

Alternativas estructurales empleando forjados unidireccionales en edificación residencial

STRUCTURAL ALTERNATIVES WITH ONE WAY SLAB IN RESIDENTIAL BUILDINGS

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7465> | Recibido: 12/11/2014 • Aceptado: 03/02/2015

Javier Ferreiro-Cabello, Esteban Fraile-García,
Eduardo Martínez-de-Pisón, Emilio Jiménez-Macías

UNIVERSIDAD DE LA RIOJA. Departamento de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. calle San Jose de Calasanz, 31 - 26004 Logroño.
Tfno: +34 941 299534

ABSTRACT

- The main objective of this work is the development of a methodology for decision making on the optimal structural typology, to be applied by the different actors involved in a residential construction project, combining performance criteria, cost, and environmental impact. This methodology is based on the knowledge generated from the research based on a deep analysis of information obtained from actual implemented projects, and on the professional experience in the sector. The paper focuses on one-way slabs; the two most commonly used types of one-way slabs in structures are "in situ" slabs and those incorporating prefabricated elements. The application of the methodology is performed on a reference building, incorporating different arrangements of pillars (pillars index) as well as the most common structural solutions. The model developed from the analyzed cases reflects the most frequent deployments in residential construction. A Pareto frontier analysis applied to the results simplifies and facilitates the decision, reducing the alternatives to only those that have some advantageous condition against all others. The results obtained allow determining optimal solutions, balanced in cost, performance and CO₂ emissions, for three different structural types, depending on the mentioned Pillars Index. The results constitute therefore a useful and practical tool which is an important aid to project designers from the initial stages; it also offers flexibility, allowing the updating of variables to consider. The incorporation of the pillars index as a characterization element allows the research to be perfectly applied to actual professional situations. In this way the designer and promoter can systematize the decisions about the type of slab to select taking into account as variables: structural rigidity, price, and environmental impact.
- **Keywords:** One-way slab, cost, environmental impact, sustainable construction, structural concrete.

RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo de investigación es el desarrollo de una metodología para la toma de decisiones, sobre la tipología estructural óptima aplicable por los diferentes agentes involucrados en los proyectos de edificación residencial, combinando criterios de prestaciones, coste, e impacto ambiental. Esta metodología se basa a su vez en el conocimiento generado en la investigación realizada, a partir de un profundo análisis de información previa obtenida de proyectos reales ejecutados.

El artículo se centra en los forjados unidireccionales; los dos tipos de forjados unidireccionales más empleados en estructuras son los "In situ" y los que incorporan elementos prefabricados.

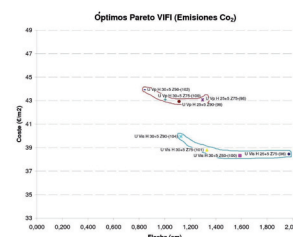
La aplicación de la metodología se realiza sobre un edificio de referencia, incorporando diferentes disposiciones de pilares (índice de pilares) así como las soluciones estructurales más habituales. El modelo desarrollado a partir de los casos estudiados refleja las implementaciones habituales en edificación residencial.

Mediante la aplicación del algoritmo de Pareto a los resultados se simplifica y facilita al máximo la elección, reduciendo las alternativas existentes a sólo las que tienen algún criterio ventajoso frente a todas las demás. Los resultados alcanzados permiten determinar soluciones óptimas, equilibradas en coste, prestaciones y emisiones de CO₂, de tres tipologías estructurales diferentes, dependiendo del mencionado índice de pilares. Los resultados obtenidos constituyen por tanto una herramienta útil y práctica que supone una ayuda importante para el proyectista y el calculista en la fase de anteproyecto, ofreciendo además flexibilidad, ya que permite la actualización de las variables a tener en cuenta. La incorporación del índice de pilares como elemento caracterizador permite que la investigación sea perfectamente aplicada a casos reales profesionales. Con ello se facilita al proyectista y al promotor la sistematización de las decisiones sobre el tipo de forjado a seleccionar teniendo en cuenta las variables de rigidez estructural, precio e impacto ambiental.

Palabras clave: forjados unidireccionales, coste, impacto ambiental, construcción sostenible, hormigón estructural.

1. INTRODUCCIÓN

Estamos ya en el siglo XXI y la edificación residencial dispone de una multitud de tipologías y alternativas estructurales



(estructuras de madera, metálicas, prefabricadas de hormigón, hormigón “in situ”). La existencia de tal cantidad de alternativas se debe a que ninguna destaca de forma clara por prestaciones o ventajas apreciables. En el caso de las estructuras de hormigón “in situ”, se presentan las siguientes alternativas:

- Losas macizas (Armadas, Postesadas)
- Forjados reticulares (Casetón perdido, Casetón recuperable)
- Forjados unidireccionales (Armado, Pretensado, “in situ”).

Actualmente, en la construcción de edificios residenciales, se incluyen como entradas para la decisión sobre la tipología estructural otros factores. De forma resumida enumeramos los más relevantes:

- Resistencia, rigidez y seguridad estructural.
- Funcionalidad (confort acústico, confort térmico, seguridad frente al fuego) y durabilidad que mejoraron la calidad de las estructuras, especialmente las de hormigón armado.
- La cada vez más acuciante situación económica ha propiciado que los diseñadores deban esforzarse en minimizar los costes asociados a los materiales, sin perder de vista también los procesos de fabricación y ejecución.
- Seguridad durante la fase de ejecución.
- La necesidad de reducir el impacto medioambiental ocasionado por las edificaciones durante todo su ciclo de vida. Estas exigencias medioambientales, condicionadas por los aspectos económicos y sociales y energéticos, han dado lugar al concepto actual de sostenibilidad. Importante destacar que los gobiernos en su afán por disminuir y controlar las emisiones de CO₂, están imponiendo nuevas tasas e impuestos. Estos impuestos de momento se centran en grandes emisores y transportes.
- Factor no menos importante que suele afectar y que es muy subjetivo, es el dominio por parte del proyectista del sistema o alternativa estructural con la que trabajar.

Todos estos factores son a veces difíciles de medir y de ponderar para poder tomar una decisión, razón que motiva la aportación del artículo, tratando de proporcionar una metodología para poder seleccionar la alternativa estructural mediante la comparativa entre diferentes soluciones.

1.1. CONCEPTOS NOVEDOSOS EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS

La sostenibilidad se fundamenta en tres aspectos básicos que están relacionados entre sí: medio ambiente, economía y sociedad. La crisis del sector de la construcción y la difícil coyuntura económica conducen a aportar un valor añadido a los productos, buscando que éstos sean competitivos en términos de coste total y que a su vez resulten sostenibles (1).

Con el objetivo de incluir estas nuevas exigencias dentro de los procesos constructivos, el *Código Técnico de la Edificación* (2) ha incorporado directrices para el incremento de la calidad y sostenibilidad de las construcciones, fomentando

la innovación en los procesos constructivos y estableciendo metodologías para el control y mejora de la eficiencia energética. Tratándose este marco normativo, de un documento de mínimos, dejando abierta la posibilidad de que el proyectista aporte soluciones diferentes, siempre que las prestaciones sean iguales o superiores a las prescritas en el documento básico correspondiente.

De forma similar, la Instrucción de Hormigón Estructural (3) recoge en su Anejo XIII un criterio para evaluar la Contribución de las Estructuras a la Sostenibilidad a través de un indicador denominado ICES, obtenido a partir del Índice de Sensibilidad Medioambiental de la estructura (ISMA). Su aplicación en el diseño de edificios supone tener en cuenta aspectos como la eficiencia energética o el impacto ambiental. La aportación que se pretende mostrar es una metodología específica para la edificación residencial mediante hormigón estructural.

