

(02-009) - Project engineering in Modern Methods of Construction. The case of buildings with lightened flat slabs with multiaxial concrete shapers

Sánchez-Garrido, Antonio J. ¹; Yepes-Bellver, Lorena ¹; Saiz, David ²; Yepes, Víctor ¹

¹ Universitat Politècnica de València, ² Unidome Spain

Modern Methods of Construction (MMC), or as some call it, “intelligent construction,” are alternatives to traditional construction. This new way of building necessarily implies a change in managing projects that have become industrialized, where structural and constructive efficiency and environmental and social sustainability are the protagonists. The article aims to identify the characteristic aspects of these innovative constructions that influence project engineering, integrating multidisciplinary groups such as architects, structural engineers, and construction companies. For this purpose, a study will be conducted on buildings with flat slabs lightened with multi-axial concrete shapers. The results show that these designs allow the project integration, elements fabrication, and construction process. The design allows for lightening and reducing the amounts of concrete and steel in those areas of the slabs where the bearing capacity is negligible. In addition, this design has been compared with other traditional designs, highlighting reduced costs and increased sustainability throughout the life cycle.

Keywords: Intelligent construction; building; sustainability; lightened slabs; modern methods of construction

Ingeniería de proyectos en Modernos Métodos de Construcción: El caso de edificios con losas planas mediante elementos aligerantes multiaxiales

Los métodos modernos de construcción (Modern Methods of Construction, MMC), o como algunos llaman “construcción inteligente”, constituyen alternativas a la construcción tradicional. Esta nueva forma de construir implica, necesariamente, un cambio en la forma de dirigir los proyectos, que pasan a ser industrializados, donde la eficiencia estructural, constructiva y la sostenibilidad ambiental y social son protagonistas. El objetivo del artículo es identificar los aspectos característicos de estas construcciones innovadoras que influyen en la ingeniería de proyectos, integrando a grupos multidisciplinares como arquitectos, ingenieros estructurales y empresas constructoras. Para ello se realizará un estudio para el caso de edificios construidos con losas planas aligeradas mediante elementos aligerantes multiaxiales. Los resultados muestran que estos diseños permiten integrar el proyecto, la fabricación de elementos y el procedimiento constructivo. El proyecto de estas construcciones permite aligerar y reducir las cuantías de hormigón y acero en aquellas zonas de las losas donde la capacidad portante es insignificante. Además, se ha comparado este diseño con otros tradicionales, destacando una reducción de costes y un aumento de la sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida.

Palabras clave: Construcción inteligente; edificación; sostenibilidad; losas aligeradas; modernos métodos de construcción

Correspondencia: Víctor Yepes. email: vyepesp@cst.upv.es

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo recibido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto de Investigación PID2020-117056RB-I00), así como la información recibida por la empresa Unidome Deutschland GmbH.



©2024 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción.

La transformación tecnológica de la construcción ya es una realidad gracias a los métodos modernos de construcción (MMC). También conocidos como "Smart construction", representan un enfoque innovador en la construcción que se aleja de los métodos convencionales o tradicionales. Este término, acuñado inicialmente por el gobierno del Reino Unido, engloba innovaciones en la construcción de viviendas, especialmente tecnologías de producción en fábrica. MMC incluye una variedad de técnicas modulares de construcción, tanto "in situ" como "off site", lo que está transformando drásticamente la forma en que se edifican estructuras, haciendo el proceso más rápido, económico y eficiente (Gibb & Pendlebury, 2005).

Muchos procedimientos innovadores con técnicas de análisis inteligente basado en la minería de datos y materiales no convencionales están siendo estudiados en ingeniería civil, aunque de forma mucho más discreta o residual en la construcción de edificios. La necesidad de evolucionar hacia ciudades más modernas y diversificadas demanda soluciones constructivas novedosas que, aunque ya se están implementando, aún no convencen plenamente a arquitectos e ingenieros ni han captado la suficiente atención por el sector en términos de sostenibilidad. Es crucial enfocarse en el diseño eficiente y sostenible, especialmente en estructuras de hormigón "in situ" basadas en MMC (Sánchez-Garrido *et al.*, 2023a), por ser las de mayor impacto ambiental y socioeconómico, para avanzar hacia una construcción más sostenible (Navarro *et al.*, 2023).

El eficiente método constructivo mediante losas aligeradas de hormigón está alcanzando los últimos años gran popularidad en el mercado frente a las losas convencionales tras más de dos décadas de desarrollo (Schnellenbach-Held & Pfeffer, 2000) siendo ahora una solución establecida internacionalmente. Debido a la materialidad de la losa maciza tradicional, el punto débil es su peso propio (Abg Adenan, 2020). En edificación residencial, éste supone al menos el 60% de la carga total, lo que redundaría en una necesidad de mayores cuantías de acero. La utilización de los aligerantes multiaxiales dentro de la sección de hormigón armado, permiten mejorar las prestaciones de la losa armada. Las capas armadas continuas, traccionada y comprimida, se mantendrán intactas, situándose los aligerantes (de plástico 100% reciclado) en el centro de la losa. En la zona central, el hormigón y su forma resultante a partir del diseño de aligeradores asumirá las tensiones provocadas por las dos capas continuas, comportándose de manera conjunta.

Varios estudios se han centrado en evaluar su resistencia al punzonamiento (Schnellenbach-Held & Pfeffer, 2002). Se ha observado una disminución en la resistencia al corte en comparación con las losas sólidas, debido a la reducción de la sección crítica de hormigón causada por la presencia de los huecos cercanos a los pilares (Sagadevan & Rao, 2019; Al-Gasham *et al.*, 2019). No obstante, se ha comprobado que este inconveniente puede ser superado al introducir una losa maciza (sin huecos) alrededor de las columnas (Chung *et al.*, 2018). En cuanto a la resistencia a la flexión, se han obtenido valores similares a los de las losas macizas (Midkiff, 2013). Además, se ha demostrado que la forma de los huecos puede tener un impacto significativo en la resistencia a la flexión, siendo los huecos esféricos los que ofrecen los mejores resultados (Nimnim & Alabdeen, 2019). Existen varios métodos analíticos para evaluar las resistencias a la flexión y a cortante de losas aligeradas. Las disposiciones de los códigos ACI 318 y EC2 pueden no ser adecuadas para predecir la resistencia al cortante; en cambio, el análisis de elementos finitos podría proporcionar una estimación precisa del rendimiento de estas losas (Chung *et al.*, 2015).

