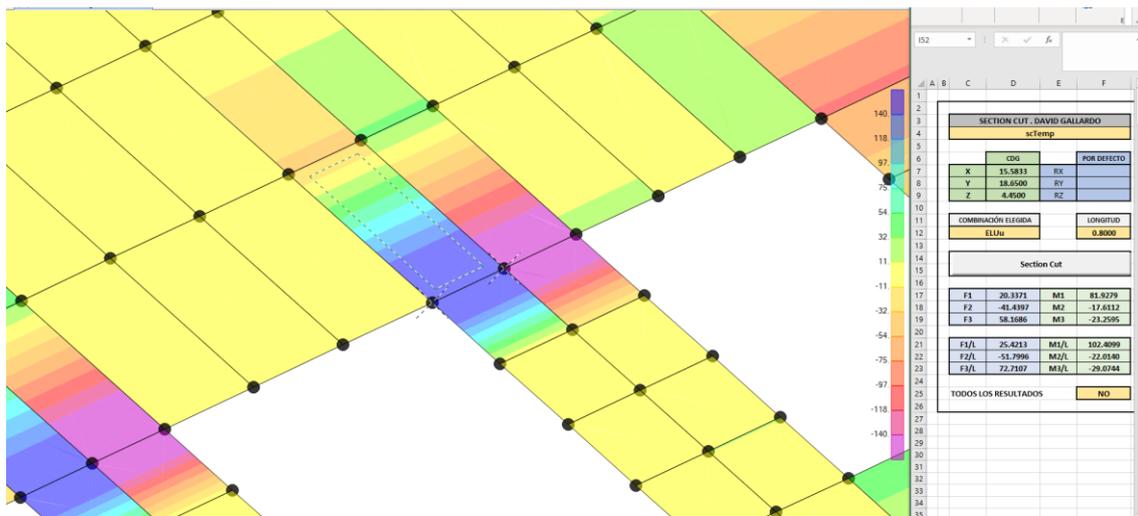


Imagen 124. Captura SAP2000: Section Cut para cortante V13. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

De nuevo, esta zona también tiene como resultante un cortante por debajo del cortante último y, por tanto, la sección cumple.

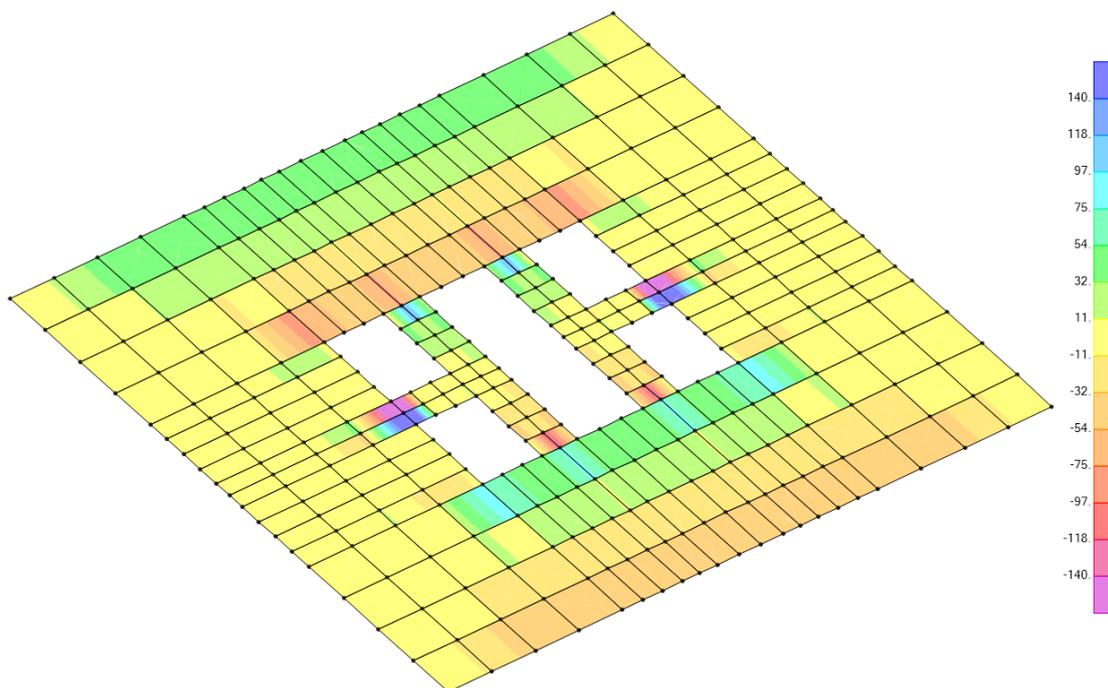


Imagen 125. Captura SAP2000: Cortantes V23 acotados según V último. Fuente: elaboración propia

Como en el caso anterior, se obtienen zonas en magenta y azul que no cumplen con la limitación de cortante último de la sección. Podría emplearse la misma metodología y aplicar el *Section Cut* para obtener el cortante resultante, pero son zonas muy puntuales en el apoyo de las pantallas que no requerirán de ningún refuerzo.

Por tanto, se obtiene un **armado en las dos direcciones de barras de Ø20 cada 15 cm**, trabajando la losa de 20cm en dominio 2.

6.2.5 | Comprobación losa grupo 2

De nuevo, se emplea la hipótesis ELUu para obtener un orden de magnitud de los esfuerzos para armar la losa. En este caso, las losas son de 40cm, por lo que los datos de partida cambian.

| DATOS DE PARTIDA | | |
|---------------------------|---------|-------------------|
| Materiales y geometría | | |
| Fck | 40 | N/mm ² |
| Gc | 1.50 | |
| Fcd | 26.67 | N/mm ² |
| Fyk | 500 | N/mm ² |
| Gy | 1.15 | |
| Fyd | 434.78 | N/mm ² |
| Tipo de elemento | FORJADO | |
| Canto Losa Maciza | 40 | cm |
| Recubrimiento Neto | 3.5 | cm |
| Cuantía mínima geométrica | 156.52 | kN |
| Cuantía mínima mecánica | 426.67 | kN |

Imagen 126. Definición constructiva losa02. Fuente: elaboración propia a partir de Excel aportado por David Gallardo Llopis

De forma análoga a la losa 01, se visualizan los momentos **M11 y M22** que afectan a los elementos finitos para tener un orden de magnitud. Una vez conocido, M11 máximo de -216 kN·m/ma y M22 máximo de -224 kN·m/ma, se puede proponer un armado.

En la dirección M11 se colocará la armadura exterior y en la M22 la interior. En **ambas direcciones la losa se arma con barras de Ø20 cada 20 cm**, obteniéndose un **momento último de 230,46 kN·m/ma**. Como es posible que existan puntos donde no se cumpla con este momento último, se emplea la visualización de los esfuerzos contemplando como límites superior e inferior 230,5 kN·m/ma.

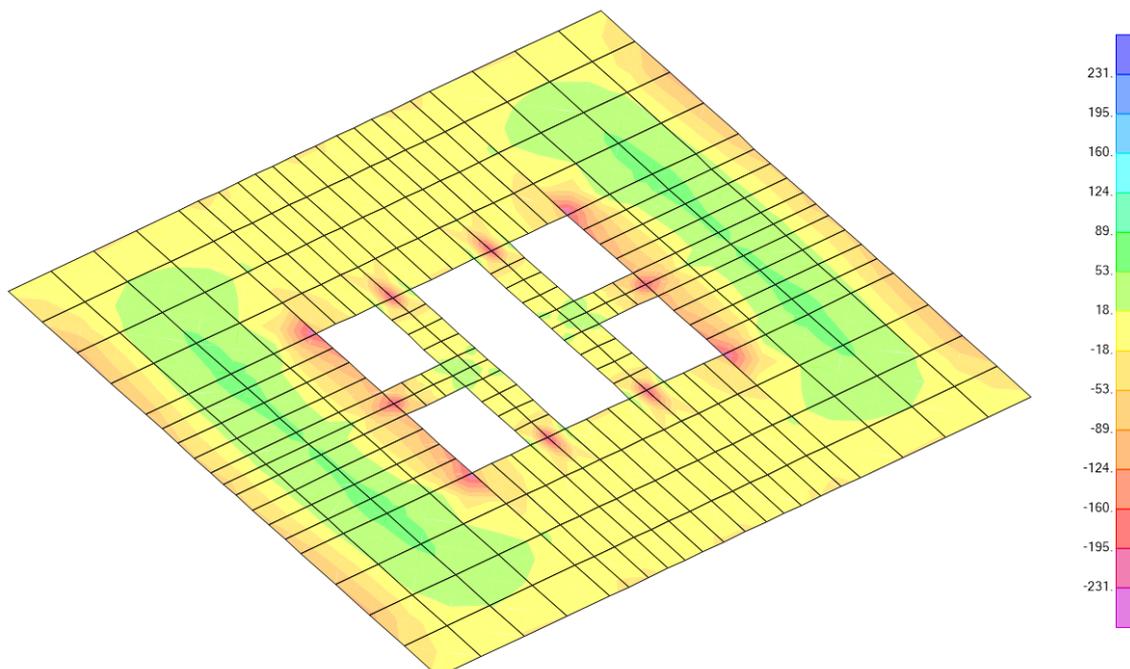


Imagen 127. Captura SAP2000: Momentos M11 en forjado grupo 02 en kN·m/ma acotados según M último. Fuente: elaboración propia

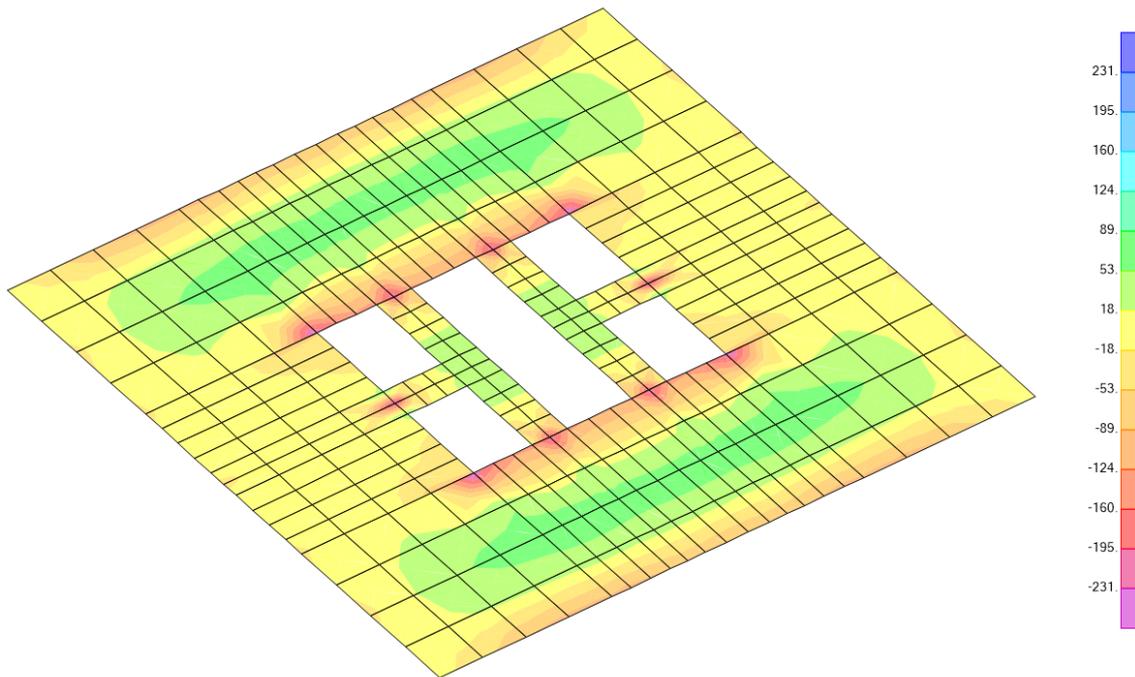


Imagen 128. Captura SAP2000: Momentos M22 en forjado grupo 02 en kN-m/ma acotados según M último. Fuente: elaboración propia

Hay algunas zonas que aparecen grafiadas en magenta (de momentos negativos) que rebasan el valor del momento último. Como se puede ver en las imágenes 127 y 128 estas zonas son muy puntuales, es decir, la resultante del momento del elemento finito estará por debajo del momento último, por lo que cumplirá esta condición.

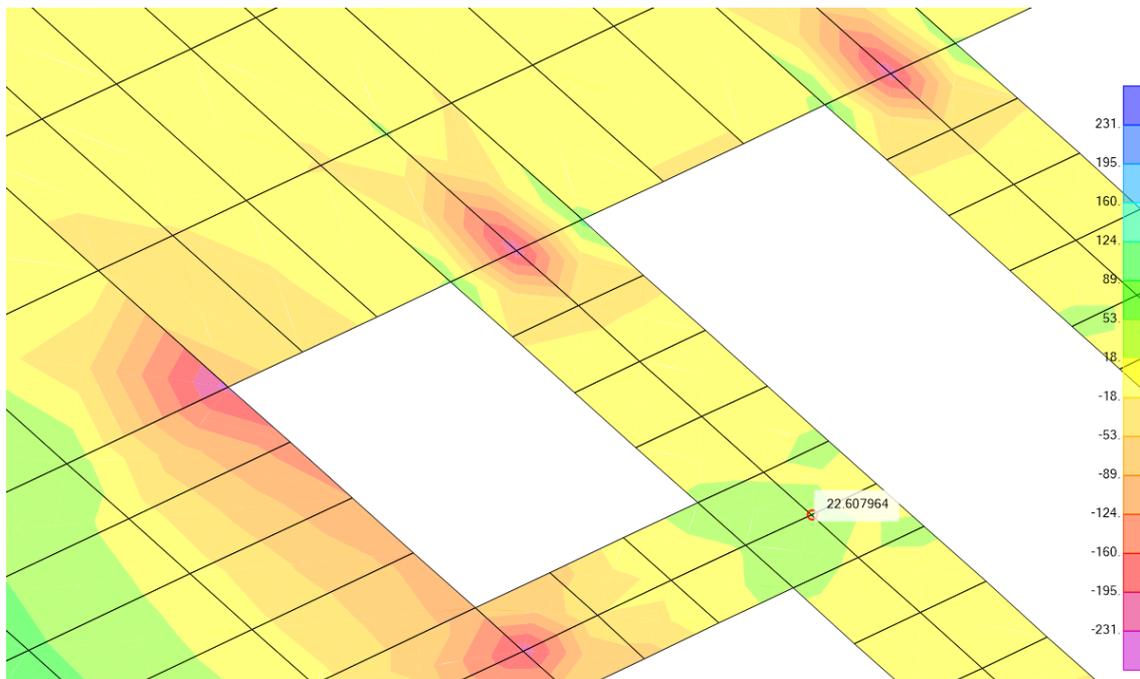


Imagen 129. Captura SAP2000: Ampliación zonas más solicitadas por momentos en dirección 1 acotados según M último. Fuente: elaboración propia

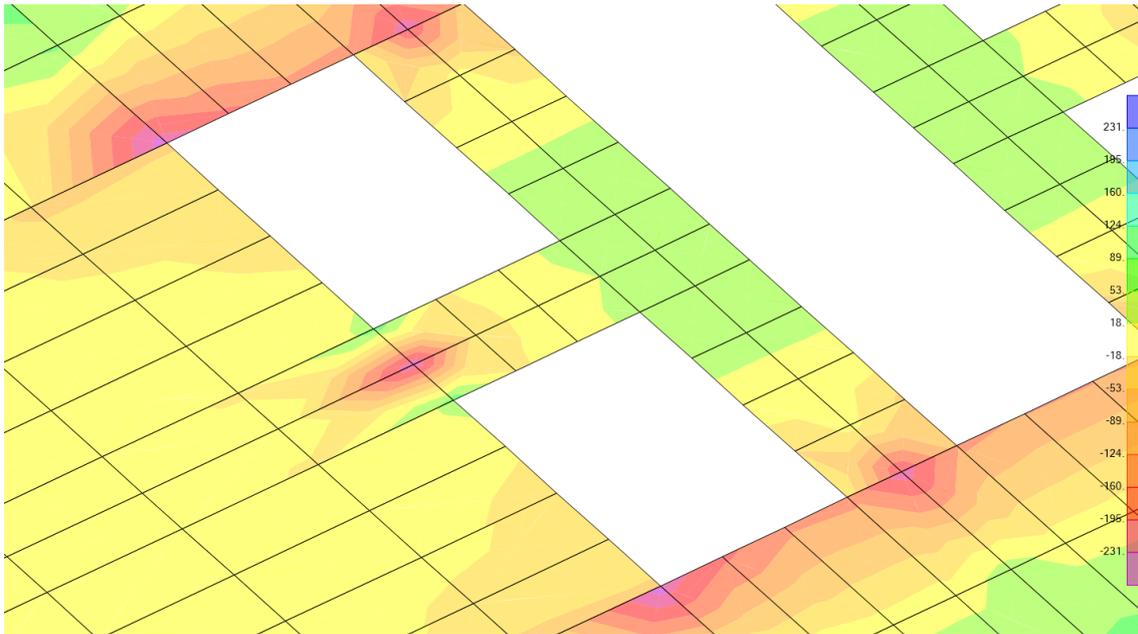


Imagen 130. Captura SAP2000: Ampliación zonas más solicitadas por momentos en dirección 2 acotados según M último. Fuente: elaboración propia

En cuanto al **cortante**, con la sección definida hasta el momento, existe un **cortante último de 194,35 kN/ma**; este valor servirá para establecer la escala de visualización de los cortantes en ambas direcciones.

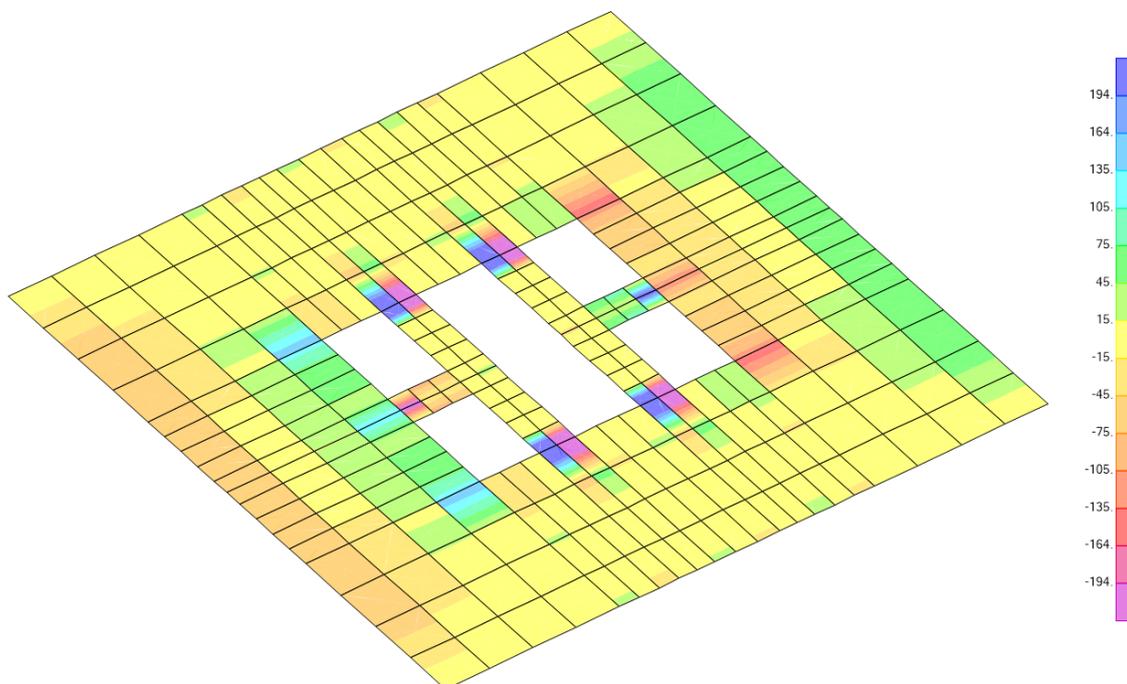


Imagen 131. Captura SAP2000: Cortantes V13 acotados según V último. Fuente: elaboración propia

Se aíslan las zonas afectadas por valores fuera del rango para integrar con *Section Cut* y ver si se trata de resultados únicamente puntuales o es necesario reforzar estas zonas frente a cortante.