La posibilidad de que en breve se contemplen nuevas tasas sobre las emisiones de CO₂ no es descabellada. Países como Australia ya han puesto en vigor desde julio de 2013 tasas de aproximadamente 17 € por tonelada de CO₂ emitida (en principio para las 500 mayores empresas contaminantes). En Europa se está hablando de gravar a los vehículos (aviones, coches, motos) que superen unas determinadas cantidades de emisión de CO₂ por cada kilómetro recorrido. En España se pretende la aprobación del Impuesto de Matriculación conforme al nivel de emisiones. Esta tasa, cuando alcance al sector de la construcción, es de suponer sea proporcional a la cantidad de CO₂ emitida, razón por lo que consideramos relevante incluir esta variable en las decisiones que afectan a la estructura. La medición y declaración de emisiones puede ser obligatoria en el escenario planteado.

El diseño de una estructura tendrá mayor valor a efectos de sostenibilidad cuando:

- Sea capaz de optimizar el consumo de materiales (reduciendo las cantidades de hormigón y acero).
- Cuando se incremente su vida útil, (produciendo una mayor amortización de los impactos desarrollados en la fase de ejecución).
- Se obtengan mejores aportaciones a la seguridad frente al fuego, el confort acústico, el comportamiento térmico, etc. Factores que condicionan los consumos durante la vida útil de la estructura.

1.2. LOS FORJADOS UNIDIRECCIONALES

Desde hace varias décadas, los investigadores han mostrado gran interés en el estudio de los forjados (7-8, 14 a 17) debido a que:

- Los forjados unidireccionales son los más populares en edificios de viviendas, pues están presentes en más del 70% de las construcciones realizadas en España (4). En la base de datos incorporada a este estudio, sobre proyectos reales de edificación residencial, los forjados unidireccionales representan el 93.5% de la superficie construida quedando el 6,5% para los forjados reticulares.
- Tienen una relevante repercusión económica dentro del coste total del edificio.

Dentro de las variantes que se pueden presentar, las configuraciones más habituales tras estudiar los datos de proyectos reales ejecutados entre los años 2005-2012 (18), son:

- Forjados unidireccional de vigueta Pretensada.
- Forjados unidireccional de vigueta Armada.
- Forjados unidireccional de nervio “in situ”.

Desde hace unos años, ante la generalización del sistema de encofrado total frente al tradicional de tableros y sopandas, medida adoptada para incrementar la seguridad de los operarios durante el proceso de ejecución, irrumpieron con fuerza los forjados “*In situ*”. Esta tipología de forjado se estudió de forma aislada variando la definición de las bovedillas empleadas (15-16) sin incorporar a las soluciones estudiadas los costes y consumos debidos a vigas y pilares. Siendo interesantes las conclusiones sobre los parámetros críticos en el diseño de los forjados.

Con la pretensión de que el estudio aporte resultados aplicables en la correcta elección de la alternativa estructural, se establecen unas hipótesis de partida aplicadas con carácter general a todas las soluciones propuestas y que es conveniente destacar:

- Plantaremos soluciones planas (evitar las vigas de cuelgue para poder emplear sistemas de encofrado continuo).
- Incluiremos la repercusión de los elementos principales de la estructura, vigas y pilares.
- Plantaremos una pastilla genérica (18x12) con diferentes disposiciones de pilares.
- Como elementos aligerantes bovedillas de hormigón vibro comprimido.

De esta manera pretendemos acotar el problema a un estudio discreto, pero representativo, de las soluciones que el proyectista debe plantear para el proyecto.

1.3. OPTIMIZACIÓN DE FORJADOS UNIDIRECCIONALES

La combinación de materiales utilizados en su construcción así como la gran variedad de soluciones técnicas posibles ha impulsado el desarrollo de algoritmos que buscan minimizar, fundamentalmente, el coste económico (5).

Estudios previos se fundamentan en los avances del cálculo computacional utilizando técnicas de optimización avanzadas como por ejemplo la cristalización simulada o técnicas evolutivas para la búsqueda de soluciones óptimas en estructuras de hormigón (6).

En relación a los forjados de hormigón, una muestra de ello puede verse en los trabajos de Castilho et al. (7) y de Kaveh (8). El primero utiliza algoritmos genéticos modificados para obtener el diseño más económico en forjados unidireccionales con viguetas pretensadas. El segundo compara diferentes alternativas de forjados empleando algoritmos heurísticos.

Muchos de estos métodos incluyen los aspectos económicos dentro de la optimización, pero la ausencia de variables relacionadas con la sostenibilidad sugiere que las soluciones obtenidas no serán las mejores desde el punto de vista actual ya que son muchos los nuevos aspectos a considerar. En relación a trabajos de optimización encaminados a reducir emisiones de CO₂ en el ámbito estructural, se han realizado recientemente avances, como (9), o más recientemente (10-11). Otro estudio realiza un Análisis de Ciclo de Vida para un mismo edificio y compara

los impactos generados por dos soluciones, un forjado “in situ” frente a un forjado prefabricado mediante placa alveolar (17). Nuestro planteamiento se centra en localizar, para un proyecto, la mejor alternativa estructural dentro de los forjados unidireccionales habituales en edificación residencial.

Para optimizar el coste económico, el objetivo es minimizar el consumo de los diferentes materiales. Las tres alternativas estructurales propuestas combinan la utilización de hormigón y acero en diferentes formas y cantidades, es decir empleamos:

- Hormigón vibro comprimido (bovedillas).
- Hormigón pretensado (viguetas pretensadas).
- Hormigón armado (viguetas armadas, vigas, pilares, hormigón “in situ”).
- Acero (armaduras pasivas, armaduras activas).

No queremos dejar de lado la interacción importante que supone, en el coste y las prestaciones globales de las soluciones, la correcta definición de vigas y pilares. Para abordar el tema de forma discreta plantaremos soluciones de vigas cortas y largas (4,5m y 6m) permutadas con forjados cortos y largos (4m y 6m). Esta decisión a cerca de la disposición de los pilares esta basada en un estudio de elaboración propia sobre una muestra de proyectos reales (2005-2012) y en estudios previos como el realizado por Gómez Hermoso (14).

Nosotros queremos dar un paso más e incluir alguna de las múltiples prestaciones que se le demandan hoy en día a las soluciones estructurales y que quedaron citadas de forma resumida en la introducción.

1.4. OBJETIVOS DEL TRABAJO PRESENTADO

En virtud de lo anteriormente expuesto, se presenta un método de selección de alternativas estructurales a partir de la creación de una base de datos con múltiples diseños. Dicha base de datos posibilita la selección de las mejores soluciones basados en criterios técnicos, económicos y sostenibles.

2. METODOLOGÍA

De los datos del estudio sobre proyectos de estructuras reales se desprende que el 93,51% de las estructuras se resuelven mediante forjados unidireccionales. Partiendo de esta base nos planteamos, como objetivo principal, facilitar al proyectista y al promotor la sistematización de las decisiones sobre el tipo de forjado unidireccional a seleccionar teniendo en cuenta las variables rigidez estructural, emisiones ambientales y el precio.

2.1. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA, MATERIALES Y TIPOLOGÍAS DE CADA SOLUCIÓN

El primer paso seguido en esta metodología es la definición de la geometría y los materiales empleados en las distintas soluciones.

2.1.1. Geometría

La aplicación de la metodología se realiza sobre un edificio de referencia de dimensiones 18mx12m. Para configurar una rigidez media de los pilares, se ha considerado un forjado intermedio de una planta tipo.

