



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA
SUPERIOR
D'ARQUITECTURA

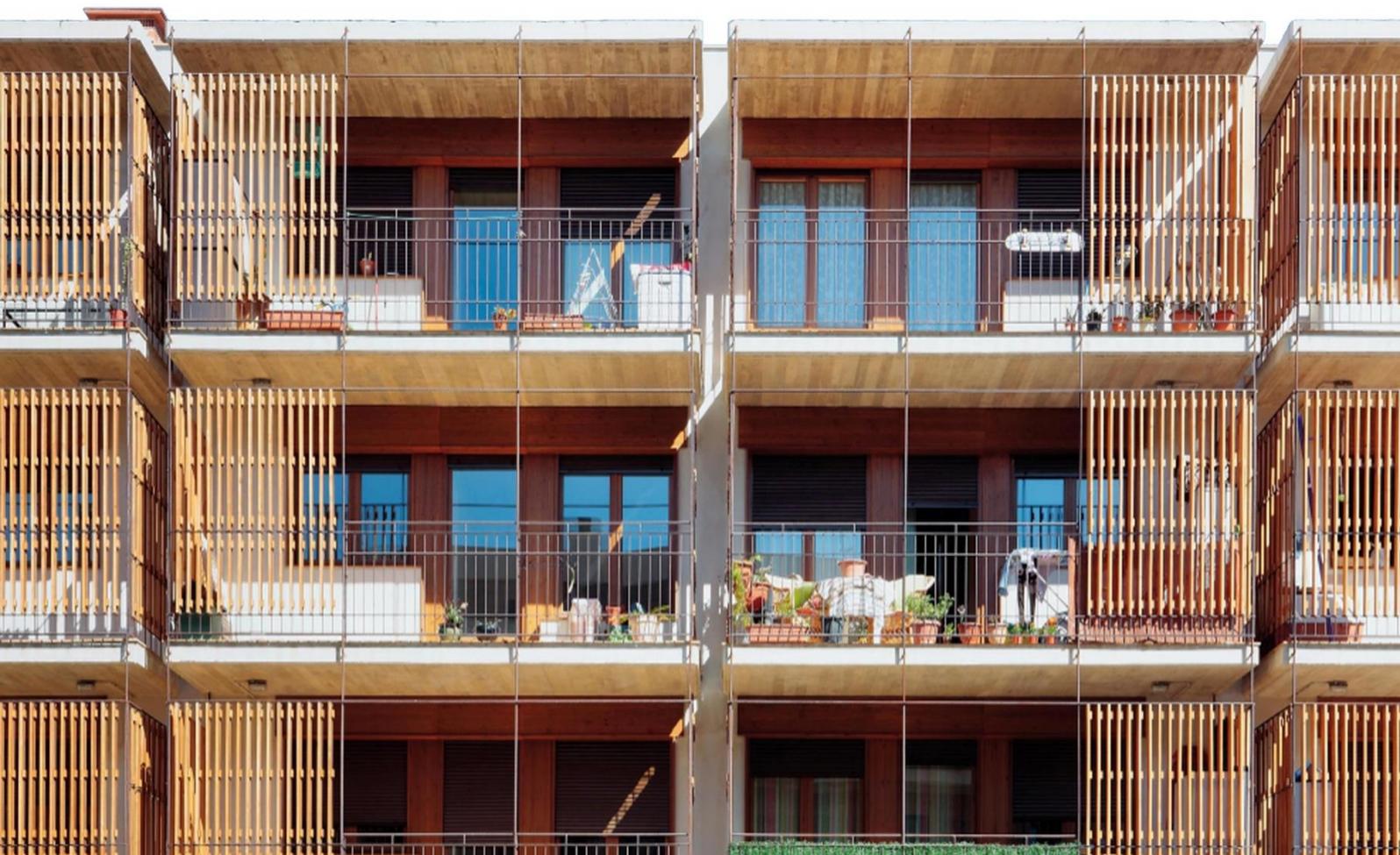
ESTUDIO DE ALTERNATIVAS PARA LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO RESIDENCIAL

Titulación: Grado en Fundamentos de la Arquitectura

Curso: 2020-2021

Alumno: Prats Chuliá, Ana

Tutor: De Mazarredo Aznar, Luis María



Resumen

La búsqueda del modelo estructural ideal es esencial a la hora de emprender un proyecto de arquitectura; no únicamente para obtener la optimización económica del mismo, sino también para la aplicación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible marcados por la agenda 2030. Es imprescindible introducir estas premisas en el sector de la construcción; uno de los más contaminantes a nivel global.

El presente trabajo desarrolla el análisis de tres modelos estructurales para un mismo proyecto de edificio residencial, con la intención de obtener, de entre ellos, el modelo óptimo en lo que respecta a economía y sostenibilidad. Para ello se ha seleccionado el edificio 80 Viviendas Sociales en Salou del arquitecto Toni Gironés, diseñado con la ecología, el aprovechamiento de recursos naturales y la optimización económica como bases.

Para obtener una comparación verídica y provechosa entre los modelos planteados, se ha utilizado Angle: un software de cálculo de estructuras que emplea el método de elementos finitos desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia.

Palabras clave: sostenibilidad, modelo estructural, vivienda social, optimización de recursos, cálculo estructural, análisis estructural

Índice

1_Introducción: Optimización Estructural y Sostenibilidad	(pág. 4)
2_Objetivos	(pág. 5)
3_Metodología	(pág. 5-6)
4_El edificio	(pág. 7-15)
4.1_Justificación de la elección	(pág. 7)
4.2_Organización general	(pág. 8-9)
4.3_La vivienda	(pág. 10)
4.4_Aproximación constructiva	(pág. 11-13)
4.5_Análisis de la estructura	(pág. 14-15)
5_Definición de la herramienta: Angle	(pág. 16)
6_Modelos estructurales	(pág. 17-34)
6.1_Modelo 1: Losa	(pág. 17-22)
6.1.1_Justificación del diseño	(pág. 17-18)
6.1.2_Plantas estructurales	(pág. 19-20)
6.1.3_Modelado	(pág. 21-22)
6.2_Modelo 2: Vigas planas	(pág. 23-28)
6.2.1_Justificación del diseño	(pág. 23)
6.2.2_Plantas estructurales	(pág. 24-25)
6.2.3_Modelado	(pág. 26-28)
6.3_Modelo 3: Vigas de canto	(pág. 29-34)
6.3.1_Justificación del diseño	(pág. 29)
6.3.2_Plantas estructurales	(pág. 30-31)
6.3.3_Modelado	(pág. 32-34)
7_Hipótesis de cálculo	(pág. 35-36)
8_Modelos de cálculo: dimensionado y mediciones	(pág. 37-46)
8.1_Armado modelo 1: Losa	(pág. 37-39)
8.2_Armado modelo 2: Vigas planas	(pág. 40-43)
8.3_Armado modelo 3: Vigas de canto	(pág. 44-46)
9_Comparación de los modelos	(pág. 47-51)
9.1_Presupuesto modelo 1: Losa	(pág. 47-48)
9.2_Presupuesto modelo 2: Vigas planas	(pág. 48-49)
9.3_Presupuesto modelo 3: Vigas de canto	(pág. 49-51)
10_Conclusión	(pág. 51-52)
11_Bibliografía	(pág. 53-54)

1_Introducción: Optimización estructural y Sostenibilidad

La presente memoria es el fruto del estudio de la estructura de un edificio residencial, el planteamiento de otras posibles soluciones estructurales para el mismo y la obtención de datos que resulten determinantes para la elección de la estructura de un edificio de similares características en la práctica. Para ello se ha seleccionado el edificio de 80 Viviendas Sociales en Salou (2007-2009) del arquitecto Toni Gironés; proyecto considerado como ejemplar en su tipología por diversas publicaciones de arquitectura de España en los últimos años.

El análisis de optimización estructural de cualquier edificio tiene como objetivo reducir al máximo posible los recursos empleados y el coste de una estructura, garantizando las condiciones de rigidez y estabilidad necesarias para las cargas a las que está sometido.

Parece, pues, razonable destinar el análisis de este trabajo a un proyecto de viviendas sociales en el que la de optimización de recursos resulta imprescindible para fomentar el derecho de las personas a una vivienda adecuada, establecido por la ONU.

Además de la reducción del coste, la optimización de recursos en la construcción de un edificio lleva implícita la búsqueda de la sostenibilidad y la preocupación medioambiental. El principal objetivo del desarrollo sostenible de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer a las generaciones futuras es una preocupación que invade, hoy en día, todos los campos de la actividad económica. Según Ávila y Sánchez-Carratalá (2012)¹, la construcción es un sector que, generalmente, provoca un gran impacto ambiental y un gran uso de energía y recursos materiales.

En los últimos años ha aumentado considerablemente la preocupación por la sostenibilidad en la edificación. Según Merino-Thomas (2008)², esta cuestión se ve reflejada en el aumento de exigencias de los reglamentos técnicos oficiales en cuanto a aislamiento térmico, disminución de demanda energética, eficiencia energética, seguridad durante la ejecución, durabilidad de las estructuras y los elementos constructivos y sostenibilidad en el diseño y ejecución. Desde la fase de diseño de cualquier proyecto, es responsabilidad del arquitecto proyectista de la estructura la búsqueda de la sostenibilidad y optimización de recursos.

¹Ávila, A., & Sánchez-Carratalá, C. R. (2012). La optimización en el proyecto estructural de edificios de gran altura como herramienta para la sostenibilidad. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia.

²Merino Thomas, J. M. Dpto. de Calidad, CEMEX ESPAÑA, S.A. (2008). El Hormigón estructural y la sostenibilidad. Los índices ICES e ISMA de la EHE-08 desde el punto de vista del fabricante de hormigón preparado y de prefabricados de hormigón.

2_Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Final de Grado es concluir en la estructura óptima para el edificio seleccionado. Para ello se plantean una serie de objetivos secundarios:

- El análisis del proyecto y su estructura.
- El planteamiento de dos soluciones estructurales aptas, además de la solución real del proyecto.
- El modelado de las tres estructuras a través de la herramienta Angle, que permite comprobar su validez.
- La obtención de datos concluyentes: deformaciones, armado, mediciones, etc.
- La determinación del modelo más adecuado siguiendo los criterios de optimización estructural y sostenibilidad.

3_Metodología

La metodología concreta empleada para el desarrollo del trabajo se puede agrupar en los siguientes procesos, llevados a cabo cronológicamente:

- Búsqueda de información sobre la optimización estructural y los métodos más empleados en el mundo profesional.
- Búsqueda y valoración de proyectos de edificios residenciales que puedan resultar favorables para el planteamiento de diferentes modelos estructurales.
- Estudio del edificio seleccionado: concepción de su estructura y análisis de determinaciones principales del proyecto para el planteamiento de otras soluciones estructurales.
- Aprendizaje para la utilización del programa Angle.
- Modelado de la estructura de pilares y losa bidireccional del edificio con AutoCAD 3D y el plugin de Angle.
- Aplicación en el programa de las cargas a las que está sometido el edificio, previa consulta del Documento Básico de Seguridad

Estructural y Acciones en la Edificación (DB-SE-AE) del Código Técnico de la Edificación (CTE).

- Búsqueda de otras tipologías estructurales comunes en edificios residenciales de similares características.
- Predimensionado y modelado de dos estructuras compatibles con el proyecto: una de forjados unidireccionales y vigas planas y otra de forjados unidireccionales y vigas de canto.
- Redimensionado de los modelos a través del programa Angle para que cumplan las condiciones de resistencia, estabilidad y limitación de deformaciones del CTE y la EHE-08.
- Elaboración de plantas estructurales de cada uno de los modelos.
- Consulta de deformaciones máximas en puntos críticos de cada estructura y comparación.
- Armado de las tres estructuras y obtención de planos de ejecución pormenorizados.
- Medición total de acero y hormigón en las vigas, losas, muros y cimentaciones de las tres alternativas.
- Análisis de los datos obtenidos y comparación.
- Determinación del modelo estructural óptimo.

4_El edificio y su arquitecto



Toni Gironés (Badalona, 1965) es doctor arquitecto por la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés. Ha sido profesor de proyectos en la ETSA Vallés y jefe de estudios y profesor de la Escuela de Arquitectura de Reus. En 1992 estableció su estudio en Badalona y desde entonces su labor ha sido reconocida con numerosos premios nacionales e internacionales de arquitectura.

80 Viviendas Sociales en Salou es un edificio de viviendas de protección pública proyectado por Toni Gironés y construido entre 2007 y 2009 en Salou, Tarragona.

4.1_Justificación de la elección

Se ha seleccionado este proyecto para el desarrollo del trabajo por la valoración de las siguientes características:



Figuras 1 y 2: fotografías generales

- La organización clara y repetitiva de las viviendas, que permite plantear numerosas soluciones estructurales.
- La intención del arquitecto de establecer la habitabilidad y el usuario como centros del proyecto.
- La búsqueda de la optimización de la obra sin restar a la calidad de los espacios de las viviendas.
- La preocupación por el tratamiento de los espacios comunes y transitorios como elementos esenciales del proyecto.
- El estudiado aprovechamiento climático de los recursos naturales disponibles en el emplazamiento.
- El empleo de materiales económicos y de fácil mantenimiento.

4.2_Organización general



Figura 3: Emplazamiento

Según la revista *El Croquis*³, el edificio se sitúa en el extremo norte del municipio de Salou; una zona de nuevas tramas urbanas y grandes parcelas con edificios aislados que está en contacto con una extensa y consolidada área agrícola.

El proyecto está dividido en dos bloques de viviendas longitudinales dispuestos de forma perpendicular. Cada bloque consta de cinco plantas; una de ellas es un sótano destinado al aparcamiento de vehículos y las otras cuatro albergan 10 viviendas por planta y corredores de acceso. Hay dispuestos un ascensor y dos núcleos de escaleras abiertos por cada edificio.

Un bosque de chopos actúa como filtro entre los edificios y la calle. Este bosque tiene un suave talud natural que se salva con diferentes rampas y pasarelas de acceso. Los garajes tienen iluminación y ventilación natural gracias al retranqueo del muro que contiene el talud. En el interior de la parcela hay una playa de gravas a la que vuelcan las fachadas principales que contienen la mayoría de las terrazas de las viviendas.

³ 80 viviendas sociales en Salou. (2017). *El Croquis*, 189, 230-243.



Figura 4: Planta tipo y sección longitudinal



4.3_La vivienda

Cada una de las viviendas resuelve su programa en el espacio de una única crujía. Están compuestas por una zona de día diáfana con ventilación cruzada desde el corredor hasta la terraza, dos estancias independientes y un baño. Se propone un único tipo de vivienda para optimizar al máximo la obra, pero, a su vez, este tipo busca ser lo más versátil posible. Cada unidad tiene un núcleo de paso de instalaciones central en contacto con las dos zonas húmedas: cocina y baño/lavadero. La utilización de tabiques ligeros, la ausencia de soportes en el interior de la vivienda y la canalización de las instalaciones por un único hueco, la convierte en fácilmente adaptable y transformable en el futuro según las necesidades del usuario.

Se entiende la vivienda como una secuencia transversal de corredor-espacio interior-terraza que es cambiante según las circunstancias del usuario y la climatología. Las características de doble orientación, ventilación cruzada y variedad de espacios abiertos contribuyen a la mejora de la calidad de vida del habitante. El usuario y la habitabilidad están colocados en el centro de todas las decisiones de proyecto por parte del arquitecto.

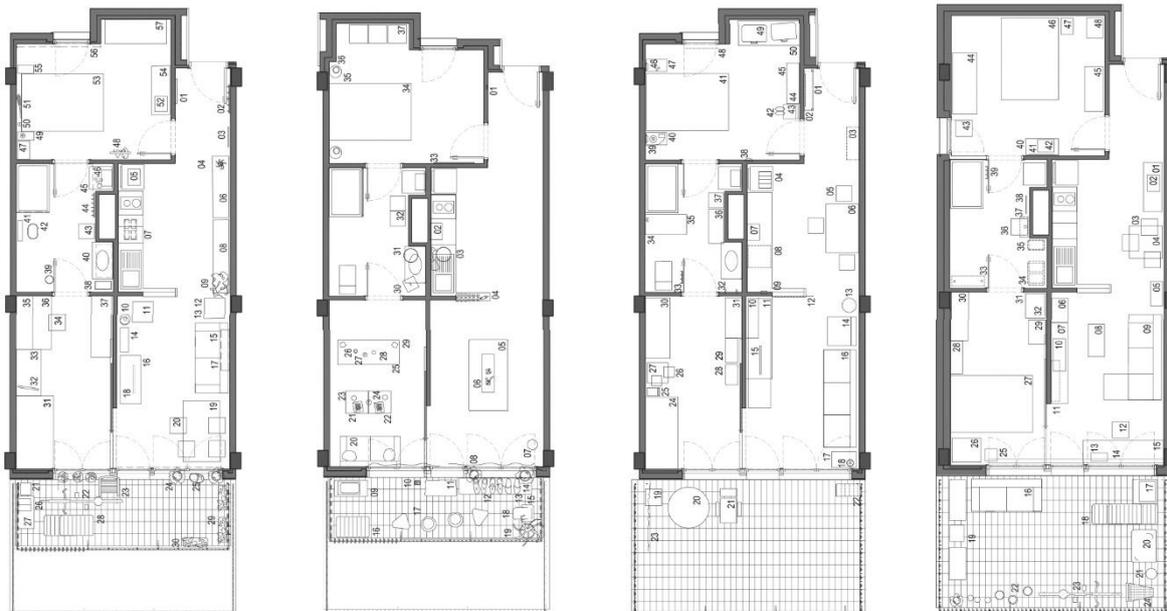


Figura 5: Tipología de vivienda

4.4_Aproximación constructiva



Los corredores son abiertos y situados en las fachadas traseras: a norte en uno de los bloques y a oeste en el otro. Se plantea el corredor no sólo como espacio de paso, si no como lugar de encuentro entre los usuarios y transición suave entre el dominio privado y el público. Es común en los proyectos de Toni Gironés, la reflexión acerca de los espacios comunes, su tratamiento constructivo y su utilidad.