El aspecto más atractivo que se obtiene con este tipo de estructuras basadas en MMC es la reducción de los cantos de forjado, mayores luces creando espacios diáfanos, estructuras más esbeltas y optimización de las cimentaciones, marcando un avance en la ingeniería civil hacia la sostenibilidad. Por tanto, el objetivo de este trabajo es doble: a) plantear una metodología para el diseño y cálculo de este tipo de losas aligeradas; b) realizar un estudio del caso comparando la sostenibilidad resultante del cálculo entre dos opciones estructurales dispares, una convencional (ejecutada realmente) y una alternativa basada en MMC, a partir del diseño de referencia de un edificio residencial público situado en la costa de Chiclana, Cádiz (España).

2. Materiales y métodos.

En general, las losas planas son elementos estructurales delgados y horizontales, dispuestos en grandes vanos para lograr espacios amplios y diáfanos. Si miramos atrás, hace unos años se empleaban mucho las cuadrículas de vigas sobre las que se apoyaban placas planas de canto reducido, pero en los últimos años las losas planas se han vuelto muy populares debido a las grandes ventajas que ofrecen. El comportamiento de las losas planas ha sido objeto de profundas investigaciones, por lo que en todo el mundo se conocen sus especificidades de diseño.

Las losas planas aligeradas con elementos formadores de huecos, no difieren de las losas macizas en términos de comportamiento estructural y rinden al mismo nivel (Sánchez-Garrido *et al.*, 2023b). Los formadores de huecos multiaxiales “Unidome” que es el sistema MMC que se estudia en este documento, sustituyen hasta el 30% del hormigón de las zonas traccionadas, en un forjado de hormigón armado, consiguiendo grandes luces y reducidos cantos de forjado, ya que además se ve reducido su peso propio.

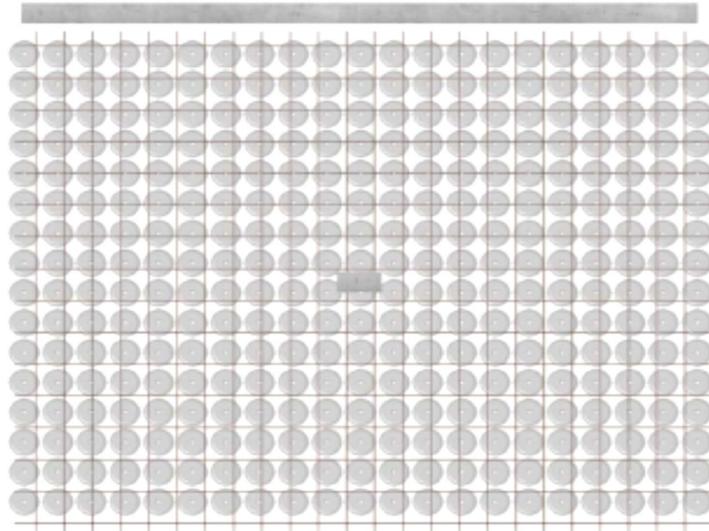
2.1 Diseño.

El diseño básicamente consiste en aligerar y reducir las cuantías de hormigón y acero, en aquellas zonas de las losas donde la capacidad portante es insignificante. ¿Por qué consumir más hormigón del necesario? El proceso se realiza exactamente igual que el de una losa maciza, teniendo únicamente en cuenta que el peso propio será inferior y que la rigidez a flexión, al ser también un poco inferior, debe ser corregida mediante un factor corrector de la inercia. Sabiendo que la reducción del peso propio genera unos efectos muy positivos que superan con creces la ligera pérdida de rigidez a flexión, las losas que utilizan este sistema destacan por reducir los cantos de forjado entre un 5-10% en comparación con las losas macizas.

2.2.1 Estimación de canto de forjado y primera fase de cálculo.

Análogo al diseño de forjados de losa maciza, se determina un primer canto de forjado para comenzar el cálculo basado en elementos finitos. Antes de comenzar el cálculo, se debe tener en cuenta una reducción de la carga de peso propio (1) (determinada por el peso de la losa maciza y aplicando la reducción de carga que corresponda al formador de huecos seleccionado /m²). Al mismo tiempo, el factor de inercia (2) de la sección transversal necesita ser calculado y modificado. Aplicando ambos parámetros en toda la losa, asumimos que el 100% de la losa está cubierta de formadores de huecos.

Figura 1: Ratio de ocupación del aligeramiento 100%.



2.2.2 Comprobación de distribución de esfuerzos cortantes.

Con la finalidad de garantizar un correcto funcionamiento y adaptar la tecnología, la distribución de esfuerzos cortantes han sido contrastados. Los formadores de huecos multiaxiales son admisibles en todas las áreas donde la distribución de esfuerzos cortantes suponga valores inferiores al 50% de la resistencia a cortante de la losa maciza.

$$V_{Rd,c,UD} = f_{shear} \times \left[\frac{0.15}{\gamma_c} \times k \times (100 \times \rho_l \times f_{ck})^{1/3} \right] \times b \times d \quad (1)$$

f_{shear} Factor que corrige la resistencia a cortante en las zonas aligeradas.

γ_c Coeficiente de seguridad de la resistencia del hormigón art. DIN EN 1992-1-1, 2.4.2.4, Tabla NA 2.1.

k Factor escalar con $k=1+(200/d)^{1/2} \leq 2,0$.

ρ_l Ratio de refuerzo longitudinal en relación a la sección transversal con $\rho_l \leq 0,02$.

b Anchura de sección transversal.

