

ANÁLISIS MULTICRITERIO DE FORJADOS UNIDIRECCIONALES

Esteban Fraile García

Fernando Antoñanzas-Torres

Rubén Escribano-García

Eduardo Martínez-de-Pisón

Francisco Javier Martínez-de-Pisón

Grupo EDMANS (<http://www.mineriadatos.com>)

Universidad de La Rioja. España

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología multicriterio, aplicada a forjados unidireccionales, que permite la obtención de las mejores soluciones reales y de aplicación inmediata a los edificios. La principal novedad es que se tienen en cuenta a la vez multitud de variables relativas a la sostenibilidad, seguridad y viabilidad estructural, obteniéndose una definición más precisa del problema y, por lo tanto, unas soluciones realmente óptimas; considerando que los datos utilizados se han obtenido de bases reales creadas a partir de un sinnúmero de obras. El modelo presentado permite al técnico cualificado tomar decisiones precisas para la selección de las mejores soluciones en función de las prestaciones que desee teniendo en cuenta: los precios de los materiales, costes energéticos y de emisiones de CO². La metodología se ha validado con el diseño de forjados unidireccionales aunque puede ser aplicada a cualquier tipología estructural.

Palabras clave: *forjado unidireccional; rigidez; costes; sostenibilidad; optimización*

Abstract

This work presents a multicriteria methodology for in situ one-way slabs that allows obtaining real optimal solutions that can be implemented in slabs design immediately. Thus, the principal innovation is that for each individual case the objective function minimizes the group of multiple variables in order to reach the most optimal solution from a comprehensive and realistic point of view. The methodology presented herein enables a qualified engineer to make specific decisions and choose the best design solution in accordance with desired performance and keeping in mind: the price of materials, energy costs and CO² emissions, and the building's expected performance. The desired design variables include: typology of the structure, structural materials utilized, the stiffness of these materials, the strength performance of these structural elements in both plan and in elevation, dimensions of the sections of the elements, designing how to join these elements, and criteria for the building's functional capacities. This methodology, which was verified for the case of in situ one-way slabs, can be extended to any building typology.

Keywords: *one-way slabs; stiffness; costs; sustainability; optimization*

1. Introducción

1.1 Exigencias actuales en el diseño de estructuras

Tradicionalmente, los requerimientos exigidos en el diseño de estructuras se han centrado en criterios de resistencia, rigidez y seguridad estructural. Pero a finales del siglo XX se incluyeron nuevos aspectos como la funcionalidad y durabilidad que mejoraron la calidad de las estructuras, especialmente las de hormigón armado.

En la actualidad, la cada vez más acuciante situación económica ha propiciado que los diseñadores deban esforzarse en minimizar los costes asociados a los materiales y a los procesos de fabricación y ejecución (Adeli, 2006). Sin olvidar estos aspectos, en las últimas décadas se ha puesto de manifiesto la necesidad de reducir el impacto medioambiental ocasionado por las edificaciones durante todo su ciclo de vida (Álvarez-Ude, 2003). Estas exigencias medioambientales, condicionadas por los aspectos económicos y energéticos, han dado lugar al concepto actual de sostenibilidad.

1.2 Los forjados unidireccionales

Desde hace varias décadas, muchos investigadores han mostrado gran interés en el estudio de los forjados unidireccionales (Figura 1) debido a que (Friel, 1974; Brown, 1975; Naaman, 1976):

- 1) Son los más populares en edificios de viviendas pues están presentes en el 70% de las construcciones realizadas en España (Payá et al., 2006).
- 2) Tienen una relevante repercusión económica dentro del coste total de la estructura.

Dentro de los forjados unidireccionales destacan tres tipos: los forjados prefabricados de viguetas pretensadas, los de semiviguetas armadas y los de nervios hormigonados "in situ".

Desde hace unos años, la utilización de estos últimos se ha visto incrementada por 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. Esta variante proporciona una mayor flexibilidad al proyectista en cuestiones de diseño pues le ofrece la posibilidad de modificar las variables del forjado con objeto de buscar la solución que mejor se adapte a sus necesidades y sin tener que ceñirse a las dimensiones establecidas en la "Autorización de Uso" de un determinado fabricante.

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 (Brown, 1975; Payá et al., 2008; Chakrabarty, 1992; Senouci & Al-Ansari, 2009; Leps, 2005).