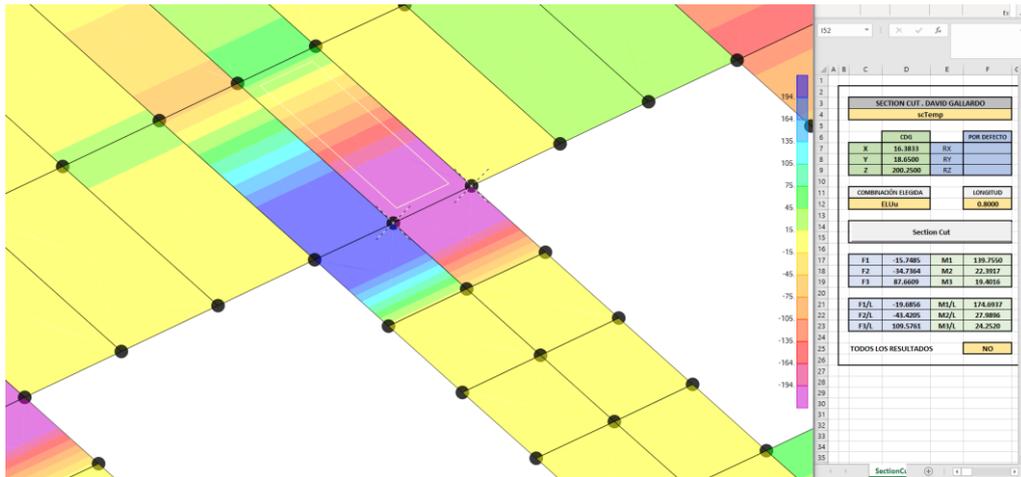


Imagen 132. Section cut 1 para cortante V13 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

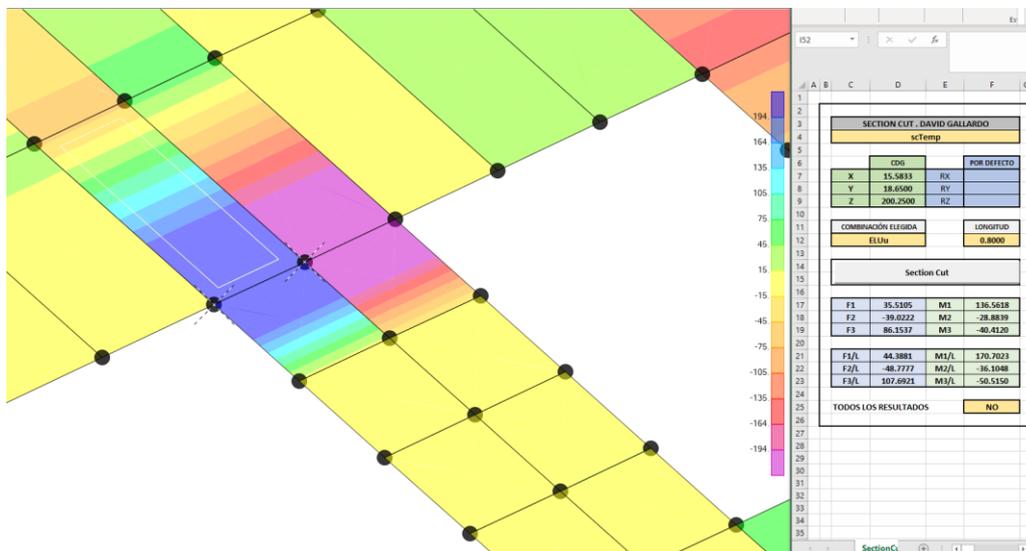


Imagen 133. Section cut 2 para cortante V13 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

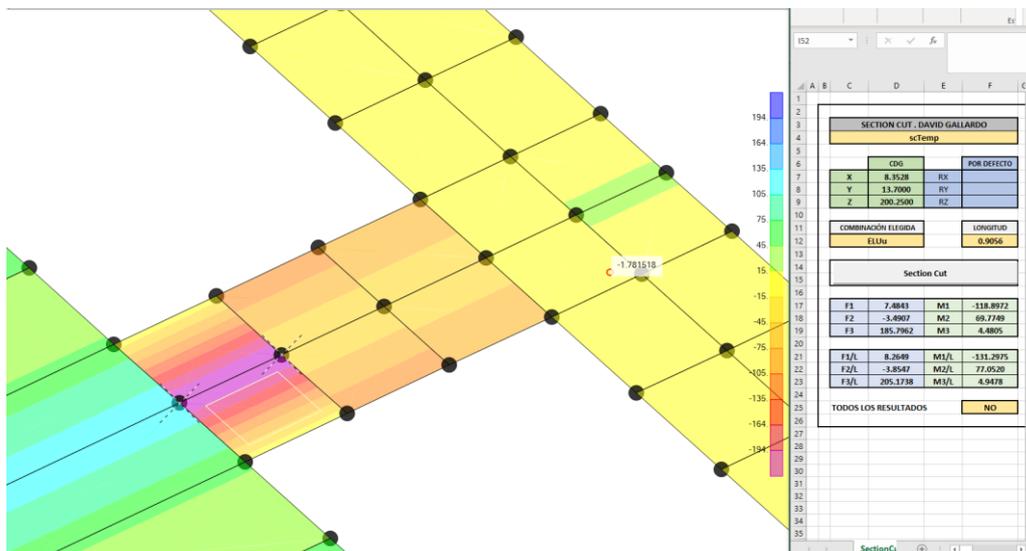


Imagen 134. Section cut 3 para cortante V13 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

El cortante obtenido con el *Section Cut* en las dos primeras secciones está por debajo del momento último (F3/L) en ambas direcciones, por lo que no será necesario emplear refuerzos en estas zonas. Sin embargo, en **la tercera zona y en su opuesta deberán de colocarse refuerzos en la dirección del eje 1 con barras de Ø12 cada 20 cm**, de forma que se alcance un **cortante último de 310,06 kN/ma**.

También es necesario comprobar los cortantes en la otra dirección, los que reciben el nombre de V23, acotados en su visualización por el cortante último.

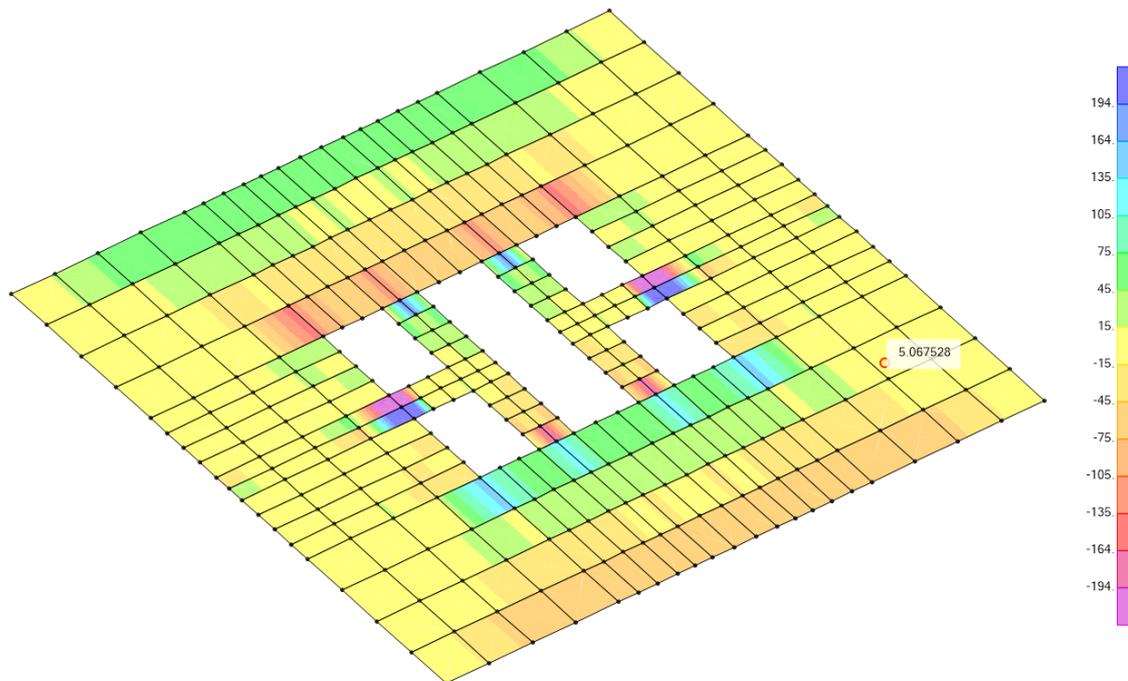


Imagen 135. Captura SAP2000: Cortantes V23 acotados según V último. Fuente: elaboración propia

En las zonas en magenta y azul más oscuro, se aplica de nuevo el *Section Cut* para ver si es necesario reforzarlas también en la otra dirección.

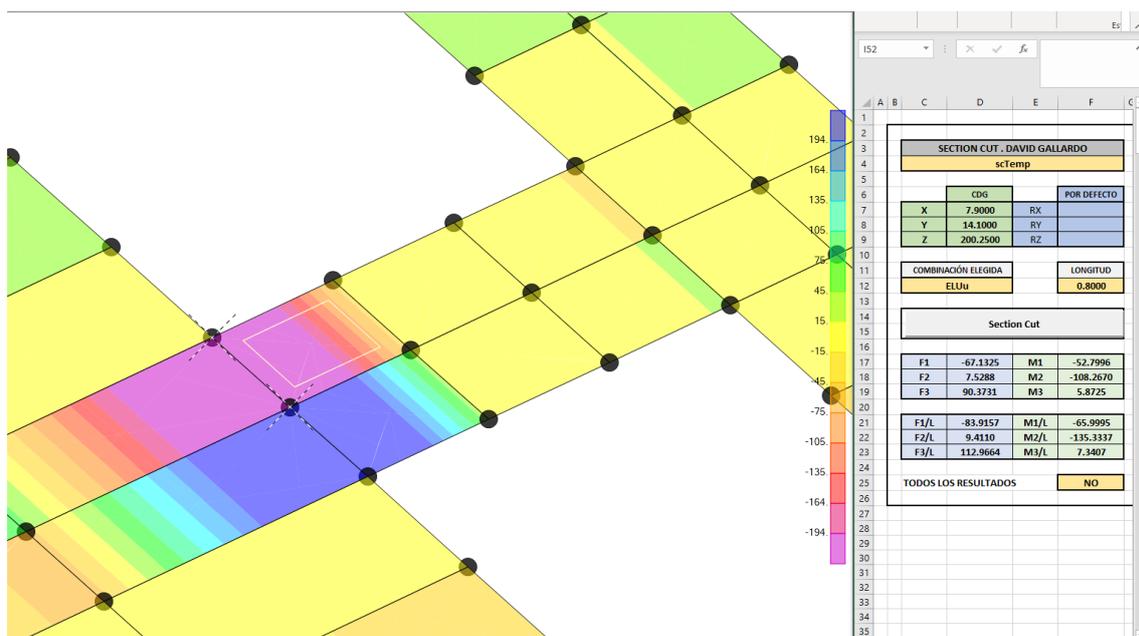


Imagen 136. Section cut 1 para cortante V23 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

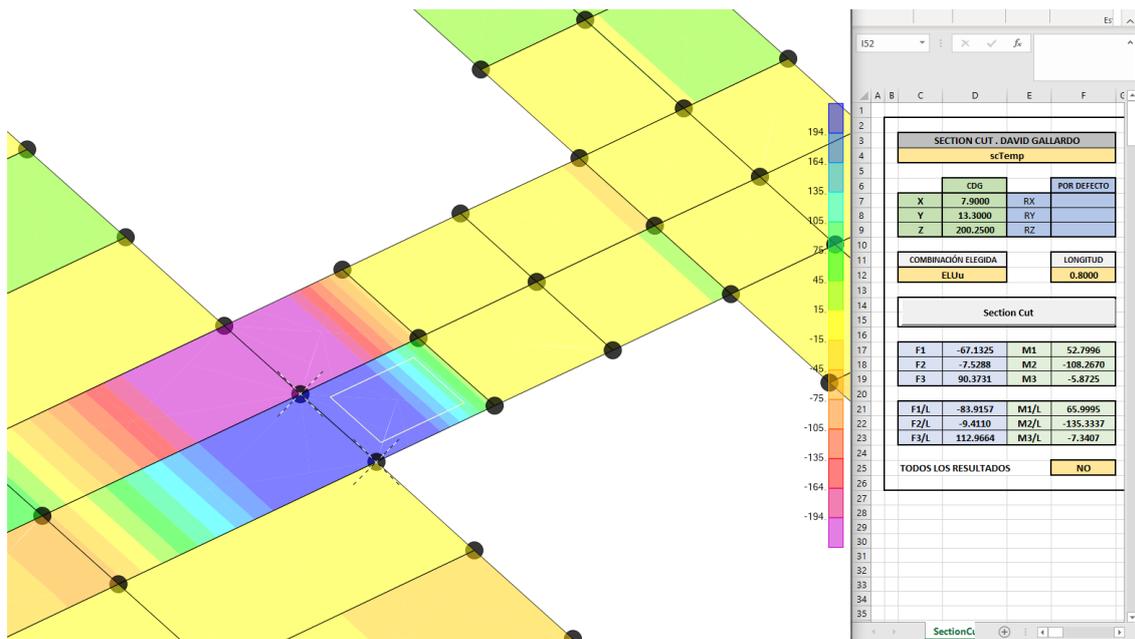


Imagen 137. Section cut 2 para cortante V23 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

De nuevo, las zonas que parecían no cumplir en la visualización, integrando el esfuerzo respecto al CDG del elemento finito, cumplen con el criterio de cortante último establecido ($F3/L < M_{\text{último}}$), por lo que tampoco se aplicará ningún refuerzo adicional.

Por tanto, la losa se arma con **barras de Ø20 cada 20 cm, con refuerzos en la dirección del eje 1 en las zonas especificadas a continuación.**

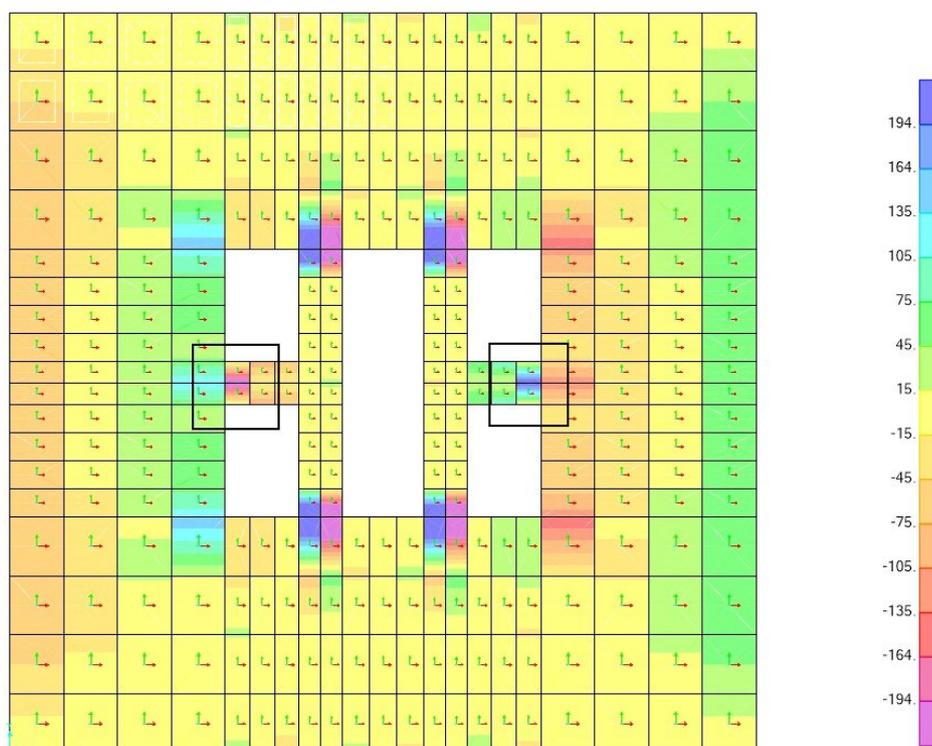


Tabla 21. Captura SAP2000: Zonas de refuerzo en el eje 1. Fuente: elaboración propia

6.2.6 | Comprobación losa grupo 3

La definición material de la losa es la misma que en el caso anterior de la losa02 (espesor de losa de 40 cm y hormigón HA-40; ver imagen 126). Se evalúa la hipótesis ELUu, proponiendo ya un **armado con barras Ø16 cada 20 cm en las dos direcciones**, lo que aporta un resultado de **momento último de 149,90 kN·m/ma**. En la dirección 1 se colocará la armadura exterior y en la 2 la interior.

Aplicando este valor como momento máximo y mínimo a visualizar en la losa, se obtienen los siguientes esfuerzos.

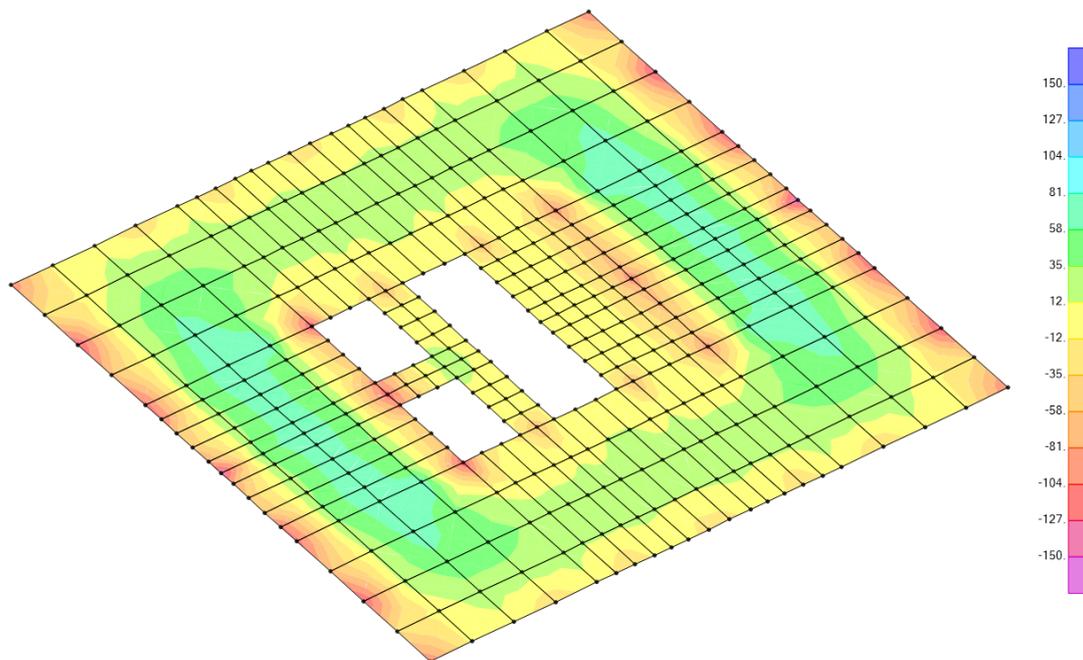


Imagen 138. Captura SAP2000: Resultado de momentos en dirección 1 acotados según M último. Fuente: elaboración propia

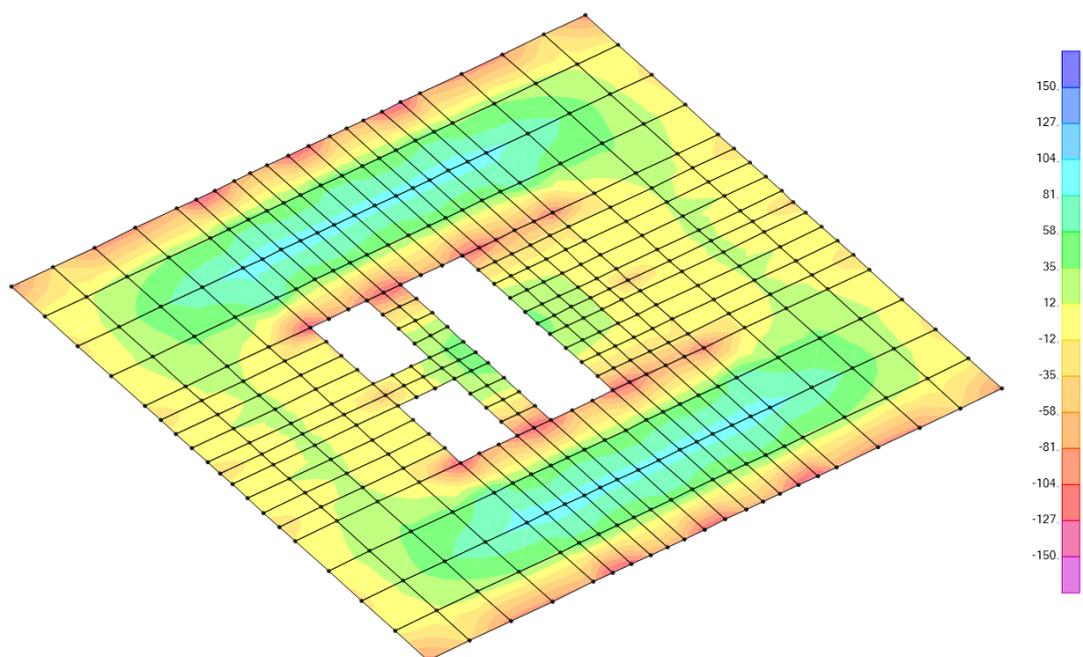


Imagen 139. Captura SAP2000: Resultado de momentos en dirección 2 acotados según M último. Fuente: elaboración propia

No se obtiene ninguna zona magenta o azul oscuro, es decir, con el armado propuesto se cumplen los momentos en ambas direcciones. Ahora bien, es necesario comprobar la sección a cortante, acotando los valores de V13 y V23 con el **cortante último de 167,9 kN/ma**.

