



# **UNITÉ D'HABITATION DE MARSELLA**

**APROXIMACIÓN ARQUITECTÓNICA Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

**LE CORBUSIER, 1945-1952**

## **TRABAJO FINAL DE GRADO**

**GRADO EN FUNDAMENTOS DE LA ARQUITECTURA  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE VALENCIA  
CURSO 2015/2016**

**ALUMNA: Beatriz Alborch Vidal**

**TUTOR: Ernesto Jesús Fenollosa Forner**

**DEPARTAMENTO: Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**



**ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a mi tutor, Ernesto Fenollosa, por su confianza en mí desde el principio;  
A mi familia por el apoyo recibido todos estos años mientras me adentraba en el viaje de la arquitectura y a mis compañeros por estar ahí durante todo el trayecto.

## **RESUMEN**

La Unité d'Habitation de Marsella, construida entre 1945 y 1956, es un icono de vivienda colectiva de la historia de la arquitectura. Es un edificio que pretende romper con todos los moldes prefijados en cuanto a urbanismo, maneras de habitar, sistemas de organizar e incluso las formas de construir. Este afán por el desarrollo de nuevos conceptos arquitectónicos, también se refleja en la estructura, donde Le Corbusier explota la dualidad de su pensamiento mediante la superposición de dos tramas estructurales de distinto carácter y funcionamiento. En primera instancia encontramos un entramado de 17 plantas de vigas y pilares de hormigón armando que reposan sobre 15 pares de pilotis en planta baja. Esta dualidad obliga a generar un elemento intermedio capaz de absorber las cargas del cuerpo superior y redistribuirlas, abriendo un campo de experimentación de las posibilidades de las macroestructuras de hormigón en un edificio residencial. La elaboración, y posterior análisis, del modelo estructural generado permite arrojar luz sobre el comportamiento de los distintos elementos que componen la estructura asegurando la correcta transmisión de las cargas hasta el terreno sin producir excesivas deformaciones ni tensiones, así como el comportamiento global de la estructura, permitiendo extraer conclusiones oportunas que puedan ser útiles para el diseño de estructuras de edificios de similares características, siempre contrastando las soluciones adoptadas, bajo la tecnología de la época y los condicionantes tanto económicos como temporales, con las soluciones que podríamos adoptar hoy en día.

## **PALABRAS CLAVE**

*Unité d'Habitation de Marsella, Le Corbusier, análisis estructural, estructura de hormigón, macroestructura, edificio en altura.*

## **RESUM**

L'Unité d'Habitation de Marsella, construïda entre 1945 i 1956, és una icona d'habitatge col·lectiu de la història de l'arquitectura. És un edifici que pretén trencar amb totes les idees prefixades en quant a urbanisme, formes d'habitar, sistemes d'organitzar i fins i tot les formes de construir. Aquest afany pel desenvolupament de nous conceptes arquitectònics, també es reflecteix en l'estructura, on Le Corbusier explota la dualitat del seu pensament mitjançant la superposició de dos trames estructurals de diferent caràcter i funcionament. En primera instància trobem un entramat de 17 plantes de bigues i pilars de formigó armat que reposen sobre 15 parells de pilotis en planta baixa. Aquesta dualitat obliga a generar un element intermedi capaç d'absorbir les càrregues del cos superior i redistribuir-les, obrint un camp d'experimentació de les possibilitats de les macroestructures de formigó en un edifici residencial. L'elaboració, i posterior anàlisi, del model estructural generat permet aclarir les idees sobre el comportament dels diferents elements que componen l'estructura assegurant la correcta transmissió de les càrregues fins al terreny sense produir excessives deformacions ni tensions, així com el comportament global de l'estructura. L'anàlisi permeteix l'extracció de conclusions que puguen ser útils per al disseny d'estructures d'edificis de similars característiques, sempre contrastant les solucions adoptades, baix la tecnologia de l'època i els condicionants tant econòmics i temporals, amb les solucions que podríem adoptar en aquest moment.

## **PARAULES CLAU**

*Unité d'Habitation de Marsella, Le Corbusier, Anàlisi estructural, estructura de formigó, macroestructura, edifici en altura.*

## **BRIEF**

The Unité d'Habitation of Marseilles, built between 1945 and 1956, is one of the icons of collective housing in the history of architecture. The building searches to break all the premade ideas on urbanism, living ways, organization systems and even construction methods. This interest in the development of new architectural concepts is also reflected on the structure, where Le Corbusier exploits the duality of his own thought through the superposition of two structural weaves with different characteristics and functionality. Firstly we find a 17 storey framework of reinforced concrete beams and pillars that rest upon 15 pairs of pilotis. This duality forces the creation of an intermediate agent, able to absorb and redistribute the loads of the main body. This element opens a complete new experimentation area developing the possibilities of concrete macrostructures in residential buildings. The generation, and further analysis, of a structural model brings light to the premade ideas about how different structural items respond, ensuring the correct transmission of load to the foundations without excessive deformations, as well as clarifying the global structural response. The analysis also enables the statement of conclusions that are useful when designing buildings of similar nature, always bearing in mind the solutions adopted at the time were heavily influenced by the technological, economical and schedule restrictions.

## **KEY WORDS:**

*Unité d'Habitation of Marseilles, Le Corbusier, Structural analysis, Concrete structure, macrostructure, high-rise building.*

<b>1.</b>	<b>Objetivos y metodología.....</b>	<b>06</b>
	<i>1.1 Objetivos.....</i>	<i>07</i>
	<i>1.2 Metodología.....</i>	<i>08</i>
<b>2.</b>	<b>Le Corbusier.....</b>	<b>09</b>
<b>3.</b>	<b>Unité d'Habitation de Marsella.....</b>	<b>18</b>
	<i>3.1. El contexto.....</i>	<i>19</i>
	<i>3.2. Principios de la ciudad vertical.....</i>	<i>20</i>
	<i>3.3. La célula de habitación.....</i>	<i>21</i>
	<i>3.4. La organización de la ciudad vertical.....</i>	<i>24</i>
	<i>3.5. La materialidad.....</i>	<i>28</i>
	<i>3.6. La construcción.....</i>	<i>29</i>
<b>4.</b>	<b>Descripción de la estructura.....</b>	<b>31</b>
<b>5.</b>	<b>Modelización de la estructura.....</b>	<b>37</b>
	<i>5.1. El modelo estructural.....</i>	<i>38</i>
	<i>5.2. Evaluación y asignación de cargas.....</i>	<i>43</i>
	<i>5.3. Combinación de acciones.....</i>	<i>49</i>
	<i>5.4. Materiales.....</i>	<i>53</i>
<b>6.</b>	<b>Análisis estructural.....</b>	<b>54</b>
	<i>6.1. Comportamiento global de la estructura.....</i>	<i>55</i>
	<i>6.2. Análisis global de la estructura.....</i>	<i>57</i>
	<i>6.3. Análisis pormenorizado de plantas.....</i>	<i>62</i>
<b>7.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>72</b>
<b>8.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>78</b>
<b>9.</b>	<b>Referencias de imágenes.....</b>	<b>82</b>

## **1. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA**

## **1.1 OBJETIVOS**

En un periodo de postguerra, donde la vivienda era escasa y los recursos limitados, Le Corbusier consiguió el respaldo del Ministerio de Reconstrucción y Urbanismo Francés para desarrollar, libre de la carga de cualquier normativa existente, la primera unidad de habitación: La Unité d'Habitation de Marsella. Esta tipología híbrida de edificio-ciudad que se desarrolla y evoluciona en las cinco unidades de habitación del arquitecto, se convirtió en uno de los campos de estudio más importantes sobre el modelo de vida del hombre moderno.

Dada la importancia no solo constructiva, sino también teórica e innovadora del carácter de este edificio, se plantea como objeto de este trabajo conocer la evolución del pensamiento arquitectónico y urbanístico de Le Corbusier. El estudio de su trayectoria nos permitirá entender los parámetros que le llevaron a generar una nueva tipología de edificación, así como la reinterpretación de los elementos clásicos y vernáculos de distintas culturas en estas construcciones.

Dentro del encargo de proyecto el máximo condicionante era alojar a 1200 personas, un reto para cualquier arquitecto. Por ello otra finalidad del presente estudio es comprender las complejas relaciones que se generan en un edificio con esta premisa, así como establecer ciertas directrices para la organización de las viviendas y las funciones auxiliares que deriven de las necesidades básicas del habitar humano.

Uno de los principios de la nueva arquitectura planteados por Le Corbusier, era la planta libre sustentada sobre pilotis. La evolución de los pilotis, desde elementos metálicos de sección ínfima a los elementos máxicos de hormigón en la Unité es un aspecto importante de su trayectoria profesional. Es tal la importancia de esta evolución estructural, que uno de los objetivos principales de este trabajo será mostrar las soluciones estructurales adoptadas para un edificio de hormigón armado de grandes dimensiones con uso de vivienda, cuya seña de identidad es una planta baja libre.

Otro propósito será llevar a cabo la abstracción del edificio pertinente para realizar un modelo estructural apropiado empleando un programa de análisis estructural que permita analizar la estructura frente a distintas combinaciones de carga. Con el modelo generado se trabajará con la intención de explicar el comportamiento de los distintos elementos estructurales, así como el de la estructura en su globalidad.

Debido a la representatividad de la estructura de la Unité de Marsella, el objeto final será extraer conclusiones oportunas que puedan ser útiles para el diseño de estructuras de edificios de similares características, siempre contrastando las soluciones adoptadas en 1945, bajo la tecnología de la época y los condicionantes tanto económicos como temporales, con las soluciones que podríamos adoptar hoy en día.

## **1.2 METODOLOGIA**

Con el objeto de satisfacer los objetivos planteados el proceso metodológico será el siguiente:

En primer lugar se realizará un estudio preliminar del arquitecto y su obra, para sentar las bases y el contexto en el que se ejecuta el edificio considerado. El estudio se centrará en la Unité de Marsella, analizándola no sólo desde el punto de vista estructural, sino también el compositivo, funcional y material.

A partir de la información recopilada se realizará un modelo estructural que se ajuste lo máximo posible a la realidad con la ayuda del programa informático de cálculo análisis estructural por elementos finitos Architrave. Se realizará una evaluación de cargas y se asignaran al modelo las mismas, permitiendo un exhaustivo estudio del comportamiento de la estructura.

A continuación se realizará un post-proceso de los resultados del cálculo. De los datos obtenidos del cálculo se realizará un análisis que arroje luz sobre el comportamiento de la estructura bajo las hipótesis establecidas. Se estudiarán individualmente los elementos estructurales más representativos (pilotis, suelo técnico, forjados, vigas y pilares) y de forma global el conjunto de la estructura, especialmente frente a cargas horizontales de viento.

Para finalizar se llevarán a cabo una serie de conclusiones que puedan ser extrapolables a otros edificios de similares características y técnicas constructivas.





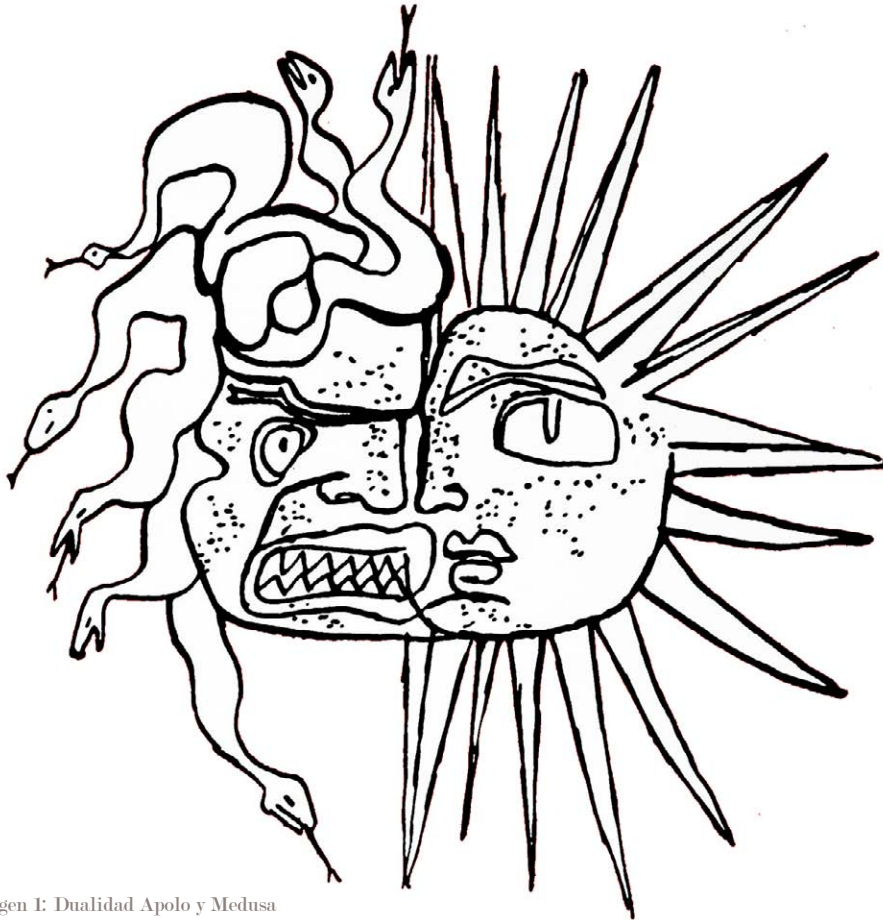


Imagen I: Dualidad Apolo y Medusa

Le Corbusier es uno de los maestros de la arquitectura moderna siglo XX. Es arquitecto, urbanista, escritor, ensayista, conferenciante, viajero incansable, polemista, artista, pintor... Ejerce todas las disciplinas forzando sus límites, abarcando y bebiendo de todas las fuentes y culturas con las que se encuentra en el viaje incesante de su vida.

Dedica su vida al proyecto filosófico de la modernidad basado en la fe ciega en el hombre, en sus posibilidades y en la razón. Pero no es un pensador, es un polemista, muy implicado en la difusión de sus ideas y agente activo en los medios de comunicación modernos.

La obra de Le Corbusier no se puede entender sin la imagen nietzscheana de la cabeza dividida entre la irradiación benéfica de Apolo y el carácter atormentado de Medusa (Imagen 1). Este esquema del propio Le Corbusier hace referencia a la dualidad de su propio pensamiento; al ethos y al pathos; al hombre técnico y el artista; a la sombra y la luz; el arte y la técnica. Es un arquitecto dual que se mueve entre polos opuestos, cuya tensión y contradicciones entre los mismos enriquecen su obra.

Es esta faceta contradictoria y evolutiva, la que en los años 30, cuando sus postulados tomaban firmeza en el ámbito arquitectónico, le lleva de vuelta a lo vernáculo y a cuestionar sus propios principios, generando una creciente complejidad en su pensamiento y por ende en sus obras. Su filosofía es un proceso evolutivo a lo largo del tiempo, por lo que es necesario analizarla desde un proceso cronológico y ordenado.

Le Corbusier, cuyo nombre verdadero era Charles-Edouard Jeanneret, nació el 6 de Octubre de 1887 en el seno de una familia de artesanos acomodados, su padre era esmaltador de cajas de reloj y su madre profesora de piano. Charles recibió una educación basada en los principios clásicos en la Escuela de Arte de Chaux-de-Fonds. En esta etapa de su vida es fundamental la figura de su maestro Charles L'Eplattenier, quien descubrió sus capacidades no sólo para dibujar sino para escrutar la realidad, buscando la lógica bajo las formas que dibujaba y lo encamina hacia la arquitectura.

Otro aspecto muy importante en el desarrollo de sus ideas, que le acompañan durante toda su vida, son los viajes. Ya de joven, en 1907, realizó un viaje a Italia para conocer las obras de la antigüedad y la tradición clásica. Como contraposición también viajó por Europa a los lugares donde estaban ocurriendo los episodios más importantes de la modernidad. En 1907 conoció a Tony Garnier cuando este estaba desarrollando la Ciudad Industrial y posteriormente trabajó en el estudio de Auguste y Gustave Perret con el objetivo de aprender sobre el material que, ya por entonces, Le Corbusier denominaba el material del futuro: el hormigón. Su paso por Francia reforzó las tendencias tecnócratas de su carácter y las ideas del racionalismo clásico francés.

En 1910 visitó Alemania con el objetivo de estudiar el arte decorativo de la corriente funcionalista del Deutscher Werkbund. Allí trabajó en el estudio de Peter Behrens donde conoció a arquitectos como Gropius o Mies Van der Rohe.

El viaje más importante de esta época es el denominado Viaje de Oriente. Este viaje supone el descubrimiento de la arquitectura griega, de la cual analiza las relaciones lógicas entre las edificaciones y el paisaje. En este viaje Le Corbusier tiene muchas intuiciones como: los valores organizativos, como la presencia de un edificio abstracto cambia su significado por la relación que este toma con el lugar, el recorrido para acceder hasta los templos, las relaciones entre la horizontalidad y la verticalidad... Todas estas intuiciones las anota en sus cuadernos (Imágenes 4 y 5) y son adoptadas como ideas propias en sus obras de décadas posteriores.

De este viaje hay que destacar su descripción de la Acrópolis: *“Su vertical forma con el horizonte del mar un ángulo recto. Cristalización, fijación del sitio. Éste es un lugar donde el hombre se detiene porque hay una sinfonía total, magnificencia de relaciones y de nobleza. La vertical fija el sentido de la horizontal. Una vive a causa de la otra”*<sup>1</sup>

Este viaje también le permite establecer una relación peculiar con el Mediterráneo que le acompañará toda su vida. Acostumbrado a los paisajes Suizos, queda fascinado con la luz del Mediterráneo. Esa luz potente que delimita las sombras de modo perfecto y expresivo. También entra en contacto con los colores primarios con los que se pintan los templos y las viviendas tradicionales y descubre su potencial en combinación con el blanco.

<sup>1</sup> Le Corbusier, *Précisions sur un état présent de l'architecture et de l'urbanisme*. V. Fréal. París, 1930.



Imagen 2: Familia Jeanneret.



Imagen 3: Le Corbusier en la Acrópolis.

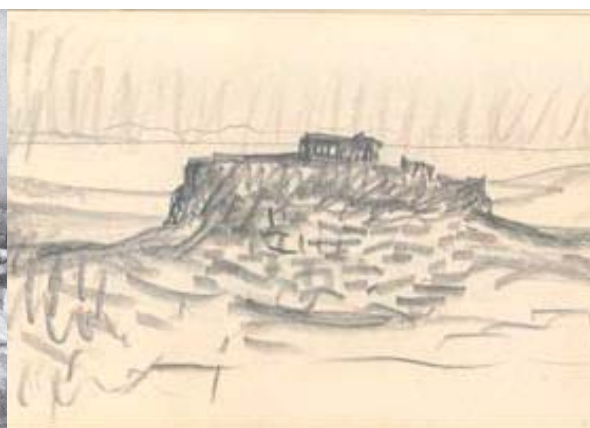


Imagen 4: Boceto de la implantación de la Acrópolis.



Imagen 5: Acuarela captando el color del Mediterráneo.

Finalmente se establece en París, donde trabaja para una consultora de hormigón armado, pero a la vez está muy relacionado con las vanguardias parisinas. En esta época se mueve entre el mundo del arte en el París de Picasso y Berman y la técnica del hormigón. Gracias a esta confluencia es capaz, en 1914, de poner sobre la mesa el Esquema Dominó.

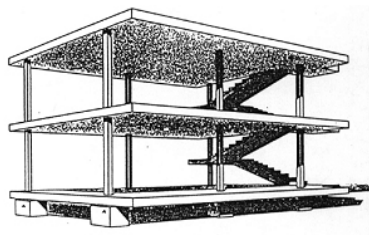


Imagen 6: Esquema Dominó.

Este esquema es una estructura de pilares y losas que permite liberar la planta de la rigidez impuesta por los muros de carga, que hasta el momento condicionaban la distribución de los edificios. También permite desarrollar una lógica industrial que nos permita prefabricar y construir de una manera eficiente y rápida. Estos prototipos permiten el desarrollo de los 5 puntos de una nueva arquitectura.

1. **PILOTIS:** Los pilotis son las columnas modernas, que derivan de las posibilidades técnicas del hormigón. Además confieren salubridad, ya que permiten que la vivienda se separe de los problemas que puedan provenir del suelo, así como permitir que el jardín pase por debajo de la casa.
2. **CUBIERTA AJARDINADA:** Nace de la necesidad de proteger el hormigón armado de las dilataciones, por lo que es recomendable mantener una humedad constante y temperatura regular en del hormigón. Además este sistema de protección de los forjados ayuda en el confort térmico de la vivienda, evitando la pérdida de calor generado por los nuevos sistemas de calefacción centralizada.

3. **PLANTA LIBRE:** La planta ya no está esclavizada por los muros portantes, es libre. Esto hace posible el uso de una multitud de nuevos materiales que sólo tienen la función de asegurar aislamiento e iluminación. Además se permite un plan flexible y aparecen los paramentos móviles.
4. **LA VENTANA CORRIDA:** La liberación del cerramiento de su función portante hace que se puedan abrir ventanales de un lado a otro. Es una idea que precede al muro cortina, donde toda la fachada es un vidrio. Le Corbusier caracteriza este elemento como el ente mecánico tipo de la casa.
5. **FACHADA LIBRE:** Los pilares están retranqueados de la fachada hacia el interior de la vivienda de modo que el suelo continua en voladizo, por lo que la fachada se entiende como una membrana tensa que no soporta ninguna carga cuya composición es totalmente libre.

Estos puntos se plasman en las Villas Parisinas, entre las que encontramos la Villa Roche, La Villa Stein, La Villa Garches... En la Villa Stein, la fachada es en un campo de pruebas que demuestran la independencia del cerramiento y la estructura. Aparece una ventana corrida en todo el cerramiento a varias alturas y la composición se rige por la matemática del número áureo. Esta obsesión por el número es herencia de su educación clásica y le acompañará toda su vida.

La Villa con más importancia en la historia de la arquitectura es la Villa Savoye. En ella expresa de un modo contundente y definitivo sus postulados. Le Corbusier se interesa por fotografiarla, dibujarla y publicarla de manera que sus postulados se difundan por el mundo de la arquitectura.

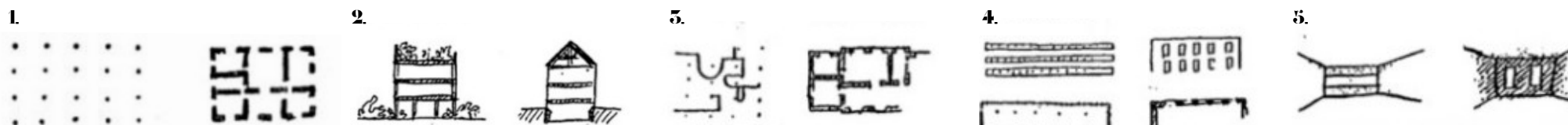


Imagen 7: Esquemas comparativos entre la arquitectura contemporánea y los principios de la nueva arquitectura.

La Villa Savoye destaca sobre el paisaje como un volumen compacto y preciso en contraposición a la naturaleza. Le Corbusier levanta la construcción sutilmente con pilotis dando la sensación que la edificación surge del propio lugar, no que este sufra una agresión por la aparición de un elemento extraño. (Imagen 8)

La villa es un paralelepípedo en cuyos cuatro lados se encuentra una ventana longitudinal que abre las vistas hacia el paisaje. La planta libre se puede observar en todas las plantas siendo una retícula neutra, abstracta e isótropa de pilotis a través de la cual se puede componer cualquier tipo de planta. En planta baja es el caso más sonoro ya que le permite adaptar la planta a la entrada de los vehículos mediante una curva.

Otro concepto importante de su obra, el paseo arquitectónico, también se muestra en esta casa. El paseo se realiza a través de una rampa que permite descubrir la arquitectura en movimiento según unos planos cuidadosamente estudiados y organizados por el arquitecto. De esta manera, abre huecos donde le interesa para enmarcar el paisaje, generando secuencias de vistas que recuerdan a un montaje cinematográfico o a las vistas simultaneas de los cuadros cubistas, reflejando la relación entre la arquitectura y su pintura purista heredera del cubismo.

A partir de este momento persigue nuevos intereses, las ideas planteadas no desaparecen pero evolucionan. Las formas burdas se mantienen pero adoptan geometrías más complejas, el blanco desaparece en favor de los valores plásticos de los materiales, los pilotis, ligeros e inmateriales van creciendo haciéndose potentes y teniendo cuerpo. Esto se aprecia en sus edificios del Pabellón Suizo y las viviendas sociales de las Weissenhof Siedlungen de los años 30.

Otro punto de inflexión es el contacto con las vanguardias soviéticas en 1931. A partir de entonces empieza a adoptar las formas con retórica tecnológica como son los arcos parabólicos, que recuerdan a los Hangares de Orly de Eugène Freyssinet que Le Corbusier había documentado en su revista. También adopta la gran escala, la fusión de arquitectura e ingeniería y la consecuente posibilidad expresiva de las formas.

Entre 1942 y 1946, durante la segunda guerra mundial, al no tener proyectos en marcha Le Corbusier inicia un periodo de reflexión y desarrollo de ideas. En esta etapa nace el Hombre Modulo, una versión actualizada del hombre de Vitruvio. Con él Le Corbusier genera un sistema de proporciones relacionadas con la sección áurea y la escala de la figura humana que luego aplicará en su arquitectura.

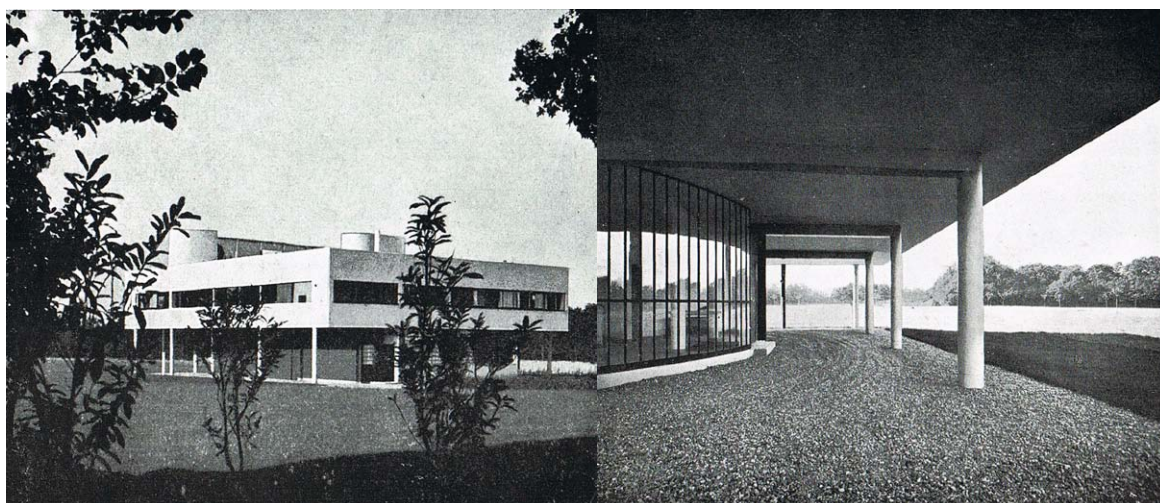


Imagen 8: Emplazamiento en el entorno de la Villa Savoye.

Imagen 9: Planta baja de la Villa Savoye.

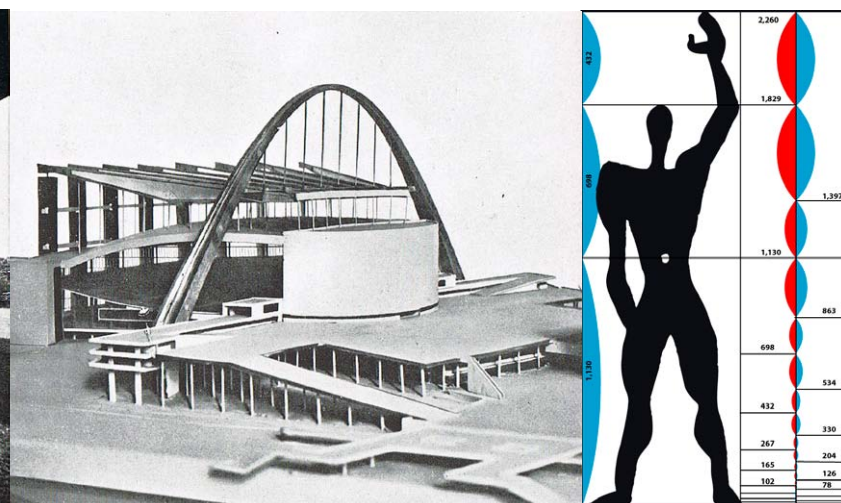


Imagen 10: Proyecto para el Palacio de los Soviets.

Imagen 11: El Modulo.

Paralelamente desde los años 20, Le Corbusier desempeña un trabajo fundamental como urbanista. Es en esta época cuando se fundan los CIAM y el urbanismo empieza a tener una importancia en el movimiento moderno. Como respuesta al habitar moderno a escala urbana, desarrolla cuatro grandes modelos urbanos: la Ciudad Contemporánea de 1922, la Cité Radieuse, la ciudad basada en las reglas las 7 vías y el modelo híbrido de arquitectura-ciudad.

La Ciudad Contemporánea para 3 millones de habitantes plantea un nuevo centro urbano social y funcional que coincide con el centro geográfico de la ciudad. Este centro se materializa por la intersección de dos ejes norte-sur y este-oeste, respondiendo a las composiciones clásicas de Durand (Imagen 12). Los rascacielos que componen este centro también son cartesianos, siguiendo la corriente racionalista francesa y aprovechando al máximo el soleamiento.

El ejemplo más conocido de este modelo urbano es el Plan Voissin de París. (Imagen13) En él Le Corbusier propone la sustitución de la trama urbana de la ciudad, pese a no tener la voluntad de ejecutar el plan. El objetivo de esta propuesta era llamar la atención hacia la reflexión sobre la escala y la complejidad de la ciudad moderna donde es vital la zonificación y separación de las funciones, así como el transporte rápido, las vías de peatones, los espacios verdes...

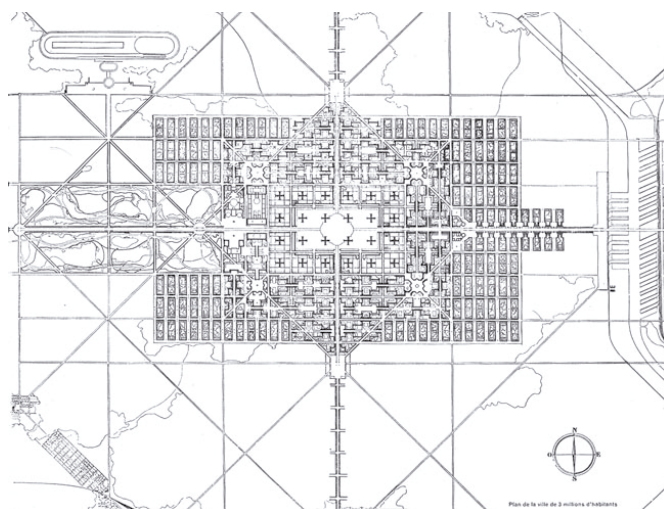


Imagen 12: Esquema ciudad contemporánea



Imagen 13: Plan Voissin de París.

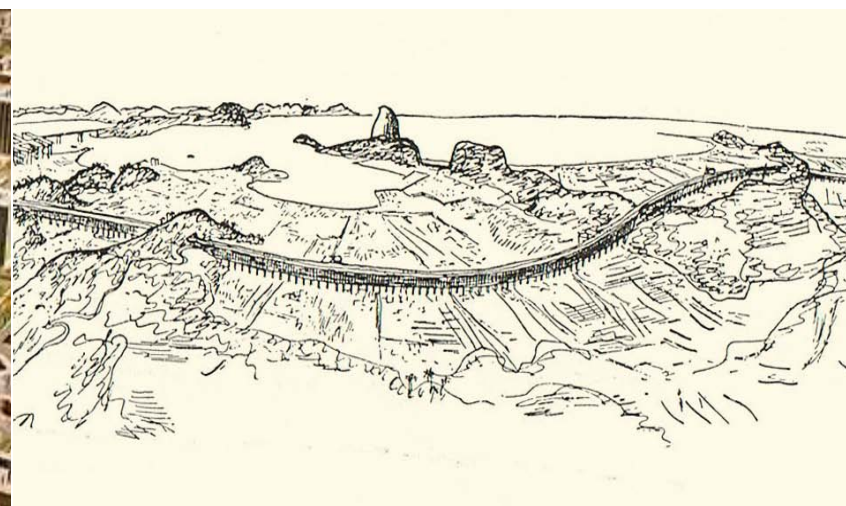


Imagen 14: Boceto del proyecto urbanístico de Río.

Debido a su carácter polifacético, Le Corbusier no se limita al urbanismo en estos planes. En este modelo realiza un ensayo de célula de vivienda, que queda reflejado en el Pabellón del Espirit Nouveau, donde la vivienda vuela sobre un patio a doble altura. La célula podría crecer por adición hasta crear un edificio completo.

Simultáneamente desarrolla el modelo de la Cité Radieuse, donde la ciudad crece alrededor de un único eje longitudinal que es cortado transversalmente con vías de menor jerarquía. En este modelo el centro de la ciudad no está en el centro geográfico del plan, sino fuera del mismo. Como analogía podríamos entender el centro como la cabeza de la ciudad y el eje como la espina dorsal del que irradian vías por la que se distribuye la ciudad.

Su viaje a Río de Janeiro en 1929, le hace cambiar su pensamiento urbanístico. En este viaje descubre la naturaleza violenta y sublime de la vegetación, la escala del paisaje y la organización de las ciudades modernas. Tras sobrevolar las ciudades americanas, las dibuja y descubre el potencial estructurador de la naturaleza.

En el proyecto de Río plantea como eje longitudinal de la ciudad radiante una superestructura a modo de viaducto con una altura media de 100m (Imagen 14). Es una cinta sinuosa que envuelve la bahía, adaptándose y dialogando con la topografía,

en cuya cubierta se dispone una autopista para el tráfico de vehículos rápidos. En alzado el viaducto es una línea recta que contrasta con la sinuosidad del paisaje. En proyectos como el de Sao Paulo o Montevideo se muestra una intención sobre la extensión infinita de la superestructura que coloniza el territorio.

En el proyecto de Buenos Aires, el centro funcional de la ciudad se genera en una península artificial sobre el mar con 5 rascacielos. La vista que se dibuja desde el mar hace que se identifique este elemento contrastando la verticalidad de los rascacielos con la horizontalidad del terreno (Imagen 15). De esta manera el proyecto se fija en el paisaje como lo hace la Acrópolis, empleando un sistema compositivo del clasicismo.

En el plan de Argel da un paso hacia el urbanismo híbrido. En él desarrolla el viaducto de manera detallada, insertando viviendas en la superestructura que coloniza el territorio. Este desarrollo en detalle le permite adoptar, tanto en los proyectos de Argel como en el Ministerio de Educación y Salud de Río, elementos tradicionales para hacer frente al soleamiento, escrutándolos y pasándolos por el filtro de la modernidad. De esta manera los brise-soleil empiezan a ser un elemento más de su caja de herramientas proyectuales protegiendo las fachadas del sol generando pequeñas sombras que resguardan el interior a la vez que son un recurso expresivo en la fachada.

Para desarrollar el modelo híbrido en respuesta a la escasez de vivienda tras la Segunda Guerra Mundial, en 1945 abre todo un campo de investigación en su serie de Unités d'Habitation. En estos edificios se pueden entender como una rebanada del acueducto de Argel y funden la ingeniería civil con las viviendas, generando un ente que se puede entender como ciudad autónoma. Estas Unités tienen una media de 340 viviendas y se configuran por adición de módulos de vivienda como en el Inmueble Villa.

Finalmente, para el plan de Marsella-Sur genera el modelo urbanístico basado en la Regla 7v (de las siete vías). En este modelo no existe una vía principal, sino que las vías de tráfico se irrigan sobre una malla que coloniza el lugar, manteniendo el centro funcional de la ciudad a la cabeza de la malla como en la Cité Radieuse. Un aspecto fundamental de estas vías es su adaptación al flujo de vehículos que soportan, tema defendido por Le Corbusier en la Carta de Atenas de 1933.

Le Corbusier clasificó el rango viario de la siguiente manera:

- V1: Autopista interurbana.
- V2: Eje principal de circulación urbana.
- V3: Red intraurbana de circulación automóvil.
- V4: Vía comercial interior de los sectores.
- V5: Vía peatonal de servicio local.
- V6: Ramificaciones de la V5 de acceso a las viviendas.
- V7: Arteria de ocio, vía peatonal de acceso a los colegios, clubes...

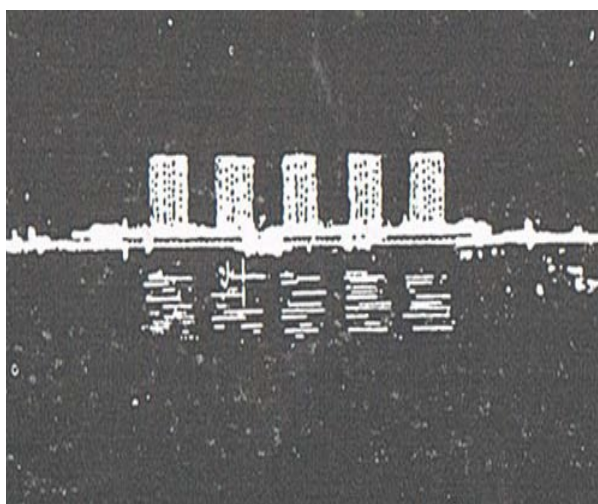


Imagen 15: Vista desde el mar de Buenos Aires.



Imagen 16: Acueducto de Argel.

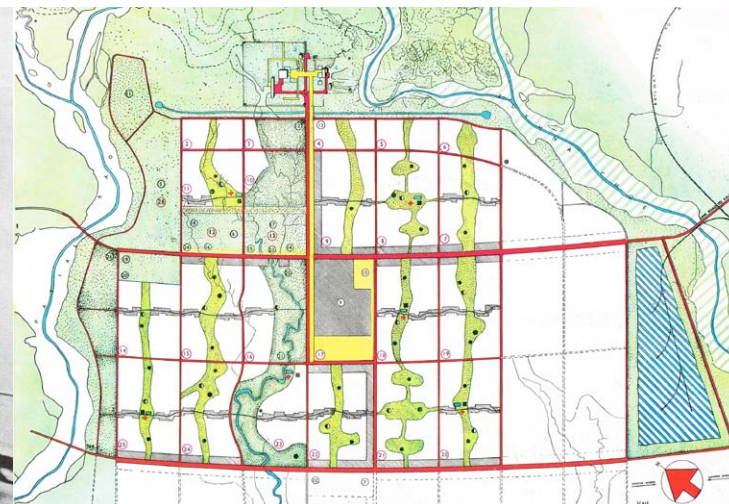


Imagen 17: Esquema 7V, Chandigarh.

A finales de los años 40, recibe a través del padre Marie-Alain Couturier el encargo del Convento de la Tourette y la Iglesia de Ronchamp.