Estudios recientes se fundamentan en los avances del cálculo computacional utilizando técnicas evolutivas para la búsqueda de soluciones óptimas. Muestra de ello puede verse en el trabajo de Castilho et al. (2007), que utilizan algoritmos genéticos modificados para obtener el diseño más económico en forjados unidireccionales con viguetas pretensadas. La función objetivo (coste económico) amplía sus límites respecto a trabajos anteriores incluyendo materias primas, costes de fabricación, costes de transporte hasta la obra y costes de ejecución.

Figura 1: Forjado unidireccional



A pesar de que en muchos de estos métodos se incluyen aspectos económicos dentro de la optimización, la ausencia de variables relacionadas con la sostenibilidad sugiere que las soluciones obtenidas no serán las mejores desde el punto de vista actual pues, como se ha mencionado anteriormente, son muchos los nuevos aspectos a considerar.

En relación a trabajos de optimización encaminados a reducir emisiones de CO² en el ámbito estructural, no existen muchas publicaciones al respecto, aunque cabe mencionar el artículo desarrollado por Payá et al. (2009) en el que se minimizan las emisiones de CO² en la construcción de pórticos de edificación mediante la técnica de la cristalización simulada. Recientemente, autores como Macías y García-Navarro (2010), presentan una metodología que permite evaluar la sostenibilidad de los edificios y que puede servir, en el futuro, para la toma de decisiones sostenibles dentro del diseño de edificaciones.

1.4 Objetivos del trabajo presentado

En virtud de lo anteriormente expuesto, se presenta un método de selección de forjados unidireccionales a partir de la creación de una base de datos con múltiples diseños (Fraile, 2012). Dicha base de datos posibilita la selección de las mejores soluciones a través de ratios característicos basados en criterios técnicos, económicos y sostenibles.

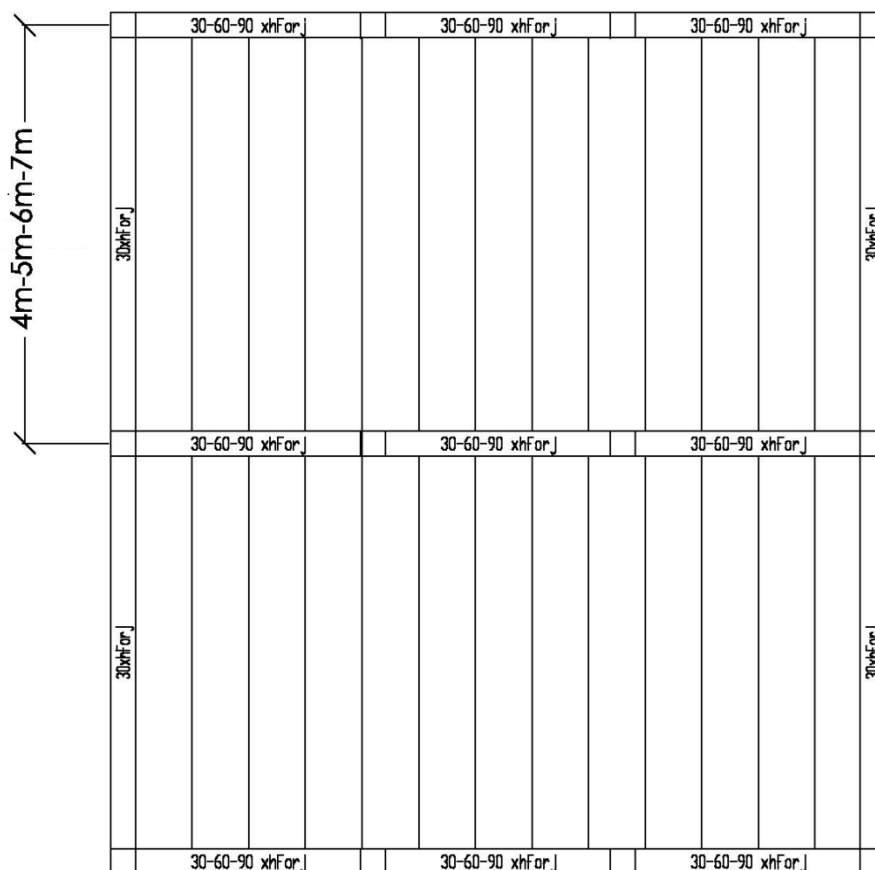
Con la finalidad de aplicar este método a un caso específico que muestre sus posibilidades, el objetivo de este trabajo se ha particularizado al estudio de forjados unidireccionales con nervio hormigonado "in situ".