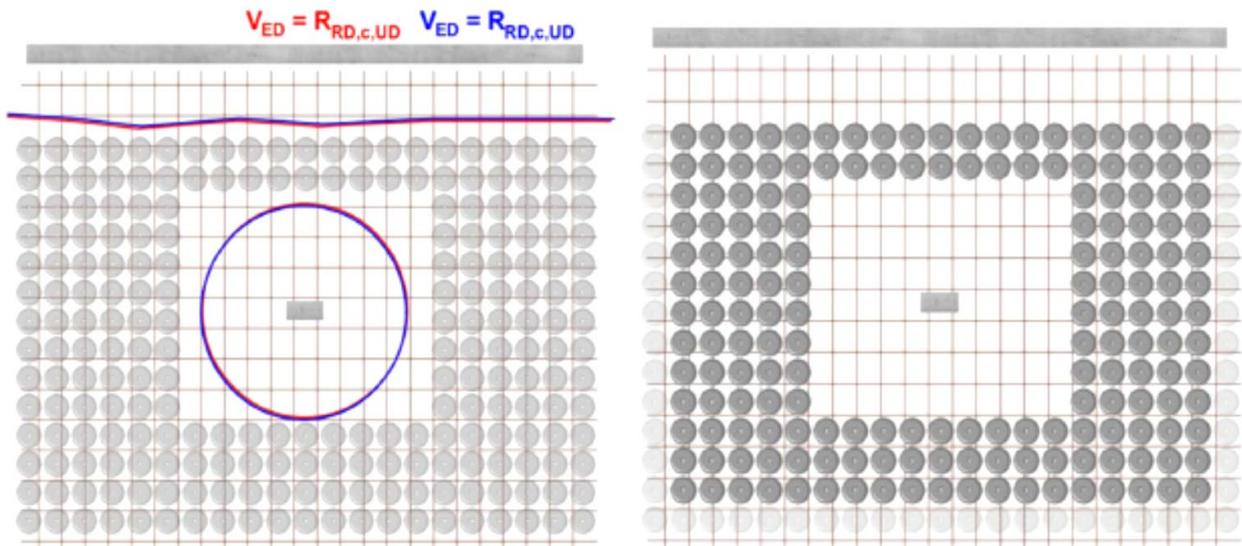
d Canto efectivo del refuerzo a flexión en relación a la sección transversal.

Los formadores de huecos han de ser eliminados de todas aquellas zonas con grandes esfuerzos de cortante, como ocurre con las áreas cercanas a los soportes, demostrando que la suposición inicial (formadores de huecos cubriendo toda la losa) es falsa. Por ello, ahora debemos corregir parcialmente dichas zonas, aplicando el peso propio que le corresponde a la losa maciza, así como su rigidez.

2.2.3 Comprobación final

Ahora que el diseño de la losa dispone de dos tipos de áreas diferenciadas (área aligerada y área sólida), ejecutamos el cálculo final para verificar que todos los resultados permanecen dentro de las condiciones de contorno.

Figura 2: Eliminación de formadores de huecos en áreas con mayores esfuerzos cortantes.

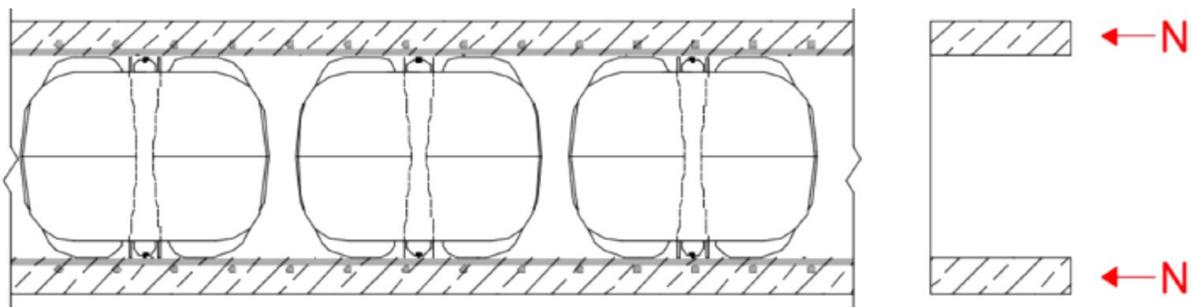


Las zonas de punzonamiento de pilares / muros definitivas no deben interferir con las zonas aligeradas. Una buena práctica es mantener también una distancia maciza mínima a los bordes de la losa en el apoyo de elementos lineales, desde 40 cm a 60 cm si fuese necesario.

2.2 Fuerzas axiales.

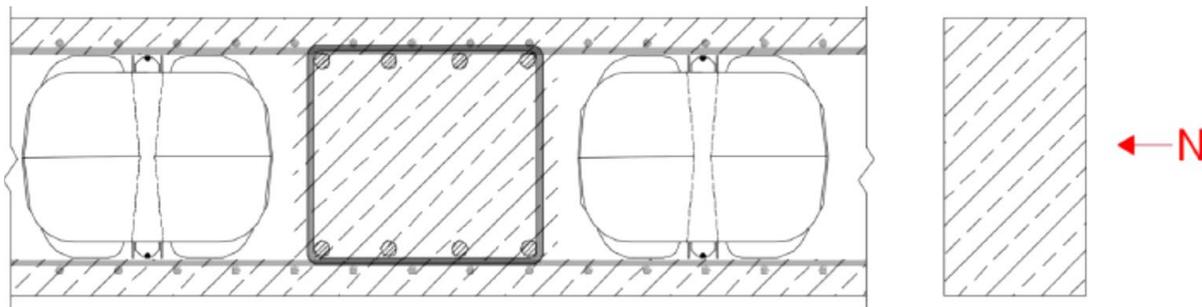
Si las fuerzas axiales tienen que ser transmitidas por dentro de la losa, como es el caso de la acción del sismo por ejemplo, los formadores de huecos multiaxiales proporcionan capacidad suficiente para soportar estas fuerzas axiales / en el plano de acción. Si comparamos la fuerza axial máxima admisible con la resistencia de la losa, solo se debe considerar la sección transversal neta del hormigón.

Figura 3: Sección neta del hormigón para determinar la capacidad de carga axial.



Si, en contra de las especificaciones, el área neta no fuese suficiente, se pueden eliminar elementos individuales para crear tiras sólidas individuales dentro de la losa, de forma análoga a un forjado reticular. Las dimensiones y el cálculo del refuerzo para esas tiras sólidas se obtienen igual que en el caso de losa maciza.

Figura 4: Nervios embebidos para mejorar la capacidad de carga axial.



