

# Influencia del empleo de vigas planas y del tipo de hormigón en el diseño óptimo de pórticos de edificación

## *Influence of the use of different types of beams and concrete grades in the design of optimized reinforced concrete building frames*

Ignacio Payá-Zaforteza<sup>(1)</sup>, Fernando González Vidosa<sup>(2)</sup>

Víctor Yepes Piqueras<sup>(3)</sup>

Recepción / Received: 05/02/2008  
Aceptado / Accepted: 05/02/2008

### RESUMEN

Este artículo utiliza la cristalización simulada para el diseño de pórticos de edificación de hormigón armado optimizados económicamente. Se analiza la influencia del uso de hormigones de distinta resistencia característica a compresión, del empleo de vigas planas o descolgadas y de la agrupación de variables para simplificar la ejecución de la estructura. Para ello, se optimizan pórticos de 2 vanos de 5 m de luz y de 8 plantas con una altura por planta de 3 m. El número de variables de diseño de estos problemas varía entre 101 y 153. El trabajo concluye que el empleo de un solo tipo de hormigón HA-25 para toda la estructura incrementa su coste únicamente un 3.02%. Si además se agrupan variables, para facilitar la constructibilidad, existe un incremento adicional del 0.52%, lo cual es poco significativo. Sin embargo, el empleo de vigas planas encarece el coste en un 41.69% respecto al caso de vigas descolgadas, cuando el hormigón empleado es HA-25.

#### **Palabras clave:**

### SUMMARY

*This paper uses the Simulated Annealing algorithm for the design of economically optimized reinforced concrete frames commonly used in building construction. The influence of the following factors is analyzed: a) the concrete compressive strength, b) the beams depth (same as the one of the floor slabs or higher) and c) the grouping of some of the design variables. The structures studied are two bays and eight floors frames, being the span length of 5 m. and the columns height of 3 m. The number of design variables of these problems varies between 101 and 153. Results show that the use of a single concrete grade (25 MPa) in the structure increases its cost only by 3.02%. If, besides some variables are grouped in order to increase the frame constructability, the optimized structure is only 0.52% more expensive. However, if, additionally, beams of the same depth as the floor slabs are used, the cost of the optimized structure increases by 41.69%.*

#### **Key word:**

<sup>(1)</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Valencia

<sup>(2)</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Valencia.

<sup>(3)</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Universidad Politécnica de Valencia.

Persona de contacto / Corresponding author:

## 1. INTRODUCCIÓN

El diseño tradicional de estructuras constituye un proceso iterativo. Se inicia con la definición previa de unas dimensiones y unos materiales que son fruto de la experiencia del proyectista y de reglas sancionadas por la práctica. A continuación se analiza la estructura a partir de los principios de la resistencia de materiales y disciplinas afines, de modelos de comportamiento de los materiales y de las prescripciones de la normativa vigente. El proyecto concluye cuando, tras varios ajustes y correcciones, queda garantizada su seguridad y funcionalidad. Sin embargo, la objetividad del diseño y la economía alcanzada de esta forma depende fuertemente de la pericia del calculista. Frente a este método de prueba y error, la optimización ofrece una alternativa objetiva al diseño estructural.

La disponibilidad de ordenadores de elevada potencia de cálculo y bajo coste, junto con el desarrollo de técnicas basadas en la inteligencia artificial, ha permitido que en las últimas décadas haya crecido de forma importante el diseño de estructuras óptimas [1,2]. La optimización de las estructuras implica la resolución de un problema condicionado, análogo a otros como la planificación y la gestión de las operaciones y el uso eficiente de los recursos, que fueron el origen del desarrollo de la inteligencia artificial a mediados de los años 50.

La optimización condicionada puede afrontarse mediante técnicas exactas o aproximadas. Las primeras se basan en la programación matemática [3,4]. Estos métodos requieren un tiempo de cálculo que crece exponencialmente con el número de variables, y por tanto, no permiten afrontar la optimización de la mayoría de las estructuras reales. La optimización aproximada puede abordarse mediante técnicas heurísticas y metaheurísticas, cuyo reciente desarrollo está unido a la evolución de métodos basados en la inteligencia artificial. Dentro de este conjunto se encuentran procedimientos como los algoritmos genéticos, la búsqueda tabú, la cristalización simulada, las colonias de hormigas o las redes neuronales, entre otros [5-9].

Los métodos de resolución exactos permiten, en ocasiones, optimizar una estructura siempre que el número de variables sea suficientemente reducido. Por ejemplo, Moragues [10] emplea la programación matemática para minimizar el coste de estructuras aperturadas restringiendo el problema a 7 variables de decisión, verificando el estado límite de agotamiento por solicitaciones normales, sin considerar diferentes calidades de hormigón y acero y sin realizar un diseño detallado del armado de la estructura. Sarma y Adeli [11] aportan una extensa revisión de artículos sobre la optimización económica de estructuras de hormigón. Estos autores insistieron en la necesidad de resolver estructuras reales de interés, tal y como ya apuntaron en 1994 Cohn y Dinovitzer [12], constatando la escasez en la aplicación de la optimización al hormigón estructural frente a las estructuras metálicas.

La programación evolutiva, y en particular los algoritmos genéticos, son los procedimientos heurísticos preponderantes en la optimización de las estructuras desde sus inicios. Las contribuciones de Goldberg y Samtani [13], Jenkins [14,15], Hajela [16], Rajeev y Krisnamoorthy [17], a finales de los 80 y principios de los 90, fueron pioneras en minimizar el peso

de las estructuras metálicas. Kicing et al. [18] aportan una revisión reciente de las aplicaciones de la programación evolutiva al diseño estructural.

Los algoritmos genéticos también se han empleado en una gran parte de los estudios realizados en la optimización del hormigón estructural. Las primeras aplicaciones de 1997 incluyen el trabajo de Coello et al. [19] con vigas biapoyadas. Referencias a publicaciones más recientes que minimizan el coste de estructuras de hormigón basándose en estas técnicas evolutivas pueden consultarse en la tesis doctoral de Payá-Zaforteza [20].