Los corredores constan de huecos en los forjados que establecen un filtro de privacidad entre las ventanas de las viviendas que dan al corredor y el transeúnte. Estos huecos repetidos a nivel de cada planta funcionan como unos patios con corriente vertical ascendente. Gracias a este mecanismo se consigue que las ventanas de las fachadas traseras sean efectivamente útiles para ventilar la vivienda.



Una malla de acero electrosoldada envuelve el corredor para que por ella trepen plantas de hojas caducas. Estas plantas, junto con el bosque de chopos de la parcela, en verano enfrían el aire que atraviesa las viviendas a través de la ventilación cruzada.



Figuras 6, 7 y 8: Fotografías de detalle

Las terrazas tienen unas dimensiones apropiadas para que sean espacios útiles (1,50x5,25m), siendo las de de las viviendas en planta baja más grandes (3,25x5,25). Esta característica, unida a la disposición de las terrazas en las orientaciones sur y este en cada uno de los bloques respectivamente, acrecienta infinitamente la calidad de las viviendas.

Se emplean materiales rotundos y económicos como son las barras de acero corrugado y la madera robinia. Estos materiales no requieren prácticamente mantenimiento por su capacidad para cambiar con el paso del tiempo y estando a la intemperie, sin deteriorarse ni dejar de cumplir su función.

En definitiva, los materiales empleados y los mecanismos climáticos de ventilaciones, doble orientación y aprovechamiento de los recursos naturales convierten al proyecto en un ejemplo de sostenibilidad, preocupación medioambiental y ahorro energético.

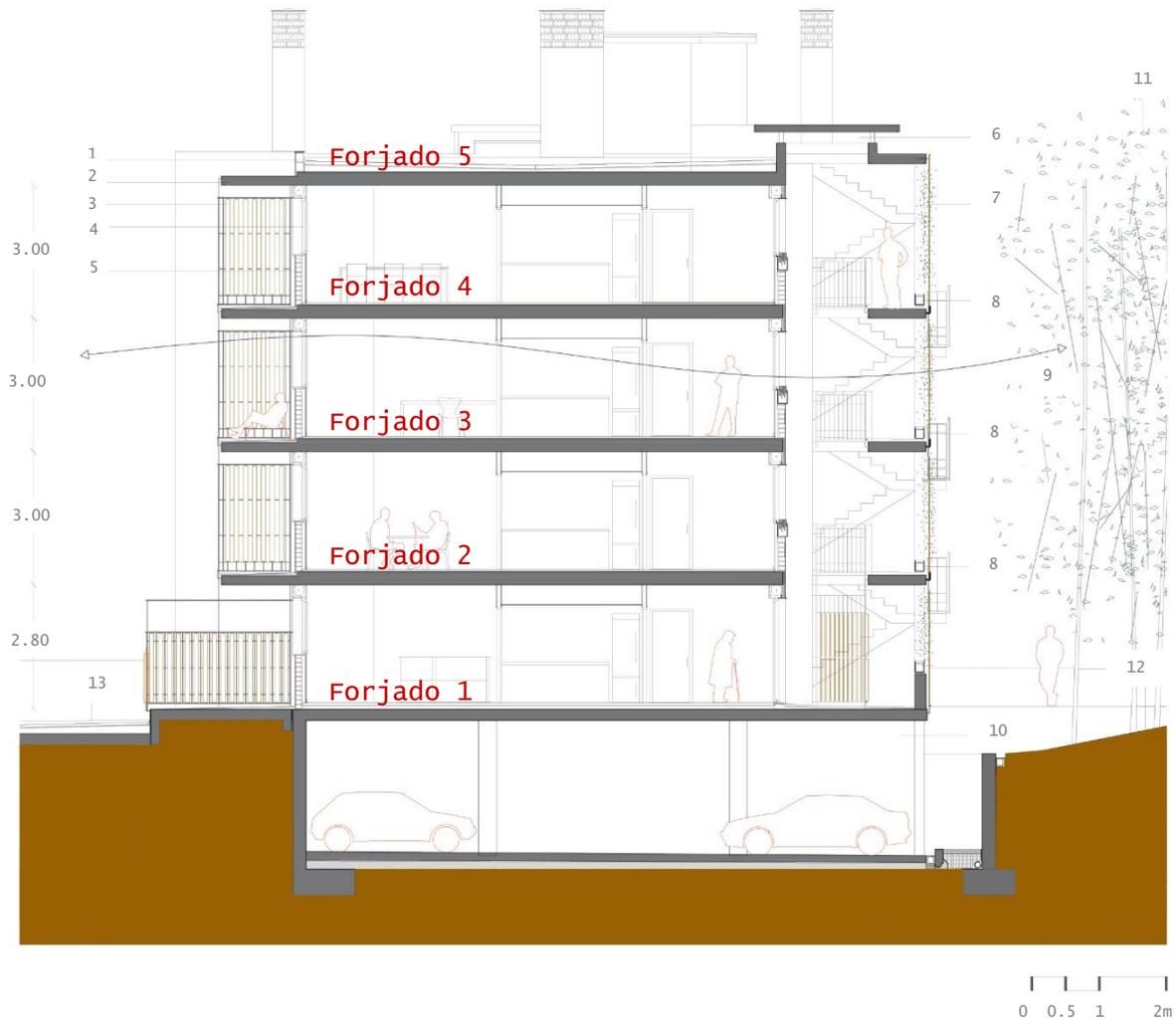


Figura 9: Sección constructiva transversal

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Cubierta invertida 2. Voladizo de hormigón armado 3. Lamas de madera de robinia sobre subestructura de barras de acero corrugado 4. Carpinterías de madera de pino 5. Antepecho de fábrica cerámica 6. Separación de 20cm para provocar corriente vertical (Efecto venturi) | <ol style="list-style-type: none"> 7. Malla de acero electrosoldada 8. Jardinera para plantas trepadoras de hoja caduca 9. Ventilación cruzada 10. Ventilación e iluminación natural en aparcamiento 11. Bosque de chopos 12. Talud plantado con madrelesva 13. Playa de gravas |
|---|--|

4.5_Análisis de la estructura

La estructura del edificio es sencilla y regular. Se trata de una estructura de forjado bidireccional de losa de hormigón armado con combinación de pilares de acero y hormigón armado con crujiás de 5,50m.

La sección de los pilares de hormigón es de 25x40cm y están embebidos en los muros de ladrillo perforado de partición de las viviendas. Cada partición alberga tres pilares separados entre sí 5,60m y 3,85m. En el corredor exterior las crujiás se reducen a la mitad (2,75m) y se emplean perfiles PHR de 180x100x8mm revestidos de una chapa de acero oxidado con tratamiento de protección frente al fuego.

La disposición longitudinal de una vivienda por crujiá y las reducidas luces de la estructura permiten plantear numerosas variaciones y soluciones estructurales que resulten viables para el proyecto. De ahora en adelante, para simplificar el modelado y mediciones se utilizará solo uno de los dos bloques que componen el proyecto (el de la parte este), ya que son prácticamente idénticos.

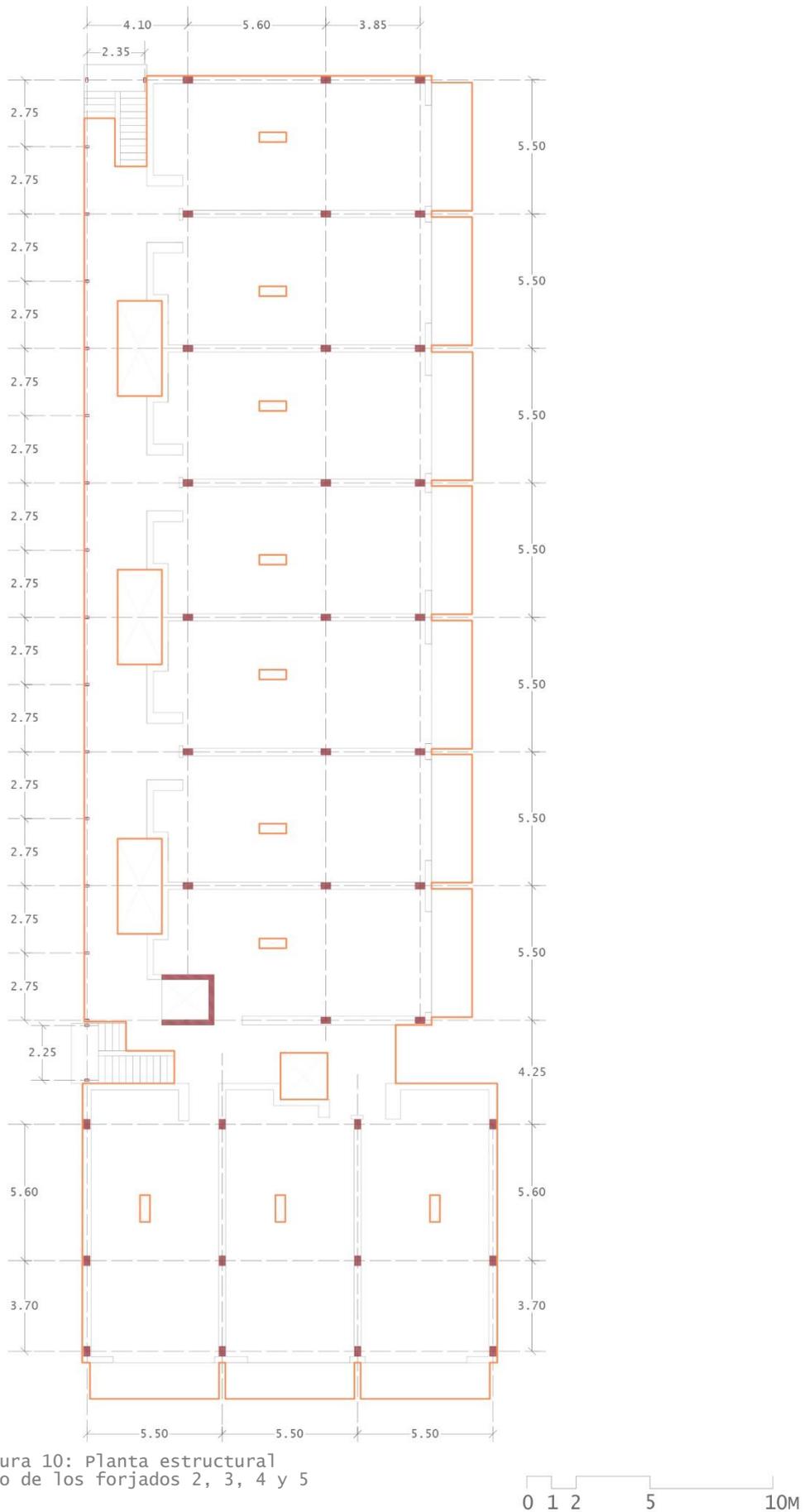


Figura 10: Planta estructural tipo de los forjados 2, 3, 4 y 5

5_Definición de la herramienta: Angle

El programa Angle es un software propio de la Universidad Politécnica de Valencia destinado al cálculo de todo tipo de estructuras en el ámbito de la investigación y la docencia. Emplea el método de elementos finitos para el cálculo estático y dinámico de estructuras de edificación u obra civil. Ha sido desarrollado por el profesor y doctor arquitecto Adolfo Alonso Durá en el Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de las Estructuras.

Las importantes ventajas que ofrece Angle respecto a otros programas de cálculo de estructuras son: su versatilidad (ya que permite calcular estructuras desde las más sencillas hasta las más singulares en una misma interfaz), su rapidez y su eficacia.

El funcionamiento es sencillo. En primer lugar, se diseña y modela la estructura deseada en la interfaz de AutoCAD 3D junto con un plugin de Angle que permite asignar todo tipo de materiales constructivos y secciones a las barras, muros o losas. A continuación, se asignan las cargas repartidas, lineales o puntuales correspondientes ya sean gravitatorias, de viento o de sismo.

Una vez realizado el modelado, se genera un archivo en formato .dxe que se traslada al programa Angle. El programa calcula el armado y comprueba la estructura para que cumpla todas las especificaciones del Código Técnico de Edificación (CTE) y la Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08). Angle realiza, para todas las hipótesis de cálculo, las comprobaciones de resistencia, flexión negativa y positiva, esfuerzo cortante, torsión, flecha, pandeo y pandeo lateral. Si no se satisfacen los requisitos, se puede redimensionar cualquier elemento estructural dentro del mismo programa.

Cuando se ha asumido una estructura definitiva y válida, el programa es capaz de generar planos de ejecución de todos los componentes de la estructura en ficheros de formato .dxf. Estos planos se trasladan a AutoCAD y mediante otro plugin de Angle se puede realizar la medición de todos los materiales presentes en la estructura.

La rapidez y eficacia con la que funciona el software permite comparar con facilidad las alternativas deseadas para cualquier estructura. Facilita la decisión sobre qué estructura asumir definitivamente para el proyecto de forma muy fundamentada; comparando deformaciones y mediciones.

6_Modelos estructurales

A continuación, se presentan las tres alternativas a comparar. Han sido seleccionadas por constituir modelos estructurales comunes en proyectos de bloques residenciales de poca altura y tras haber desechado varios modelos que resultaron ser inválidos o inconvenientes.

6.1_Modelo 1: Losa

6.1.1_Justificación del diseño

En el primer modelo se respeta la disposición, materiales y secciones de los pilares en el proyecto y se asume un forjado de losa bidireccional. De esta manera será posible comprobar si la estructura adoptada en el proyecto original es la óptima o, de haberse empleado otra, se habría obtenido una mayor optimización de recursos.

Se realizó el modelo con losas de tres cantos: 30cm, 25cm y 20cm. Al ser las tres validadas por el programa Angle, se empleó la comparación de flechas entre las tres opciones para adoptar uno de los tres cantos. Para ello se utiliza la visualización de deformación e isovalores que ofrece Angle en la losa del forjado 4 de cada una de las alternativas.