Lo mismo es de aplicación, si las ventajas del sistema se combinan con pre-/post tesado, por ejemplo. Las tiras macizas se disponen de forma adecuada para albergar los tendones. Estructuralmente, las fuerzas axiales se transmiten y distribuyen dentro de las tiras macizas que albergan los tendones. No se permite repartir fuerzas axiales a las zonas aligeradas. Entre esas áreas reforzadas, los formadores de huecos “Unidome” garantizan una losa plana, ligera y uniaxial, reduciendo la cantidad de tendones necesarios.

2.3 Junta en frío.

Para prevenir que los formadores de huecos floten durante la fase de hormigonado, los elementos se pueden sujetar al encofrado inferior en el caso de una solución de hormigonado in-situ. En este caso, el hormigón puede ser vertido en una única capa. Sin embargo, por norma general, para evitar el efecto de flotación, el hormigonado de las zonas aligeradas de la losa suele ejecutarse en dos capas (primera capa de aproximadamente 10-15 cm, dependiendo de la sección transversal del forjado). En esta segunda opción, se debe colocar un refuerzo para una unión limpia entre las capas inferior y superior.

Para calcular el refuerzo que requiere una losa según la sección transversal, se debe utilizar como máximo el 30% del área total como área de unión. Esta área corresponde al área proyectada con los formadores de huecos. Además, consideramos junta lisa (quedando del lado de la seguridad) a efectos de cálculo.

Figura 5: Mínimo refuerzo de unión para hormigonado en dos capas.



2.4 Resistencia al fuego de la estructura.

Los elementos estructurales deben diseñarse de forma que, ante el desconchado (*spalling*) del hormigón, el fallo por anclaje o por pérdida de capacidad de giro tenga una menor probabilidad de aparición que el fallo por flexión, por esfuerzo cortante o por cargas axiales.

La resistencia a fuego de la losa aligerada viene condicionada por tres factores:

- Recubrimiento mecánico

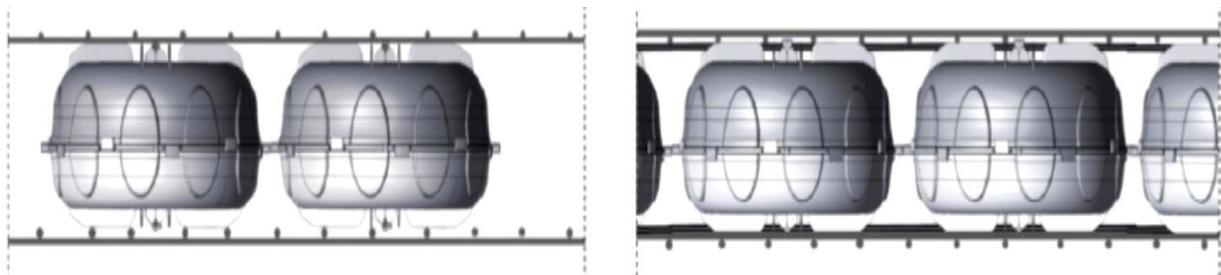
- Recubrimiento hasta el cuerpo del aligerador (cavidad hueca), es decir, sin tener en cuenta las "patillas" que tienen los aligeradores de 1,5 cm en cara superior e inferior.
- Transmisión de esfuerzos en losa uniaxial (unidireccional), biaxial (bidireccional con $I_y/I_x \leq 1,5$) y biaxial con vanos descompensado (bidireccional con $1,5 \leq I_y/I_x \leq 2$).

2.5 Ensamblado, instalación y seguimiento en obra.

La entrega de los formadores de huecos se realiza en obra (o en la planta de prefabricación) almacenados en palets. Después de la descarga del camión o del contenedor, las semi-cáscaras XS-HP (embaladas en papel film) son desembaladas y ensambladas in-situ para convertirse en Formadores de Huecos. Hay que prestar especial atención y cuidado durante la descarga del material y el desembalado, para evitar dañar el material.

Cada formador de huecos XS consiste en dos semi-cáscaras XS-HP. El ensamblado debe realizarse tal y como se indica, mediante un sistema de clic que une las dos semi-cáscaras. Es importante destacar que en el caso de ensamblar distintas alturas de semi-cáscaras, la semi-cáscara más pequeña de los formadores de huecos XS-HP debería colocarse en la cara inferior. Varios formadores (hasta 6 piezas por elemento) son ensamblados empleando sus correspondientes ganchos Unifix y dos barras de acero corrugado (diámetro 6 mm). Una vez ensamblados, hay que asegurarse de que no hayan sido dañados los elementos. La distancia de eje a eje entre formadores de huecos quedará marcada por la distancia entre los ganchos Unifix, siendo de 35 cm, recomendando utilizar una plantilla de base para un ensamblado rápido y eficaz.

Figura 6: Sección transversal y diseño de formadores de huecos Unidome XS.

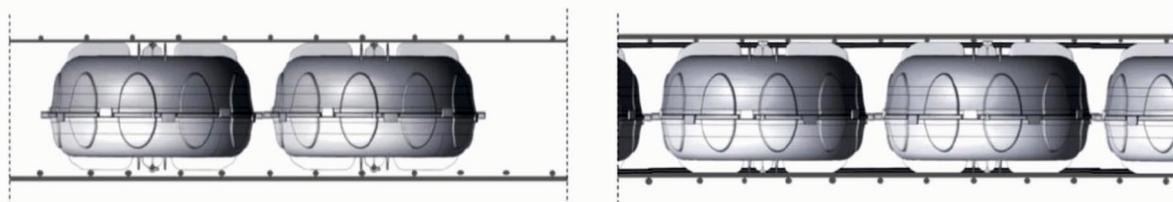


Tras colocar el armado inferior de la losa, se instalan los formadores de huecos. Los elementos se disponen en paralelo a la dirección adyacente del armado inferior. Para fijarlos, los elementos se atan al armado inferior mediante alambre de atado de armaduras. La tercera capa de refuerzo se coloca ortogonalmente a los elementos.

La disposición básica de los elementos con respecto a la armadura superior e inferior de la losa puede verse en las figuras que se muestran a continuación. Toda la información necesaria sobre la sección transversal de la estructura debe encontrarse en los respectivos planos de cada proyecto.