El uso de métodos heurísticos alternativos a los genéticos para la optimización de estructuras de hormigón es más bien escaso [21,22]. Recientemente, el trabajo desarrollado por el Grupo de Procedimientos de Construcción, Optimización y Análisis de Estructuras de la Universidad Politécnica de Valencia ha minimizado el coste de estructuras reales de hormigón tales como muros, pórticos y marcos de carretera, pilas de puentes y pórticos de edificación con metaheurísticas como la cristalización simulada, la búsqueda tabú, la aceptación por umbrales y las colonias de hormigas, entre otros [23-27]. Asimismo, se ha abordado la optimización multiobjetivo en pórticos de edificación [28].

Las estructuras objeto de este trabajo son los pórticos planos de edificación de hormigón armado. Constituyen una tipología habitual en la construcción de edificios en España, donde aproximadamente el 70% de las viviendas están constituidas por forjados unidireccionales y pórticos planos paralelos entre sí. Esta tipología está diseñada para soportar cargas verticales y cargas horizontales moderadas, siendo inevitable el uso de sistemas apantallados cuando las acciones de viento y sismo son de gran magnitud. Los pórticos están formados por elementos horizontales o jácenas con luces entre 5 y 12 m, que recogen las cargas de los forjados y las transmiten a los pilares, cuya altura varía entre 3 y 6 m. En nuestro país es habitual imponer a las jácenas el mismo canto que a los forjados; son las denominadas vigas planas, donde el estado límite de deformaciones suele ser la condición activa de diseño. Son elementos que se calculan para soportar las acciones prescritas por el Código Técnico de Edificación [29], verificándose, además, los estados límites de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE [30].

Los resultados de trabajos preliminares [20,24] muestran que los hormigones de los pórticos optimizados tienen resistencias características a compresión superiores a los 25 MPa del hormigón HA-25 habitualmente utilizado en edificación en nuestro país para pórticos de hasta ocho alturas. Por ello, en este trabajo se estudia la repercusión económica del empleo de un único hormigón HA-25 en la estructura. Además, se aborda la minimización del coste de un pórtico de dos vanos y ocho alturas en el que se han definido cuatro grupos de vigas de modo que todas las vigas pertenecientes a un mismo grupo tienen las mismas dimensiones geométricas y armado. Esta estrategia permite simplificar la ejecución de la obra y disminuir el número de variables manejado. La agrupación de variables es una práctica utilizada anteriormente por diversos autores [31,32], pero su repercusión económica no ha sido analizada. Se estudia finalmente la influencia del uso de las vigas planas frente a las descolgadas, proporcionan-

do reglas de predimensionamiento para estas estructuras que se comparan con las propuestas de otros autores.

El artículo se organiza de la siguiente forma: en primer lugar se detalla la definición y comprobación de los pórticos de edificación, seguidamente se describe el algoritmo de optimización empleado, posteriormente se expone la aplicación del método heurístico analizándose los resultados obtenidos y, por último, se establecen las conclusiones del trabajo.

## 2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema consiste en la optimización económica de un pórtico plano de edificación de hormigón armado. Se trata de minimizar la función objetivo  $F$  de la expresión (1), comprobando además que se cumplen las restricciones de la expresión (2).

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_m) = \quad (1)$$

$$= \sum_{i=1}^r c_i \cdot m_i(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_m)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_m) \leq 0 \quad (2)$$

Obsérvese que  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son variables de diseño cuya combinación es objeto de optimización y  $p_1, p_2, \dots, p_m$  son los parámetros asociados al problema. El coste de ejecución de la estructura (1) es la función objetivo obtenida al sumar los productos de los costes unitarios de las respectivas unidades de obra por sus mediciones. La expresión (2) representa todas las condiciones, tanto geométricas como de estados límite, que debe verificar el pórtico.

La función objetivo incluye el coste de los materiales y el de todas las partidas necesarias para ejecutar los pórticos como, por ejemplo, el encofrado y desencofrado de vigas y pilares y el cimbrado y descimbrado de vigas. Los precios unitarios proceden de una consulta efectuada a empresas constructoras en octubre del año 2004, detallándose en la Tabla 1.

El número de variables del problema depende de la cantidad de vanos y plantas del pórtico considerado (ver Payá-Zaforteza [20]). Los pórticos estudiados en este trabajo, de 2 vanos y 8 alturas, requieren 153 variables para definir la geometría de las secciones de vigas y pilares, los tipos de acero y de hormigones y los armados. El conjunto de combinaciones de valores para dichas variables constituye el espacio de soluciones. Tal espacio es extraordinariamente grande, del orden de  $9.15 \times 10^{232}$ , lo cual implica que sea inabordable la búsqueda exhaustiva del óptimo en tiempos de cálculo razonables (ver Payá-Zaforteza [20]). Ello justifica la adopción de técnicas heurísticas para su resolución.

Los parámetros del problema son aquellas magnitudes que se toman como datos y, por tanto, no forman parte de la optimización. Así, la luz de cada vano es de 5 m y la altura de cada planta es de 3 m (ver Figura 1); el canto de los forjados es de

Tabla 1. Precios unitarios de las unidades de obra

Unidad de obra	Precio unitario (€)
Kg Acero B-400 S	1.27
Kg Acero B-500 S	1.30
m <sup>3</sup> Hormigón HA-25 en vigas	78.40
m <sup>3</sup> Hormigón HA-30 en vigas	82.79
m <sup>3</sup> Hormigón HA-35 en vigas	98.47
m <sup>3</sup> Hormigón HA-40 en vigas	105.93
m <sup>3</sup> Hormigón HA-45 en vigas	112.13
m <sup>3</sup> Hormigón HA-50 en vigas	118.60
m <sup>3</sup> Hormigón HA-25 en pilares	77.80
m <sup>3</sup> Hormigón HA-30 en pilares	82.34
m <sup>3</sup> Hormigón HA-35 en pilares	98.03
m <sup>3</sup> Hormigón HA-40 en pilares	105.1
m <sup>3</sup> Hormigón HA-45 en pilares	111.72
m <sup>3</sup> Hormigón HA-50 en pilares	118.26
m <sup>2</sup> Encofrado-desencofrado de vigas	25.05
m <sup>2</sup> Encofrado-desencofrado de pilares	22.75
m <sup>2</sup> Cimbrado-descimbrado de vigas	38.89