2. Metodología

2.1 Definición de la geometría y materiales de cada solución

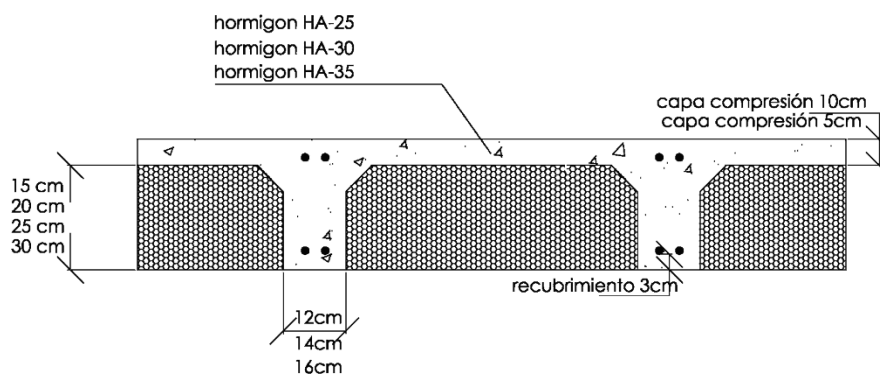
El primer paso para poder crear la base de datos consiste en definir la geometría y los materiales a emplear de cada una de las propuestas. Las variables que definen el diseño de cada solución corresponden a la geometría de la planta (Figura 2).

Figura 2: Geometrías de las plantas



La sección del forjado y los materiales usados en el mismo se muestran en la Figura 3.

Figura 3: Secciones de forjados a estudio



y se detallan a continuación:

- **Luz del vano:** está limitada por la tipología del forjado. En este caso se han considerado longitudes habituales de 4, 5, 6 y 7 metros.
- **Dimensión de las vigas en las que apoya el forjado:** para la dimensión de las vigas se han elegido tres valores puntuales representativos de 30, 60 y 90 centímetros de ancho, siempre considerando el uso de vigas planas. En los resultados aparecen respectivamente referenciadas como “rigidez 1”, “rigidez 2” y “rigidez 3”, pues mayor sección proporciona mayor rigidez en el apoyo.
- **Intereje y canto total del forjado:** el intereje corresponde a la suma del ancho de la bovedilla más el ancho del nervio, aunque este solamente varía con el ancho de nervio pues la bovedilla tiene anchura constante. Para el estudio se han elegido anchos de nervio de 12, 14 y 16 centímetros, que han dado como resultado interejes de 68, 70 y 72 centímetros, respectivamente.
- **Canto total del forjado:** el canto total del forjado corresponde a la suma del canto de la bovedilla y la capa de compresión. Se han estudiado cantos de 20, 25, 30, 35 y 40 centímetros empleando, para ello, bovedillas de 15, 20, 25 y 30 centímetros de altura con capas de compresión de 5 y 10 centímetros.
- **Materiales empleados:** los materiales utilizados en las bovedillas han sido Hormigón, Hormigón ligero y Poliestireno expandido; se han empleado tres resistencias características para el hormigón (25, 30 y 35 N/mm²), así como acero B 500 S en todos los casos.
- **Recubrimiento que varía en dos valores 30 mm y 40 mm:** Siendo el más frecuente 30 mm que es el representado en los resultados.

2.2 Número de soluciones a estudiar

La buena práctica constructiva sugiere el uso de vigas planas debido fundamentalmente a razones económicas.

La combinación de las luces de vano y anchos de las vigas de apoyo ha proporcionado los 12 casos generales que se muestran en la Tabla 1, agrupados según el ancho de las vigas.

Tabla 1: Descripción de los 12 casos simplificados para estudio

Luz de cálculo (m)	Vigas 0,30 m	Porcentaje forjado	Vigas 0,60 m	Porcentaje forjado	Vigas 0,90 m	Porcentaje forjado
	Long vigueta		Long vigueta		Long vigueta	
4	3,70	83,40%	3,40	73,97%	3,10	65,17%
5	4,70	85,37%	4,40	77,66%	4,10	70,38%
6	5,70	86,70%	5,40	80,18%	5,10	73,97%
7	6,70	87,66%	5,90	82,02%	5,60	76,60%

Combinando con las variables correspondientes a la sección del forjado se obtienen las diferentes alternativas estudiadas, que organizamos por categorías de Luz y Canto para poder establecer las posteriores comparaciones de resultados (Tabla 2).