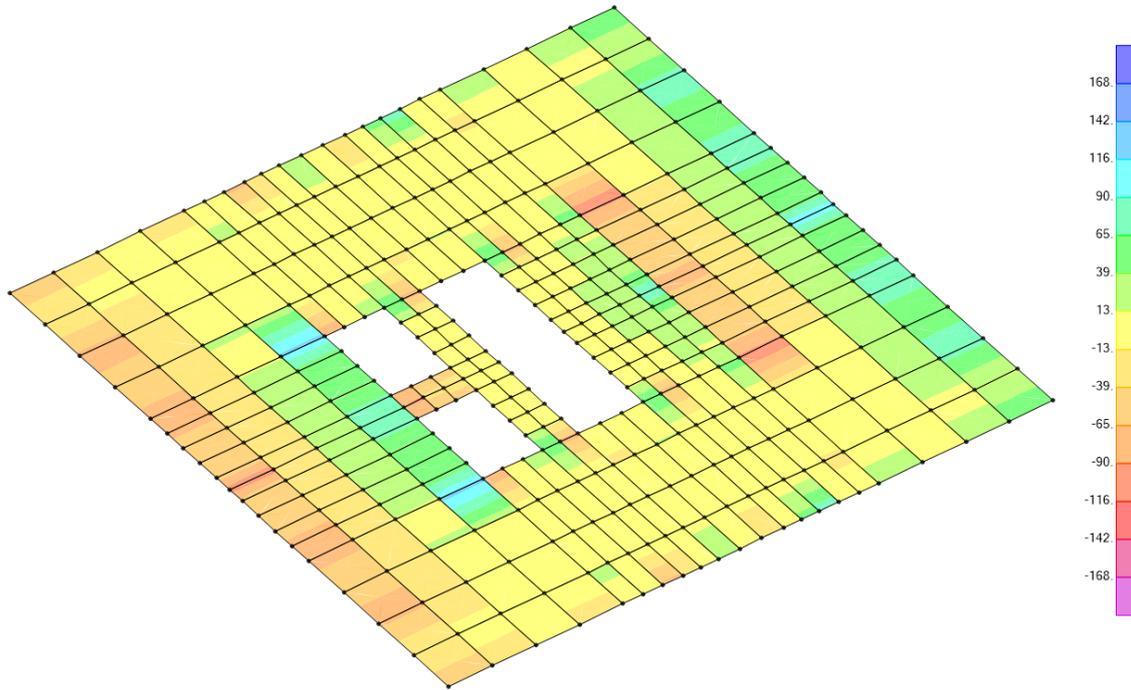


Imagen 140. Captura SAP2000: Cortantes V13 acotados según V último. Fuente: elaboración propia

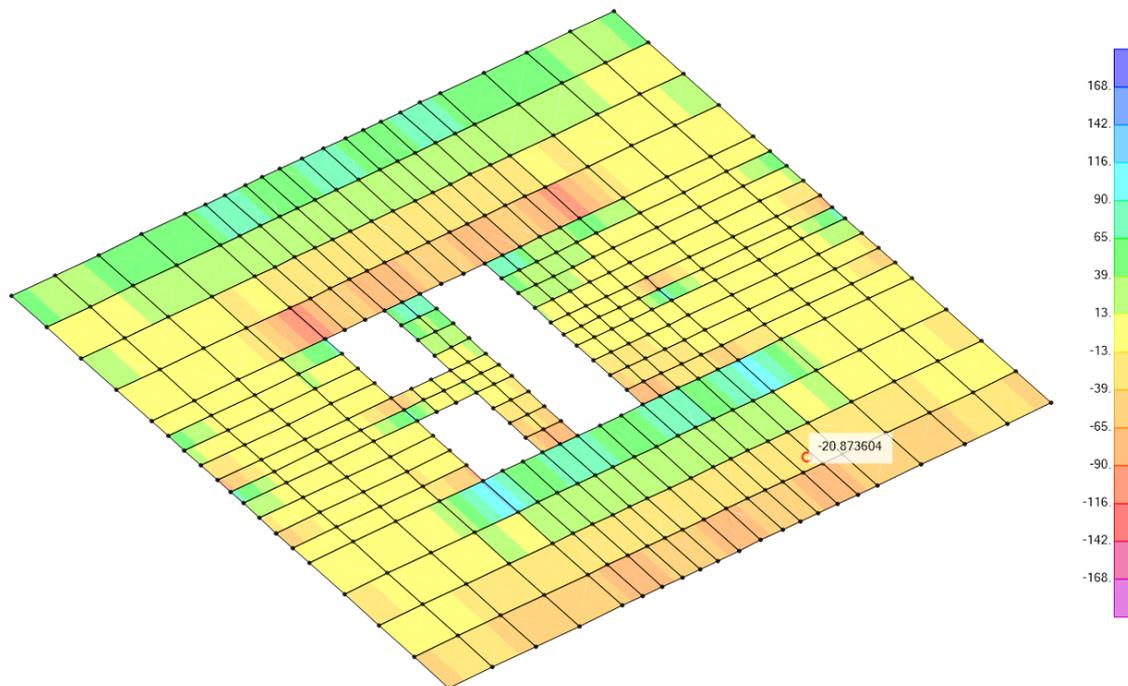


Imagen 141. Captura SAP2000: Cortantes V23 acotados según V último. Fuente: elaboración propia

Tampoco aparece ninguna zona que no cumpla con los valores de cortante último establecidos, por lo que se concluye que la sección cumple con **Ø16 cada 20 cm en ambas direcciones**.

6.2.7 | Comprobación pantalla grupo 1

Las pantallas están constituidas por un mallado que contiene algunos huecos para el paso. La geometría es la misma para todas las plantas, variando el espesor y la resistencia del hormigón.

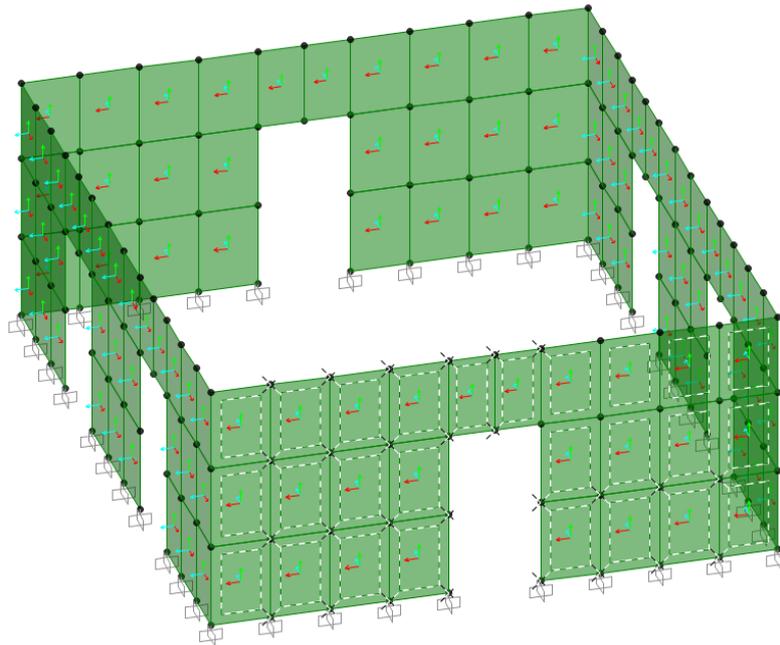


Imagen 142. Captura SAP2000: Selección de la pantalla 01 a dimensionar. Fuente: elaboración propia

En la imagen se muestran los ejes locales de las pantallas y se ha optado por dimensionar uno de sus lados, idéntico al que se encuentra opuesto. Para su dimensionado se emplea la combinación ELUu, ya definida en la plantilla. En su base se encuentra empotrada, en su encuentro con el suelo.

Son las F11 y F22 las que interesa comprobar, que provocan la flexión en el plano de la pantalla. En este caso, al tratarse de una pantalla son las **F22** las que interesa conocer, las fuerzas verticales o en el eje Z en globales.

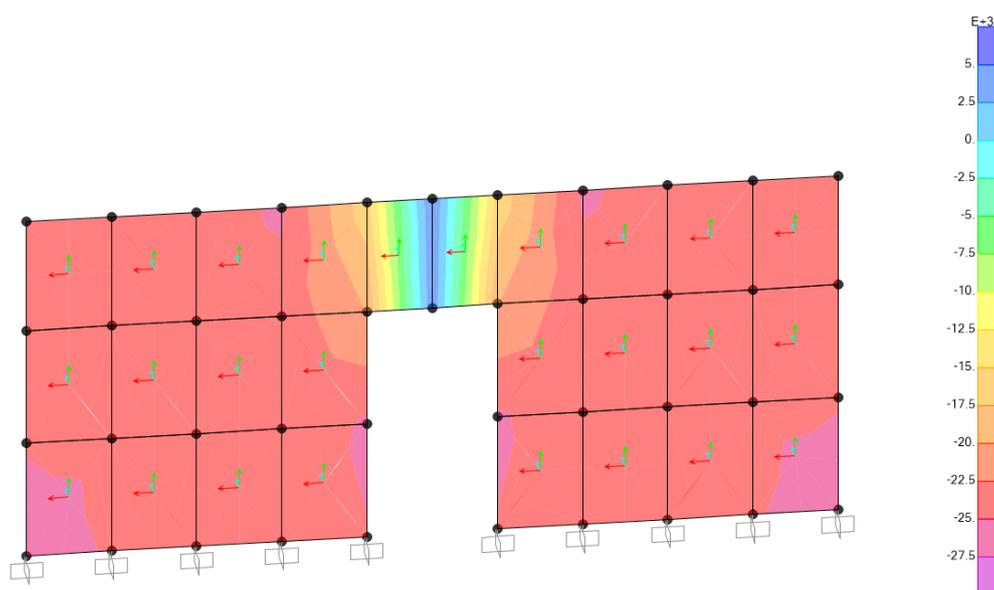


Imagen 143. Captura SAP2000: Fuerzas F22 en la pantalla 01. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, son esfuerzos muy elevados los que afectan a la pantalla, ya que se trata del muro de hormigón armado que constituye el núcleo central y recibe las cargas de todas las pantallas superiores.

Empleando la herramienta *Section Cut* se pueden conocer los esfuerzos en la base de la pantalla.

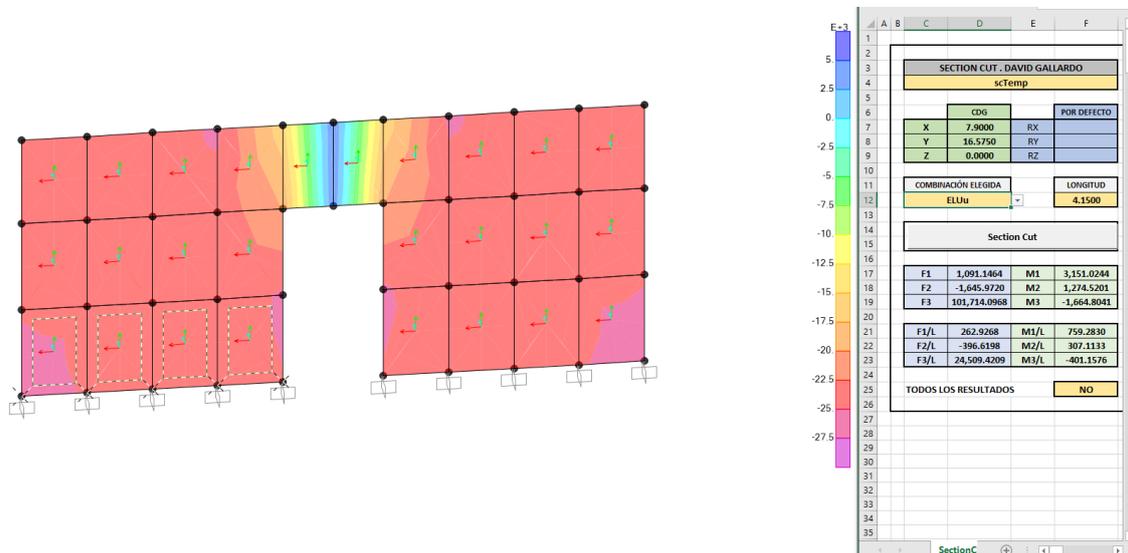


Imagen 144. Section Cut en la base de la pantalla 01. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

La fuerza que se ejerce en la base es de 101.714,1 kN; se muestra en signo positivo ya que es la reacción sobre la sección de corte.

En primer lugar, se definen las características constructivas de la pantalla a armar.

| DATOS DE PARTIDA | | | |
|-----------------------------------|------------|-----------|--|
| Materiales | | Geometría | |
| Fck | 140 | N/mm2 | |
| Gc | 1.50 | | |
| Fcd | 93.33 | N/mm2 | |
| Fyk | 500 | N/mm2 | |
| Gc | 1.15 | | |
| Fyd (tracciones) | 434.78 | N/mm2 | |
| Fyd (compresiones) | 400.00 | N/mm2 | |
| Espesor muro | 76 | cm | |
| Recubrimiento Neto | 3.5 | cm | |
| Armadura exterior | horizontal | | |
| Recubrimiento armadura horizontal | 4.10 | cm | |
| Recubrimiento armadura vertical | 5.70 | cm | |

Imagen 145. Características constructivas pantalla 01. Fuente: elaboración propia

Se define una sección genérica para su comprobación, en la que hay que establecer un armado. Se opta por barras de $\varnothing 16$ c/20cm en horizontal y barras de $\varnothing 20$ c/20cm en vertical.

| ARMADO HORIZONTAL (simétrico en ambas caras) | | | ARMADO VERTICAL (simétrico en ambas caras) | | |
|--|-------------------|----------------|--|-------------------|----------------|
| Armadura horizontal - fuerzas F11 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - fuerzas F22 [kN/m.a.] | | |
| Diámetro de base horizontal | 16 | mm | Diámetro de base vertical | 20 | mm |
| Distancia vertical entre barras | 20 | cm | Distancia vertical entre barras | 10 | cm |
| Máxima compresión hormigón | 60,293.33 | kN/m.a. | Máxima compresión hormigón | 60,293.33 | kN/m.a. |
| Máxima compresión acero | 804.25 | kN/m.a. | Máxima compresión acero | 2,513.27 | kN/m.a. |
| Máxima compresión | -61,097.58 | kN/m.a. | Máxima compresión | -62,806.61 | kN/m.a. |
| Máxima tracción | 874.18 | kN/m.a. | Máxima tracción | 2,731.82 | kN/m.a. |

Imagen 146. Armado inicial pantalla 01. Fuente: elaboración propia

La máxima compresión y tracción establecen los límites de F22 para su visualización según la escala de color. La gran capacidad portante del muro frente a compresiones se debe al empleo de hormigón de muy alta resistencia (HA-140) en una sección importante (76cm).

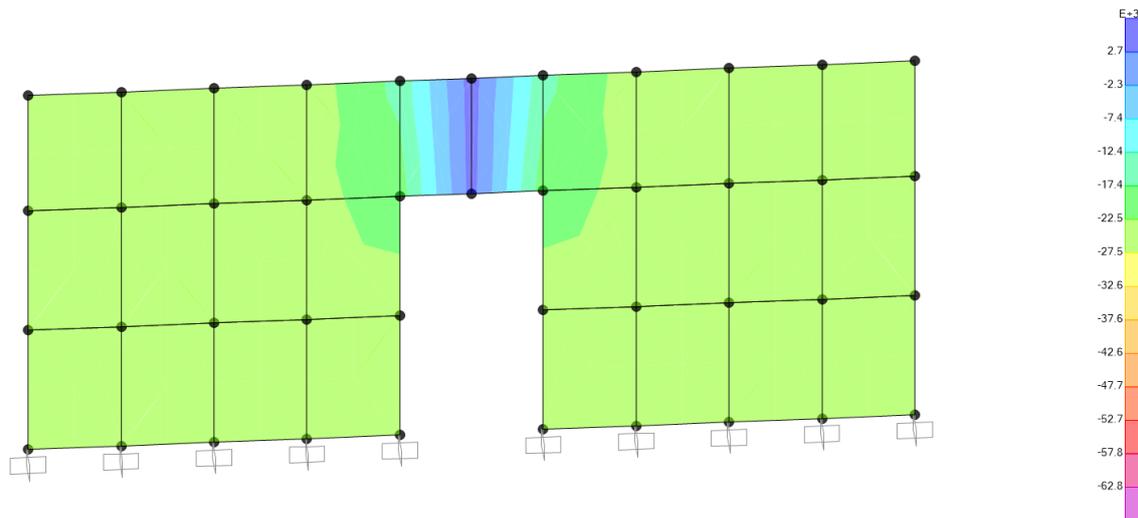


Imagen 147. F22 acotados según la máxima tracción y compresión. Fuente: elaboración propia

Lo único que no cumple con los límites descritos es la **zona del dintel** de la puerta, que tiene tracciones que no pueden ser asumidas por el armado propuesto, alcanzando máximos puntuales de 5.135 kN/ma. Se puede emplear la herramienta *Section Cut* ya que a simple vista parecen zonas pequeñas las que no cumplen con el armado.

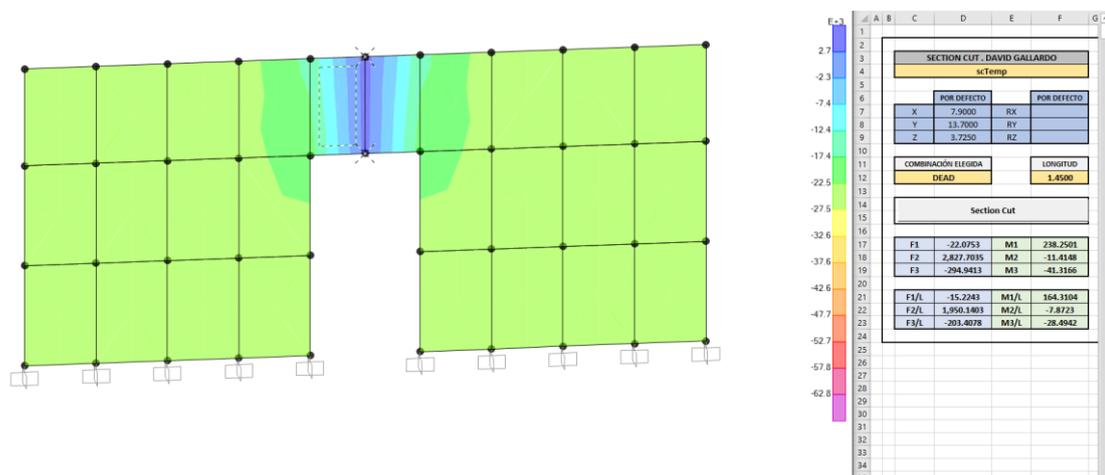


Imagen 148. Section cut en el dintel pantalla 01 armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

No es necesario colocar ningún refuerzo de barras verticales ya que la fuerza $F3/L^{20}$ es inferior al esfuerzo último F22 de la sección (ver imagen 146).

²⁰ En el Excel las fuerzas resultantes se expresan según los ejes globales

Si se comprueban con el primer armado las fuerzas en la dirección **F11**, estableciendo como límites la máxima compresión y tracción, se obtiene el resultado siguiente:

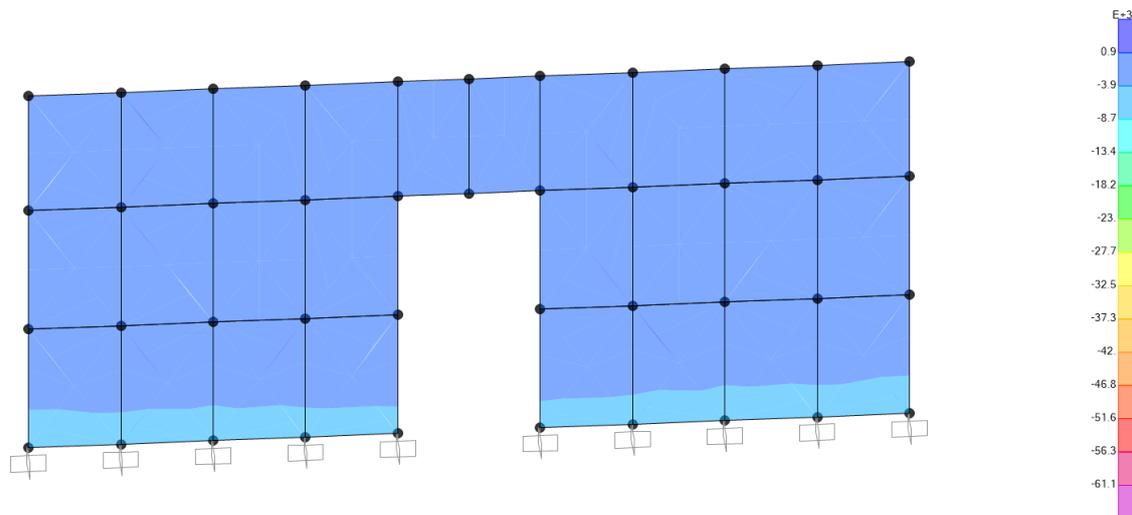


Imagen 149. F11 acotados según la máxima tracción y compresión. Fuente: elaboración propia

Sabiendo que **cumple con las fuerzas F11 y F22**, se puede proceder a la comprobación de cortantes y de momentos. Con el armado base, es decir, sin contar con los refuerzos del dintel, se obtienen los siguientes valores:

| Armadura horizontal - Momentos M11 [kNm/m.a.] | | | Armadura vertical - Momentos M22 [kNm/m.a.] | | |
|---|---------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|
| Cuantía flexión transversal | 437.09 | kN / m.a. | Cuantía flexión transversal | 2,731.82 | kN / m.a. |
| Momento último flexión transversal | 271.93 | kNm/m.a. | Momento último flexión transversal | 1,836.02 | kNm/m.a. |
| Armadura horizontal - Cortantes V13 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - Cortantes V23 [kN/m.a.] | | |
| Epsilon | 1.534141 | | Epsilon | 1.542725 | |
| Cuantía geométrica | 0.001434 | | Cuantía geométrica | 0.009254 | |
| Cortante último | 350.75 | kN/m.a. | Cortante último | 636.04 | kN/m.a. |

Imagen 150. Momentos y cortantes últimos en pantalla 01. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

Se emplean estos valores últimos como límites en la visualización.