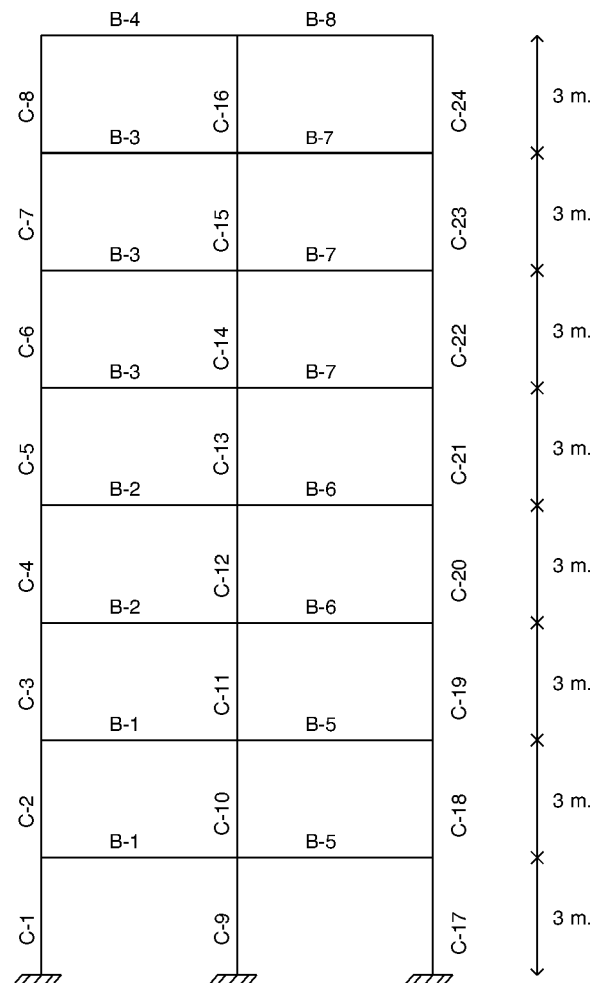


Figura 1. Elementos constituyentes del pórtico objeto de optimización económica.

Tabla 2. Parámetros relativos a las acciones consideradas

Descripción	Valor adoptado
Cargas permanentes en forjados por planta (KN/m <sup>2</sup> )	Planta tipo: 4 KN/m <sup>2</sup> Cubierta: 6 KN/m <sup>2</sup>
Sobrecargas de uso en forjados por planta (KN/m <sup>2</sup> )	Planta tipo: 3 KN/m <sup>2</sup> Cubierta: 1 KN/m <sup>2</sup>
Altitud topográfica del emplazamiento del edificio (m)	0 m
Zona eólica del emplazamiento del edificio	X
Situación topográfica del edificio	Normal
Porcentaje que suponen el peso de lo elementos no estructurales sobre las cargas permanentes totales (%)	Planta tipo: 25% Cubierta: 50%
Edad de la estructura cuando se descimbra (días)	14 días
Edad de la estructura cuando se aplican las cargas muertas y la sobrecarga cuasi-permanente (días)	28 días
Edad de la estructura para el cálculo de las flechas (días)	8.000 días

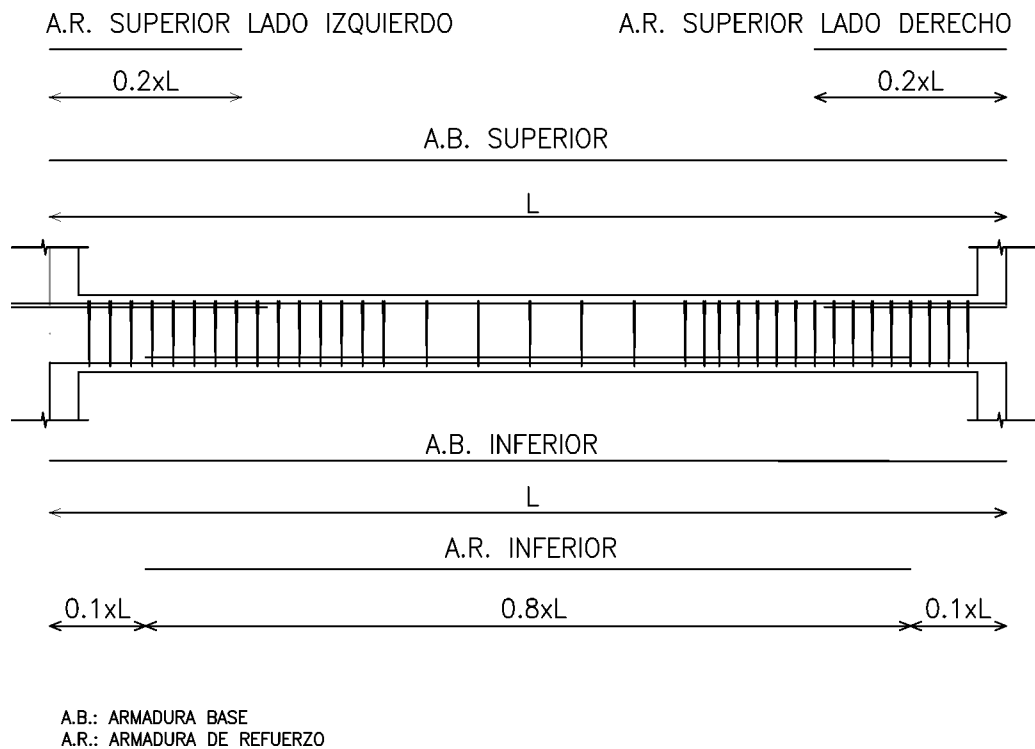


Figura 2. Armadura longitudinal de vigas.

0.29 m; la separación entre pórticos es de 5 m; la distancia mínima entre la cara superior del forjado de una planta y la cara inferior de las vigas de la planta superior es de 2.45 m; el nivel de control de la ejecución es normal; el ambiente de la estructura es tipo I; los coeficientes de minoración de las resistencias de los materiales son de 1.5 y 1.15 para el hormigón y el acero respectivamente; el recubrimiento de las armaduras es de 30 mm y el tamaño máxima del árido es de 25 mm. En la Tabla 2 se recogen los parámetros relativos a las acciones.

Asimismo, por razones de facilidad constructiva, se ha considerado que la calidad del hormigón es la misma para todos los pilares de una planta y para todas las vigas que se apoyan en esos pilares. Además, en el caso de las vigas, se ha adopta-

do un único ancho y canto para todas las vigas de la misma planta. En cuanto al armado, se ha dispuesto una armadura base inferior y superior que recorre toda la longitud de las vigas de una misma planta. Adicionalmente, se ha previsto en cada viga un refuerzo inferior con una longitud de 0.8 veces su luz y uno superior en cada uno de sus extremos con una dimensión 0.2 veces su luz (ver Figura 2). Las longitudes predefinidas de estos refuerzos son similares a las indicadas en el artículo 56.2 de la EHE para la armadura a disponer en la banda de soportes de las placas sobre apoyos aislados y, en todo caso, pueden ser consideradas como variables en futuras investigaciones. Para definir la armadura de cortante de vigas, se han considerado divididas en tres zonas de igual longitud, en cada una de las cuales la armadura de cortante es la misma,

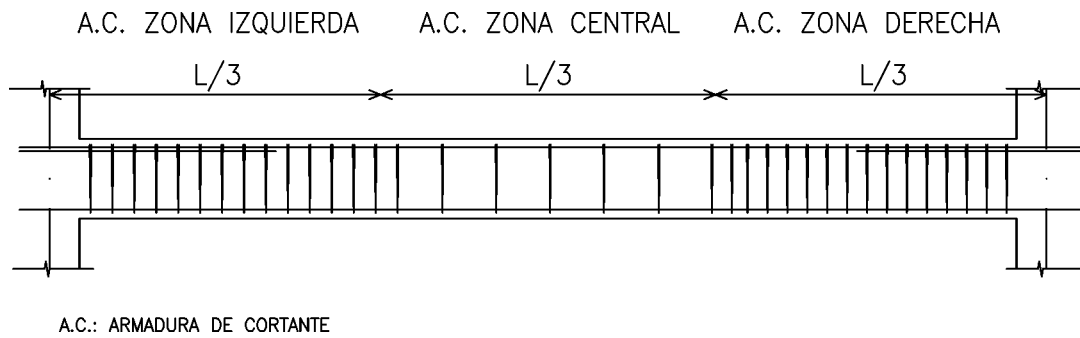


Figura 3. Armadura de cortante de vigas.

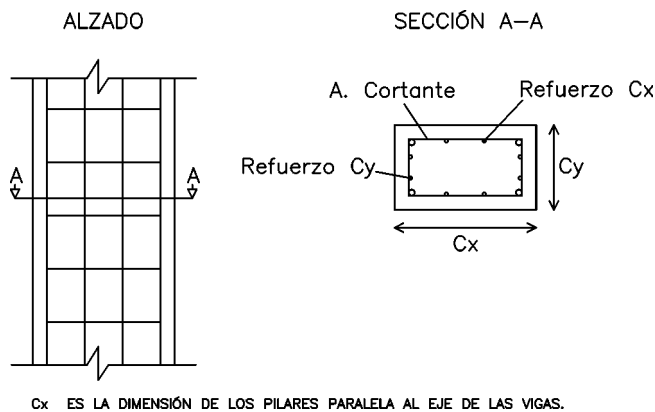


Figura 4. Armadura de pilares.

pero pudiendo variar de una zona a otra dentro de cada viga (ver Figura 3). Por último, reflejando la práctica constructiva habitual, los pilares se arman con una armadura longitudinal y un estriado de cortante constantes en toda su altura (ver Figura 4). Se señala que la medición total de acero obtenida a partir de los esquemas de armado anteriormente explicados se incrementa en un 10% para considerar el acero adicional necesario para efectuar los solapes de armaduras, el diseño detallado de los nudos y las pérdidas por despuntes.

Por otro lado, las restricciones estructurales se refieren a los estados límite y prescripciones constructivas que deben cumplirse según la instrucción EHE y reglas de buena práctica constructiva. Para ello, se han calculado las envolventes de esfuerzos y deformaciones debidos a las acciones prescritas por el Código Técnico de Edificación [29]. La estructura se ha calculado empleando un método matricial que incluye la deformabilidad por axiles mediante un análisis elástico lineal con características mecánicas brutas de las secciones. La estructura se supone arriostrada transversalmente por los forjados. Los casos de carga considerados son las cargas permanentes, sobrecarga de uso en vanos pares e impares, sobrecarga en todos los vanos y viento en dos direcciones opuestas. De las 48 combinaciones de casos de carga elementales resultantes se obtienen las envolventes de momentos flectores correspondientes a las combinaciones ELS cuasipermanente, ELS poco probable y las envolventes de flectores, axiles y cortantes correspondientes al ELU. Asimismo se calculan las flechas activas y totales de las jácenas del pórtico. El cálculo de pilares en ELU incluye las excentricidades adicionales de pandeo

descritas en la EHE en la hipótesis de pórtico traslacional en su plano, con desplazamientos en cabeza menores que  $1/750$  de la altura del pórtico. Los cálculos de ELS de fisuración también incluyen una estimación de holguras medidas como relación entre la abertura de fisura obtenida y la máxima permitida según el ambiente. El ELS de deformaciones se verifica siguiendo el método simplificado de la EHE considerándose admisibles flechas de  $1/250$  de la luz para la flecha total y de  $1/400$  para la flecha activa.

Nótese que se realiza una comprobación de los estados límite y no se intenta dimensionar en el sentido habitual, puesto que el orden en el dimensionamiento obvia otras posibilidades que la optimización heurística no descarta. Así, por ejemplo, se pueden eliminar armaduras de cortante con aumentos localizados de armadura longitudinal, lo cual puede resultar más económico que disponer armadura de cortante [26,27].

### 3. PROCEDIMIENTO DEL ALGORITMO DE CRISTALIZACIÓN SIMULADA

Se emplea la cristalización simulada SA (Simulated Annealing), como procedimiento de optimización (ver [6]). Este método requiere una solución inicial y un mecanismo que permita el movimiento de una solución a otra próxima, siempre y cuando se cumpla con un criterio de aceptación determinado. Este paso puede realizarse mediante un pequeño cambio en el valor de una o varias variables. Se denomina entorno al conjunto de soluciones a las que se puede llegar aplicando un movimiento desde una solución determinada. En la versión propuesta, sólo se han aceptado nuevas soluciones cuando se cumplen todas las restricciones impuestas.

SA se basa en una analogía con los procesos de formación de masas de cristales a partir de masas fundidas a altas temperaturas que se dejan enfriar lentamente. El proceso se rige por la expresión de Boltzmann  $\exp(-\Delta E/T_k)$ , donde  $\Delta E$  es el incremento de energía y  $T_k$  es la temperatura. Dada la forma de esta expresión, a medida que se enfría la masa se reduce la probabilidad de que se formen configuraciones de mayor energía.

SA compara la energía de la masa cristalina con el valor de la función de coste evaluada para una solución admisible de un problema de optimización. La temperatura en este algoritmo



constituye un parámetro de control. El procedimiento se inicia con una solución factible generada aleatoriamente y con la determinación de una temperatura inicial. La solución en curso se modifica mediante la aplicación de un movimiento lo que genera una nueva solución. Ésta reemplaza a la anterior si a) reduce su coste o b) un número aleatorio entre 0 y 1 es menor que la expresión de Boltzman  $\exp(-\Delta E/T_k)$ , donde ahora  $\Delta E$  es el incremento de coste y  $T_k$  es la temperatura actual que se mantiene para un número definido de movimientos denominado cadena de Markov. Tras una cadena, se produce un enfriamiento de la temperatura y continúa la búsqueda con una nueva cadena. El proceso termina cuando la temperatura desciende hasta un cierto umbral o bien no aparecen mejoras en un número consecutivo de cadenas. La metaheurística tiende asintóticamente a la solución óptima siempre que el número de iteraciones sea suficientemente elevado. Sin embargo, la obtención de buenos resultados en tiempos razonables de cálculo sólo es posible si se calibran los parámetros del algoritmo y se definen movimientos adecuados al problema planteado.

Los trabajos previos de Payá-Zaforteza [20] han permitido ajustar los parámetros que guían la metaheurística SA para los pórticos de edificación, así como generar soluciones aleatorias mediante una estrategia de saltos múltiples aleatorios. El movimiento utilizado en SA consiste en una modificación de un máximo de tres variables. Para el cálculo de la temperatura inicial se ha utilizado el método de Medina [34], de forma que el porcentaje de aceptaciones en los estadios iniciales se encuentre entre el 20 y el 40%. Se ha empleado un coeficiente de enfriamiento geométrico  $r=0.8$ . El criterio de parada ha sido detener el proceso de cálculo si no existen mejoras en dos cadenas de Markov. Por último, Payá-Zaforteza [20] encontró una fuerte dependencia lineal entre el número de variables de este problema (NumVar) y la longitud adecuada para la cadena de Markov (Lm). Así, para pórticos de dos vanos y hasta 8 plantas la relación es la indicada en la Expresión 1, donde se observa la fuerte correlación lineal encontrada.

$$Lm = 1592.105 \cdot NumVar - 46592.110 \quad (R^2 = 0.9963) \quad (1)$$

#### 4. APLICACIÓN Y RESULTADOS

La gran mayoría de los edificios construidos en España con un máximo de ocho alturas emplean hormigón HA-25 y vigas planas. Por otro lado, la facilidad constructiva hace razonable el agrupamiento de variables, de forma que las vigas pertenecientes a un mismo grupo presenten idénticas dimensiones y armados (ver Figura 5). Por tanto, se plantea aplicar el algoritmo SA anterior a pórticos de 2 vanos y 8 alturas comprobando la influencia de la adopción de un único tipo de hormigón (HA-25), la presencia o no de vigas planas y la agrupa-

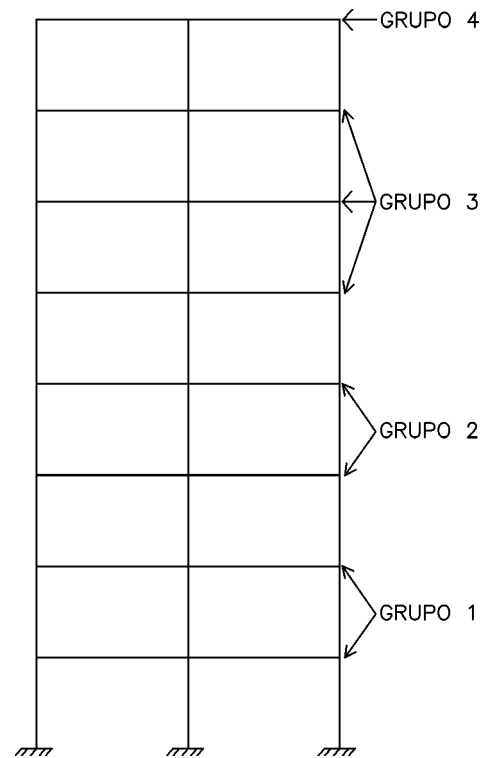


Figura 5. Definición de agrupación de variables en vigas.

ción de variables. Para cuantificar la repercusión de los aspectos anteriores, se plantea un estudio aplicado a los cuatro problemas caracterizados en la Tabla 3.

El algoritmo SA descrito se ha ejecutado un total de nueve veces para cada uno de los problemas. El código del programa se ha implementado en FORTRAN 77, en un ordenador con procesador Pentium IV a 3.2 GHz y 2 GB de memoria RAM. En la Tabla 4 se indica, para cada uno de los problemas, el número de variables y la longitud de la cadena de Markov necesaria, según la Expresión 1.

En la Tabla 5 se recoge el coste mínimo para cada caso, con sus valores medios y coeficientes de variación, así como el tiempo medio de cálculo, en minutos. Se constata cómo la disminución del número de variables permite reducir significativamente los tiempos medios de cálculo. Así, pasar de 153 variables (problema P-2v8h.1) a 105 (problema P-2v8h.3) requiere una duración del proceso de cálculo un 49% inferior.

El empleo de un hormigón HA-25 para toda la estructura incrementa el coste mínimo sólo en un 3.02% (ver Tabla 5). Si se simplifica la ejecución del pórtico agrupando variables se produce un incremento adicional del coste del 0.52%, lo cual sigue siendo poco significativo. Sin embargo, el uso de las

Tabla 3. Pórticos planos analizados de 2 vanos y 8 plantas

Problema	Tipo de hormigón	Tipo de vigas	Agrupación de variables
P-2v8h.1	Variable	Descolgadas	No
P-2v8h.2	HA-25	Descolgadas	No
P-2v8h.3	HA-25	Descolgadas	Sí (ver Figura 2)
P-2v8h.4	HA-25	Planas	Sí (ver Figura 2)

**Tabla 4. Número de variables y longitud de cadena de Markov para los pórticos de 2 vanos y 8 plantas**

Problema	Número variables	Longitud cadena de Markov
P-2v8h.1	153	200000
P-2v8h.2	145	185000
P-2v8h.3	105	121000
P-2v8h.4	101	115000

**Tabla 5. Costes y tiempos de cálculo obtenidos en la optimización de pórticos de 2 vanos y 8 plantas ejecutando 9 veces el algoritmo SA para cada uno de los problemas. (\*) Coeficiente de variación del coste. (\*\*) Tiempo medio de cálculo, en minutos.**

Problema	Coste mínimo (€)	Coste medio (€)	CV % (*)	TMC (**)
P-2v8h.1	8242.23	8334.44	0.63%	361.1
P-2v8h.2	8491.51	8534.03	0.47%	337.9
P-2v8h.3	8536.01	8659.32	1.60%	184.1
P-2v8h.4	12095.04	12267.78	0.99%	151.2

**Tabla 6. Dimensiones de vigas en pórticos de 2 vanos de 5 m y 8 alturas optimizadas para hormigón HA-25. Dimensiones en metros**

Grupo de vigas	Vigas descolgadas (P-2v8h.3)				Vigas planas(P-2v8h.4)			
	Ancho b	L/b	Canto h	L/h	Ancho b	L/b	Canto h	L/h
4 (cubierta)	0.39	12.8	0.55	9.1	0.61	8.2	0.29	17.2
3	0.24	20.8	0.55	9.1	0.45	11.1	0.29	17.2
2	0.23	21.7	0.54	9.3	0.40	12.5	0.29	17.2
1	0.23	21.7	0.49	10.2	0.34	14.7	0.29	17.2

vigas planas supone un añadido en el menor coste obtenido del 46.74% respecto al problema P-2v8h.1 y de un 41.69% en relación al pórtico equivalente con vigas descolgadas (problema P-2v8h.3).

El análisis de los costes de las estructuras con vigas descolgadas indica que el encofrado supone el 44.54% del total, el acero el 27.85%, el hormigón el 18.38% y el cimbrado de vigas el 9.23%. En el caso de vigas planas, el coste del encofrado se reduce al 31.51%, el del acero aumenta al 42.33%, el del hormigón disminuye al 15.10% y el del cimbrado de vigas se incrementa ligeramente al 11.04%.

A continuación se comprueban las diferencias entre los pórticos optimizados con vigas descolgadas o planas, empleando el hormigón habitual HA-25 y agrupando las variables para facilitar la construcción de la estructura. En la Tabla 6 se recogen las características de las vigas de los problemas P-2v8h.3 y P-2v8h.4.

La relación luz/canto de las vigas descolgadas, optimizadas según las hipótesis del presente trabajo, varían entre 9.1 en cubierta y 10.2 en la primera planta. Estos valores se aproximan a reglas de dimensionamiento previo proporcionadas por Calavera [35], quien recomienda valores del orden de 10 a 15 para dinteles de pórticos sometidos exclusivamente a acciones verticales, o por Rodríguez [36], quien recomienda valores del orden de 10 a 12 en el caso de luces de 5.50 m y carga total de hasta 700 kg/m<sup>2</sup>. Las vigas planas analizadas presentan una relación luz/canto de 17.2, pues la dimensión del forjado se

considera como parámetro del problema (29 cm). Esta relación es próxima a las recomendaciones de Calavera [35] de 18 a 22, y algo alejadas respecto a las de Rodríguez [36], de 30 en vanos interiores y 24 en vanos extremos.

Los anchos de las vigas descolgadas obtenidas para el problema P-2v8h.3 son algo menores a las recomendaciones de Rodríguez [36] (20 a 35 cm), especialmente en el caso de la cubierta, como se observa en la Tabla 6. Este autor también señala una relación luz/ancho para predimensionar una viga plana de 10 en alineaciones que soportan paños por ambos lados, cifra sensiblemente inferior a la obtenida para el problema P-2v8h.4, excepto para el caso de la cubierta.

En la Tabla 7 se indican las cuantías de acero por unidad de volumen de hormigón para el caso de vigas de pórticos con vigas descolgadas (problema P-2v8h.3) y planas (P-2v8h.4), con agrupación de variables y con hormigón HA-25. En las vigas descolgadas la cuantía total de acero oscila entre 108 y 127 kg de acero por m<sup>3</sup> de hormigón en las plantas tipo, excepto en la de cubierta que es de 65 kg/m<sup>3</sup>. La armadura de cortante, en estos casos, constituye aproximadamente la quinta parte del total requerido, excepto en cubierta donde es algo mayor. En la Tabla 7 también se observa el incremento en acero necesario para las vigas planas, llegando a cifras de 300 kg/m<sup>3</sup>, que casi triplican la cuantía de acero de las vigas descolgadas. La armadura de cortante se incrementa mucho menos, suponiendo un porcentaje menor respecto al total en relación con las vigas descolgadas.

**Tabla 7. Cuantías (kg acero/m<sup>3</sup> hormigón) en vigas de pórticos de 2 vanos de 5 m y 8 alturas optimizados para hormigón HA-25**

Grupo de vigas	Vigas descolgadas (P-2v8h.3)			Vigas planas (P-2v8h.4)		
	Flexión	Cortante	Total	Flexión	Cortante	Total
4 (cubierta)	50	15	65	276	23	299
3	90	18	108	259	36	295
2	90	21	111	262	38	300
1	102	25	127	253	39	292

**Tabla 8. Escuadrias de pilares de pórticos de 2 vanos de 5 m y 8 alturas optimizados para hormigón HA-25. El primer número indica el ancho del pilar y el segundo su canto**

Planta	Vigas descolgadas (P-2v8h.3)		Vigas planas (P-2v8h.4)	
	Pilares interiores	Pilares exteriores	Pilares interiores	Pilares exteriores
8 (cubierta)	30 x 35	25 x 35	35 x 30	25 x 55
7	35 x 40	25 x 35	40 x 35	25 x 55
6	40 x 40	25 x 35	45 x 40	25 x 55
5	40 x 40	25 x 35	50 x 45	25 x 55
4	40 x 45	25 x 40	55 x 50	25 x 60
3	45 x 50	25 x 40	55 x 55	25 x 65
2	50 x 55	25 x 40	55 x 60	30 x 70
1	55 x 60	25 x 40	60 x 60	30 x 70

**Tabla 9. Cuantías mecánicas de la armadura longitudinal de pilares de pórticos de 2 vanos de 5 m y 8 alturas optimizados para hormigón HA-25**

Planta	Vigas descolgadas (P-2v8h.3)		Vigas planas (P-2v8h.4)	
	Pilares interiores	Pilares exteriores	Pilares interiores	Pilares exteriores
8 (cubierta)	0.113	0.202	0.112	0.229
7	0.107	0.135	0.126	0.129
6	0.105	0.135	0.131	0.172
5	0.131	0.202	0.105	0.238
4	0.111	0.177	0.107	0.249
3	0.111	0.315	0.108	0.274
2	0.126	0.491	0.167	0.340
1	0.112	0.315	0.107	0.112
Cuantía media	0.115	0.247	0.120	0.218

**Tabla 10. Cuantías (kg acero/m<sup>3</sup> hormigón) de la armadura longitudinal de pilares de pórticos de 2 vanos de 5 m y 8 alturas optimizados para hormigón HA-25**

Planta	Vigas descolgadas (P-2v8h.3)		Vigas planas (P-2v8h.4)	
	Pilares interiores	Pilares exteriores	Pilares interiores	Pilares exteriores
8 (cubierta)	37	67	37	76
7	42	45	42	43
6	37	45	43	57
5	37	67	35	79
4	43	59	36	82
3	35	104	36	91
2	35	163	55	113
1	37	104	36	37
Cuantía media	60	59		



Las escuadrías obtenidas para los pilares de los pórticos de los problemas P-2v8h.3 y P-2v8h.4 figuran en la Tabla 8. Se observa una disminución de la sección de los pilares en relación con la altura, presentando los pilares interiores mayores secciones. En cuanto a las cuantías mecánicas medias de la armadura longitudinal obtenidas para los pilares en estos problemas (ver Tabla 9), éstas son de 0.12 para los pilares interiores y de 0.23 para los exteriores, en los que los esfuerzos de flexión son más importantes.

Por último, en la Tabla 10 figuran las cuantías de la armadura longitudinal de los pilares en los problemas analizados, observándose una cuantía media en torno a los 60 kg de acero por m<sup>3</sup> de hormigón. Estas cifras son inferiores a las propuestas por Rodríguez [36] de 100 a 120 kg/m<sup>3</sup>. En este caso, éste autor prefiere, probablemente por motivos arquitectónicos, pilares de menores dimensiones pero con cuantías de armadura más altas que las obtenidas en el trabajo por motivos estrictamente económicos.

## 5. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado en el presente artículo permite comprobar que, en los casos estudiados, la inteligencia artificial representada en un algoritmo de cristalización simulada, ha sido capaz de diseñar de forma automática pórticos planos de edificación de hormigón armado, detectando con una metodología objetiva, relaciones prácticas que, para el caso de los pórticos estudiados de 2 vanos y 8 alturas, son congruentes con las que normalmente se emplean en las oficinas de cálculo experimentadas.

A partir de los resultados obtenidos se señalan las siguientes conclusiones:

a) El empleo de hormigones de resistencia variable permite reducir el coste de la estructura (un 3.02% en el caso de un hormigón HA-25). Sin embargo esto sólo sería posible con una correcta planificación del programa de hormigonado pues el hormigón utilizado en forjados es habitualmente un HA-25.

b) Recurrir a diseños con vigas planas es altamente ineficiente desde el punto de vista económico en comparación con la alternativa de vigas descolgadas (un incremento del 41.69% con un hormigón HA-25). Esta consideración es independiente del ineficaz comportamiento mecánico y de las patologías asociadas a este tipo de vigas.

c) Se recomienda agrupar variables de diseño por plantas pues permite la reducción significativa de los tiempos de cálculo y simplificar la ejecución de la estructura con pequeños incrementos en su coste (apenas un 0.52% con un hormigón HA-25).

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Jones, M.T.: "Artificial intelligence application programming", Charles River Media, Hingham (Massachusetts), 2003.

[2] Sriram, R.D.: "Artificial intelligence in engineering: personal reflections", *Advanced Engineering Informatics*, 20, 2006, pp. 3-5.