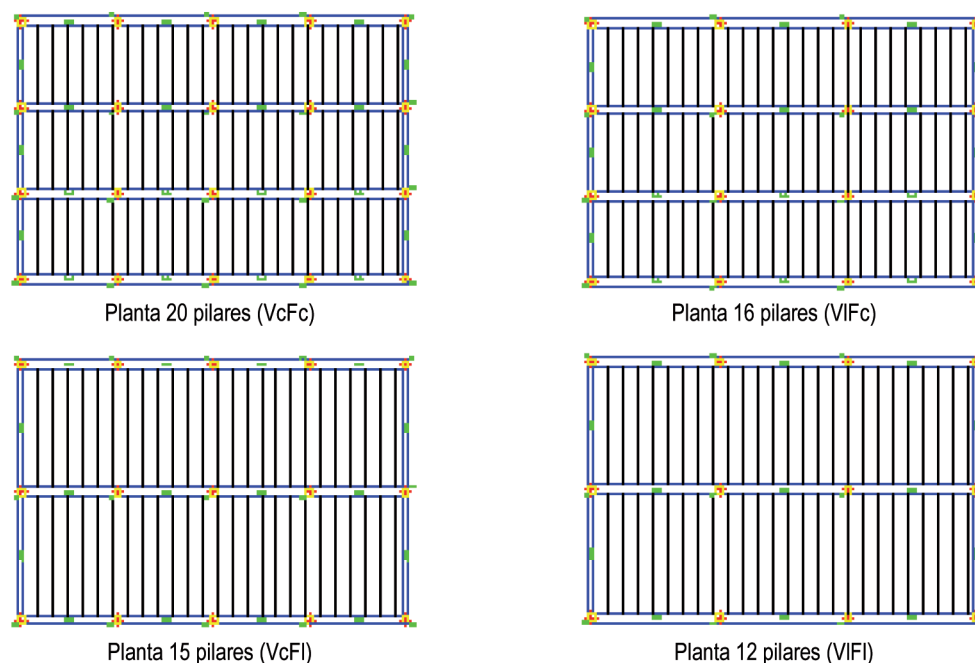


Fig. 1: Representación geometría planta y disposición de pilares

Para el citado edificio, manteniendo la geometría del mismo, se propone la división en dos valores de longitud largo y corto tanto para vigas como forjados, valorando su correspondencia con los casos reales. La división se estableció mediante diferentes disposiciones de pilares:

- Vigas 4.5 y 6 metros (Vc, VI).
- Forjados 4 y 6 metros (Fc, FI).

Por lo tanto para una misma geometría de planta hay distinta cantidad de pilares (Figura 1).

Con esta distribución discreta se consigue una serie en la que el índice de pilares por metro cuadrado (n° pilares/ superficie planta) varía entre 0.0508 y 0.0889 situación que representa de forma fiel la variación de este índice en la base de datos de proyectos reales (Figura 2).

Se presenta a continuación la definición geométrica de los elementos que conforman la planta sometida a estudio:

- Los pilares, sección 30x30 cm, la cuantía empleada variará en función de las solicitaciones en cada caso de estudio.
- Las vigas planas, en la base de datos de proyectos reales, se registran valores desde 30 centímetros hasta 110 centímetros. Tratando de simular este continuo en forma discreta optamos por trabajar con cinco anchos diferentes. Esta variable empieza en un ancho de viga de 30 centímetros y va aumentando 15 centímetros hasta una anchura de 90.
- En lo referente a los forjados unidireccionales:
 - Los cantos de forjado total son 25, 30 y 35 centímetros. Estos cantos están formados por el alto del elemento aligerante de 20, 25 y 30 centímetros con una capa de compresión de 5 centímetros.
 - El interjeje considerado para el forjado es de 70 centímetros.

2.1.2. Materiales

Los materiales utilizados en la configuración de los diferentes elementos son:

- Hormigón HA-25/B/20/I en pilares, vigas, viguetas armadas, nervios “in situ” y capa de compresión.
- Hormigón HP-45/S/12/I en viguetas pretensadas.
- Hormigón HNE-15/S/6 en la elaboración de elementos aligerantes.
- Acero corrugado B500S para armaduras pasivas en pilares, vigas, vigueta armada, nervios “in situ” y negativos de forjado.
- Acero para armadura activa Y-1770 C en las viguetas pretensadas.

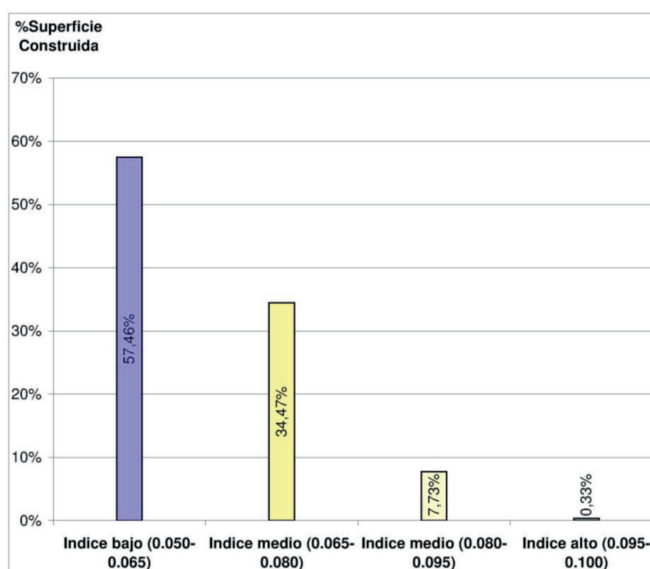


Fig. 2: Índice pilares, obtenido de la Base de proyectos reales (Fuente Qualiberica S.L.)