En Ronchamp coexisten muchas influencias ya desgranadas. Por un lado tenemos la implantación en el lugar. La capilla de Ronchamp es un lugar de peregrinaje y de culto en lo alto de una colina, por lo que Le Corbusier aplica los principios de aproximación estudiados en los templos griegos (Imagen 18). También existen los restos de la capilla derruida por la guerra, cuyos restos recoge y reutiliza en la construcción de la nueva capilla, trabajando con la preexistencia física y emocional de los habitantes del lugar. Finalmente recurre a las formas acústicas de su pintura para generar una arquitectura que funciona como resonador de los ecos de la cualidad mística del lugar.

El proyecto es un compendio de formas vinculadas a la experimentación del hormigón y sus posibilidades. La cubierta parece pesada y densa desde el exterior, recordando a las formas de las alas de los aviones. En el interior la sensación es totalmente la opuesta, la cubierta parece que flote sobre los muros y que está separada de los mismos por un haz de luz apoyando puntualmente. Este juego de diferencias entre el exterior y el interior, también ocurre en las fachadas. Los muros parecen masivos desde el exterior, pero huecos desde el interior, un contraste entre el positivo y el negativo, concibiendo una fachada con significado.

En 1953 Le Corbusier reinterpreta la tipología del monasterio clerical en el convento de Sainte Marie de la Tourette, haciéndola suya mediante un juego de inversiones. El claustro, recinto privado organizador de la vida monacal, no se excava de la volumetría del edificio si no se construye. Le Corbusier construye el edificio de la iglesia al que contrapone una pieza en U (Imagen 20), dejando caer la pendiente del lugar por debajo del edificio.

Otro de los aspectos importantes en el convento de la Tourette es el uso de la luz como un material más que tensiona los espacios interiores en determinados puntos del día. Además, el ritmo irregular de los montantes de hormigón en los paramentos, diseñados acorde a las proporciones del Modulor, hace que la luz y sombra surja como una composición musical en los espacios interiores. (Imagen 21)

Dentro de la iglesia del convento, la luz y el color toman mucha presencia en la cripta, aunque el punto culminante de la coreografía lumínica comienza con la puesta de sol. Una ranura en la cima de la pared oeste dibuja líneas de luz a lo largo de las paredes laterales. A medida que el sol cae, las líneas se mueven lentamente, generando una atmósfera dramática que aumenta hasta que la luz golpea el plano de la cubierta inclinada. Este efecto cambia con las estaciones del año debido a la intensidad e inclinación del sol.



Imagen 18: Emplazamiento Ronchamp.



Imagen 19: Interior de la capilla.

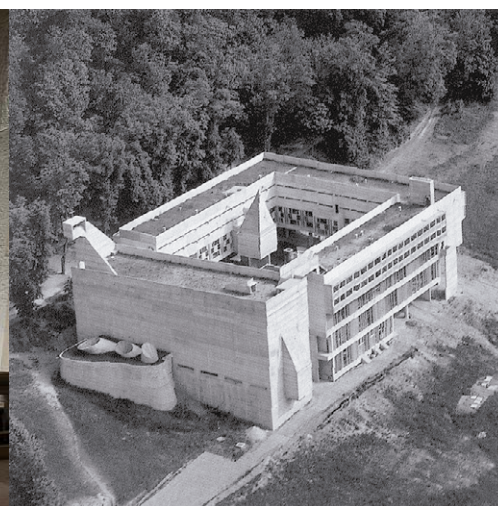


Imagen 20: Vista aérea del convento.



Imagen 21: Pasillo del claustro.



Finalmente en 1951, Le Corbusier recibe el encargo de una ciudad totalmente nueva y, para enfrentarse a este nuevo reto, desarrolla el último modelo urbanístico basado en la Regla de las 7 vías. Le Corbusier dividió la ciudad en sectores y cada uno de ellos funciona como una ciudad autosuficiente, con templos, mercados y escuelas a las que se puede llegar andando desde cualquier punto en diez minutos.

En Chandigarh, el capitolio, centro funcional de la ciudad, se mantiene a la cabeza de la malla de vías. En el desarrollo del capitolio se tuvo que enfrentar a la naturaleza y el paisaje del Himalaya, que hacían que la referencia visual del centro de la ciudad sobre el entorno que prevalecía en sus anteriores propuestas se difuminase. Para intentar paliar este problema de escala Le Corbusier esponja los edificios en el paisaje disponiendo de láminas de agua para hacer más grande la arquitectura. (Imagen 24)

En estos edificios emplea las mismas geometrías resonantes que en Ronchamp, utilizando cubiertas y pórticos para generar sombras. Bajo la luz india consigue la máxima expresión de la sombra, del toldo de abrigo, pero en ella Le Corbusier se topa con la paradoja de construir sin medios (Imagen 23). El arquitecto más moderno y radical se encuentra bajo la merced de los problemas constructivos del lugar, lejos del mundo de la tecnología y la industrialización que predicaba. Pese

a ello consigue emplear el revés tecnológico, aprovechando la falta de calidad en la ejecución para explotar al máximo la expresividad de los materiales.

En contraste con la escala urbana de Chandigarh, Le Corbusier desarrolla todas las posibilidades del espacio mínimo en su retiro del Petit Cabanon en Roquerburne-Cap-Martin. Para su diseño abandonó sus investigaciones sobre los nuevos prototipos de vivienda moderna, y regresó a uno de los arquetipos de la arquitectura, la cabaña. Pese a esta vuelta a lo antiguo la cabaña está construida por encargo según las dimensiones del Modulor y está totalmente prefabricada. En el diseño Le Corbusier puso mucho empeño a la hora de situar las ventanas abriendo pequeñas aberturas para observar elementos concretos del exterior como pueden ser un árbol, una roca o el horizonte, realizando un ejercicio similar al del paseo arquitectónico en un espacio de 16m<sup>2</sup>. Con ello consigue realizar un lugar de cobijo con lazos más estrechos con la naturaleza que con la historia de las formas arquitectónicas.

La cabaña nació como lugar de veraneo para él y su su mujer, y se convirtió en su propio retiro espiritual para disfrutar de ese mar Mediterráneo que tanto había aportado a su arquitectura: el color, la luz, las sombras... Finalmente fué en este mar en el que se fue nadando hacia el sol.



Imagen 22: Le Corbusier con los planos de Chandigarh.



Imagen 23: Construcción del capitolio.



Imagen 24: Láminas de agua.



Imagen 25: Interior Petit Cabanon.



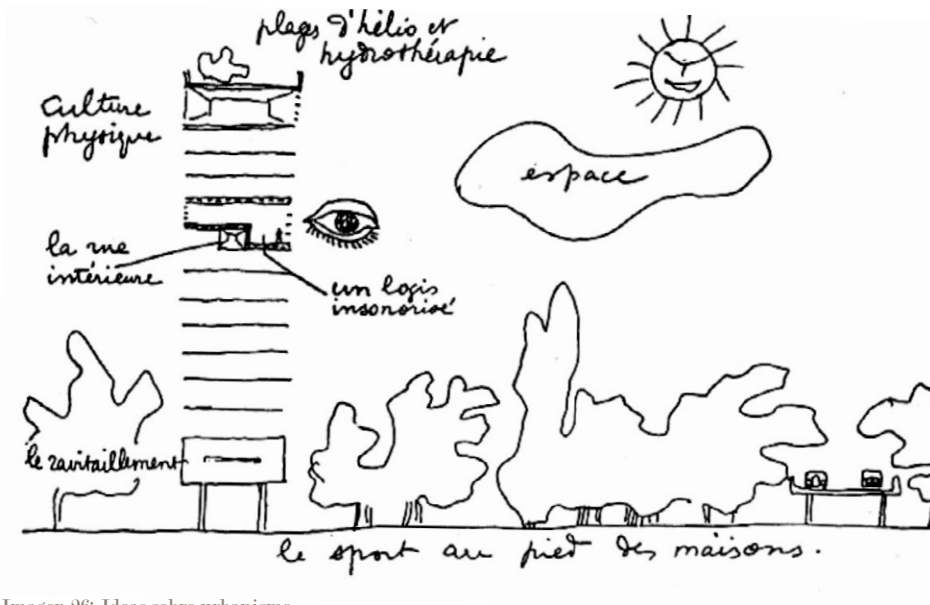


Imagen 26: Ideas sobre urbanismo.

### 5.1 EL CONTEXTO

En 1944 el Ministerio de la Reconstrucción y la Urbanística de Francia se enfrentaba a los problemas suscitados por la Segunda Guerra Mundial: La destrucción de un importante número de viviendas, la crisis en el sector de la construcción debido a su prolongada inactividad y el crecimiento incontrolado de la ciudad dado el éxodo masivo a las ciudades y la consecuente promoción de viviendas en el extrarradio.

El ministro Clauduis Petit afrontó esta labor desde dos frentes: la planificación a largo plazo y las intervenciones concretas que atraían el interés del público. Dentro de este último grupo podemos encontrar los proyectos de Perret para El Havre o Amiens, que resuelven la construcción de un gran número de viviendas en la periferia mediante elementos estandarizables pero no aciertan al resolver las diferentes escalas.

En 1945, bajo las órdenes del ministro Raoul Daunry, Le Corbusier recibe el encargo de la Unité d'Habitation de Marsella tras un largo periodo de inactividad y reflexión sobre su carrera entorno a los problemas del urbanismo y los nuevos modos de habitar. Debida su inquietud respecto a las nuevas formas de vida, exige como condición la derogación de toda normativa vigente sobre la construcción de viviendas al aceptar el proyecto.

## 5.2 PRINCIPIOS DE LA CIUDAD VERTICAL

Dada la evolución de su pensamiento urbanístico, Le Corbusier decide resolver la producción masiva de alojamientos mediante el modelo híbrido ciudad-edificio. Para ello generó un volumen rectangular, lineal y de crecimiento vertical de dimensiones 24x137x56m, recurriendo a una volumetría ya ensayada en el Pabellón Suizo donde el volumen de los dormitorios descansa sobre un número reducido de soportes de dimensiones colosales.

Esta solución deriva del estudio de la relación del hombre moderno con el paisaje. Como explica en el libro *The Marseilles Block*, Le Corbusier pensaba que la gente se mudaba a los suburbios con el sueño de descansar y estar en contacto con la naturaleza, pero si cientos de miles hacían lo mismo, se encontrarían con un paisaje roto. Si se organiza correctamente, se puede llevar al hombre de vuelta a la naturaleza y este es el objetivo final que justifica del desarrollo vertical de la Unité d'Habitation de Marsella.

También realiza un estudio sobre el uso de suelo en distintas tipologías edificatorias a la hora de tomar la decisión del desarrollo vertical. (Imagen 28) Una Unité d'Habitation con la capacidad de 1200 habitantes podía ocupar el mismo espacio que las parcelas para diez casas unifamiliares, con la ventaja

de conseguir la imagen bucólica del urbanismo moderno (Imagen 27). Este tipo de edificación, respondía así a las premisas del ministerio ofreciendo gran cantidad de alojamientos, con la menor ocupación de suelo posible.

Otro importante aspecto urbano de la Unité es la singularidad de la planta baja. Le Corbusier quería que la visión del peatón, así como el aire y el sol recorriesen la planta baja. Como dijo André Wogensky, *“El objetivo era desbloquear las vistas. De esa manera las líneas de visión de los peatones ya no se canalizan entre edificios. Pasan por debajo de la vivienda, transformando completamente el diseño urbano”*<sup>1</sup> Para conseguir esto el volumen prismático de las viviendas se sustenta sobre un elemento contenido dentro de los cinco postulados de la nueva arquitectura del propio autor, los pilotis. Los pilotis reducen la ocupación del suelo prácticamente a cero, permitiendo en flujo de personas o incluso vehículos, si se desease, por el solar.

Pese a haber empleado los pilotis ampliamente en sus proyectos anteriores, en la Unité de Marsella Le Corbusier da un paso más en la expresión artística de los

<sup>1</sup> Sbriglio, J. (2004). *Le Corbusier: L'Unité d'Habitation de Marseille*. Basel: Fondation Le Corbusier & Birkhäuser.

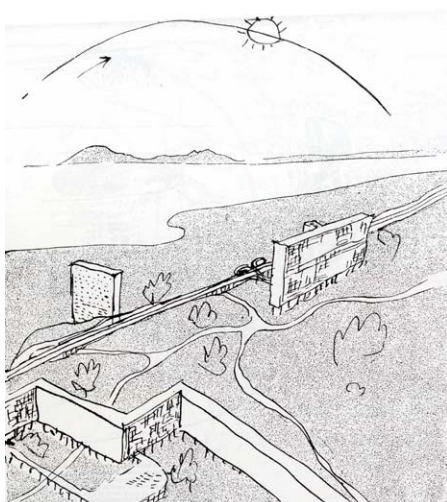


Imagen 27: Esquema urbano.

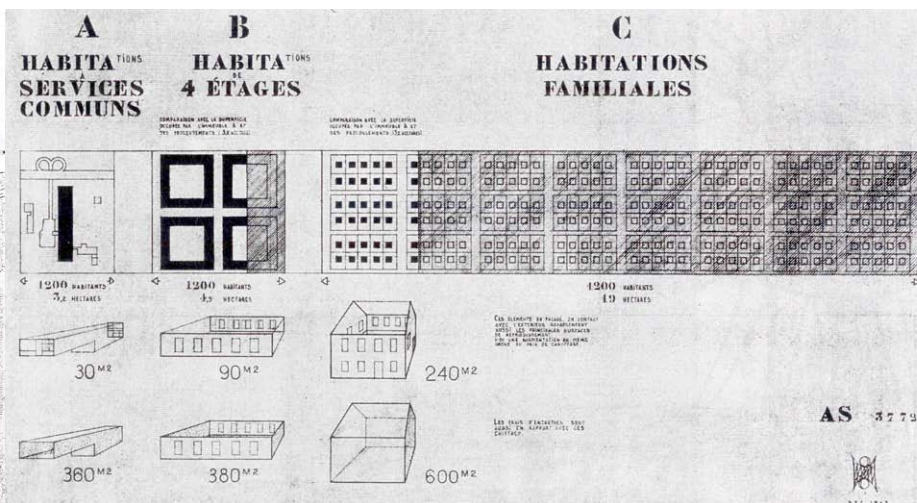


Imagen 28: Comparación entre la ocupación de suelo de distintas tipologías residenciales.

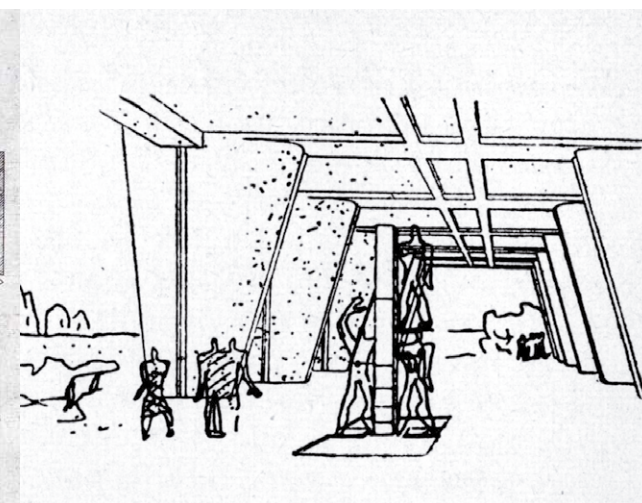


Imagen 29: Intuición planta baja.

mismos. Los pilotis nacen como elementos escultóricos y orgánicos, respondiendo al contexto natural en que se posan y contraponiéndose a la geometría reglada y racional de las células de habitación que descansan sobre ellos. Se genera un espacio de disfrute protegido para caminar y disfrutar de la naturaleza a modo de pórtico griego. En él Le Corbusier encuentra la oportunidad de investigar la expresión plástica del nuevo material, el hormigón armado, mediante el juego estudiado de las tablillas de madera que componen el encofrado, generando un juego de luces y sombras en la propia superficie del material. Además hay que señalar como curiosidad que los tabloncillos de madera del encofrado están colocados oblicuamente marcando la dirección de las barras de acero en el interior.

Los brise-soleils y la pigmentación de los balcones que caracterizan la Unité también nacen de la inquietud plástica del arquitecto. Como mencionado anteriormente, reinterpreta los brise-soleils de la arquitectura vernácula y los adapta al nuevo lenguaje funcionalista moderno, diseñando una fachada altamente técnica descubriendo la posibilidad que el hormigón prefabricado le ofrece. También adopta la policromía de los templos griegos para reducir la austeridad de las crudas fachadas, fundiendo en la arquitectura sus conocimientos en el campo pictórico e histórico para crear un esquema de color que llenará la Unité de vibraciones y luz.

### 5.5 LA CÉLULA DE HABITACIÓN

Pero, no olvidemos el objeto final de la Unité de Marsella, ser el hogar de más de 1200 personas. Las ideas revolucionarias de Le Corbusier sobre el habitar comienzan en el análisis de las condiciones de vida del hombre de los años 40. Según el arquitecto todos los problemas de la época comenzaban en la falta de tiempo dedicado dentro de la habitación propia para desarrollar la libertad básica individual y crecer como personas llevando a cabo actividades personales como la lectura, el dibujo, la meditación...

Como contraposición a esa necesidad personal de aislamiento, nace en la vivienda la necesidad de relacionarse y desarrollar la esencia de la familia (Imagen 32). Como el servicio ya había desaparecido de la unidad familiar Le Corbusier defiende que el hogar, el fuego y la cocina se pueden entender como un único elemento, debiendo articular la vivienda entorno a la cocina. Bajo estos criterios surge el concepto de célula de habitación como la envoltura para el adecuado desarrollo de un nuevo programa de vida, entendido como una máquina, que requiere un aprendizaje por parte del nuevo usuario para hacer uso correcto de la misma.

Dado que Le Corbusier es un amante de las máquinas y hasta en algunos casos describe las viviendas de la Unité como si de máquinas de habitar se tratasen, las nuevas tecnologías y las máquinas forman una parte muy importante en el



Imagen 30: Detalle de la textura de los pilotis.



Imagen 31: Detalle fachada.



Imagen 32: Familia en el salón.

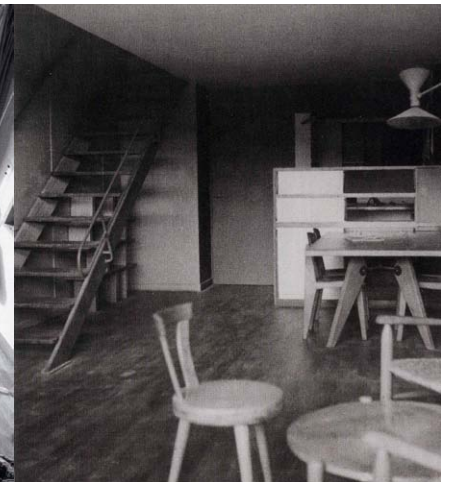


Imagen 33: Espacio cocina-salón.

desarrollo del proyecto. Cada una de las células de habitación dispone de un control de luz, ventilación y sonido mediante los últimos avances tecnológicos así como calefacción centralizada, agua caliente, teléfono privado, baño completo, ducha... Otro aspecto a mencionar, en cuanto a la industrialización y tipificación de la célula es que todos los elementos están diseñados acorde con las series numéricas del Modulor.

Además Le Corbusier cree que la vivienda tiene que adaptarse a las necesidades de cada persona a lo largo de su vida. De esta manera estudia las distintas etapas personales de un individuo y diseña más de 23 variaciones del apartamento tipo para resolver las necesidades que pueda tener desde una pareja recién casada con la única necesidad de una habitación, hasta una familia con 4 niños. La idea de Le Corbusier en cuanto a la evolución de una persona dentro de la Unité es que vaya cambiando de casa dentro de la ciudad vertical según sus necesidades como haría en cualquier asentamiento común.

Pese a las distintas tipologías que se presentan en la Unité de Marsella, todas de basan en una vivienda de dos plantas con sección en L (Imagen 34) que encaja con otra L opuesta, generando un pasillo de acceso en la planta intermedia. Esto genera la subdivisión dentro de las tipologías en apartamento superior y apartamento inferior.

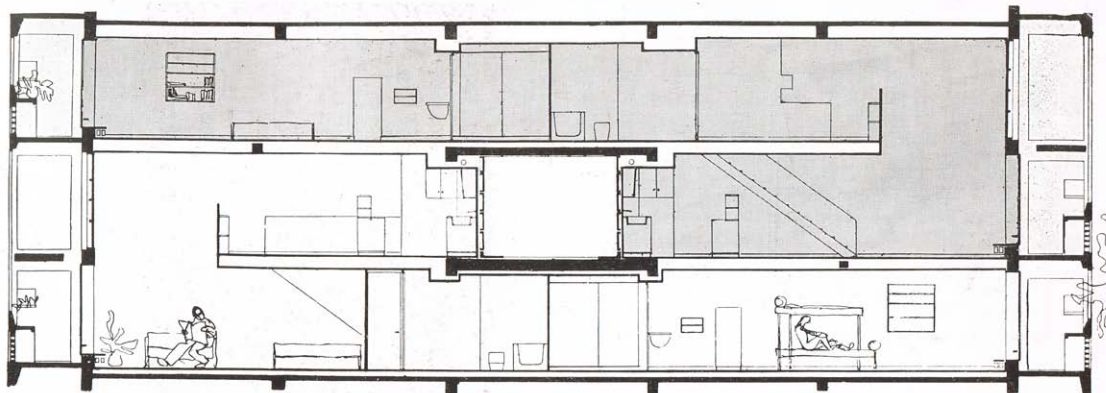


Imagen 34: Sección transversal célula.

Si se analiza la vivienda tipo desde la cual se desarrollan el resto, el apartamento E superior de 98m<sup>2</sup>, el primer aspecto significativo al acceder a la célula es la caja que se encuentra al lado de la puerta de la misma a modo de buzón. Esta caja de madera accesible desde el exterior tiene conexión directa con la "nevera" de la cocina. Este cajón se empleaba para que el distribuidor de hielo pudiese suministrar a las viviendas mediante un sistema rápido y eficaz. Un elemento similar era empleado para que las tiendas de la Unité suministrasen sus productos.

El acceso a la vivienda se realiza a través de un pequeño vestíbulo que actúa como una zona de transición entre la semioscuridad de las calles y los apartamentos bañados en luz. El primer elemento de la vivienda es la cocina, que como mencionado anteriormente pasa de ser un espacio olvidado y lúgubre a tomar el control de la vivienda.(Imagen 36)

Como extensión de la cocina aparece la zona de comedor que se funde con la sala de estar a doble altura, que a su vez fluye hasta el balcón. Se puede decir entonces que la célula de habitación es una sucesión de espacios funcionales. La sala de estar pese a no ser muy ancha (3,44m) adquiere una gran sensación de ligereza debido a dos factores: la doble altura del espacio y los rayos de luz directa que iluminan el espacio debido al perfecto estudio del soleamiento de Le Corbusier.

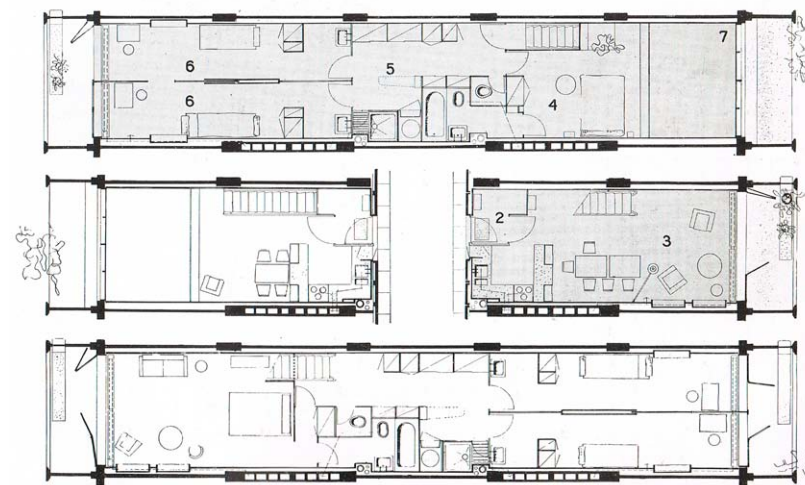


Imagen 35: Plantas de los dos apartamentos que componen un paquete.

En la sala de estar, adyacente al muro de separación entre viviendas, podemos encontrar la escalera que nos dirige al piso superior. (Imagen 37) La disposición a 180° respecto al flujo natural de la planta baja, obliga al usuario a girarse, dejar atrás el paisaje y la luz y adentrarse en otro mundo, enriqueciendo el paseo arquitectónico. Siguiendo la idea de hacer el habitar más fácil, la escalera totalmente industrializada, es diseñada por Jean Prouvé con una pendiente relajada y peldaños muy anchos.

El distribuidor de la planta de dormitorios es un elemento primordial para el funcionamiento de la misma. En él podemos encontrar los ya optimizados espacios de almacenaje desarrollados en 1938 con la colaboración de su primo, Pierre Jeanneret y Charlotte Perriand. También encontramos una ducha que recuerda mucho a la estética naval que inspira a Le Corbusier en la organización de la Unité y el baño completo.

La habitación principal se abre sobre la planta inferior y hacia el ventanal que enmarca el paisaje exterior, permitiendo el control de la vivienda desde el espacio íntimo (Imagen 38). Por el contrario las habitaciones de los niños se abren hacia la otra fachada, teniendo un pequeño espacio exterior propio formado por un banco y una jardinera.

De la habitación de los niños hay que destacar su parecido a las celdas que más tarde utilizará en el monasterio de la Tourette, teniendo una zona de aseo más próxima a la puerta, una zona ocupada por la cama y otra de juegos. La separación entre la zona de juegos se realiza mediante un tabique móvil, que permite conectar ambas habitaciones y disfrutar de más espacio para jugar (Imagen 39). Esto es un ejemplo de la libertad que permite la planta libre donde la estructura es totalmente independiente de los cerramientos.

Pese a todos sus esfuerzos, Le Corbusier es consciente que no puede resolver todas las necesidades personales dentro de la vivienda, por lo que plantea lo que él denomina las extensiones de la vivienda. Las extensiones de la vivienda son un conjunto de servicios comunitarios (gimnasio, tiendas, guardería, hotel, club social, teatro...) que hacen de la Unité una ciudad vertical autosuficiente. Esta idea chocaba un poco con los planteamientos del Ministerio de Reconstrucción, que sólo buscaba la creación masiva de alojamientos al menor coste, por lo que se tuvo que ajustar el tamaño de la comunidad al número suficiente de usuarios para justificar la presencia de los servicios colectivos.



Imagen 36: Prototipo de la cocina.



Imagen 37: Sucesión de espacios funcionales de la planta baja.

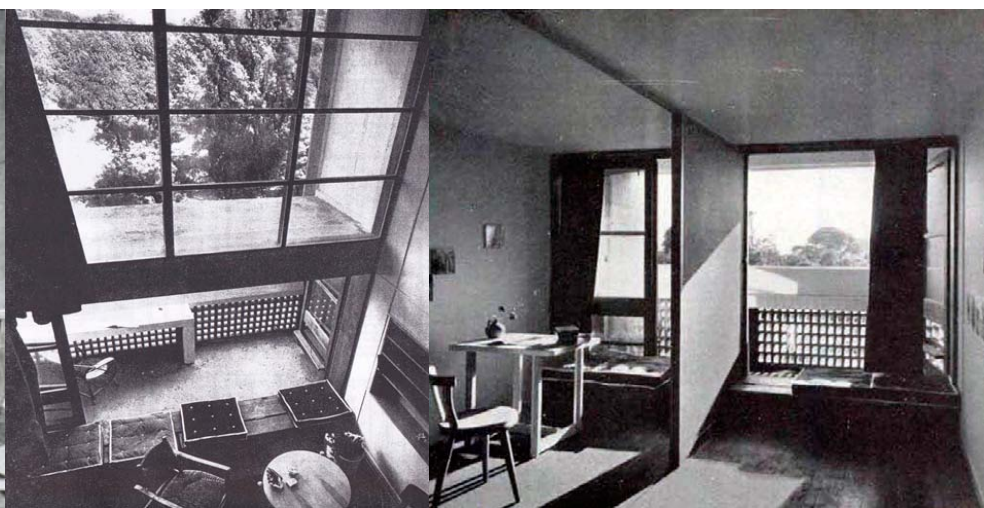


Imagen 38: Visión desde la habitación principal. Imagen 39: Tabique móvil habitación niños.

## 5.4 LA ORGANIZACIÓN DE LA CIUDAD VERTICAL

En un edificio donde se alojan más de 1200 personas, el flujo debe estar muy estudiado y la organización es clave. Para enfrentarse a este reto, Le Corbusier recuerda los esquemas de funcionamiento de un trasatlántico, diseñado para alojar temporalmente a la misma cantidad de personas.

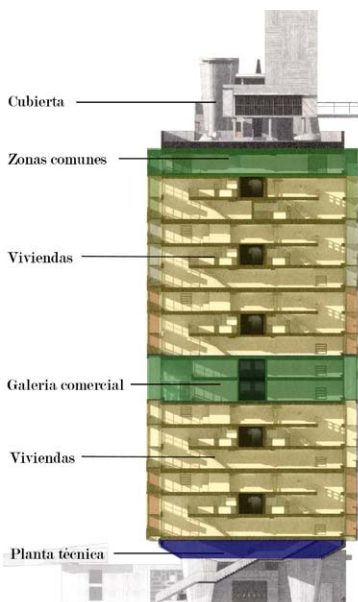


Imagen 40: Sección transversal

De esta manera, la planta baja recibe al usuario mediante el gran pórtico de pilotis y un acceso cubierto, con formas orgánicas, que invitan a acceder al edificio. Los pilotis no sólo tienen una función estética y estructural sino que también sirven para ocultar el flujo vertical de las instalaciones entre sus alas. De esta manera, justo sobre los pilotis podemos encontrar una planta técnica donde las instalaciones se distribuyen y canalizan hacia los patinillos verticales. Si comparamos con un trasatlántico podemos ver como las instalaciones se quedan por debajo de la línea de flotación, que en la Unité será la nueva cota de suelo a 8m de altura desde donde arrancan las viviendas.

Sucesivamente encontramos el cuerpo central del buque, formado por los camarotes con un diseño racional a los que se accede a través de los pasillos. Las células de habitación de la Unité tienen una sección en L que permite encajar dos viviendas generando un pasillo de distribución al que Le Corbusier denomina las calles. (Imagen 45) Así, dos viviendas se organizan en paquetes de tres plantas y se accede a las mismas por el piso intermedio. Esto le permite agilizar el flujo de personas y ahorrar en elementos de distribución ya que los ascensores y escaleras solo dan acceso a las viviendas una vez cada tres plantas.

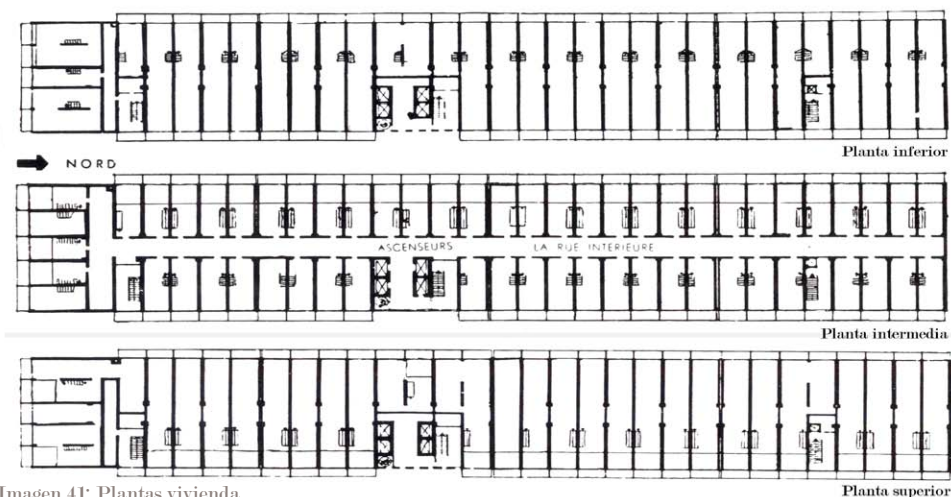


Imagen 41: Plantas vivienda



Imagen 43: Planta técnica.



Imagen 43: Vista inferior planta técnica.



Imagen 44: Núcleo de comunicación vertical.



Imagen 45: Pasillo de acceso a las viviendas.



En la séptima y octava planta el bloque de viviendas se ve invadido por una galería comercial, donde podemos encontrar tiendas, oficinas, despachos y un pequeño hotel. Estos son parte de la extensión de la vivienda y responden a las necesidades funcionales del habitante del edificio. Esta distinción de uso dentro del bloque se expresa en la fachada, donde los brise-soleils tipo de la vivienda se reemplazan por unas lamas verticales también de hormigón prefabricado.

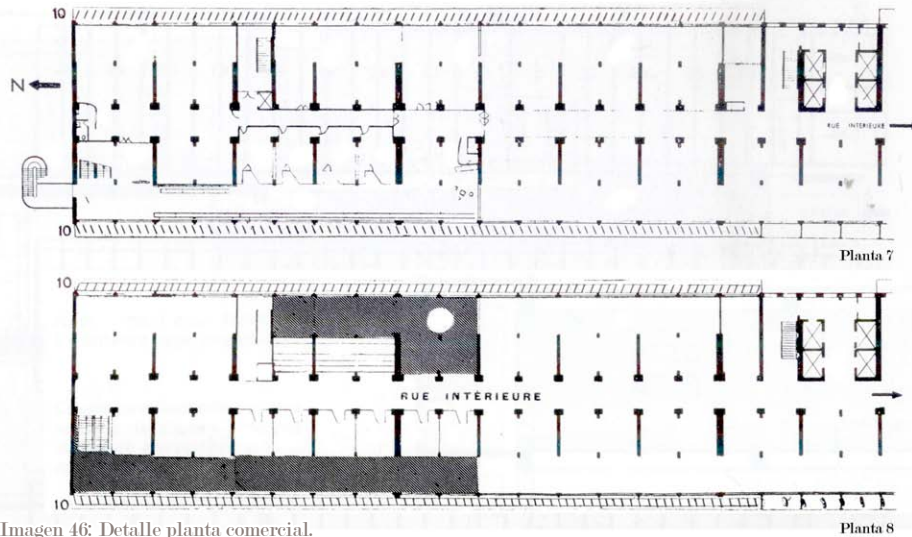


Imagen 46: Detalle planta comercial.

La sucesión de paquetes de tres plantas de viviendas se reanuda hasta la planta 17, donde las viviendas se combinan con algunos elementos que se rehunden de la cubierta. La cubierta, en la décimo octava planta es, como en el trasatlántico al que nos referíamos, el espacio donde realizar las actividades de ocio al aire libre. Para representar esta libertad del alma, Le Corbusier emplea formas alabeadas, aprovechando la expresividad de la forma que le permiten las superficies de hormigón que ornamentan la cubierta y aumentan el contraste con los elementos funcionales inferiores.

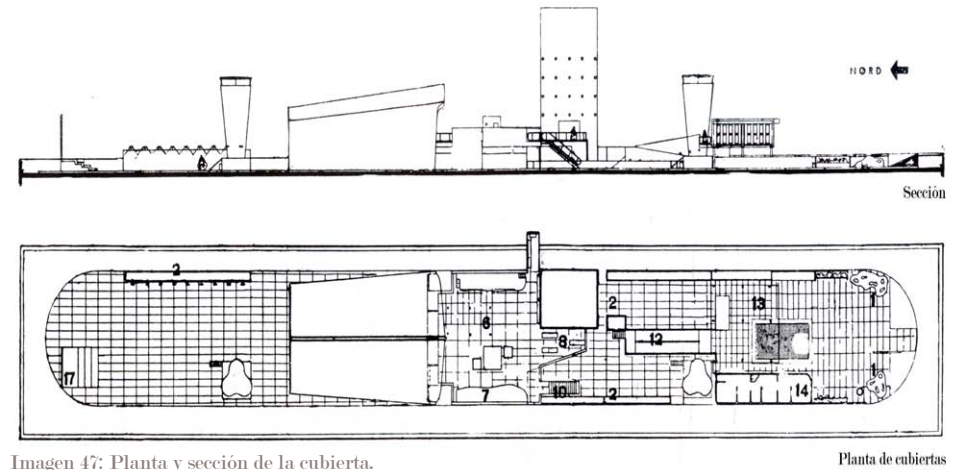


Imagen 47: Planta y sección de la cubierta.



Imagen 48: Galería comercial.

Imagen 49: Habitación del hotel.

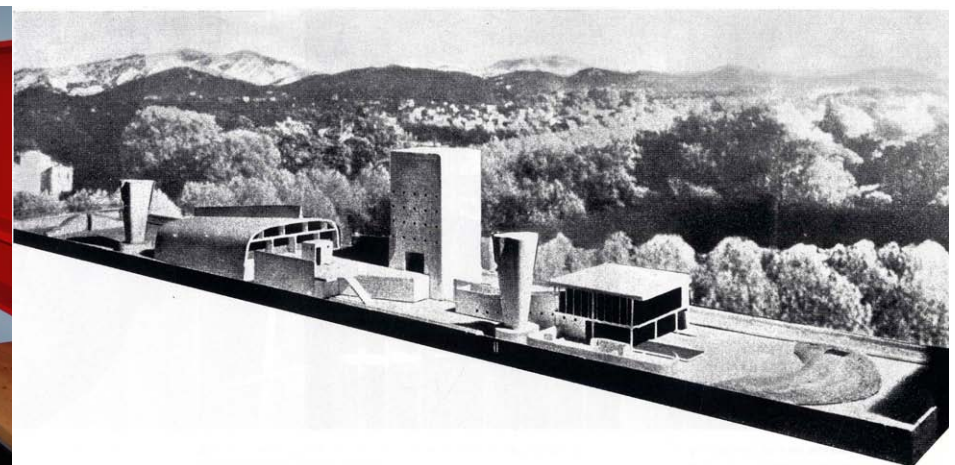


Imagen 50: Maqueta de la cubierta.

La cubierta se puede entender como una composición pictórica de pabellones con función social, como lo son la guardería, el gimnasio y el solárium, o como organismos funcionales, como las chimeneas de ventilación, la caja de ascensor o la pantalla de proyecciones, cuyo fondo de cielo y montañas queda recortado por los altos parapetos.

Los parapetos son fundamentales para la construcción artística del paisaje ya que delimitan la visual, impidiendo ver el paisaje más próximo (Imagen 51). En las juntas estructurales se ensancha la fisura en ellos para ser puntos de contemplación. Este recurso es empleado posteriormente en Chandigarh.

La pantalla de proyección también sirve para cerrar las visuales a un paisaje menos interesante, sirviendo también de protección a los vientos mistrales y como punto de encuentro social en las noches de verano a modo de teatro al aire libre.

En la cubierta Le Corbusier ve la posibilidad de la experimentación plástica con el hormigón. En la zona de la guardería crea montículos o falsas montañas para que los niños jueguen, utilizando el material de manera novedosa, ya que no se atrapa en encofrados, sino que fluye libremente.