Tabla 2: Alternativas estudio clasificadas en categorías

Luz	Canto					Σ
	20 cm	25 cm	30 cm	35 cm	40 cm	
4m	162	324	324	324	162	1.296
5m	162	324	324	324	162	1.296
6m	162	324	324	324	162	1.296
7m	162	324	324	324	162	1.296
				Total Alternativas		5.184

Cada alternativa se codifica de la siguiente manera; por ejemplo, en el código:

A15+5 72 HA-35 r30 Z90

- La primera letra identifica el material de de las bovedillas (A = Hormigón ligero, H = Hormigón, P = Poliestireno expandido).
- La primera cifra es la altura de la bovedilla en cm (15, 20, 25, 30).
- La segunda cifra es la altura de la capa de compresión en cm (5, 10).
- La tercera es el Intereje en cm que viene marcado por el ancho de nervio (68 con nervio de 12 cm, 70 con nervio de 14 cm, 72 con nervio de 16 cm).
- Las letra HA seguidas de un número identifican las prestaciones del hormigón empleado (HA 25, HA 30, HA 35).
- La letra r seguida de un número identifica el recubrimiento en mm de las armaduras empleadas.
- La letra Z seguida de un número identifica el ancho de las vigas de apoyo del forjado en cm (Z30, Z60, Z90).

2.3 Generación de la base de datos

El siguiente paso consiste en incluir las cargas contempladas en edificación. En este caso se ha considerado una “sobrecarga de uso” (SCU) de 2,0 kN/m² y unas “cargas permanentes” (CM) de 2,5 kN/m².

Después, se plantean las hipótesis de cálculo tanto para los “Estados Límite Últimos” (ELU) como para los “Estados Límite de Servicio” (ELS).

Una vez definidas las dimensiones, materiales, cargas e hipótesis de cálculo, el siguiente paso consiste en calcular las 5.184 alternativas mediante el programa profesional de cálculo de estructuras de hormigón, CYPECAD.

Para cada solución se incluyen, como variables de salida de la base de datos, los consumos de materiales y resultados de los ELU y ELS.

Los valores relativos al coste de los materiales (acero, hormigón y elementos aligerantes), así como la colocación de los mismos, se obtienen del banco BEDEC del Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC) (ITEC-BEDEC, 2010).

Partiendo de los costes unitarios conocidos y de los ratios de consumos de cada solución, (kg Acero/m², Litros Hormigón/m² y ml de aligerante/m²) se define el coste en €/m² del forjado objeto de estudio:

- Costes no incluidos en la valoración:
 - Mano de obra y materiales de encofrado y desencofrado
 - Material y colocación mallazo de reparto
 - Cuantías de acero en vigas
 - Cuantías de hormigón y acero en pilares
- Costes incluidos en la valoración
 - Material y colocación elementos aligerantes
 - Material y colocación acero (+,- cortante)
 - Material y colocación hormigón
 - Emisiones CO²

Para valorar la repercusión ambiental de cada solución, se definen dos nuevas variables: el coste energético y las emisiones de CO₂ relativas a la fabricación, transporte y colocación de los tres materiales empleados: acero, hormigón y aligerantes. Estos valores se obtienen igualmente del banco BEDEC del ITeC.

Los costes energéticos se consideran incluidos y valorados en el coste del material. La repercusión de las emisiones de CO₂ generadas por cada una de las soluciones se establece en 20 € por tonelada de CO₂ emitida (SENDECO, 2011), aportando un valor que sumado a su precio de coste nos proporciona el denominado eco-precio:

$$\text{Eco-precio} = \text{Coste material €/m}^2 + \text{Coste de CO}_2 \text{ emitido €/m}^2 \quad (1)$$

Finalmente, y con objeto de poder valorar la idoneidad técnica y económica de las diferentes alternativas, se incluyen los indicadores que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Indicadores valoración alternativas