Durante la instalación, es imprescindible mantener la distancia mínima entre ejes de 35 cm. Las "patillas espaciadoras" que nacen de las cuatro caras de cada formador de huecos, ayudan a asegurar la correcta instalación y la alineación entre elementos.

Figura 7: Sección transversal y diseño de formadores de huecos Unidome XS.



La puesta en obra puede realizarla cualquier empresa de construcción, ya sea pequeña o grande, pues se trata de manipular hormigón y acero corrugado. Es un sistema sencillo de ejecutar, pero que tiene algunas peculiaridades que hay que tener en cuenta a la hora de su colocación. Es crucial abordar especialmente el tema de evitar la flotabilidad del sistema, además de considerar el proceso de hormigonado. Esto implica verter inicialmente una capa de hormigón de aproximadamente 6-7 cm de espesor para proporcionar peso, y antes de que esta capa inferior se solidifique por completo, verter el resto del hormigón, asegurándose de que ambas capas se unan perfectamente.

2.6 Sostenibilidad.

El hormigón es uno de los materiales esenciales en la construcción contemporánea. Sin embargo, la producción de cemento, requerida en grandes cantidades para el suministro de hormigón, es una importante fuente de emisiones de gases de efecto invernadero. Según datos de WWF Deutschland, una tonelada de cemento emite aproximadamente 587 kg de CO₂ (Yepes-Bellver *et al.*, 2022). Utilizando formadores de huecos multiaxiales en comparación con una losa maciza, se puede reemplazar hasta un 35% del hormigón, y por ende del cemento, sin afectar negativamente el comportamiento de las estructuras. De hecho, se llega a obtener reducciones del 10% del canto alcanzando un incremento del 40% en las luces. La reducción directa en el consumo de hormigón y sus componentes, es solo una parte de las posibles mejoras materiales. El acero estructural presente en cada estructura también puede reducirse significativamente. Además, la reducción de hasta un 35% de peso implica optimizar todos los elementos estructurales, disminuyendo la sección de pilares, muros y cimentaciones, lo que resulta en un importante ahorro indirecto de materiales. Se utiliza plástico 100% reciclado en la fabricación de los aligeradores. Un transporte del sistema reemplaza una media de 30 camiones de hormigón (hasta 48 camiones), evitando una media de 46 toneladas en emisiones de CO₂ (hasta 62 toneladas). Esto supone un 20% de reducción de energía consumida y un 20% en la reducción de emisiones. Todas estas medidas conducen a una significativa reducción de la huella de carbono, menos consumo de agua y, por tanto, a una mayor protección del medio ambiente.

Tabla 1: Sostenibilidad de los formadores de huecos.

Unidome XS	80 (110)	100 (130)	120 (150)	140 (170)	160 (190)	180 (210)	200 (230)	220 (250)	240 (270)	260 (290)
Canto de losa (cm)	20	22	24	26	28	30	32	35	38	40
Consumo hormigón (Kg/m ²)	369	390	413	436	463	485	515	559	613	644
Reducción vs losa maciza (%)	23	26	28	30	31	33	33	33	33	33
Vol. desplazado (m ³ /m ²)	0,0443	0,0551	0,0652	0,0753	0,0837	0,0938	0,1010	0,1123	0,1195	0,1265
Reducción peso (Kg/m ²)	-111	-138	-163	-188	-209	-235	-253	-281	-299	-316
Contenido cemento (Kg/m ²)	22,2	27,6	32,6	37,6	41,8	47,0	50,6	56,2	59,8	63,2
Reducción CO ₂ áreas aligeradas (Kg/m ²)	13,03	16,20	19,14	22,07	24,54	27,59	29,70	32,99	35,10	37,10
CO ₂ reducido (Kg/m ²)	9,12	11,34	13,40	15,45	17,18	19,31	20,79	23,09	24,57	25,97

3. Caso de estudio.

3.1 Caracterización del problema.

Este estudio pretende comparar la sostenibilidad entre dos alternativas estructurales dispares, una convencional y otra basada en MMC, a partir del diseño de referencia de un edificio residencial público situado en la costa de Chiclana, Cádiz (España). La estructura se ciñe a un módulo completo de 339 m² estructura por planta (20,70 x 12,70 m) entre juntas de dilatación repetidas longitudinalmente. La edificación destinada al uso de habitaciones y pasillos comunes, tiene tres plantas de 3,30 m de altura, siendo la cubierta una azotea invertida no transitable con instalaciones de paneles solares y acceso a efectos solo de mantenimiento. En su totalidad esta tipología representa más del 80% de la superficie construida del hotel si exceptuamos el Lobby. Uno de los factores más significativos que afectan a la durabilidad del hormigón es la penetración de cloruros procedentes del agua de mar, que puede presentar distintos grados de severidad y que se tienen en cuenta en los recubrimientos de las dos alternativas.

3.2 Alternativas de diseño.

Para comparar la evaluación de los impactos del ciclo de vida, es esencial utilizar la misma unidad funcional que en la norma ISO 14040. Este análisis considera 1m² de superficie construida que comprende un módulo hotelero de tres niveles con una superficie total construida de 1356 m² para la estructura más la cimentación consideradas para una vida útil estándar de 50 años, tal y como exigen el Código Técnico de la Edificación (CTE).



Figura 8: Modelos 3D de la estructura convencional vs MMC.

3.3.1 Alternativa A: estructura de hormigón convencional.

Este modelo estructural precisa disponer 10 pilares para luces de 6.60 m en sentido longitudinal y 7,50 m en el transversal. Se compone de:

a) Forjados con estructura mediante losa maciza de hormigón armado, realizada con hormigón HA-30/F/20/XS1 fabricado en central, con cemento MR, y vertido con cubilote, con un volumen total de hormigón en losa y pilares de 0,252 m³/m² en forjados tipo y 0,231 m³/m² en forjado de cubierta, con acero UNE-EN 10080 B 500 S; pilares: altura libre de entre 3 y 4 m y 60x30 cm de sección media.