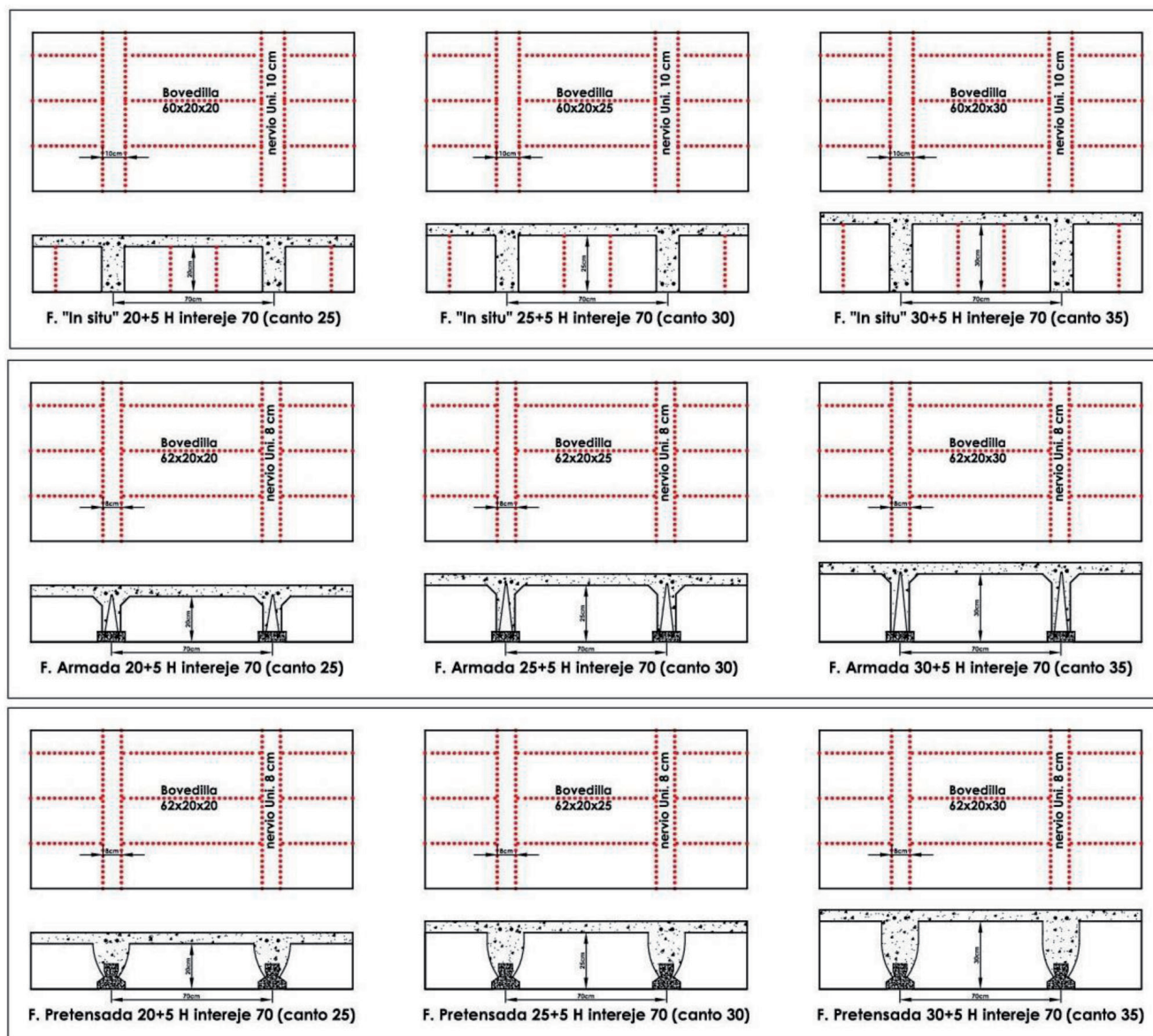


Fig. 3: Tipologías de forjado

2.1.3. Tipologías

El alcance del estudio se centra en las tipologías, que de forma frecuente, se emplean en la edificación residencial:

- Forjado unidireccional vigueta Armada.
- Forjado unidireccional vigueta Pretensada.
- Forjado unidireccional nervio "in situ".

Para todos los casos empleamos elementos aligerantes de hormigón vibro comprimido e intereje 70 cm. Con estos datos de partida estudiamos los casos representativos en edificación que son 25, 30 y 35 centímetros de canto estructural. A continuación presentamos las 9 alternativas de forjado de partida (Figura 3).

2.2. NÚMERO DE SOLUCIONES A ESTUDIAR

La combinación entre las diferentes geometrías y las diferentes tipologías proporciona un universo discreto de estudio que consta de 180 soluciones. Enumeramos a continuación las soluciones estudiadas para cada una de las tipologías de forjado unidireccional (Tabla 1).

Estos 60 casos descritos en la tabla anterior se estudiaron para modelizar cada una de las tres tipologías de forjado unidireccional, que son "In situ", armada y pretensada.

2.3. CÁLCULO Y CLASIFICACIÓN DE LAS SOLUCIONES

Una vez definida la geometría, materiales y tipología el siguiente paso consiste en incluir las cargas contempladas en edificación residencial. En este caso se ha considerado unas cargas superficiales: "sobrecarga de uso" (SCU) de 2 kN/m² y unas "cargas permanentes" (CM) de 2 kN/m². También se han considerado cargas de cerramiento de fachada de valor característico 8 kN/ml.

A continuación, se plantean las hipótesis de cálculo tanto para los "Estados Límite Últimos" (ELU) como para los "Estados Límite de Servicio" (ELS) cumpliendo con la normativa vigente Código Técnico de la Edificación (2).

Definidas las dimensiones, materiales, cargas e hipótesis de cálculo, el siguiente paso consiste en el análisis estructural de las 180 posibles soluciones mediante el programa profesional de cálculo de estructuras de hormigón, CYPECAD (12).

Forjado unidireccional				
Luz de vigas (m)	Luz de forjado (m)	Canto forjado	Ancho de viga (m)	Nº Soluciones
4,5	4	20+5 25+5 30+5	0,30	15
			0,45	
			0,60	
			0,75	
			0,90	
4,5	6	20+5 25+5 30+5	0,30	15
			0,45	
			0,60	
			0,75	
			0,90	
6	4	20+5 25+5 30+5	0,30	15
			0,45	
			0,60	
			0,75	
			0,90	
6	6	20+5 25+5 30+5	0,30	15
			0,45	
			0,60	
			0,75	
			0,90	

Tabla 1: Descripción de los 60 casos en forjado unidireccional

Aquellas soluciones que no cumplan los criterios establecidos en el CTE no serán tomadas en consideración.

En cada caso de estudio se ha calculado la flecha activa en el punto central del cuadrante 1 de la planta (Figura 4), para clasificar y cuantificar las diferentes soluciones. En el análisis de las deformaciones, se ha tenido en cuenta la del conjunto formado por las vigas y el forjado. Este punto de estudio se ha elegido, como representativo, por ser el más desfavorable ya que es tanto para el forjado como en el pórtico el vano extremo.

Para cada solución se incluyen, como variables de salida en nuestra base de datos, los consumos de materiales y el valor de la flecha. Este último dato, permite estimar el grado de bondad de la solución a efectos de rigidez. La rigidez de la estructura, proporciona una menor fisuración de los elementos

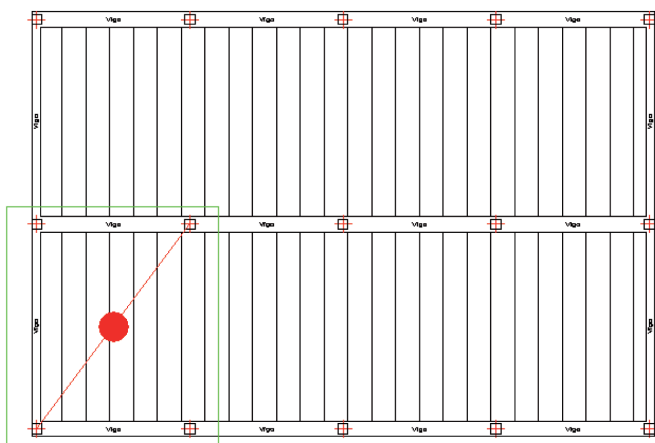


Fig. 4: Punto caracterización flecha activa máxima esperada

resistentes, ofreciendo mejores valores sobre la durabilidad del edificio.

Los valores relativos al coste de los materiales (acero, hormigón, aligerante y elementos prefabricados), así como la colocación de los mismos, se obtienen del banco BEDEC del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC) (13) como costes unitarios. Para cuantificar estos consumos en las diferentes soluciones se procede a obtener los siguientes ratios por metro cuadrado de superficie construida:

- Forjado “In situ” unidireccional se han tenido en cuenta los kg de acero y m³ de hormigón empleados en vigas, pilares y forjado. Además se han contabilizado los bloques aligerantes.
- Forjados unidireccionales con elementos prefabricados, vigueta armada o vigueta pretensada, a los valores anteriormente citados se añade el consumo de metros lineales de vigueta.

Partiendo de los costes unitarios conocidos (BEDEC) y de los ratios de consumos de cada solución (CYPECAD) se define el coste en €/m² de la parte de estructura objeto de estudio (kg Acero/m², m³ Hormigón/m², ml de aligerante/m² y ml de elementos prefabricados/m²).