Las chimeneas (Imagen 52), más estrechas en la base que en la coronación, tienen una forma ondulada que expresa la capacidad del hormigón de trabajar como una superficie maleable. La construcción de estos elementos está llevada a cabo con hormigón proyectado sobre una plancha de metal conformado, evitando el uso de encofrados. Es la primera vez que Le Corbusier emplea estas técnicas y afirma: *“El hormigón reforzado hace posible construir muros, curvas, superficies de forma libre, que no sabíamos construir hasta el momento”*<sup>1</sup>

En el gimnasio también emplea este tipo de formas alabeadas. La cubierta es una cascara grecada en su proceso metamórfico-creativo. Es un barco del revés, un naufragio que alude al viaje de Homero por el Mediterráneo hasta la acrópolis contemporánea. Recuerda así al gran referente del trasatlántico que es el icono de la civilización mecánica y el referente estrella de la Unité.

Finalmente, como contraposición a estos elementos de forma libre encontramos la guardería, que recuerda morfológicamente a la Ville Savoye (Imagen 53) y la torre del ascensor. Esta última es un gran volumen prismático que se eleva unas 5 plantas que se aligera mediante ventanas cuadradas de pequeñas dimensiones que recuerdan a los elementos de aligeramiento en la fachada de los brise-soleil.

<sup>1</sup> Gargiani, R., & Rossellini, A. (2011). *Le Corbusier, Béton Brut and Ineffable Space, 1940-1965 Surface Materials and Psychophysiology of Vision*. Lausanne: EPLF Press.

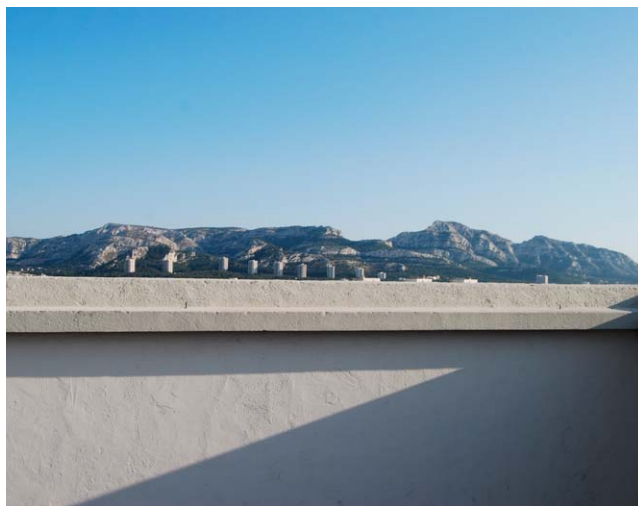


Imagen 51: Control sobre el paisaje.



Imagen 52: Gimnasio, chimenea de ventilación y torre.

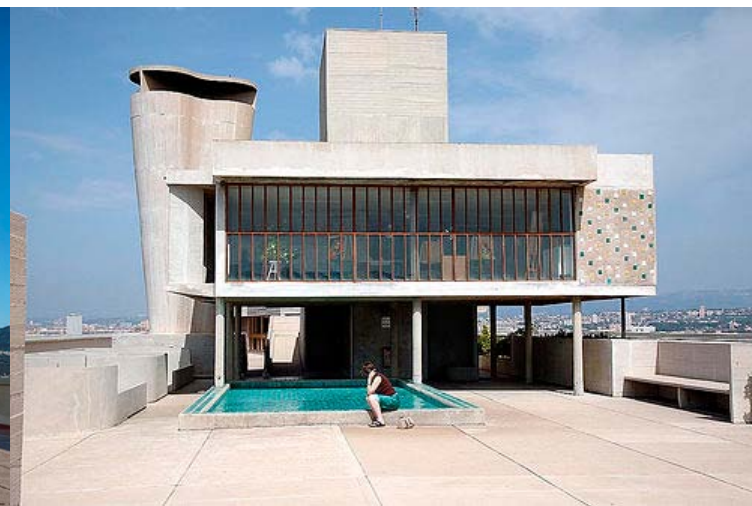


Imagen 53: Guardería, chimenea de ventilación y torre.



Imagen 54: Niños realizando una actividad.



Imagen 55: Niños en el recreo.



Imagen 56: Acto de inauguración de la Unité.

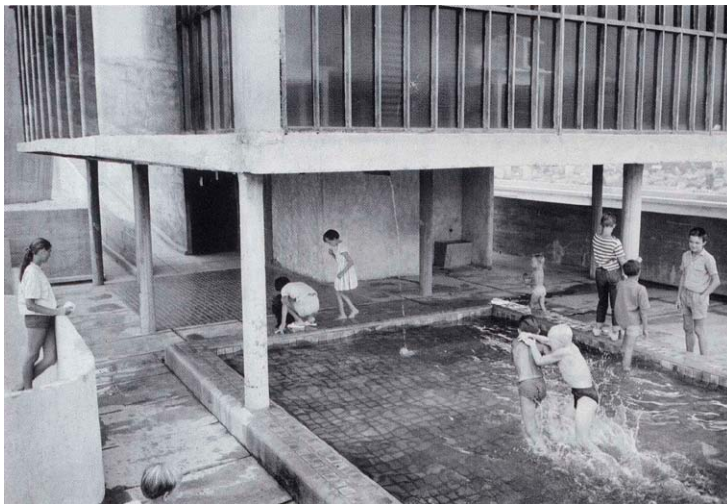


Imagen 57: Piscina en uso.



Imagen 58: Niños jugando en el solárium.



Imagen 59: Niños escalando las montañas artificiales.

## 5.5 LA MATERIALIDAD

Con el objetivo de optimizar el proceso constructivo, reducir presupuestos y tiempo como si de un producto industrial se tratase, Le Corbusier intenta seriar todos los materiales y técnicas constructivas de la obra. Los materiales principales son: el hormigón, el acero, el vidrio, la madera y el yeso laminado.

El hormigón está presente en dos formas. Todos los elementos estructurales están contruidos mediante hormigón in situ (Imagen 54) en los que, como quedan ocultos, simplemente se procura asegurar su funcionalidad. Los elementos vistos reciben un tratamiento específico y cuidadoso para obtener el mejor resultado. Al ser la primera obra de Le Corbusier de hormigón visto, este investiga la calidad de las superficies mediante el grano del agregado y el enconfrado artístico. Para compensar el tono gris dominante y contrastar con el aspecto pétreo de las construcciones industriales de Perret añade color en algunos puntos.

Los elementos de acabado como las fachadas o los brise-soleils son elementos de hormigón prefabricados. En el caso de los brise-soleils se colocaban durante el proceso de construcción de la estructura, por lo que quedaban embebidos en la misma durante el hormigonado.

Los paneles de revestimiento opacos de la fachada norte, este y oeste están hechos de "Contex" y contienen grava blanca típica de la región Marsellesa (Imagen 55). Estos se fijan a la fachada interior de fábrica cerámica mediante ganchos.

Para construcción interior de las células de habitación se emplearon materiales innovadores. Las paredes se construyeron con planchas de yeso laminado sobre montantes de madera que acababan de salir al mercado en los años cincuenta, así como aislamiento de fibra de vidrio, contrachapados y paneles de fibrocemento.

La sección tipo del pavimento de las mismas está compuesto por una estructura de viguetas metálicas que se apoyan en las vigas principales separadas por almohadillas de plomo que permiten la dilatación diferencial entre los elementos, así como aislamiento ante impacto. Sobre esta estructura metálica se apoyan unos paneles de madera con tratamiento ignífugo cubiertas por una lámina de asfalto como elemento de aislamiento acústico y de olores. Finalmente se coloca un pavimento de madera de roble maciza.

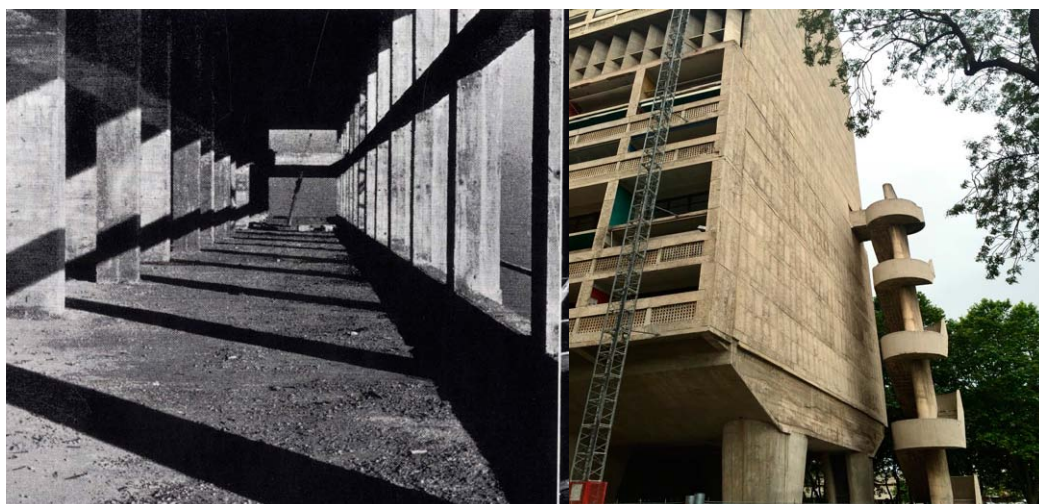


Imagen 54: Imagen de la estructura de hormigón in situ.

Imagen 55: Detalle brise-soleil y paneles prefabricados.

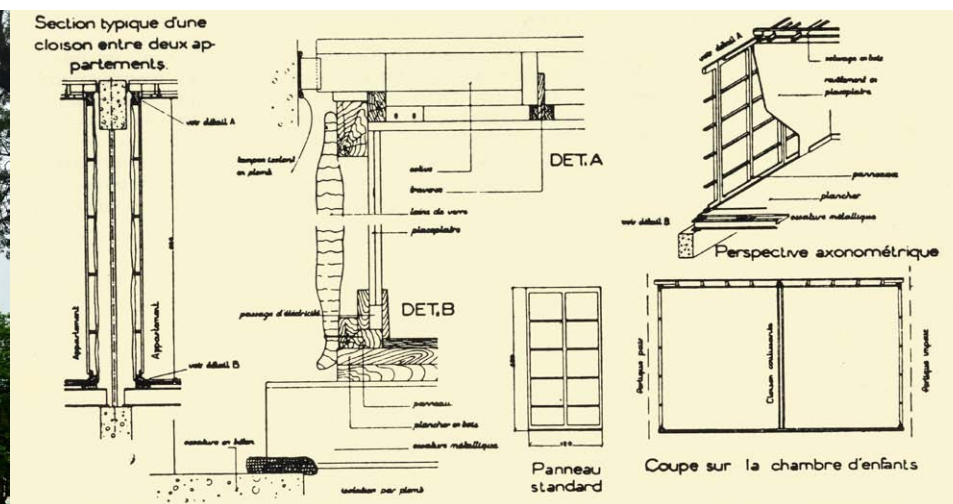


Imagen 56: Detalles constructivos vivienda.

## 5.6 LA CONSTRUCCIÓN

El proyecto de la Unité d'Habitation comenzó en 1945 sin parcela asignada. Durante los siguientes 2 años se investigaron hasta 4 emplazamientos diferentes en Marsella, resultando la implantación final en el número 280 del Boulevard Michelet. El año de 1947 supuso un trabajo a contrarreloj para adaptar el proyecto a la parcela asignada que culminó en la ejecución de los cimientos del primer pilotis cuando aún no se contaba con el permiso de urbanístico pertinente. La construcción se llevó cabo sin esta licencia hasta que en 1949 se eximió de la necesidad de estos trámites para viviendas experimentales.

La construcción comenzó con el tercer bloque, el contenido entre el extremo norte y el bloque con el núcleo de comunicación, al ser el menos problemático. Para ello parte del taller técnico de Le Corbusier, ATBTAT, se instaló de manera permanente en la obra, llevando a cabo decisiones y modificaciones de último minuto en el terreno. Los mayores problemas se encontraron a la hora de encajar los elementos prefabricados como la fachada o los paneles de vidrio con la estructura de hormigón in situ. También hubo problemas de almacenamiento, ya que las fábricas producían los productos prefabricados a mayor ritmo que los operarios las colocaban en obra.

1949 marcó un antes y un después en la construcción. En este año se diseñó la escalera exterior para evacuación de la planta de servicios, se finalizó el diseño de la planta de cubierta y se instaló un apartamento prototipo en la obra como referencia a la hora de construir, así como para enseñárselo al público. Estos prototipos tuvieron mucho éxito ya que fueron visitados por los participantes del séptimo CIAM en Bérgamo y se instaló otro en el Salon des Arts Ménagers de París en 1950.

Ese mismo año se finalizó la estructura de hormigón de la Unité y se prosiguió ensamblando los elementos prefabricados de las viviendas. En 1951 se finalizó el sistema de calefacción y se estableció el sistema de color de los balcones. Finalmente en el verano de 1952, mientras se finalizaban las obras de acondicionamiento de la planta baja y el entorno, se instalaron los primeros ocupantes y el 14 de Octubre se inauguró el edificio.

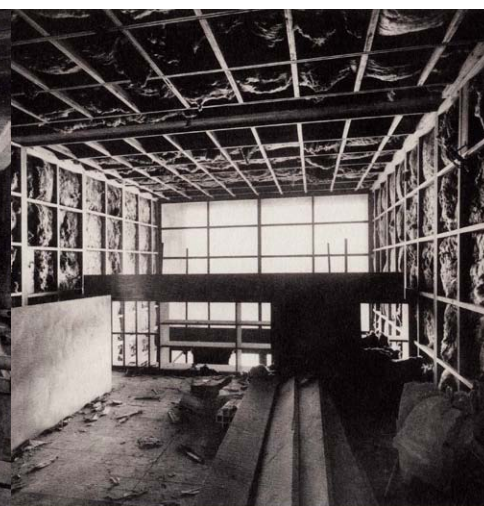
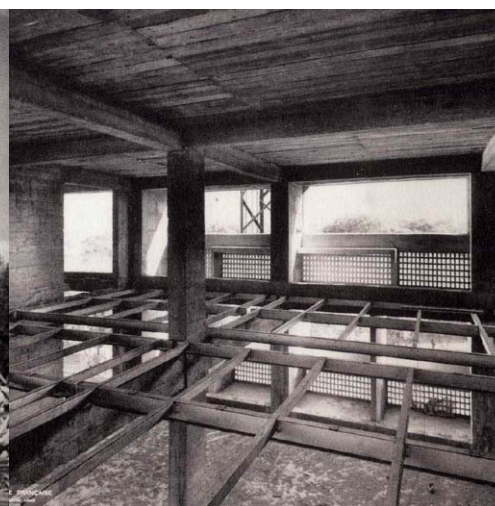


Imagen 57: Construcción de las primeras plantas.

Imagen 58: Construcción del primer bloque.

Imagen 59: Estructuras de hormigón y metálica ejecutada. Imagen 60: Ejecución de los acabados de la célula.

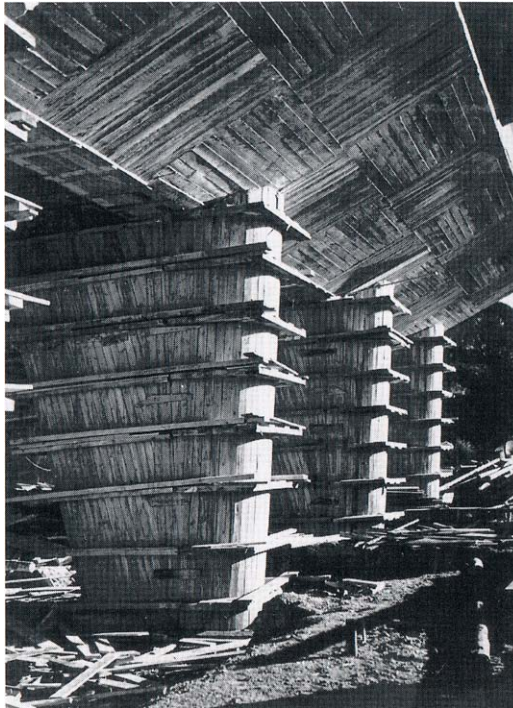


Imagen 67: Encontrados planta baja.

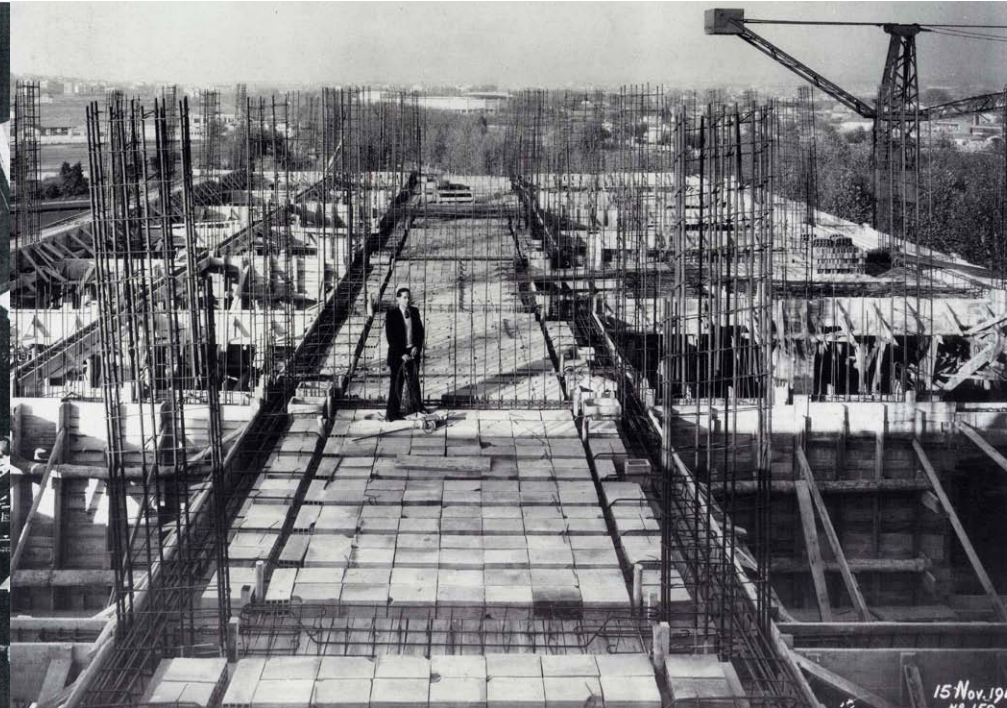


Imagen 68: Construcción de los forjados de nervios in situ.

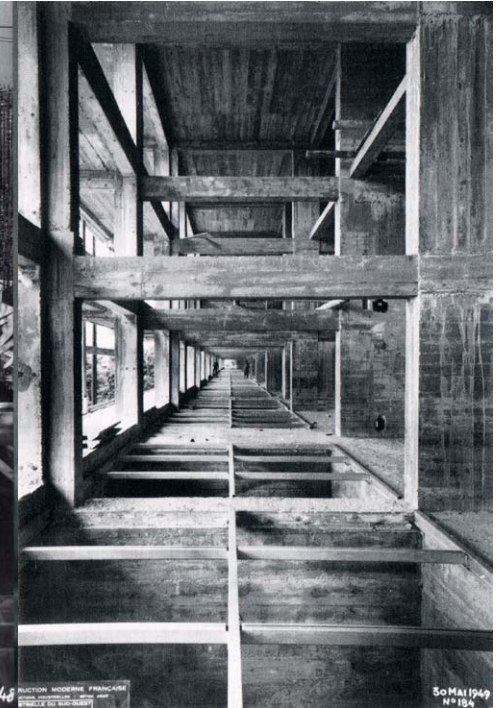


Imagen 69: Estructura principal y viguetas metálicas.

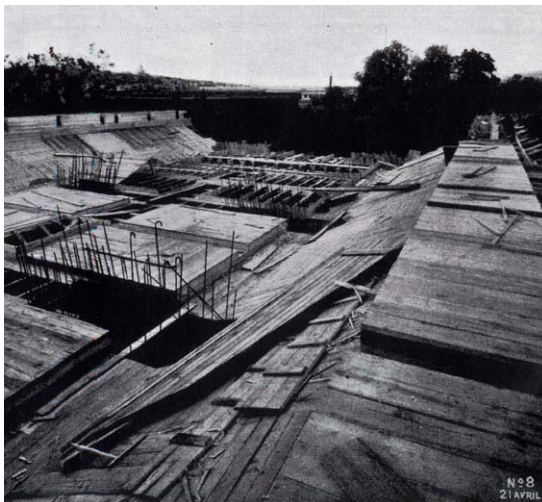


Imagen 70: Vista superior del encofrado.



Imagen 71: Pilotis desencofrados.



Imagen 73: Forjado continuo planta 7.

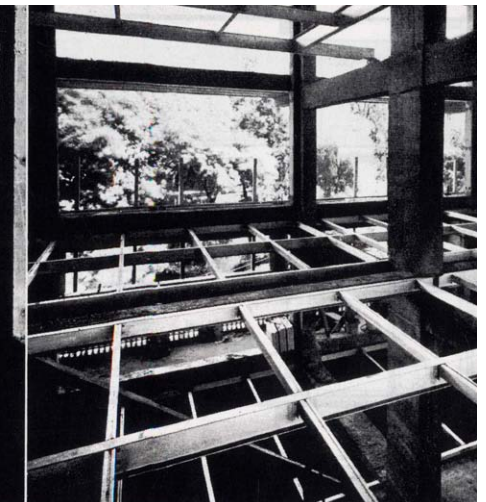


Imagen 74: Construcción de los forjados de las células.

## **4. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA**

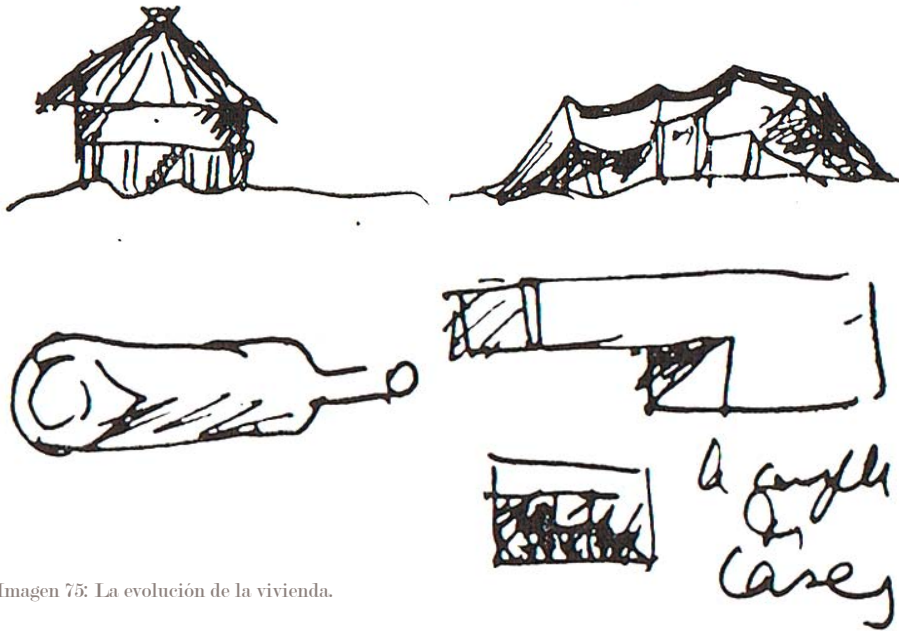


Imagen 75: La evolución de la vivienda.

*“Durante siglos se han construido ciudades mediante calles, casi con necesidad militar. Las puertas principales se abren a la calle, las calles esparciéndose en todas las direcciones. Las viviendas tienen una forma arbitraria en tamaño y material de construcción, olvidando su forma esencial. Mientras estas condiciones prevalezcan es imposible llevar la producción en masa a las viviendas. La arquitectura se ha dejado atrás en la época de la máquina- ese es el problema.*

*La cabaña, por el contrario, es algo absolutamente real. Es un producto de su entorno y es verdadero a su tipo. También lo es la tienda del nómada. Y el aeroplano, volando sobre el desierto. Podremos encontrar diferentes estilos de tienda en distintas regiones, adaptándose a las condiciones del entorno. Como el aeroplano, la cabaña del nativo y la tienda del nómada no tienen una forma arbitraria, son las viviendas del hombre las que desafían la ley del orden.*

*Hemos hecho un importante paso a delante, introduciendo un concepto totalmente nuevo en la teoría de las viviendas, y en la práctica. La vivienda se considera como un elemento en sí mismo. Un contenedor. Contiene una familia. Un ente en sí mismo, con su propia realidad, con sus propios criterios, con sus propias necesidades. Es una botella.”*

Le Corbusier, 1953. The Marseilles Block



El planteamiento de Le Corbusier en cuanto a la estructura de la Unité deriva de la suma de dos elementos básicos: un basamento libre donde el edificio descansa sobre grandes pilotis y una retícula tridimensional de vigas y pilares que se posan sobre él.

Analizaremos primero el elemento superior, que comprende la estructura desde la primera hasta la decimoctava planta. Metafóricamente Le Corbusier se refiere a esta parte de la estructura como un sistema "Bouteille et Boutellier" (botella y botellero). Si admitimos el concepto de que la vivienda en sí es un elemento propio, con su propia realidad y criterios, y esta contiene una familia, la vivienda es una botella como mencionado anteriormente. Si se perfecciona la botella, diseñándola con rigor y observación como si esta fuera una máquina, esta se podrá insertar en cualquier lugar indistintamente. En este caso se requiere un esqueleto resistente, al que también podemos denominar el botellero. (Le Corbusier, 1953)

De esta manera Le Corbusier entiende las unidades habitacionales como elementos prefabricados que simplemente han de insertarse en una estructura construida in situ (Imagen 76), pero no puedo llevar a cabo esta idea, ya que la industria no podía prefabricar las casas hasta el punto de ser módulos independientes que simplemente había de insertar. Pese a esto se pueden identificar dos elementos estructurales independientes: una retícula de vigas y pilares que actúan de

botellero y el conjunto de viguetas metálicas, contrachapados y tableros de yeso que conforman la unidad habitacional. Las vigas de hormigón y las viguetas metálicas pueden considerarse de sección activa ya que son elementos lineales rígidos y sólidos en los que la transmisión de cargas se efectúa por movilización de fuerzas seccionales y trabajan fundamentalmente a flexión. (Engel, 2006)

Como se puede apreciar en la correspondencia intercambiada entre el taller de Le Corbusier y el de Jean Prouvé, la primera idea fue que el entramado que actúa de botellero fuese una estructura metálica. Esta solución ya había sido empleada por Le Corbusier en las villas de la Weissenhofsiedlung de Stuttgart (1927) o en el Pabellón Suizo de la Ciudad Universitaria de París (1932). Debido a la escasez de acero y la aniquilación de la industria siderúrgica francesa durante la segunda guerra mundial se optó por una estructura de hormigón armado.

Como mencionado anteriormente, la Unité de Marsella es el campo de experimentación de las ideas del arquitecto, por lo que emplea las proporciones de El Modulor en todos los elementos, aplicándolas incluso en la estructura. De esta manera la estructura principal de la Unité está formada por vigas en dos direcciones de distinto canto según su posición en planta, pero con luz constante de 4,19m.

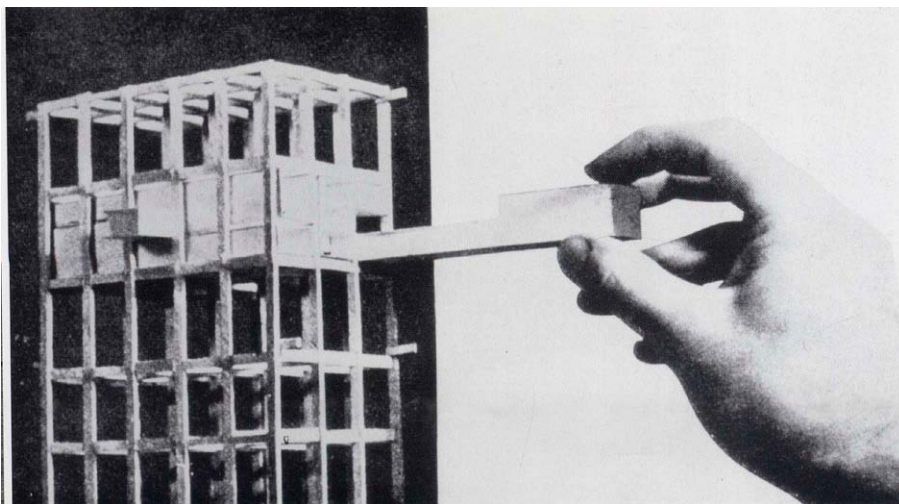


Imagen 76: Esquema funcional de la idea estructural.

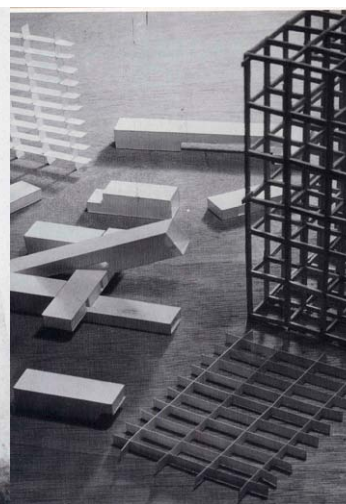


Imagen 77: Elementos de la estructura.

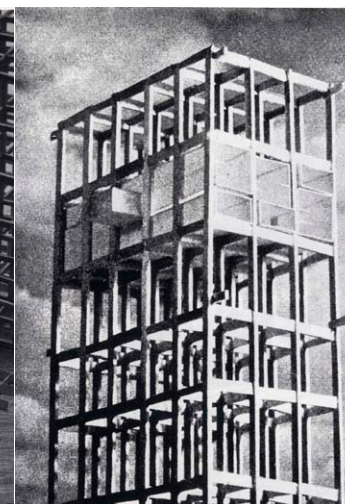


Imagen 78: Pruebas de inserción.

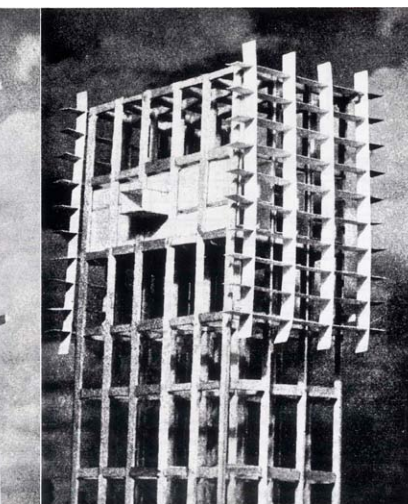


Imagen 79: Estructura con brise-soleils.

Partiendo de esa estructura principal de vigas de hormigón armado en dos direcciones con podemos identificar algunas variaciones significativas:

Para darle rigidez a la estructura, y compartimentarla en sectores independientes en caso de incendio, la sección transversal de la Unité se divide en *paquetes de tres plantas*, que a su vez corresponden a la configuración de dos viviendas (Imagen 40). Los dos forjados que delimitan el paquete, que denominaremos planta tipo cortafuego, son losas bidireccionales de 10 cm de espesor apoyadas sobre las vigas y unos nervios secundarios de luz 2,10m (Imagen 81).

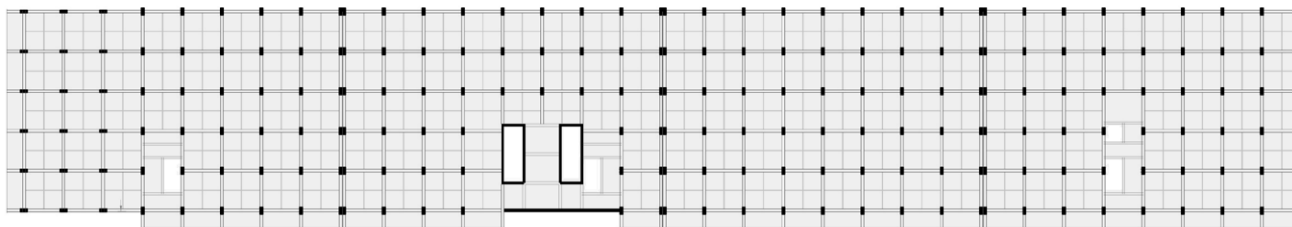
Además en las plantas intermedias que denominaremos planta tipo vivienda, en el vano central así como los voladizos inferiores, los forjados son losas de hormigón unidireccionales de nervaturas in situ de 8x26cm y bovedillas cerámicas, dando así más rigidez a las zonas de mayor tránsito peatonal (Imagen82).

Finalmente para completar la descripción de los elementos de rigidización del "botellero" hay que mencionar el *núcleo de comunicación vertical*, que consta de dos cajas de ascensor y un muro de fachada de hormigón armado 40cm de

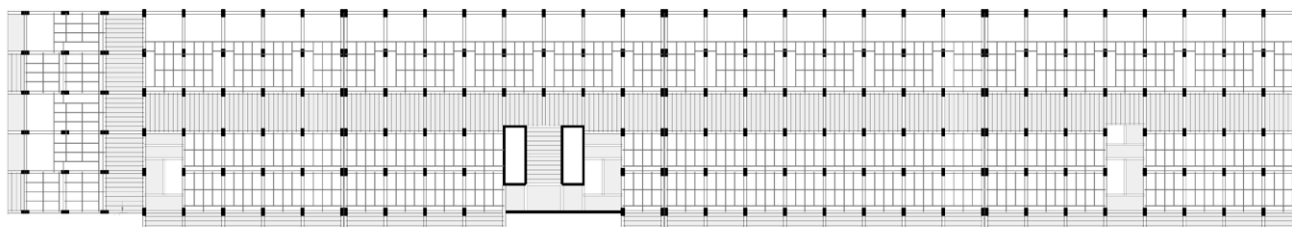
espesor. Al ser un lugar de tránsito frecuente el forjado en esta zona es una losa de hormigón armado con nervios in situ con mismo espesor y configuración que en las calles.

Otro elemento importante unido a la estructura durante el proceso de hormigonado son los *brise-soleils* en el extremo de los voladizos, que son elementos prefabricados de hormigón, aligerados mediante un diseño con pequeños huecos y 26 cm de espesor.

Finalmente hay que denotar que la longitud de la Unité d'Habitation de Marsella es de 137m por lo que se precisan de juntas de dilatación estructurales. Para ello la totalidad de la estructura se divide en 4 bloques, con nueve planos de pilares en la dirección longitudinal cada uno. La junta estructural se resuelve duplicando pilares en el entramado superior mientras que la solución en la planta baja y los pilotis es más compleja.



Planta tipo cortafuego



Planta tipo vivienda

Imagen 80: Planos estructurales.

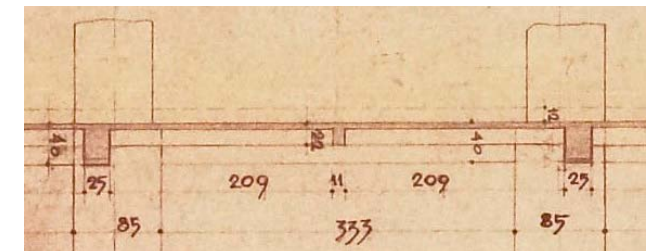


Imagen 81: Sección del forjado bidireccional.

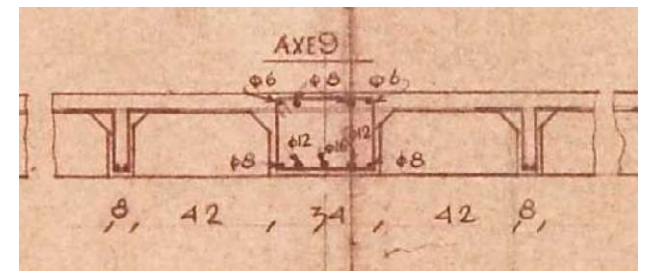


Imagen 82: Sección del forjado unidireccional.

Los *pilotis* son, junto a los equipamientos en cubierta, los elementos plásticos y artísticos más importantes de la Unité de Marsella. En planta baja podemos encontrar 15 pares de pilotis de hormigón armado, que aparte de cumplir su función plástica y estructural permiten el paso y protección de instalaciones y bajantes. Los pilotis constan de dos partes, un pilar cilíndrico de diámetro 1,90m y unas alas de 65cm de espesor cuya sección decrece en el sentido de la gravedad (Imagen84).

Como se aprecia es sus dibujos iniciales (Imagen 85) la primera idea del arquitecto respecto a la relación entre el paralelepípedo superior y los pilotis era desfasar las retículas para demostrar la autonomía del elemento sustentado frente a su soporte. Hay que recordar que el elemento sustentado es una estructura reticular de vigas y pilares cada 4,19m y que se pretendía cambiar el sistema a unos pilares de grandes dimensiones cada 8,38m. Por estas razones dimensionales y de índole técnica es necesaria la interposición de una plataforma que concentre la dispersión de las cargas provenientes del cuerpo superior. Esta plataforma nace con el nombre de *suelo artificial*, y plantea la nueva cota de referencia del edificio a 8m de altura sobre la calle.

El planteamiento del desfase de las tramas desaparece en algún momento del diseño, y ambas tramas se fusionan de manera que los pilotis se alinean con algunos de los pilares de la retícula superior, haciendo así más sencilla la transmisión de las cargas entre ambas partes del edificio. Pese a esto Le Corbusier consigue reinterpretar la independencia del cuerpo principal y los pilotis, primero revistiendo todo el suelo artificial con un cielo raso de hormigón de 10cm espesor, consiguiendo una imagen de elemento compacto y homogéneo que remata la parte inferior del paralelepípedo. En segundo lugar, evita colocar los pilotis en los extremos exteriores del entramado generando voladizos perimetrales.

La estructura del suelo artificial es un emparrillado jerarquizado de vigas en las dos direcciones ortogonales (Imagen 83) formados por vigas de sección activa según la clasificación de Engel dada la transmisión de las fuerzas externas a través del material de la sección y su trabajo a flexión.

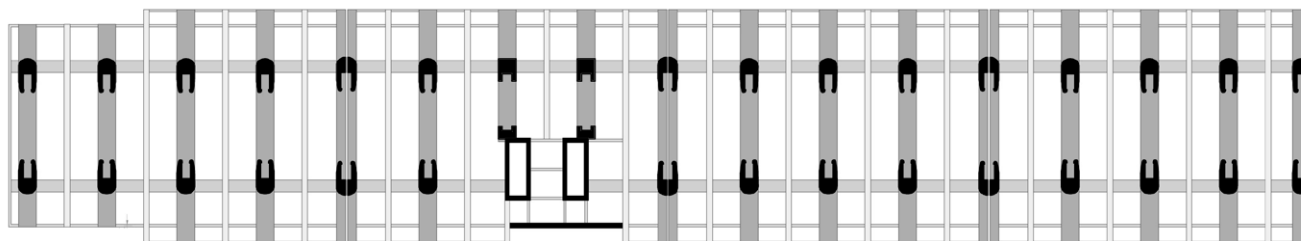


Imagen 83: Plano estructural.