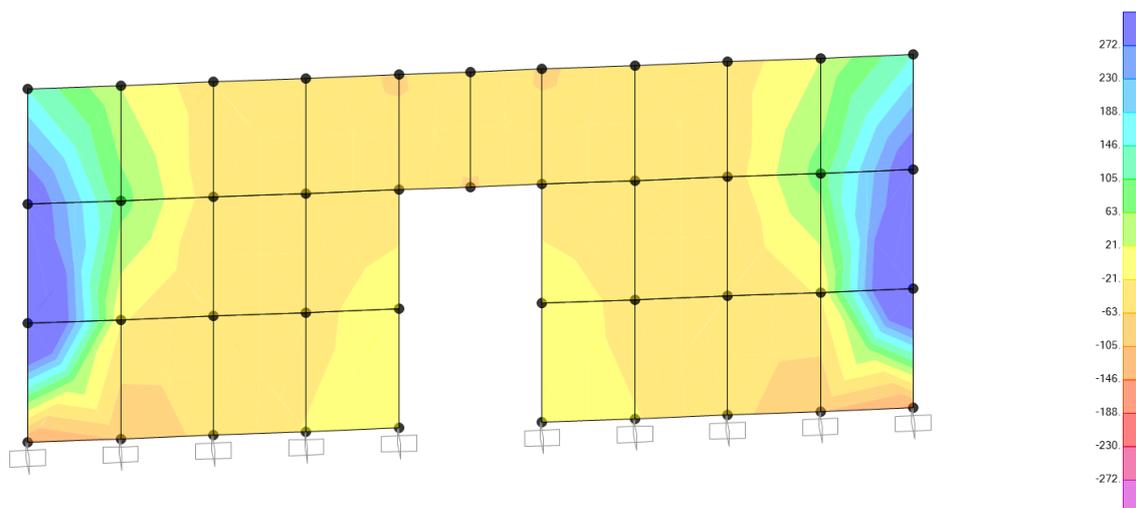


Imagen 151. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos. Fuente: elaboración propia

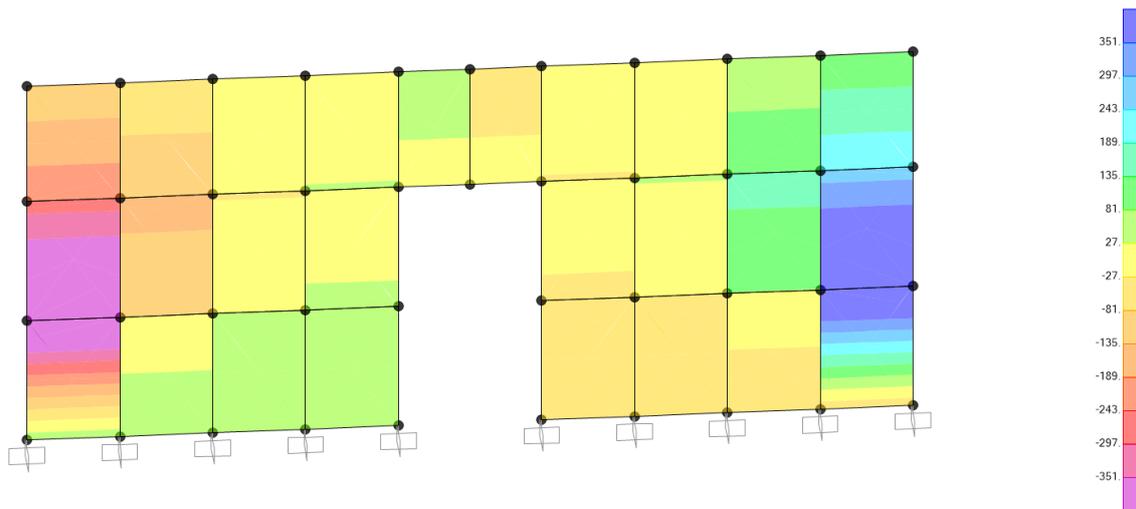


Imagen 152. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos. Fuente: elaboración propia

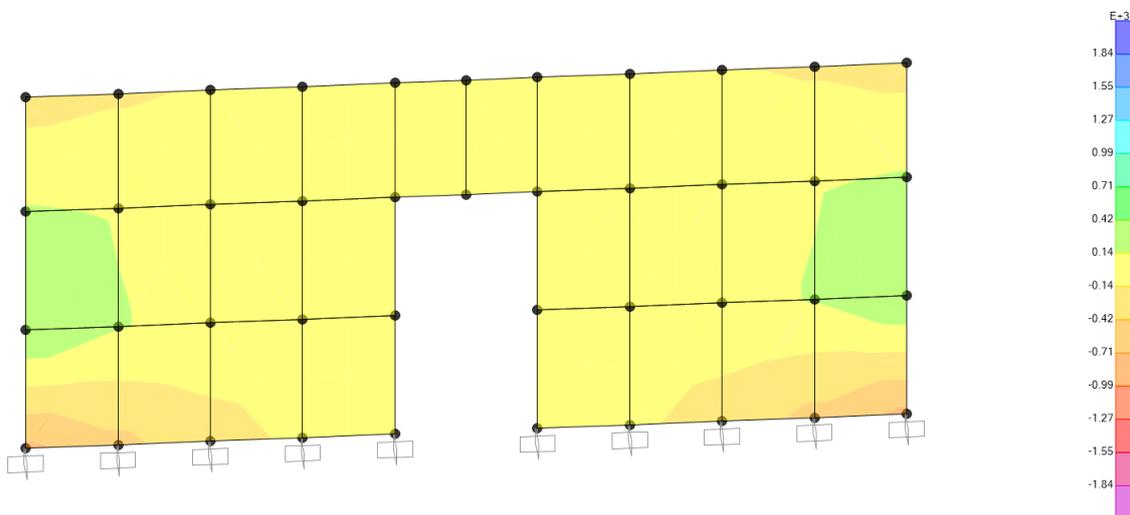


Imagen 153. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos. Fuente: elaboración propia

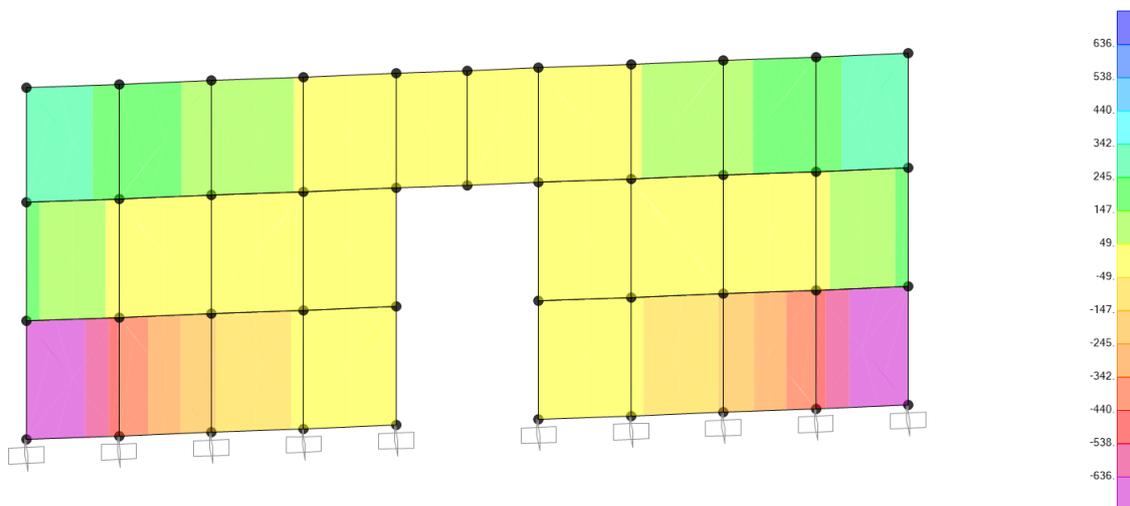


Imagen 154. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, la sección no cumple ni a cortante ni a momento M11 en zonas bastante amplias en los extremos del muro. Se propone **reforzar estas zonas colocando en horizontal de barras de Ø16 cada 10 cm y en vertical colocar barras de Ø20 cada 10 cm**, es decir, duplicando el armado de base. El orden de esfuerzos máximos que es necesario cubrir con esta armadura es:

| | |
|------------|---------------|
| M11 | 496,6 kN·m/ma |
| V13 | 523,5 kN/ma |
| V23 | -879,5 Kn/ma |

Tabla 22. Orden de esfuerzos máximos en la pantalla 01. Fuente: elaboración propia

Este rearmado que solamente se aplicará en los extremos del muro tiene los siguientes cortantes y momentos últimos:

| ARMADO HORIZONTAL (simétrico en ambas caras) | | | ARMADO VERTICAL (simétrico en ambas caras) | | |
|---|-------------------|-----------------|---|-------------------|-----------------|
| Armadura horizontal - fuerzas F11 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - fuerzas F22 [kN/m.a.] | | |
| Diámetro de base horizontal | 16 | mm | Diámetro de base vertical | 20 | mm |
| Distancia vertical entre barras | 10 | cm | Distancia vertical entre barras | 10 | cm |
| Máxima compresión hormigón | 60.293.33 | kN/m.a. | Máxima compresión hormigón | 60.293.33 | kN/m.a. |
| Máxima compresión acero | 1.608.50 | kN/m.a. | Máxima compresión acero | 2.513.27 | kN/m.a. |
| Máxima compresión | -61.901.83 | kN/m.a. | Máxima compresión | -62.806.61 | kN/m.a. |
| Máxima tracción | 1.748.36 | kN/m.a. | Máxima tracción | 2.731.82 | kN/m.a. |
| Armadura horizontal - Momentos M11 [kNm/m.a.] | | | Armadura vertical - Momentos M22 [kNm/m.a.] | | |
| Cuantía flexión transversal | 874.18 | kN / m.a. | Cuantía flexión transversal | 1.365.91 | kN / m.a. |
| Momento último flexión transversal | 576.20 | kNm/m.a. | Momento último flexión transversal | 912.95 | kNm/m.a. |
| Armadura horizontal - Cortantes V13 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - Cortantes V23 [kN/m.a.] | | |
| Epsilon | 1.534141 | | Epsilon | 1.542725 | |
| Cuantía geométrica | 0.002868 | | Cuantía geométrica | 0.004627 | |
| Cortante último | 441.92 | kN/m.a. | Cortante último | 504.83 | kN/m.a. |

Imagen 155. Rearmado de la sección en los extremos de la pantalla 01. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

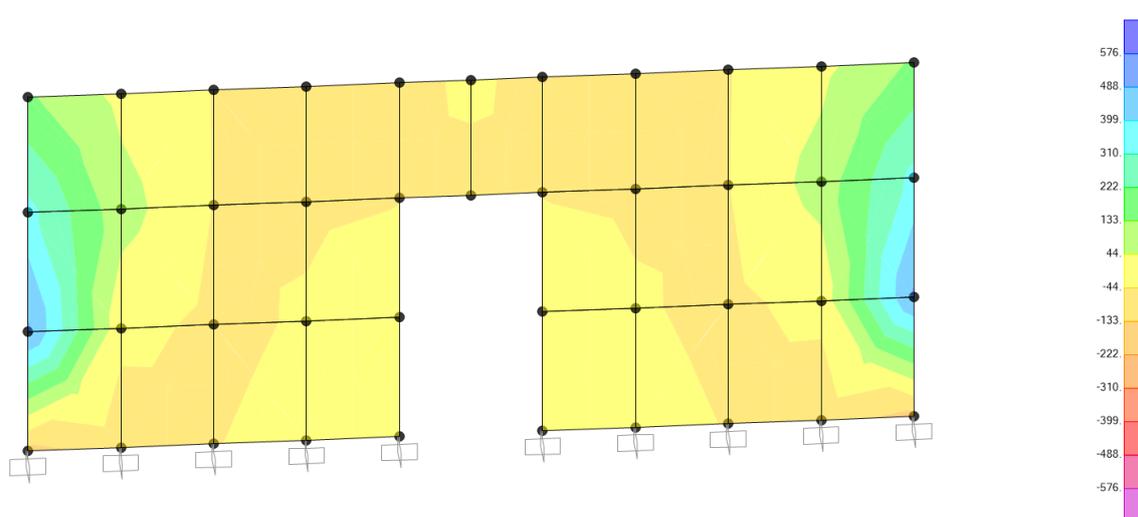


Imagen 156. Captura SAP2000: M11 con refuerzo de la sección. Fuente: elaboración propia

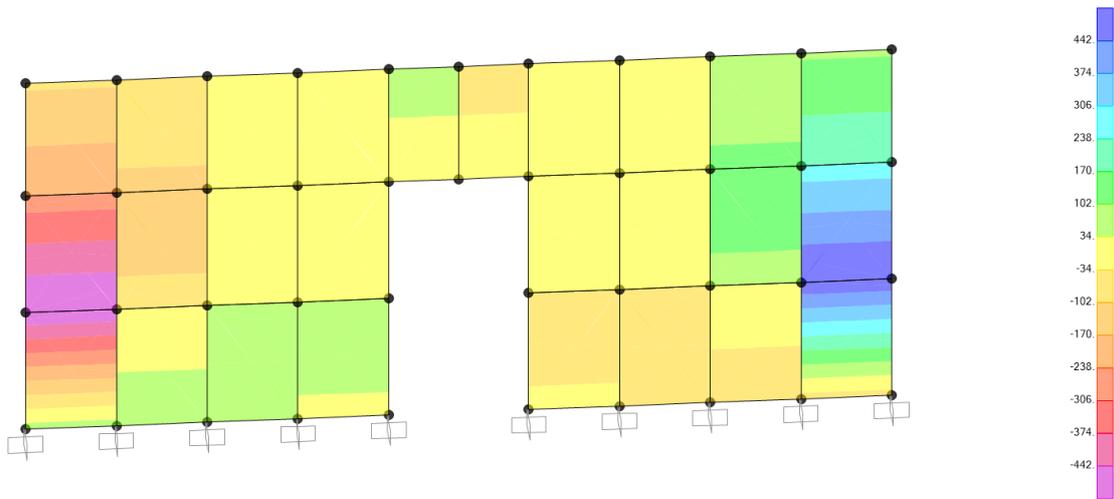


Imagen 157. Captura SAP2000: V13 con refuerzo de la sección. Fuente: elaboración propia

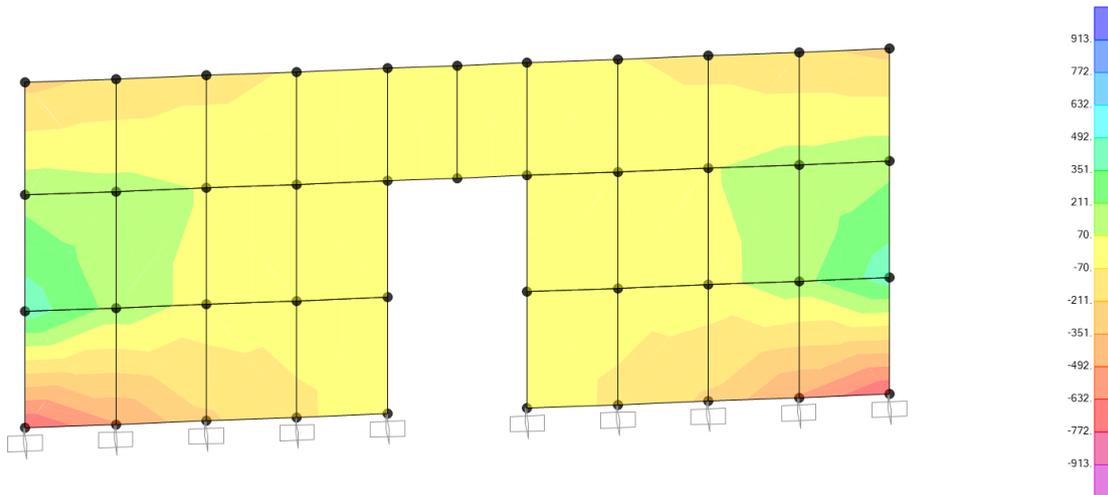


Imagen 158. Captura SAP2000: M22 con refuerzo de la sección. Fuente: elaboración propia

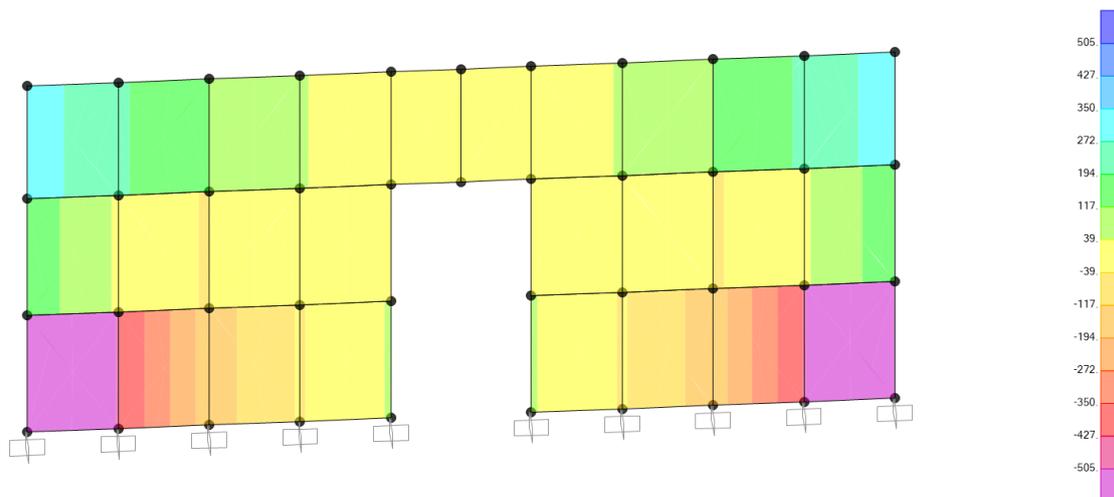


Imagen 159. Captura SAP2000: V23 con refuerzo de la sección. Fuente: elaboración propia

Los cortantes, como se puede observar en las imágenes 157 y 159 los refuerzos siguen sin cumplir. Puesto que el cortante **V13** es probable que supere el momento último solamente en algunos puntos, se va a comprobar empleando la herramienta *Section Cut*, puesto que ya se están empleando barras horizontales de $\varnothing 16$ cada 10 cm.

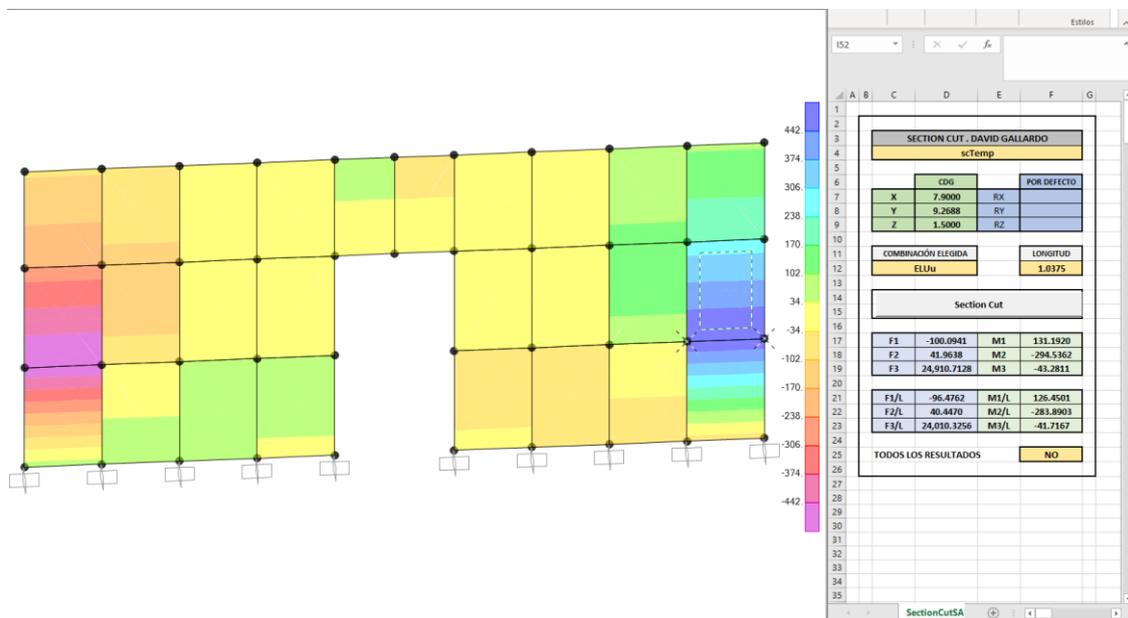


Imagen 160. Captura SAP2000: Section Cut para V13 con barras de refuerzo horizontales. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

Para el cortante V13 basta con colocar el refuerzo indicado, ya que integrando los esfuerzos respecto al CDG del elemento finito, el cortante se encuentra por debajo del cortante último ($96,48 \text{ kN/ma} < 504,83 \text{ kN/ma}$).

Para el cortante V23, puesto que las zonas que no cumplen abarcan un ámbito mayor, se va a emplear en la base refuerzos **de barras verticales de $\varnothing 20$ cada 5 cm**, o bien un armado doble. En este caso se obtiene un cortante V23 último de $636,04 \text{ kN}$.

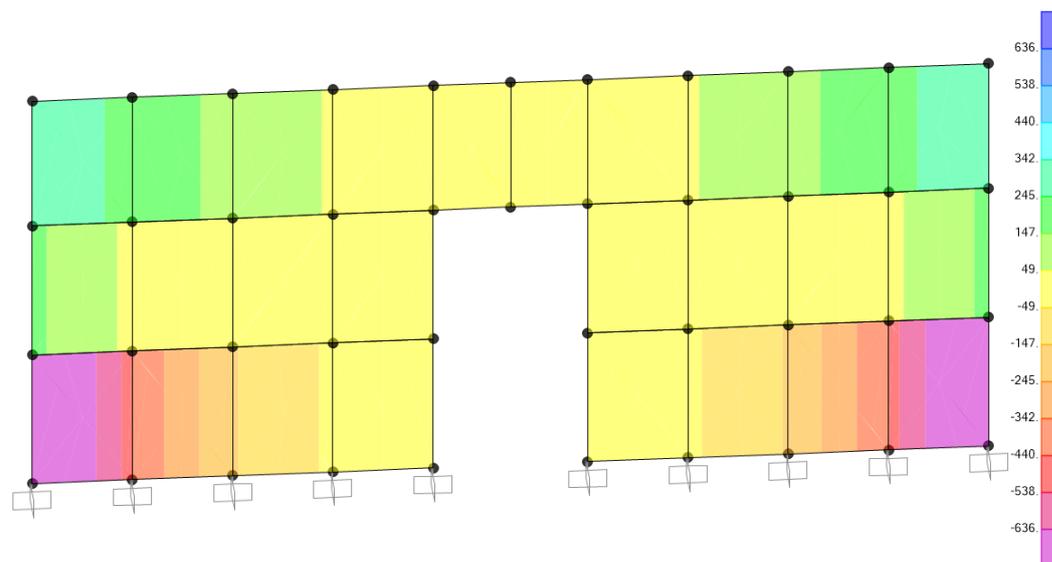


Imagen 161. Captura SAP2000: Section Cut para V23 con barras de refuerzo verticales. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

Siguen apareciendo cortantes que no puede absorber la armadura, aunque en una zona más reducida. Por ello, se va a aplicar el *Section Cut* únicamente a esa zona.