Excluyendo del concepto tradicional de estructura el coste del encofrado de forjado, supuesto constante una vez determinado el canto. No se excluye el coste del encofrado de los pilares pues es un valor variable dentro de las diferentes soluciones propuestas (m² encofrado pilares/m²). Partiendo de estos datos se define el coste en €/m² mediante la siguiente formula:

$$Coste(€/m^2) = \sum_{i=1}^n M_i \times \gamma_i \quad (1)$$

Donde:

M_i Representan los ratios de materiales empleados por cada metro cuadrado.

γ_i Indican los costes unitarios de los materiales y colocación por cada metro cuadrado.

Para valorar la repercusión ambiental de cada solución, se definen las emisiones de CO₂ relativas a la fabricación, transporte y colocación de los materiales empleados. Estos valores unitarios se obtienen igualmente del banco BEDEC del ITeC (13). La formula se detalla a continuación:

$$Emisiones_CO_2(Kg/m^2) = \sum_{i=1}^n M_i \times \kappa_i \quad (2)$$

Donde:

M_i Representan los ratios de materiales empleados por cada metro cuadrado.

κ_i Indican las emisiones unitarias de CO₂ de los materiales y colocación por cada metro cuadrado.

En la siguiente tabla se presentan los valores de costes y emisiones de CO₂ unitarios. Los valores de esta tabla se obtienen de una base de datos (BEDEC), para hacer más sencillo

el seguimiento y/o posterior modificación de los resultados, hay valores en los que se cambio las unidades de la base original para adaptarlas a los ratios de consumo obtenidos de los cálculos.

Table with 3 columns: Material Mi, γi (€), Ki (kg CO2). Rows include Acero (kg), Hormigón (m³), Bovedilla H20 (ml), Bovedilla H25 (ml), Bovedilla H30 (ml), Vigueta armada hormigón (ml), Vigueta armada acero (kg), Viguetas pretensadas hormigón (ml), Viguetas pretensadas acero (kg), and Encofrado de pilares (m²).

Tabla 2. Coste económico y emisiones CO2 (BEDEC)

2.4. CREACIÓN DE LA BASE DE DATOS

Una vez calculadas todas las soluciones, se genera la base de datos final. Lógicamente, las soluciones que no cumplan los criterios exigidos por la normativa vigente quedan desestimadas.

Cada solución se codifica de la siguiente manera:

V n1 F n2 T M H n3+n4 Z n5

- V seguido de n1 que identifica la longitud de las vigas (c= Viga corta, l = Viga larga).
- F seguido de n2 que identifica la longitud de los forjados (c= Forjado corto, l = Forjado largo).
- T indicamos el tipo de forjado: (U = Unidireccional).
- M la división entre tipología de viguetas (Vis = “In situ”, Va = Vigueta armada, Vp = Vigueta pretensada).
- H la bovedillas de hormigón (en este estudio el valor es constante).
- n3 la altura de las bovedillas en centímetros (20, 25, 30).
- n4 la altura de la capa de compresión (en este estudio el valor es constante).
- Z seguida de n5 que identifica el ancho de las vigas de apoyo del forjado en centímetros (30, 45, 60, 75, 90).

Por ejemplo, la siguiente codificación: VcFl U Va H 25+5 Z75, corresponde a una tipología de estudio de vigas cortas con forjados largos unidireccionales de vigueta armada con bovedillas de hormigón de canto 25 cm, capa de compresión de 5 cm y apoyado sobre vigas de un ancho 75 cm.

3. RESULTADOS

3.1. OBTENCIÓN RESULTADOS

Para la representación del universo de soluciones nos decantamos por tres variables. El coste económico (€/m²) factor clave en las fases de anteproyecto que condiciona la viabilidad

del mismo. La emisión de CO2 (kg/m²) factor representativo de los impactos ambientales generados por cada una de las alternativas propuestas. La flecha activa máxima (cm) de cada solución, este factor es clave para limitar los daños provocados por la estructura a elementos no estructurales.

La representación en tres dimensiones es una nube de puntos, pero dada la dificultad para seleccionar las mejores opciones, proyectamos sobre cada plano las diferentes soluciones. Se representa a continuación las tres gráficas obtenidas (Figuras 5, 6 y 7):

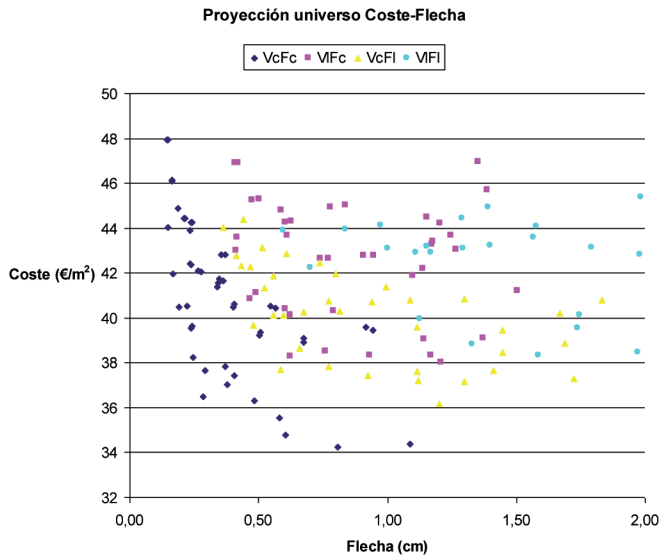


Fig. 5: Proyección nube 3D sobre el plano Coste/Flecha

Los resultados para los diversos índices de pilares se superponen, las mejores opciones se encuentran en la zona próxima al origen. Este tipo de relación entre variables se repite en el siguiente gráfico (Emisión CO2 → Flecha), dada la correlación entre el coste y las emisiones de CO2. Se observa de forma nítida que las mejores opciones se presentan para índices de pilares altos, esta situación no es muy frecuente en los proyectos reales, pues no es compatible con la distribución arquitectónica habitual (garajes, locales, viviendas, etc.).

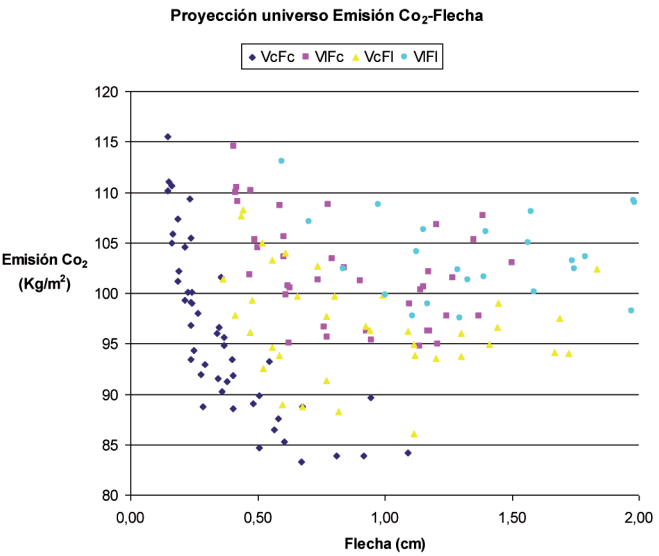


Fig. 6: Proyección nube 3D sobre el plano Emisiones CO2/Flecha

En la proyección de emisiones de CO₂ frente a coste se aprecia una correlación aproximadamente lineal entre estos dos valores.