Suelo artificial

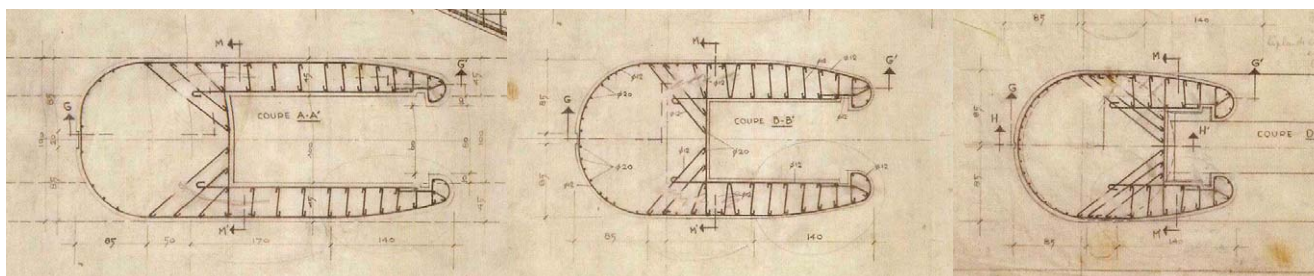


Imagen 84: Secciones de los pilotis.

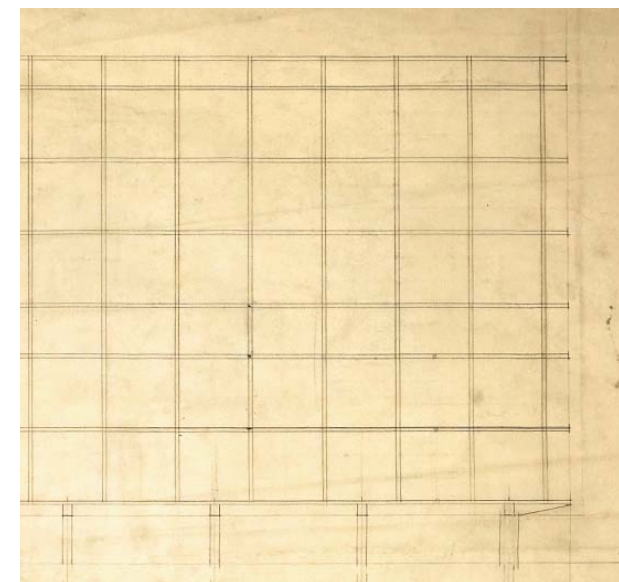


Imagen 85: Esquemas iniciales de la estructura.

Para comprender el esqueleto resistente la plataforma es necesario analizar la sección transversal (Imágenes 86 y 87). En ella se puede apreciar una jácena que cubre la anchura del edificio que está perforada para el paso de instalaciones. La perforación de mayor envergadura se encuentra en el centro de vano y tiene un diámetro de 1m. Esta jácena consta de un vano central con 12,57m entre apoyos y dos voladizos exteriores de 5,94m.

Estas jácenas están atravesadas por dos grandes vigas longitudinales encargadas de apelar las jácenas transversales que no coinciden verticalmente con los pilotis. Estas vigas son continuas en 4 vanos y tienen una sección de 1,25 x 2,36m. Longitudinalmente también podemos encontrar dos vigas que delimitan los huecos en la parte inferior del cielo raso para dar acceso a la galería técnica de 0,33x0,40m y los zunchos que delimitan el suelo técnico y los voladizos.

Si por el contrario observamos la sección longitudinal (Imagen 88) observamos que las jácenas tienen distinto carácter debido a la superposición de las distintas tramas del cuerpo superior y los pilotis. En los puntos donde las tramas coinciden, los pilotis están alineados con los pilares del entramado, y existe una jácena

doble. Este elemento está formado por dos jácenas de 0,45x2,62m unidas por una losa de un metro de ancho y 25cm de espesor en la que se realizan aberturas para el paso de canalizaciones verticales. La anchura total de la jácena doble es de 1,90m y coincide con la de los pilotis.

Cuando el eje de los pilares del entramado no coincide con el de los pilotis hay una jácena simple de dimensiones 0,60x2,62m que absorbe las cargas del entramado superior y es apeada por la viga longitudinal de mayor sección.

En el caso de las juntas de dilatación (Imagen 89), la sección es similar a las vigas dobles con la diferencia de que la losa de unión entre las subjácenas queda dividida en su punto medio y el conjunto se materializa como dos elementos independientes. Cada una de las subjácenas recibe la carga correspondiente a la estructura que recogen y la transmiten a los pilotis, que también están fraccionados en dos. Las dos estructuras independientes que se forman por la junta quedan separadas una distancia de 3cm por lo que desde la planta baja, simplemente se aprecia como un juego más de sombras y texturas.

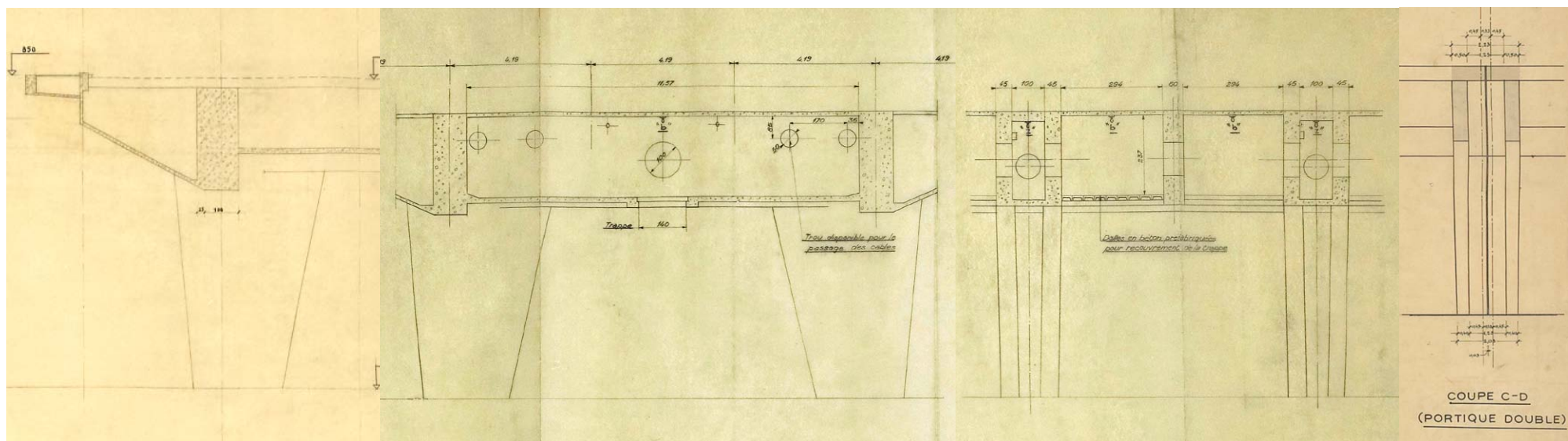


Imagen 86: Detalle del extremo de las jácenas.

Imagen 87: Detalle del tramo central de las jácenas

Imagen 88: Sección longitudinal.

Imagen 89: Junta.

## **5. MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA**

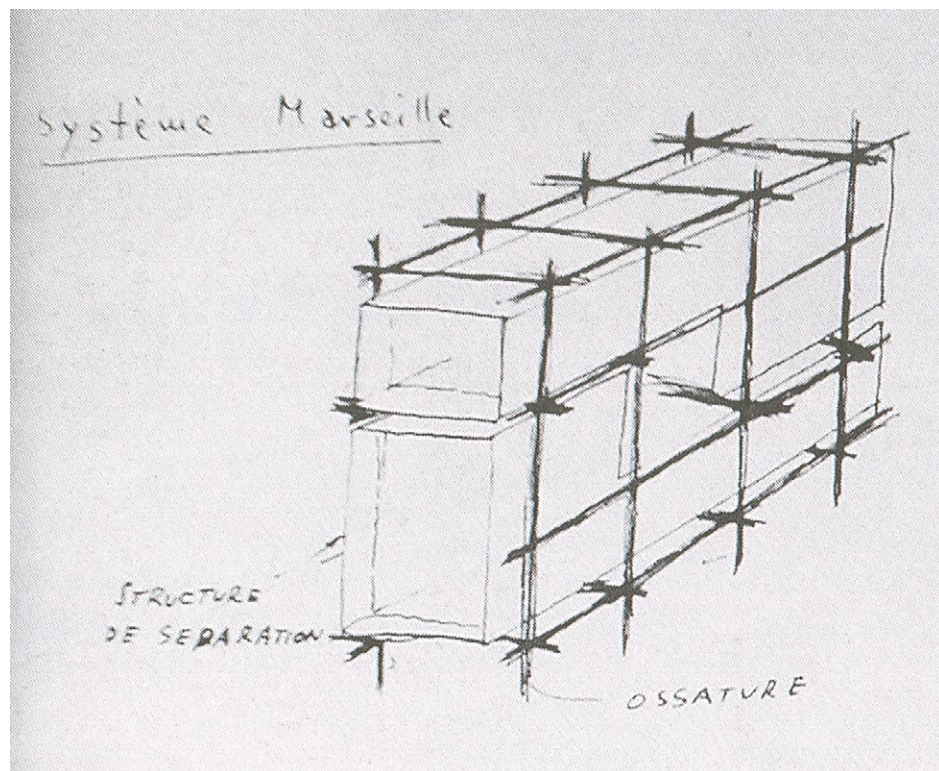


Imagen 90 : Esquema de la estructura

### 5.1 EL MODELO ESTRUCTURAL

Para estudiar el comportamiento de la estructura de la Unité d'Habitation de Marsella se ha realizado un modelo estructural con el programa informático Architrave. El modelo comprende los pilotis y suelo técnico, modelizados mediante elementos finitos, y las 17 plantas de viviendas. La envergadura del modelo y la discretización realizada, que se describirá posteriormente, han llevado a sustituir la cimentación real, realizada mediante pilotaje, por un empotramiento en la base de los pilotis y a no incluir las construcciones de gimnasio, guardería y torre existentes sobre el nivel de cubierta. Su estudio y análisis podría ser objeto de otro trabajo final de grado.

Para modelizar la estructura de la Unité hay que denotar el que entramado superior se puede modelizar como barras, mientras que elementos que trabajan superficialmente como son los muros de ascensor, el suelo artificial o las losas requieren del modelado mediante elementos finitos. De esta forma obtenemos un modelo donde cada elemento se modeliza acorde a su funcionamiento, acercándose así más al comportamiento real de la estructura global.

La estructura global se compone de los siguientes elementos:

Información de la estructura	
Tipo:	Rígida espacial
Nudos:	89091
Barras:	79475
EF 2D:	79585
Áreas de reparto:	4512
Apoyos:	0
Balastos:	0
Vigas de cimentación:	0
Zapatas:	111
Cargas:	1303
Movimientos impuestos:	0

Imagen 91 : Información del modelo de cálculo.

### 5.1.1 PLANTA TIPO VIVIENDA

En todas las plantas del cuerpo superior podemos identificar elementos del entramado comunes que tienen las mismas dimensiones y características (Imagen92). Todos estos elementos de sección activa tienen una dimensión longitudinal mucho mayor que la transversal, por lo que se modelizarán como barras de hormigón armado a las que se les asignarán distintas secciones.

En el caso de las vigas, la sección de las mismas varía en función de su posición en la planta. En el siguiente esquema se identifica el tipo de viga y sección a asignar a las barras del modelo:

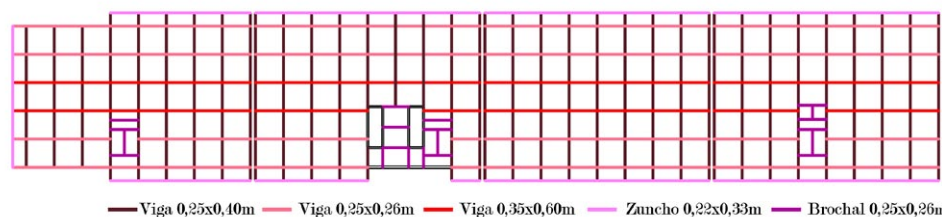


Imagen 92: Esquema estructural.

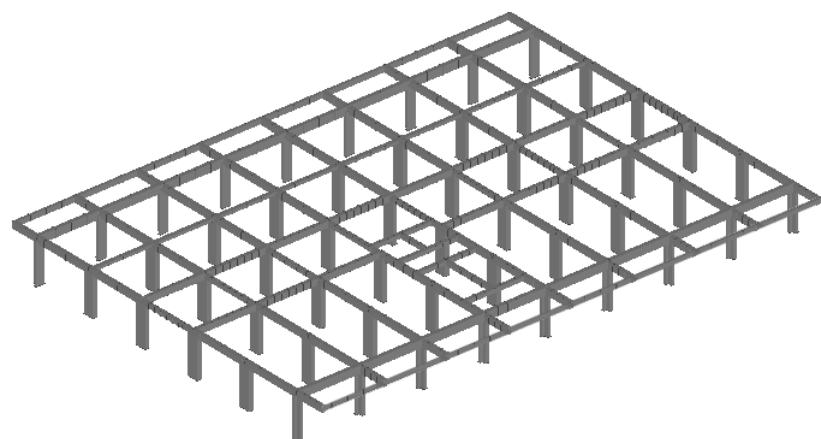


Imagen 93: Detalle del modelo "sólido" de la estructura principal.

Los pilares también se modelizan por barras, asignándole una sección de 0,75x0,35m a los pilares interiores mientras que a los exteriores se les atribuye una sección en T de usuario para ser más riguroso con las dimensiones originales. La altura de los todos los pilares será de 2,7m.

La principal variable entre los distintos tipos de planta de vivienda es la materialización de los forjados. En la planta que nos compete, el vano central se construye con losas de hormigón armado con nervaduras in situ. Los nervios in situ quedan representados por barras de sección 0,11x0,22m separadas 50cm. Los nervios se unen mediante elementos finitos que representan la losa entre los nervios de dimensión 0,5x0,65m y espesor 6cm.

Como la estructura metálica de la "botella" es independiente de la de hormigón al estar simplemente apoyada sobre ella, las viguetas se modelizan mediante barras a las que se le asigna una sección y desconexión determinada. Para el cálculo simplificado de la estructura se han homogeneizado todos con perfiles a IPN-160 con desconexiones respecto al eje z en los puntos de conexión con las vigas de hormigón armado. Como los forjados de contrachapado de madera también se consideran independientes de la estructura de hormigón se modelizan mediante áreas de reparto de espesor 10cm.

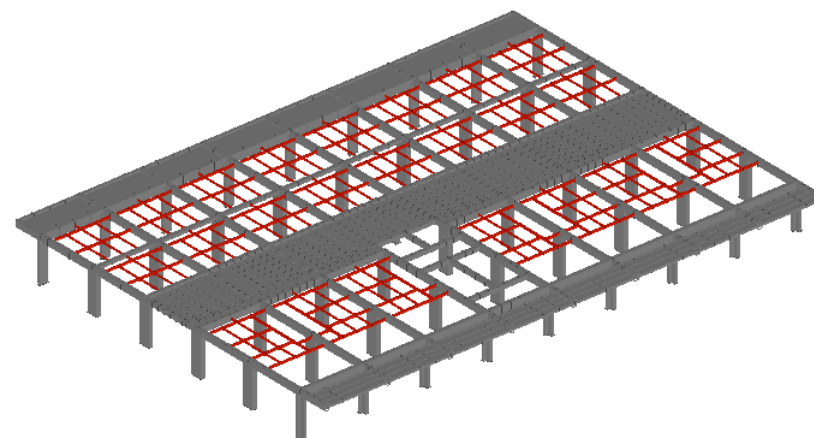


Imagen 94: Detalle del modelo "sólido" de la estructura de la planta tipo vivienda.

### 5.1.2 PLANTA TIPO CORTAFUEGO

Los elementos del entramado de vigas y pilares de esta planta se modelizan igual que los de la planta tipo de vivienda (Imagen 92). La diferencia en este caso es que en estas plantas todo el forjado es una losa de hormigón armado bidireccional con nervios intermedios para reducir la luz. El objeto de esta diferencia es servir de elemento cortafuego en el caso de accidente. La losa se modeliza con superficies finitas de dimensión 1,05x1,05m y espesor 10cm mientras que los nervios son barras de sección 11x22cm.

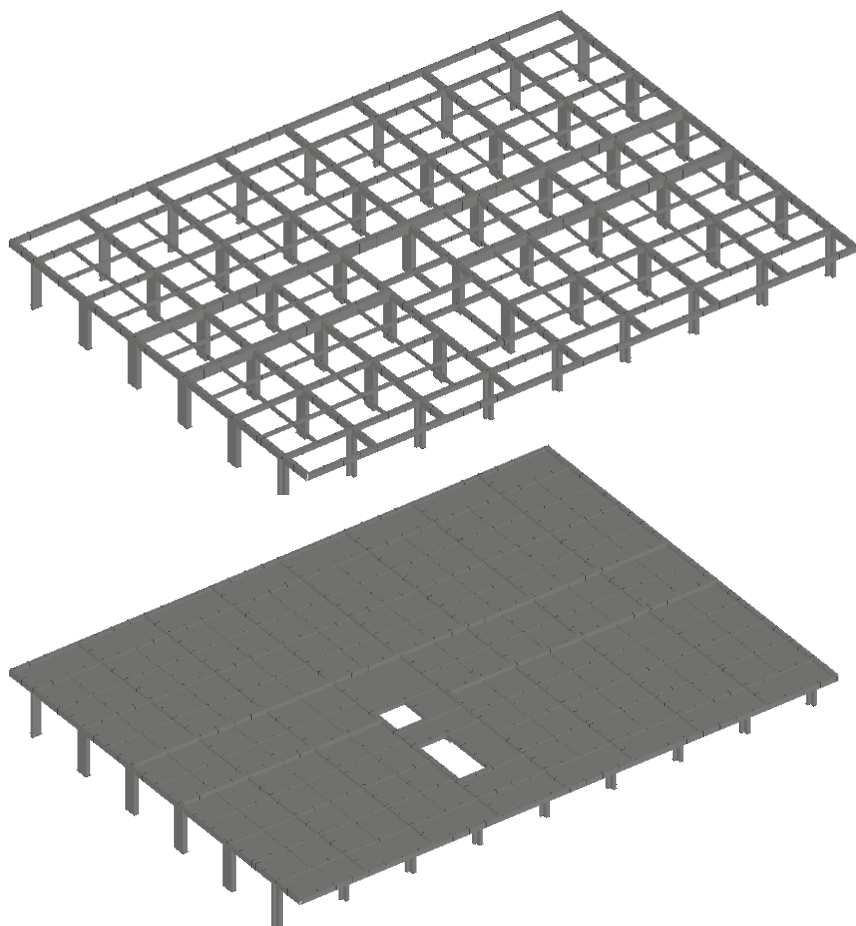


Imagen 94: Modelo "sólido" de la estructura principal (sup.) y la estructura de la planta tipo cortafuegos (inf.)

### 5.1.3 ELEMENTOS DE COMUNICACIÓN VERTICAL

Los muros de ascensor y la fachada en la zona de comunicación vertical se modelizan con elementos finitos rectangulares de dimensiones aproximadas de 0,6x0,9m y espesor de 40cm. Uno de los aspectos fundamentales para que el modelo funcione correctamente es comprobar que las esquinas de los elementos finitos que componen el muro coincidan con el resto de barras y elementos finitos de las plantas, asegurando la correcta transmisión de cargas entre ellos. Por ello la geometría de las superficies finitas se adapta por plantas. Como mencionado anteriormente, la cimentación de los muros de hormigón se simplifica a una zapata corrida en su parte inferior.

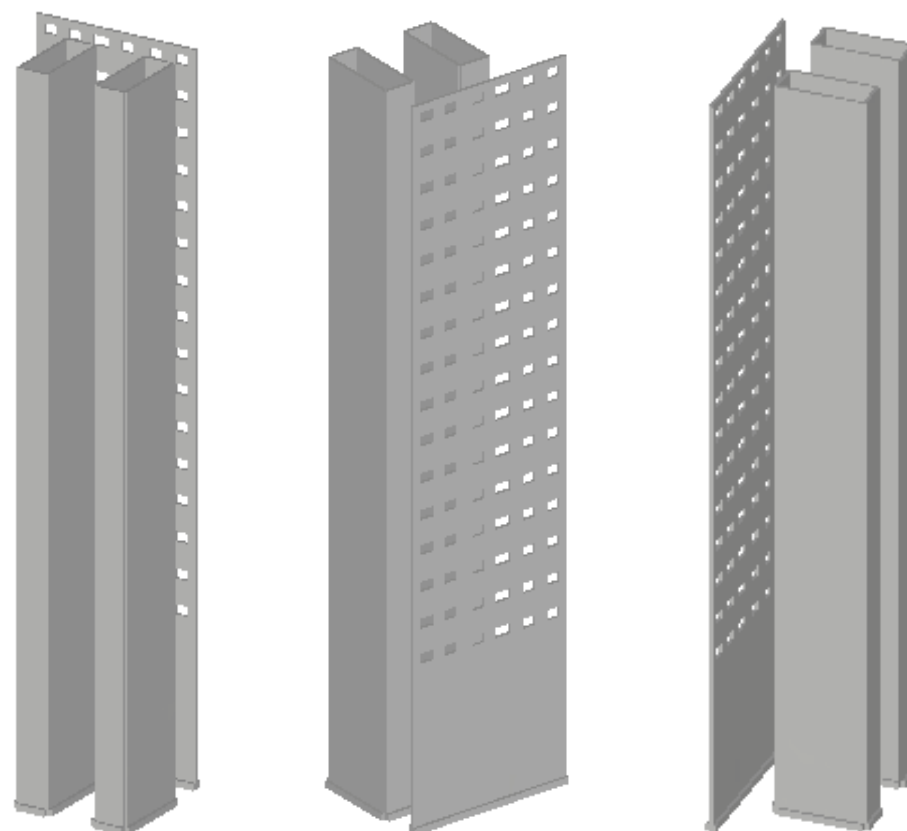


Imagen 95: Modelo 3D de los elementos de rigidización.



#### 5.1.4 SUELO ARTIFICIAL

Debido a su naturaleza particular, sección variable y dimensiones personalizadas, las jácenas simples y dobles estas se han de modelizar con elementos finitos. Las vigas dobles se modelizan con dos subjácenas comprendidas por elementos finitos de dimensiones de  $0,87 \times 1,31\text{m}$  y espesor de  $0,45\text{m}$  que se unen en todo su perímetro con otros elementos finitos de dimensión  $0,90 \times 0,70\text{m}$  y espesor  $25\text{cm}$  para asegurar el funcionamiento como un único elemento estructural. Las vigas simples se modelizan con los mismos elementos que las subjácenas pero de espesor de  $0,6\text{m}$ . (Imagen 97)

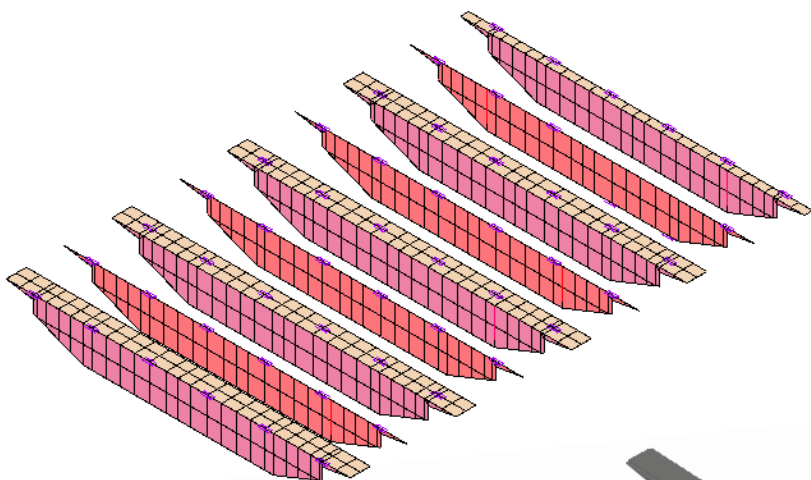


Imagen 97: Detalle modelo de elementos finitos: jácenas.

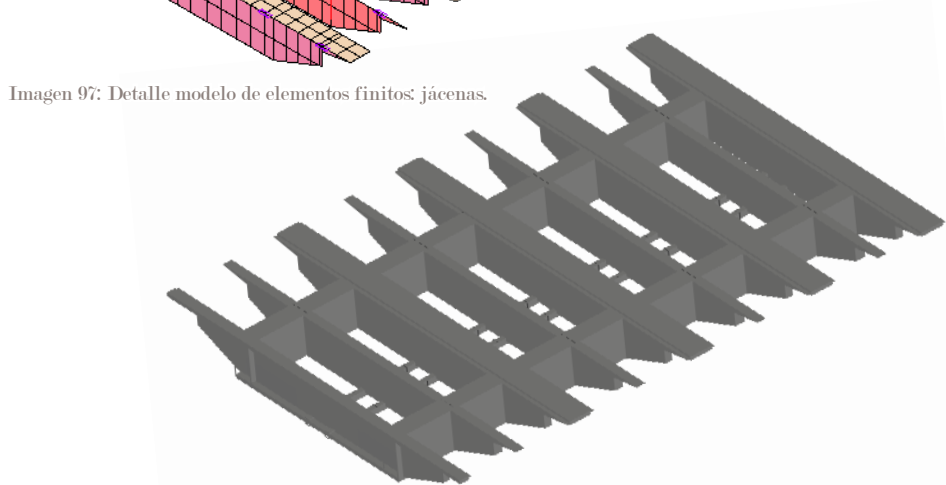


Imagen 98: Modelo "sólido" jácenas y vigas longitudinales.

La viga longitudinal y las vigas que permiten el acceso a la galería técnica desde la planta baja se modelizan como una barras ya que tienen una geometría más usual. La primera es una barra con sección rectangular de dimensiones  $1,25 \times 2,36\text{m}$  que pasa por los vértices de los elementos finitos que componen las vigas, mientras que las segundas tienen una sección de  $0,33 \times 0,40\text{m}$  (Imagen 98).

Finalmente el cielo raso de hormigón que envuelve el emparrillado para dar la imagen de elemento único y generar la galería técnica se modeliza con elementos finitos de dimensión  $0,90 \times 1,25\text{m}$  y espesor  $10\text{cm}$  dada su naturaleza superficial.

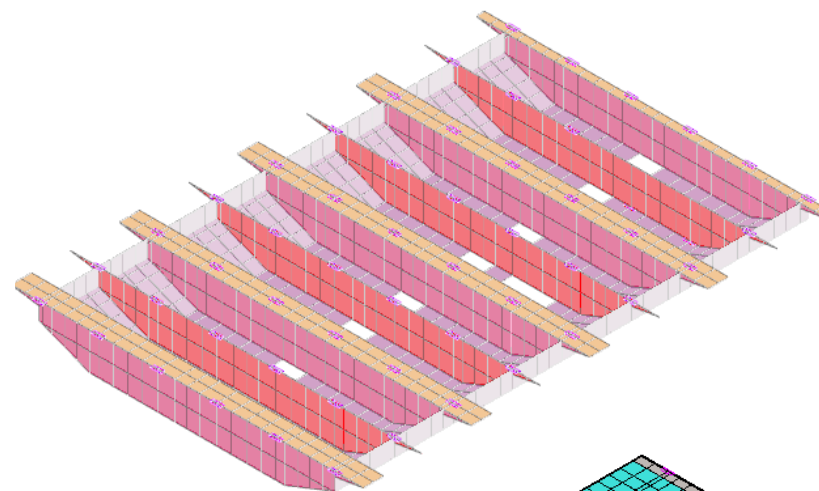


Imagen 99: Detalle jácenas y cielo raso inferior.

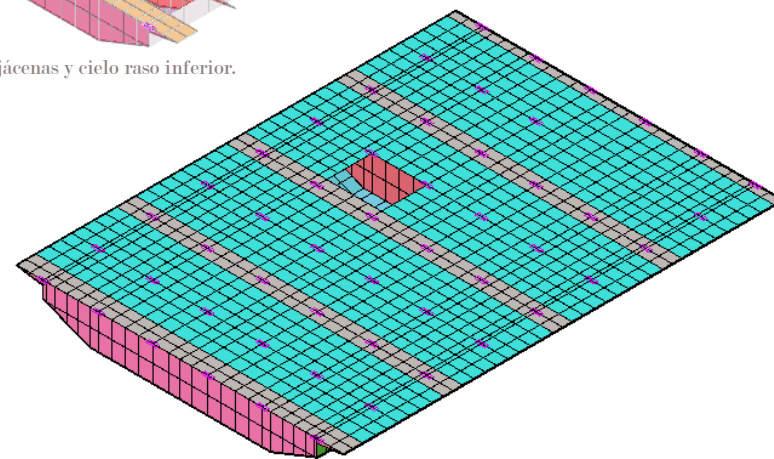


Imagen 100: Detalle modelo de elementos finitos: jácenas y cielo raso superior.

### 5.1.5 PILOTIS

Los pilotis conllevan una abstracción más compleja que deriva del funcionamiento estructural de los mismos. Por un lado, la parte circular del pilar absorbe los esfuerzos axiales del pilar superior, mientras que las alas del pilotis recogen los esfuerzos de las vigas longitudinales trabajando como muros a compresión. De esta manera los pilotis se han modelizado como un elemento de barra de sección redonda de 1,9m de diámetro y 8m de longitud unida mediante elementos finitos auxiliares a las dos alas de hormigón representadas mediante elementos finitos de espesor 0,65m.

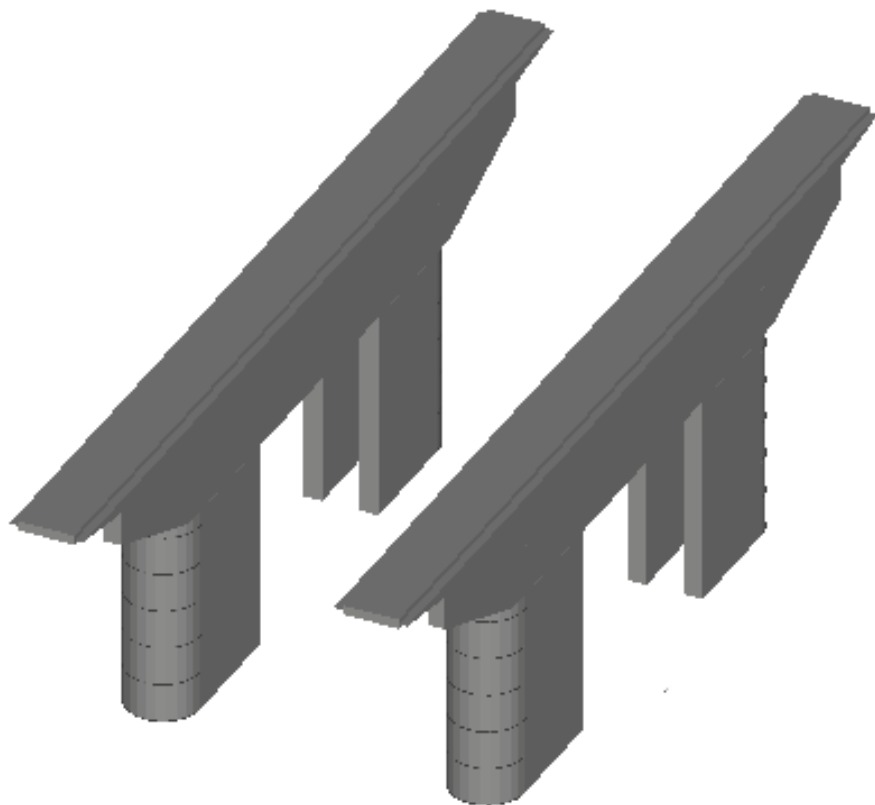


Imagen 101: Modelo "sólido" de los pilotis y las jácenas dobles.

### 5.1.6 MODELO COMPLETO

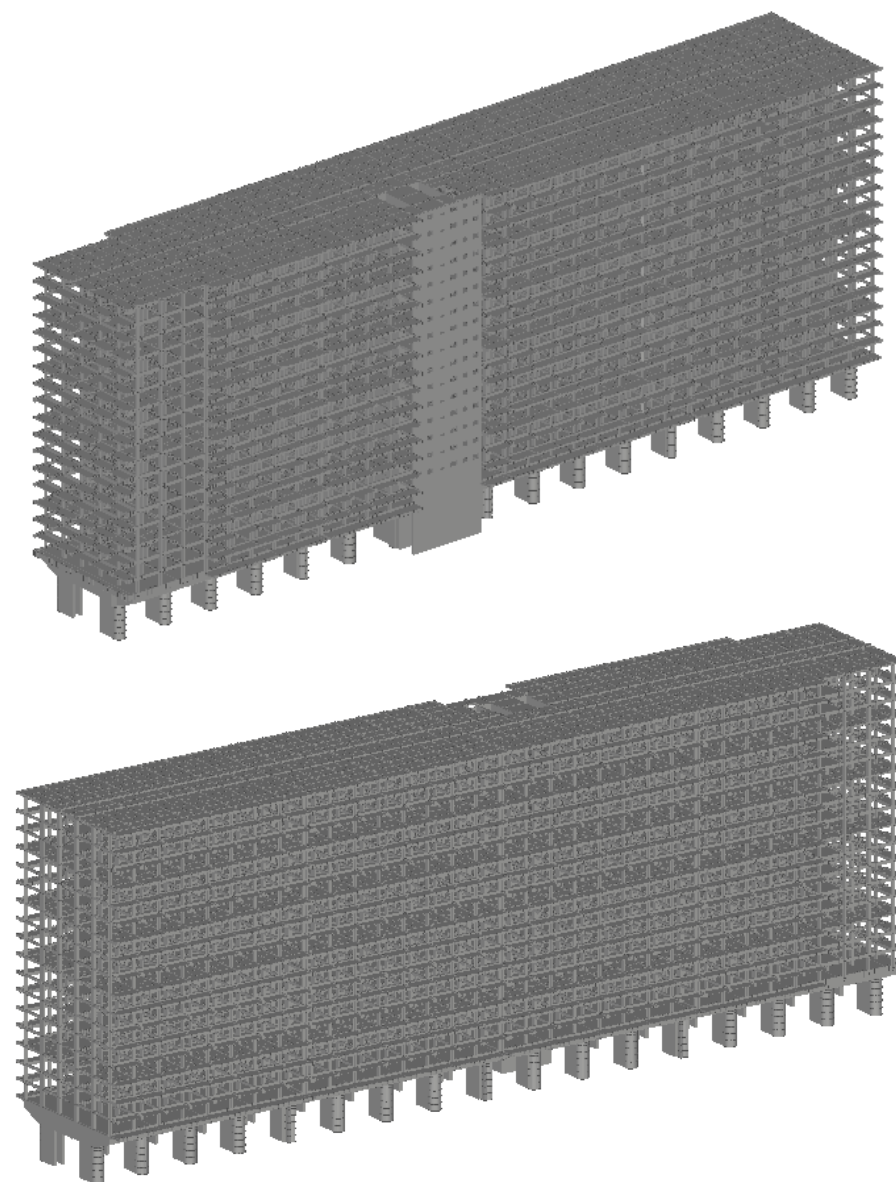


Imagen102: Modelo 3D del edificio completo.

## 5.2 EVALUACIÓN Y ASIGNACIÓN DE CARGAS

Para completar el modelo, se analizan y posteriormente asignan las cargas a las que podría estar sometida la estructura real. Esta evaluación se efectúa de acuerdo al Documento Básico de Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación (DB-SE-AE) y el Código Técnico de la Edificación (CTE).

Para el análisis de la Unité d'Habitation sólo evaluaremos las cargas permanentes y variables, no considerando las acciones térmicas sobre la estructura o las acciones accidentales de sismo, impacto e incendio.



### 5.2.1 CARGAS PERMANENTES

Los pesos propios de elementos estructurales son tenidos en cuenta por Architrave a la hora de realizar el cálculo a partir de las secciones y materiales definidos previamente en AutoCAD. De esta manera, pese a que evaluemos esta carga, no hace falta aplicarla sobre el modelo como carga adicional. Las cargas de este apartado corresponden al Anejo C del DB SE-AE.

### PLANTA TIPO VIVIENDA

#### Pesos propios de elementos estructurales:

En el caso del forjado de contrachapado y pavimento de madera sí que hay que incluir el peso propio de este como carga aplicada sobre el modelo ya que estas superficies se han simplificado a áreas de reparto y no se ha designado material de la misma. El sistema se compone de un pavimento de madera maciza de roble con una carga de 1 kN/m<sup>2</sup>, un contrachapado de espesor 0,02m y carga de 0,1 kN/m<sup>2</sup> y un tablero de madera de 0,15 kN/m<sup>2</sup>.

- Forjado unidireccional de nervios in situ, espesor 0,26m (calles)..... 3kN/m<sup>2</sup>
- Peso propio de viguetas metálicas (interior de las viviendas)..... 377,24kN
- Vigas de hormigón..... 4990,86kN
- Forjado de contrachapado y pavimento de madera..... 2,30kN/m<sup>2</sup>

	Área (m <sup>2</sup> )	Longitud (m)	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Peso por barra (kN)	Número de barras por planta	Peso por planta (kN)
Viga 0,25x0,40	0,1	24	25	60,00	36	2160,00
Viga 0,25x0,26	0,065	4,19	25	6,81	136	925,99
Viga 0,35x0,60	0,21	4,19	25	22,00	61	1341,85
Zuncho 0,22x0,33	0,0726	4,19	25	7,60	61	463,90
Brochal 0,25x0,26	0,065	61	25	99,13	1	99,13
					Peso total	4990,86

Tabla 1: Peso propio de la estructura de hormigón.

**Cargas de cerramientos:**

Debido a la ligereza de la compartimentación entre las propias viviendas y en el interior de las mismas al materializarse mediante elementos prefabricados de yeso laminado y madera se ha optado por definir la tabiquería como una carga superficial de  $1\text{kN/m}^2$  en toda la planta.

Por el contrario, pese a estar perforado el brise-soleil y las fachadas prefabricadas de hormigón suponen una importante carga. Este elemento se evalúa de manera individual y se asignará como una carga lineal en el perímetro de voladizo.

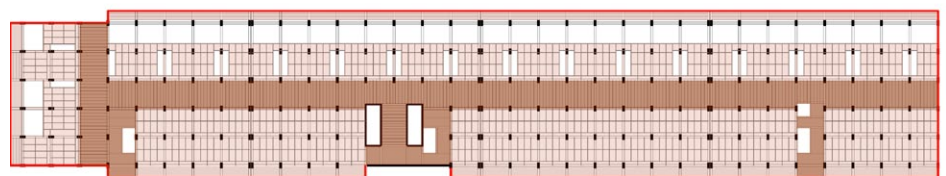
Peso específico del hormigón ligero  $9\text{kN/m}^3$  x espesor  $0,26\text{m}$  x altura  $1,21\text{m}$  =  $2,83\text{kN/m}$

- Tabiquería.....  $1\text{kN/m}^2$
- Brise-soleil.....  $2,83\text{kN/m}$

**Cargas adicionales:**

- Falso techo: placa de yeso laminar  $e=1\text{cm}$  y material acústico.....  $0,1\text{kN/m}^2$
- Instalaciones.....  $0,25\text{kN/m}^2$

Las cargas verticales permanentes superficiales a asignar en el modelo tendrán un valor de  $3,65\text{ kN/m}^2$  para el interior de la vivienda y  $1,35\text{ kN/m}^2$  para los pasillos.