Prestación Forjado	Indicador	Aspectos abarcados	Fuentes
Precio	€/m ²	Producción material transporte a obra y construcción.	Base datos BEDEC + consumos alternativa
Emisión CO ₂	kg. CO ₂ /m ²	Consumo de CO ₂ alternativa solución.	Base datos BEDEC + consumos alternativa
Rigidez	cm Flecha estimada	Comportamiento estructural que aporta la solución	Cálculos realizados CYPE
Acústica	Db aislamiento acústico.	Comportamiento solución frente a Ruido aéreo y Ruido de impacto	Estimaciones Normativa específica
Térmica	w/m ² K transmitancia térmica U	Comportamiento solución frente a pérdidas de calefacción y refrigeración	THERM 6.2.
Resistencia Fuego	Minutos RF	Comportamiento solución frente la situación de incendio	CTE

2.4 Estudio de las mejores soluciones

El estudio de las mejores soluciones se realiza configurando una función valor, pero estos indicadores tan heterogéneos no resultaban operativos. Se decidió emplear únicamente 4 parámetros significativos (Rigidez, Acústica, Térmica, Resistencia al Fuego) y lo que se hizo, para reflejar e introducir el coste económico y ambiental de cada solución, fué prorratear con el *Eco-precio* cada uno de los parámetros.

Para poder sumar los valores, cada parámetro se normalizó entre 0 (solución menos apropiada) y 1 (solución más idónea) dentro de cada categoría Luz-Canto de la Tabla 2. El propósito final, es poder valorar el coste y las prestaciones de diferentes soluciones de forjado combinadas con diferentes alternativas de diseño. La función valor se define como:

$$\text{Función valor} = w_1 \cdot \text{Rigidez}N + w_2 \cdot \text{Acústica}N + w_3 \cdot \text{Térmica}N + w_4 \cdot \text{Resistencia_Fuego}N \quad (2)$$

donde los factores w_i los debe definir el usuario conociendo las demandas que solicita del forjado además de una serie importante de factores subjetivos que gobiernan la decisión definitiva (Tabla 4).

Tabla 4: Indicadores empleados en la confección de CASOS MULTI CRITERIO

Prestaciones Forjado	Codificación caso practico	w_i			
		Rigid ez	Acústica	Térmica	Resistencia Fuego
CASO 1	R(0,25)-A(0,25)-T(0,25)-RF(0,25)	0,25	0,25	0,25	0,25
CASO 2	R(0,40)-A(0,40)-T(0,00)-RF(0,20)	0,40	0,40	0,00	0,20
CASO 3	R(0,20)-A(0,20)-T(0,40)-RF(0,20)	0,20	0,20	0,40	0,20

- **Caso 1:** representa la situación de reparto de pesos igual sobre cada una de las prestaciones demandadas.
- **Caso 2:** representa el caso de los forjados no pertenecientes a la envolvente del edificio, a los que no le pide la normativa ninguna prestación térmica.
- **Caso 3:** representa el caso de los forjados pertenecientes a la envolvente del edificio, a los que la normativa demanda prestación térmica.

3. Resultados

Una vez clasificados y ordenados convenientemente los resultados obtenidos a partir de los valores de la función valor y del coste, de cada caso representaremos para cada luz (4, 5, 6 y 7) y canto (20, 25, 30 y 35) la función valor frente al precio. Para localizar las alternativas mas eficientes, buscamos puntos con precios por debajo del valor medio de coste y resultado de la función valor (0-1) por encima de 0,5.

El uso de la base de datos permite identificar las soluciones más interesantes de entre todas las posibilidades contempladas. En este caso, a modo de ejemplo, se muestran los resultados para forjado con luz de 5 metros, y canto de 30 centímetros; que es frecuente en edificación, y lo haremos solo para el caso 1.

Se representa en un gráfico la función valor normalizada entre 0 y 1, frente al coste por metro cuadrado de cada una de las soluciones. Además, se establece una línea horizontal que representa el precio medio de las 10 mejores soluciones obtenidas para ese canto.

3.1 Resultados para los forjados de 5 metros de Luz-Canto 30

Las mejores soluciones para los tres materiales de bovedillas se sitúan en el cuadrante inferior derecho, donde existen altos ratios de rigidez y bajos costes por metro cuadrado. De entre ellas, el diseñador puede seleccionar aquella que mejor se adapte a su proyecto, teniendo la completa seguridad de que está eligiendo entre las soluciones que cumplen los mejores requerimientos técnicos, económicos y sostenibles.

En la Tabla 5 y Figura 4, se muestran los resultados de las mejores alternativas separadas por tipo de material. Las soluciones han sido indicando las mejoras porcentuales sobre el valor de la función valor y bajo el precio medio.