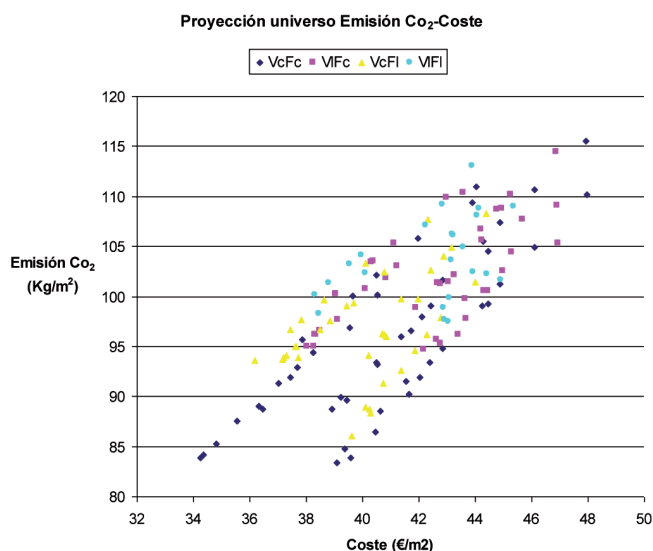


Fig. 7: Proyección nube 3D sobre el plano Emisiones CO₂/Coste

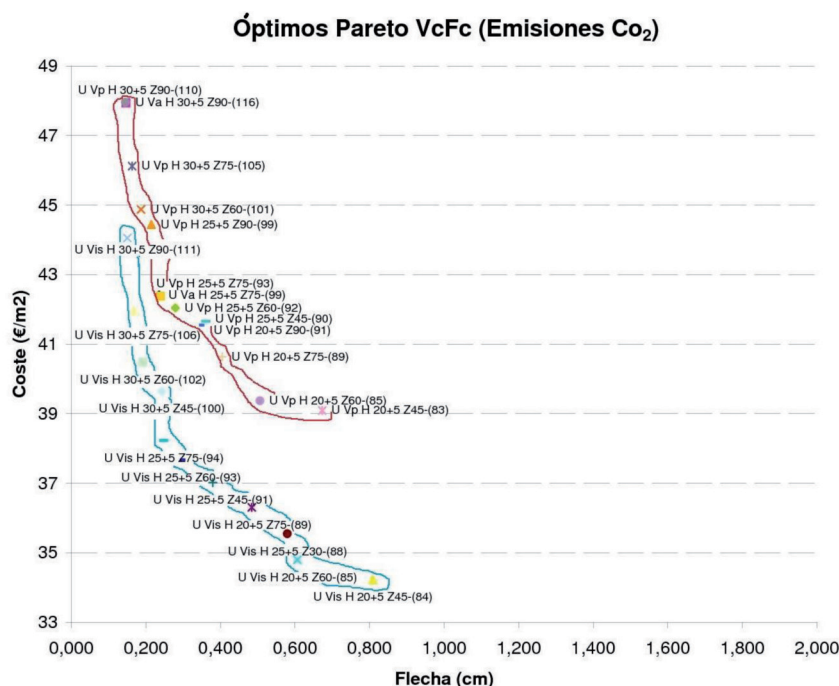
Llegados a este punto fraccionamos las soluciones atendiendo al denominado índice de pilares que en este caso está representado por las denominaciones VcFc, VcFI, VIFc y VIFI.

Todavía no es posible detectar de forma clara las mejores alternativas para cada índice de pilares. Decidimos seleccionar mediante los Óptimos de Pareto las mejores soluciones. Este algoritmo de optimización se aplicó sobre cada una de las tres proyecciones. Los valores así obtenidos se representan de forma gráfica en dos dimensiones (Coste-Flecha) añadiendo la información de las emisiones de CO₂ en formato texto para cada solución óptima. Obteniendo así cuatro gráficos uno para cada índice de pilares en el que se aprecian las diferentes variables consideradas para cada óptimo obtenido. A continuación representamos las gráficas con los resultados (Figuras 8, 9, 10 y 11).

3.2. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

A la vista de los resultados gráficos (2D), los puntos más interesantes son los más próximos al origen, aportando una mayor rigidez a un menor coste. Con la presentación aquí mencionada disponemos de forma adicional del dato de emisiones de CO₂, pudiendo así de forma rápida comparar entre estas alternativas y seleccionar la más adecuada para cada caso.

Los resultados se estudian y presentan para cada rango del índice de pilares. De entre ellos, el diseñador puede seleccionar aquel que mejor se adapte a su proyecto sabiendo que está eligiendo entre las soluciones que cumplen los mejores requerimientos. La decisión final dependerá del valor de rigidez que estime oportuno en relación con el coste del forjado y el valor de emisiones.



U_Unidireccional.

Vis = "In situ", Va = Vigueta armada, Vp = Vigueta pretensada.

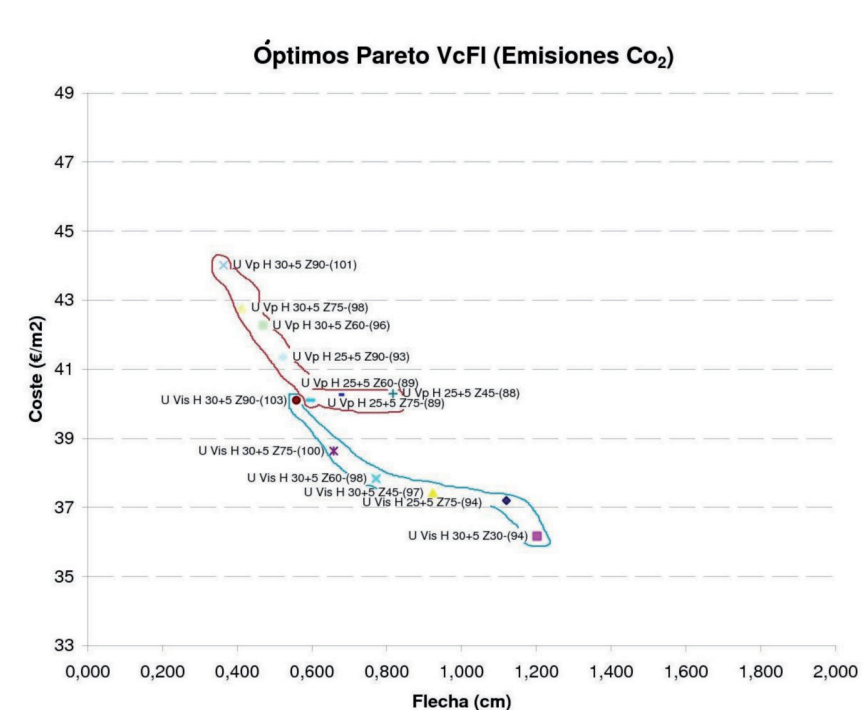
H_bovedillas de hormigón.

Canto del forjado: 20+5, 25+5, 30+5.

Ancho de las vigas de apoyo del forjado en centímetros: 30, 45, 60, 75, 90.