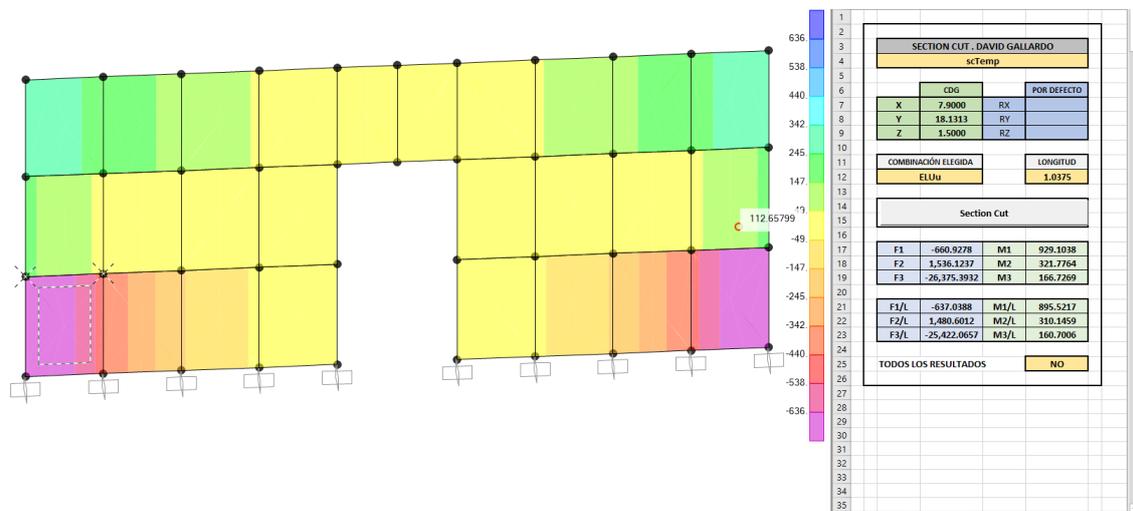


Imagen 162. Captura SAP2000: Section Cut para V23 con barras de refuerzo verticales. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

El cortante resultante es de 637,04 kN, muy cerca de cumplir con el cortante último con los refuerzos. Esta sección se da por válida, ya que con SAP2000 se está asumiendo un comportamiento elástico y lineal del hormigón armado, sin tener en cuenta la teoría de dominios.

Por tanto, la pantalla cuenta con el siguiente armado:

| | |
|---------------------------------|-------------|
| Armado de base vertical | Ø20 c/20 cm |
| Armado de base horizontal | Ø16 c/20 cm |
| Refuerzo vertical en extremos | Ø20 c/5 cm |
| Refuerzo horizontal en extremos | Ø16 c/10 cm |

Tabla 23. Armado final pantalla 01. Fuente: elaboración propia

6.2.8 | Comprobación pantalla grupo 2

Se escoge la misma pantalla, pero situada en el grupo 2, es decir, a mayor altura. Se realiza la misma comprobación a ELUu, considerando las fuerzas **F11** y **F22** que se obtienen de SAP2000. En primer lugar, se definen las características constructivas del muro a considerar.

| DATOS DE PARTIDA | | |
|-----------------------------------|------------|-------------------|
| Materiales | | Geometría |
| Fck | 100 | N/mm ² |
| Gc | 1.50 | |
| Fcd | 66.67 | N/mm ² |
| Fyk | 500 | N/mm ² |
| Gc | 1.15 | |
| Fyd (tracciones) | 434.78 | N/mm ² |
| Fyd (compresiones) | 400.00 | N/mm ² |
| Espesor muro | 76 | cm |
| Recubrimiento Neto | 3.5 | cm |
| Armadura exterior | horizontal | |
| Recubrimiento armadura horizontal | 4.30 | cm |
| Recubrimiento armadura vertical | 6.10 | cm |

Imagen 163. Características constructivas pantalla 02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

Se establece un armado de base para la pantalla con **armadura exterior horizontal de Ø16 cada 20 cm** y **una armadura vertical interior de Ø16 cada 20 cm**. Este armado ya aporta unas primeras fuerzas F11 y F22 últimas que establecer como límite de esfuerzos en la visualización.

| ARMADO HORIZONTAL (simétrico en ambas caras) | | | ARMADO VERTICAL (simétrico en ambas caras) | | |
|--|-------------------|----------------|--|-------------------|----------------|
| Armadura horizontal - fuerzas F11 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - fuerzas F22 [kN/m.a.] | | |
| Diámetro de base horizontal | 16 | mm | Diámetro de base vertical | 20 | mm |
| Distancia vertical entre barras | 20 | cm | Distancia vertical entre barras | 20 | cm |
| Máxima compresión hormigón | 43.066.67 | kN/m.a. | Máxima compresión hormigón | 43.066.67 | kN/m.a. |
| Máxima compresión acero | 804.25 | kN/m.a. | Máxima compresión acero | 1.256.64 | kN/m.a. |
| Máxima compresión | -43.870.91 | kN/m.a. | Máxima compresión | -44.323.30 | kN/m.a. |
| Máxima tracción | 874.18 | kN/m.a. | Máxima tracción | 1.365.91 | kN/m.a. |

Imagen 164. Armado 1 pantalla 02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

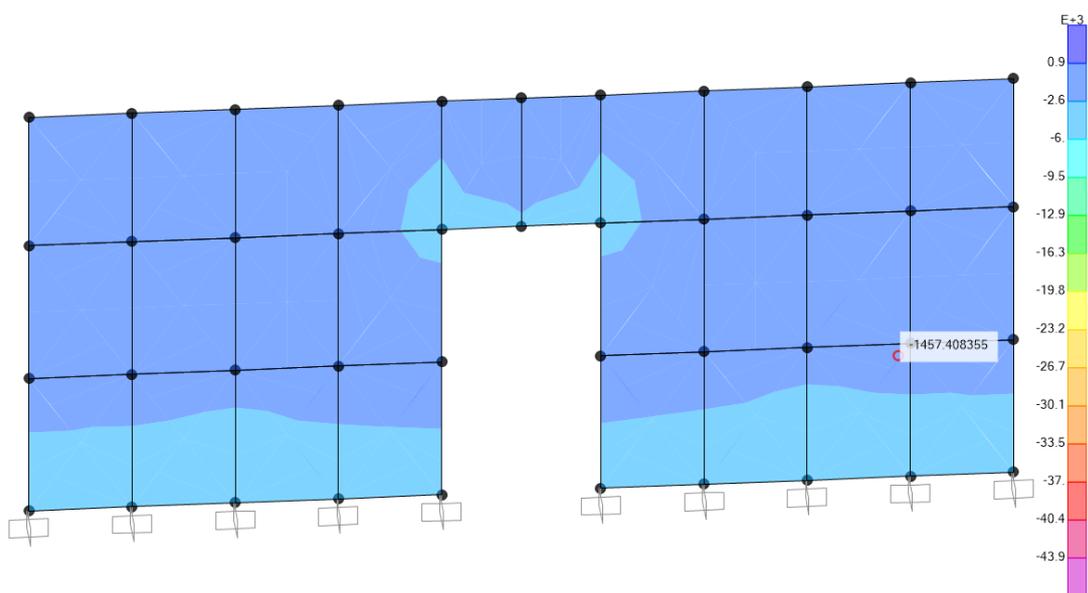


Imagen 165. F11 acotados según la máxima tracción y compresión en pantalla 02; armado 1. Fuente: elaboración propia

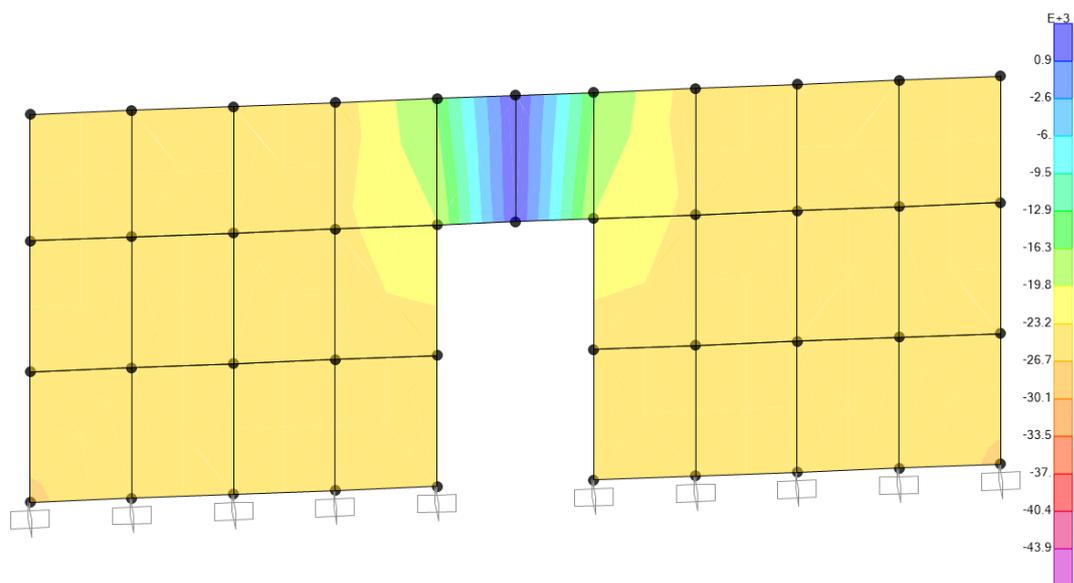


Imagen 166. F22 acotados según la máxima tracción y compresión en pantalla 02; armado 1. Fuente: elaboración propia

De nuevo, es la zona del dintel la que presenta problemas con la armadura vertical con tracciones máximas de 5.135 kN. Puesto que es una zona muy localizada y puede estar generándose únicamente un esfuerzo puntual tan importante, se aplica el *Section Cut*.

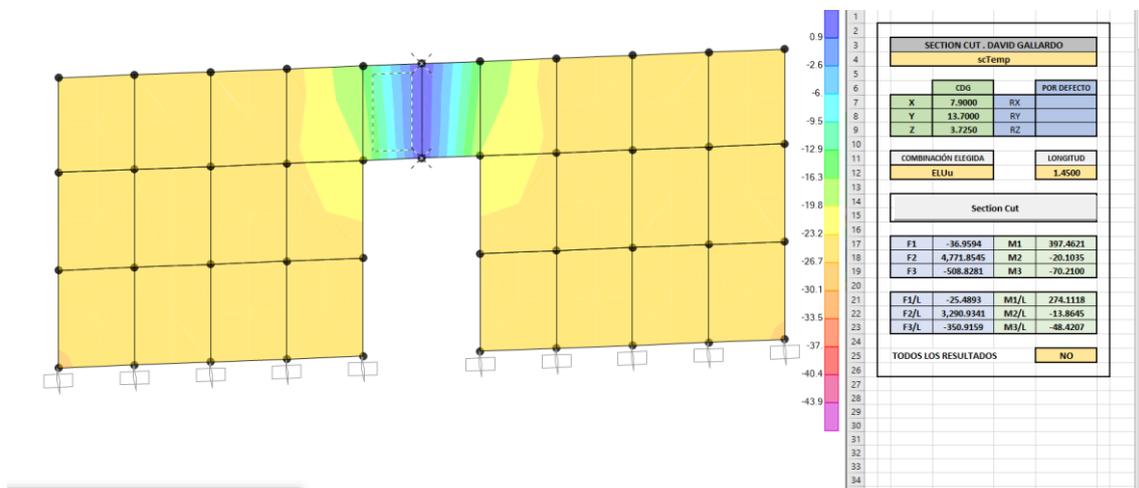


Imagen 167. Captura SAP2000: Section Cut del dintel en pantalla 02; armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

La sección del dintel cumple sin necesidad de refuerzos, ya que la fuerza F22 resultante está por debajo del esfuerzo último de la armadura vertical propuesto.

De forma análoga, se van a completar la comprobación con el cumplimiento de la pantalla frente a momentos y cortantes. Para ello se emplean los valores últimos de momento y cortante aportados por la tabla de Excel.

| Armadura horizontal - Momentos M11 [kNm/m.a.] | | | Armadura vertical - Momentos M22 [kNm/m.a.] | | |
|---|---------------|-----------------|---|---------------|-----------------|
| Cuántia flexión transversal | 437.09 | kN / m.a. | Cuántia flexión transversal | 437.09 | kN / m.a. |
| Momento último flexión transversal | 281.38 | kNm/m.a. | Momento último flexión transversal | 281.38 | kNm/m.a. |
| Armadura horizontal - Cortantes V13 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - Cortantes V23 [kN/m.a.] | | |
| Epsilon | 1.534141 | | Epsilon | 1.540343 | |
| Cuántia geométrica | 0.001434 | | Cuántia geométrica | 0.001468 | |
| Cortante último | 313.54 | kN/m.a. | Cortante último | 310.00 | kN/m.a. |

Imagen 168. Momentos y cortantes últimos en pantalla 02 para armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

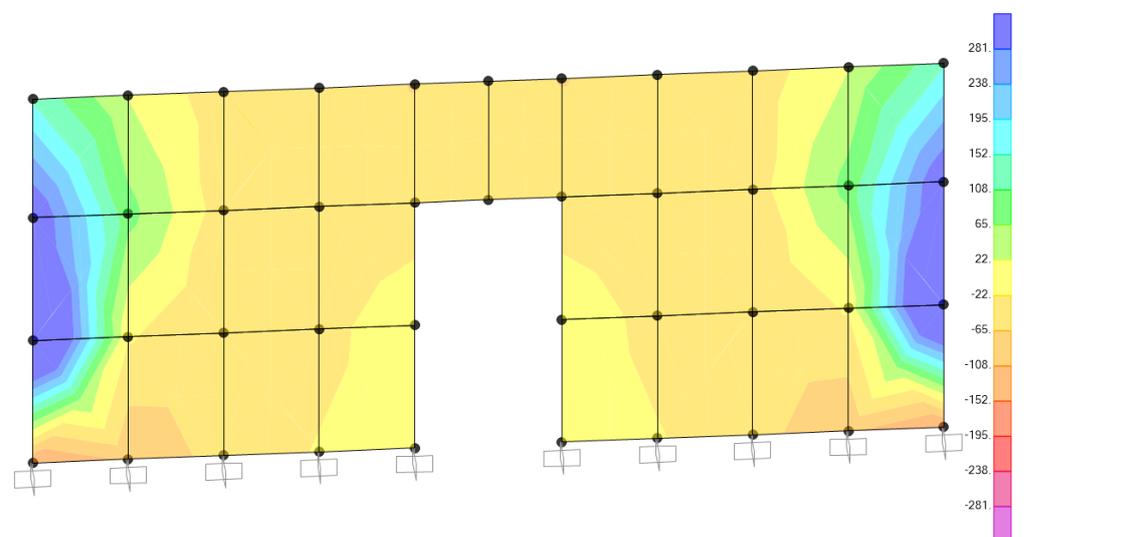


Imagen 169. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos; armado 1. Fuente: elaboración propia

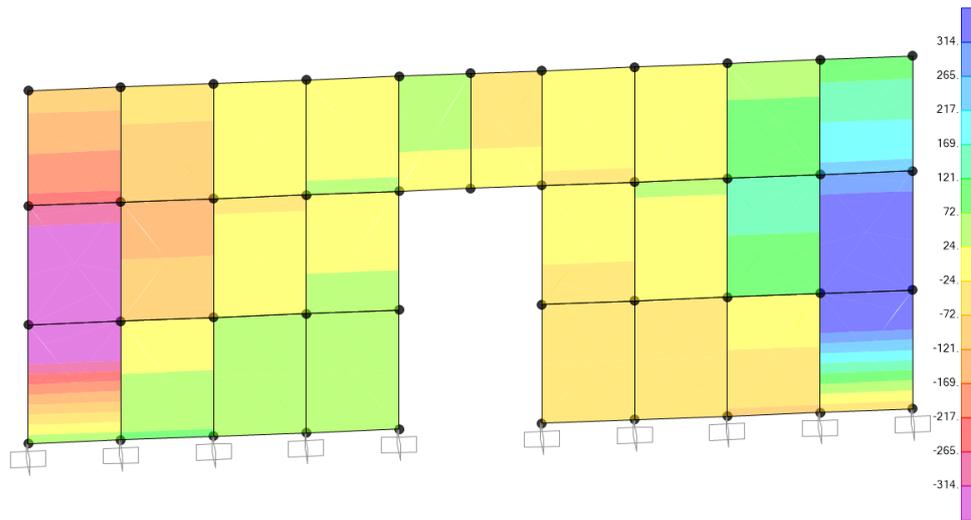


Imagen 170. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos; armado 1. Fuente: elaboración propia

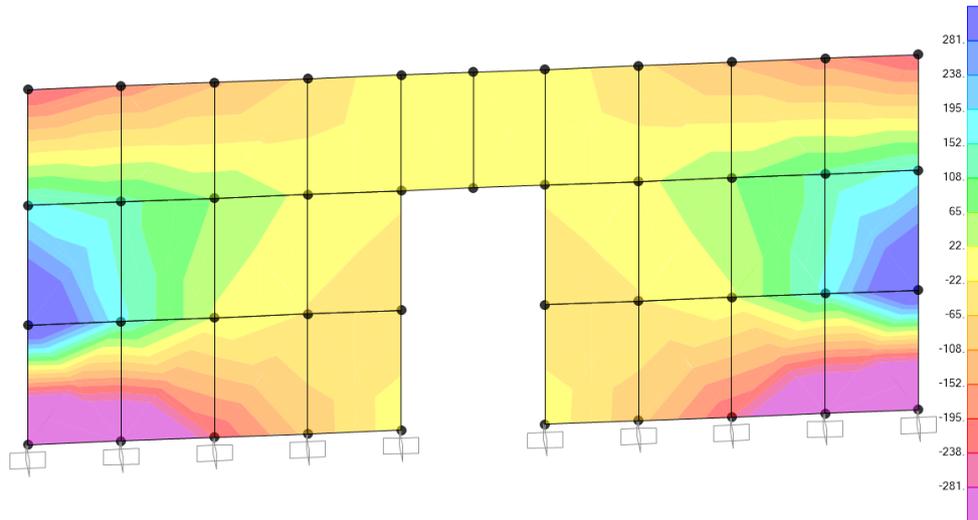


Imagen 171. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos; armado 1. Fuente: elaboración propia

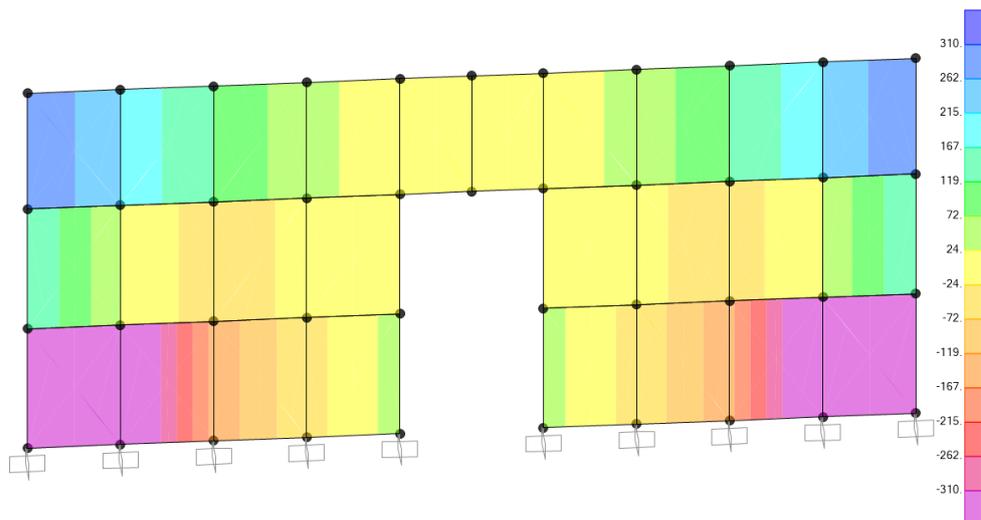


Imagen 172. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos; armado 1. Fuente: elaboración propia

Puesto que el armado propuesto no cumple en ninguna de las dos direcciones, se va a cambiar el armado de los extremos del muro por **barras de Ø20 cada 15 cm**, tanto en el armado vertical como en el horizontal. Lógicamente, frente a F11 y F22 cumplirá este armado; entonces cabe comprobar los cortantes y los momentos.

| Armadura horizontal - Momentos M11 [kNm/m.a.] | | | Armadura vertical - Momentos M22 [kNm/m.a.] | | |
|---|---------------|-----------------|---|---------------|-----------------|
| Cuántía flexión transversal | 910.61 | kN / m.a. | Cuántía flexión transversal | 910.61 | kN / m.a. |
| Momento último flexión transversal | 604.15 | kNm/m.a. | Momento último flexión transversal | 604.15 | kNm/m.a. |
| Armadura horizontal - Cortantes V13 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - Cortantes V23 [kN/m.a.] | | |
| Epsilon | 1.536442 | | Epsilon | 1.544331 | |
| Cuántía geométrica | 0.003014 | | Cuántía geométrica | 0.003103 | |
| Cortante último | 398.76 | kN/m.a. | Cortante último | 393.08 | kN/m.a. |

Imagen 173. Momentos y cortantes últimos en pantalla 02 para armado 2. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

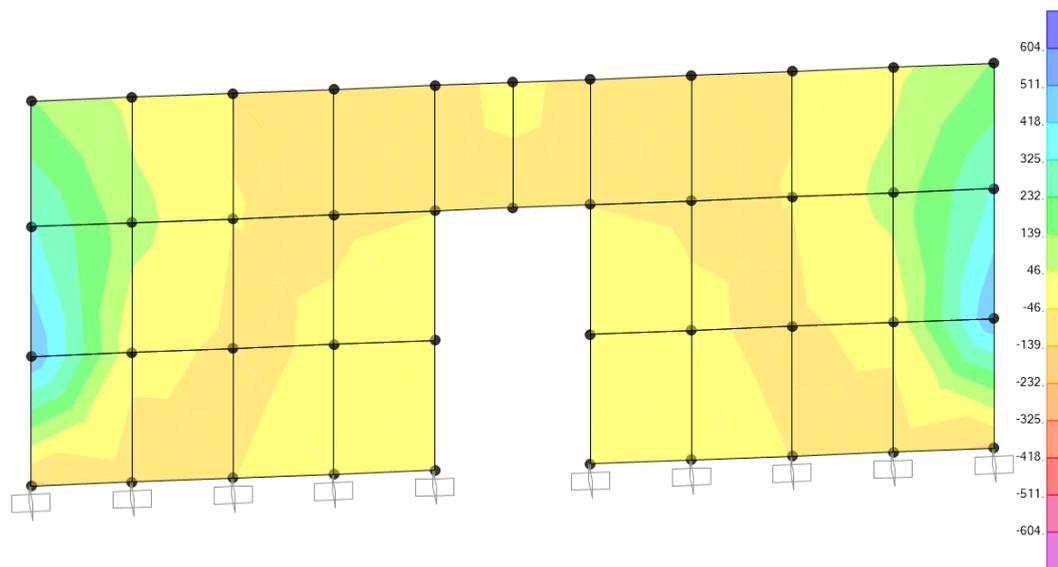


Imagen 174. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos; armado 2. Fuente: elaboración propia