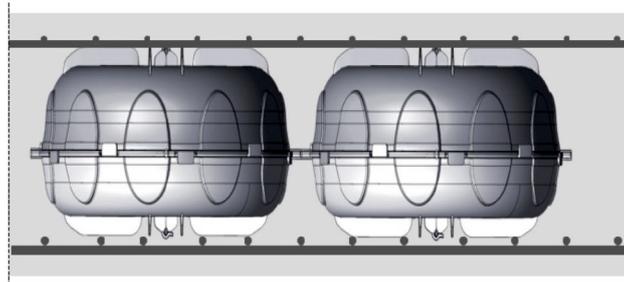
b) Losa de cimentación maciza de hormigón armado de 60 cm de espesor, realizada con hormigón HA-30/F/20/XS1+XA1 fabricado en central, con cemento SR, y vertido con bomba, y acero UNE-EN 10080 B 500 S; acabado superficial liso mediante regla vibrante.

3.3.2 Alternativa B: estructura de hormigón basada en MMC.

Este modelo estructural, con la reducción de peso propio sin comprometer la rigidez, permite eliminar filas intermedias de pilares, resultando sola 6 pilares de características equivalentes a los anteriores para luces de 13,20 m en sentido longitudinal y 7,50 m en el transversal.

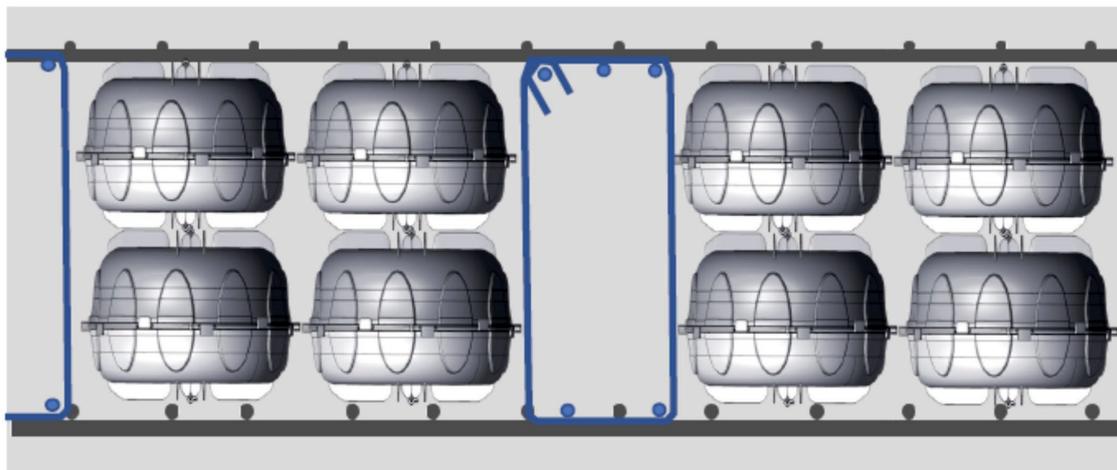
- a) Forjados con estructura de hormigón armado, realizada con Unidome XS-260 (290) de sección transversal de 44 cm para forjados intermedios y Unidome XS-240 (270) de espesor 40 cm para forjado de cubierta. El volumen desplazado de hormigón en zona aligerada de forjado intermedio es de $0,1265 \text{ m}^3/\text{m}^2$ y en forjado de cubierta $0,1195 \text{ m}^3/\text{m}^2$, con una reducción de peso propio de $-3,16$ y $-2,99 \text{ kN/m}^2$, respectivamente.

Figura 9: Sección transversal forjados.



- b) Losa de cimentación aligerada de hormigón armado, realizada con Unidome XS-D-500 (550) con una sección transversal de canto 72 cm, nervios de 20 cm de ancho con intereje a 70 cm. El volumen desplazado de hormigón en zona aligerada es de $0,148 \text{ m}^3/\text{m}^2$, con una reducción de peso propio de $-3,72 \text{ kN/m}^2$.

Figura 10: Sección transversal losa de cimentación.



Las especificaciones de los materiales adicionales, para el mismo tipo de hormigón y acero definido anteriormente a igualdad de ambiente, son: Formadores de huecos: compuestos de HD-PE o PP; Barras de fijación: barras de fijación superior e inferior (corrugadas) de acuerdo con DIN 488-1: 2009-08 o equivalente; Conectores: las barras se unen a los formadores de huecos mediante ganchos de plástico (HD-PE o PP), pasando a través del hueco central de los formadores de huecos.

4. Resultados.

Se ha realizado el cálculo según el método de los estados últimos, definidos como aquellas situaciones que, en caso de ser superadas, se puede considerar que el edificio no cumple con algunos de los requisitos estructurales para los que ha estado diseñado.

La limitación de deformaciones se ha comprobado según C.T.E. que indica que frente a cualquier combinación de acciones características, la flecha relativa, considerando sólo las flechas posteriores a la puesta en obra del elemento ha de ser menor:

- 1/500 en forjados con tabiques frágiles o pavimentos rígidos sin juntas
- 1/400 en forjados con tabiques ordinarios o pavimentos rígidos con juntas
- 1/300 en el resto de casos

Las acciones superficiales comunes consideradas en el cálculo de las alternativas han sido:

- Cargas vivas de 1,00 kN/m², 2,00 kN/m² y 3,00 kN/m² para cubierta plana accesible a efectos solo de mantenimiento, plantas de habitaciones y pasillos en zonas comunes, respectivamente.
- Cargas muertas de 2,50 kN/m² y 1,50 kN/m² para formación de pendientes + acabado en grava y tabiquería autoportante + pavimento, en planta de cubierta y plantas de habitaciones respectivamente.

Una vez calculadas ambas alternativas, considerando viento y sismo, y optimizados los armados, el resultado con la comparativa con el resumen de mediciones por cuantías de obra se muestran en la Tabla 2, tanto para la opción A con estructura convencional como la opción B con estructura de losas aligeradas con elementos multiaxiales "Unidome":

Tabla 2: Mediciones por cuantías para estructura convencional.