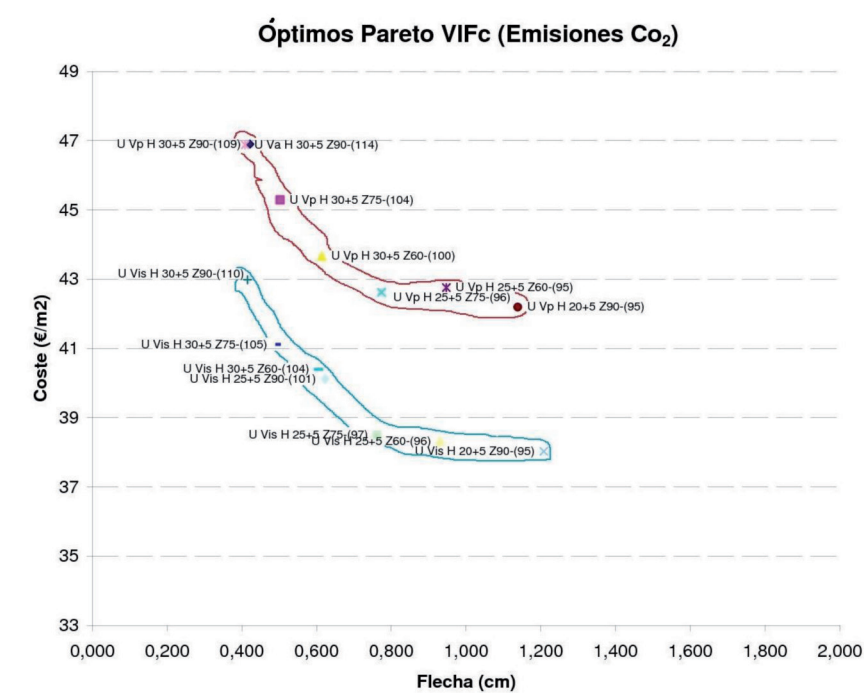
Información de las emisiones de CO₂ en formato texto (Kg/m²).

Fig. 8: Soluciones óptimas índice de pilares por metro cuadrado (VcFc)



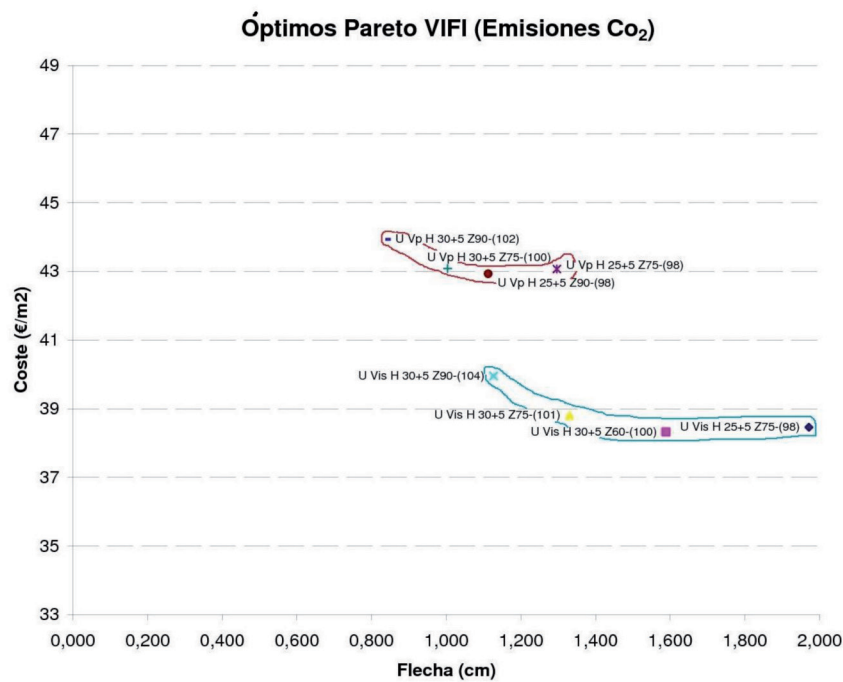
U_Unidireccional.
Vis = "In situ", Va = Vigueta armada, Vp = Vigueta pretensada.
H_bovedillas de hormigón.
Canto del forjado: 20+5, 25+5, 30+5.
Ancho de las vigas de apoyo del forjado en centímetros: 30, 45, 60, 75, 90.
Información de las emisiones de CO₂ en formato texto (Kg/m²).

Fig. 9: Soluciones óptimas índice de pilares por metro cuadrado (VcFI)



U_Unidireccional.
Vis = "In situ", Va = Vigueta armada, Vp = Vigueta pretensada.
H_bovedillas de hormigón.
Canto del forjado: 20+5, 25+5, 30+5.
Ancho de las vigas de apoyo del forjado en centímetros: 30, 45, 60, 75, 90.
Información de las emisiones de CO₂ en formato texto (Kg/m²).

Fig. 10: Soluciones óptimas índice de pilares por metro cuadrado (VIFc)



U_Unidireccional.
Vis = "In situ", Va = Vigüeta armada, Vp = Vigüeta pretensada.
H_bovedillas de hormigón.
Canto del forjado: 20+5, 25+5, 30+5.
Ancho de las vigas de apoyo del forjado en centímetros: 30, 45, 60, 75, 90.
Información de las emisiones de CO₂ en formato texto (Kg/m²).

Fig. 11: Soluciones óptimas índice de pilares por metro cuadrado (VIFI)

En los valores tabulados (Tablas 3, 4, 5 y 6) aparecen referenciados en **negrita** los valores de soluciones que proporcionan óptimos sobre variables de forma individual en cada rango de índice de pilares:

- VcFc (Figura 8): se aprecian dos zonas de resultados quedando claramente diferenciada la alternativa “in situ” frente a la que emplea elementos prefabricados. Los costes oscilan para los casos más económicos entre 34 y 48 €/m². No alcanzándose flechas por encima de

0,80 cm. Por lo que respecta a las emisiones de CO₂ oscilan entre 83 y 116 Kg/m². Este índice de pilares no es habitual (incompatibilidad con la distribución arquitectónica luces muy cortas), pero es importante destacar que se alcanzan los óptimos globales en las tres variables analizadas (coste, emisiones CO₂ y flecha).

- VcFI (Figura 9): en este caso se aprecian dos bandas en el gráfico la correspondiente al forjado unidireccional “In situ” y otra con las opciones del forjado unidireccio-

Denominación		F. Act.	Precio	Emisión CO ₂
		cm	€/ m²	kg / m²
VcFc	U Vis H 20+5 Z45	0,809	34,23	84
VcFc	U Vp H 20+5 Z45	0,673	39,09	83
VcFc	U Vp H 30+5 Z90	0,145	47,95	110

Tabla 3: Soluciones óptimas sobre variables individuales (VcFc)

Denominación		F. Act.	Precio	Emisión CO ₂
		cm	€/ m²	kg / m²
VcFI	U Vis H 30+5 Z30	1,202	36,17	94
VcFI	U Vp H 25+5 Z45	0,817	40,29	88
VcFI	U Vp H 30+5 Z90	0,363	44,01	101

Tabla 4: Soluciones óptimas sobre variables individuales (VcFI)

nal de vigueta pretensada. Ahora los valores de flecha máxima alcanzan valores hasta 1,2 cm, se aprecia la diferencia en esta variable entre la opción pretensada y la “In situ”. Los precios oscilan entre 36 y 44 €/m² y en este caso es la opción “In situ” la que presenta mejores valores frente a la vigueta pretensada. Las emisiones de CO₂ varían entre 86 y 108 Kg/m².

- VIFc (Figura 10): quedan claramente diferenciadas las alternativas del forjado unidireccional “In situ”, resultando costes más elevados en las soluciones que emplean elementos prefabricados pretensados. Los costes oscilan entre 38 y 47 €/m², resultando claramente más económicas las opciones “In situ”. Los valores de flecha no superan el 1,20 cm, arrojando un intervalo de valores similar para ambas opciones, por lo que respecta a las emisiones de CO₂ oscilan entre 95 y 114 Kg/m².