■ Carga superficial de  $3,65\text{ kN/m}^2$  ■ Carga superficial de  $1,35\text{kN/m}^2$  — Carga puntual de  $2,83\text{kN/m}$

Imagen 102: Asignación de cargas en la planta tipo vivienda.

**PLANTA TIPO CORTAFUEGO**

En esta planta las escaleras son simplemente de emergencia, ya que no dan acceso a ninguna vivienda y los ascensores no tienen parada. En los ámbitos de las escaleras se adopta las mismas cargas permanentes que en las calles de la planta tipo vivienda. En el ámbito de las viviendas las cargas permanentes sí que varían, al tratarse de una configuración constructiva distinta.

**Pesos propios de elementos estructurales:**

- Losa bidireccional, espesor  $0,1\text{m}$ .....  $2\text{kN/m}^2$

**Cargas de cerramientos:**

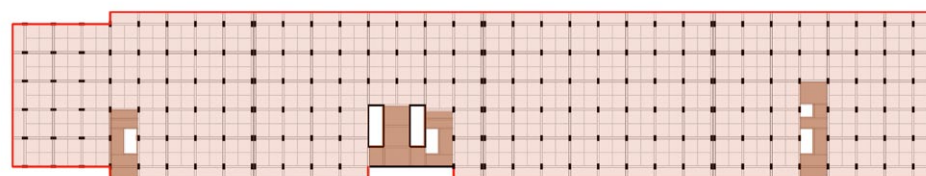
Se aplica el mismo criterio que en la planta tipo vivienda.

- Tabiquería.....  $1\text{kN/m}^2$
- Brise-soleil.....  $2,83\text{kN/m}$

**Cargas adicionales**

- Pavimento de madera.....  $1\text{kN/m}^2$
- Falso techo:placa de yeso laminar  $e=1\text{cm}$  y material acústico.....  $0,1\text{ kN/m}^2$
- Instalaciones.....  $0,25\text{kN/m}^2$

Las cargas superficiales verticales permanentes a aplicar sobre el modelo en la zona de viviendas serán de  $2,35\text{kN/m}^2$ .



■ Carga superficial de  $3,65\text{ kN/m}^2$  ■ Carga superficial de  $1,35\text{kN/m}^2$  — Carga puntual de  $2,83\text{kN/m}$

Imagen 103: Asignación de cargas en la planta tipo cortafuegos.

SUELO ARTIFICIAL

El suelo artificial consta de dos niveles. El nivel superior corresponde a una vivienda por lo que tendrá las mismas cargas verticales, tanto permanentes como variables, como las correspondientes a la planta cortafuego mientras que la galería inferior de instalaciones requiere un análisis independiente.

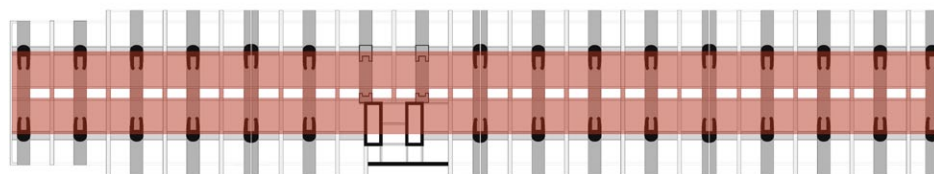
**Pesos propios de elementos estructurales:**

- Losa bidireccional, espesor 0,10m..... 2kN/m<sup>2</sup>

**Cargas adicionales**

- Instalaciones..... 1kN/m<sup>2</sup>

Dado que el modelo contempla los pesos propios solamente aplicaremos la carga de instalaciones sobre el modelo para la hipótesis 1.



■ Carga superficial de 1 kN/m<sup>2</sup> Imagen 104: Asignación de cargas planta inferior del suelo artificial.

Adicionalmente, se ha realizado una estimación del peso propio de los elementos principales que conforman el suelo artificial, para cuantificar su aportación al modelo.

	Área (m <sup>2</sup> )	Espesor/Longitud (m)	Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	Peso por elemento (kN)	Número de elementos	Peso por planta (kN)
Jácena simple	50,47	0,6	25	757,05	14	10.598,70
Jácena doble	50,47	0,45	25	567,79	28	15.898,05
Superficie unión	24	0,1	25	60,00	14	840,00
Jácena junta dilatación	50,47	0,45	25	567,79	6	3.406,73
Superficie unión	24	0,1	25	60,00	6	360,00
Viga Longitudinal	2,95	33,64	25	2480,95	4	9.923,80
Vigas Huecos	0,132	33,64	25	111,01	4	444,05
					Peso total	31.103,48

Tabla 2: Peso propio de las vigas del suelo artificial.

5.2.2 CARGAS VARIABLES:

Dado que la Unité se encuentra en Marsella, es necesario ubicar el edificio en un emplazamiento semejante en España para utilizar el Anejo D del DB-SE-AE. Marsella se encuentra a 28 metros sobre el nivel del mar y tiene una temperatura mínima media de 2°C y máxima de 29°C. Según los datos del Reglamento de Instalaciones Térmicas (RITE) (Tabla 3), se puede asemejar a San Sebastián.

UBICACIÓN: AEROPUERTO			Nº DE OBSERVACIONES Y PERIODO			
a.s.n.m. (m)	Lat.	Long.	T seca	Hum. relativa	T terreno	Rad
8	43°21'24"	01°47'25"W	87.600 (1998-2007)	(2) 18.980 (1998-2007)	2.920 (1998-1999)	23.360 (2004-2007)

CONDICIONES PROYECTO CALEFACCIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÍNIMA)					
TSMIN (°C)	TS_99,6 (°C)	TS_99 (°C)	OMDC (°C)	HUMcoin (%)	OMA (°C)
-7,2	-0,6	1,0	9,8	90	31,3

CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA SECA EXTERIOR MÁXIMA)							
TSMAX (°C)	TS_0,4 (°C)	THC_0,4 (°C)	TS_1 (°C)	THC_1 (°C)	TS_2 (°C)	THC_2 (°C)	OMDR (°C)
39,8	30,7	22,3	28,6	22,3	26,9	21,9	14,7

CONDICIONES PROYECTO REFRIGERACIÓN (TEMPERATURA HÚMEDA EXTERIOR MÁXIMA)					
TH_0,4 (°C)	TSC_0,4 (°C)	TH_1 (°C)	TSC_1 (°C)	TH_2 (°C)	TSC_2 (°C)
24,0	29,6	23,0	28,7	22,0	27,5

VALORES MEDIOS MENSUALES							
Mes	TA (°C)	TASOL (°C)	GD_15 (°C)	GD_20	GDR_20	RADH (kWh/m <sup>2</sup> día)	TTERR (°C)
Enero	9,2	10,9	188	336	0	1,3	7,6
Febrero	9,2	10,8	171	306	1	1,9	8,4
Marzo	12,0	13,7	117	251	4	3,3	11,7
Abril	13,2	14,7	81	208	5	4,2	13,3
Mayo	16,3	17,7	29	130	16	5,0	17,3
Junio	19,5	20,7	4	52	36	5,8	20,1
Julio	20,9	22,0	1	28	54	5,5	22,8
Agosto	21,7	23,1	0	19	74	4,9	24,9
Septiembre	19,7	21,6	6	53	43	3,7	22,1
Octubre	17,1	19,0	28	115	24	2,4	17,0
Noviembre	11,6	13,5	117	252	2	1,8	11,1
Diciembre	9,4	11,2	180	328	0	1,2	8,1

Rosa de los vientos: velocidad media 2,65 m/s

Tabla 3: Condiciones ambientales de San Sebastián

**CARGAS VARIABLES: SOBRECARGA DE USO**

Las cargas de sobrecarga de uso se obtendrán del apartado 3.1.1 del DBSE-AE según los usos proyectados por Le Corbusier y explicados en el apartado 3.

Tabla 3.1. Valores característicos de las sobrecargas de uso

Categoría de uso		Subcategorías de uso		Carga uniforme [kN/m <sup>2</sup> ]	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 <sup>(1)</sup>
F	Cubiertas transitables accesibles sólo privadamente <sup>(2)</sup>			1	2
G	Cubiertas accesibles únicamente para conservación <sup>(3)</sup>	G1 <sup>(7)</sup>	Cubiertas con inclinación inferior a 20°	1 <sup>(4)(6)</sup>	2
			Cubiertas ligeras sobre correas (sin forjado) <sup>(5)</sup>	0,4 <sup>(4)</sup>	1
		G2	Cubiertas con inclinación superior a 40°	0	2

Tabla 4: Valores característicos de las sobrecargas de uso.

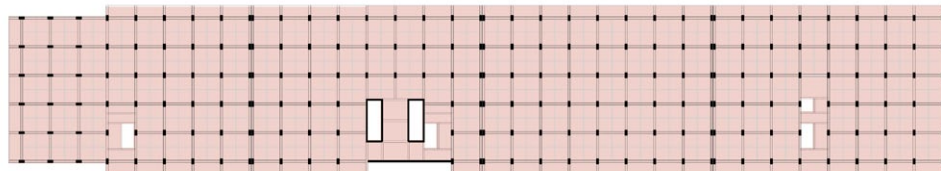


Imagen 105: Ámbito de aplicación de cargas en las plantas del entramado.

**PLANTA TIPO VIVIENDA Y CORTAFUEGO**

Pese a tener distinto sistema constructivo ambas tipologías de planta responden al mismo uso y por lo tanto tienen la misma sobrecarga de uso.

- A1: Zona residenciales, vivienda..... 2kN/m<sup>2</sup>

**CUBIERTA**

Pese a que constructivamente se ha simplificado la cubierta como un forjado más, no se puede despreciar la sobrecarga que su uso lúdico y social confiere.

- C4: Zonas dedicadas a gimnasio o actividades físicas..... 5kN/m<sup>2</sup>
- C5: Zonas de aglomeración..... 5kN/m<sup>2</sup>

**SUELO ARTIFICIAL**

Como mencionado anteriormente la parte superior del suelo tendrá la misma sobrecarga de uso que la planta tipo cortafuego, mientras que el entresuelo sólo es accesible para mantenimiento, así que se toma la sobrecarga relativa a una cubierta de estas características.

- G1: Cubierta sólo accesible para conservación, inclinación < 20° ..... 1kN/m<sup>2</sup>

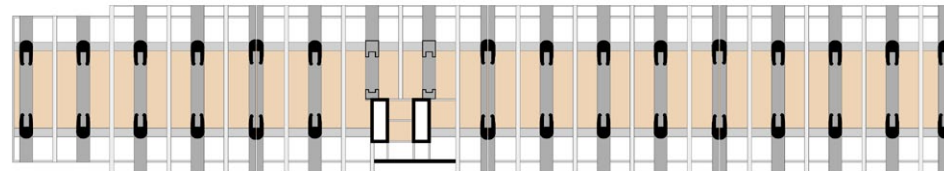


Imagen 106: Ámbito de aplicación de cargas en la planta inferior del suelo técnico.

**CARGAS VARIABLES: CARGA DE VIENTO**

El viento predominante en Marsella es el viento de Mistral (orientación NO), dado que la Unité tiene una orientación NS estricta de su eje longitudinal, la carga de viento más frecuente se encontraría a 45° respecto la fachada longitudinal. Teniendo esto en cuenta, se modeliza la carga de viento para la condición posible más desfavorable: carga de viento perpendicular a la fachada longitudinal. De acuerdo con el *Apartado 3.3.2 Acción del viento del DBSE-AE*, la carga de viento se calcula con la expresión:  $q_n = q_b \cdot c_e \cdot c_p$

Si tomamos San Sebastián nos encontramos en la zona C, por lo que la presión dinámica ( $q_b$ ) es de 0,52kN/m<sup>2</sup>. (Imagen 107)

- 4 El valor básico de la velocidad del viento en cada localidad puede obtenerse del mapa de la figura D.1. El de la presión dinámica es, respectivamente de 0,42 kN/m<sup>2</sup>, 0,45 kN/m<sup>2</sup> y 0,52 kN/m<sup>2</sup> para las zonas A, B y C de dicho mapa.



Imagen 107: Mapa de zonas para la obtención de la presión dinámica del viento.

El coeficiente de exposición ( $c_e$ ), depende de la altura del punto considerado y el grado de aspereza del entorno. La Unité se encuentra a menos de 5km de una superficie de agua en la dirección del viento (grado I) y dado que tiene 56m de altura se ha de calcular según lo indicado en el anexo D.

**D.2 Coeficiente de exposición**

- 1 El coeficiente de exposición  $c_e$  para alturas sobre el terreno, z, no mayores de 200 m, puede determinarse con la expresión:

$$c_e = F \cdot (F + 7 k) \tag{D.2}$$

$$F = k \ln(\max(z, Z) / L) \tag{D.3}$$

Grado de aspereza del entorno	k	L (m)	Z (m)
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	0,156	0,003	1,0
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	0,17	0,01	1,0
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	0,19	0,05	2,0

Tabla 5: Valores del coeficiente de exposición.

$$F = 0,156 \ln(56/0,003) = 1,534 \quad c_e = 4,028$$

Finalmente el coeficiente eólico de presión ( $c_p$ ) se obtiene de la interpolación de los datos de la Tabla 3 para una esbeltez de 24m/56m=0,42, siendo  $c_p = 0,67$ .

	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

Tabla 6: Valores del coeficiente eólico.

$$\text{De esta manera } q_n = 0,52 \times 4,028 \times 0,67 = 1,4 \text{ kN/m}^2$$

La carga de viento se ha de aplicar a la cabeza de los pilares al no haber elementos superficiales que componen la fachada en el modelo. La altura entre plantas de la Unité es de 2,70m y el ámbito entre pilares es de 4,19m, por lo que se aplicará una carga de 15,87kN en los pilares de vanos centrales y una carga de 7,93kN en los pilares de vanos extremos.

**CARGAS VARIABLES: CARGA DE NIEVE**

Según el *Apartado 3.5.1 del DBSE-AE Determinación de la carga de nieve*, la carga de nieve por superficie horizontal es  $q_n = \mu \cdot s_k$

Tomando la altura sobre el mar de 28m y Zona climática 1 correspondiente a San Sebastián  $s_k$  será 0,3 kN/m<sup>2</sup> (Tabla 4) y el coeficiente de forma de cubierta  $\mu=1$  ya que la cubierta tiene una pendiente inferior a 30°. Así obtenemos un valor de  $q_n = 0,3\text{kN/m}^2$ , igual a lo recomendado por el Eurocódigo 1 para Marsella. (Tabla 5)



Figura E.2 Zonas climáticas de invierno

Tabla E.2 Sobrecarga de nieve en un terreno horizontal (kN/m<sup>2</sup>)

Altitud (m)	Zona de clima invernal, (según figura E.2)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	0,3	0,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
200	0,5	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
400	0,6	0,6	0,2	0,3	0,4	0,2	0,2
500	0,7	0,7	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2
600	0,9	0,9	0,3	0,5	0,5	0,4	0,2
700	1,0	1,0	0,4	0,6	0,6	0,5	0,2
800	1,2	1,1	0,5	0,8	0,7	0,7	0,2
900	1,4	1,3	0,6	1,0	0,8	0,9	0,2
1.000	1,7	1,5	0,7	1,2	0,9	1,2	0,2
1.200	2,3	2,0	1,1	1,9	1,3	2,0	0,2
1.400	3,2	2,6	1,7	3,0	1,8	3,3	0,2
1.600	4,3	3,5	2,6	4,6	2,5	5,5	0,2
1.800	-	4,6	4,0	-	-	9,3	0,2
2.200	-	8,0	-	-	-	-	-

Tabla 7: Zonas y valores para la sobrecarga de nieve.

**Mediterranean Region: Snow Load at Sea Level**

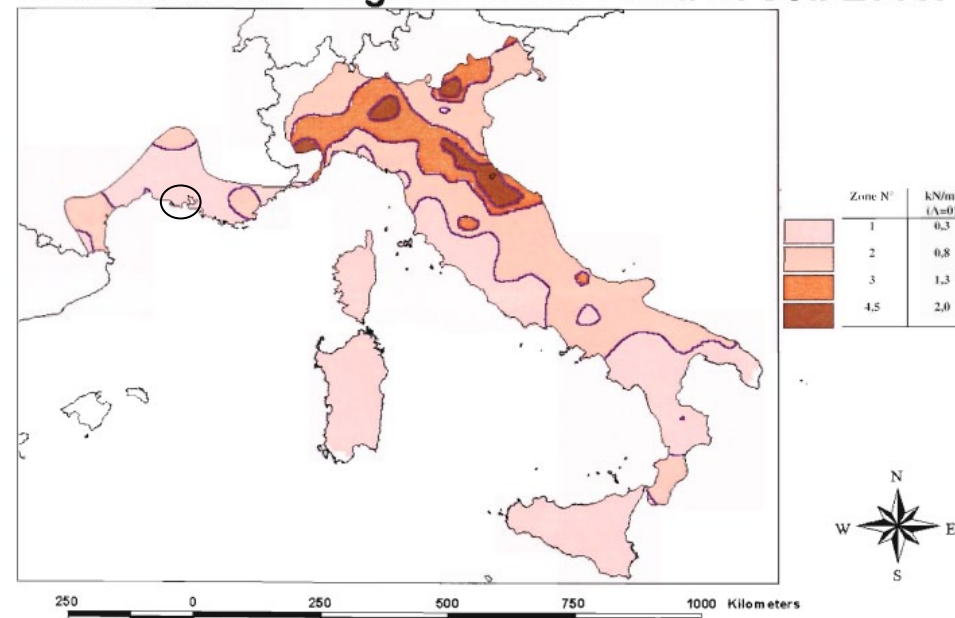


Imagen 108: Sobrecarga de nieve según el Eurocódigo 1 para la zona del Mediterráneo.



## 5.5 COMBINACIÓN DE ACCIONES

La combinación de cargas se hace automáticamente por el programa Architrave de acuerdo con lo establecido en el Código Técnico de la Edificación (CTE) y el Apartado 4.4.2 del Documento Básico de Seguridad Estructural (DB-SE).

### 5.3.1 COMBINACIÓN EN ESTADO LIMITE ÚLTIMO (ELÚ)

El DB-SE define las siguientes combinaciones para comprobar a resistencia:

- Situaciones permanentes o transitorias:

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

- Situaciones accidentales:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + A_d + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

- Situaciones sísmicas:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Siendo:

$G_{k,j}$	Valor característico de las acciones permanentes.
$G_{k,j}$	Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.
$P_k$	Valor característico de la acción del pretensado.
$Q_{k,1}$	Valor característico de la acción variable determinante.
$\psi_{0,i} Q_{k,i}$	Valor representativo de combinación de las acciones variables concomitantes.
$\psi_{1,1} Q_{k,1}$	Valor representativo frecuente de la acción variable determinante.
$\psi_{2,i} Q_{k,i}$	Valores representativos cuasipermanentes de las acciones variables con la acción determinante o con la acción accidental.
$A_k$	Valor característico de la acción accidental.
$A_{E,k}$	Valor característico de la acción sísmica.

Los coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones en ELU son:

Tipo de verificación <sup>(1)</sup>	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	0,80
	Variable	1,50	0

Tabla 8: Coeficientes parciales de seguridad ELU.

Los coeficientes de simultaneidad a aplicar sobre las cargas variables son:

	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Sobrecarga superficial de uso (Categorías según DB-SE-AE)			
• Zonas residenciales (Categoría A)	0,7	0,5	0,3
• Zonas administrativas (Categoría B)	0,7	0,5	0,3
• Zonas destinadas al público (Categoría C)	0,7	0,7	0,6
• Zonas comerciales (Categoría D)	0,7	0,7	0,6
• Zonas de tráfico y de aparcamiento de vehículos ligeros con un peso total inferior a 30 kN (Categoría E)	0,7	0,7	0,6
• Cubiertas transitables (Categoría F)	(1)		
• Cubiertas accesibles únicamente para mantenimiento (Categoría G)	0	0	0
Nieve			
• para altitudes > 1000 m	0,7	0,5	0,2
• para altitudes ≤ 1000 m	0,5	0,2	0
Viento			
	0,6	0,5	0
Temperatura			
	0,6	0,5	0
Acciones variables del terreno			
	0,7	0,7	0,7

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

Tabla 9: Coeficientes de simultaneidad a aplicar en ELU y ELS.

De esta manera, para el análisis estructural a llevar a cabo se definen las siguientes combinaciones para comprobación de resistencia en situaciones persistentes o transitorias:

Combinación de acciones gravitatorias

- *ELU-01, uso como variable principal:*  
 $1,35 \times \text{HIP1} + 1,50 \times \text{HIP2} + (1,50 \times 0,5) \times \text{HIP3}$
- *ELU-02, nieve como variable principal:*  
 $1,35 \times \text{HIP1} + 1,05 \times \text{HIP2} + 1,50 \times \text{HIP3}$

Combinación de todas las acciones:

- *ELU-03 Uso como variable principal:*  
 $1,35 \times \text{HIP1} + 1,5 \times \text{HIP2} + (1,5 \times 0,5) \times \text{HIP3} + (1,5 \times 0,6) \times \text{HIP4}$
- *ELU-04 Nieve como variable principal:*  
 $1,35 \times \text{HIP1} + (0,7 \times 1,5) \times \text{HIP2} + 1,50 \times \text{HIP3} + (1,5 \times 0,6) \times \text{HIP4}$
- *ELU-05 Viento como variable principal:*  
 $1,35 \times \text{HIP1} + (1,5 \times 0,7) \times \text{HIP2} + (1,5 \times 0,5) \times \text{HIP3} + 1,5 \times \text{HIP4}$

Información de combinación

Nombre Resistencia, Persistente: Gravitatoria Uso

$(1,35 \times \text{HIP01}) + (1,50 \times \text{HIP02}) + (0,75 \times \text{HIP03})$

Factor	Hipótesis
1,35	01. Peso propio
1,50	02. Uso
0,75	03. Nieve

Tabla 10: Captura Architrave Combinación ELU-01

Información de combinación

Nombre Resistencia, Persistente: Gravitatoria Nieve

$(1,35 \times \text{HIP01}) + (1,50 \times \text{HIP03}) + (1,05 \times \text{HIP02})$

Factor	Hipótesis
1,35	01. Peso propio
1,05	02. Uso
1,50	03. Nieve

Tabla 11: Captura Architrave Combinación ELU-02.

Información de combinación

Nombre Resistencia, Persistente: Uso

$(1,35 \times \text{HIP01}) + (1,50 \times \text{HIP02}) + (0,75 \times \text{HIP03}) + (0,90 \times \text{HIP04})$

Factor	Hipótesis
1,35	01. Peso propio
1,50	02. Uso
0,75	03. Nieve
0,90	04. Viento

Tabla 12: Captura Architrave Combinación ELU-03.

Información de combinación

Nombre Resistencia, Persistente: Nieve

$(1,35 \times \text{HIP01}) + (1,50 \times \text{HIP03}) + (1,05 \times \text{HIP02}) + (0,90 \times \text{HIP04})$

Factor	Hipótesis
1,35	01. Peso propio
1,05	02. Uso
1,50	03. Nieve
0,90	04. Viento

Tabla 13: Captura Architrave Combinación ELU-04.

Información de combinación

Nombre Resistencia, Persistente: Viento

$(1,35 \times \text{HIP01}) + (1,50 \times \text{HIP04}) + (1,05 \times \text{HIP02}) + (0,75 \times \text{HIP03})$

Factor	Hipótesis
1,35	01. Peso propio
1,05	02. Uso
0,75	03. Nieve
1,50	04. Viento

Tabla 14: Captura Architrave Combinación ELU-05.

### 5.3.2 COMBINACIÓN EN ESTADO LIMITE DE SERVICIO (ELS)

El DB-SE define las siguientes combinaciones para comprobar a estabilidad:

- Combinación característica:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{l > 1} \psi_{0,l} \cdot Q_{k,l}$$

- Combinación frecuente:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{l > 1} \psi_{2,l} \cdot Q_{k,l}$$

- Combinación casi permanente:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{l \geq 1} \psi_{2,l} \cdot Q_{k,l}$$

Siendo:

$G_{k,j}$	Valor característico de las acciones permanentes.
$G_{k,j}$	Valor característico de las acciones permanentes de valor no constante.
$P_k$	Valor característico de la acción del pretensado.
$Q_{k,1}$	Valor característico de la acción variable determinante.
$\psi_{0,l} \cdot Q_{k,l}$	Valor representativo de combinación de las acciones variables concomitantes.
$\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$	Valor representativo frecuente de la acción variable determinante.
$\psi_{2,l} \cdot Q_{k,l}$	Valores representativos cuasipermanentes de las acciones variables con la acción determinante o con la acción accidental.
$A_k$	Valor característico de la acción accidental.
$A_{E,k}$	Valor característico de la acción sísmica.

Los coeficientes de simultaneidad para Estado Límite de Servicio son los mismos que en apartado anterior (Tabla 8) mientras que los coeficientes parciales de seguridad ( $\gamma$ ) para las acciones en ELS si que varían. (Tabla 15)

Estabilidad		desestabilizadora	estabilizadora
	Permanente		
	Peso propio, peso del terreno	1,10	0,90
	Empuje del terreno	1,35	0,80
	Presión del agua	1,05	0,95
	Variable	1,50	0

Tabla 15: Coeficientes parciales de seguridad para ELS.

Las combinaciones de acciones llevadas a cabo por el Architrave para ELS son:

Combinaciones características

- ELS-01, Gravitatoria, Uso como variable principal:*  
HIP1 + HIP2 + 0,5\*HIP3 + 0,6\*HIP4
- ELS-02, Gravitatoria, Nieve como variable principal:*  
HIP1 + 0,7\*HIP2 + HIP3 + 0,6\*HIP4
- ELS-03, Viento como variable principal:*  
HIP1 + 0,7\*HIP2 + 0,5\*HIP3 + HIP4

Combinación frecuente

- ELS-04, Uso como variable principal:*  
HIP1 + 0,5\*HIP2
- ELS-05, Nieve como variable principal:*  
HIP1 + 0,3\*HIP2 + 0,2\*HIP3
- ELS-06, Viento como variable principal:*  
HIP1 + 0,3\*HIP2 + 0,5\*HIP4

Combinación casi permanente

- ELS-07: HIP1 + 0,3\*HIP2*

Infomación de combinación

Nombre Característica: Nieve

**(1,00xHIP01) + (1,00xHIP03) + (0,70xHIP02) + (0,60xHIP04)**

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
0,70	02. Uso
1,00	03. Nieve
0,60	04. Viento

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Tabla 16: Captura Architrave Combinación ELS-01.

Información de combinación

Nombre Característica: Uso

$(1,00 \times \text{HIP01}) + (1,00 \times \text{HIP02}) + (0,50 \times \text{HIP03}) + (0,60 \times \text{HIP04})$

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
1,00	02. Uso
0,50	03. Nieve
0,60	04. Viento

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Tabla 17: Captura Architrave Combinación ELS-02.

Información de combinación

Nombre Característica: Viento

$(1,00 \times \text{HIP01}) + (1,00 \times \text{HIP04}) + (0,70 \times \text{HIP02}) + (0,50 \times \text{HIP03})$

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
0,70	02. Uso
0,50	03. Nieve
1,00	04. Viento

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Tabla 20: Captura Architrave Combinación ELS-05.

Información de combinación

Nombre Frecuente: Nieve

$(1,00 \times \text{HIP01}) + (0,20 \times \text{HIP03}) + (0,30 \times \text{HIP02})$

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
0,30	02. Uso
0,20	03. Nieve

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Tabla 18: Captura Architrave Combinación ELS-03.

Información de combinación

Nombre Frecuente: Viento

$(1,00 \times \text{HIP01}) + (0,50 \times \text{HIP04}) + (0,30 \times \text{HIP02})$

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
0,30	02. Uso
0,50	04. Viento

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Tabla 21: Captura Architrave Combinación ELS-06.

Información de combinación

Nombre Frecuente: Uso

$(1,00 \times \text{HIP01}) + (0,50 \times \text{HIP02})$

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
0,50	02. Uso

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Tabla 19: Captura Architrave Combinación ELS-04.

Información de combinación

Nombre Casi Permanente

$(1,00 \times \text{HIP01}) + (0,30 \times \text{HIP02})$

Factor	Hipótesis
1,00	01. Peso propio
0,30	02. Uso

Añadir hipótesis

Eliminar hipótesis

Tabla 22: Captura Architrave Combinación ELS-07.

### 5.4 MATERIALES

La Unité de Marsella fue uno de los primeros edificios de Hormigón Armado. Para su diseño estructural Le Corbusier fundó el Taller de los constructores ATBAT en 1945. Este taller era el encargado de realizar cambios e investigación sobre el material a pie de obra. Por lo tanto, al no obtener información original sobre las propiedades de los materiales, se ha decidido realizar el análisis con HA-20 y Acero-230, los materiales de menor resistencia disponibles en la herramienta informática.

Materiales de la estructura:

<ul style="list-style-type: none"> <li>Hormigón armado - HA20</li> <li>Acero - S235</li> </ul>	Nombre: <input type="text" value="Hormigón armado - HA20"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Asignar nombre por defecto
	Clase: <input type="text" value="Hormigón armado"/>
	Tipo: <input type="text" value="HA20"/>

Añadir Eliminar

Propiedades

Peso específico:	<input type="text" value="25,00"/> kN/m3
Módulo de elasticidad longitudinal:	<input type="text" value="25.811,0"/> N/mm2
Módulo de elasticidad transversal:	<input type="text" value="10.754,6"/> N/mm2
Coefficiente de Poisson:	<input type="text" value="0,2000"/>
Coefficiente de dilatación:	<input type="text" value="0,000012"/> (°C)-1

Exportar Importar Habilitar edición Cerrar

Tabla 23: Captura Architrave de las propiedades del hormigón.

Materiales de la estructura:

<ul style="list-style-type: none"> <li>Hormigón armado - HA20</li> <li>Acero - S235</li> </ul>	Nombre: <input type="text" value="Acero - S235"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Asignar nombre por defecto
	Clase: <input type="text" value="Acero"/>
	Tipo: <input type="text" value="S235"/>

Añadir Eliminar

Propiedades

Peso específico:	<input type="text" value="78,50"/> kN/m3
Módulo de elasticidad longitudinal:	<input type="text" value="210.000,0"/> N/mm2
Módulo de elasticidad transversal:	<input type="text" value="80.769,2"/> N/mm2
Coefficiente de Poisson:	<input type="text" value="0,3000"/>
Coefficiente de dilatación:	<input type="text" value="0,000012"/> (°C)-1

Exportar Importar Habilitar edición Cerrar

Tabla 24 Captura Architrave de las propiedades del acero.

## **6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

## 6.1 COMPORTAMIENTO GLOBAL DE LA ESTRUCTURA

### 6.1.1 CARGAS VERTICALES

La Unité de Marsella es un edificio residencial de 18 plantas de 3288m<sup>2</sup> que se sustenta sobre 15 pares de pilares en planta baja. Esto supone que las cargas verticales en planta baja sean muy elevadas y se concentren en puntos muy localizados. Además hay que añadir la diferencia estructural entre el entramado de las plantas altas y los pilotis de la planta baja, por lo que es fundamental entender como circulan las cargas verticales a través del elemento de transición, el suelo artificial.

En cada planta los forjados recogen las cargas gravitatorias y las transmiten a los pilares dispuestos cada 4,19m. Estos pilares van recogiendo o las cargas de todas las plantas, llegando a acumular hasta 2.311kN al llegar al suelo artificial.

En el suelo artificial podemos encontrar dos situaciones. Si los ejes de pilares del entramado coinciden con el eje de los pilotis, su carga es transmitida directamente al pilotis inferior. En el resto, al no haber continuidad vertical la carga es recogida por las jácenas dobles y transmitidas a las alas de los pilotis, que trabajan a compresión transmitiendo las cargas hasta la cimentación.

En el caso de que los ejes de pilares se encuentren en el punto medio entre pilotis, la carga debe ser redirigida a los apoyos. De esta manera la jácena simple absorbe las cargas del entramado superior que son conducidas hasta los pilotis mediante la viga longitudinal de grandes dimensiones que a su vez apea la jácena.

La integridad del edificio está entonces condicionada por la correcta transmisión de esfuerzos entre ambos sistemas estructurales, asegurando que no produzcan sollicitaciones que agoten las piezas (Estado Límite Último) y que estas produzcan deformaciones dentro de los límites de aptitud para el servicio (Estado Límite Servicio).

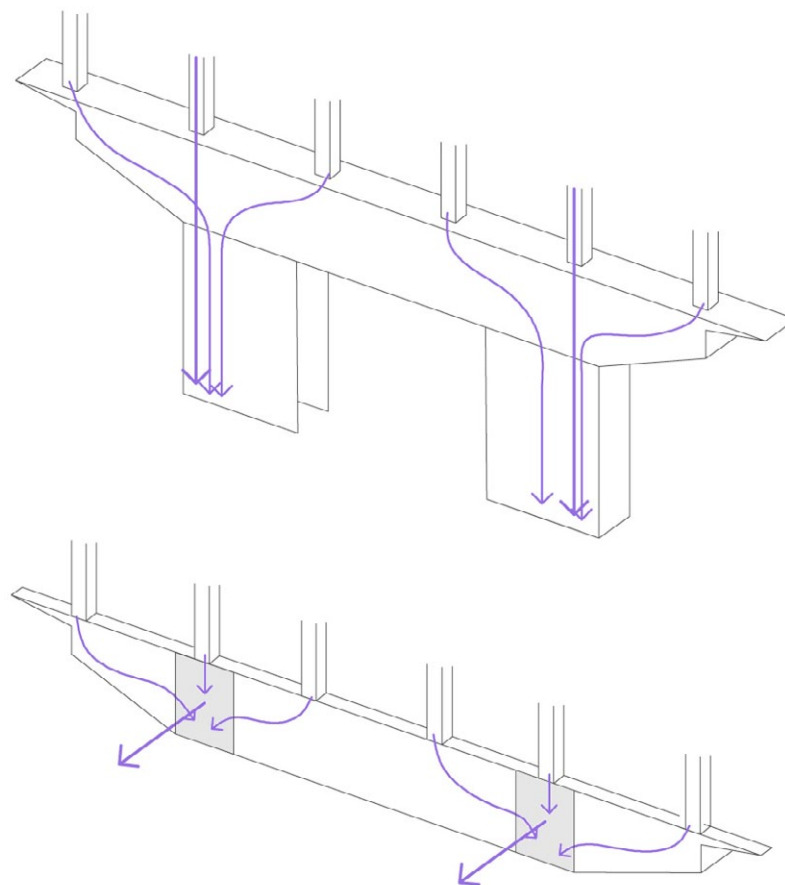


Imagen 109: Esquema de transmisión de cargas verticales: Jácena doble (sup.) y jácena simple (inf.)

### 6.1.2 CARGAS HORIZONTALES

La Unité de Marsella tiene una serie de condicionantes que hace de especial importancia el análisis de la respuesta de la estructura frente a cargas horizontales de viento. Para conseguir que la gran parte de las viviendas tengan dos orientaciones Le Corbusier diseña la Unité con un ancho de 24m. Además para minimizar la ocupación de suelo según la teoría del urbanismo moderno y cumplir con la ocupación establecida necesita un elevado número de plantas, lo que deriva en un edificio de 56m de altura muy esbelto en su dimensión transversal. Finalmente, la carga de viento más frecuente se encontraría a 45° respecto la fachada longitudinal.

Otra carga horizontal importante a evaluar en el análisis global de la estructura sería el comportamiento ante sismo, debido a la poca rigidez de la estructura en planta baja. Dada la extensión del trabajo no se evalúan los efectos de sismo dejando abierto un posible campo de estudio para trabajos posteriores.

Para responder a estas acciones horizontales son muy importantes los forjados de losa en el entramado del cuerpo superior, que reciben la carga de los pilares y vigas de fachada y la transmiten a los elementos verticales. Los forjados de las calles rigidizan la planta tipo de vivienda ligeramente en su tramo central, pero los más efectivos son los forjados continuos de la planta tipo cortafuego ya que consolidan la estructura cada tres plantas, haciendo que esta responda monolíticamente frente a las acciones horizontales.

También son importantes los elementos horizontales de rigidización, que en este caso son la caja de ascensores y la fachada de hormigón que delimita el espacio de comunicación vertical. Estos elementos reciben la carga horizontal de los forjados y la transmiten por compresión hasta la cimentación.

Si analizamos los movimientos horizontales de la losa de la planta de cubierta bajo la *hipótesis de viento* en los distintos bloques entre juntas de dilatación, podemos cuantificar a grosso modo el efecto de distintas alteraciones en la respuesta a viento del edificio.

Los dos bloques de la derecha tienen las mismas dimensiones y ningún elemento de rigidización adicional, por lo que las losas de cubierta se desplazan uniformemente hasta unos 2,6cm. En bloque donde se sitúa la comunicación vertical, al haber un núcleo rígido de muros de hormigón los desplazamientos son mínimos. Dado que el núcleo de rigidización se encuentra excéntrico, el bloque torsiona ligeramente en sentido antihorario, habiendo puntos con un desplazamiento de 1,1cm y otros con 1,3cm. Finalmente, la planta del primer bloque no es un polígono regular, la parte izquierda de la planta tiene mayor rigidez frente a viento al tener mayor ancho oponiéndose al desplazamiento, por eso también torsiona en sentido antihorario. En este bloque se obtiene un desplazamiento máximo de 3,1cm y un desplazamiento mínimo de 2,60cm. También se aprecia mucha diferencia en la deformación entre los últimos bloques, lo que incrementa la importancia de resolver la junta de dilatación correctamente.



Imagen 110: Desplazamientos Y en la losa de cubierta bajo hipótesis de viento



## 6.2 ANÁLISIS GLOBAL DE LA ESTRUCTURA

### 6.2.1 ELS. Deformaciones

De los diagramas de deformación obtenidos (Imágenes 111, 112, 113 y 114) podemos determinar que la estructura responde de manera muy similar para las combinaciones gravitatorias ELS-01 y ELS-02 con las variables principales de uso y nieve respectivamente. Ambas combinaciones tienen aproximadamente una flecha absoluta de 2,2cm y una flecha relativa de 0,002cm en el punto de mayor deformación. El caso más desfavorable es la combinación *ELS-03 con carga de viento como variable principal* y requiere un estudio más detallado.

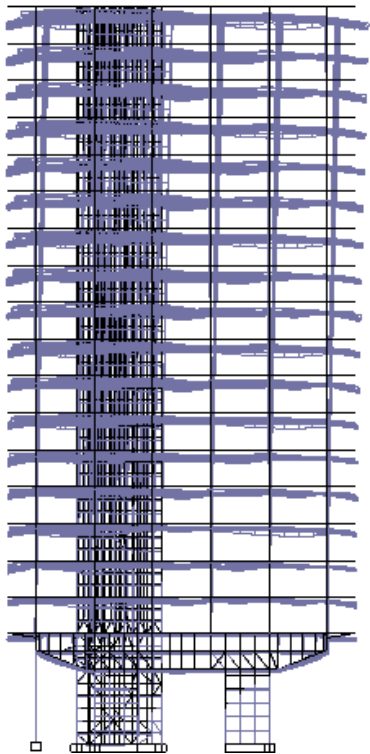


Imagen 111: Deformación para hipótesis de peso propio.

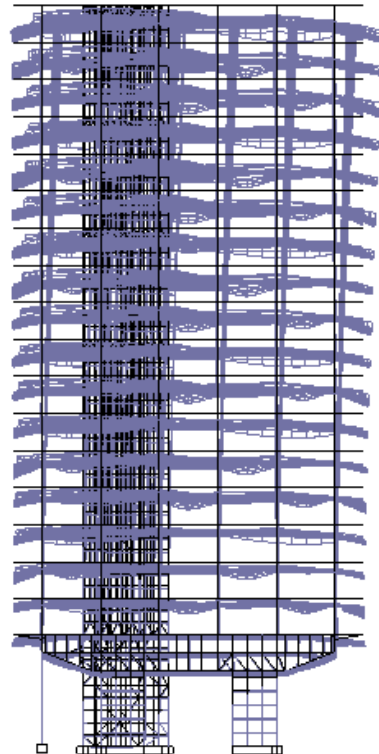


Imagen 112: Deformación para la ELS-01, Uso como variable principal.

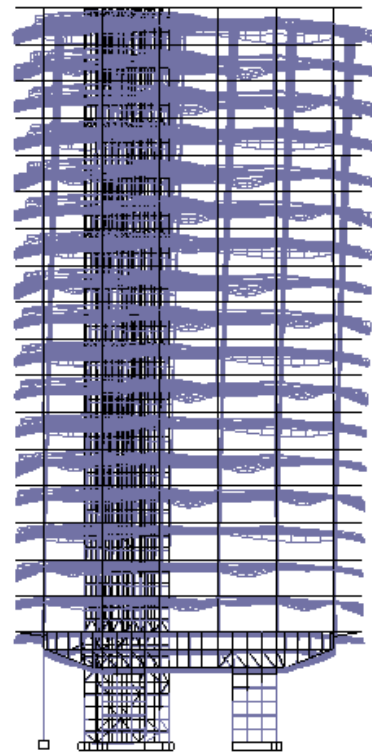


Imagen 113: Deformación para ELS-02, Nieve como variable principal.

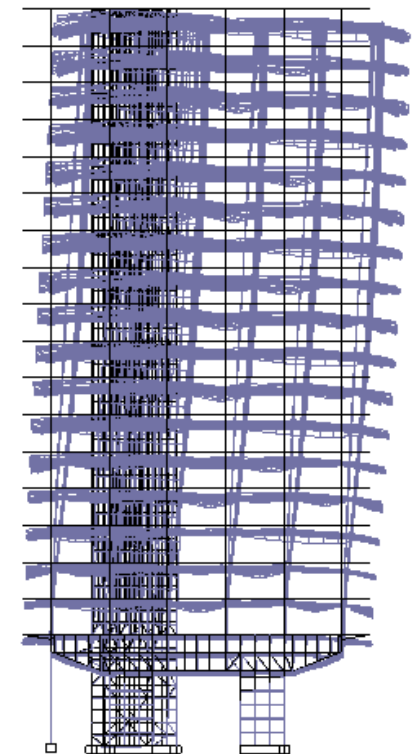


Imagen 114: Deformación para ELS-03, Viento como variable principal.

**ESTUDIO DE LA COMBINACIÓN ELS-03, Viento como variable principal.**

Como se aprecia en los mapas el mayor desplazamiento de la Unité se produce en la dirección del viento, dirección Y (Imagen 115), con un valor máximo de 3,055cm en la planta de cubierta del bloque con geometría irregular.

Si comparamos con el desplazamiento previsto para la estructura bajo la hipótesis de viento (Imagen 110) encontramos un conflicto en el bloque con la comunicación vertical. Cabría esperar que el núcleo rígido de hormigón no se desplazase apenas, pero en su coronación se desplaza 2,40cm, habiendo sólo una diferencia de 1cm respecto a los bloques sin rigidización.

Esto es debido al efecto en la combinación del peso propio del bloque (Imágenes 119 y 120). Como la caja del ascensor es un muro de hormigón de 40cm de espesor es muy rígido y apenas tiene desplazamiento vertical bajo la acción del peso propio. Por el contrario, la zona posterior del bloque está configurada por pilares que se acortan mucho más bajo la acción del peso propio. De esta manera el peso propio induce a un desplazamiento hacia la parte posterior del bloque, arrastrando al núcleo de comunicación consigo y generando ese desplazamiento en coronación.

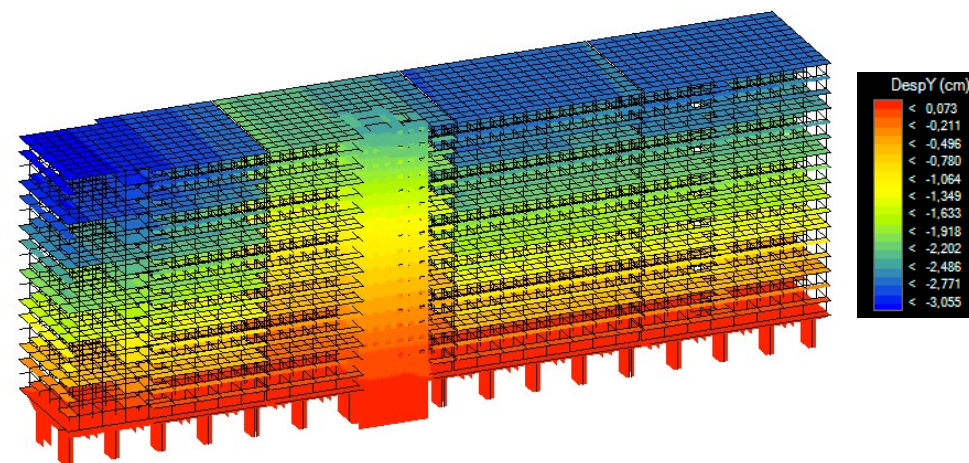


Imagen 115: ELS-03 Desplazamiento en la dirección del viento, Y.

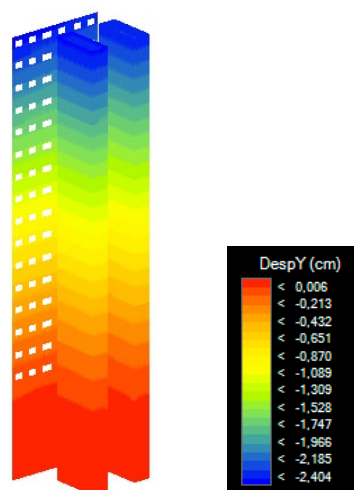


Imagen 117: ELS-03 Desplazamiento muros de hormigón en la dirección del viento, Y.

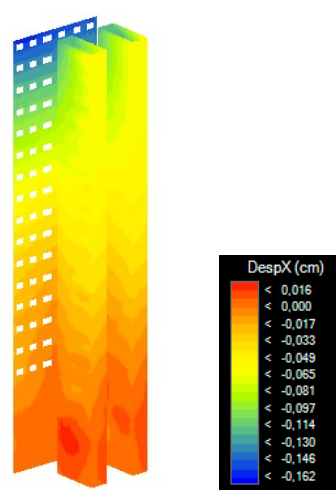


Imagen 118: ELS-03 Desplazamiento muros de hormigón en la perpendicular del viento, X.

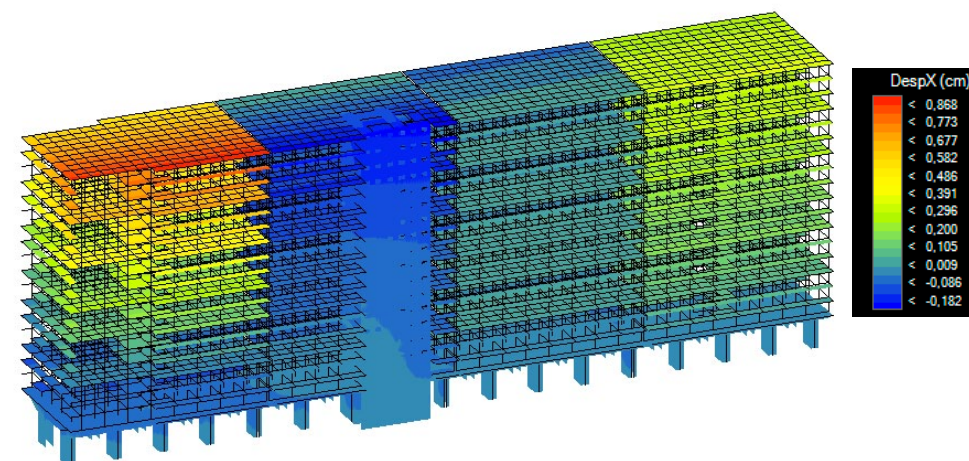


Imagen 116: ELS-03 Desplazamiento en la perpendicular al viento, X

El efecto del peso propio también explica el desplazamiento diferencial en el sentido longitudinal del bloque, dirección x (Imagen 116). El núcleo de comunicación se desplaza más que el entramado lateral bajo la combinación *ELS-03*, ya la diferencia de rigidez entre los elementos también induce una torsión, en este caso en el sentido contrario a la torsión del viento.

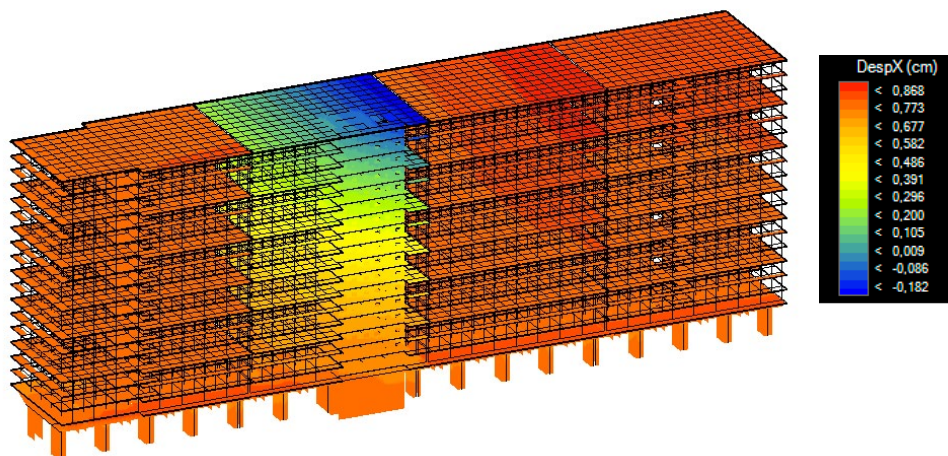


Imagen 119: Deformación para hipótesis de peso propio en la dirección del viento, Y.

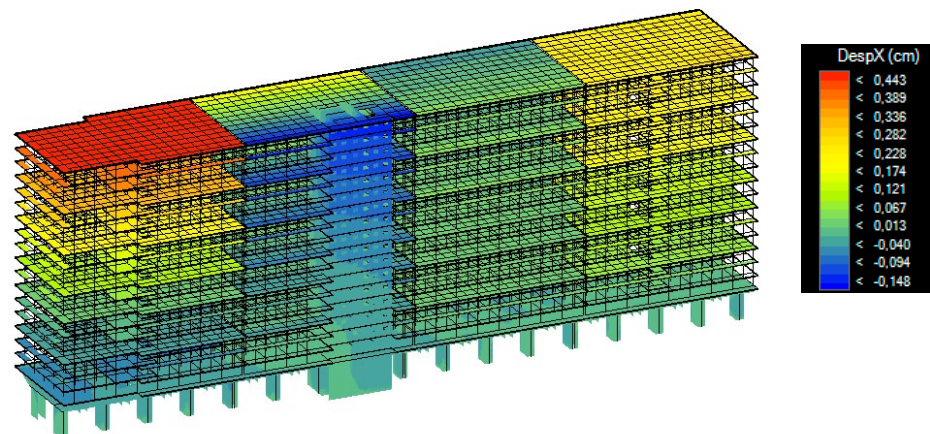


Imagen 120: Deformación para hipótesis de peso propio en la dirección perpendicular al viento, X.

También se requiere un análisis más detallado del desplazamiento del último bloque, en el que se realizarán las comprobaciones respecto a desplome según el apartado 4.3.3 DB-SE, que considera la integridad de los elementos constructivos susceptibles de ser dañados por desplazamientos horizontales, tales como tabiques o fachadas rígidas.

Según la normativa, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral, si ante cualquier combinación de acciones característica, el desplome real es menor a:

- Desplome total= 1/500 de la altura total del edificio
- Desplome local= 1/250 de la altura de la planta

En el caso que nos atañe el límite para el desplome total el límite se establecerá en  $= 56/500 = 0,112m = 11,2cm$  mientras que para el desplome local será  $= 2,70/250 = 0,108m = 1,08cm$ .

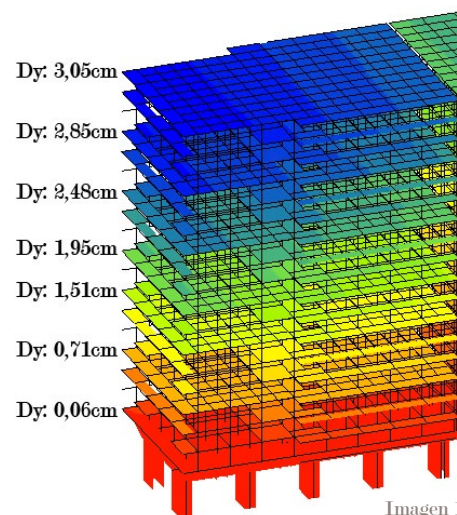


Imagen 121: Detalle del bloque con mayor desplome en dirección Y.

El desplome total de la Unité de Marsella es de 3,055cm, bastante inferior al límite, por lo que se puede afirmar que no presenta problema de desplome y que nos encontramos con una estructura muy rígida.

No es necesario comprobar en la dirección x ya que los desplazamientos son mucho menores. Además, como el desplazamiento cada 3 plantas aumenta poco más de 1 cm tampoco hay problema de desplome local.

### ESTUDIO DE LOS ELEMENTOS VERTICALES DE RIGIDIZACIÓN

Las tensiones verticales de compresión,  $S_y$ , en el muro incrementan a medida que desciende el muro al ir acumulando las acciones de las plantas (Imagen 122). Se puede apreciar cuatro zonas con mayor concentración de tensiones de compresión. Por un lado encontramos los apoyos con el suelo ( $-6,349\text{N/mm}^2$ ) y el tramo de muro justo sobre el suelo artificial ( $-7,064\text{ N/mm}^2$ ). Estas concentraciones de deben a que el muro se encuentra con un elemento muy rígido por lo que se produce una elevada transferencia de cargas.

El punto con mayor tensión de compresión ( $-7,938\text{ N/mm}^2$ ) es el encuentro del muro de fachada, el voladizo y el forjado en la coronación del muro. Este punto es conflictivo en todas las plantas por el encuentro de tantos elementos de distintas rigideces y tipologías constructivas. Cerca de este punto podemos encontrar el punto menos comprimido ( $2,454\text{N/mm}^2$ ) en el punto de aplicación directa de una carga puntual de viento, donde si que se necesitaría disponer puntualmente de armadura de tracción específica.

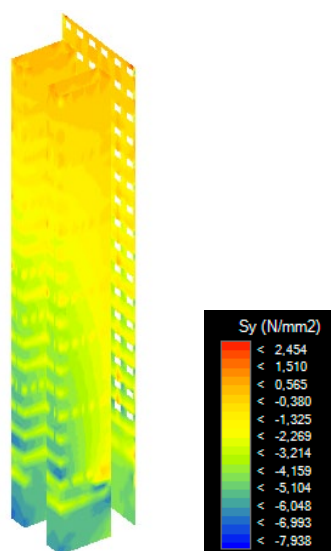


Imagen 122: ELU-01 Tensiones  $S_y$  (verticales)

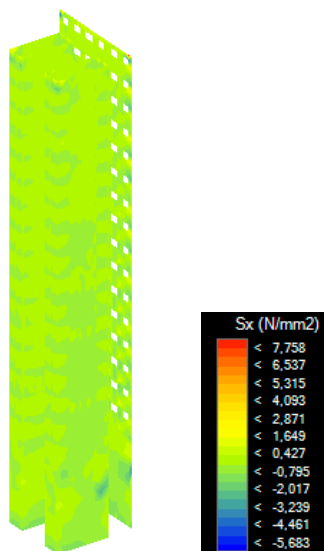


Imagen 123: ELU-01 Tensiones  $S_x$  (horizontales)

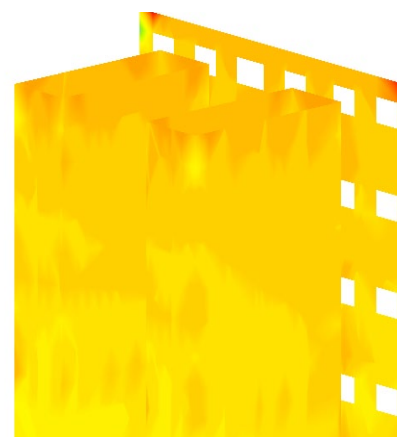


Imagen 124: Detalle  $S_y$  coronación muros.

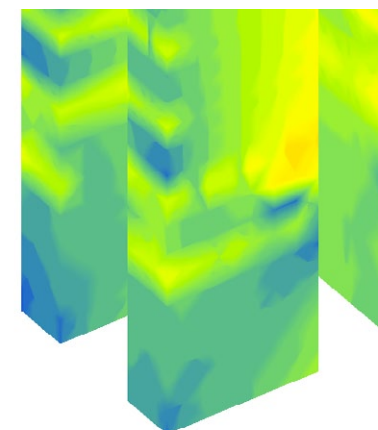


Imagen 125: Detalle  $S_y$  base muros.

Finalmente hay que estudiar el encuentro entre el muro y la viga longitudinal. En este punto hay una concentración local de tensiones de compresión de  $-6,918\text{N/mm}^2$  inferior a la resistencia de cálculo del hormigón, pese a esto, al ser un punto crítico en la transferencia de cargas, Le Corbusier refuerza el muro aumentando su espesor con un pilar. También llama la atención que la transferencia de cargas de los forjados al muro reduzca la tensión del muro. Esto se justifica por la diferencia de rigideces mencionada anteriormente porque los forjados arrastran el muro, traccionando esos puntos.

En cuanto a tensiones horizontales  $S_x$  en las superficies (Imagen 123), generalmente son nulas y despreciables excepto en alguna zona puntual donde hay una ligera concentración de tensiones. Estas concentraciones se producen alrededor de los huecos del muro debido a la discontinuidad geométrica y mecánica que suponen, así como en el encuentro de los muros de hormigón con las superficies de la planta técnica.

### 6.2.2 ELU. Resistencia

Los pilotis están modelados mediante una barra, que transmite el axil de los pilares superiores y unos muros que transmiten las tensiones de las vigas. Ambas partes funcionan a compresión con el objetivo de transmitir las cargas de las plantas superiores a la cimentación.

Si analizamos la transmisión de cargas verticales a través de las 18 plantas de la Unité (Imagen 126) podemos observar cómo crecen uniformemente planta a planta, ya que todas tienen características constructivas y funcionales similares, hasta llegar al suelo artificial, donde la carga en los pilotis inferiores aumenta cuantitativamente, ya que se redistribuyen las cargas de 12 pilares del entramado a tan solo 2 pilotis. De esta manera la carga en un pilar tipo de primera planta es de 2.311kN mientras que la del pilotis es de 14.428,710kN.

También hay que destacar la distribución homogénea de los axiles en las barras de los pilotis, teniendo todas unas cargas similares. La única disparidad en los axiles se produce en los medios pilotis correspondientes a la junta de dilatación, que reciben aproximadamente la mitad de axil ya que sobre ellos sólo descansa la mitad de cuerpo superior que en el resto.

El comportamiento de las alas está muy condicionado por la respuesta estructural de la jácena doble que apean. La jácena tiene una deformación máxima en punta de voladizo lo que, como se aprecia en los desplazamientos verticales (Imagen 130), supone unos movimientos impuestos mayores en la zona izquierda de los muros. Esta deformación deriva en la mayor concentración de tensiones verticales de compresión,  $S_y$ , este punto con un valor de  $-7,701\text{N/mm}^2$  (Imagen 127 y 129). Estas tensiones se disipan por el alzado siguiendo una diagonal a 45 grados, resultando en una distribución bastante homogénea de tensiones, entre  $-3,22$  y  $-4,645\text{N/mm}^2$ , en la base de los mismos.

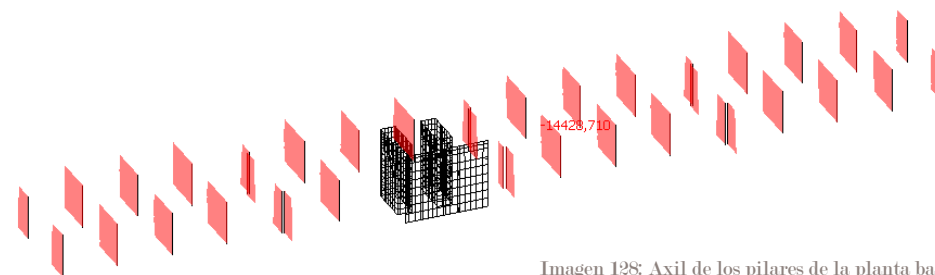


Imagen 128: Axil de los pilares de la planta baja.

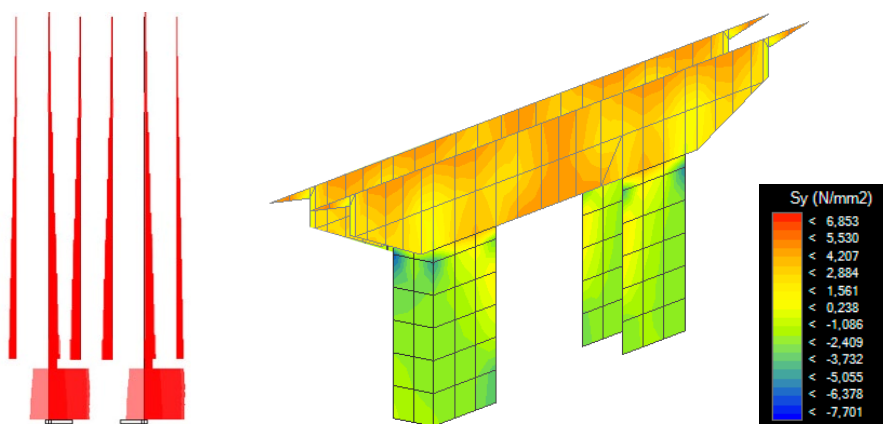


Imagen 126: ELU-01: Axil de los pilares de todo el edificio.

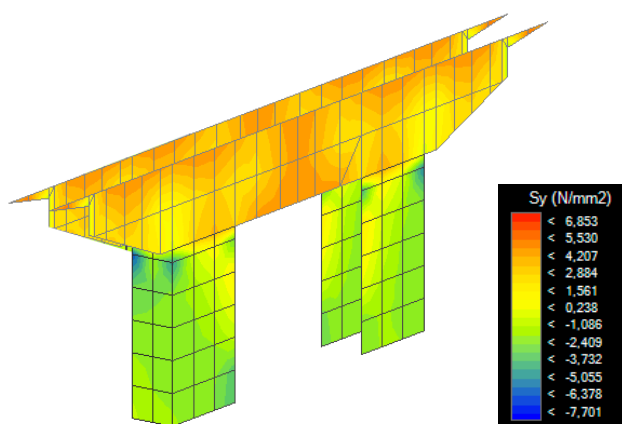


Imagen 127: ELU-01: Conjunto viga-pilotis. Tensiones verticales.

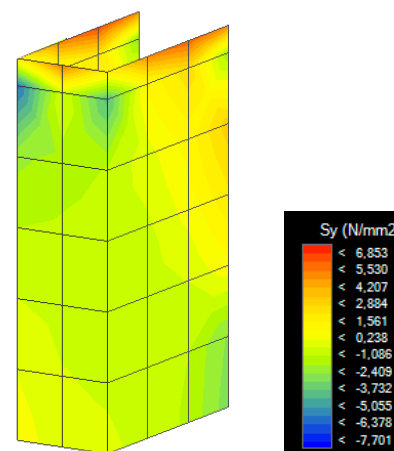


Imagen 129: ELU-01: Detalle Tensiones verticales,  $S_y$ .

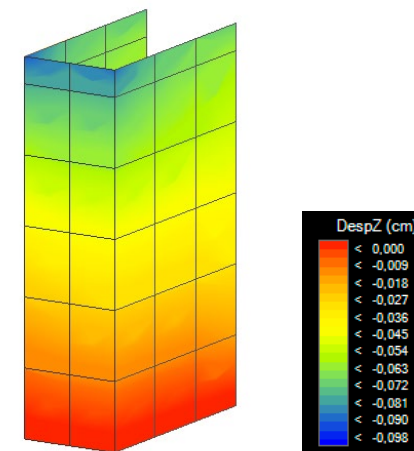


Imagen 130: ELS-01: Desplazamiento vertical.

## 6.5 ANÁLISIS PORMENORIZADO POR PLANTAS

### 6.3.1 SUELO ARTIFICIAL

Según Engel se puede esperar los siguientes comportamientos de las jácenas en función de la longitud de los voladizos y teniendo en cuenta una carga uniformemente repartida:

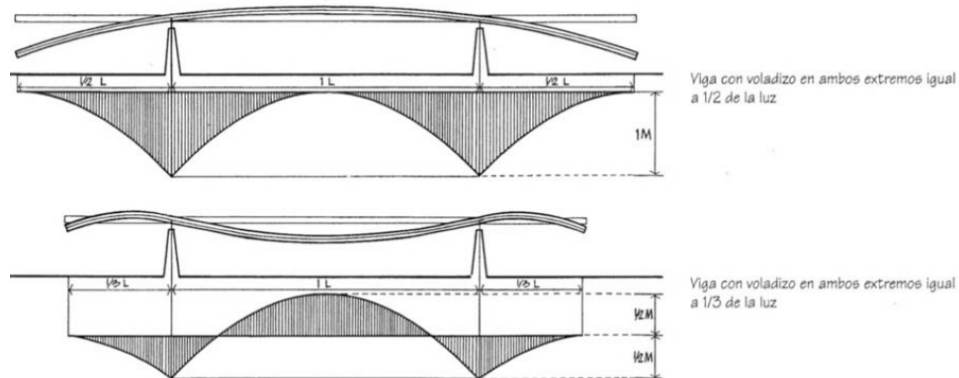


Imagen 131: Esquema sobre la influencia del voladizo en la eficacia de la viga

En un principio la Unité de Marsella entraría dentro del segundo caso, ya que los voladizos son de pequeña dimensión en comparación con el vano central.

Al observar la deformada de las vigas principales que conforman el suelo técnico (Imagen 132), podemos apreciar que esta es una planta muy rígida con muy poca deformación. La mayor deformación se encuentra en el voladizo y en los puntos donde las vigas soportan los pilares del entramado superior. Además se observan dos comportamientos diferentes para cada tipo de jácena.

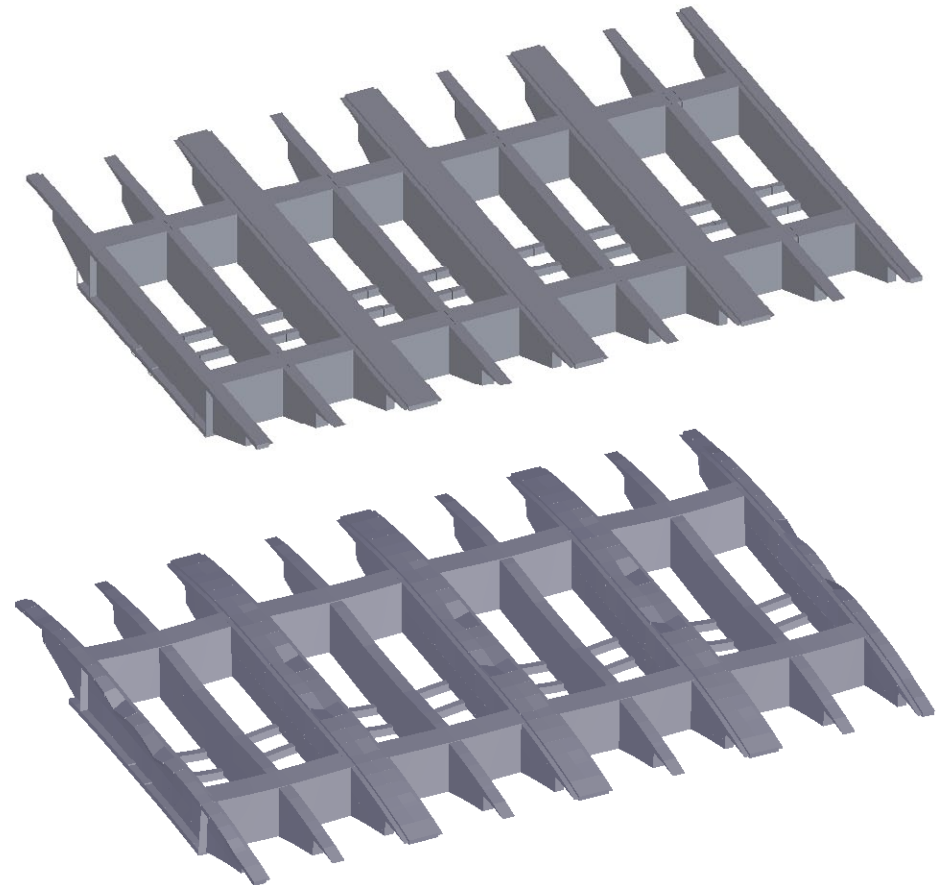


Imagen 132: ELS-01 Detalle de la indeformada (sup.) y la deformada de las vigas del suelo técnico

La jácena simple responde a la segunda respuesta propuesta por Engel, encontrándose fuertemente comprimida en la cara inferior del punto intersección con la viga longitudinal con una tensión de  $-7,056 \text{ N/mm}^2$  y traccionada en la cara superior ( $5,70 \text{ N/mm}^2$ ) (Imagen 133). En la sección del punto medio del vano, debido a las cargas puntuales de los pilares sin continuidad, la parte superior queda comprimida ( $-1,583 \text{ N/mm}^2$ ) y la inferior traccionada ( $1,502 \text{ N/mm}^2$ ) aunque con tensiones mucho inferiores a las mencionadas anteriormente.

El mayor desplazamiento de la jácena simple se encuentra en el voladizo con un valor de  $-0,691 \text{ cm}$  (Imagen 134), pero lo más significativo es que la jácena desciende globalmente unos  $0,134 \text{ cm}$  ya que su punto de apoyo se encuentran en el centro de vano de la viga longitudinal y por ello están sometidas a las deformaciones impuestas por ella.

Debido a la rigidez que le confiere a la jácena doble estar formada por subjácenas unidas mediante una losa de hormigón, a la continuidad de los soportes y a la gran carga en punta de voladizo, su comportamiento es ligeramente diferente.

Como ocurre en la jácena simple, la mayor concentración de tensiones de produce en la sección de apoyo con tensiones de compresión de  $-7,87 \text{ N/mm}^2$  en la cara inferior y de  $4,1 \text{ N/mm}^2$  tracción en la superior (Imagen 135).

La diferencia se encuentra en el comportamiento en el tramo central. Frente a las cargas gravitatorias de los soportes intermedios, sólo deforma de manera muy puntual la losa de unión entre las subjácenas. De esta manera las cargas se distribuyen homogéneamente a través de la losa de unión y no son recibidas directamente por el vano central de la jácena, que se encuentra traccionado asemejándose al primer esquema de Engel.

Otra diferencia significativa respecto a la jácena simple es la poca deformación que sufre la jácena doble en su tramo intermedio, ya que apoya directamente sobre los pilotis que apenas tienen desplazamiento vertical ( $-0,024 \text{ cm}$ ). El mayor desplazamiento vertical también se produce en el voladizo con una magnitud de  $-0,795 \text{ cm}$ .

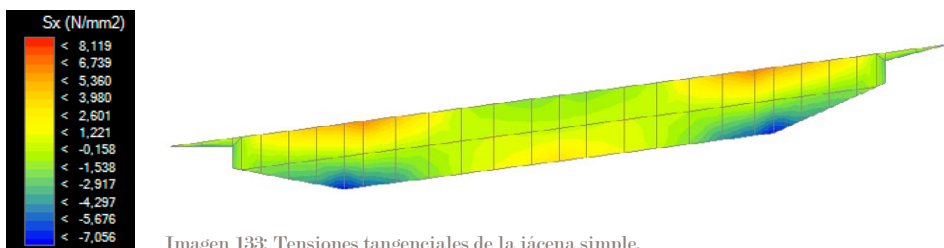


Imagen 133: Tensiones tangenciales de la jácena simple.

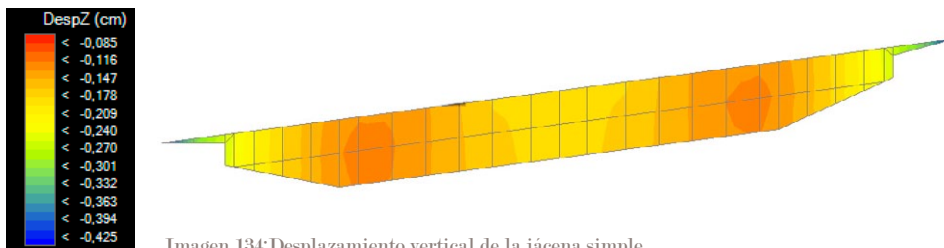


Imagen 134: Desplazamiento vertical de la jácena simple.

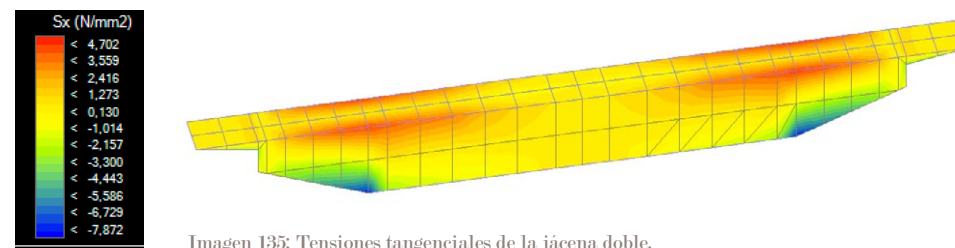


Imagen 135: Tensiones tangenciales de la jácena doble.

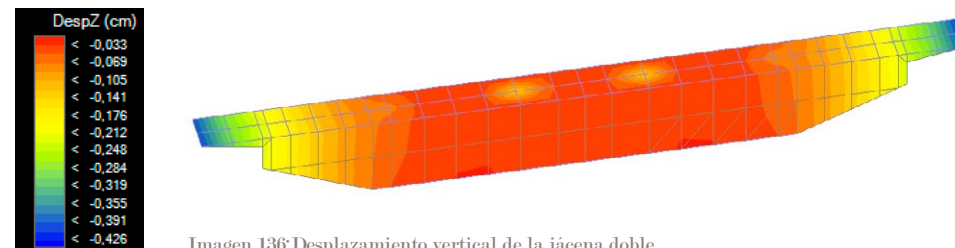


Imagen 136: Desplazamiento vertical de la jácena doble.

Debido a las importantes tracciones que presentan ambas vigas, es necesario diseñar la armadura de las mismas introduciendo armadura de tracción, ya que el hormigón es incapaz de soportar estos valores. No se requerirá armadura de compresión ya que las concentraciones de tensiones de compresión no superan la resistencia de cálculo del hormigón  $= 20/1,5 = 13,33 \text{ N/mm}^2$ .

En la propuesta de armado de Le Corbusier para una jácena doble (Imagen 138) podemos ver como se dispone de un elevado número de armaduras de tracción en la parte superior del apoyo, con hasta 10 barras de diámetro 40mm que se doblan y se alargan por la parte superior e inferior de la sección central del vano, que tienen cada una 4 barras del mismo diámetro. Como las vigas son de grandes dimensiones es necesario emplear armaduras de tracción en el alma, y para ello emplea barras de 12cm cada 70cm.

Hoy en día este tipo de vigas se realizaría mediante el postesado de las armaduras, ya que nos permitiría reducir el canto de la viga a la vez que optimizar el uso de materiales, pero hay que tener en cuenta que la Unité de Marsella es uno de los primeros campos de prueba del uso del hormigón armado en un edificio de tales dimensiones y que en ella se utilizó los sistemas constructivos más novedosos. Posteriormente en la Unité de Nantes-Renzé si que se empleó esta técnica.

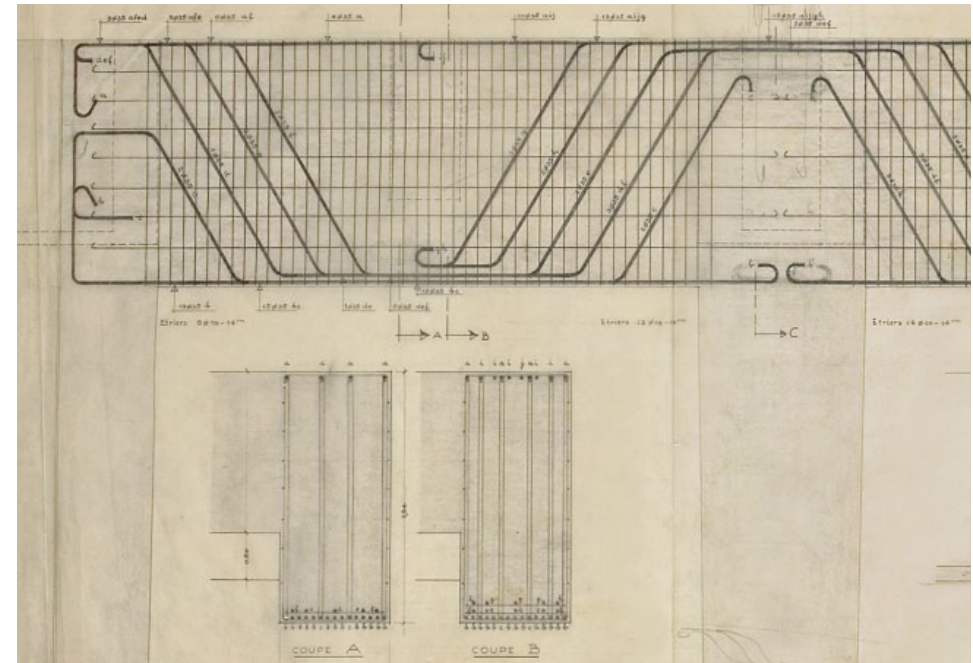


Imagen 137: Detalle armado viga longitudinal

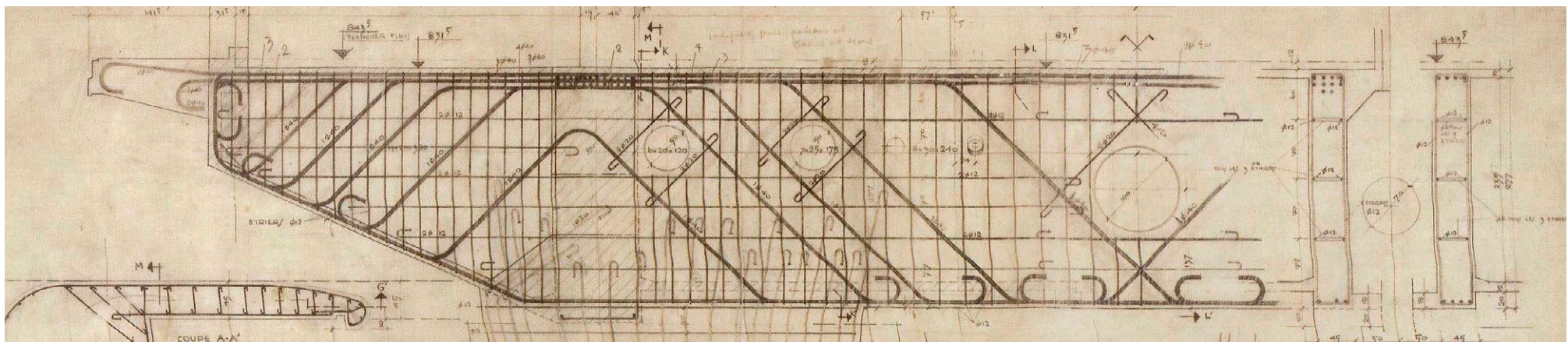


Imagen 138: Detalle armado jácena doble.



Otro elemento importante a considerar es la viga longitudinal que une las jácenas. La viga, modelizada como una barra, tiene un axil máximo de 300,548 kN en los vanos finales de la misma (Imagen 139). Hay que señalar que los tramos contenidos dentro de la jácena doble se encuentran traccionados hasta 49kN debido a la pequeña longitud del vano en comparación a los adyacentes.

La viga también tiene unos cortantes importantes, (Imagen 140) ya que su función es transmitir las cargas verticales de las jácenas, por ello los saltos en las leyes de cortantes ocurren en el encuentro entre los dos elementos. El mayor cortante  $V_y$  es de 4175,533kN. Los momentos  $M_z$  generados por los axiles también tienen su punto máximo en el encuentro de la viga con las jácenas, siendo el valor máximo de 7926,245kNm (Imagen 141).

La lámina de hormigón que unifica el suelo técnico responde solidariamente a las jácenas, con una deformación máxima de -0,43cm en el voladizo debido a las cargas del brise-soleil y un desplazamiento casi nulo en la jácena doble.

En puntos donde la superficie superior coincide con los pilares del cuerpo principal hay una concentración de las tensiones de tracción, ya que la superficie de hormigón se deforma bajo las cargas de estos. Las tracciones son mayores en las jácenas simples ( $4,215\text{N/mm}^2$ ) que en las dobles ( $2,841\text{N/mm}^2$ ), requiriendo la disposición de armaduras de tracción en ambos puntos. En la lámina inferior las compresiones se concentran alrededor de los puntos comprimidos de las jácenas con una magnitud de  $-8,04\text{ N/mm}^2$ , inferiores a la resistencia de cálculo del hormigón.

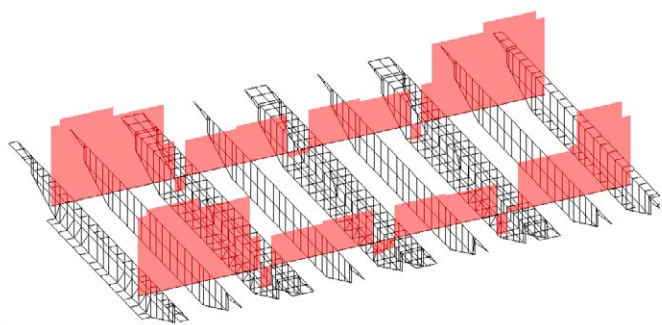


Imagen 139: ELU-01 Axiles de la viga longitudinal

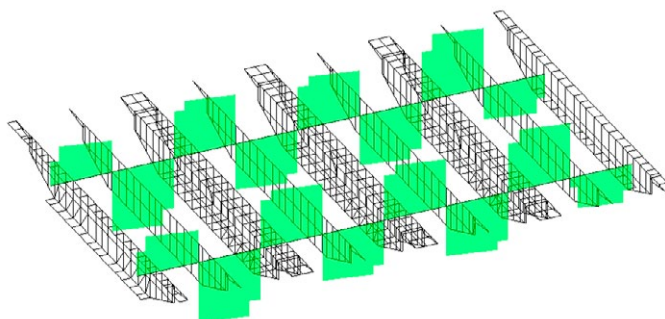


Imagen 140: ELU-01 Cortantes de la viga longitudinal.

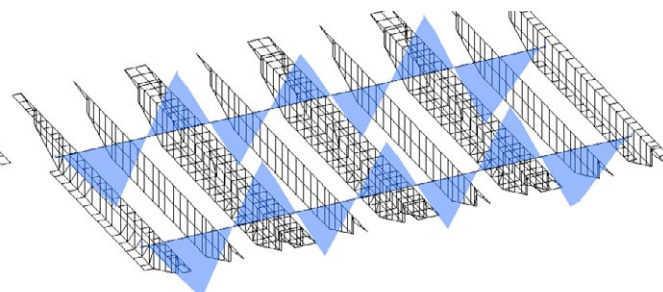


Imagen 141: ELU-01 Momentos Z de la viga longitudinal.

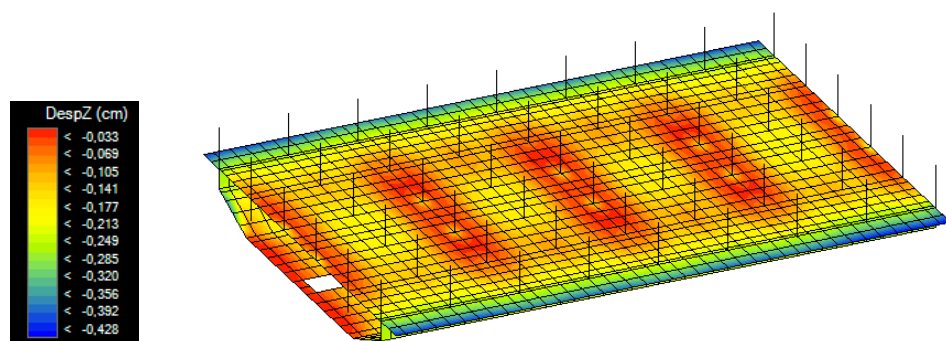


Imagen 142: ELS-01 Desplazamientos verticales de la lámina de hormigón.

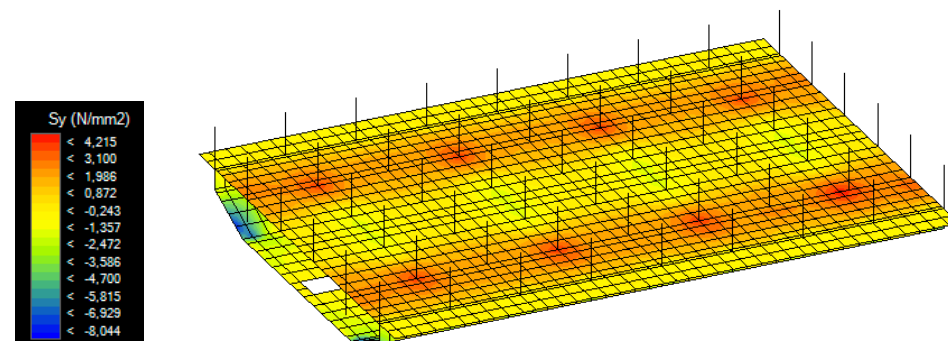


Imagen 143: ELU-01 Tensiones tangenciales de la lámina de hormigón.

### 6.3.2. PLANTA TIPO VIVIENDA

Al analizar la planta tipo vivienda desde la combinación *ELS-01 Característica gravitatoria con uso como variable principal*, se puede apreciar grandes diferencias de deformación entre los dos elementos estructurales que conforman los distintos tipos de forjados.

Las losas y elementos lineales de hormigón no tienen casi deformación mientras que en las viguetas metálicas es mayor. Los mayores descensos se producen en la vigueta paralela al hueco de escalera (flecha relativa -1,86cm) y la vigueta que delimita la planta superior de la doble altura (flecha relativa -0,33cm). Esto es así porque estas viguetas actúan de apoyo para el resto de viguetas del forjado para salvar los huecos, recibiendo las cargas de las mismas.

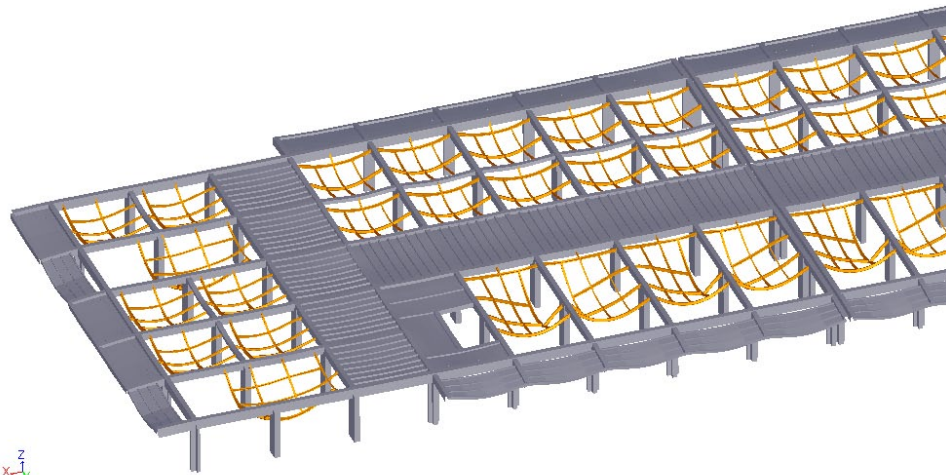


Imagen 144: ELS-01 Detalle de la deformada.

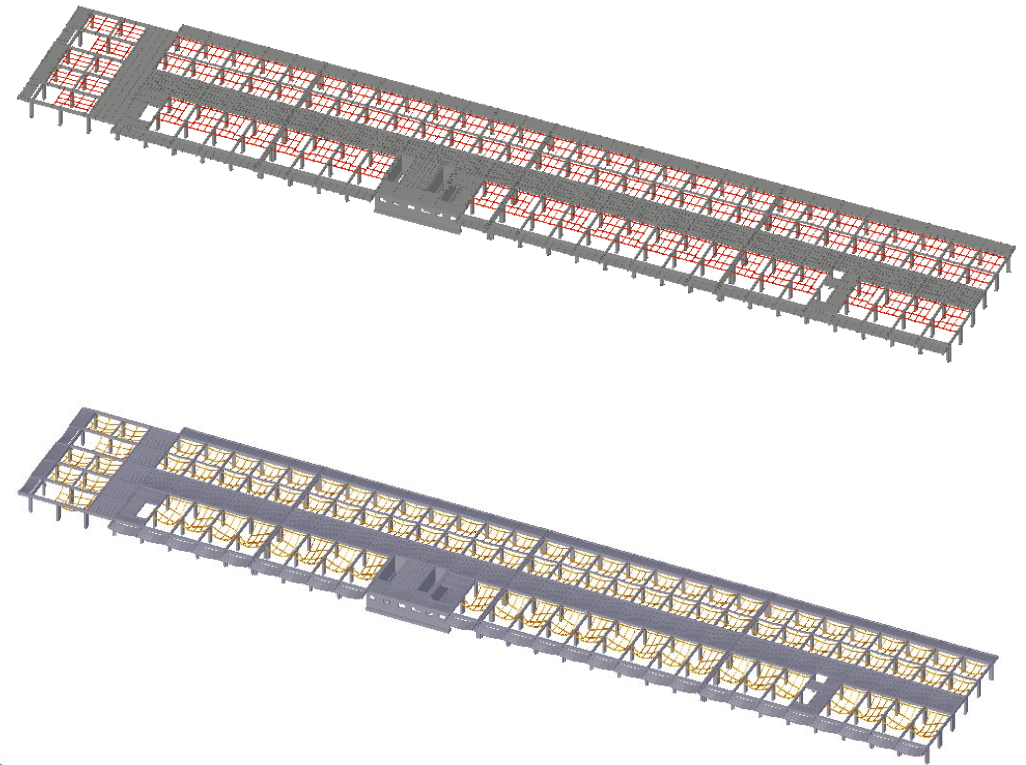


Imagen 145: ELS-01 Indeformada (sup.) y deformada (inf.) del forjado.



Imagen 146: ELS-01 Sección de la deformada.

Si se peritan ambas viguetas podemos ver que a pesar de deformar más que los elementos de hormigón responden correctamente a los criterios de resistencia y flecha.

**Peritar Viga 656.1.1 (Barras: 6123, 6164, 6194, 6229)**

**Sección:** IPN 160

**Propiedades:** Base: 7,40 cm; Altura: 16,00 cm; Área: 22,82 cm<sup>2</sup>; Ix: 5,89 cm<sup>4</sup>; Iy: 54,48 cm<sup>4</sup>; Iz: 934,64 cm<sup>4</sup>

**Material:** Acero - S235; Fyk: 235.000; Fu: 360.000

**Pórtico de vigas:** Nombre del pórtico: 656.1; Nº de vigas: 1; Viga actual: 656.1.1; Longitud viga (m): 4,72

**Comprobaciones:** Cumple normativa

**Resistencia:** ELU desfavorable: 2; Ten. Von Mises (N/mm<sup>2</sup>): 204,66; Coeficiente Resistencia: 0,91; Comprobaciones: Cumple

**Pandeo:** ELU desfavorable: 2; β Pandeo plano XY local: 0,60; β Pandeo plano XZ local: 0,53; Coeficiente Pandeo: 0,00; Chi Z: 0,93; Chi Y: 0,27; Comprobaciones: Cumple

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

**Flecha:** ELS desfavorable: 1; Flecha relativa (elástica) (cm): -1,861; Tipo de vano: Interior; Flecha activa (cm): 0,744; Coeficiente Flecha activa: 0,63; Flecha instant. (cm): 0,651; Coeficiente Flecha instantánea: 0,48; Flecha casi-perm (cm): 1,396; Coeficiente Flecha casi-permanente: 0,89; Flecha activa/L: 1/ 634; Límite Flecha activa: 1/ 400; Flecha instant./L: 1/ 725; Límite Flecha instantánea: 1/ 350; Flecha casi-perm/L: 1/ 338; Límite Flecha casi-permanente: 1/ 300; Comprobaciones: Cumple

Tabla 25: Captura peritaje de la vigueta paralela al hueco de escalera.

**Peritar Viga 340.1.1 (Barras: 3357, 3402, 3443)**

**Sección:** IPN 160

**Propiedades:** Base: 7,40 cm; Altura: 16,00 cm; Área: 22,82 cm<sup>2</sup>; Ix: 5,89 cm<sup>4</sup>; Iy: 54,48 cm<sup>4</sup>; Iz: 934,64 cm<sup>4</sup>

**Material:** Acero - S235; Fyk: 235.000; Fu: 360.000

**Pórtico de vigas:** Nombre del pórtico: 340.1; Nº de vigas: 1; Viga actual: 340.1.1; Longitud viga (m): 3,07

**Comprobaciones:** Cumple normativa

**Resistencia:** ELU desfavorable: 2; Ten. Von Mises (N/mm<sup>2</sup>): 88,42; Coeficiente Resistencia: 0,40; Comprobaciones: Cumple

**Pandeo:** ELU desfavorable: 2; β Pandeo plano XY local: 0,77; β Pandeo plano XZ local: 0,51; Coeficiente Pandeo: 0,42; Chi Z: 0,95; Chi Y: 0,55; Comprobaciones: Cumple

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

**Flecha:** ELS desfavorable: 1; Flecha relativa (elástica) (cm): -0,330; Tipo de vano: Interior; Flecha activa (cm): 0,132; Coeficiente Flecha activa: 0,17; Flecha instant. (cm): 0,115; Coeficiente Flecha instantánea: 0,13; Flecha casi-perm (cm): 0,247; Coeficiente Flecha casi-permanente: 0,24; Flecha activa/L: 1/ 2,324; Límite Flecha activa: 1/ 400; Flecha instant./L: 1/ 2,657; Límite Flecha instantánea: 1/ 350; Flecha casi-perm/L: 1/ 1,240; Límite Flecha casi-permanente: 1/ 300; Comprobaciones: Cumple

Tabla 26: Captura peritaje de la vigueta paralela a la doble altura.

También es interesante analizar la respuesta del forjado de losa de nervios in situ, bajo la combinación de acciones *ELU-01*, uso como *variable principal*.

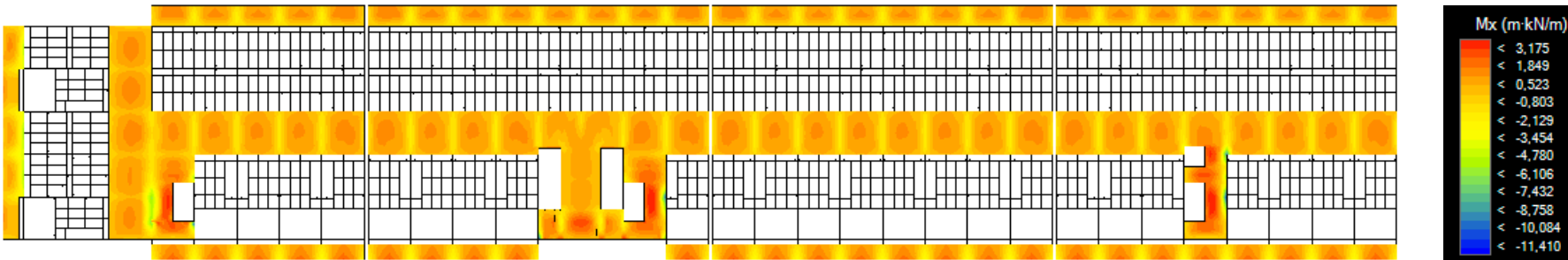


Imagen 147: ELU-01 Momentos X.

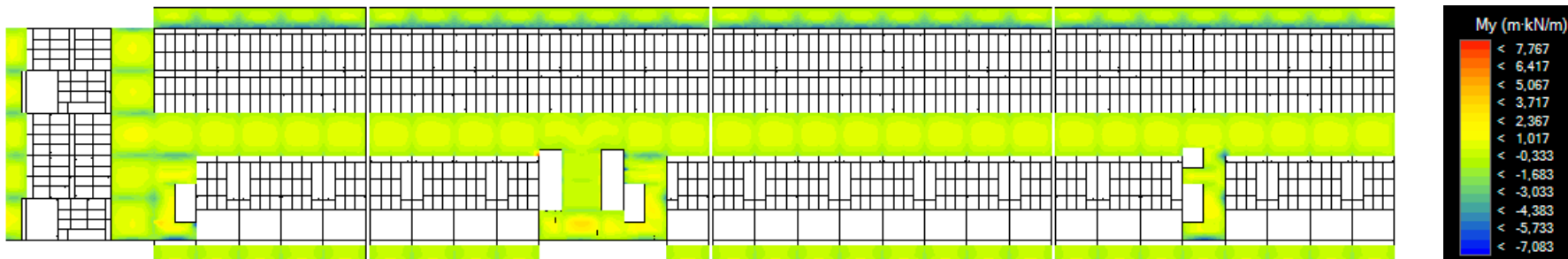


Imagen 148: ELU-01 Momentos Y.

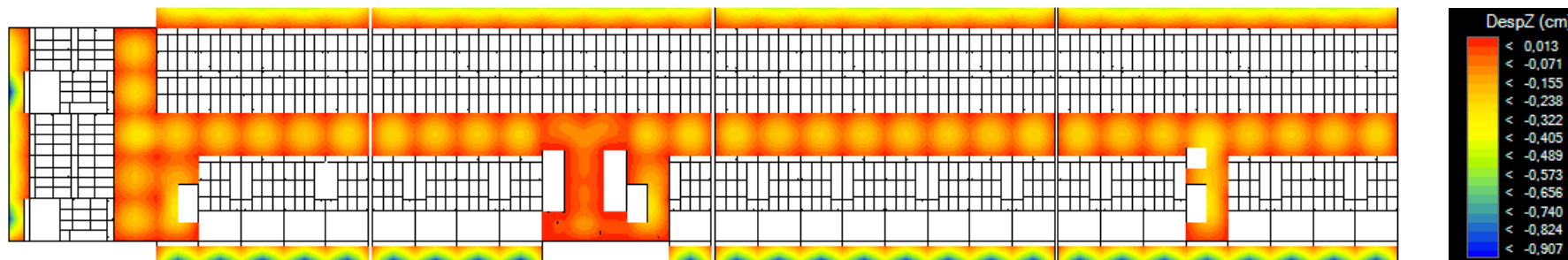


Imagen 149: ELS-01 Desplazamiento vertical.

En el detalle de la planta (Imagen 150) se puede ver, como al estar formado el forjado por nervios in situ delimitados en cuadrados por las vigas principales de la planta, los momentos negativos se concentran respecto a las mismas con un valor de  $-1,036\text{mkN/my}$  no se aprecia una concentración respecto los nervios individuales. La unidireccionalidad del sistema se aprecia ya que en los momentos  $M_y$  (Imagen 151) no hay prácticamente concentración alrededor de las vigas que delimitan la losa.

También resulta interesante observar que pasa entorno a las comunicaciones verticales, ya que estas suponen una modificación en la trama de ejes y pilares. Para crear el acceso a los ascensores se elimina un pilar, que debería encontrarse justamente en el medio de los dos núcleos y se dispone de una viga de muro a muro de hormigón. Podemos decir que está bien resuelto ya que prácticamente no flexa el forjado,  $-0,078\text{cm}$  en su punto medio y no se produce ninguna concentración especial de tensiones.

Donde sí se aprecian concentraciones de tensiones importantes son en el encuentro del forjado de losa con las viguetas metálicas para momentos  $M_x$ , donde se alcanzan los  $-9,659\text{mkN/m}$ . Esto también ocurre alrededor de los elementos

lineales que delimitan las losas de hormigón en la zona de comunicación vertical para momentos  $M_y$  ya que estos cargan en la dirección ortogonal a los nervios de la calle.

Además se aprecia la diferencia entre la deformación de las dos tipologías de construcción de voladizo (Imagen 152). Los voladizos superiores que responden al espacio exterior del cuarto de niños están construidos mediante losas de hormigón bidireccionales exportadas en los tres extremos coincidentes con las vigas. Estas losas deforman uniformemente en toda su longitud, siguiendo la deformación de la viga en voladizo en la que se apoyan con un desplazamiento vertical máximo de  $0,5\text{cm}$ .

Por el contrario, los voladizos inferiores que constituyen el brise-soleil están construidos mediante un forjado unidireccional de nervios in situ que apoyan en las vigas transversales. De esta manera los elementos lineales, además de descender por la deformación impuesta por las vigas en las que se apoyan, flexan longitudinalmente, encontrándose el punto de desplazamiento máximo en el centro del vano del elemento lineal. De esta manera en el extremo del zuncho exterior podemos encontrar un desplazamiento vertical de  $0,15\text{cm}$  y uno de  $0,87\text{cm}$  en el centro del mismo.

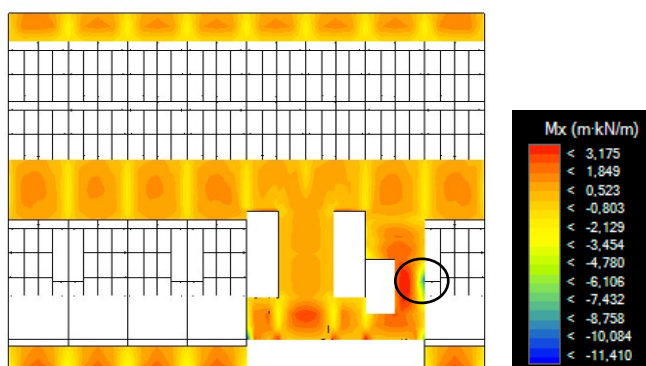


Imagen 150: ELU-01 Detalle bloque comunicación momentos X.



Imagen 151: ELU-01 Detalle bloque comunicación momentos Y.

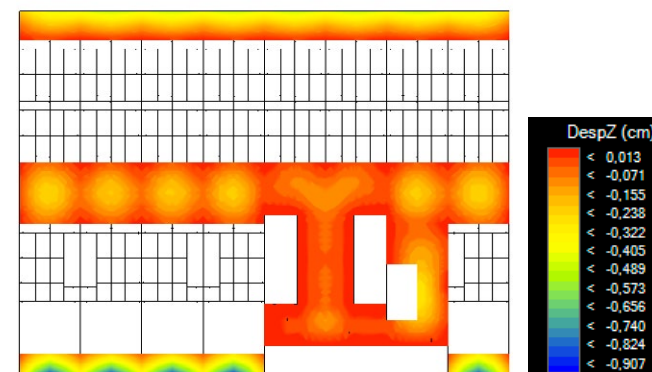


Imagen 152: ELS-01 Detalle bloque comunicación desplazamiento Z.

### 6.3.3. PLANTA TIPO CORTAFUEGO

La diferencia principal entre la planta cortafuego y la planta tipo de vivienda es la continuidad del forjado de hormigón. En este caso el forjado de hormigón se materializa como losas bidireccionales de hormigón con unas vigas auxiliares intermedias. Es interesante pues estudiar la respuesta de dos esquemas estructurales de un mismo material para un mismo uso.

Se puede decir que el forjado empleado en la planta cortafuegos deforma de manera más uniforme ante cargas de servicio (ELS-01) que el empleado en la planta de viviendas, ya que está todo construido de la misma manera. Si se compara la losa del vano central correspondiente a las calles de ambos sistemas, las losas bidireccionales tienen un desplazamiento  $z$  menor (-0,245cm) que la losa unidireccional de nervios in situ (-0,322cm).

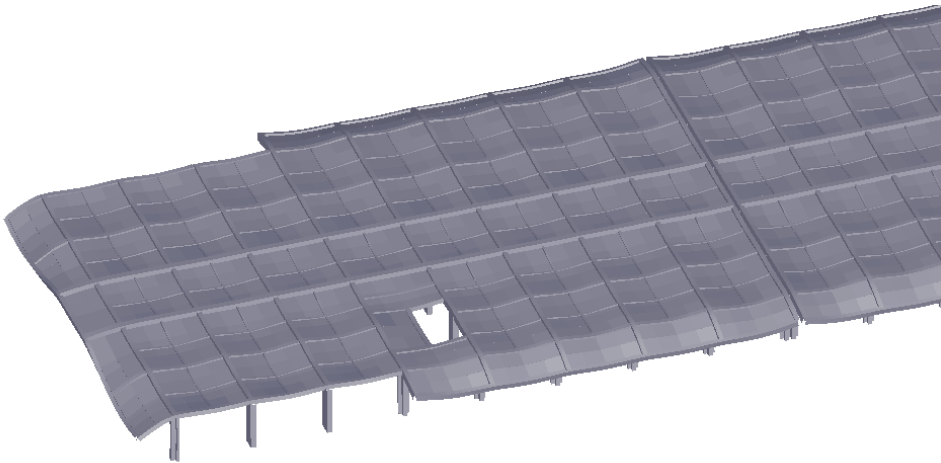


Imagen 153: ELS-01 Detalle de la deformada.

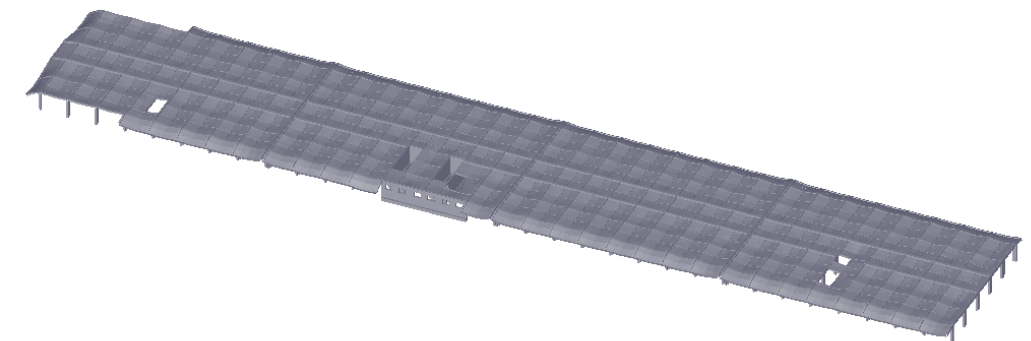
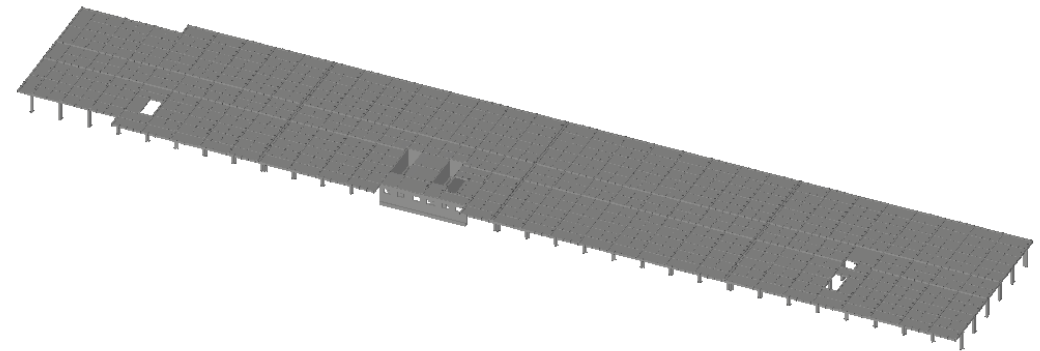


Imagen 154: ELS-01 Indeformada (sup.) y deformada (inf.) del forjado.



Imagen 155: ELS-01 Sección de la deformada.

El análisis bajo la combinación de acciones *ELU-01*, uso como variable principal demuestra la bidireccionalidad del sistema, ya que los momentos negativos se concentran alrededor de las vigas en las dos direcciones. Los mayores momentos de  $-6,286$  y  $-10,99$  mkN/m se encuentran, en ambos sentidos, en las vigas que preceden a los voladizos ya que la carga en punta de voladizo debida a los brise-soleil es importante.

Llama la atención el importante momento  $M_x$  de  $10,992$  mkN/m (Imagen 156) en el encuentro del muro de fachada, el voladizo y el forjado de la zona de comunicación vertical. Este punto es conflictivo en todas las plantas por el encuentro de tantos elementos de distintas rigideces y tipologías constructivas, estar precedido por la discontinuidad que supone el hueco de ascensor, así como por recibir directamente la carga de viento.

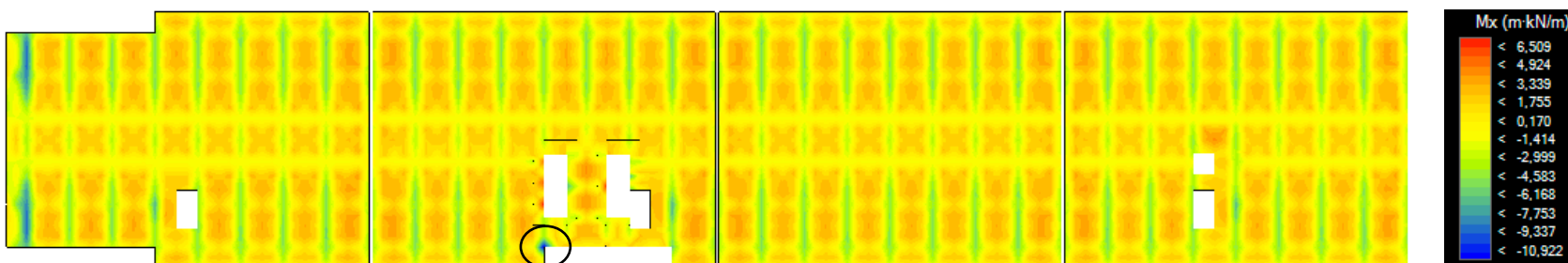


Imagen 156: ELU-01 Momentos X.

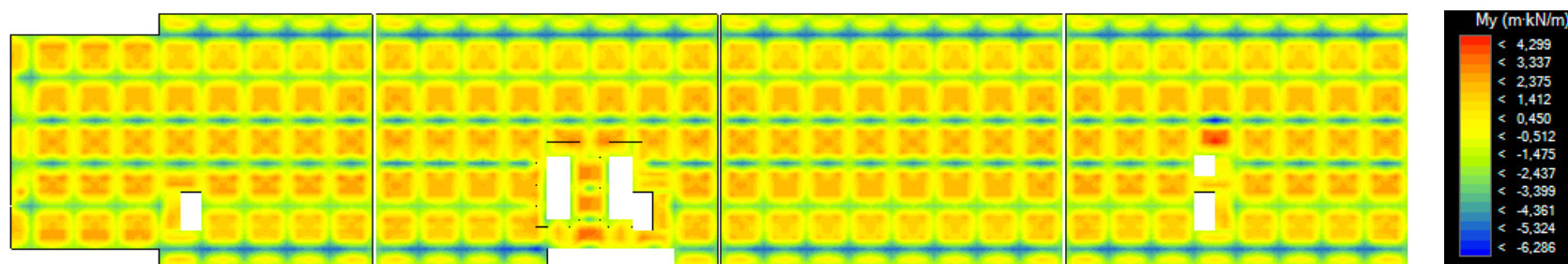


Imagen 157: ELU-01 Momentos Y.

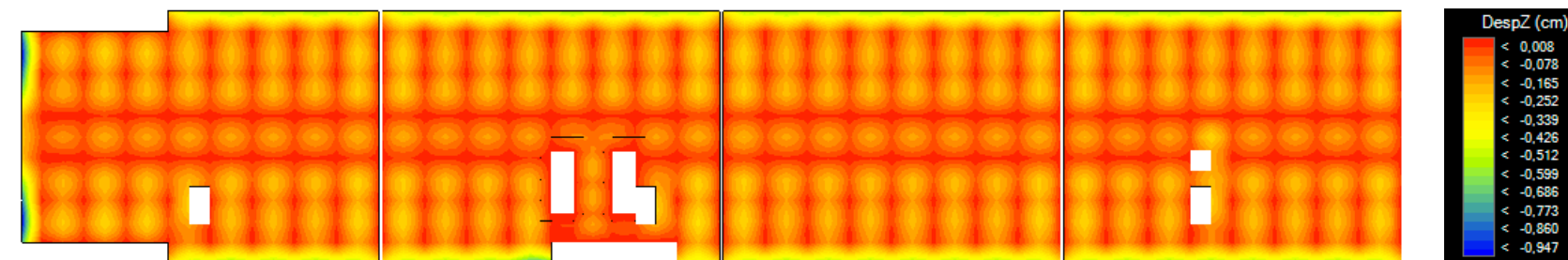


Imagen 158: ELS-01 Desplazamiento vertical.

## **7. CONCLUSIONES**



## CONCLUSIONES

Le Corbusier fue un pionero de la modernidad, sus ideas basadas en la fe ciega en el hombre moderno y sus posibilidades, redefinieron la arquitectura y urbanismo del siglo 20. Por ello no es de extrañar que para ello explotase todas las facetas de su personalidad.

Su capacidad para compaginar sus estudios basados en las teorías clásicas, con viajes que le llevaban a las ciudades donde prosperaba la modernidad, así como a conocer culturas y arquitectura foránea le permitió reinterpretar elementos clásicos y generar nuevos conceptos arquitectónicos. Así es como llega a sus Villas Parisinas, todo un alarde de nuevos conceptos que son causa del desarrollo de la técnica del hormigón armado, pero cuya implantación en el lugar, la manera de acercarse o recorrerla recuerda a principios clásicos griegos.

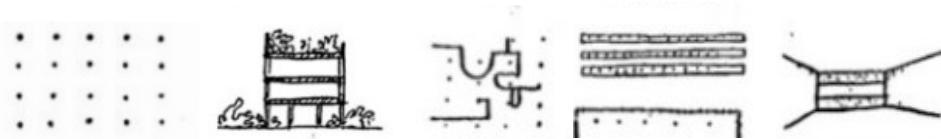


Imagen 159: 5 principios para la nueva arquitectura planteados por Le Corbusier.

Una vez llegaron sus ideas a la cima del panorama arquitectónico, no se complació con lo conseguido, siguió investigando las nuevas corrientes vanguardistas, las formas resonantes de su propia pintura purista o incluso los elementos vernáculos de la cultura suramericana, que llenaron su arquitectura de la expresión, el sonido y el color que faltaba en las tan industrializadas Villas Parisinas.

Pese a su gran recorrido arquitectónico se ha podido determinar en este estudio que el mayor paso hacia el modelo de la Unité d'Habitation fueron sus utopías urbanísticas, encaminadas hacia el desarrollo de unas ciudades adaptadas al hombre y la cultura moderna. En su compromiso urbanístico, Le Corbusier desarrolla cuatro prototipos urbanísticos que tienen como factor común la zonificación de las funciones, la importancia del transporte y los espacios verdes. Sus planes presentan ciudades totalmente planificadas y jerarquizadas donde el hombre es el artífice y pensador de cada uno de los elementos de la misma. El modelo de Cité Radieuse, donde el centro funcional de la ciudad se posiciona en la cabeza de un eje alrededor del cual se extiende la ciudad, evoluciona en sus proyectos americanos derivando en asentamientos alrededor de un gran elemento de arquitectura civil. Este elemento, que suele aparecer como un acueducto, se desarrolla más en el proyecto de Argel, donde el tramo inferior se llena de viviendas y finalmente acaba en el desarrollo del modelo híbrido ciudad-edificio, que no es más que la extracción de una rebanada de ese acueducto y perfeccionamiento de la misma para que trabaje como un ente independiente. Este ente independiente a modo de ciudad, es la Unité d'Habitation de Marsella.

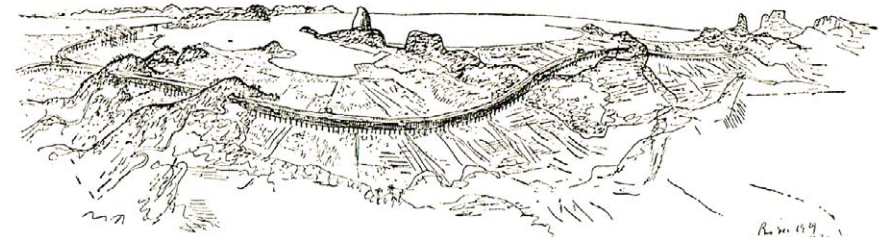


Imagen 160: Evolución del modelo de Cité Radieuse, acueducto de Río.

Tras un periodo de reflexión forzada por la guerra, el ministro Dauntry le encarga un proyecto que debe ser el emblema de la reconstrucción francesa, por lo que decide continuar sus ideas revisadas sobre el habitar moderno. Volumétricamente se basa en modelos ya ensayados a menor escala como en el Pabellón Suizo, un edificio sustentado sobre pilotis que redefine el espacio de los peatones, permitiendo el flujo libre de personas, coches y visuales.

Como se ha podido concretar, el ejercicio proyectual de la Unité no es solo materializar sus ideas en cuanto al desarrollo urbanístico. Le Corbusier llevaba años dándole vueltas a la manera de vivir del hombre, los cambios introducidos por la tecnología en las vidas cotidianas, las facilidades del habitar moderno... Por ello, decide plasmar todos estos cambios en un prototipo de vivienda novedoso que gira en torno a la evolución personal en el espacio íntimo, así como la relación familiar alrededor del hogar y finalmente el desarrollo social en las extensiones de la casa. Con estos objetivos desarrolla las células de habitación buscando la mayor comodidad y calidad de vida del residente, poniendo mucho esmero en la organización de la Unité, que por sus preceptos urbanísticos y necesidades del habitar humano, se convierte en una ciudad de desarrollo vertical autosuficiente.

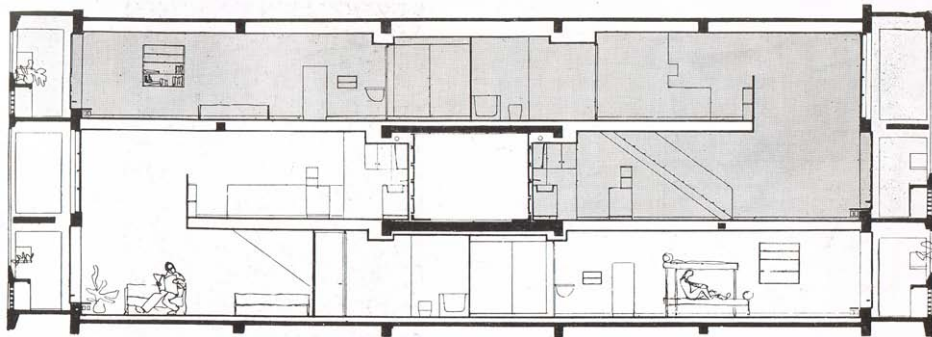


Imagen 161: Sección del paquete de 3 plantas que conforman las viviendas en dúplex.

La organización de un edificio de tal envergadura es compleja por lo que se ha definido como símil de uno de los iconos de la era mecánica, los trasatlánticos. Manteniendo su sello de la planta baja libre sobre pilotis, Le Corbusier sólo construyó el acceso prolongando el vestíbulo hacia el exterior mediante una cubierta de formas alabeadas, recurso empleado en este edificio como símbolo del espacio del placer y socialización. Sobre esta planta, aún bajo la línea de flotación del buque, dispuso en el entresuelo la planta técnica necesaria para abastecer a todas las viviendas con las últimas prestaciones tecnológicas. En el cuerpo central del buque ubicó los camarotes, o en este caso las viviendas.

La organización de las viviendas de la Unité denota un hábil manejo de la geometría y economía, pues se generan viviendas dúplex con una importante calidad espacial debido a la doble altura, a la vez que permite la economía de los espacios de transición en aras del espacio habitable y el espacio común de calidad. Las viviendas tienen una característica sección en L de manera que encajan dos a dos, generando paquetes de viviendas cada tres plantas, donde el acceso solo se produce por la planta intermedia.

Finalmente se han determinado los espacios complementarios a la vivienda. Según su ubicación en la Unité se pueden identificar los servicios puramente funcionales, como lo son las tiendas, las oficinas y el hotel que se encuentran inmersos en el cuerpo central de viviendas, y los servicios lúdicos que se ubican en la cubierta. La cubierta fue un campo de experimentación social en los que Le Corbusier recurrió a las formas ondulantes y sinuosas para generar los espacios de gimnasio, juego de niños o chimeneas de ventilación, que le permitieron a su vez experimentar con otros aspectos materiales del hormigón armado.

También se ha diagnosticado que la innovación material no se limitó únicamente a la cubierta, la Unité en sí es un campo de experimentación de materiales y técnicas de construcción novedosas para la época. Un equipo del taller de Le Corbusier se instaló a pie de obra durante la construcción íntegra del edificio, para resolver cualquier problema que surgiese el empleo de los materiales. Esta necesidad surgió del ansia por la seriación e industrialización del propio arquitecto, quien insistió en crear un prototipo de célula con los materiales más novedosos de la época (los paneles de yeso laminado, el aislamiento de fibra de vidrio, los brise-soleils de hormigón prefabricado) pese a los problemas que esto pudiese suponer en obra.

En términos de la estructura, el prototipo ideado por Le Corbusier partía del concepto de que la estructura del edificio era un botellero y la célula de habitación botella. De esta manera el botellero era un entramado de pilares y vigas metálicas con luces y dimensiones marcadas por las proporciones de El Modulor que se completaba y rigidizaba mediante la inserción de elementos prefabricados que conformaban la célula de habitación. Debido al contexto de escasez de la postguerra, su idea se enfrentaba a dos grandes retos: por un lado la aniquilación de la industria siderúrgica y por otro la tecnología incapaz de producir células de habitación como entes estructurales independientes.

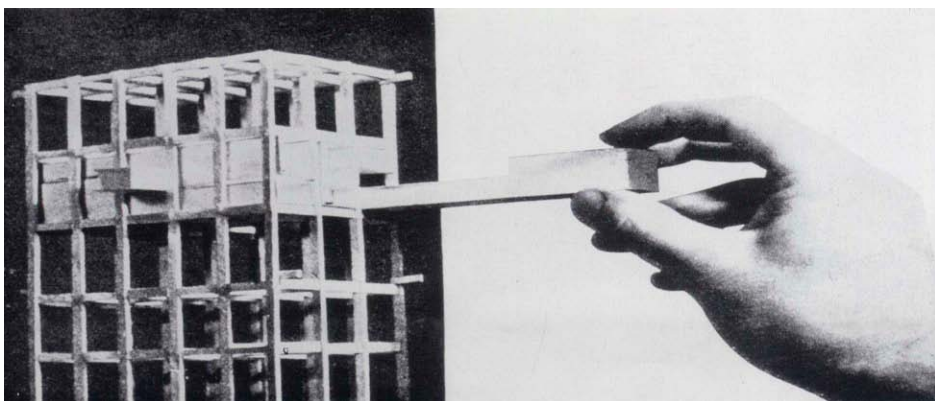


Imagen 162: Maqueta de la idea estructural de botella y botellero.

Se ha podido demostrar, gracias a la documentación facilitada por la Fondation Le Corbusier, que estos reveses se salvaron con la construcción del entramado como vigas y pilares de hormigón amado, que ante la necesidad de rigidización se intercalan con distintos tipos de forjado de hormigón. Además pese a la falta de tecnología la célula se intentó prefabricar de la manera más tecnológica posible, mediante viguetas metálicas apoyadas y asiladas de la estructura principal de hormigón y una sucesión de contrachapados con distintos tratamientos.

El análisis del comportamiento lineal de los elementos constructivos mencionados ha derivado en el modelado de mismos empleado elementos de barra. Hay que resaltar que en el modelado de las viguetas metálicas se ha realizado una desconexión de las mismas respecto al eje z para asemejar su disposición constructiva de simplemente apoyado e independiente de la estructura de hormigón.

Dentro de la estructura global se han identificado dos tipos de forjado de hormigón rigidizantes, respondiendo tanto a criterios de aislamiento contra fuego como organizativos. Los paquetes funcionales de tres plantas de vivienda se consolidan estructuralmente en los forjados superiores e inferiores mediante un forjado bidireccional de 10 cm de espesor con vigas auxiliares cuyo objetivo es reducir la luz entre apoyos. En los forjados intermedios se pueden encontrar los antes mencionados forjados metálicos y contrachapados, en los que el vano central se consolida mediante losas de hormigón unidireccionales con nervios in situ.

Analizado el comportamiento de estos elementos, se ha observado como en las plantas con forjado bidireccional, las vigas están más solicitadas aunque la deformación en el forjado es menor y más homogénea que la combinación losa-viguetas metálicas. De estos forjados, llama la atención su pequeño espesor ya que para construcciones actuales similares la normativa establece espesores mínimos mayores, así como la necesidad de vigas auxiliares intermedias que dada nuestra tecnología actual podrían obviarse.

En las plantas con losas de hormigón unidireccionales el forjado está constituido mayoritariamente por viguetas metálicas y tableros contrachapados. El análisis del modelo estructural ha permitido determinar que esta clase de forjado de hormigón solicita una menor cantidad de vigas del entramado, porque sólo funcionan en una dirección, mientras que se obtienen deformaciones mayores. A su vez las viguetas metálicas generan puntos de concentración de tensiones puntuales sobre las vigas, que hay que tener cuenta en el dimensionado de las mismas. Pese a esto fue la tipología más empleada de forjados ya que suponía un ahorro importante de material, permitiendo una mayor rapidez constructiva.

El concepto de planta baja libre que Le Corbusier defendía supuso una compleja macroestructura capaz de derivar las acciones de 12 pilares del entramado superior a tan solo dos pilares en planta baja. Para realizar este desafío técnico se empleó una planta completa de 2,62m de alto para el gran emparrillado de vigas, que se compaginó con la planta técnica del edificio.

Transversalmente la estructura portante está constituida por dos tipos de jácena de sección variable perforadas para el paso de instalaciones. Estas jácenas están atravesadas por dos grandes vigas longitudinales que apean algunas de las anteriores. La disparidad en la tipología de las jácenas nace de la superposición entre la trama del entramado superior, con pilares cada 4,19m y la trama de los pilotis inferiores, con pilares cada 8,38m. De esta manera las jácenas ubicadas en la superposición de las tramas están constituidas por dos subjácenas de espesor 0,45m unidas por una losa de un metro de ancho apeadas en un piloti. En los puntos donde la trama superior no encuentra continuidad con la inferior, las jácenas son un único elemento de 0,60m de espesor sustentadas por la viga longitudinal. Debido a la complejidad geométrica y carácter particular, las jácenas así como el cielo raso de hormigón que las envuelve se han modelizado como elementos finitos que permiten un análisis más detallado de su comportamiento.

Tomando como referencia los esquemas de Engel para el comportamiento de vigas de sección activa, se ha concretado que la jácena simple responde a los criterios de deformación planteados en el segundo esquema ya que se encuentra fuertemente comprimida en la cara inferior del punto de intersección con la viga longitudinal mientras que el punto medio del vano queda traccionado en su cara inferior. Por el contrario la jácena doble responde como en el primer esquema, ya que las acciones de los pilares que inducen la tracción en el centro de vano son absorbidas por la losa de unión de manera que las jácenas no están solicitadas a acciones gravitatorias importantes en el ámbito central del vano, pero sí en el extremo de sus voladizos.

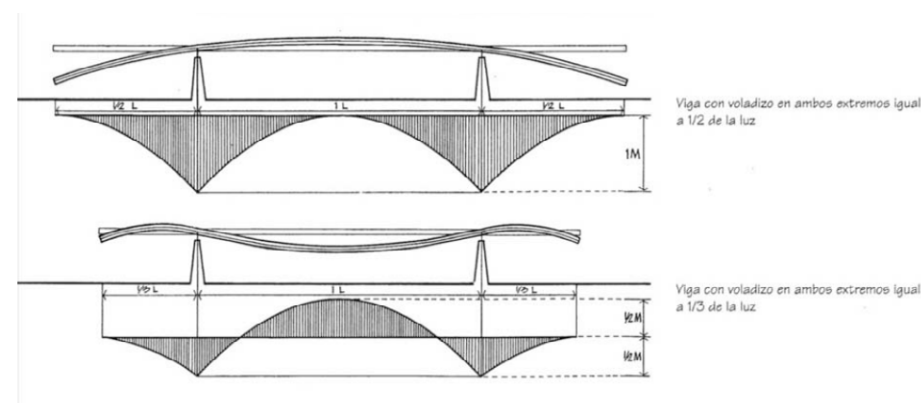


Imagen 163: Esquemas de comportamiento de las vigas de sección activa.

Del análisis de las jácenas cabe destacar que no haría falta la disposición de armadura de compresión, pero sí de armadura de tracción para absorber los esfuerzos generados ya que el hormigón es incapaz de absorberlos, tanto en los extremos superior e inferior de las jácenas como en el alma de la sección de hormigón.

Otra condición a tener en cuenta de la planta técnica es que pese a solucionar el problema de la transmisión de cargas, una planta de tal envergadura de hormigón armado también aumenta mucho el peso propio a sustentar. Hoy en día se emplearía hormigón postesado o estructuras metálicas más ligeras, intentado aliviar el exceso de carga añadido por el peso propio del material.

Otro elemento cuyo análisis es vital son los pilotis. Por un lado se ha identificado un elemento de sección redonda y diámetro 1,90m, que recibe la carga directa de los pilotis y la viga longitudinal transmitiéndola directamente a la cimentación y actuando como un elemento de barra con axil de 14.428,710kN. Por el otro lado se han definido unas alas de sección variable que se modelizan mediante elementos superficiales como un muro de sección constante que canaliza las cargas recibidas de las jácenas hasta la cimentación. Se ha podido precisar que el comportamiento de las alas está totalmente condicionado con la deformación de la jácena doble superior, que comprime el piloti en su extremo exterior, generando una fuerte concentración de tensiones negativas en esta zona. Estas compresiones se disipan a lo largo del alzado del muro siguiendo una directriz oblicua de 45 grados y deriva en una distribución bastante uniforme de las cargas en la base del mismo.

El análisis global frente cargas de viento ha demostrado los efectos que tienen de distintas variables en la respuesta de un edificio frente a viento. En primer caso se ha demostrado que reducir el espesor del edificio en la dimensión ortogonal al viento reduce su resistencia a él, lo que deriva en un mayor desplazamiento en la dirección del viento. También se ha planteado la importancia de ubicar y estudiar cuidadosamente el núcleo de comunicación. El hecho de colocarlo excéntricamente genera una torsión en sentido del viento, permaneciendo inmóvil el núcleo de hormigón y desplazándose el elemento menos rígido. A este movimiento inducido exclusivamente por el viento hay que incluirle el efecto del peso propio, ya que al combinar dos sistemas constructivos (de nudos y barras y elementos superficiales) las rigideces de los elementos varían pese a estar constituidas del mismo material, derivando en desplazamientos diferenciales.



Imagen 164: Desplazamientos Y en la losa de cubierta bajo hipótesis de viento.

En el caso de la Unité se ha determinado que el entramado de pilares y vigas tiene menor rigidez frente a peso propio, por lo que los pilares se acortan mientras que el muro de hormigón tiene una elevada rigidez y no sufre acortamiento. Al estar ambos elementos unidos rigidamente mediante las losas de hormigón del forjado, el acortamiento de los pilares arrastra el muro, generando una torsión en el sentido contrario al viento que vence los efectos del viento planteados anteriormente. Este fenómeno se podría resolver empleando un muro de hormigón con mayor espesor y aún más rígido que por su propia inercia impida este arrastre, siempre que se realice un estudio detallado de los elementos de unión de ambos elementos constructivos asegurando que no se exceden los límites determinados para su Estado Limite Último de Agotamiento ni de Servicio.



Imagen 165: Desplazamientos Y en la losa de cubierta combinando viento y el efecto del peso propio.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

### 8.1 LIBROS

ATECYR (2010) *Guía técnica. Condiciones climáticas exteriores de proyecto*. Madrid: Ministerio de industria, turismo y comercio.

BENTON, T., & COHEN, J.-L. (2008). *Le Corbusier Le Grand. Vol1, Works*. London: Phaidon.

BOESIGER, W. (1999). *Le Corbusier - Œuvre complète Volume 4: 1938-1946*. Basel: Birkhäuser.

BOESIGER, W. (1999). *Le Corbusier - Œuvre complète Volume 5: 1946-1952*. Basel: Birkhäuser.

BOESIGER, W. Y GIRSBERGER, H. (1971). *Le Corbusier 1910-1965*. Barcelona: Gustavo Gili S.A.

CALAFELL, E. (2000). *Las unités d'habitation de Le Corbusier. Aspectos formales y constructivos*. Barcelona: Fundación Caja de Arquitectos.

DIAZ SEGURA, A. (2011). *El concepto de prefabricación en Le Corbusier*. Madrid: CEU Ediciones.

ENGEL, H. (2006). *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili S.L.

FONDATION LE CORBUSIER. (2005). *Le Corbusier Plans, Volume 8 1945*. París: Echelle-1.

FRAMPTON, K. (2000). *Le Corbusier*. Madrid: Akal Ediciones.

GANS, D. (1988). *Le Corbusier*. Barcelona: Gustavo Gili S.A.

GARGIANI, R., & ROSSELLINI, A. (2011). *Le Corbusier, Béton Brut and Ineffable Space, 1940-1965 Surface Materials and Psychophysiology of Vision*. Lausanne: EPLF Press.

JENKINS, D. (1999). "Le Corbusier: Unité d'Habitation de Marseilles, 1945-52." en *Twentieth-century classics*. B. Dunlop, & D. Hector, London: Phaidon.

LE CORBUSIER. (1953). *The Marseilles Block*. Londres: The Harvill Press.

LE CORBUSIER. (1981). "Sketchbook E21". En *Le Corbusier Sketchbooks Volume 2 1950-1954* .F. Franclieu. London: Thames and Hudson.

RAMIREZ, J. (1998). *La metáfora de la colmena: De Gaudí a Le Corbusier*. Madrid: Ediciones Siruela.

RÍO VÁZQUEZ, A. (2015). *Le Corbusier 2015-1965: Modernidad y contemporaneidad*. A coruña: Diseño Editorial.

RÜEGG, A., BONILLO, J., TROPEANO, R. & DRUT, J. (2013). *La Cellule Le Corbusier: L'Unité d'habitation de Marseille*. Marseille: Editions Imbernon.

SBRIGLIO, J. (2004). *Le Corbusier: L'Unité d'habitation de Marseille*. Basel: Fondation Le Corbusier& Birkhäuser.

SBRIGLIO, J. (2009). *Le Corbusier Habiter: de la Villa Savoye à l'Unité d'Habitation de Maseille*. Arles: Actes Sud.

TIKAL ARQUITECTUM. (2000). *Le Corbusier*. Madrid: Susaeta Ediciones S.A.

XENAKIS, I. (1982). *Música de la arquitectura*. Madrid : Akal.

## 8.2 CONFERENCIAS

PARRA MARTINEZ, J. (2012). *Le Corbusier, una introducción: obras y proyectos 1915 -1965*  
<<https://media.upv.es/player/?id=f72c94e0-021d-11e6-851a-656f7e06a374&autoplay=true>> [Consulta: 4 Mayo de 2016]

SEQUEIRA, M. (2013). *Inmuebles-villa Le Corbusier y Arquitectura cartuja, Constantes de proporcionalidad.*  
<<https://media.upv.es/player/?id=7150d970-3789-11e6-ad19-a567c385184b&autoplay=true>> [Consulta: 4 Mayo de 2016]

## 8.5 PAGINAS WEB

KROLL, A.(2015). *Plataforma Arquitectura. Clásicos de Arquitectura: Unité d'Habitation / Le Corbusier*  
<<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/771341/clasicos-de-arquitectura-unite-dhabitation-le-corbusier>> [Consulta 6 Mayo 2016]

PONTI, G. (2011). *Domus. Corbusier's Cité Radieuse*  
<<http://www.domusweb.it/en/from-the-archive/2011/02/28/corbusier-s-cite-radieuse.html>> [Consulta 15 Mayo 2016]

*Unité D'Habitation Le Corbusier Marseille.* s.f.  
<<http://www.marseille-citeradieuse.org>>. [Consulta 10 Mayo 2016]

ZINKIN, T. (2014) *The Guardian. From the archive, 11 September 1965: An awkward interview with Le Corbusier*  
<<https://www.theguardian.com/artanddesign/2014/sep/11/le-corbusier-india-architecture-1965>>. [Consulta 6 Mayo 2016]

## 8.6 NORMATIVA

VV.AA. (2009). *Código técnico de la edificación. Documento Básico SE, Seguridad estructural.* Madrid: Ministerio de Fomento.

VV.AA. (2009). *Código técnico de la edificación. Documento Básico SE-AE, Seguridad Estructural- Acciones en la edificación.* Madrid: Ministerio de Fomento.

VV.AA. (1998). *Eurocódigo 1. Bases de proyecto y acciones estructurales.* Madrid: AENOR

## 8.7 PROGRAMA DE CALCULO

Architrave Versión 2015 Académica (v1.4).  
<http://www.architrave.es/index.php>

Autores:

Grupo de Investigación en Grid y Computación de Altas Prestaciones (GRyCAP)  
*Hernández García, Vicente.*  
*Alonso Ábalos, José Miguel.*  
*Campo Berga, Francisco Javier.*  
*Lozano Lloret, Pau.*  
*De la Fuente Aragón, Pedro.*

Grupo de Investigación CiD  
*Pérez García, Agustín. Doctor Arquitecto.*  
*Alonso Durá, Adolfo. Doctor Arquitecto.*  
*Guardiola Villora, Arianna. Doctor Arquitecto.*  
*Gómez Martínez, Fernando. Arquitecto.*



## **9. REFERENCIAS DE IMÁGENES**

## 0. PORTADA

Imagen obtenida de BENTON, T., & COHEN, J.-L. (2008).  
*Le Corbusier Le Grand. Vol1, Works*. London: Phaidon.

## 2. LE CORBUSIER

Imágenes obtenidas de: BOESIGER, W., & GIRSBERGER, H. (1971).  
*Le Corbusier 1910-1965*. Barcelona: Gustavo Gili S.A.

Imagen 1: Dualidad Apolo y Medusa.

Imagen 6: Esquema Dominó.

Imagen 8: Emplazamiento en el entorno.

Imagen 9: Planta baja.

Imagen 10: Proyecto para el Palacio de los Soviets.

Imagen 12: Esquema ciudad contemporánea.

Imagen 14: Boceto del proyecto urbanístico de Río.

Imagen 15: Vista desde el mar de Buenos Aires.

Imagen 16: Acueducto de Argel.

Imagen 17: Esquema 7V, Chandigarh.

Imagen 23: Construcción del capitolio.

Imágenes cedidas por la Fondation Le Corbusier, contacto en:

[www.fondationlecorbusier.fr](http://www.fondationlecorbusier.fr)

Imagen 2: Familia Jeanneret.

Imagen 3: Le Corbusier en la acrópolis.

Imagen 4: Boceto de la implantación de la acrópolis.

Imagen 25: Interior Petit Cabanon.

Otras fuentes

Imagen 5: Acuarela captando el color del Mediterráneo.

<https://lecorbusierinpar.wordpress.com/2011/04/14/xviii-rencontres-de-la-fondation-le-corbusier-centenaire-du-voyage-dorient/>

Imagen 7: Esquemas comparativos entre la arquitectura contemporánea y los principios de la nueva arquitectura.

<http://otraarquitecturaesposible.blogspot.com.es/2013/03/pieles-y-envolventes-arquitectonicas-ii.html>

Imagen 11: El Modulor.

<http://www.neermanfernand.com/corbu.html>

Imagen 13: Plan Voissin de París.

<https://creatingurbansignatureproperties.wordpress.com/2012/11/>

Imagen 18: Emplazamiento Ronchamp.

<https://minutosdearquitectura.wordpress.com/2014/07/01/notre-dame-du-haut-lecorbusier-ronchamp/>

Imagen 19: Interior de la capilla.

<https://www.flickr.com/photos/32224170@N03/8066510453/in/photostream/>

Imagen 20: Vista aérea del convento.

<http://arquite.rtos.galeon.com/obras/lecorbusier/tourette.htm>

Imagen 21: Pasillo del claustro.

<https://www.flickr.com/photos/56408860@N02/6033054214>

Imagen 22: Le Corbusier con los planos de Chandigarh.

<https://es.pinterest.com/pin/314126142738465064/>

Imagen 24: Láminas de agua.

<http://www.chandigarhcity.com/attractions/capitol-complex/>

## 3. UNITÉ D'HABITATION DE MARSELLA

Imágenes obtenidas de: BOESIGER, W., & GIRSBERGER, H. (1971).

*Le Corbusier 1910-1965*. Barcelona: Gustavo Gili S.A.

Imagen 27: Comparación entre la ocupación de suelo de distintas tipologías residenciales.

Imagen 28: Esquema urbano.

Imagen 34: Sección transversal célula.

Imagen 35: Plantas de los dos apartamentos que componen un paquete.

Imagen 38: Visión desde la habitación principal.

Imágenes obtenidas de: BENTON, T., & COHEN, J.-L. (2008).

*Le Corbusier Le Grand. Vol1, Works*. London: Phaidon.

Imagen 32: Familia en el salón.

Imagen 33: Espacio cocina-salón.

Le grand Imagen 54: Niños realizando una actividad.

Imagen 55: Niños en el recreo.

Imagen 56: Acto de inauguración de la Unité.

Imagen 57: Piscina en uso.

Imagen 58: Niños jugando en el solárium.

Imagen 59: Niños escalando las montañas artificiales.

Imagen 68: Construcción de los forjados de nervios in situ.

Imágenes obtenidas de: BOESIGER, W. (1999).

*Le Corbusier - Œuvre complète Volume 4: 1938-1946.* Basel: Birkhäuser.

Imagen 50: Maqueta de la cubierta.

Imagen 60: Imagen de la estructura de hormigón in situ.

Imagen 70: Vista superior del encofrado.

Imagen 71: Pilotis desencofrados.

Imagen 72: Pilotis desencofrados.

Imagen 73: Forjado continuo planta 7.

Imagen 74: Construcción de los forjados de las células.

Imágenes obtenidas de: SBRIGLIO, J. (2009). *Le Corbusier Habiter:*

*de la Villa Savoye à l'Unité d'habitation de Marseille.* Arles: Actes Sud.

Imagen 40: Sección transversal. (Modificación posterior de la autor)

Imagen 63: Construcción de las primeras plantas.

Imagen 64: Construcción del primer bloque.

Imagen 65: Estructuras de hormigón y metálica ejecutada.

Imagen 66: Ejecución de los acabados de la célula.

Otras fuentes

Imagen 26: Ideas sobre urbanismo.

[http://catedrasolla.com.ar/solla\\_trabajos/disenio-iii-obras-2/](http://catedrasolla.com.ar/solla_trabajos/disenio-iii-obras-2/)

Imagen 29: Intuición planta baja.

<http://jsah.ucpress.edu/content/74/1/13>

Imagen 30: Detalle de la textura de los pilotis.

<https://quizlet.com/5827380/arch-219-lecture-14-flash-cards/>

Imagen 31: Detalle fachada.

[https://www.flickr.com/photos/carlos\\_seo/3740867246/in/set-72157628544362743](https://www.flickr.com/photos/carlos_seo/3740867246/in/set-72157628544362743)

Imagen 36: Prototipo de la cocina.

<http://www.park-books.com/index.php?lang=de&book=610&pd=ss&page=press>

Imagen 37: Sucesión de espacios funcionales de la planta baja.

*LE CORBUSIER.* (1953). *The Marseilles Block.* Londres: *The Harvill Press.*

Imagen 39: Tabique móvil habitación niños.

*LE CORBUSIER.* (1953). *The Marseilles Block.* Londres: *The Harvill Press.*

Imagen 41: Plantas vivienda.

*BOESIGER, W.* (1999). *Le Corbusier - Œuvre complète Volume 5: 1946-1952.* Basel: *Birkhäuser.*

Imagen 42: Pórtico de pilotis.

[www.thomaselliottburns.com/CiteRadiouse\\_Pilotis/Pilotis1.html](http://www.thomaselliottburns.com/CiteRadiouse_Pilotis/Pilotis1.html)

Imagen 43: Vista inferior planta técnica.

<http://www.panoramio.com/photo/46380386>

Imagen 44: Núcleo de comunicación vertical.

*Anna Armstrong,*

<https://www.flickr.com/photos/french-disko/3795252529/in/photostream/>

Imagen 45: Pasillo de acceso a las viviendas.

*Anna Armstrong,*

<https://www.flickr.com/photos/french-disko/3795252529/in/photostream/>

Imagen 47: Planta y sección de la cubierta.

*BOESIGER, W.* (1999). *Le Corbusier - Œuvre complète Volume 5: 1946-1952.* Basel: *Birkhäuser.*

Imagen 48: Galería comercial.

<http://www.iliangcang.com/i/topicapp/201506304500>

Imagen 49: Habitación del hotel.

*Imagen propia del autor*

Imagen 51: Control sobre el paisaje.

*Imagen propia del autor*

Imagen 52: Gimnasio, chimenea de ventilación y torre.

<http://arttattler.com/archiveoferwolberger.html>

Imagen 53: Guardería, chimenea de ventilación y torre.

[http://daddytypes.com/2009/08/18/raised\\_on\\_the\\_roof\\_unite\\_dhabitation\\_nursery\\_creche.php](http://daddytypes.com/2009/08/18/raised_on_the_roof_unite_dhabitation_nursery_creche.php)

Imagen 61: Detalle brise-soleil y paneles prefabricados.

<https://twitter.com/nickbax>

Imagen 62: Detalles constructivos vivienda.

*BOESIGER, W.* (1999). *Le Corbusier - Œuvre complète Volume 5: 1946-1952.* Basel: *Birkhäuser.*

Imagen 67: Encofrados planta baja.

*SBRIGLIO, J.* (2004). *Le Corbusier: L'Unité d'habitation de Marseille.* Basel: *Fondation Le Corbusier& Birkhäuser.*

Imagen 69: Estructura principal y viguetas metálicas.

*SBRIGLIO, J.* (2004). *Le Corbusier: L'Unité d'habitation de Marseille.* Basel: *Fondation Le Corbusier& Birkhäuser.*

## 4. DESCRIPCIÓN ESTRUCTURA

Imágenes cedidas por la Fondation Le Corbusier, contacto en:

[www.fondationlecorbusier.fr](http://www.fondationlecorbusier.fr)

Imagen 81: Sección del forjado bidireccional.

Imagen 82: Sección del forjado unidireccional.

Imagen 85: Esquemas iniciales de la estructura.

Imagen 86: Detalle del extremo de las jácenas.

Imagen 87: Detalle del tramo central de las jácenas.

Imagen 88: Sección longitudinal.

Imagen 89: Junta.

Imágenes obtenidas de: BENTON, T., & COHEN, J.-L. (2008).

*Le Corbusier Le Grand. Vol1, Works.* London: Phaidon.

Imagen 76: Esquema funcional de la idea estructural.

Imagen 77: Elementos de la estructura.

Imagen 84: Secciones de los pilotis.

Imágenes obtenidas de: BOESIGER, W. (1999).

*Le Corbusier - Œuvre complète Volume 4: 1938-1946.* Basel: Birkhäuser.

Imagen 78: Pruebas de inserción.

Imagen 79: Estructura con brise-soleils.

Otras fuentes:

Imagen 75: La evolución de la vivienda.

*LE CORBUSIER. (1953). The Marseilles Block. Londres: The Harvill Press.*

## 5. MODELIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

Imagen 90: Esquema de la estructura

XENAKIS, I. (1982). *Música, arquitectura.* Madrid: Akal.

Imágenes propias del autor

Imagen 80: Planos estructurales.

Imagen 83: Plano estructural.

Imagen 91: Información del modelo de cálculo

Imagen 92: Esquema estructural

Imagen 93: Detalle del modelo "sólido" de la estructura principal.

Imagen 94: Detalle del modelo "sólido" de la estructura de la planta tipo vivienda.

Imagen 95: Modelo "sólido" de la estructura principal (sup.) y la estructura de la planta tipo cortafuegos (inf.)

Imagen 96: Modelo 3D de los elementos de rigidización.

Imagen 97: Detalle modelo de elementos finitos: jácenas

Imagen 98: Modelo "sólido" jácenas y vigas longitudinales.

Imagen 99: Detalle jácenas y cielo raso inferior.

Imagen 100: Detalle modelo de elementos finitos: jácenas y cielo raso superior.

Imagen 101: Modelo "sólido" de los pilotis.

Imagen 102: Asignación de cargas en la planta tipo viviendas.

Imagen 103: Asignación de cargas en la planta tipo cortafuegos.

Imagen 104: Asignación de cargas planta inferior del suelo artificial.

Imagen 105: Ámbito de aplicación de cargas en las plantas del entramado.

Imagen 106: Ámbito de aplicación de cargas en la planta inferior del suelo técnico.

Imagen 107: Mapa de zonas para la obtención de la presión dinámica del viento.

Imagen 108: Sobrecarga de nieve según el Eurocódigo 1 para la zona del Mediterráneo.

Tablas propias del autor

Tabla 1: Peso propio de la estructura de hormigón. Tabla 10: Captura Architrave Combinación ELU-01.

Tabla 2: Peso propio de las vigas del suelo artificial.

Tabla 11: Captura Architrave Combinación ELU-02.

Tabla 12: Captura Architrave Combinación ELU-03.

Tabla 13: Captura Architrave Combinación ELU-04.

Tabla 14: Captura Architrave Combinación ELU-05.

Tabla 15: Coeficientes parciales de seguridad para ELS.

Tabla 16: Captura Architrave Combinación ELS-01.

Tabla 17: Captura Architrave Combinación ELS-02.

Tabla 18: Captura Architrave Combinación ELS-03.

Tabla 19: Captura Architrave Combinación ELS-04.

Tabla 20: Captura Architrave Combinación ELS-05.

Tabla 21: Captura Architrave Combinación ELS-06.

Tabla 22: Captura Architrave Combinación ELS-07.

Tabla 23: Captura Architrave de las propiedades del hormigón.

Tabla 24: Captura Architrave de las propiedades del acero.

Tablas normativa

Tabla 3: Condiciones ambientales de San Sebastián.

ATECYR (2010) *Guía técnica. Condiciones climáticas exteriores de proyecto.*

Madrid: Ministerio de industria, turismo y comercio.

Tablas extraídas de: VV.AA. (2009). *Código técnico de la edificación. Documento Básico SE-AE, Seguridad Estructural- Acciones en la edificación.* Madrid: Ministerio de Fomento.

Tabla 4: Valores característicos de las sobrecargas de uso.

Tabla 5: Valores del coeficiente de exposición.

Tabla 6: Valores del coeficiente eólico.

Tabla 7: Zonas y valores para la sobrecarga de nieve.

Tablas extraídas de: VV.AA. (2009). *Código técnico de la edificación. Documento Básico SE, Seguridad Estructural.* Madrid: Ministerio de Fomento.

Tabla 8: Coeficientes parciales de seguridad ELU.

Tabla 9: Coeficientes de simultaneidad a aplicar en ELU y ELS.

## 6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Imágenes propias del autor

Imagen 109: Esquema de transmisión de cargas verticales: Jácena doble (sup.) y jácena simple (inf.)

Imagen 110: Desplazamientos Y en la losa de cubierta bajo hipótesis de viento.

Imagen 111: Deformación para hipótesis de peso propio.

Imagen 112: Deformación para ELS-01, Uso como variable principal.

Imagen 113: Deformación para ELS-02, Nieve como variable principal.

Imagen 114: Deformación para ELS-03, Viento como variable principal.

Imagen 115: ELS-03 Desplazamiento en la dirección del viento Y.

Imagen 116: ELS-03 Desplazamiento en la perpendicular al viento X.

Imagen 117: ELS-03 Desplazamiento muros de hormigón en la dirección del viento, Y.

Imagen 118: ELS-03 Desplazamiento muros de hormigón en la perpendicular del viento, X.

Imagen 119: Deformación para hipótesis de peso propio en la dirección del viento, Y.

Imagen 120: Deformación para hipótesis de peso propio en la dirección perpendicular al viento, X.

Imagen 121: Detalle del bloque con mayor desplome en dirección Y.

Imagen 122: ELU-01 Tensiones  $S_y$  (verticales) en los muros.

Imagen 123: ELU-01 Tensiones  $S_x$  (horizontales)

Imagen 124: Detalle  $S_y$  coronación muros.

Imagen 125: Detalle  $S_y$  base muros.

Imagen 126: ELU-01: Axil de los pilares de todo el edificio.

Imagen 127: ELU-01: Conjunto viga-pilotis. Tensiones verticales.

Imagen 128: Axil de los pilares de la planta baja.

Imagen 129: ELU-01: Detalle Tensiones verticales,  $S_y$ .

Imagen 130: ELS-01: Desplazamiento vertical.

Imagen 132: ELS-01 Detalle de la indeformada (sup.) y la deformada de las vigas del suelo técnico (inf.)

Imagen 133: ELU-01 Tensiones tangenciales de la jácena simple.

Imagen 134: ELS-01 Desplazamiento vertical de la jácena simple.

Imagen 135: ELU-01 Tensiones tangenciales de la jácena doble.

Imagen 136: ELS-01 Desplazamiento vertical de la jácena doble.

Imagen 139: ELU-01 Axiles de la viga longitudinal.

Imagen 140: ELU-01 Cortantes de la viga longitudinal.

Imagen 141: ELU-01 Momentos Z de la viga longitudinal.

Imagen 142: ELS-01 Desplazamientos verticales de la lámina de hormigón.

Imagen 143: ELU-01 Tensiones tangenciales de la lámina de hormigón.

Imagen 144: ELS-01 Detalle de la deformada.

Imagen 145: ELS-01 Indeformada (sup.) y deformada (inf.) del forjado.

Imagen 146: ELS-01 Sección de la deformada.

Imagen 147: ELU-01 Momentos X.

Imagen 148: ELU-01 Momentos Y.

Imagen 149: ELS-01 Desplazamiento vertical.

Imagen 150: ELU-01 Detalle bloque comunicación momentos X.

Imagen 151: ELU-01 Detalle bloque comunicación momentos Y.

Imagen 152: ELS-01 Detalle bloque comunicación desplazamiento Z.

Imagen 153: ELS-01 Detalle de la deformada.

Imagen 154: ELS-01 Indeformada (sup.) y deformada (inf.) del forjado.

Imagen 155: ELS-01 Sección de la deformada.

Imagen 156: ELU-01 Momentos X.

Imagen 157: ELU-01 Momentos Y.

Imagen 158: ELS-01 Desplazamiento vertical.

Tablas propias del autor

Tabla 25: Captura peritaje de la vigueta paralela al hueco de escalera.

Tabla 26: Captura peritaje de la vigueta paralela a la doble altura.

Otras fuentes:

Imagen 131: Esquema sobre la influencia del voladizo en la eficacia de la viga.

ENGEL, H. (2006). *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili S.L.

Imagen 137: Detalle armado viga longitudinal

FONDATION LE CORBUSIER. (2005). *Le Corbusier Plans, Volume 8 1945*.

París: Echelle-1.

Imagen 138: Detalle armado jácena doble.

BENTON, T., & COHEN, J.-L. (2008). *Le Corbusier Le Grand. Vol1, Works*.

London: Phaidon.

## **7. CONCLUSIONES**

Imágenes obtenidas de: BOESIGER, W., & GIRSBERGER, H. (1971).

*Le Corbusier 1910-1965*. Barcelona: Gustavo Gili S.A

Imagen 159: 5 principios para la nueva arquitectura planteados por Le Corbusier.

Imagen 160: Evolución del modelo de Cité Radieuse, acueducto de Rio.

Imagen 161: Sección del paquete de 3 plantas que conforman las viviendas en dúplex.

Imagen 162: Maqueta de la idea estructural de botella y botellero.

Otras fuentes:

Imagen 163: Esquemas de comportamiento de las vigas de sección activa.

ENGEL, H. (2006). *Sistemas de estructuras*. Barcelona: Gustavo Gili S.L.

Imagen 164: Desplazamientos Y en la losa de cubierta bajo hipótesis de viento.

Imagen propia del autor

Imagen 165: Desplazamientos Y en la losa de cubierta combinando viento y el efecto del peso propio.

Imagen propia del autor