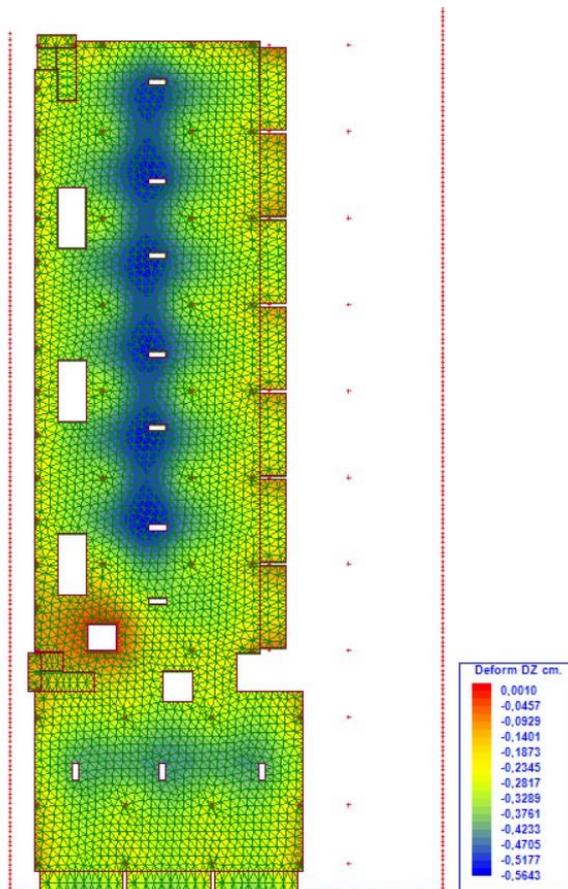


Figura 11: Deformada del forjado 4 para losa de 20cm

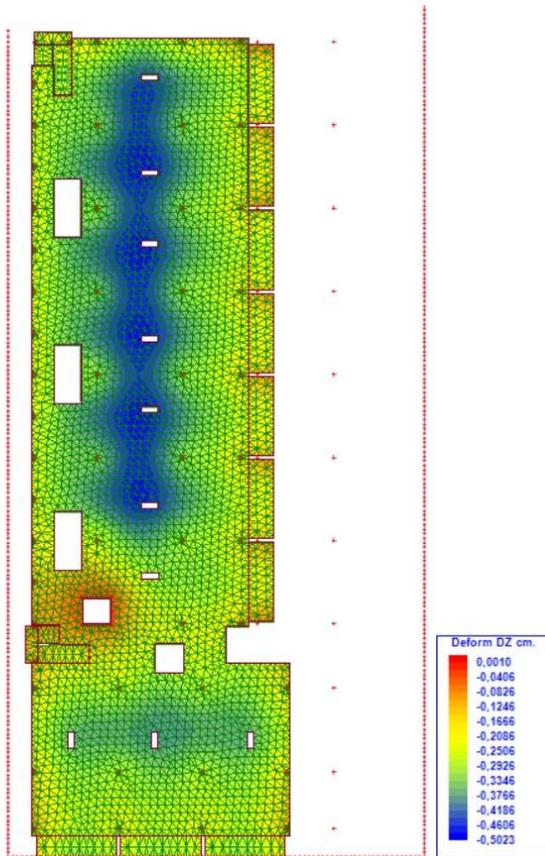


Figura 12: Deformada del forjado 4 para losa de 25cm

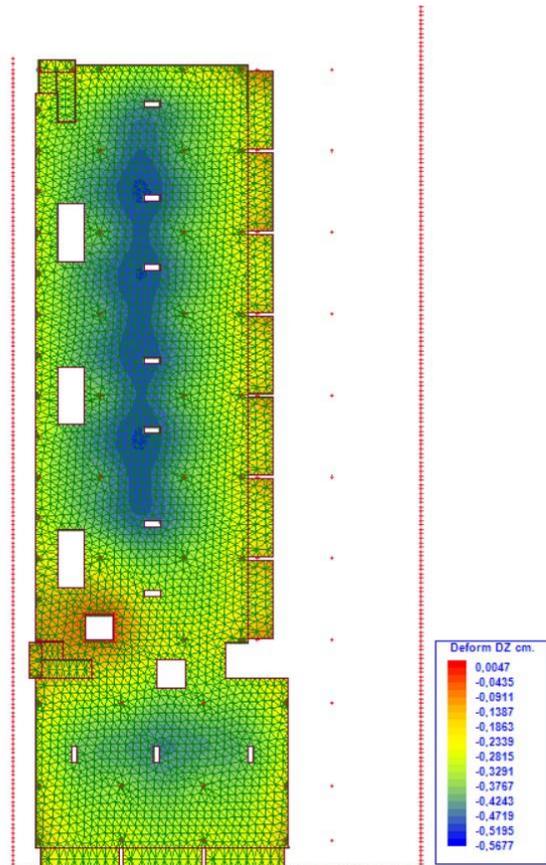


Figura 13: Deformada del forjado 4 para losa de 30cm

Como se puede observar, las deformaciones máximas son similares en los tres casos y las tres resultan válidas. Por ello, se opta por adoptar un canto de 20cm. Adoptar un canto reducido tiene importantes ventajas: se economiza considerablemente el forjado, se obtiene una mayor altura libre y se reduce el peso propio y las cargas sobre los soportes.

En los últimos años, en el ámbito de la edificación en nuestro país, existe una tendencia a emplear forjados bidireccionales de losa maciza en lugar de forjados aligerados. Esto supone múltiples ventajas en cuanto a sostenibilidad y optimización. Las losas resultan más sencillas y rápidas de ejecutar, ya que, al no emplear elementos aligerantes, el encofrado, el cimbrado y el hormigonado se simplifican. Por otro lado, los forjados macizos resultan ser significativamente más duraderos debido a que tienen menor superficie en contacto con la intemperie y no tienen zonas de poco espesor como los nervios de los forjados aligerados. Por último, cabe destacar que las losas cumplen la misma función que un forjado reticular con un menor canto.⁴

⁴ Universidad Politécnica de Cataluña, Marí, A., Ortega, H., Ariel, G., & Sáiz, S. (2002). Recomendaciones para el proyecto y construcción de placas macizas de hormigón "in situ" para forjados.

6.1.2_Plantas estructurales



Figura 14: Planta estructural tipo de los forjados 2, 3, 4 y 5 (Modelo 1)

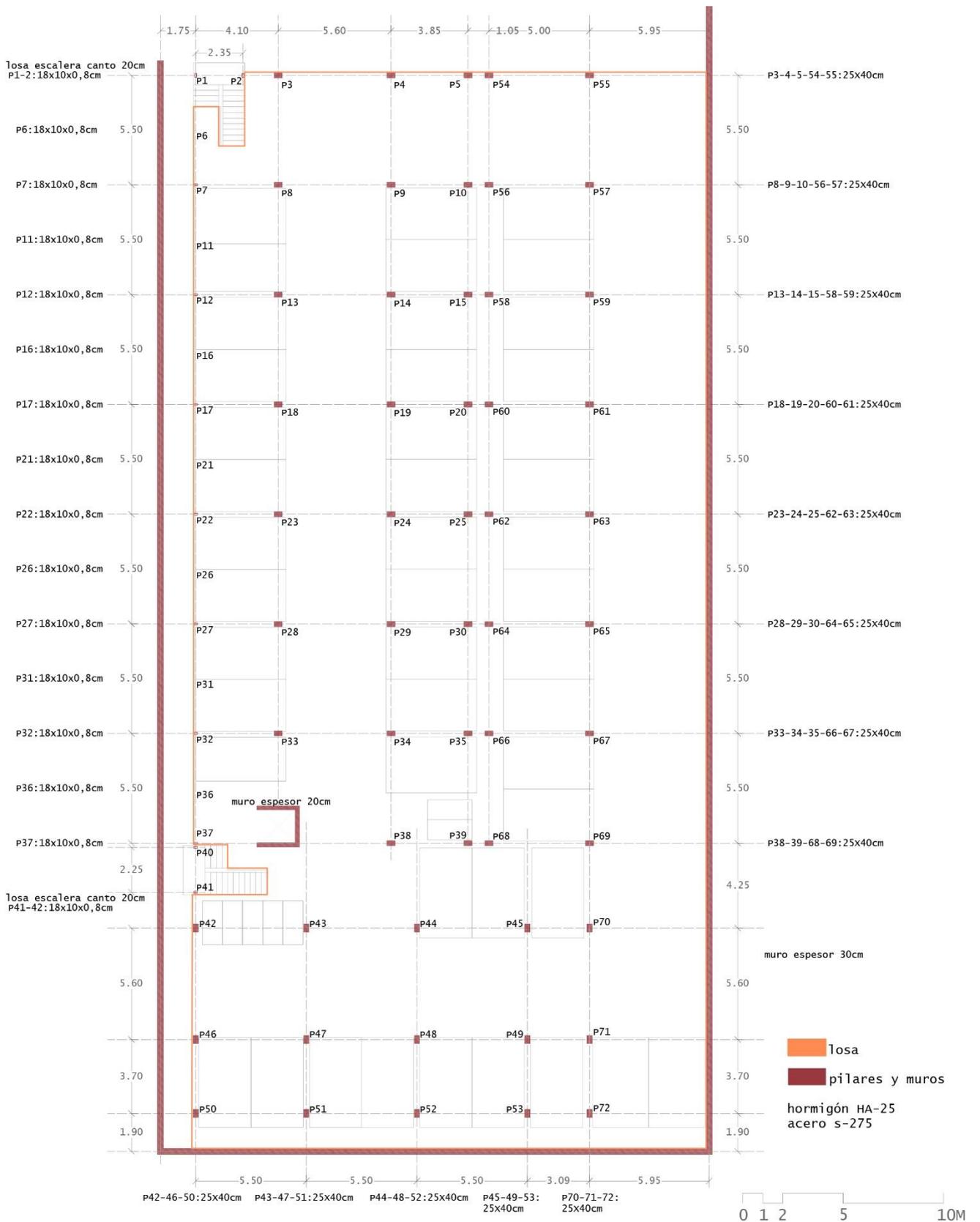


Figura 15: Planta estructural del forjado 1 (Modelo 1)

6.1.3_Modelado

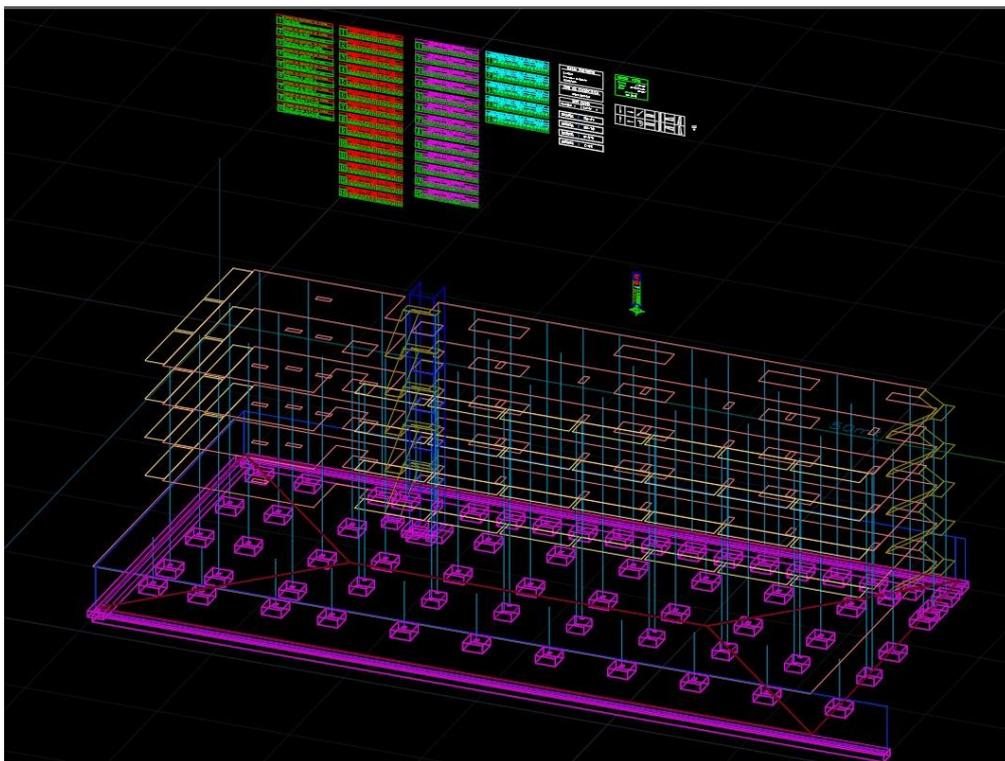


Figura 16: Modelado 1 en AutoCAD

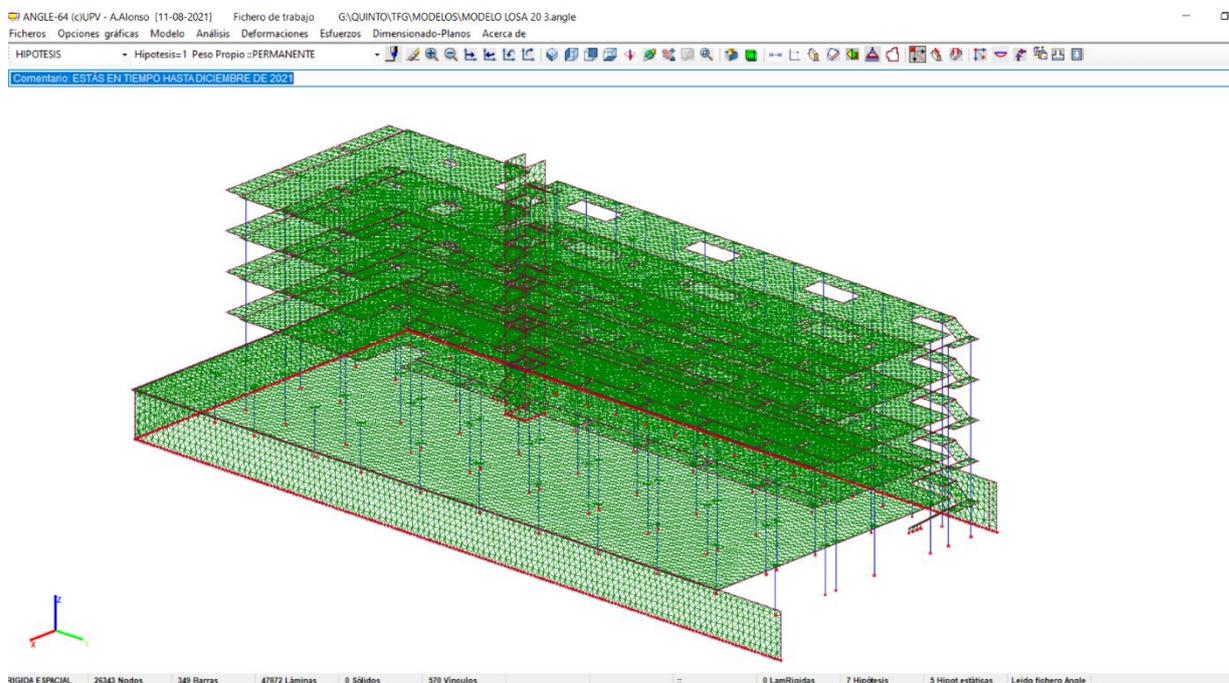


Figura 17: Modelo 1 en Angle

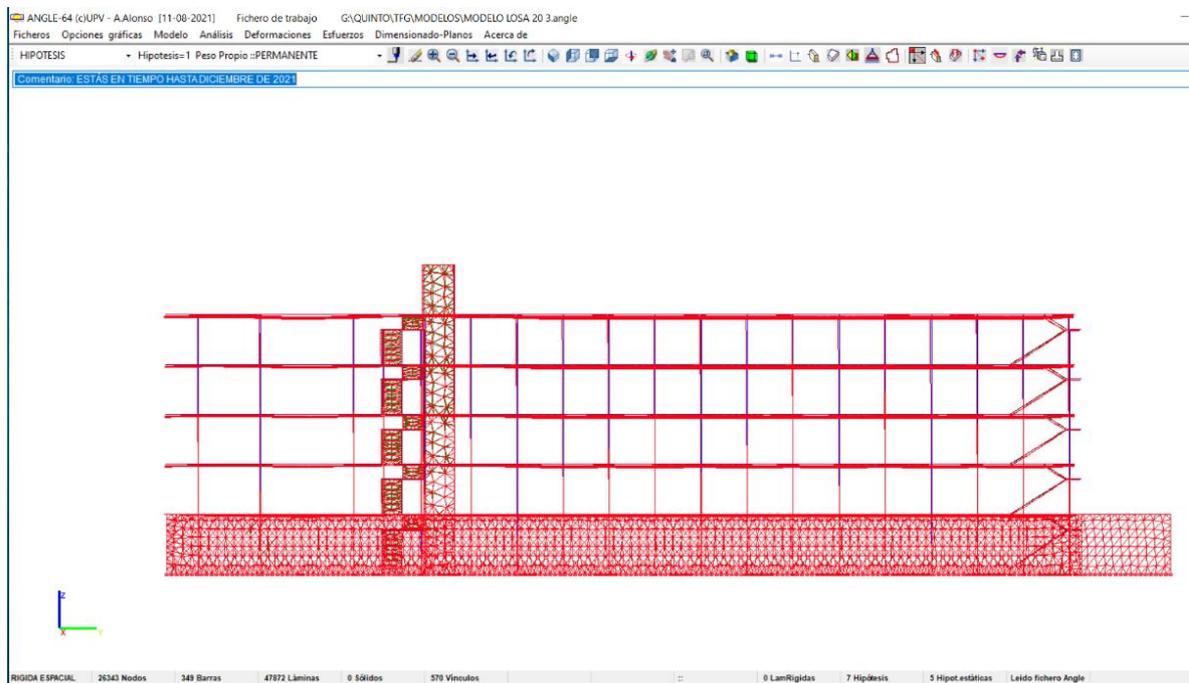


Figura 18: Deformada alzado longitudinal modelo 1

6.2_Modelo 2: Vigas planas

6.2.1_Justificación del diseño

La organización del edificio permite plantear un cambio de forjado a unidireccional sin inconveniente alguno. El segundo modelo de estructura propuesto consiste en forjados unidireccionales con vigas planas de canto 30cm y combinación de pilares de hormigón armado y acero. Se trata de una estructura de pórticos transversales embebidos en las particiones entre viviendas. Debido a que las luces son reducidas, los anchos de las vigas también lo son: 30cm en los corredores y 50 o 40cm en las viviendas.

La disposición y dimensiones de los pilares es la misma que en el proyecto original, pero se añaden algunos soportes que resultan necesarios a raíz del cambio de tipología de forjado. La adición de estos nuevos soportes se ha realizado tratando de evitar cambios significativos en el proyecto. Sin embargo, se detectan unos cambios necesarios que alteran el proyecto moderadamente: los huecos de los forjados de los corredores quedan divididos por el paso de vigas y en el desembarco de las escaleras el ancho libre se reduce ligeramente por la presencia de dos pilares metálicos.

Las ventajas de las estructuras de vigas planas respecto a las de vigas de canto son obvias: aumento de las posibilidades de diseño, facilidad para el paso de instalaciones, uniformidad de la altura libre entre forjados, simplificación del encofrado, etc. En el edificio de 80 viviendas sociales en Salou, en principio, estas ventajas no son tan determinantes como en otros casos ya que los pórticos se sitúan en las particiones y ninguna viga atraviesa las viviendas.

Sin embargo, en las vigas de los corredores sí resulta especialmente conveniente mantener un canto de 30cm que conlleve una altura libre adecuada para una zona común y de paso. Adicionalmente, la utilización de vigas planas en todo el edificio lo convierte en mucho más versátil y aumenta los usos compatibles en el futuro.

6.2.2_Plantas estructurales



Figura 19: Planta estructural tipo de los forjados 2, 3, 4 y 5 (Modelo 2)

6.2.3_Mode1ado

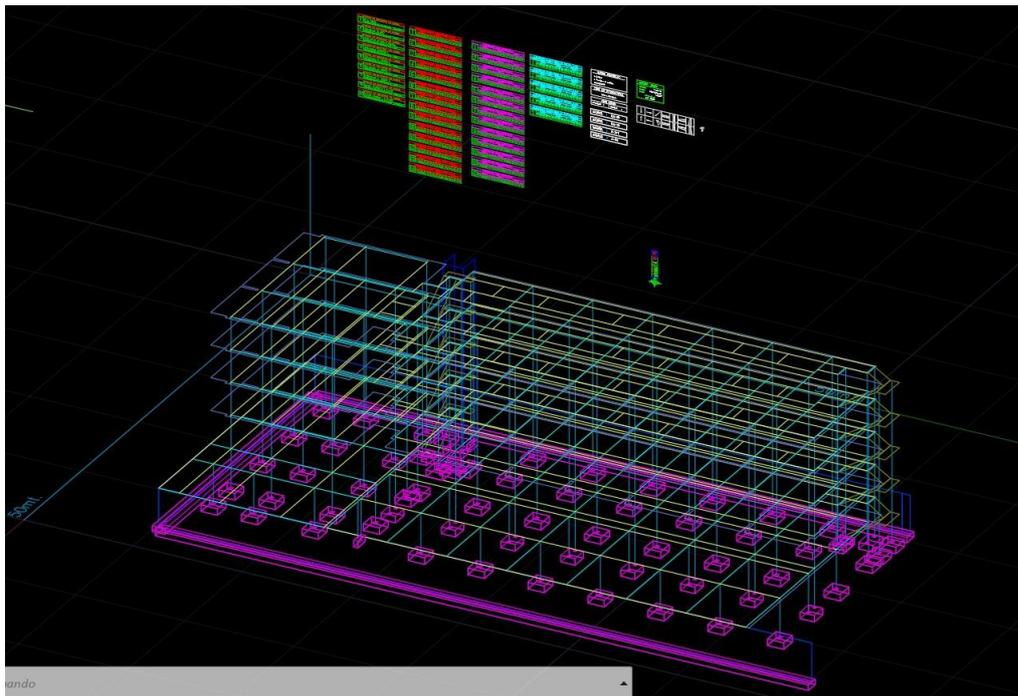


Figura 21: Modelado 2 en AutoCAD

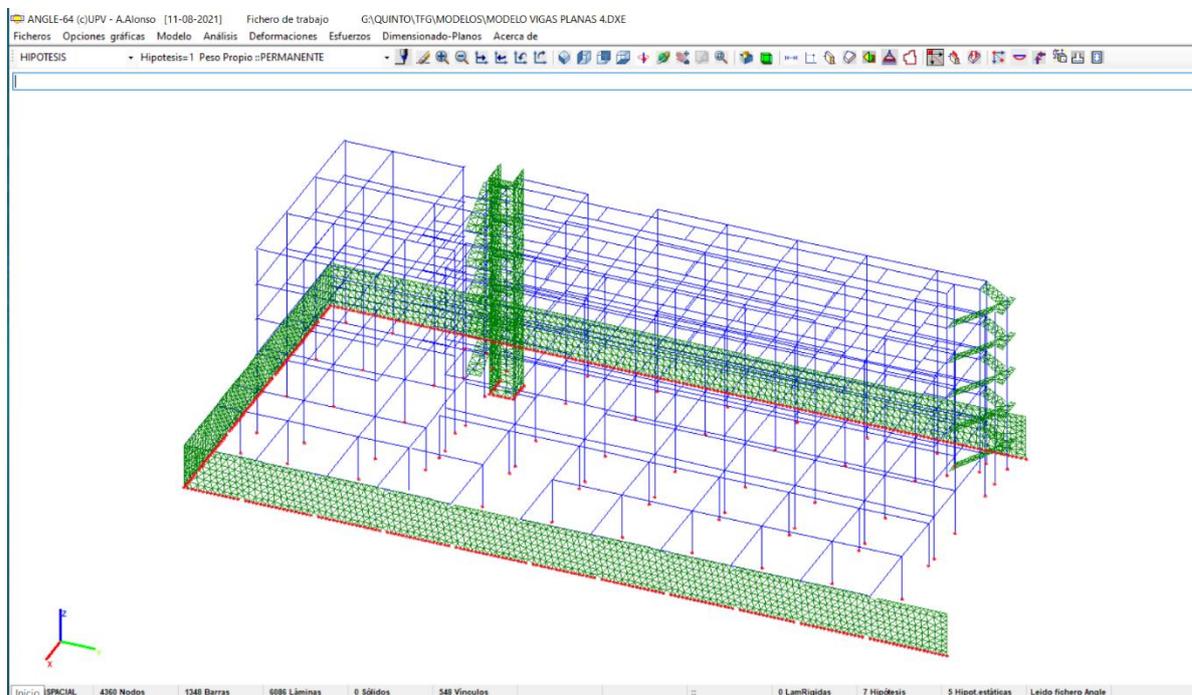


Figura 22: Modelo 2 en Angle

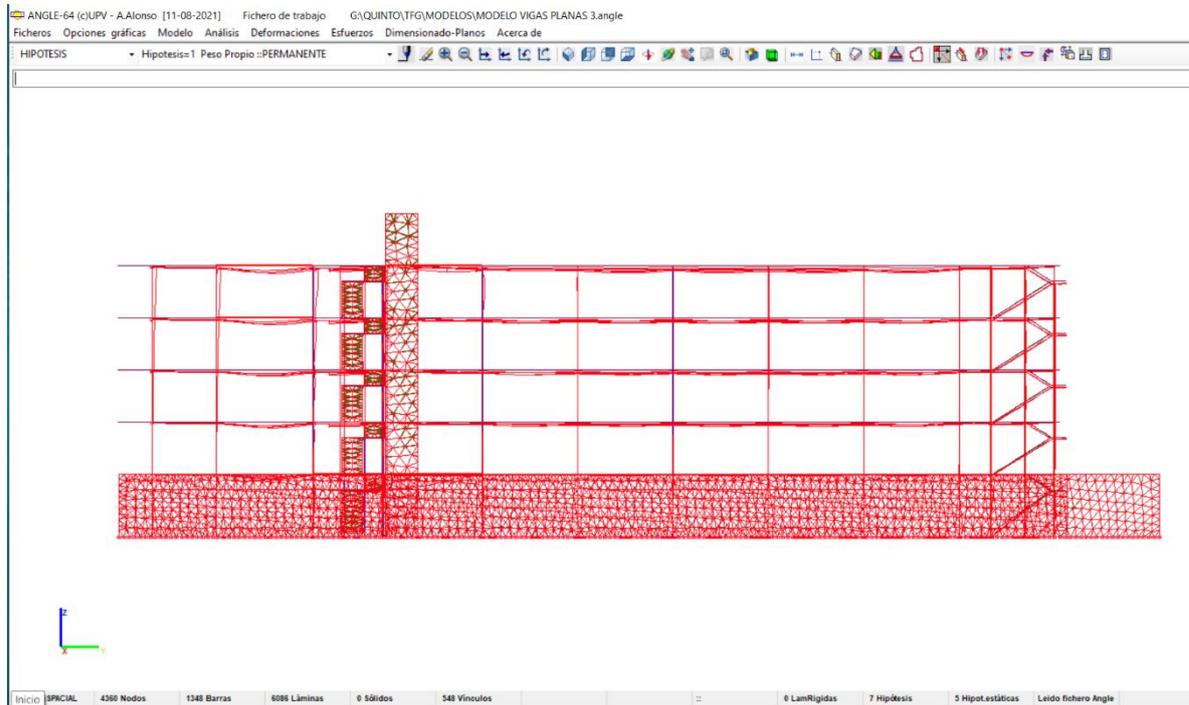


Figura 23: Deformada alzado longitudinal, modelo 2

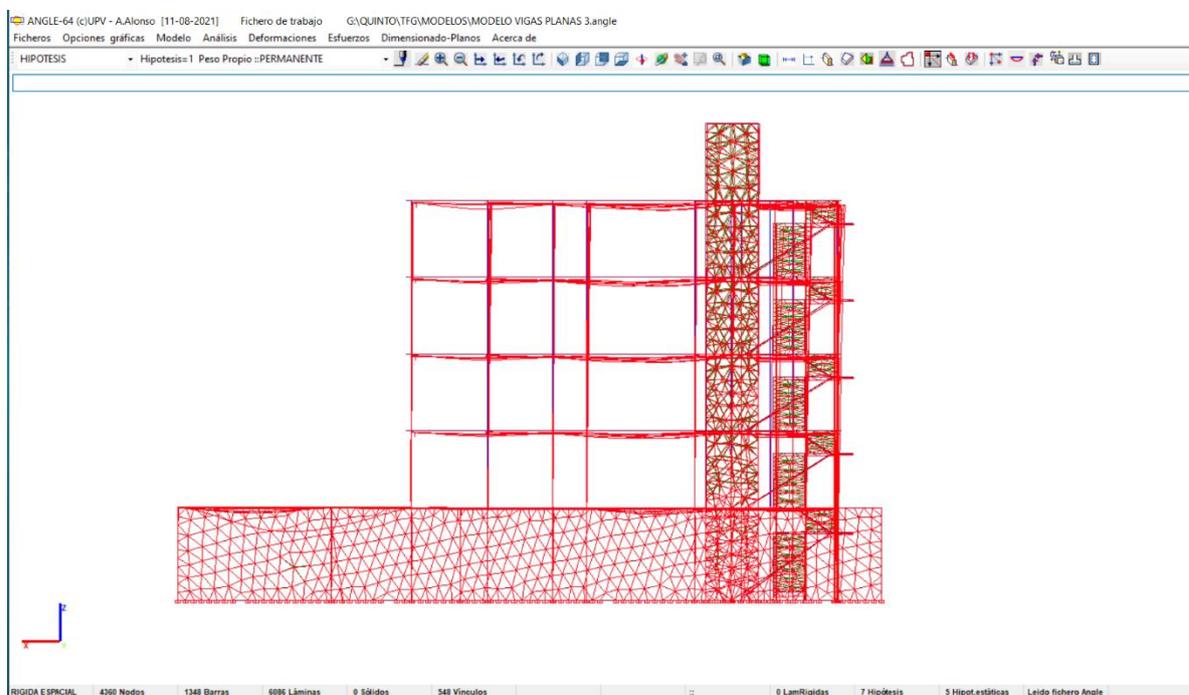


Figura 24: Deformada alzado transversal, modelo 2

Para comparar las flechas de las vigas de los modelos 2 y 3, se observa la flecha de la viga 6 del forjado 4: -0,414cm y una relación flecha/luz de 1/1353

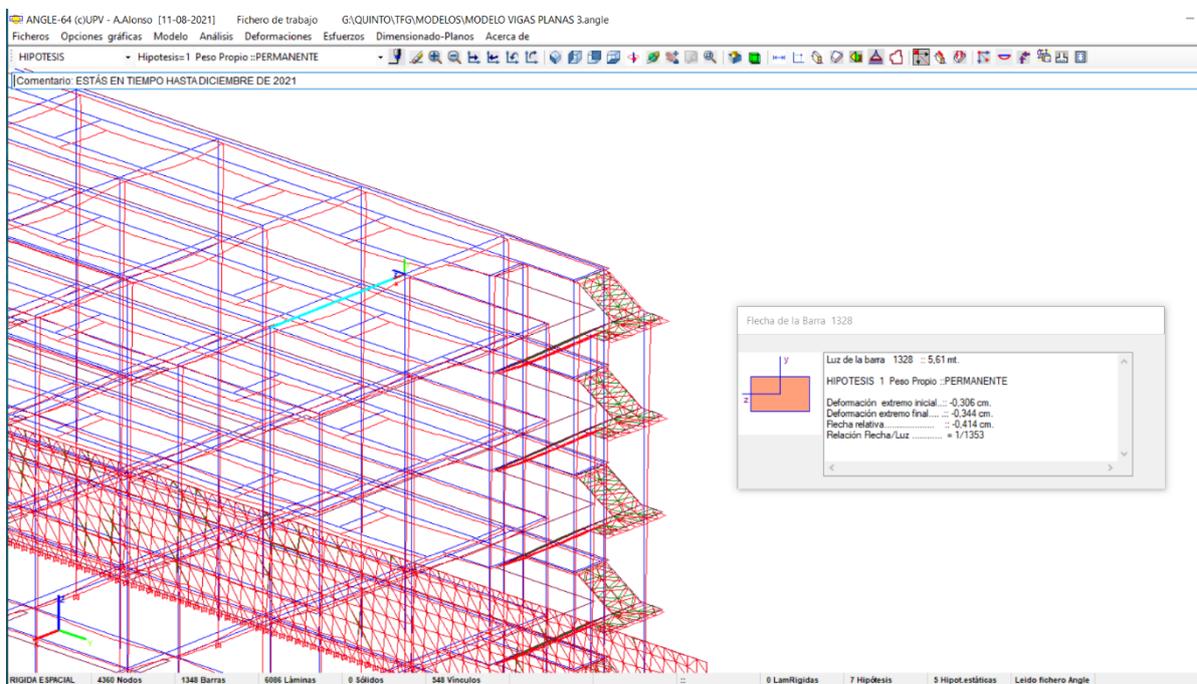


Figura 25: Flecha viga 6, forjado 4, modelo 2

6.3_Modelo 3: Vigas de canto

6.3.1_Justificación del diseño

La utilización de vigas planas en una estructura supone numerosas ventajas, como ya se ha comentado. Sin embargo, según Payá-Zaforteza, González y Yepes (2008) ⁵, también tienen ciertos inconvenientes: sus deformaciones bajo carga son superiores que las de las vigas de canto, suelen requerir de más armado y no resultan efectivas para grandes luces.

En el edificio de estudio de este trabajo, es oportuno el planteamiento de la utilización de pórticos con luces grandes, sin importar un aumento en las secciones de vigas y pilares, debido a la disposición de todas las viviendas en las crujías. El tercer modelo de estructura plantea la utilización de vigas de canto, eliminando una fila de pilares y aumentando las luces. De esta forma, cada partición entre viviendas alberga dos pilares con una luz de 9,40m.

Resultó necesario redimensionar la sección de estos pilares a 25x55cm. Tras haber probado en el programa cantos de 40 y 50cm, se comprueba que los cantos de las vigas necesarias para salvar esta gran luz son de 60 y 50cm. Las luces de los corredores no se han cambiado para poder mantener el canto de 30cm de las vigas que los atraviesan, ya que una altura libre continua de 3m se considera adecuada para un espacio abierto de paso.

Este tercer modelo estructural no condiciona a la versatilidad de las viviendas ni del edificio notablemente. El inconveniente que sí resulta considerable en un edificio de viviendas cuando las vigas descuelgan 30cm del forjado, es la dificultad para el paso de instalaciones. Sin embargo, en el edificio de 80 viviendas sociales en Salou, las instalaciones están correctamente canalizadas por pasos verticales en todas las viviendas.

A través del modelado y dimensionado de esta estructura, se pretende comprobar si las mediciones de acero y hormigón disminuyen respecto a los otros modelos considerablemente tras eliminar una fila de pilares y disponer vigas de canto que requieren menos armado que las planas.

⁵ Payá-Zaforteza, I., González, F., & Yepes, V. (2008). Influencia del empleo de vigas planas y del tipo de hormigón en el diseño óptimo de pórticos de edificación. *Hormigón y Acero*, 247, 99-108.

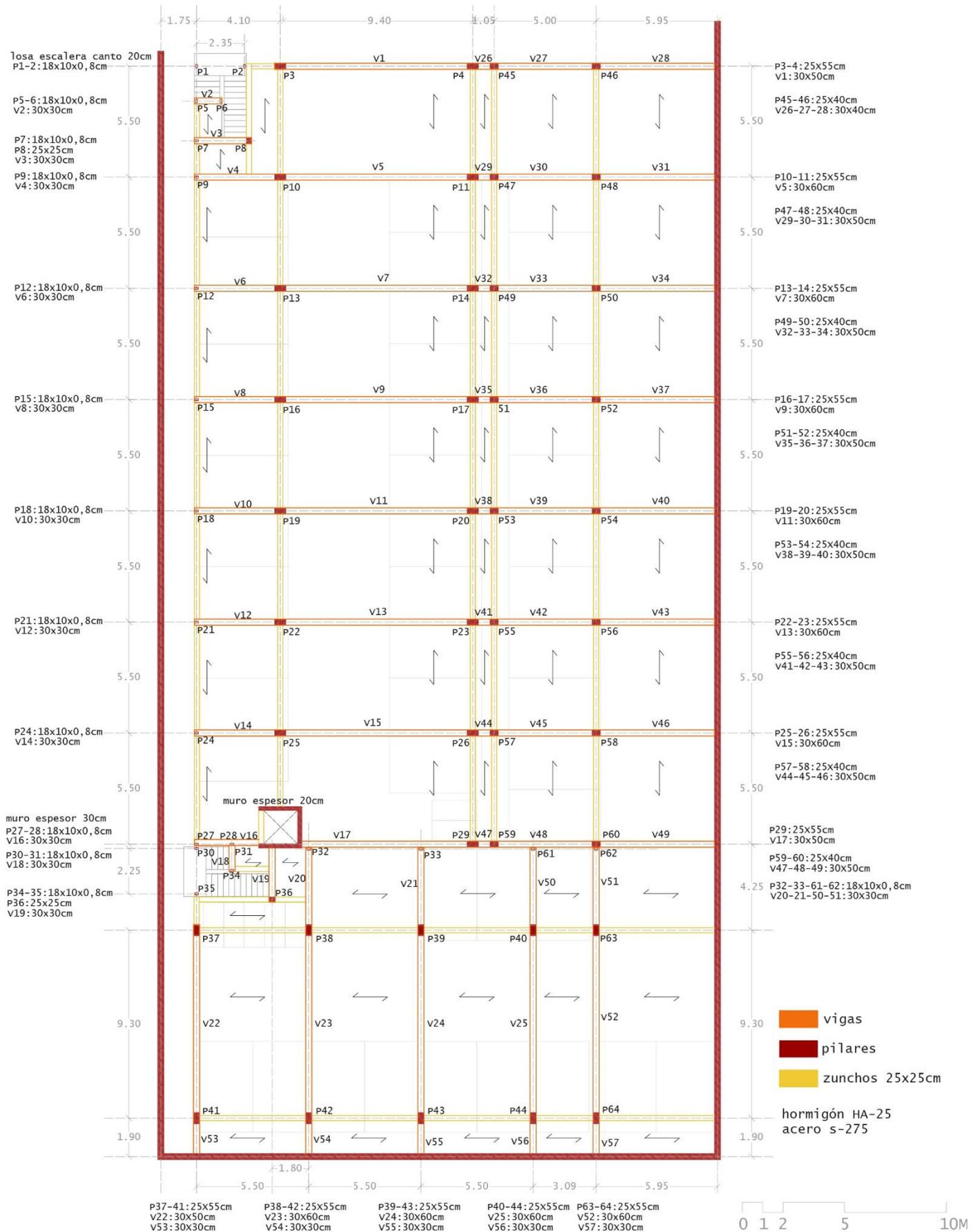


Figura 27: Planta estructural del forjado 1 (Modelo 3)

6.3.3_Modelado

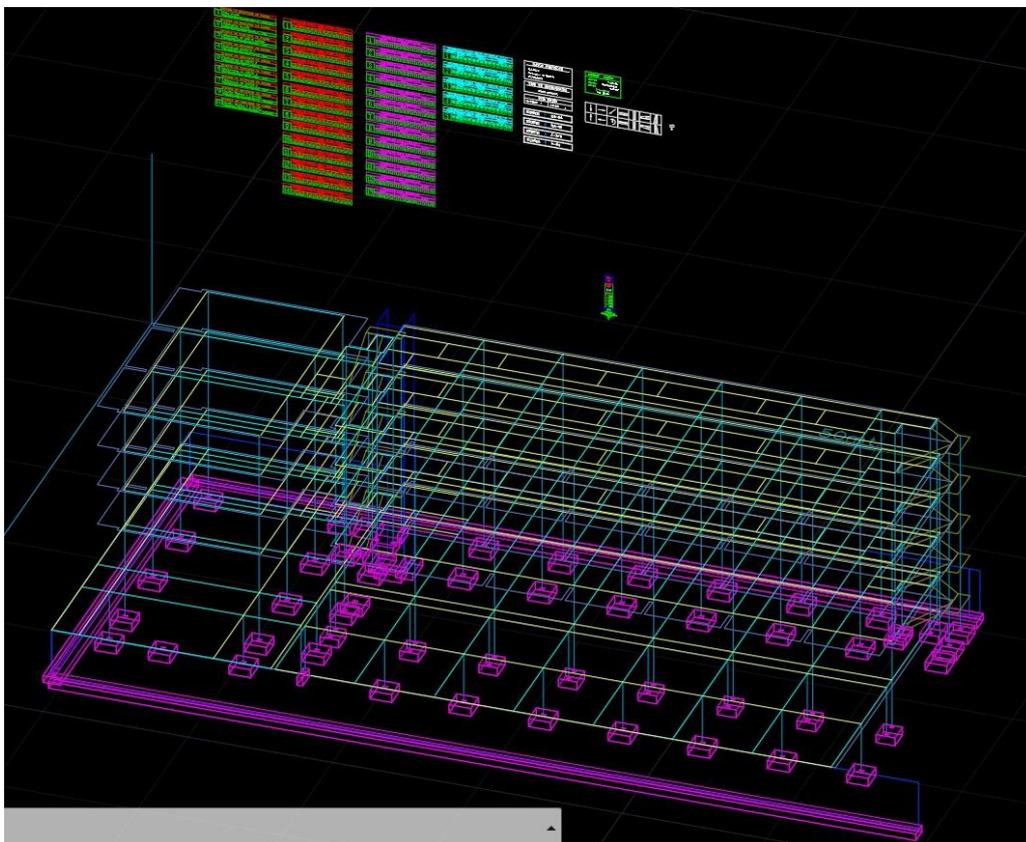
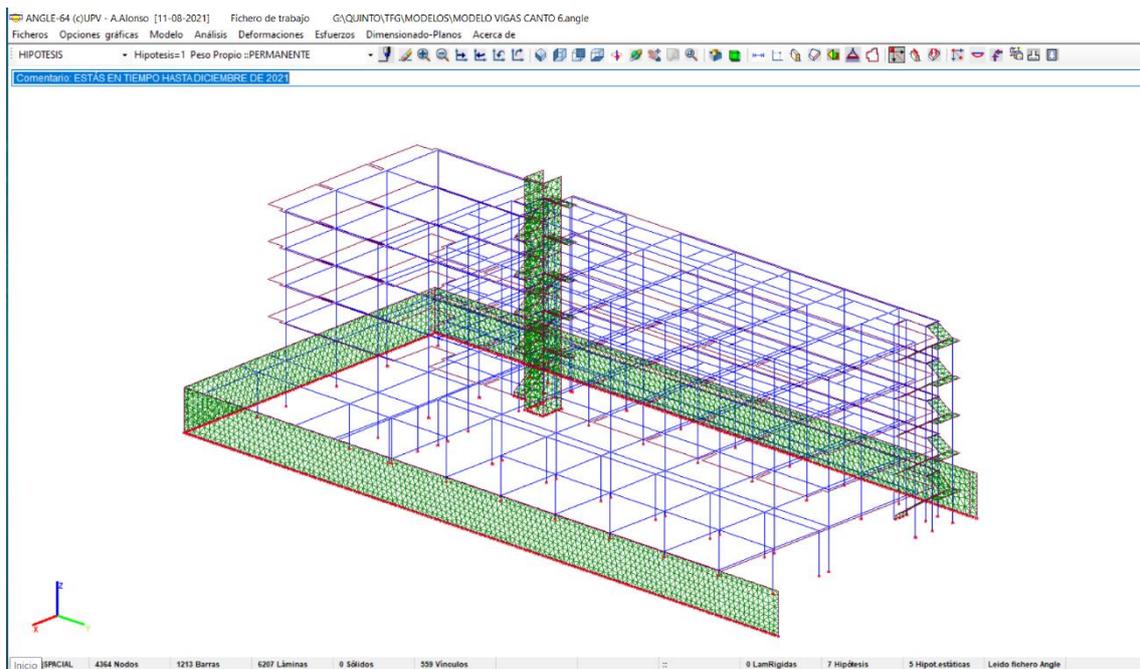


Figura 28: Modelado 3 en AutoCAD



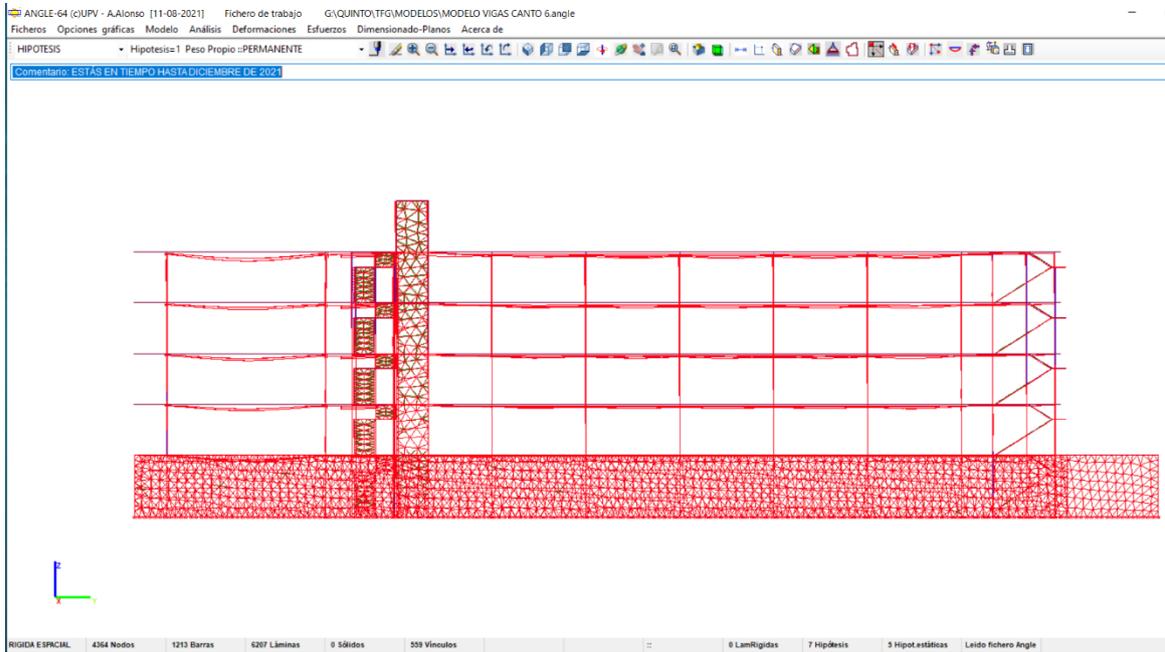


Figura 30: Deformada alzado longitudinal, modelo 3

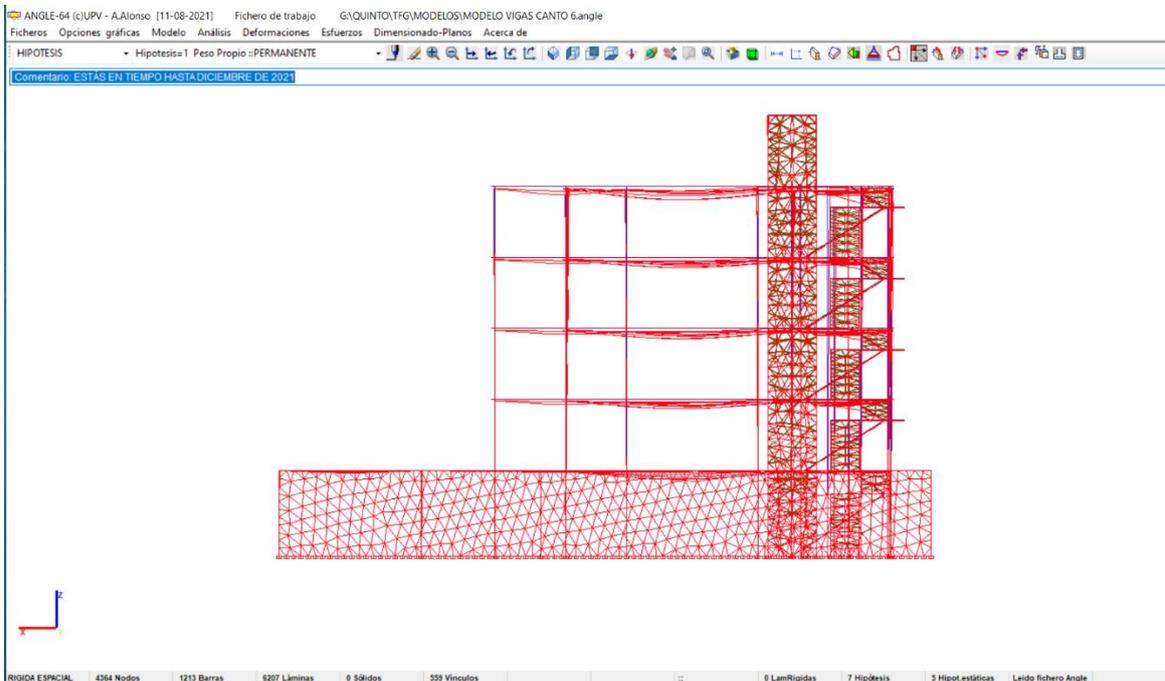


Figura 31: Deformada alzado transversal, modelo 3

Para comparar las deformaciones de las vigas en los modelos 2 y 3 se observa la flecha de la viga 5 del forjado 4: $-0,05\text{cm}$ y una relación de flecha/luz de $1/18771$. Queda evidenciado, pues, que las deformaciones con vigas planas ($-0,414\text{cm}$ y una relación flecha/luz de $1/1353$ en la viga 6 del forjado 3 del modelo 2) son considerablemente superiores a las deformaciones con vigas de canto. Además, según muestra la figura 11 en la losa del modelo 1 se alcanzan flechas de $-0,56\text{cm}$.

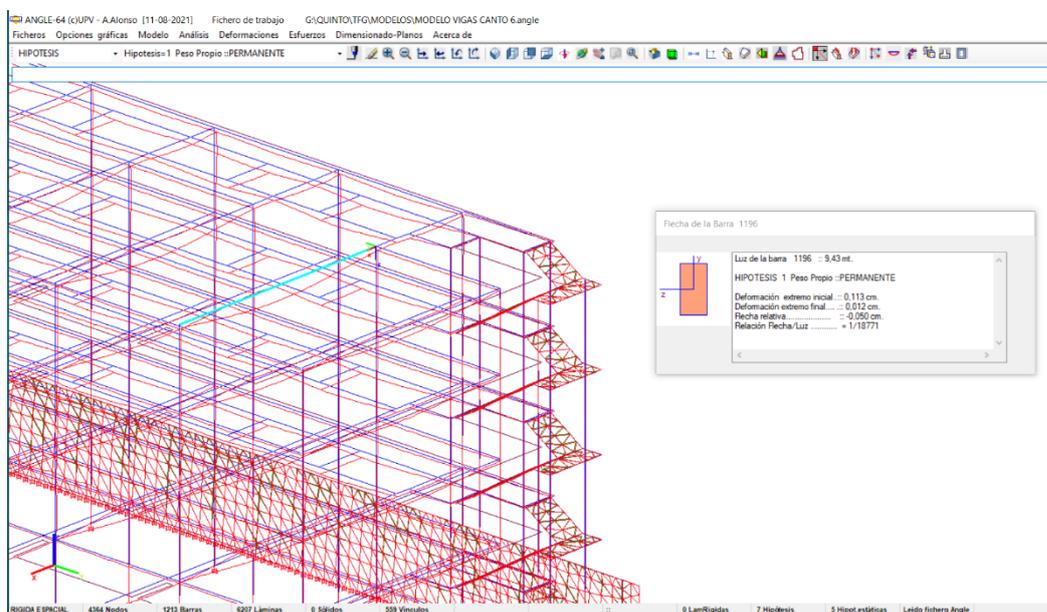


Figura 32: Flecha viga 5, forjado 4, modelo 3

6_Hipótesis de cálculo

Para que la comparación entre los modelos sea efectiva, se establecen unas hipótesis de cálculo iguales en todos ellos. En primer lugar, se emplea en todos los casos los mismos materiales estructurales: acero S-275 para los pilares metálicos y hormigón HA-25 y acero B-500 para todos los elementos de hormigón armado.