Denominación		F. Act.	Precio	Emisión CO ₂
		cm	€/ m²	kg / m²
VIFc	U Vp H 25+5 Z60	0,947	42,76	95
VIFc	U Vp H 20+5 Z90	1,138	42,19	95
VIFc	U Vis H 20+5 Z90	1,208	38,03	95
VIFc	U Va H 30+5 Z90	0,409	46,88	114

Tabla 5 Soluciones óptimas sobre variables individuales (VIFc)

- VIFI (Figura 11): vuelven a apreciarse dos zonas, la correspondiente al forjado unidireccional “In situ” y otra con las opciones del forjado unidireccional de vigueta pretensada. Lógicamente los valores de flecha máxima alcanzan valores próximos a los límites hasta 2 cm, y en este caso de forjado largo, se desmarca en prestaciones la vigueta pretensada. Los precios se encuentran entre 38 y 44 €/m² y las emisiones de CO₂ oscilan entre 98 y 113 kg/m².

4. CONCLUSIONES

La metodología permite el análisis rápido de las soluciones óptimas en cada escenario futuro donde se produzcan cambios en los precios de los materiales, en los costes de mano de obra o la inclusión de los futuros gravámenes como, por ejemplo, los debidos a las emisiones de CO₂.

En este artículo se ha presentado una metodología que permite la búsqueda de soluciones óptimas, equilibradas en coste,

Denominación		F. Act.	Precio	Emisión CO ₂
		cm	€/ m²	kg / m²
VIFI	U Vis H 25+5 Z75	1,972	38,46	98
VIFI	U Vis H 30+5 Z60	1,589	38,32	100
VIFI	U Vp H 25+5 Z75	1,296	43,07	98
VIFI	U Vp H 25+5 Z90	1,113	42,93	98
VIFI	U Vp H 30+5 Z90	0,839	43,93	102

Tabla 6: Soluciones óptimas sobre variables individuales (VIFI)

prestaciones y emisiones de CO₂, de tres tipologías estructurales y contemplando la repercusión del denominado índice de pilares.

Respecto a los óptimos sobre las variables individuales. La reducción del valor de la flecha activa supone un incremento en el precio y en las emisiones de CO₂. Las oscilaciones de las emisiones de CO₂ son menores que en las otras dos variables, presentando oscilaciones menores a medida que aumenta el índice de pilares.

La utilización de estos gráficos presenta múltiples ventajas al diseñador pues:

- Se presentan las mejores soluciones para cada índice de pilares (variable esta que tendrá una relación directa con su caso particular) de modo que resulta fácil realizar comparaciones en cuanto a coste, prestaciones en rigidez y flecha de cuatro índices de pilares frecuentes en edificación residencial.
- Se reduce el tiempo de diseño ya que se evita en gran medida el largo proceso de prueba y error. Permite acometer el cálculo sobre una tipología ya comparada con otras alternativas.
- El empleo de materiales con mejores prestaciones (caso tipología vigueta pretensada), redunda en consumo de menor cantidad de material y por lo tanto menores emisiones de CO₂. Si bien es cierto que se incrementan los costes económicos de las soluciones propuestas.
- Es importante destacar que con esta metodología somos capaces de valorar las prestaciones, las emisiones y el aspecto económico de forma conjunta y objetiva.
- La matriz de costes y emisiones se puede actualizar en función de los avances tecnológicos que se presenten en el futuro.

- Finalmente, esta metodología se puede ampliar con el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de las diferentes soluciones óptimas, amén de cuantificar otros parámetros que midan otras prestaciones del forjado como comportamiento acústico, comportamiento térmico, resistencia al fuego, etc. Sería factible proyectar por pares las prestaciones y plantear el algoritmo de optimización para detectar los puntos más interesantes.

Como conclusión final podemos destacar que es necesario disponer de herramientas específicas para la valoración de las estructuras en función de sus parámetros característicos. Tratar de obtener una herramienta muy general nos llevará a resultados más groseros. Es evidente que cada tipología estructural presenta factores dominantes diferentes, razón que motiva la implementación de esta herramienta específica para las tipologías frecuentes en edificación residencial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pons O, de La Fuente A. "Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns". *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 49 p.882-893. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.009>).
- [2] Real Decreto 314/2006 de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. (CTE).
- [3] Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08).
- [4] Gómez-Hermoso J. "Análisis técnico económico de la influencia que presenta el empleo de diferentes materiales y tipologías estructurales en el proyecto de estructuras de edificios". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, España, 1998.
- [5] Payá-Zaforteza I, Yepes-Piqueras V, Clemente JJ, González-Vidosa F. "Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado". *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 2006. Vol. 22-3 p.241-259.
- [6] Payá-Zaforteza I, Yepes-Piqueras V, González-Vidosa F, Hospitaler A. "Multiobjective Optimization of Concrete Building Frames by Simulated Annealing". *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2008. Vol. 23-8 p.575-589 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00561.x>).
- [7] Castilho VC; El Debs MK, Nicoletti MC. "Using a modified genetic algorithm to minimize the production costs for slabs of precast prestressed concrete joists". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2007. Vol. 20-4 p.519-530 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2006.09.003>).
- [8] Kaveh A, Behnam AF. "Cost optimization of a composite floor system, one-way waffle slab, and concrete slab formwork using a charged system search algorithm". *Scientia Iranica*. 2012. Vol. 19 p.410-416 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scient.2012.04.001>).
- [9] Payá-Zaforteza I, Yepes-Piqueras V, Hospitaler A, González-Vidosa F. "CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing". *Engineering Structures*. 2009. Vol. 31-7 p.1501-1508 (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.034>).
- [10] Gomez-Lopez D, de la Cruz-Lopez MP, del Cano-Gochi A, Arroyo-Cunha I. "Computer tool for assessing sustainability of concrete structures according to the Spanish EHE-08 code". *DYNA*. 2012. Vol.87 n.2 p.180-189 (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/4391>).
- [11] Mel-Fraga J, del Cano-Gochi A, de la Cruz-Lopez MP. "Analysis of energy consumption and CO₂ emissions in the construction of concrete structures in Spain". *DYNA*. 2013. Vol. 88 n.1 p.59-67 (DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5078>).
- [12] CYPE Ingenieros S.A.: CYPE Ingenieros Software para Arquitectura, Ingeniería y Construcción. Alicante, 2014.
- [13] Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña: Banco Estructurado de Datos de Elementos Constructivos BEDEC. Barcelona, 2014.
- [14] Gómez Hermoso, J. y Fernández Gómez, J. "Influencia del tipo de hormigón y de acero, y de las características geométricas de la estructura, en los costes de materiales y en la superficie ocupada por los pilares en estructuras de edificios de hormigón armado con forjado unidireccional". *Informes de la Construcción*. 1999. Vol.51-464 p.5-22.
- [15] Fernandez-Ceniceros J, Fernandez-Martinez R, Fraile-Garcia E, Martinez-de-Pison FJ. "Decision support model for one-way floor slab design: A sustainable approach". *Automation in Construction*. 2013. Vol. 35 p.460-470. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2013.06.002>).
- [16] Fraile-García E, Fernández-Ceniceros J, Martínez-de Pisón E, Martínez-de Pisón FJ. "Selection of one-way floor slabs based on technical, economic and sustainability criteria". *Informes de la Construcción*. 2013. Vol. 65-530 p.183-194. (DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.11.126>).
- [17] López-Mesa B, Pitarch A, Tomás A, Gallego T. "Comparison of environmental impacts of building structures with in situ cast floors and with precast concrete floors". *Building and Environment*. 2009. Vol. 44 p.699-712. (DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.017>).
- [18] Ferreiro-Cabello J. "Metodología de optimización para soluciones estructurales en edificación residencial". Tesis doctoral. Universidad de La Rioja, España 2013.