[3] Fletcher, R.: "Practical Methods of Optimization", Wiley, Chichester, 2001.

[4] Hernández, S.; Fontan, A.: "Practical Applications of Design Optimization", WIT Press, Southampton, 2002.

[5] Dreo, J.; Petrowsky, A.; Siarry, P.; Taillard, E.; Chatterjee, A.: "Metaheuristics for hard optimization. Methods and case studies", Springer, Berlin, 2006.

[6] van Laarhoven, P.J.M.; Aarts, E.H.L.: "Simulated Annealing: Theory and Applications", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1987.

[7] Goldberg, D.E.: "Genetic algorithms in search, optimization and machine learning", Addison-Wesley, 1989.

[8] Glover, F.; Laguna, M.: "Tabu search", Kluwer Academic Publishers, Boston, 1997.

[9] Adeli, H.; Sarma, K.C.: "Cost optimization of structures. Fuzzy logic, genetic algorithms and parallel computing", Wiley, Chichester, 2006.

[10] Moragues, J.: "Diseño óptimo de estructuras apertadas de hormigón armado". Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 1980.

[11] Sarma, K.C.; Adeli, H.: "Cost optimization of concrete structures", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 124(5), 1998, pp. 570-578.

[12] Cohn, M.Z.; Dinovitzer, A.S.: "Application of structural optimization", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120(2), 1994, pp. 617-649.

[13] Goldberg, D.E.; Samtani, M.P.: "Engineering optimization via genetic algorithms", en *ASCE Proceedings of the Ninth Conference on Electronic Computation*, University of Alabama at Birmingham, February 1986, pp. 471-482.

[14] Jenkins, W.M.: "Structural optimization with the genetic algorithm", *The Structural Engineer*, 69(24), 1991, pp. 418-422.

[15] Jenkins, W.M.: "Plane frame optimum design environment based on genetic algorithm", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 118(11), 1992, pp. 3103-3112.

[16] Hajela, P.: "Genetic algorithms in automated structural synthesis", en Topping (Ed.), *Optimization and Artificial Intelligence in Civil and Structural Engineering*, vol. 1, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992, pp. 639-653.

[17] Rajeev, S.; Krishnamoorthy, C.S.: "Discrete optimization of structures using genetic algorithm", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 118(5), 1992, pp. 1233-1250.

[18] Kicinger, R.; Arciszewski, T.; de Jong, K.: "Evolutionary computation and structural design: A survey of the state-of-the-art", *Computers and Structures*, 83(23-24), 2005, pp. 1943-1978.

[19] Coello, C.A.; Christiansen, A.D.; Santos, F.: "A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams", *Engineering with Computers*, 13(4), 1997, pp. 185-196.

- [20] Payá-Zaforteza, I.: "Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado". Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universidad Politécnica de Valencia, 2007.
- [21] Balling, R.J.; Yao, X.: "Optimization of reinforced concrete frames", ASCE Journal of Structural Engineering, 123(2), 1997, pp. 193-202.
- [22] Ceranic, B.; Fryer, C.; Bines, R.W.: "An application of simulated annealing to the optimum design of reinforced concrete retaining structures", Computers and Structures, 79(17), 2001, pp. 1569-1581.
- [23] González-Vidosa, F.; Yepes, V.; Alcalá, J.; Carrera, M.; Perea, C.: "Simulated annealing optimization of walls, portal and box reinforced concrete road structures", en Proceedings of 9th International Conference on Computed Aided Optimum Designed in Engineering (OPTI-2005), Skiathos (Greece), 2005, pp. 175-186.
- [24] Payá, I.; Yepes, V.; Clemente, J.J.; González-Vidosa, F.: "Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado", Rev. Int. Mét. Num. Cál. Dis. Ing., 22(3), 2006, pp. 241-259.
- [25] Martínez, F.; Perea, C.; Yepes, V.; Hospitaler, A.; González-Vidosa, F.: "Optimización heurística de pilas rectangulares de hormigón armado", Hormigón y Acero, 244, 2007, pp. 67-80.
- [26] Yepes, V.; Alcalá, J.; Perea, C.; González-Vidosa, F.: "A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing", Engineering Structures, doi:10.1016/j.engstruct.2007.05.023, 2007, in press.
- [27] Perea, C.; Alcalá, J.; Yepes, V.; González-Vidosa, F.; Hospitaler, A.: "Design of Reinforced Concrete Bridge Frames by Heuristic Optimization", Advances in Engineering Software, doi: 10.1016/j.advengsoft.2007.07.007, in press.
- [28] Payá, I.; Yepes, V.; González-Vidosa, F.; Hospitaler, A.: "Multiobjective simulated annealing optimization of concrete building frames", Abstracts of the Proceedings of the IABSE Symposium Budapest 2006. "Responding to tomorrow's challenges in structural engineering". IABSE Report Vol. 92, 2006, pp: 186-187.
- [29] Ministerio de Vivienda y Ministerio de la Presidencia. "Código Técnico de Edificación", 2006.
- [30] Ministerio de Fomento. "Instrucción de Hormigón Estructural EHE". 5ª edición, Centro de Publicaciones, Madrid, 2000.
- [31] Rajeev, S.; Krisnamoorthy, C.S.: "Genetic algorithm-based methodology for design optimization of reinforced concrete frames", Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 13(1), 1998, pp. 63-74.
- [32] Lee, C.; Ahn, J.: "Flexural Design Reinforced Concrete Frames by genetic Algorithm", ASCE Journal of Structural Engineering, 129(6), 2003, pp. 762-774.
- [33] Kirkpatrick, S.; Gelatt, C.D.; Vecchi, M.P.: "Optimization by simulated annealing", Science, 220(4598), 1983, pp. 671-680.
- [34] Medina, J.R.: "Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing", Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, 127(4), 2001, pp. 213-221.
- [35] Calavera, J.: "Proyecto y cálculo de estructuras de hormigón". Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, Madrid, 1999.
- [36] Rodríguez, L.F.: "Curso práctico Cypecad. Versión 2000.1". Ed. Cype Ingenieros, Alicante, 2001.