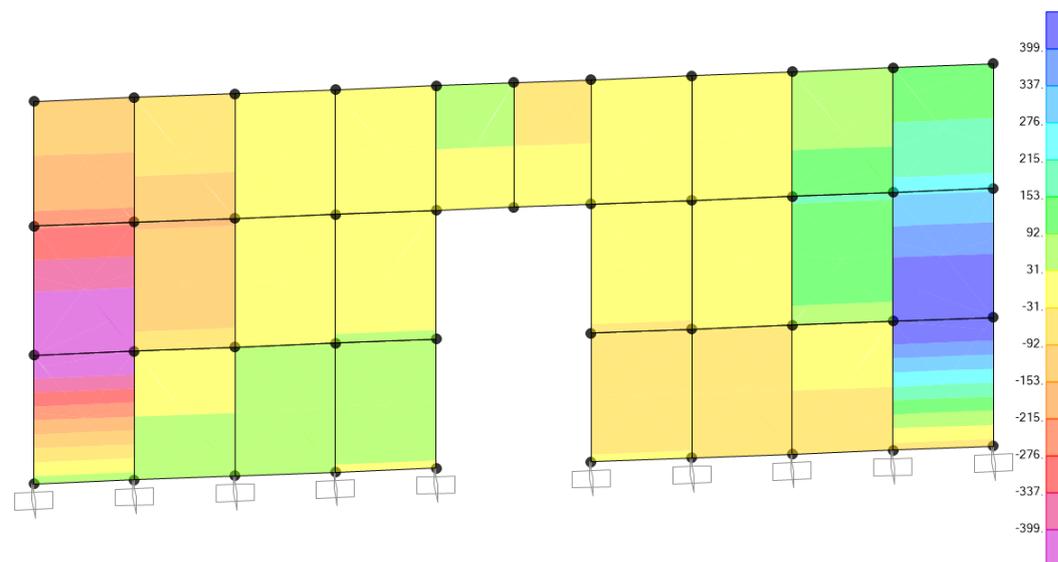


Imagen 175. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos; armado 2. Fuente: elaboración propia

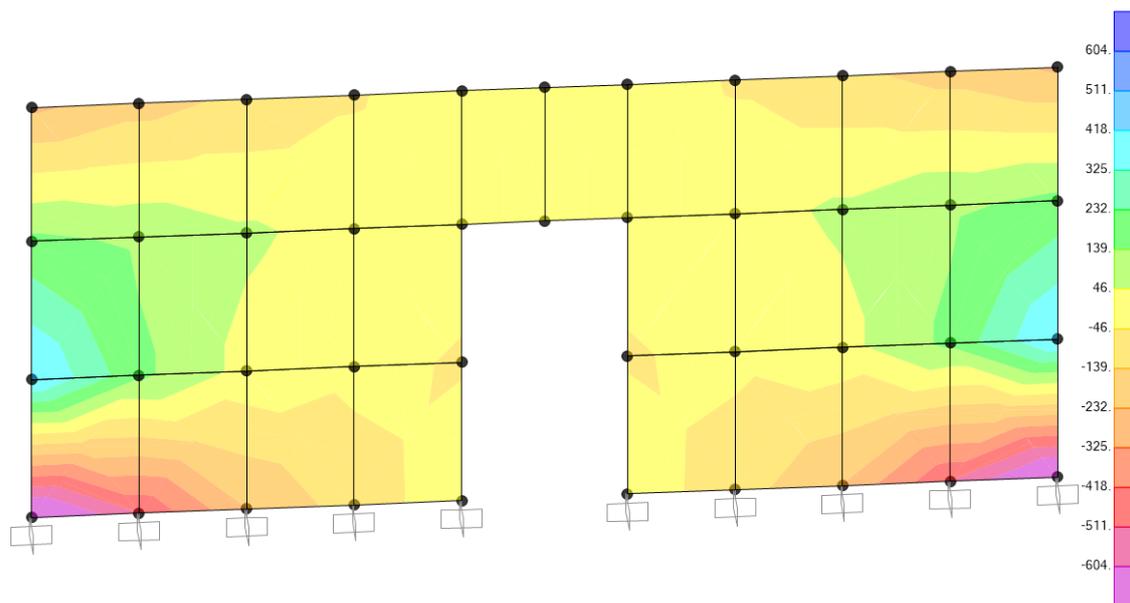


Imagen 176. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos; armado 2. Fuente: elaboración propia

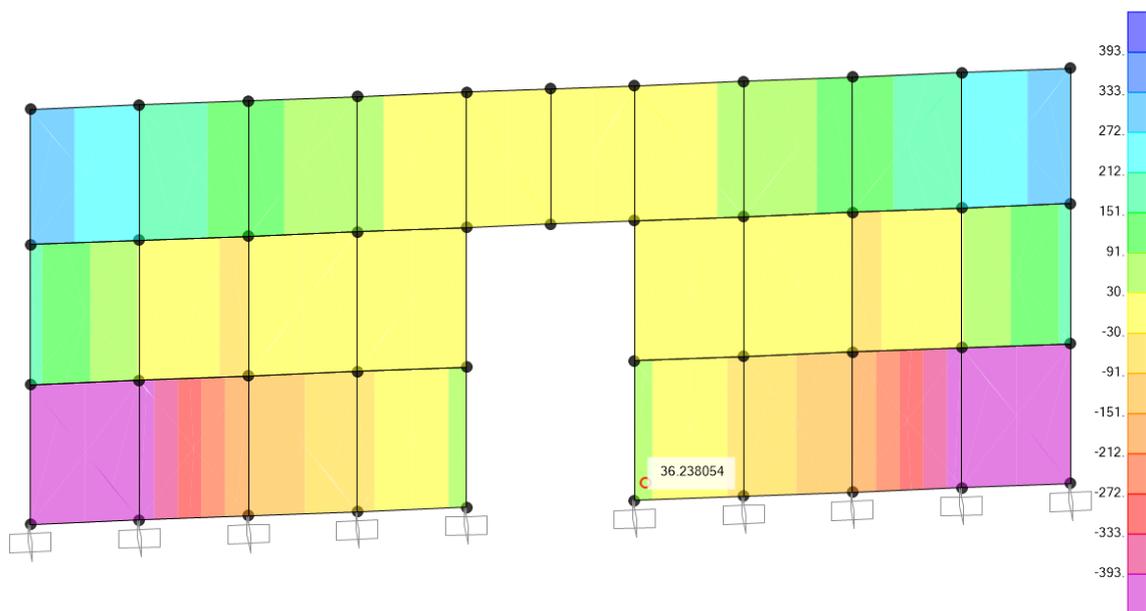


Imagen 177. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos; armado 2. Fuente: elaboración propia

Sigue sin cumplir el armado propuesto, por lo que se va a optar por **reducir la distancia entre las barras a 10 cm en ambas direcciones en los extremos del muro**, con los siguientes cortantes y momentos últimos.

| Armadura horizontal - Momentos M11 [kNm/m.a.] | | | Armadura vertical - Momentos M22 [kNm/m.a.] | | |
|---|---------------|-----------------|---|---------------|-----------------|
| Cuantía flexión transversal | 1,365.91 | kN / m.a. | Cuantía flexión transversal | 1,365.91 | kN / m.a. |
| Momento último flexión transversal | 912.74 | kNm/m.a. | Momento último flexión transversal | 912.74 | kNm/m.a. |
| Armadura horizontal - Cortantes V13 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - Cortantes V23 [kN/m.a.] | | |
| Epsilon | 1.536442 | | Epsilon | 1.544331 | |
| Cuantía geométrica | 0.004520 | | Cuantía geométrica | 0.004654 | |
| Cortante último | 456.46 | kN/m.a. | Cortante último | 449.96 | kN/m.a. |

Imagen 178. Momentos y cortantes últimos en pantalla 02 para armado 3. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

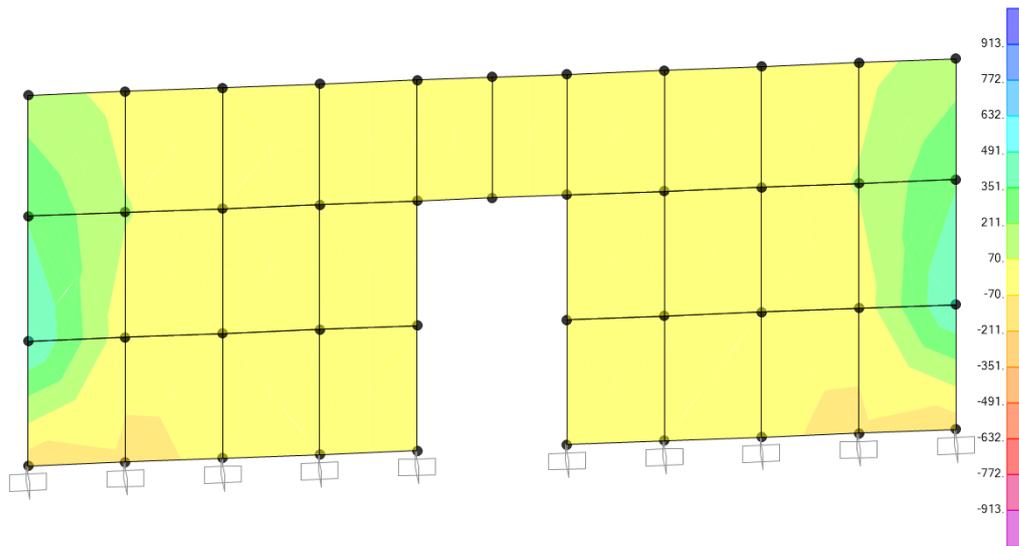


Imagen 179. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos; armado 3. Fuente: elaboración propia

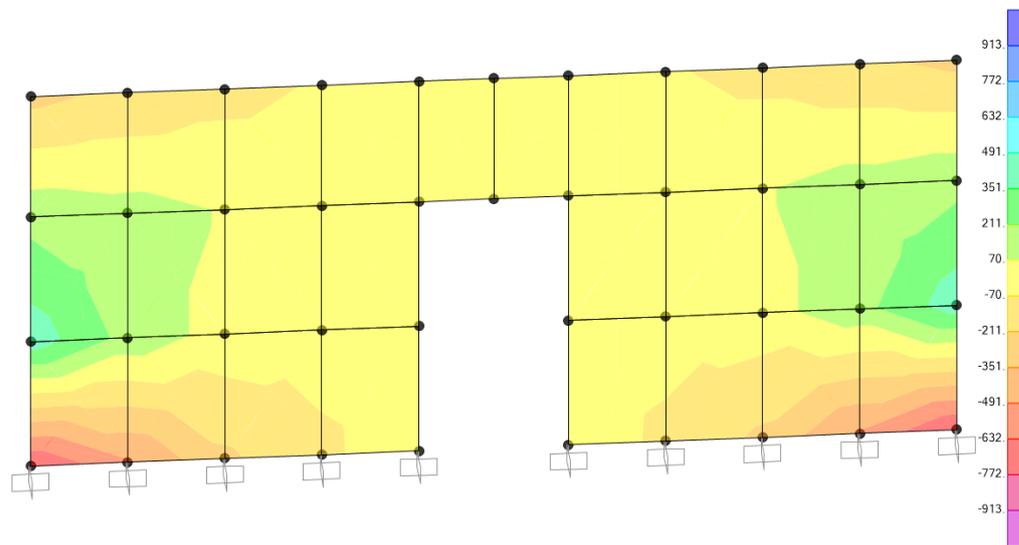


Imagen 180. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos; armado 3. Fuente: elaboración propia

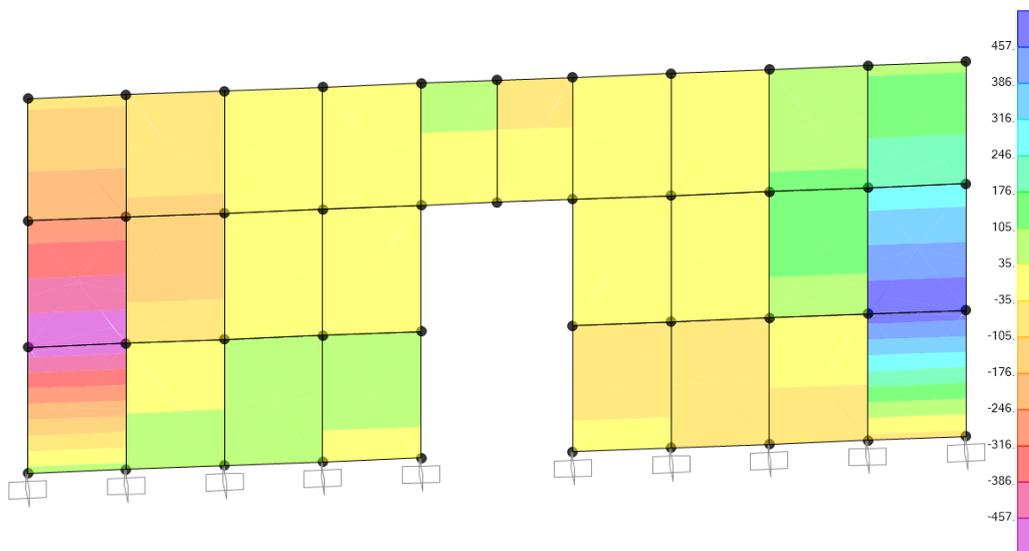


Imagen 181. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos; armado 3. Fuente: elaboración propia

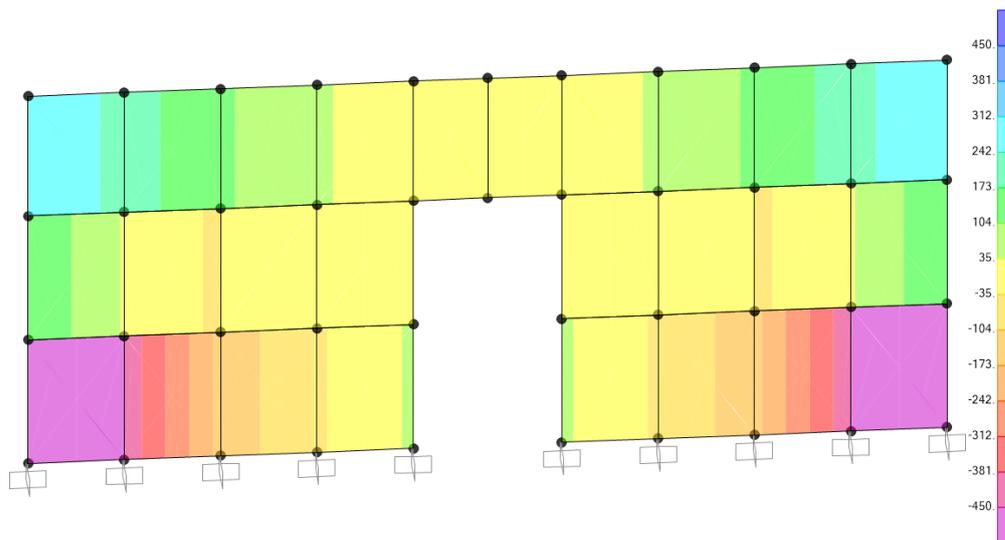


Imagen 182. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos; armado 3. Fuente: elaboración propia

Frente a momentos las secciones de los extremos cumplen con el último armado propuesto. En cuanto al cortante V13 las zonas en las que el cortante solicitación supera al cortante último de la sección son muy reducidas; en caso de no estar seguros habría que aplicar el *Section Cut*.

En cuanto al momento V23, requerirá de refuerzos en la armadura vertical en los extremos del muro y se opta por colocar **barras de Ø20 cada 5 cm en vertical**, pudiendo llegar a doblarse el armado.

| | |
|-----------------------------------|-------------|
| Armado de base vertical | Ø20 c/20 cm |
| Armado de base horizontal | Ø16 c/20 cm |
| Refuerzo vertical en los extremos | Ø20 c/5 cm |
| Refuerzo horizontal en extremos | Ø20 c/10 cm |

Tabla 24. Armado final pantalla 02. Fuente: elaboración propia

6.2.9 | Comprobación pantalla grupo 3

Esta pantalla forma parte del grupo superior del rascacielos; se escoge la última pantalla de correspondiente a una vivienda. Cambia tanto su espesor como la resistencia del hormigón empleado.

| DATOS DE PARTIDA | | | | | |
|--------------------|--------|-------------------|-----------------------------------|------------|----|
| Materiales | | | Geometría | | |
| Fck | 70 | N/mm ² | Espesor muro | 30 | cm |
| Gc | 1.50 | | Recubrimiento Neto | 3.5 | cm |
| Fcd | 46.67 | N/mm ² | Armadura exterior | horizontal | |
| Fyk | 500 | N/mm ² | Recubrimiento armadura horizontal | 4.30 | cm |
| Gc | 1.15 | | Recubrimiento armadura vertical | 5.90 | cm |
| Fyd (tracciones) | 434.78 | N/mm ² | | | |
| Fyd (compresiones) | 400.00 | N/mm ² | | | |

Imagen 183. Características constructivas pantalla 03. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

Se opta por un armado inicial de **barras de Ø16 cada 20 cm**, tanto en horizontal como en vertical. En primer lugar, se analizan las fuerzas F11 y F22 en función de las máximas compresiones y tracciones que soporta la sección en cada dirección.

| ARMADO HORIZONTAL (simétrico en ambas caras) | | | ARMADO VERTICAL (simétrico en ambas caras) | | |
|--|-------------------|----------------|--|-------------------|----------------|
| Armadura horizontal - fuerzas F11 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - fuerzas F22 [kN/m.a.] | | |
| Diámetro de base horizontal | 16 | mm | Diámetro de base vertical | 16 | mm |
| Distancia vertical entre barras | 20 | cm | Distancia vertical entre barras | 20 | cm |
| Máxima compresión hormigón | 11,900.00 | kN/m.a. | Máxima compresión hormigón | 11,900.00 | kN/m.a. |
| Máxima compresión acero | 804.25 | kN/m.a. | Máxima compresión acero | 804.25 | kN/m.a. |
| Máxima compresión | -12,704.25 | kN/m.a. | Máxima compresión | -12,704.25 | kN/m.a. |
| Máxima tracción | 874.18 | kN/m.a. | Máxima tracción | 874.18 | kN/m.a. |

Imagen 184. Momentos y cortantes últimos en pantalla 03; armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

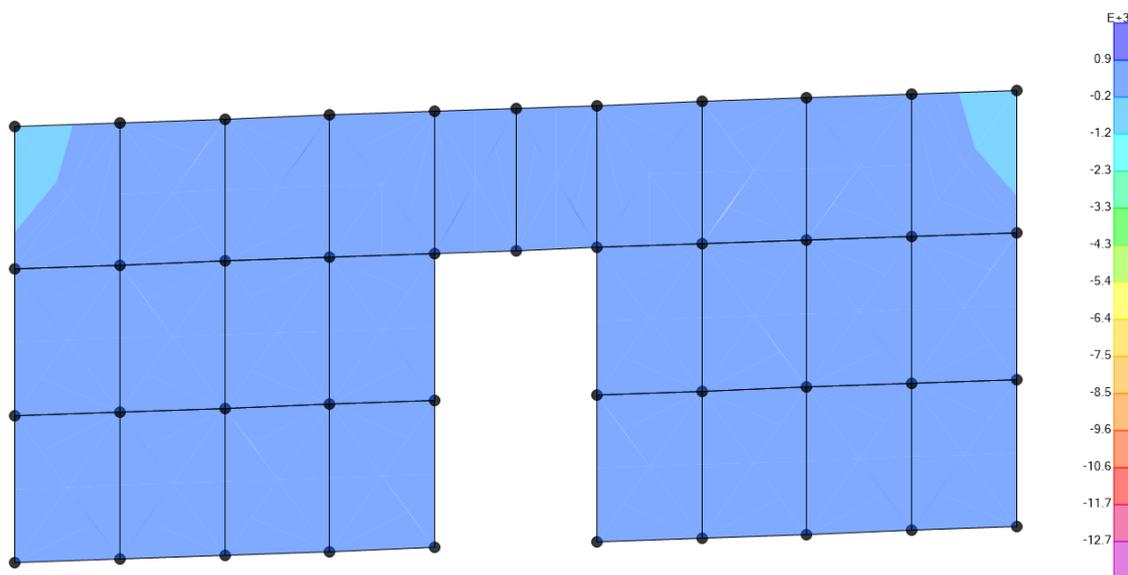


Imagen 185. F11 acotados según la máxima tracción y compresión en pantalla 02. Fuente: elaboración propia

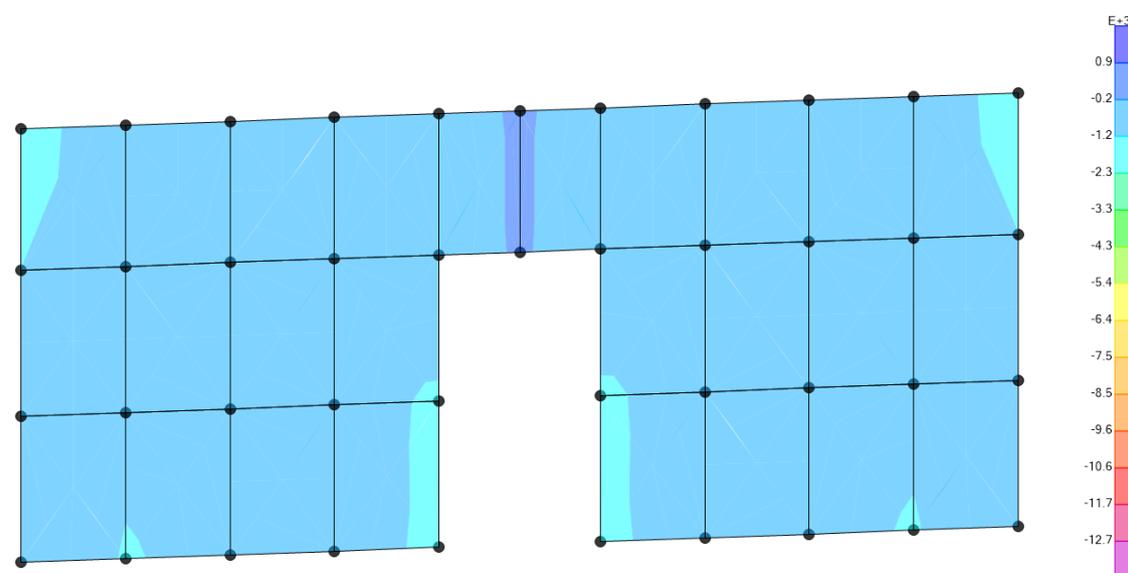


Imagen 186. F22 acotados según la máxima tracción y compresión en pantalla 02. Fuente: elaboración propia

La pantalla está comprimida y en ambos casos cumple con el armado propuesto. Es necesario, antes de validar este armado, revisar si los cortantes y momentos solicitación se encuentran por debajo de los cortantes y momentos últimos del Excel.

| Armadura horizontal - Momentos M11 [kNm/m.a.] | | | Armadura vertical - Momentos M22 [kNm/m.a.] | | |
|---|---------------|-----------------|---|---------------|-----------------|
| Cuantía flexión transversal | 437.09 | kN / m.a. | Cuantía flexión transversal | 437.09 | kN / m.a. |
| Momento último flexión transversal | 101.33 | kNm/m.a. | Momento último flexión transversal | 101.33 | kNm/m.a. |
| Armadura horizontal - Cortantes V13 [kN/m.a.] | | | Armadura vertical - Cortantes V23 [kN/m.a.] | | |
| Epsilon | 1.910975 | | Epsilon | 1.942809 | |
| Cuantía geométrica | 0.004171 | | Cuantía geométrica | 0.004468 | |
| Cortante último | 170.18 | kN/m.a. | Cortante último | 165.27 | kN/m.a. |

Imagen 187. Momentos y cortantes últimos en pantalla 03 para armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis

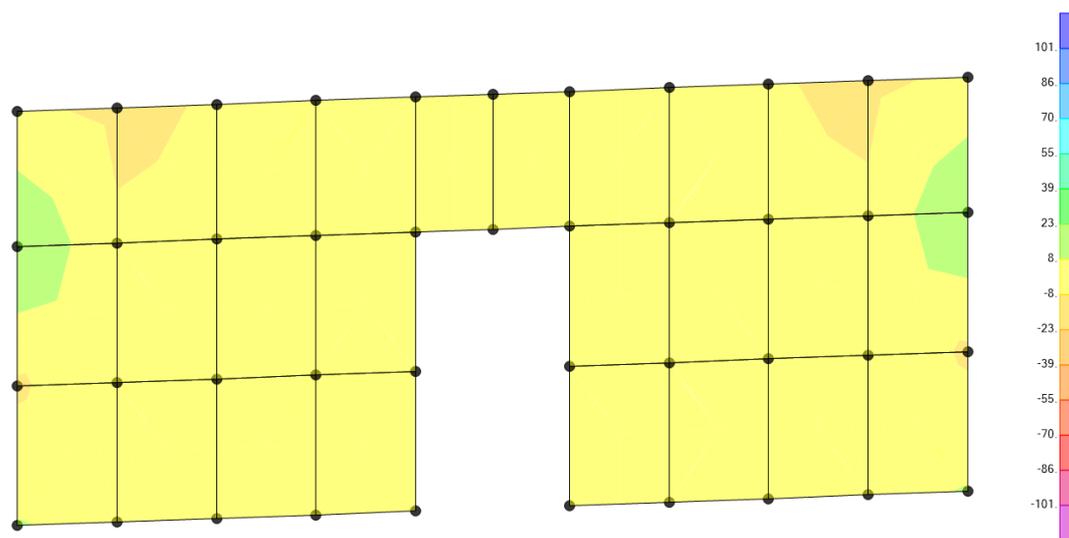


Imagen 188. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos. Fuente: elaboración propia

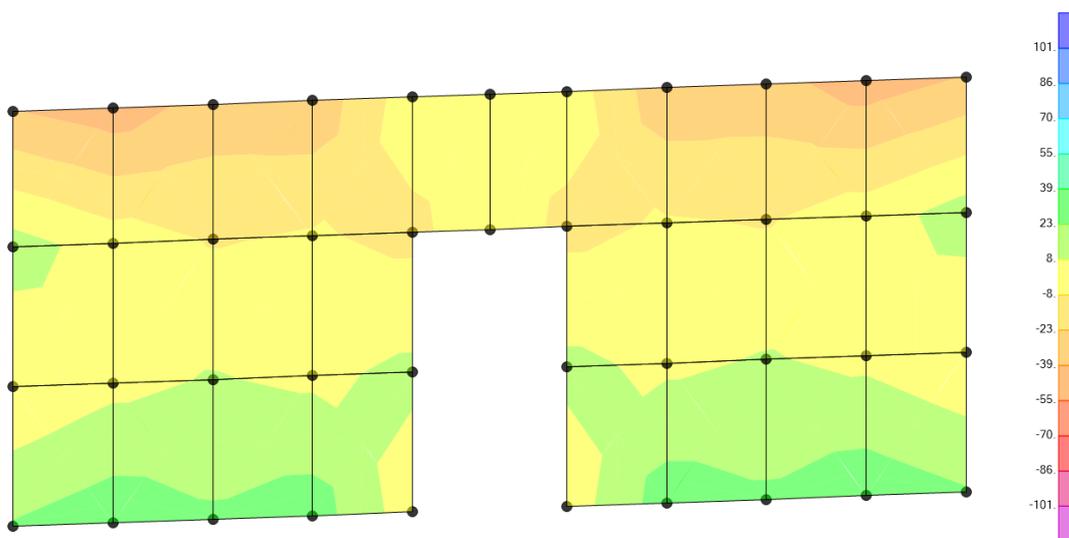


Imagen 189. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos. Fuente: elaboración propia

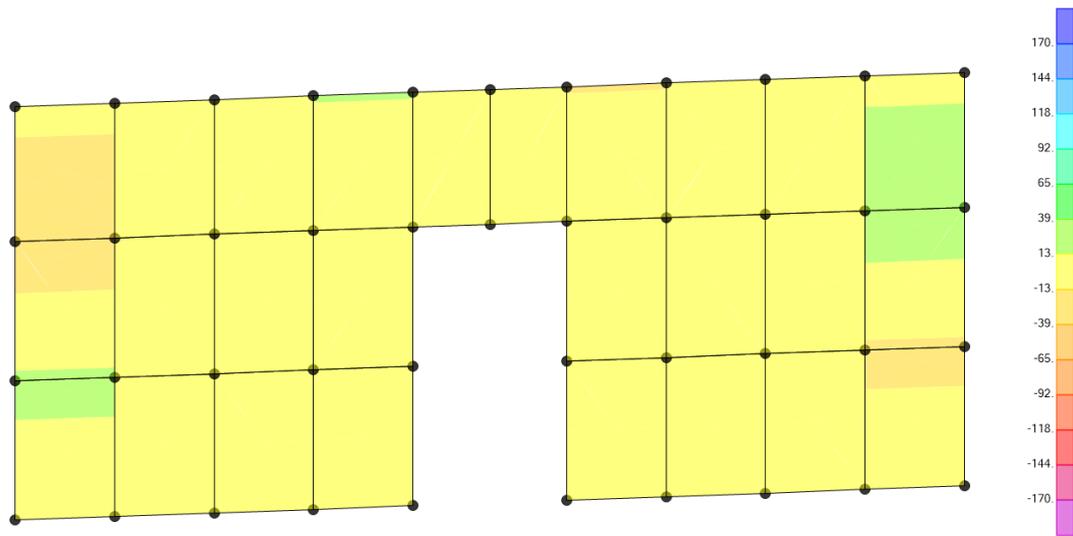


Imagen 190. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos. Fuente: elaboración propia

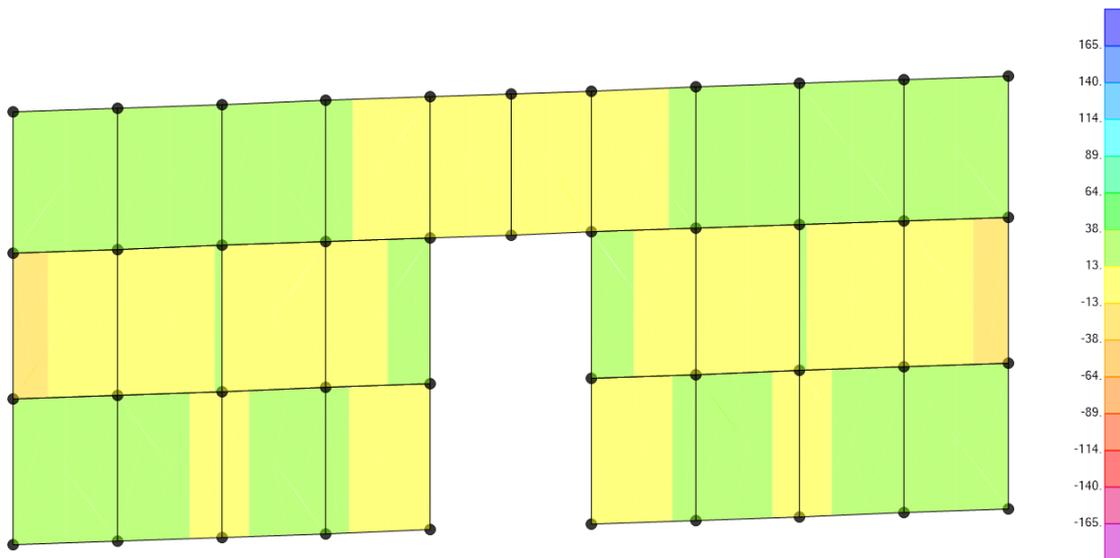


Imagen 191. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos. Fuente: elaboración propia

Puesto que no hay ninguna zona en magenta u azul oscuro, no hay ninguna zona que no cumpla. Por tanto, el **armado propuesto en horizontal y vertical de barras de Ø16 cada 20 cm** cumple con los criterios de cálculo.

Conclusiones

Con el presente Trabajo Final de Grado se ha podido emplear una herramienta de análisis estructural que, en mi caso particular, no he tenido la oportunidad de aprender durante la carrera, como es el SAP2000. Es un programa para el que se necesitan conocimientos de estructuras previos, pero esto no le resta valor como un excelente software para un entendimiento aún más profundo de la construcción y del funcionamiento las estructuras desde un punto de vista tridimensional.

La elección del rascacielos 432 Park Avenue, situado en Manhattan, como objeto de análisis, con las dificultades que ello ha conllevado, tanto por falta de información disponible, como por la complejidad de una estructura tan esbelta, ha sido totalmente acertada, ya que en él se han podido llevar a cabo todas las comprobaciones con las que debe contar una estructura para construirse, llevándome a un enfrentamiento con una estructura singular desde todos sus puntos de vista.

El proceso de investigación del edificio me ha permitido entender el porqué del surgimiento de estas nuevas construcciones en la isla de Manhattan y cómo es posible integrar toda una serie de condicionantes estéticos, funcionales y compositivos en un edificio en altura. Es un claro ejemplo de cómo construir arquitectura a través de la estructura, ya que esta juega un papel fundamental no solo en la estabilidad del edificio, sino también en sus prestaciones, de las que destacaría su flexibilidad en planta. Resulta asombroso que arquitectos e ingenieros, a lo largo de la corta historia de los rascacielos, hayan podido desarrollar materiales y técnicas lo suficientemente avanzadas para poder construir edificios de tal esbeltez y sencillez compositiva y estructural.

Además, ha sido posible profundizar en una evolución lógica de un proyecto que, comenzando con una forma totalmente prismática, ha tenido que variar su diseño, incorporando plantas técnicas que funcionan como túneles de viento y un amortiguador de masa en la cubierta; el viento al que está expuesta la estructura es la carga fundamental a la que tiene que hacer frente.

Con un modelo totalmente comprendido e interiorizado se ha podido modelar en AutoCAD el rascacielos con la mayor fidelidad posible, con el empleo de líneas y 3Dcaras; aunque se ha tratado de simplificar el modelo al máximo, éste cuenta con más de 46.000 elementos. Una vez completado este primer paso se ha podido exportar a SAP2000, donde se han asignado materiales, secciones y cargas a todos los elementos, tratando de acercar el modelo a una realidad tangible y numérica. Aunque no está construido en España, se ha aplicado la normativa estructural estatal para analizar su cumplimiento frente a Estados Límites de Servicio y Estados Límites Últimos.

En un primer momento con las comprobaciones de ELS, dada la esbeltez del edificio con proporciones de 1:15, podría llegar a pensarse que es una estructura imposible; sin embargo, se han abolido todas las premisas que se pudieran tener sobre el rascacielos, ya que cumple holgadamente con todas las comprobaciones.

En cuanto al análisis de ELU, éste ha sido más complejo de realizar, ya que SAP2000 permite obtener diagramas de esfuerzos, pero no una peritación de los elementos construidos con hormigón armado; se han empleado tablas y cálculos complementarios, suponiendo armados de las piezas, hasta dar con soluciones válidas.

Ha sido una forma de demostrar que las estructuras, por muy complejas que puedan parecer, siempre cuentan con una solución, aunque ello suponga un auténtico reto para la paciencia y la constancia. Para ello es necesario no solamente conocer la estructura del edificio, sino también su forma de construcción, esencial para realizar un adecuado modelo de cálculo.

Bibliografía

- Alberts, H. R. (2014). Watch 432 Park's Engineer Explain How The Tower Stays Up. *Curbed. New York*. <https://ny.curbed.com/2014/2/4/10147410/watch-432-parks-engineer-explain-how-the-tower-stays-up>
- Arquitectura Viva. (2015). *Torre 111 West*. Arquitectura Viva. <https://arquitecturaviva.com/obras/torre-111-west>
- Ashford, G. (2020). *Giles Ashford*. Giles Ashford Webpage. <http://www.gilesashford.com/>
- Chaban, M. A. V. (2014, October 13). New Manhattan Tower Is Now the Tallest, if Not the Fairest, of Them All. *The New York Times*. https://www.nytimes.com/welcome-subscriber/newsletter-signup?EXIT_URI=http%3A%2F%2Fwww.nytimes.com%2F%3FcampaignId%3D9WJRH
- Chen, S. (2021, February 3). The Downside to Life in a Supertall Tower: Leaks, Creaks, Breaks. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2021/02/03/realestate/luxury-high-rise-432-park.html>
- Construction News. (2015). *432 Park Avenue, New York City - Timelapse*. https://www.youtube.com/watch?v=_TH0bEJvY4A
- Council on Tall Buildings and Urban Habitat. (2021). *Tallest buildings*. Council on Tall Buildings and Urban Habitat. <https://www.skyscrapercenter.com/buildings>
- DBOX. (2013). *432 Park Avenue*. DBOX. https://www.dboxcg.com/portfolio/432_park_avenue
- Deborah Berke Partners. (2020). *432 Park — classically modern apartments offering remarkable vistas*. 432 Park. <https://www.dberke.com/project/432-park-avenue/#read-more>
- Douglas Elliman. (n.d.). *Douglas Elliman*. 432 Park Ave. Retrieved August 18, 2021, from <https://www.elliman.com/newyorkcity>
- Extell. (2020). *Central Park Tower features the highest residences in the world*. Central Park Tower. <https://centralparktower.com/tower#anatomy-of-a-building>
- Finn, R. (2014). Another Glass Tower at Madison Square. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2014/10/12/realestate/another-glass-tower-at-madison-square.html>
- Gallardo Llopis, D. (2005). *Edificios en altura*.
- Gray, C. (2005). Are Manhattan's Right Angles Wrong? *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2005/10/23/realestate/are-manhattans-right-angles-wrong.html>
- Gregor, A. (2015). In Midtown East, the Seagram Building's New Neighbor. *The New York Times*. In Midtown East, the Seagram Building's New Neighbor
- Marcus, S., Mena, H., Yalniz, F., & Shirley, C. (2018, July). 432 Park. *Structure Magazine*. <https://www.structuremag.org/?p=13350>
- Mazzara, B. (2016). Everything You Need To Know About 432 Park Avenue. *Bisnow*. <https://www.bisnow.com/new-york/news/economy/inside-the-supertalls-432-park-avenue-65580>
- Monfort Lleó, J. (2006). *Estructuras metálicas para edificación* (2006th ed.). Universitat Politècnica de València.
- Peirón, F. (2021, February 8). El lujoso edificio de Manhattan que acumula deficiencias. *La Vanguardia*. <https://www.lavanguardia.com/internacional/20210208/6230224/432-park-avenue-nueva-york-edificio-deficiencias-goteras.html>
- Pomroy, M. (2015). *The rise of New York's luxury towers*. www.Mattpomroy.Com. <https://mattpomroy.com/2015/12/03/the-rise-of-new-yorks-luxury-towers/>
- Rafael Viñoly Architects. (n.d.). *Rafael Viñoly Architects*. www.viñoly.com

- Rafael Viñoly Architects. (2021). *432 Park Avenue*. 432 Park Avenue. <https://www.432parkavenue.com/>
- Rehana, S. J. (2015). Concrete homes: 432 Park Avenue. *Concrete Construction*. https://www.concreteconstruction.net/business/concrete-homes-432-park-avenue_o
- Reid, R. L. (2019). Civil Engineering Magazine Archive. *American Society of Civil Engineers (ASCE) Magazine*, 89(Skinny 'Scrapers), 44–53. <https://www.asce.org/cemagazine/skinny-scrapers/>
- Structurae. (2015). *432 Park Avenue, New York: the tallest residential building in the western hemisphere*. Structurae.
- The Architect's Newspaper. (2014). 432 Park Avenue. *The Architect's Newspaper*. <https://www.archpaper.com/2014/04/432-park-avenue/>
- Viñoly, R. (2014). *Rafael Viñoly Lecture: 432 Park Avenue and other towers*. https://www.youtube.com/watch?v=tllQu9ym_sk&t=874s
- Welch, A. (2021). *Rafael Viñoly Architect Practice Information*. Architects Offices Studios. <https://www.e-architect.com/architects/rafael-vinoly-architect>
- Willis, C. (2015). *The Logic of Luxury 2.0*.
- WSP. (2017). *432 Park Avenue, New York*. WSP Projects. <https://www.wsp.com/en-GL/projects/432-park-avenue>

Listado de imágenes

| | |
|---|----|
| Imagen 1. Panorámica edificios del entorno en Manhattan. Fuente: (Rafael Viñoly Architects, n.d.) | 9 |
| Imagen 2. Rafael Viñoly. Fuente: Elisabeth Lippman para el Wall Street Journal | 11 |
| Imagen 3 (derecha). Foro Internacional de Tokio desde el exterior. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.) | 11 |
| Imagen 4 (izquierda). Foro Internacional de Tokio desde el interior. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.) | 11 |
| Imagen 5. Equipo completo de Rafael Viñoly Architects. Fuente: Rafael Viñoly (Rafael Viñoly Architects, n.d.) | 12 |
| Imagen 6. Puente de la Laguna Garzón. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.) | 13 |
| Imagen 7. Aeropuerto Internacional de Carrasco. Nueva Terminal. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.) | 13 |
| Imagen 8. Teatro Curve. Fuente: Rafael Viñoly Architects webpage (Rafael Viñoly Architects, n.d.) | 14 |
| Imagen 9 (derecha). Render de la torre 111 West 57th Street. Fuente: Torre 111 West (<i>Arquitectura Viva</i> , 2015) | 15 |
| Imagen 10 (izquierda). Foto aérea 53W53. Fuente: Giles Ashford (Ashford, 2020) | 15 |
| Imagen 11 (derecha). Render de Central Park Tower. Fuente: Central Park Tower (Extell, 2020) | 16 |
| Imagen 12 (centro). Render 100 East 53rd Street. Fuente: In Midtown East, the Seagram Building's New Neighbor (Gregor, 2015) | 16 |
| Imagen 13 (izquierda). Render de Madison Square Park Tower. Fuente: Williams New York (<i>Finn</i> , 2014) | 16 |
| Imagen 14. Emplazamiento en la isla de Manhattan. Fuente: Google Maps | 17 |
| Imagen 15. Emplazamiento próximo. Fuente: reelaboración propia | 18 |
| Imagen 16. Vista desde 57th Street. Fuente: DBOX Portfolio (<i>DBOX</i> , 2013) | 19 |
| Imagen 17 (derecha). Acceso principal al edificio. Fuente: DBOX Portfolio (<i>DBOX</i> , 2013) | 19 |
| Imagen 18 (izquierda). Acceso al edificio y marquesina en voladizo. Fuente: DBOX Portfolio (<i>DBOX</i> , 2013) | 19 |
| Imagen 19 (derecha). Comercio desde la plaza pública. Fuente: Rafael Viñoly Architects (<i>Rafael Viñoly Architects</i> , 2021) | 20 |
| Imagen 20 (izquierda). Comercio desde Park Avenue con 56th Street. Fuente: Rafael Viñoly Architects (<i>Rafael Viñoly Architects</i> , 2021) | 20 |
| Imagen 23. Rascacielos 432 Park Avenue en una vista nocturna con el entorno. Fuente: Rafael Viñoly Architects (<i>Rafael Viñoly Architects</i> , 2021) | 20 |
| Imagen 24 (derecha). Basura para papel Hoffmann Gitterwerk. Fuente: Neue Galerie | 21 |
| Imagen 25 (izquierda). Composición en retícula del rascacielos 432 Park Avenue. Fuente: DBOX Portfolio (<i>DBOX</i> , 2013) | 21 |
| Imagen 26. Esquema partes del rascacielos. Fuente: reelaboración propia | 22 |
| Imagen 27. Piscina interior a doble altura. Fuente: DBOX Portfolio (<i>DBOX</i> , 2013) | 23 |
| Imagen 28. Lounge a doble altura. Fuente: DBOX Portfolio (<i>DBOX</i> , 2013) | 23 |

| | |
|--|----|
| Imagen 29 (derecha). Zócalo con acabado en piel. Fuente: DBOX Portfolio (<i>DBOX, 2013</i>) | 23 |
| Imagen 30 (izquierda). Zócalo con acabado en mármol blanco. Fuente: DBOX Portfolio (<i>DBOX, 2013</i>) | 23 |
| Imagen 31. Ventanas en retícula de un apartamento. Fuente: DBOX Portfolio (<i>DBOX, 2013</i>) | 24 |
| Imagen 32. Planta vivienda tipo A plantas 35-37. Fuente: Douglas Elliman/Buy (Douglas Elliman, n.d.) | 24 |
| Imagen 33. Planta vivienda tipo A planta 34. Fuente: Douglas Elliman/Buy (Douglas Elliman, n.d.) | 25 |
| Imagen 34. Planta vivienda tipo A plantas 77-84. Fuente: Douglas Elliman/Buy (Douglas Elliman, n.d.) | 25 |
| Imagen 35. Planta vivienda tipo ático plantas 91-96. Fuente: Douglas Elliman/Buy (Douglas Elliman, n.d.) | 26 |
| Imagen 36 (derecha). Cocina diseñada por Deborah Berke Partners. Fuente: "432 Park — classically modern apartments offering remarkable vistas" (Deborah Berke Partners, 2020) | 27 |
| Imagen 37 (izquierda). Distribuidos y estares diseñados por Deborah Berke Partners. Fuente: "432 Park — classically modern apartments offering remarkable vistas" (Deborah Berke Partners, 2020) | 27 |
| Imagen 21. Plantas estructurales inferiores. Fuente: reelaboración propia | 29 |
| Imagen 22. Plantas estructurales superiores. Fuente: reelaboración propia | 29 |
| Imagen 38. Sótano y muros desde 57th Street. Fuente: 432 Park Avenue, New York City - timelapse of construction, minuto 0:19 (Construction News, 2015) | 32 |
| Imagen 39. Armaduras de espera en el sótano. Fuente: 432 Park (<i>Marcus et al., 2018</i>) | 32 |
| Imagen 40. Vista interior de la losa maciza y puntales. Fuente: 432 Park (<i>Marcus et al., 2018</i>) | 33 |
| Imagen 41. Andamiaje interior. Fuente: Fuente: 432 Park Avenue by Rafael Viñoly (Lalueta, 2013) | 33 |
| Imagen 42 (derecha). Construcción del núcleo previa al perímetro y grúa. Fuente: 432 Park Avenue by Rafael Viñoly (Lalueta, 2013) | 34 |
| Imagen 43 (izquierda). Grúa conectada a la estructura y elevador. Fuente: 432 Park Avenue (Rafael Viñoly Architects, 2021) | 34 |
| Imagen 44. Vista aérea de la pluma en el núcleo. Fuente: Concrete homes; 432 Park Avenue (Rehana, 2015) | 34 |
| Imagen 45. Vista interior del amortiguador de masa y de la pluma. Fuente: Concrete homes; 432 Park Avenue (Rehana, 2015) | 34 |
| Imagen 46. Imagen encofrados metálicos en pilares y red de seguridad. Fuente: Concrete Construction (Rehana, 2015) | 35 |
| Imagen 47. Rascacielos sin amortiguador de masa. Elaboración propia | 37 |
| Imagen 48. Rascacielos con amortiguador de masa. Elaboración propia | 37 |
| Imagen 50 (derecha). Modelización en AutoCAD: parte superior. Fuente: elaboración propia | 38 |
| Imagen 49 (izquierda). Modelización en AutoCAD. Fuente: elaboración propia | 38 |
| Imagen 51 (derecha). Modelización en AutoCAD: planta tipo. Fuente: elaboración propia | 39 |
| Imagen 52 (izquierda). Modelización en AutoCAD: planta ático. Fuente: elaboración propia | 39 |
| Imagen 53. Captura SAP2000: resultado de la importación del dxf. Fuente: elaboración propia | 39 |

| | |
|---|----|
| Imagen 54 (derecha). Captura SAP2000: Definición del material HA-70. Fuente: elaboración propia | 40 |
| Imagen 55 (izquierda). Captura SAP2000: Definición del material HA-100. Fuente: elaboración propia | 40 |
| Imagen 56. Captura SAP2000: Definición del material HA-140. Fuente: elaboración propia | 41 |
| Imagen 57 (derecha). Captura SAP2000: Perspectiva general del edificio y sus grupos. Fuente: elaboración propia | 42 |
| Imagen 58 (izquierda). Captura SAP2000: Perspectiva en detalle del grupo 03. Fuente: elaboración propia | 42 |
| Imagen 59 (derecha). Captura SAP2000: Pilares de una planta tipo con ejes locales girados. Fuente: elaboración propia | 43 |
| Imagen 60 (izquierda). Captura SAP2000: Pilares de una planta tipo en vista extruida. Fuente: elaboración propia | 43 |
| Imagen 61. Captura SAP2000: Pilares alineados según su centroide. Fuente: elaboración propia | 43 |
| Imagen 62. Captura SAP2000: Pilares alineados con la fachada. Fuente: elaboración propia | 44 |
| Imagen 63. Captura SAP2000: Asignación de empotramientos en la base de la estructura. Fuente: elaboración propia | 44 |
| Imagen 64. Tabla 3.1 del CTE-BDSE-AE | 46 |
| Imagen 65. Tabla 3.8 del CTE-BDSE-AE | 46 |
| Imagen 66. Captura SAP2000: Sección None2 aplicada a la fachada. Fuente: elaboración propia | 47 |
| Imagen 67. Cálculo viento en edificios en altura. Fuente: elaboración propia a partir de documentación facilitada por David Gallardo Llopis | 48 |
| Imagen 68. Tabla 3.5 del CTE-BDSE-AE | 48 |
| Imagen 69. Captura SAP2000: Ejemplo Joint Pattern de presión en la dirección Y | 49 |
| Imagen 70. Tabla 4.1 del DBSE | 50 |
| Imagen 71 (derecha). Captura SAP2000: Deformación escalada x100 y en milímetros de SCVx. Fuente: elaboración propia | 52 |
| Imagen 72 (izquierda). Captura SAP2000: Deformación escalada x100 y en milímetros de SCVy. Fuente: elaboración propia | 52 |
| Imagen 73. Tabla 4.2 del CTE-DBSE-AE | 52 |
| Imagen 74. Captura SAP2000: ELS integridad de los elementos constructivos hipótesis 1. Fuente: elaboración propia | 53 |
| Imagen 75 (derecha). Captura SAP2000: Alzado del desplazamiento horizontal en hipótesis 1 en milímetros. Fuente: elaboración propia | 53 |
| Imagen 76 (izquierda). Captura SAP2000: Perspectiva axonométrica del desplazamiento horizontal en hipótesis 1 en milímetros. Fuente: elaboración propia | 54 |
| Imagen 77. Tabla 4.2 del CTE-DBSE-AE | 54 |
| Imagen 78. Captura SAP2000: ELS integridad de los elementos constructivos hipótesis 2. Fuente: elaboración propia | 54 |

| | |
|--|----|
| Imagen 79. Captura SAP2000: Alzado del desplazamiento horizontal en hipótesis 2 en milímetros. Fuente: elaboración propia | 55 |
| Imagen 80. Captura SAP2000: Perspectiva axonométrica del desplazamiento horizontal en hipótesis 2 en milímetros. Fuente: elaboración propia | 55 |
| Imagen 81. Captura SAP2000: Desplome total de la estructura en dirección y. Fuente: elaboración propia | 56 |
| Imagen 82. Captura SAP2000: Desplome local de la estructura en dirección y. Fuente: elaboración propia | 57 |
| Imagen 83. Tabla 4.2 del CTE-DBSE | 58 |
| Imagen 84. Captura SAP2000: ELS apariencia de la obra. Fuente: elaboración propia | 58 |
| Imagen 85 (derecha). Captura SAP2000: ELSqpu deformación de la estructura en dirección x en milímetros. Fuente: elaboración propia | 59 |
| Imagen 86 (izquierda). Captura SAP2000: ELSqpu deformación de la estructura en dirección y en milímetros. Fuente: elaboración propia | 59 |
| Imagen 87. Captura SAP2000: Deformación vertical para integridad de los elementos constructivos en milímetros. Fuente: elaboración propia | 60 |
| Imagen 88. Captura SAP2000: Punto de deformación vertical mínima del forjado de última planta en milímetros. Fuente: elaboración propia | 60 |
| Imagen 89. Captura SAP2000: Punto de deformación vertical máxima del forjado de última planta en milímetros. Fuente: elaboración propia | 61 |
| Imagen 90. Captura SAP2000: Deformación vertical bajo SCU. Fuente: elaboración propia | 62 |
| Imagen 91. Captura SAP2000: Punto de deformación vertical máxima del forjado de última planta en milímetros. Fuente: elaboración propia | 62 |
| Imagen 92. Captura SAP2000: Punto de deformación vertical mínima del forjado de última planta en milímetros. Fuente: elaboración propia | 63 |
| Imagen 93. Captura SAP2000: ELSqpu deformación de la estructura en dirección z en milímetros. Fuente: elaboración propia | 64 |
| Imagen 94. Captura SAP2000: Resultado de la apariencia de la obra en milímetros; desplazamiento vertical máximo. Fuente: elaboración propia | 64 |
| Imagen 95. Captura SAP2000: Resultado de la apariencia de la obra en milímetros; desplazamiento vertical mínimo. Fuente: elaboración propia | 65 |
| Imagen 96 (derecha). Captura SAP2000: disposición de los ejes locales en pilar 01. Fuente: elaboración propia | 66 |
| Imagen 97 (izquierda). Captura SAP2000: envolvente de combinaciones definidas para ELU. Fuente: plantilla de David Gallardo Llopis | 66 |
| Imagen 98. Captura SAP2000: Esfuerzos en pilar 01. Fuente: elaboración propia | 67 |
| Imagen 99. Primer esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 01. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis | 68 |
| Imagen 100. Resultados primer esquema de armado de la sección del pilar 01. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis | 68 |
| Imagen 101. Segundo esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 01. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis | 69 |

| | |
|--|----|
| Imagen 102. Segundo esquema de armado de la sección del pilar 01. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis | 69 |
| Imagen 103. Captura SAP2000: Esfuerzos en pilar 01. Fuente: elaboración propia | 70 |
| Imagen 104. Primer esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 02. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis | 70 |
| Imagen 105. Resultados primer esquema de armado de la sección del pilar 02. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis | 70 |
| Imagen 106. Segundo esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 02. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis | 71 |
| Imagen 107. Resultados segundo esquema de armado de la sección del pilar 02. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis | 71 |
| Imagen 108. Limitaciones del segundo esquema de armado en pilar 02. Fuente: elaboración propia | 71 |
| Imagen 109. Esfuerzos en pilar 03. Fuente: elaboración propia | 72 |
| Imagen 110. Primer esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 03. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis | 72 |
| Imagen 111. Resultados primer esquema de armado de la sección del pilar 03. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis | 72 |
| Imagen 112. Segundo esquema de armado y esfuerzos límite de la sección del pilar 03. Fuente: elaboración propia a partir de Excel de David Gallardo Llopis | 73 |
| Imagen 113. Resultados segundo esquema de armado de la sección del pilar 03. Fuente: elaboración propia a partir del Excel de David Gallardo Llopis | 73 |
| Imagen 114. Captura SAP2000: Posición de los ejes locales en los elementos finitos de la losa. Fuente: elaboración propia | 75 |
| Imagen 115. Captura SAP2000: Momentos M11 en forjado grupo 01 en kN·m/ma acotados por máximo y mínimo. Fuente: elaboración propia | 75 |
| Imagen 116. Captura SAP2000: Momentos M22 en forjado grupo 01 en kN·m/ma acotados por máximo y mínimo. Fuente: elaboración propia | 76 |
| Imagen 117. Definición constructiva losa01. Fuente: elaboración propia a partir Excel aportado por David Gallardo Llopis | 76 |
| Imagen 118. Captura SAP2000: Resultado de momentos en dirección 1 acotados según M último. Fuente: elaboración propia | 77 |
| Imagen 119. Section cut para apoyo de las pantallas en losa01 en la dirección 1. Fuente: elaboración propia | 77 |
| Imagen 120. Captura SAP2000: Resultado de momentos en dirección 2 acotados según M último. Fuente: elaboración propia | 78 |
| Imagen 121. Section cut para apoyo de las pantallas en losa01 en la dirección 2. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 78 |
| Imagen 122. Captura SAP2000: Cortante V13 en losa01 acotados según V último. Fuente: elaboración propia | 79 |
| Imagen 123. Captura SAP2000: Section Cut para cortante V13. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 79 |

| | |
|---|----|
| Imagen 124. Captura SAP2000: Section Cut para cortante V13. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 80 |
| Imagen 125. Captura SAP2000: Cortantes V23 acotados según V último. Fuente: elaboración propia | 80 |
| Imagen 126. Definición constructiva losa02. Fuente: elaboración propia a partir de Excel aportado por David Gallardo Llopis | 81 |
| Imagen 127. Captura SAP2000: Momentos M11 en forjado grupo 02 en kN·m/ma acotados según M último. Fuente: elaboración propia | 81 |
| Imagen 128. Captura SAP2000: Momentos M22 en forjado grupo 02 en kN·m/ma acotados según M último. Fuente: elaboración propia | 82 |
| Imagen 129. Captura SAP2000: Ampliación zonas más solicitadas por momentos en dirección 1 acotados según M último. Fuente: elaboración propia | 82 |
| Imagen 130. Captura SAP2000: Ampliación zonas más solicitadas por momentos en dirección 2 acotados según M último. Fuente: elaboración propia | 83 |
| Imagen 131. Captura SAP2000: Cortantes V13 acotados según V último. Fuente: elaboración propia | 83 |
| Imagen 132. Section cut 1 para cortante V13 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 84 |
| Imagen 133. Section cut 2 para cortante V13 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 84 |
| Imagen 134. Section cut 3 para cortante V13 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 84 |
| Imagen 135. Captura SAP2000: Cortantes V23 acotados según V último. Fuente: elaboración propia | 85 |
| Imagen 136. Section cut 1 para cortante V23 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 85 |
| Imagen 137. Section cut 2 para cortante V23 en losa02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 86 |
| Imagen 138. Captura SAP2000: Resultado de momentos en dirección 1 acotados según M último. Fuente: elaboración propia | 87 |
| Imagen 139. Captura SAP2000: Resultado de momentos en dirección 2 acotados según M último. Fuente: elaboración propia | 87 |
| Imagen 140. Captura SAP2000: Cortantes V13 acotados según V último. Fuente: elaboración propia | 88 |
| Imagen 141. Captura SAP2000: Cortantes V23 acotados según V último. Fuente: elaboración propia | 88 |
| Imagen 142. Captura SAP2000: Selección de la pantalla 01 a dimensionar. Fuente: elaboración propia | 89 |
| Imagen 143. Captura SAP2000: Fuerzas F22 en la pantalla 01. Fuente: elaboración propia | 89 |
| Imagen 144. Section Cut en la base de la pantalla 01. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 90 |
| Imagen 145. Características constructivas pantalla 01. Fuente: elaboración propia | 90 |

| | |
|--|-----|
| Imagen 146. Armado inicial pantalla 01. Fuente: elaboración propia | 90 |
| Imagen 147. F22 acotados según la máxima tracción y compresión. Fuente: elaboración propia | 91 |
| Imagen 148. Section cut en el dintel pantalla 01 armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 91 |
| Imagen 149. F11 acotados según la máxima tracción y compresión. Fuente: elaboración propia | 92 |
| Imagen 150. Momentos y cortantes últimos en pantalla 01. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 92 |
| Imagen 151. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos. Fuente: elaboración propia | 92 |
| Imagen 152. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos. Fuente: elaboración propia | 93 |
| Imagen 153. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos. Fuente: elaboración propia | 93 |
| Imagen 154. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos. Fuente: elaboración propia | 93 |
| Imagen 155. Rearmado de la sección en los extremos de la pantalla 01. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 94 |
| Imagen 156. Captura SAP2000: M11 con refuerzo de la sección. Fuente: elaboración propia | 94 |
| Imagen 157. Captura SAP2000: V13 con refuerzo de la sección. Fuente: elaboración propia | 95 |
| Imagen 158. Captura SAP2000: M22 con refuerzo de la sección. Fuente: elaboración propia | 95 |
| Imagen 159. Captura SAP2000: V23 con refuerzo de la sección. Fuente: elaboración propia | 95 |
| Imagen 160. Captura SAP2000: Section Cut para V13 con barras de refuerzo horizontales. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 96 |
| Imagen 161. Captura SAP2000: Section Cut para V23 con barras de refuerzo verticales. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 96 |
| Imagen 162. Captura SAP2000: Section Cut para V23 con barras de refuerzo verticales. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 97 |
| Imagen 163. Características constructivas pantalla 02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 97 |
| Imagen 164. Armado 1 pantalla 02. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 98 |
| Imagen 165. F11 acotados según la máxima tracción y compresión en pantalla 02; armado 1. Fuente: elaboración propia | 98 |
| Imagen 166. F22 acotados según la máxima tracción y compresión en pantalla 02; armado 1. Fuente: elaboración propia | 98 |
| Imagen 167. Captura SAP2000: Section Cut del dintel en pantalla 02; armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 99 |
| Imagen 168. Momentos y cortantes últimos en pantalla 02 para armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 99 |
| Imagen 169. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos; armado 1. Fuente: elaboración propia | 99 |
| Imagen 170. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos; armado 1. Fuente: elaboración propia | 100 |

| | |
|--|-----|
| Imagen 171. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos; armado 1. Fuente: elaboración propia | 100 |
| Imagen 172. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos; armado 1. Fuente: elaboración propia | 100 |
| Imagen 173. Momentos y cortantes últimos en pantalla 02 para armado 2. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 101 |
| Imagen 174. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos; armado 2. Fuente: elaboración propia | 101 |
| Imagen 175. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos; armado 2. Fuente: elaboración propia | 101 |
| Imagen 176. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos; armado 2. Fuente: elaboración propia | 102 |
| Imagen 177. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos; armado 2. Fuente: elaboración propia | 102 |
| Imagen 178. Momentos y cortantes últimos en pantalla 02 para armado 3. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 102 |
| Imagen 179. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos; armado 3. Fuente: elaboración propia | 103 |
| Imagen 180. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos; armado 3. Fuente: elaboración propia | 103 |
| Imagen 181. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos; armado 3. Fuente: elaboración propia | 103 |
| Imagen 182. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos; armado 3. Fuente: elaboración propia | 104 |
| Imagen 183. Características constructivas pantalla 03. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 104 |
| Imagen 184. Momentos y cortantes últimos en pantalla 03; armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 105 |
| Imagen 185. F11 acotados según la máxima tracción y compresión en pantalla 02. Fuente: elaboración propia | 105 |
| Imagen 186. F22 acotados según la máxima tracción y compresión en pantalla 02. Fuente: elaboración propia | 105 |
| Imagen 187. Momentos y cortantes últimos en pantalla 03 para armado 1. Fuente: elaboración propia a partir de documentación aportada por David Gallardo Llopis | 106 |
| Imagen 188. Captura SAP2000: M11 acotado con momentos últimos. Fuente: elaboración propia | 106 |
| Imagen 189. Captura SAP2000: M22 acotado con momentos últimos. Fuente: elaboración propia | 106 |
| Imagen 190. Captura SAP2000: V13 acotado con cortantes últimos. Fuente: elaboración propia | 107 |
| Imagen 191. Captura SAP2000: V23 acotado con cortantes últimos. Fuente: elaboración propia | 107 |

Listado de tablas

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Propiedades de los materiales empleados. Fuente: elaboración propia | 40 |
| Tabla 2. Secciones de barras y 3Dcaras: dimensiones y materialidad. Fuente: elaboración propia | 41 |
| Tabla 3. Cargas superficiales en planta de vivienda. Fuente: elaboración propia | 45 |
| Tabla 4. Cargas superficiales en plantas técnicas. Fuente: elaboración propia | 45 |
| Tabla 5. Tabla 3.4 del CTE-BDSE-AE | 48 |
| Tabla 6. Cargas permanentes y variables aplicadas a la estructura. Fuente: elaboración propia | 50 |
| Tabla 7. Desplome total de la estructura. Fuente: elaboración propia | 56 |
| Tabla 8. Desplome local de la estructura. Fuente: elaboración propia | 57 |
| Tabla 9. Integridad constructiva para desplazamientos verticales. Fuente: elaboración propia | 61 |
| Tabla 10. Confort de los usuarios para desplazamientos verticales. Fuente: elaboración propia | 63 |
| Tabla 11. Apariencia de la obra para desplazamientos verticales. Fuente: elaboración propia | 65 |
| Tabla 12. Esfuerzos comprobación ELU pilar 01. Fuente: elaboración propia | 67 |
| Tabla 13. Limitaciones geométrica y mecánicas de los pilares. Fuente: elaboración propia a partir de EHE-08 | 67 |
| Tabla 14. Limitaciones del primer esquema de armado en pilar 01. Fuente: elaboración propia | 68 |
| Tabla 15. Limitaciones del segundo esquema de armado en pilar 01. Fuente: elaboración propia | 69 |
| Tabla 16. Esfuerzos comprobación ELU pilar 02. Fuente: elaboración propia. | 70 |
| Tabla 17. Limitaciones del primer esquema de armado en pilar 02. Fuente: elaboración propia | 71 |
| Tabla 18. Esfuerzos comprobación ELU pilar 03. Fuente: elaboración propia | 72 |
| Tabla 19. Limitaciones del primer esquema de armado en pilar 03. Fuente: elaboración propia | 73 |
| Tabla 20. Limitaciones del primer esquema de armado en pilar 03. Fuente: elaboración propia | 74 |
| Tabla 21. Captura SAP2000: Zonas de refuerzo en el eje 1. Fuente: elaboración propia | 86 |
| Tabla 22. Orden de esfuerzos máximos en la pantalla 01. Fuente: elaboración propia | 94 |
| Tabla 23. Armado final pantalla 01. Fuente: elaboración propia | 97 |
| Tabla 24. Armado final pantalla 02. Fuente: elaboración propia | 104 |