En cuanto a las cargas consideradas en los modelos, se siguen las indicaciones de del Documento Básico Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación (DB SE-AE 2008). Estas cargas se dividen en:

- Cargas permanentes:
 - Peso propio de la estructura calculado automáticamente por el programa.
 - Forjado unidireccional de 30cm de espesor: 4kN/m^2
 - Pavimento de madera, cerámico o hidráulico de 8cm de espesor: 1kN/m^2
 - Tabiquería: 1kN/m^2
 - Fachadas y particiones entre viviendas de ladrillo perforado (espesor 14cm) y trasdosado de cartón yeso: 7 kN/m (carga lineal)
 - Cubierta plana: $1,5\text{kN/m}^2$
- Acciones variables:
 - Sobrecargas de uso: 3kN/m^2 en zonas de acceso al público (categoría de uso C1), 2kN/m^2 en zonas residenciales (categoría de uso A), 1kN/m^2 en cubiertas transitables privadas (categoría de uso F) y 2kN/m^2 en zonas de tráfico y aparcamiento de vehículos ligeros (categoría de uso E)
 - viento: $0,52\text{kN/m}^2$ (por pertenecer geográficamente a la zona C de valor básico de velocidad del viento) en las cuatro direcciones principales.
 - Acumulación de nieve: 1 kN/m^2 por encontrarse a una altitud inferior a 1000m.
- Acciones accidentales: consideradas automáticamente por el programa.

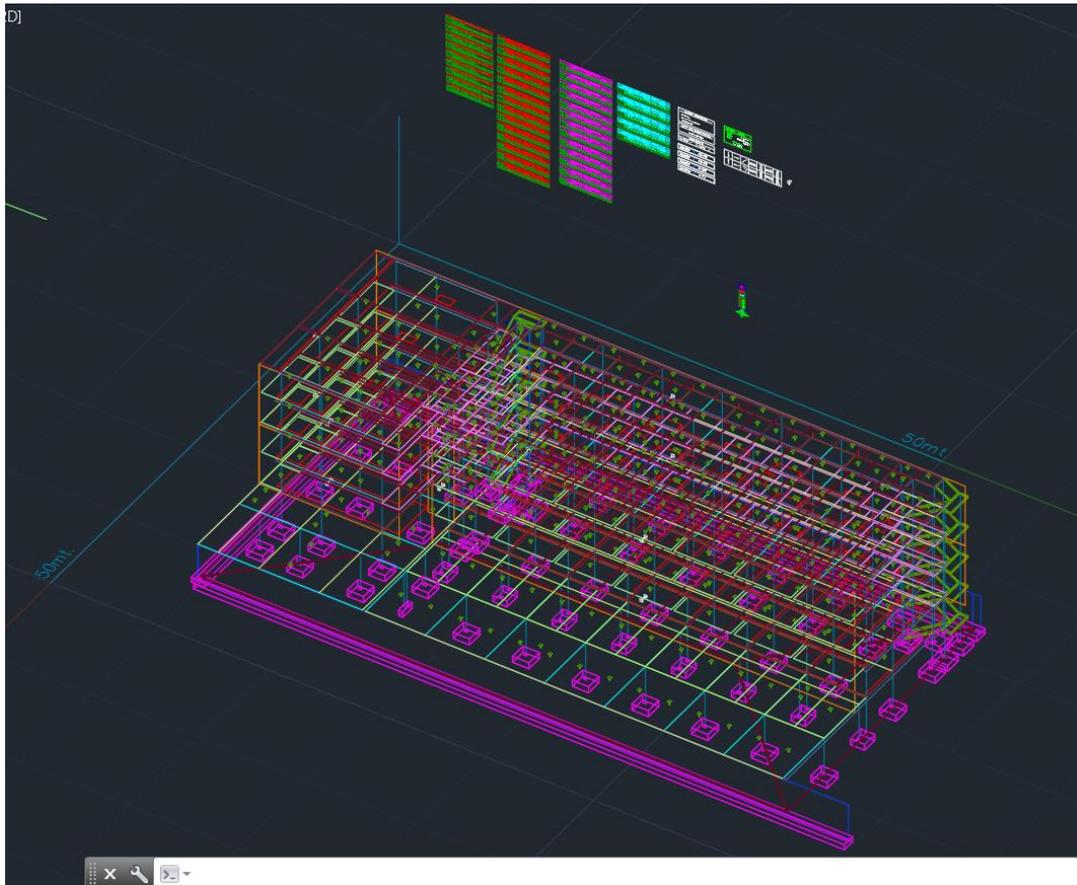


Figura 33: Modelado 2 en AutoCAD con cargas aplicadas

8_Modelos de cálculo: dimensionado y mediciones.

Para simplificar la comparación de alternativas estructurales, se dimensionan y generan planos de armado de la planta primera (cota 3m) de cada uno de los tres modelos. La comparación de sólo una planta estructural es lo suficientemente determinante para establecer el modelo óptimo y resultará más sencilla y útil para el propósito de este trabajo.

8.1_Armado modelo 1: Losa

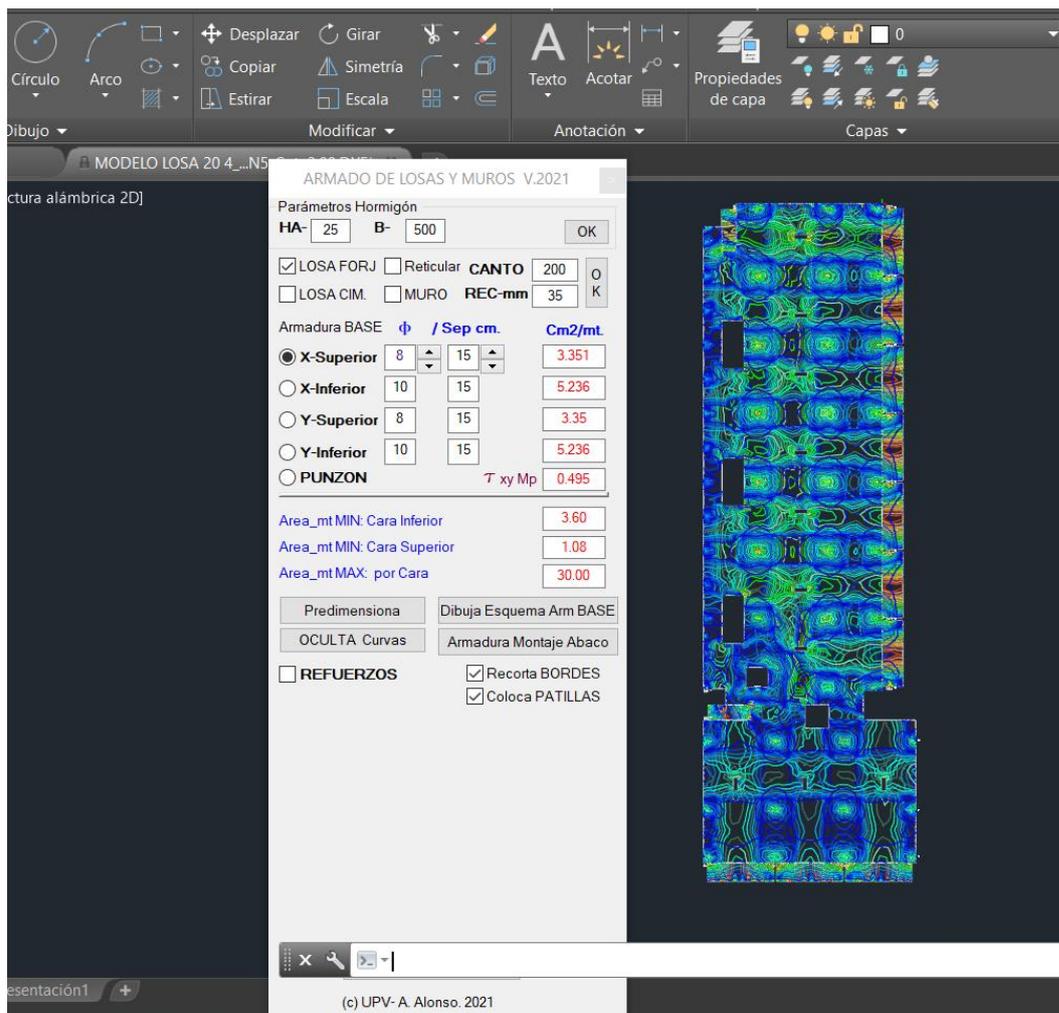


Figura 34: Archivo .dxf en AutoCAD para armado de losa

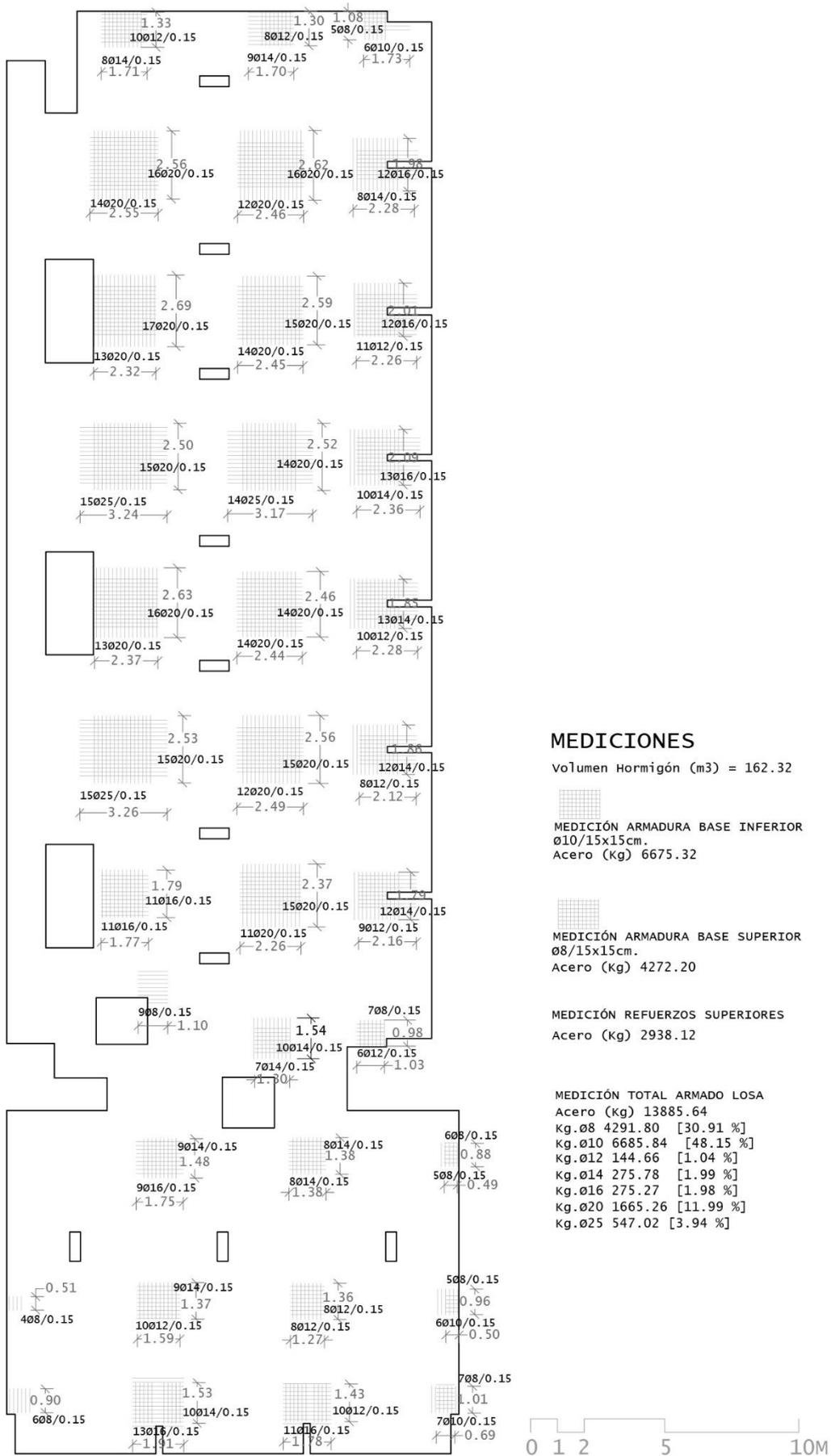


Figura 35: Armado de la losa del modelo 1

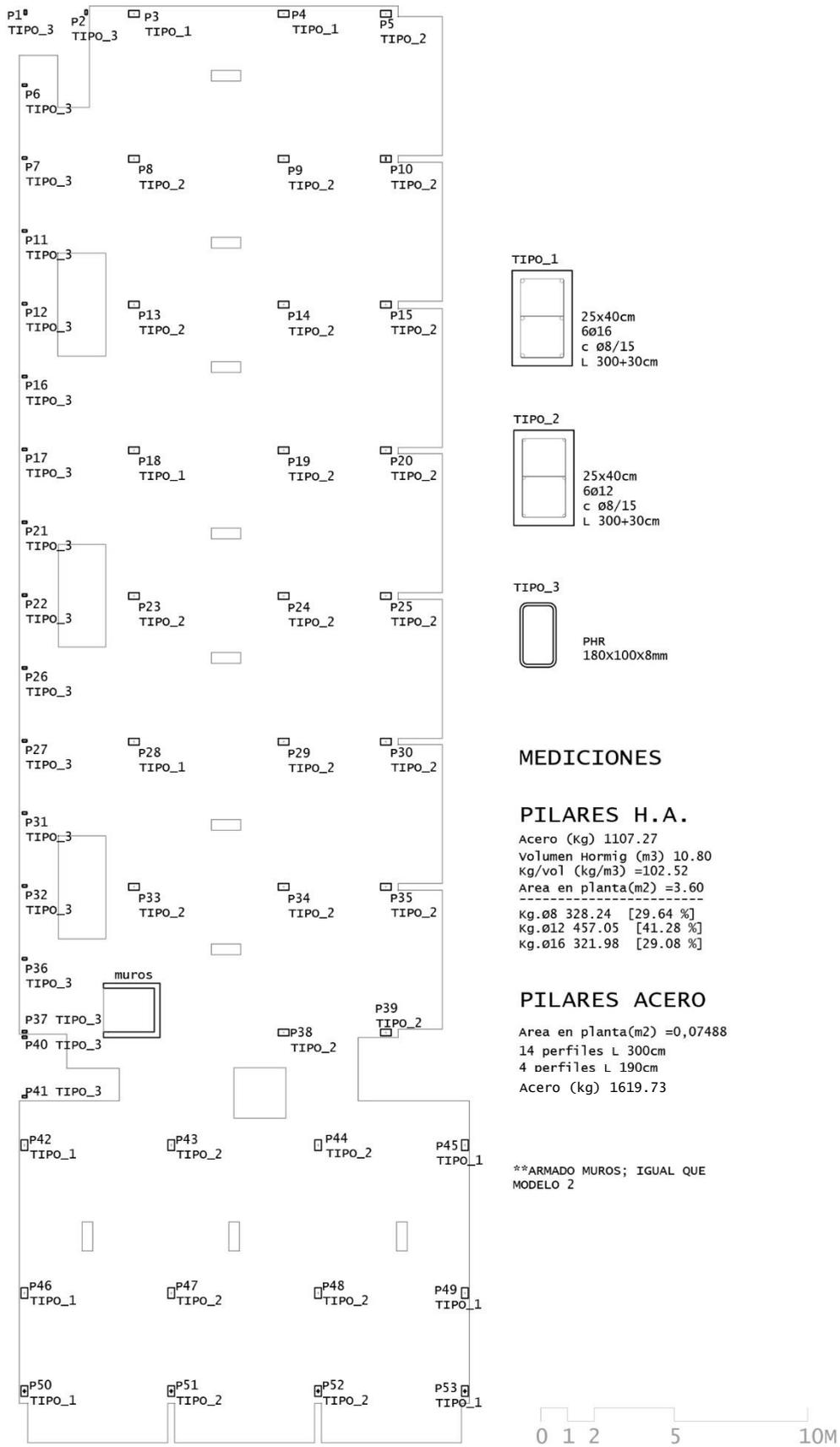
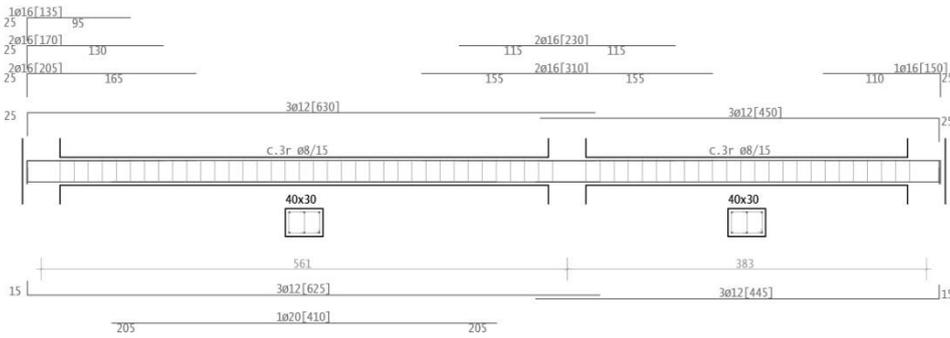


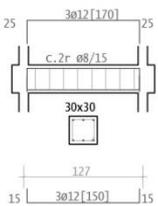
Figura 36: Armado de pilares del modelo 1

8.2_Armado modelo 2: Vigas Planas

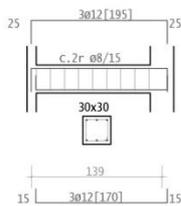
v1-2



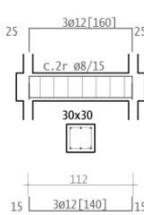
v3



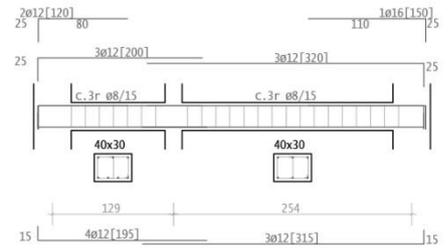
v4



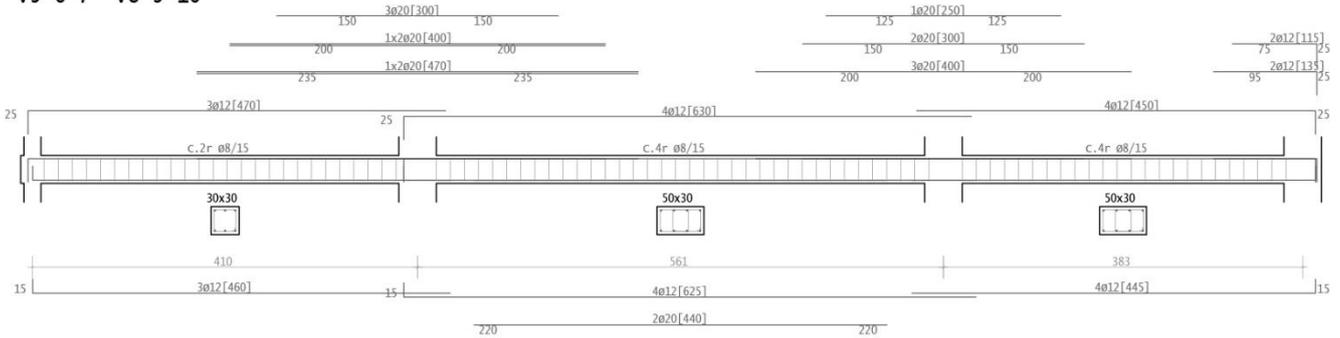
v23



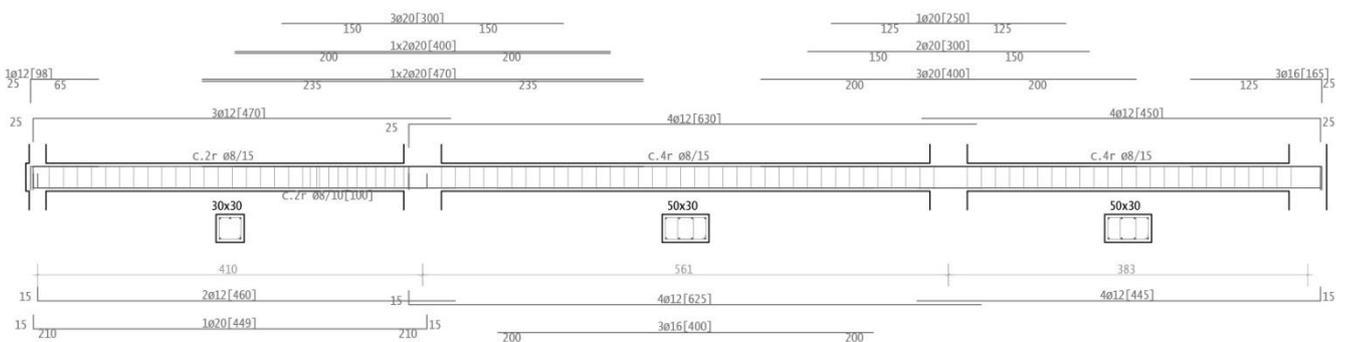
v24-25



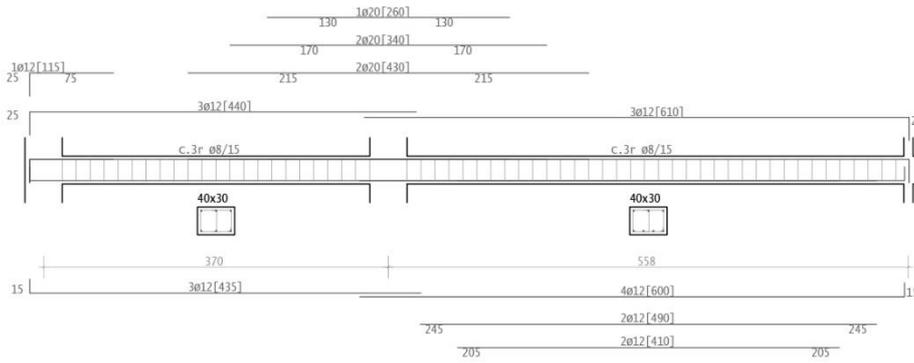
v5-6-7 v8-9-10



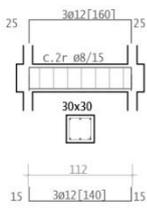
v11-12-13 v14-15-16 v17-18-19 v20-21-22



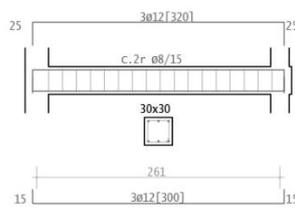
v30-34 v33-37



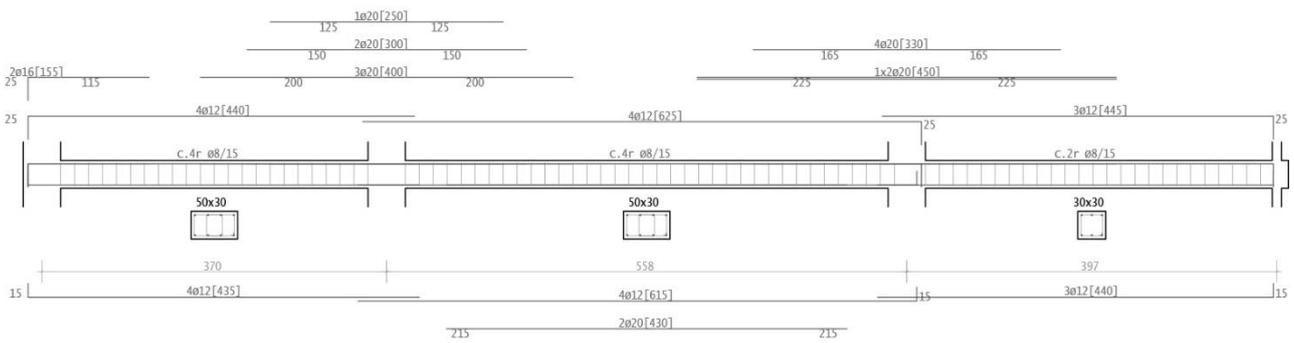
v26



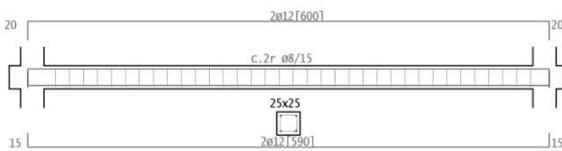
v27



v28-31-35 v29-32-36



zunchos



MEDICIONES

Acero (Kg) 4904.04
 Volumen Hormig (m3) 36.95
 Kg/vol (kg/m3) =132.74
 Area en planta(m2) =7.94

 Kg.ø8 1210.62 [24.69 %]
 Kg.ø12 2318.44 [47.28 %]
 Kg.ø16 207.46 [4.23 %]
 Kg.ø20 1167.51 [23.81 %]

Figura 37: Armado de vigas del modelo 2

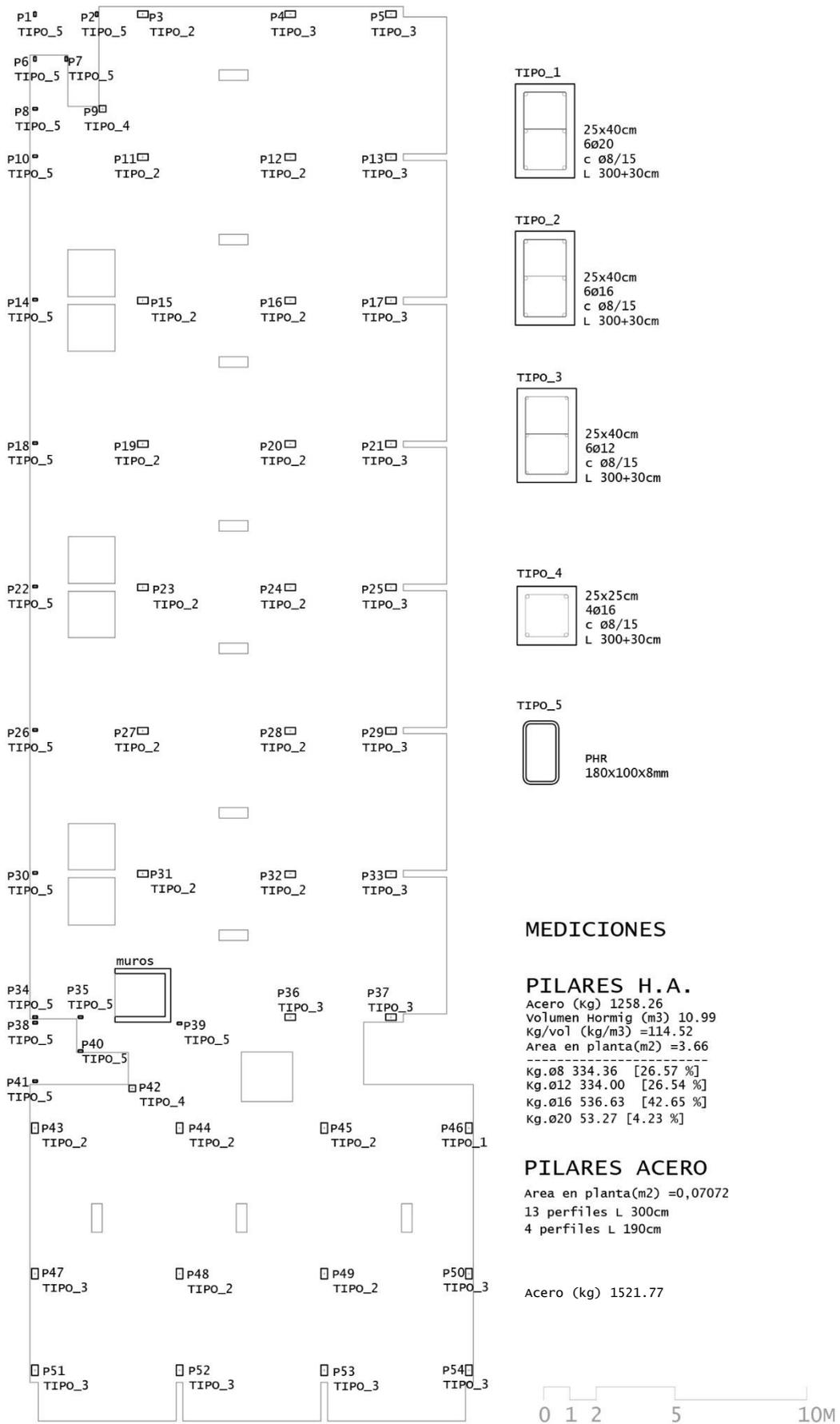


Figura 38: Armado de pilares del modelo 2

10 LOSAS H.A. BALCONES



MEDICIONES

Acero (Kg) 243.7
 Volumen Hormig (m3) = 15.53
 Kg.Ø8 95.1 [39.02 %]
 Kg.Ø10 148.6 [60.98 %]



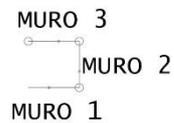
ARMADURA BASE SUPERIOR
 Ø8/15x15cm.



ARMADURA BASE INFERIOR
 Ø10/15x15cm.

MUROS HUECO ASCENSOR

MURO 1



MURO 2



ARMADURA BASE SUPERIOR
 Ø10/15x15cm.



ARMADURA BASE INFERIOR
 Ø12/15x15cm.

MURO 3



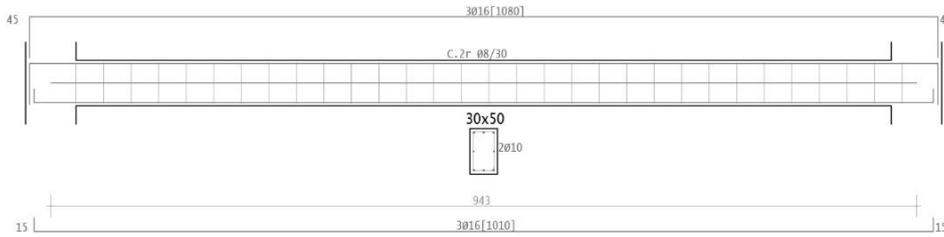
MEDICIONES

Acero (Kg) 108.76
 Volumen Hormig (m3) = 3.52
 Kg.Ø10 44.58 [40.98 %]
 Kg.Ø12 64.19 [59.02 %]

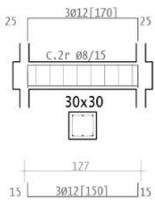
Figura 39: Armado de muros y losas del modelo 2

8.3_Armado modelo 3: Vigas de canto

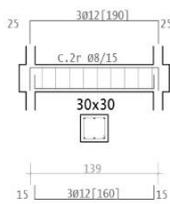
v1



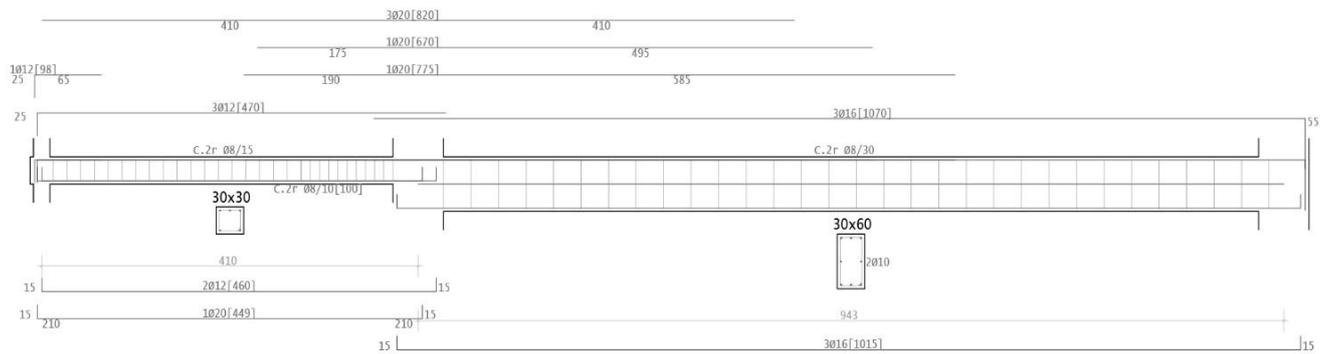
v2



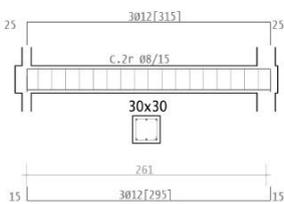
v3



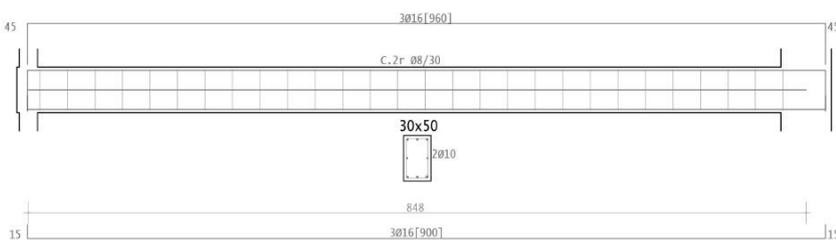
v4-5 v6-7 v8-9 v10-11 v12-13 v14-15



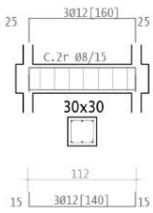
v16



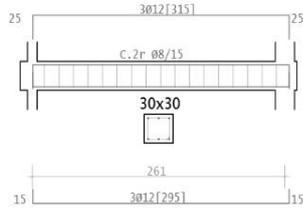
v17



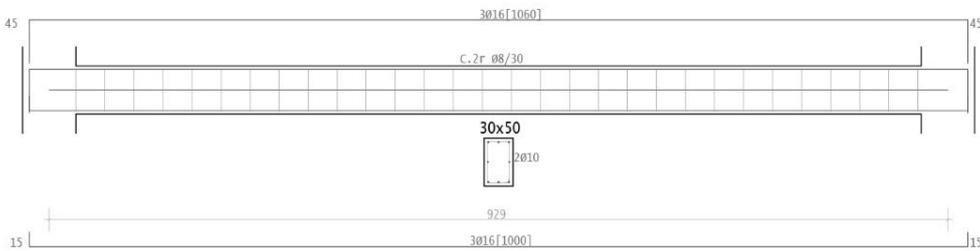
v18



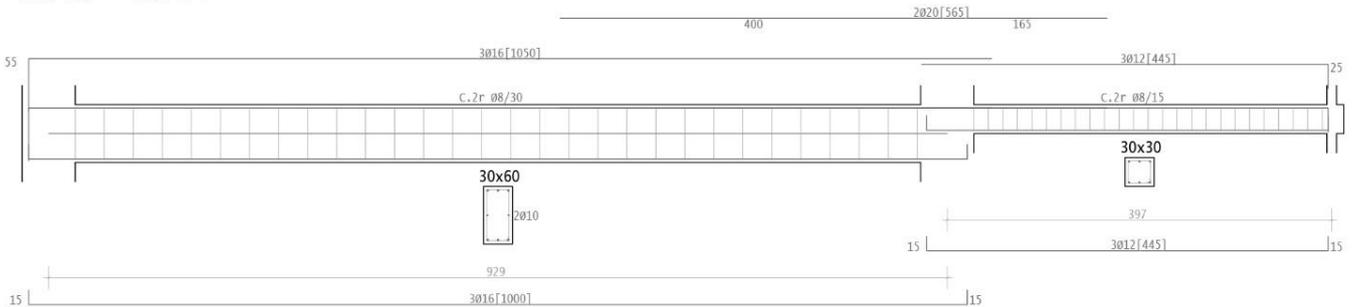
v19



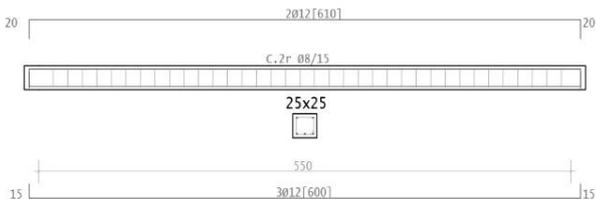
v22 v25



v20-23 v21-24



zunchos



MEDICIONES

Acero (Kg) 4022.26
 Volumen Hormig (m3) 37.90
 Kg/vol (kg/m3) =106.12
 Area en planta(m2) =6.46

 Kg.Ø8 812.73 [20.21 %]
 Kg.Ø10 138.87 [3.45 %]
 Kg.Ø12 1273.89 [31.67 %]
 Kg.Ø16 1081.00 [26.88 %]
 Kg.Ø20 715.78 [17.80 %]

Figura 40: Armado de vigas del modelo 3

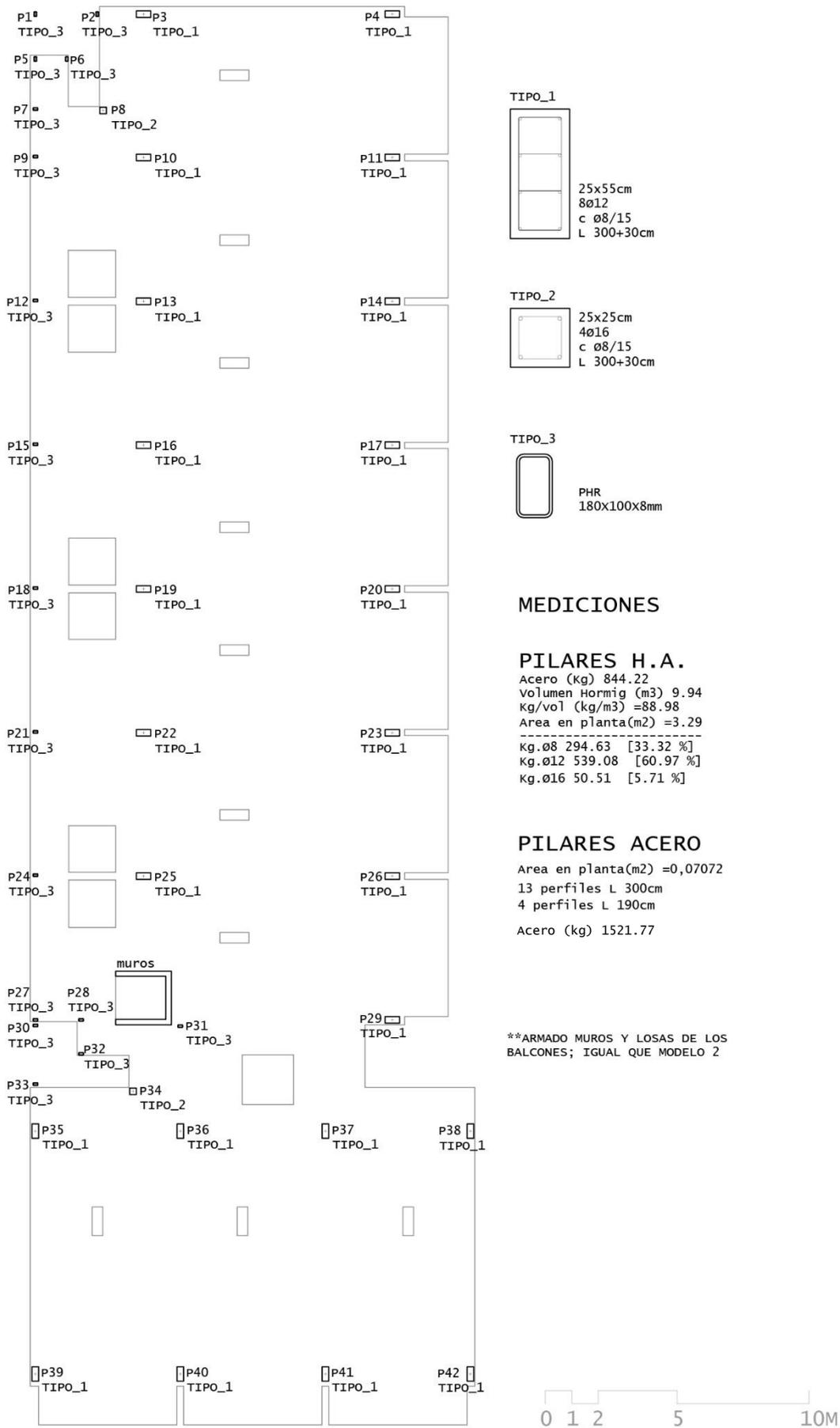


Figura 41: Armado de pilares del modelo 3

9_Comparación de los modelos

Tras realizar las mediciones de todos los elementos estructurales del forjado primero de cada uno de los modelos, se obtiene un presupuesto a través del generador de precios online de CYPE. Estos precios tienen en cuenta el valor de los materiales en el mercado español en el momento de consulta, así como la mano de obra, los costes complementarios y el equipo y maquinaria necesarios para la ejecución de cada elemento estructural. De esta forma se obtiene una aproximación real al coste total de cada una de las estructuras planteadas considerando factores determinantes en la práctica.

9.1_Presupuesto modelo 1: Losa

A continuación, se presupuestan únicamente los elementos estructurales que forman el forjado de la cota 3 del modelo 1

1. Losa maciza:

Losa maciza de hormigón armado de canto 20cm, con altura libre de 3 m, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa, y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 17,1 kg/m².

Medición (m ²)	Precio unitario (€/m ²)	Precio (€)
811,6	80,37	65228,29

2. Pilares de hormigón armado:

Pilares de sección rectangular de hormigón armado, con 25x40 cm de sección media, realizados con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 102,5 kg/m³.

Medición (m ³)	Precio unitario (€/m ³)	Precio (€)
10,8	527,49	5696,89

3. Pilares metálicos

Acero UNE-EN 10025 S275JR, en pilares formados por perfiles laminados en caliente de la serie PHR, acabados con imprimación antioxidante, colocados con uniones soldadas en obra, con altura de 3 m.

Medición (kg)	Precio unitario (€/kg)	Precio (€)
1619,73	2,22	3595,8

4. Muros de hormigón armado

Muros de hormigón armado de 3 m de altura, espesor 20 cm, realizado con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 30,9 kg/m³.

Medición (m ³)	Precio unitario (€/m ³)	Precio (€)
3,52	297,49	1047,16

TOTAL: 75568,14€

9.2_Presupuesto modelo 2: Vigas planas

A continuación, se presupuestan únicamente los elementos estructurales que forman el forjado de la cota 3 del modelo 2

1. Vigas de hormigón armado:

Vigas planas de hormigón armado, con sección media de 40x30 cm, realizadas con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 132,72 kg/m³.

Medición (m ³)	Precio unitario (€/m ³)	Precio (€)
36,95	432,24	15971,26

2. Losas macizas:

Losa maciza de hormigón armado de canto 20cm, con altura libre de planta de 3 m, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 5 kg/m².

Medición (m ²)	Precio unitario (€/m ²)	Precio (€)
77,65	55,21	4287,06

3. Pilares de hormigón armado:

Pilares de sección rectangular de hormigón armado, con 25x40 cm de sección media, realizados con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 102,5 kg/m³.

Medición (m ³)	Precio unitario (€/m ³)	Precio (€)
10,99	527,49	5797,12

4. Pilares metálicos:

Acero UNE-EN 10025 S275JR, en pilares formados por perfiles laminados en caliente de la serie PHR, acabados con imprimación antioxidante, colocados con uniones soldadas en obra, con altura de 3 m.

Medición (kg)	Precio unitario (€/kg)	Precio (€)
1521,77	2,22	3378,33

5. Muros de hormigón armado:

Muros de hormigón armado de 3 m de altura, espesor 20 cm, realizado con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 30,9 kg/m³.

Medición (m ³)	Precio unitario (€/m ³)	Precio (€)
3,52	297,49	1047,16

6. Forjado unidireccional:

Forjado unidireccional de hormigón armado, con altura libre de planta de 3 m, canto 30 = 25+5 cm, realizado con hormigón HA-25/B/20/IIa y con un volumen total de hormigón de 0,11 m³/m², y acero UNE-EN 10080 B 500 S en zonas de refuerzos con una cuantía de 2 kg/m².

Medición (m ²)	Precio unitario (€/m ²)	Precio (€)
572,6	49,7	28458,22

TOTAL: 58939,15€

9.3_Presupuesto modelo 3: Vigas de canto

A continuación, se presupuestan únicamente los elementos estructurales que forman el forjado de la cota 3 del modelo 3

1. Vigas de hormigón armado:

Vigas descolgadas, de hormigón armado, con sección media de 30x50 cm, realizadas con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 106,13 kg/m³.

Medición (m ³)	Precio unitario (€/m ³)	Precio (€)
37,9	433,77	16439,88

2. Losas macizas:

Losa maciza de hormigón armado de canto 20cm, con altura libre de planta de 3 m, realizada con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 5 kg/m².

Medición (m ²)	Precio unitario (€/m ²)	Precio (€)
77,65	55,21	4287,06

3. Pilares de hormigón armado

Pilares de sección rectangular de hormigón armado, de 25x55 cm de sección media, realizados con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 84,93 kg/m³.

Medición (m ³)	Precio unitario (€/m ³)	Precio (€)
9,94	457,25	4545,06

4. Pilares metálicos:

Acero UNE-EN 10025 S275JR, en pilares formados por perfiles laminados en caliente de la serie PHR, acabados con imprimación antioxidante, colocados con uniones soldadas en obra, con altura de 3 m.

Medición (kg)	Precio unitario (€/kg)	Precio (€)
1521,77	2,22	3378,33

5. Muros de hormigón armado:

Muros de hormigón armado de 3 m de altura, espesor 20 cm, realizado con hormigón HA-25/B/20/IIa y acero UNE-EN 10080 B 500 S, con una cuantía aproximada de 30,9 kg/m³.

Medición (m ³)	Precio unitario (€/m ³)	Precio (€)
3,52	297,49	1047,16

6. Forjado unidireccional

Forjado unidireccional de hormigón armado, con una altura libre de planta de 3 m, canto 30 = 25+5 cm, realizado con hormigón HA-25/B/20/IIa y con un volumen total de hormigón de 0,11 m³/m², y acero UNE-EN 10080 B 500 S en zonas de refuerzos con una cuantía de 2 kg/m².

Medición (m ²)	Precio unitario (€/m ²)	Precio (€)
602,71	49,7	29954,69

TOTAL: 59652,18€

10_Conclusión

Para concluir esta memoria, se analizan los datos obtenidos para los forjados de la cota 3 de cada uno de los modelos estructurales desarrollados.

El modelo óptimo económicamente es el modelo 2: vigas planas. Se desecha, en primer lugar, el modelo 1 (losa) por ser un 22% más caro que el modelo 1. Adoptar el modelo estructural de losa supondría un sobre coste considerable para el proyecto.

El resultado de los cálculos muestra unos precios similares en los modelos 2 y 3, pero, si se tiene en cuenta que en el proyecto de viviendas sociales en Salou hay en total 10 forjados similares al que se ha presupuestado para la comparación, la diferencia de costes resulta algo más significativa. El coste del forjado en el tercer modelo 3 (vigas de canto) es solamente un 1,2% superior que en el modelo 2 (vigas planas), por lo que, a priori, el precio no es tan determinante como para desechar uno de los modelos.

Para tomar la decisión sobre qué modelo de estructura es más apropiado para el edificio, se debe tener en cuenta otros muchos factores además del precio, ya comentados anteriormente, como la facilidad de paso de instalaciones, versatilidad del edificio o las deformaciones de la estructura. Son muchas las ventajas constructivas y proyectuales de las vigas planas respecto a las vigas de canto frente a un solo inconveniente: como se ha concluido en el punto 6.3.3, las deformaciones en el modelo de vigas planas son considerablemente más grandes. Sin embargo, unas relaciones de flecha/luz del orden de 1/1000 son más que aceptables para un edificio de viviendas teniendo en cuenta que el CTE pone el límite en 1/500.

Por ello, se concluye en que el modelo estructural más adecuado para el edificio en términos de optimización de recursos, sostenibilidad y ventajas constructivas y proyectuales es el modelo 2: vigas planas.

Recapitulando, los motivos por los cuales el modelo de vigas planas ha resultado ser el óptimo para el proyecto son:

- Es el más barato de los tres modelos propuestos.
- Las flechas de las vigas son reducidas y no supondrían daños significativos en elementos no estructurales del edificio.
- Los forjados de vigas planas tienen muchas ventajas proyectuales en un edificio residencial.
- El hecho de que existan más pilares en la planta no es determinante en este proyecto, ya que cada vivienda ocupa el espacio de una cruzía y los pilares están embebidos en las particiones entre viviendas.

11_Bibliografía

Software

_Alonso, A. (2021). *Angle* [Software de cálculo de estructuras]. Universidad Politécnica de Valencia.

Revistas

_80 viviendas sociales en salou. (2017). *El Croquis*, 189, 230-243.

_Payá-Zaforteza, I., González, F., & Yepes, V. (2008). Influencia del empleo de vigas planas y del tipo de hormigón en el diseño óptimo de pórticos de edificación. *Hormigón y Acero*, 247, 99-108.

webs

_Estructuras. (2021). Generador de precios de la construcción. España. CYPE ingenieros, S.A.
http://www.generadordeprecios.info/obra_nueva/Estructuras.html#gsc.tab=0

Informes

_Ávila, A., & Sánchez-Carratalá, C. R. (2012). La optimización en el proyecto estructural de edificios de gran altura como herramienta para la sostenibilidad. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, Valencia.

_Merino Thomas, J. M. Dpto. de Calidad, CEMEX ESPAÑA, S.A. (2008) El Hormigón estructural y la sostenibilidad. Los índices ICES e ISMA de la EHE-08 desde el punto de vista del fabricante de hormigón preparado y de prefabricados de hormigón.

Cuadernos

_Marí, A., Ortega, H., Ariel, G., & Sáiz, S. Universidad Politécnica de Cataluña (2002). Recomendaciones para el proyecto y construcción de placas macizas de hormigón "in situ" para forjados.

_Rodríguez, J. Departamento de Estructuras y Física de la Edificación, ETSAM (2018). Proyecto de estructuras de hormigón.

Figuras

_Figuras de la 1 a la 9. Fuente: 80 viviendas sociales en Salou. (2017). *El Croquis*, 189, 230-243.

_Figuras de la 9 a la 41: elaboración propia