Luz 5 metros canto 30 centímetros, las prestaciones de la opción *Arlita* y Hormigón superan al *Porexpan* pero éste resulta más económico. La opción más económica resulta (P25+5 68 HA-25 r30 Z60) 22,15 €/m² un 13% por debajo del precio medio con un 5% por encima de la función valor. Reseñar que la opción (H25+5 72 HA-25 r30 Z30) 22,27 €/m² es un 13% por debajo del precio medio con un 17% por encima de la función valor.

Figura 4: Función valor frente a coste

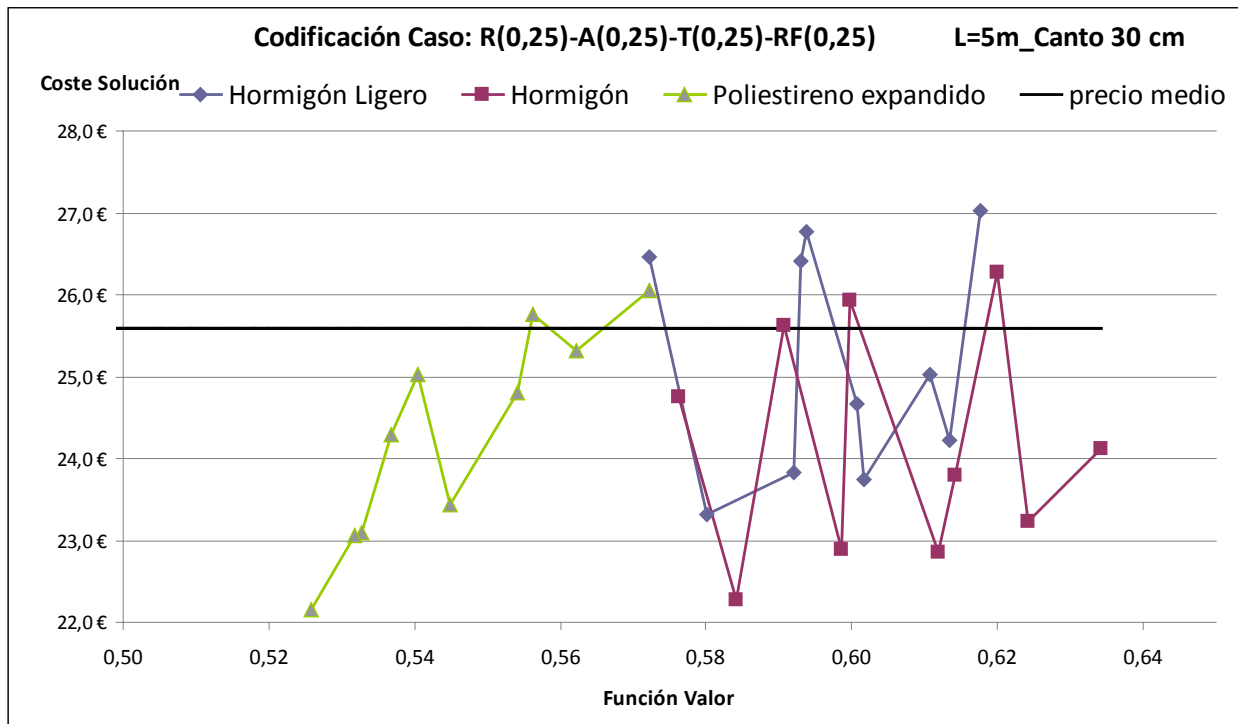


Tabla 5: Los 10 mejores resultados de cada aligerante luz 5 m canto 30

Caso R (0,25)-A (0,25)-T (0,25)-RF (0,25).				
PRECIO MEDIO = 25,59 €/m ²				
Denominación.	F. VALOR	Δ% sobre 0,5	€/m ²	Δ% bajo € medio
A20+10 72 HA-25 r30 Z90	0,6176	24%	27,03	-6%
A25+5 72 HA-25 r30 Z60	0,6133	23%	24,22	5%
A25+5 72 HA-25 r30 Z90	0,6106	22%	25,02	2%
A25+5 68 HA-25 r30 Z90	0,6017	20%	23,75	7%
A25+5 70 HA-25 r30 Z90	0,6008	20%	24,66	4%
A20+10 70 HA-25 r30 Z90	0,5937	19%	26,77	-5%
A20+10 72 HA-25 r30 Z60	0,5930	19%	26,41	-3%
A25+5 70 HA-25 r30 Z60	0,5920	18%	23,82	7%
A25+5 72 HA-25 r30 Z30	0,5802	16%	23,32	9%
A20+10 68 HA-25 r30 Z90	0,5721	14%	26,46	-3%
H25+5 72 HA-25 r30 Z90	0,6342	27%	24,12	6%
H25+5 72 HA-25 r30 Z60	0,6242	25%	23,22	9%
H20+10 72 HA-25 r30 Z90	0,6199	24%	26,27	-3%
H25+5 70 HA-25 r30 Z90	0,6141	23%	23,80	7%
H25+5 68 HA-25 r30 Z90	0,6119	22%	22,85	11%
H20+10 70 HA-25 r30 Z90	0,5998	20%	25,93	-1%
H25+5 70 HA-25 r30 Z60	0,5985	20%	22,89	11%
H20+10 72 HA-25 r30 Z60	0,5907	18%	25,62	0%
H25+5 72 HA-25 r30 Z30	0,5841	17%	22,27	13%
H25+5 72 HA-30 r30 Z60	0,5763	15%	24,76	3%
P20+10 72 HA-25 r30 Z90	0,5723	14%	26,05	-2%
P20+10 72 HA-25 r30 Z60	0,5623	12%	25,32	1%
P20+10 70 HA-25 r30 Z90	0,5563	11%	25,76	-1%
P20+10 68 HA-25 r30 Z90	0,5542	11%	24,80	3%
P25+5 72 HA-25 r30 Z60	0,5448	9%	23,44	8%
P20+10 70 HA-25 r30 Z60	0,5404	8%	25,02	2%
P25+5 72 HA-25 r30 Z90	0,5369	7%	24,30	5%
P25+5 70 HA-25 r30 Z60	0,5328	7%	23,10	10%
P25+5 68 HA-25 r30 Z90	0,5317	6%	23,06	10%
P25+5 68 HA-25 r30 Z60	0,5258	5%	22,15	13%

3.2 Discusión de los resultados

Después de realizar el análisis correspondiente a las soluciones obtenidas para diversos tipos de forjados se extrajeron las siguientes conclusiones:

- A nivel resistente, el empleo de una capa de compresión de 10 cm no resulta competitivo. El incremento en coste por metro cuadrado y en peso propio del forjado hace que sea operativo en prestaciones, pero se obtienen precios superiores a los medios.
- Las magnitudes de los apoyos en el orden de 60-90 (rigidez 2 y 3) compensan con el incremento de rigidez si el forjado está muy solicitado, aportando soluciones con prestaciones respetables a precios razonables.

- La posibilidad de emplear hormigones de mayores prestaciones no debe descartarse si el canto es bajo y la luz elevada. Es previsible que en los próximos años se generalice el empleo de hormigones autocompactantes con mayores prestaciones resistentes por sus dosificaciones particulares.

4. Conclusiones

En este artículo, se ha presentado un método que permite obtener soluciones óptimas en el diseño estructural de forjados unidireccionales con nervio hormigonado "in situ". Éste parte de los parámetros económicos y costes energéticos de los materiales, de los umbrales que definan las propiedades de los mismos y de los pesos definidos por el usuario en la función valor final.

El modelo generado permite incorporar y combinar en el diseño diversos tipo de aspectos: técnicos, normativos, económicos, medioambientales, de buena práctica constructiva, etc.; incluso propios de fases posteriores como la ejecución y con mayor número de variables de las que se usan en el diseño habitual. En particular, las ventajas más destacadas de la utilización de la metodología propuesta son:

- Se realiza un análisis en el que se emplea el precio como declaración medioambiental del producto (actualmente las empresas no proporcionan esta información) y se introduce una valoración de las prestaciones de cada solución propuesta. Es decir, se incluyen prestaciones, precio y emisiones de CO₂ en un mismo análisis.
- Al incluir mayor número de variables el conocimiento estudiado es mayor. En el diseño tradicional muchas de las variables se omiten por una falta de cuantificación.
- Este mayor grado de definición del proyecto evita tener que realizar mejoras en la fase de ejecución lo que se traducen en una reducción de sus costes, ya que toda modificación que se invierte en un proyecto es más costosa en fases posteriores.
- El proyectista puede ir alimentando la base de datos con diferentes alternativas que se puedan plantear a lo largo de la definición del alcance del proyecto.

En definitiva, esto hace que los resultados abarquen una visión más completa en función de los objetivos previos marcados ya que:

- Se barajan muchísimas más soluciones que en el diseño convencional y, además, se obtienen las mejores dentro del espectro estudiado.
- Se reduce el tiempo de diseño ya que se evita en gran medida el largo proceso de prueba y error.
- Al incluir mayor número de variables el conocimiento es más preciso.
- Esta herramienta permite combinar economía y prestaciones con el consiguiente beneficio tanto para la ejecución como para el posterior uso de la solución planteada. La valoración de las prestaciones se puede incorporar a los Análisis de Ciclo de Vida.

Aun así, tras los esfuerzos realizados para poder sistematizar la elección de la mejor solución, seguirá siendo imprescindible la aportación del proyectista a la hora de definir los pesos a introducir en la función valor. Debido a esto, se recomienda que el técnico utilice diversos escenarios, utilizando diversos pesos para la función valor, con el objetivo de poder llegar a soluciones que estén acordes con los requisitos reales del proyecto.

5. Agradecimientos

Los autores quieren dar las gracias a la Universidad de La Rioja y el Banco Santander por la financiación del proyecto AP111/13, a la unión europea por el proyecto RFS-PR-06035 y al Gobierno de la Rioja por el proyecto FOMENTA 2010/13.

6. Referencias

- Adeli H. & Sarma K.C. (2006). *Cost Optimization of Structures*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, Inglaterra.
- Álvarez-Ude, L. (2003). Edificación Y Desarrollo Sostenible. GBC: Un Método Para La Evaluación Ambiental De Edificios. *Informes de la Construcción*, 55(486), 63-70.
- Brown, R.H. (1975). Minimum cost selection of one-way slab thickness. *Journal of the Structural Division*, 101(12), 2585–2590.
- Castilho, V.C., Debs, M.K., Nicoletti, M.C. (2007). Using a modified genetic algorithm to minimize the production costs for slabs of precast prestressed concrete joists. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 20(4), 519-530.
- Chakrabarty B.K. (1992). Models for optimal design of reinforced concrete beams. *Computers and Structures*, 42(3), 447–451.
- Fraile-García, E. (2012). *Análisis multicriterio de forjados unidireccionales*. Tesis Doctoral, Universidad de La Rioja, Logroño.
- Friel, L.L. (1974). Optimum singly reinforced concrete sections. *ACI Journal*, 71(11), 556–558.
- ITEC-BEDEC (2012). *Banco Estructurado De Datos De Elementos Constructivos BEDEC*. Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña. Disponible en <http://www.itec.es/noumetabase2.e/Presentacio.aspx?page=banchedec>.
- Leps, M. (2005, Junio). Multi-objective optimization of reinforced concrete frames. Proc. 6th Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization. Brasil, Rio de Janeiro. Obtenido de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.60.6970&rep=rep1&type=pdf>
- Macías, M. & García-Navarro, J. (2010). Metodología y Herramienta VERDE para la evaluación y la sostenibilidad en edificios. *Informes de la Construcción*, 62(517), 87-100.
- Naaman, A.E. (1976). Minimum cost versus minimum weight of prestressed slabs. *Journal of the Structural Division*, 102(7), 1493–1505.
- Payá, I., Yepes, V., Clemente, J.J. & González, F. (2006). Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado. *Revista internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 22(3), 241-259.
- Payá, I., Yepes, V., González-Vidosa, F. & Hospitaler, A. (2008). Multiobjective Optimization of Concrete Building Frames by Simulated Annealing, *Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(8), 575-589.
- Payá, I., Yepes, V., Hospitaler, A. & González, F. (2009). CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*, 31(7), 1501-1508.
- SENDECO (2012). Sistema electrónico de negociación de derechos de emisión de dióxido de carbono. Disponible en <http://www.sendeco2.com/>.

Senouci, A.B. & Al-Ansari, M.S. (2009). Cost optimization of composite beams using genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40, 1112-1118.

Corresponding author: (For more information, please contact to):

Dr. Francisco Javier Martínez de Pisón Ascacíbar
Grupo EDMANS. URL: <http://www.mineriadatos.com>
Área de Proyectos de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica
Edificio Departamental. ETSII de Logroño. C/ Luis de Ulloa, 20, 26004 Logroño (España).
Phone: +34 941 299 232
Fax: + 34 941 299 794
E-mail: fjmartin@unrrioja.es.