Opción A: Estructura convencional para $L_{max}=6,6m$				
Elemento	Encofrado (m²)	Superficie (m²)	Volumen (m³)	Barras (kg)
Losas de cimentación	-	307,69	200,00	1.452,00
Armadura base	-	-	-	14.098,00
Losas macizas	-	852,92	232,74	929,00
Armadura base	-	-	-	31.696,00
Vigas	126,37	183,78	62,87	7.072,00
Pilares	149,47	-	14,26	4.590,00
Total	-	1.344,39	509,87	59.837,00
Índices (por m²)	-	-	0,37	44,30
Superficie total: 1.350,75 m²				

- **Cimentación Nivel 0:** Losa E=65 cm.
Arm. Base: #Φ16c/20 cm superior y #Φ20c/20 cm inferior.
- Forjado Nivel 1 y 2:** Losa E=28 cm.
Arm. Base: #Φ16c/15 cm superior y #Φ12c/15 cm inferior.
- Forjado Nivel 3:** Losa E=26 cm.
Arm. Base: #Φ16c/15 cm superior y #Φ12c/15 cm inferior.

Tabla 3: Mediciones por cuantías para estructura basada en MMC.

Opción B: Estructura "Unidome" para $L_{max}=13,2m$				
Elemento	Encofrado (m²)	Superficie (m²)	Volumen (m³)	Barras (kg)
Losa cimentación				
Unidome	-	309,34	154,24	10.092,00
Armado base	-	-	-	13.525,00
Vigas de cimentación	56,95	29,90	22,32	3.236,00
Losas Unidome	-	854,13	276,05	9.761,00
Armado base	-	-	-	20.576,00
Vigas	114,73	153,11	67,06	7.134,00
Pilares	107,14	-	12,93	5.568,00
Total	-	1.346,48	532,60	69.892,00
Índices (por m²)	-	-	0,40	51,91
Superficie total: 1352,68 m²				

- **Cimentación Nivel 0:** Losa XS-D-500(550); E=72 cm.
Arm. Base Superior $\Phi 16c/20$ cm (Eje X) + $\Phi 20c/15$ cm (Eje Y).
Arm. Base inferior $\Phi 12c/15$ cm (Eje X) + $\Phi 16c/20$ cm (Eje Y).
- **Forjados Nivel 1 y 2:** Losa XS-260(290); E=44 cm.
Arm. Base Superior $\Phi 12c/25$ cm (Eje X) + $\Phi 16c/25$ cm (Eje Y).
Arm. Base inferior $\Phi 12c/25$ cm (Eje X) + $\Phi 16c/25$ cm (Eje Y).
- **Forjado Nivel 3:** Losa XS-240(270); E=40 cm.
Arm. Base Superior $\Phi 12c/25$ cm (Eje X) + $\Phi 16c/25$ cm (Eje Y).
Arm. Base inferior $\Phi 12c/25$ cm (Eje X) + $\Phi 16c/25$ cm (Eje Y).

En la solución basada en MMC, para el Nivel 3 de Losa XS-240(270) de espesor 40 cm logra aligerar 125,60 m² (37% de 336 m² totales) lo que supone 0.1195 m³/m² de volumen desplazado, una disminución de peso propio de 2,99 kN/m² y una reducción de emisiones de CO₂ de 0,025 t/m². Para cada Nivel 1 y 2 de Losas XS-260(290) de espesor 44 cm se aligeran 83,51 m² (25% de 336 m² totales) siendo 0.1265 m³/m² el volumen desplazado, una bajada de peso propio de 3,16 kN/m² y 0,027 t/m² menos de emisiones de CO₂.

Hay que tener en cuenta que las zonas macizadas son superiores a la media de otras obras con rangos de luces entre los 6 y 12 m (donde se consiguen aligerar hasta un 60% de superficie) dado que se trata de una estructura puesta al límite con rangos de luces máximas muy elevados (13,2 m). En el caso de la losa de cimentación XS-D-500(550) de 72 cm de espesor, aligera 119,73 m² (35% de 339 m² totales) desplaza un volumen de 0,246 m³/m², 6,15 kN/m² menos de peso propio (0,148 m³/m² y 3,72 kN/m² si consideramos realmente los nervios embebidos) y un ahorro de 0,052 t/m² de emisiones a la atmósfera.

En números totales, el volumen de hormigón empleado en la solución B es un 4,5% sensiblemente superior a la convencional, así como la cuantía de acero que precisa sobre un 16% más. Sin embargo, estamos comparando una estructura que requiere 10 pilares para ser soportada con tecnología convencional frente a otra que partiendo de la anterior es más ambiciosa y precisa solo 6 pilares con tecnología basada en MMC.

El impacto y coste social que representa para un promotor hotelero esta eliminación de soportes es parámetro que se debería tener en cuenta en los estudios previos de viabilidad: más libertad en el diseño y reparto de las habitaciones, mayores espacios diáfanos en áreas de clientes especialmente en plantas bajas, flexibilidad en las zonas que se concentran cargas por instalaciones o para aperturas imprevistas de huecos, menores tiempos de ejecución y

montaje debido al ínfimo peso de los aligerantes, menores cantos de losas a igualdad de luces y cargas frente a un sistema tradicional, etc...

Para tener un orden de dimensiones a igualdad de luces de 13,2 m y a efectos solo de predimensionado, una losa maciza "teórica" para uno de los niveles intermedios precisaría más de 50 cm de canto. Un forjado reticular en el mismo caso hipotético necesitaría un canto de 50+5 cm. En ambos casos, desde el punto de vista solo del efecto del peso propio en forjados, pilares y cimentación, los hace constructivamente inviables teniendo que recurrir a otras técnicas combinadas como post-tesado.

5. Conclusiones.

Los Métodos Modernos de Construcción (MMC) surgen como un cambio de paradigma en la forma de diseñar y construir edificios, minimizando los impactos del ciclo de vida mediante la optimización del consumo de materiales. Este estudio se centra en la aplicación constructiva de losas planas de hormigón armado aligeradas con elementos multiaxiales de plástico 100% reciclado. El concepto se basa en aligerar y reducir las cuantías de hormigón y acero, en aquellas zonas de las losas donde la capacidad portante es insignificante.

Las losas aligeradas Unidome reducen el consumo de hormigón de las losas armadas hasta un 35%, haciéndolas más ligeras. Esto además permite reducir hasta un 20% la cuantía de acero estructural, sin que ello suponga minorar la capacidad portante de la losa. De esta manera se ahorra material, energía, mano de obra, tiempo y dinero.

Estos aligeradores están disponibles en el mercado en distintos tamaños o alturas, lo que permite emplearlos para cualquier espesor de losa. Por ello, todo tipo de edificación puede beneficiarse de estas ventajas, sin importar si se trata de una escuela o de un rascacielos, por ejemplo. El rango de espesores de losa a poder ejecutar va desde los 20 cm hasta los 80 cm teniendo en cuenta que a partir de 45 cm habría que apilarlos dobles o triples.

El objetivo además no es solo aligerar las pesadas losas de hormigón, sino que hace más fácil el trabajo para los integrantes de un proyecto, desde los arquitectos, a los ingenieros estructurales y las empresas de construcción.

Los espacios pueden definirse con mayor flexibilidad, las comprobaciones estáticas se simplifican debido a la reducción de las cargas y se aceleran los tiempos de ejecución. Además, esta tecnología basada en los MMC ofrece ventajas para obtener certificados de sostenibilidad que con sistemas tradicionales es muy complicado.

En resumen, es una alternativa interesante tanto para forjados como para losas de cimentación ya que son capaces de:

- Simplificar la geometría de los forjados y mejorar los rendimientos de ejecución.
- Optimizar canto de forjado.
- Posibilidad de acabado en hormigón visto.
- Mayor flexibilidad para la apertura de huecos.
- Contribuir en la reducción de emisiones de CO₂.
- Emplear materiales reciclados en las estructuras (polipropileno 100% reciclado).
- Mejorar técnicamente la estructura (resistencia a fuego, comportamiento frente a sismo, aislamiento acústico...).

Este trabajo está limitado a un estudio del caso concreto de tipología residencial pública (hotelera) con unas luces y cargas muy concretas acordes al uso del edificio. Se compara exclusivamente una alternativa de estructura no convencional "Unidome" con la estructura

realmente ejecutada de losa maciza, que se consideró la más adecuada en el momento de la redacción del proyecto. Futuros trabajos buscarán optimizar el diseño eficiente de este tipo de estructuras de hormigón no convencionales, con criterios multiobjetivo sostenibles, elevando tanto rangos de carga como de luces, entre los 6,00 y los 16,00 m. Del mismo modo se ampliará el estudio comparando con otras alternativas tradicionales, como forjado reticular tanto de casetón perdido (hormigón, arcilla expandida y EPS) como de casetón recuperable. Del predimensionado se deduce como recomendación práctica que para maximizar el aprovechamiento de la sección aligerada de hormigón en relación a la luz hay que evitar diseñar las placas de forjado como biapoyadas, retranqueando los soportes de sus bordes y compensando las luces interiores con vuelos proporcionales en los extremos.

5.1 Referencias.

- Abg Adenan, D. S. Q., Kartini, K., & Hamidah, M. S. (2020). Comparative Study on Bubble Deck Slab and Conventional Reinforced Concrete Slab –A Review. *Journal of Advanced Research in Materials Science*, 70 (1), 18–26. <https://doi.org/10.37934/arms.70.1.1826>
- Albrecht, C., Albert, A., Pfeffer, K. & Schnell, J. (2012). Design and construction of two-way spanning reinforced concrete slabs with flattened rotationally symmetrical void formers. *Beton- und Stahlbetonbau*, 107 (9), 590-600. <https://doi.org/10.1002/best.201200027>
- Al-Gasham, T. S., Hilo, A. N., & Alawsi, M. A. (2019). Structural behavior of reinforced concrete one-way slabs voided by polystyrene balls. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00292. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00292>
- Chung, J.-H., Bae, B.-I., Choi, H.-K., Jung, H.-S., & Choi, C.-S. (2018). Evaluation of punching shear strength of voided slabs considering the effect of the ratio b_0/d . *Engineering Structures*, 164, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.085>
- Chung, J.-H., Choi, H.-K., Lee, S.-C., & Choi, C.-S. (2015). One-way shear strength of circular voided reinforced concrete floor slabs. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, 168 (5), 336–350. <https://doi.org/10.1680/stbu.14.00044>
- Midkiff, C. J. (2013). *Plastic voided slab systems: applications and design*.
- Navarro, I.J., Martí, J.V., Yepes, V. (2023). Evaluation of Higher Education Students' Critical Thinking Skills on Sustainability. *International Journal of Engineering Education*, 39(3), 592-603.
- Nimnim, H., & Alabdeen, Z. (2019). *Structural behavior of voided normal and high strength reinforced concrete slabs*. *Kufa Journal of Engineering*, 10, 1–11. <https://doi.org/10.30572/2018/kje/100201>
- Sagadevan, R., & Rao, B. N. (2019). Experimental and analytical investigation of punching shear capacity of biaxial voided slabs. *Structures*, 20, 340–352. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.03.013>
- Sánchez-Garrido, A.J., Navarro, I.J., García, J., & Yepes, V. (2023a). A systematic literature review on Modern Methods of Construction in building: an integrated approach using machine learning. *Journal of Building Engineering*, 73, 106725. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106725>
- Sánchez-Garrido, A.J., Navarro, I.J. & Yepes, V. (2023b). Sustainable Design of Lightened Reinforced Concrete Flat Slabs in Coastal Environment. *8th International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering IALCCE 2023*, July 2-6, Milano (Italy), PP. 2463-2470. <https://doi.org/10.1201/9781003323020-300>
- Schnellenbach-Held, M. & Pfeffer, K. (2000). Punching Shear Capacity of Biaxial Hollow Slabs, International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs Proceedings, pp. 423-430, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Schnellenbach-Held, M. & Pfeffer, K. (2002). Punching behavior of biaxial hollow slabs. *Cement and Concrete Composites*, 24 (6), 551-556. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00071-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00071-3)

Yepes-Bellver, I.; Brun-Izquierdo, A.; Alcalá, J.; Yepes, V. (2022). CO₂-optimization of post-tensioned concrete slab-bridge decks using surrogate modeling. *Materials*, 15(14):4776. <https://doi.org/10.3390/ma15144776>

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible



El proyecto se orienta hacia el objetivo 9 de desarrollo sostenible (ODS): Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación.