

Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado

Ignacio Payá, Víctor Yepes, Juan José Clemente y Fernando González

ETSI Caminos, Canales y Puertos,
Dpto. Ingeniería Construcción,
Universidad Politécnica de Valencia
Campus de Vera, 46022, Valencia, España
Tel.: 34 963 879 563; Fax: 34 963 877 569
e-mail: fgonzale@cst.upv.es

Resumen

El trabajo se centra en optimizar los costes de pórticos de edificación mediante métodos heurísticos y metaheurísticos, demostrando su efectividad. Los métodos heurísticos utilizados son la búsqueda aleatoria y el gradiente, y los metaheurísticos, son la búsqueda de aceptación por umbrales (TA) y la cristalización simulada (SA). Todos los métodos de búsqueda han sido aplicados a un pórtico de dos vanos y cuatro plantas con 81 variables de diseño. La evaluación de cada una de las soluciones se realiza mediante un módulo de comprobación según la normativa EHE. El cálculo de esfuerzos se realiza por un programa matricial interno aplicando las cargas de la NBE AE-88. Se concluye que la cristalización simulada es la metaheurística más eficiente de las cuatro heurísticas comparadas, mejorando en un 1.1% los resultados del TA, en un 31.6% los del gradiente y en un 253.6% los de la búsqueda aleatoria.

Palabras clave: *optimización económica, diseño estructural, estructuras de hormigón*

HEURISTIC OPTIMIZATION OF REINFORCED CONCRETE BUILDING FRAMES

Summary

This paper deals with the optimization of costs of reinforced concrete frames used in building construction. It shows the efficiency of four heuristic and metaheuristic optimization algorithms. Heuristic methods used are the random walk and the gradient method. The metaheuristic methods used are the threshold accepting method (TA) and the simulated annealing method (SA). The four methods have been applied to the same frame of 2 bays and 4 floors that includes 81 design variables. The evaluation of each solution is performed using a computer module according to the Spanish Code EHE. The calculation of stress resultants is done by an internal matrix method code that applies loads according to the national NBE AE-88 provisions. The comparison of the four heuristic algorithms leads to the conclusion that simulated annealing is more efficient, since it improves by 1.1% the results of TA, and by 31.6% and 253.6% the results of the gradient and the random walk methods.

Keywords: *economic optimization, structural design, concrete structures.*

INTRODUCCIÓN

Desde su aparición a mediados de los años 50, la inteligencia artificial ha ido abarcando distintos campos de aplicaciones, entre los que cabe destacar la programación automática, la resolución de problemas con restricciones, la investigación operativa, la planificación, las redes neuronales, etc.¹ El diseño de estructuras de hormigón es un claro ejemplo de problema de elección de variables de diseño sujeto a restricciones en el que la aplicación de métodos de inteligencia artificial tiene pleno sentido. Sin embargo, y muy lejos de las posibilidades que ofrece la inteligencia artificial, su resolución se ha basado tradicionalmente en la experiencia del ingeniero de estructuras. Si bien los métodos de análisis de esfuerzos y de verificación de estados límite han sido objeto de innumerables desarrollos, el predimensionamiento de estructuras se suele realizar por comparación con diseños previos o por tanteos en los casos en que no se cuenta con experiencia. Todo ello conforma un panorama de procedimientos artesanales de diseño, sin que haya un procedimiento objetivo en la elección de dimensiones y materiales. En estos términos, la mayor parte de los procedimientos adoptan secciones cuyas dimensiones, pretensado y tipo de hormigón están sancionados por la práctica. Una vez que la estructura está definida se procede al análisis de envolventes de esfuerzos y al cálculo de armaduras pasivas que satisfagan los estados límite prescritos por la normativa de hormigón estructural. En el caso de que las dimensiones, pretensado o los tipos de hormigón sean insuficientes se redefine la estructura mediante un proceso de prueba-error. Tales métodos conducen a diseños seguros estructuralmente, pero la economía y la objetividad de los diseños estructurales queda muy ligada a la experiencia previa del ingeniero estructural.

Los métodos de optimización de estructuras ofrecen una alternativa objetiva al diseño. Estos métodos pueden clasificarse en dos grandes grupos: métodos exactos y métodos heurísticos. Los métodos exactos son los empleados tradicionalmente. Se basan en el cálculo de soluciones óptimas siguiendo técnicas iterativas de programación lineal^{2,3}. El segundo grupo son los métodos heurísticos, cuyo reciente desarrollo está unido a la evolución de procedimientos basados en la inteligencia artificial. Este grupo incluye un amplio número de algoritmos de búsqueda, como los algoritmos genéticos, la cristalización simulada, la aceptación por umbrales, la búsqueda tabú, las colonias de hormigas, etc.^{4,7}. Estos métodos se han empleado con éxito en áreas diferentes a la ingeniería estructural⁸. Consisten en algoritmos simples, pero que requieren un gran coste computacional, debido a que la función objetivo debe ser evaluada y las restricciones estructurales deben ser comprobadas un gran número de iteraciones. Entre los primeros trabajos de optimización heurística aplicada a las estructuras cabe destacar las contribuciones en 1991-1992 de Jenkins y de Rajeev y Krishnamoorthy^{9,10}. Ambos autores aplican los algoritmos genéticos a la optimización del peso de estructuras metálicas. En cuanto al hormigón estructural, las primeras aplicaciones de 1997 incluyen el trabajo de Coello *et al.*¹¹, quienes aplicaron algoritmos genéticos a la optimización de vigas de hormigón armado. Un año más tarde, Rajeev y Krishnamoorthy¹² aplicaron por primera vez algoritmos genéticos a la optimización de pórticos de edificación de hormigón armado. Trabajos recientes destacables incluyen la optimización de vigas de hormigón armado en 2003 de Hrstka *et al.* y Leps y Sejnoha^{13,14}; las aplicaciones de los algoritmos genéticos a los pórticos de edificación de hormigón armado de Lee y Ahn y Camp *et al.*^{15,16} y la optimización de edificios con forjados macizos de Sahab *et al.*¹⁷. Finalmente, también son mencionables los trabajos de los autores encaminados a la optimización de muros, pórticos y marcos de hormigón armado de obras de paso de carretera mediante técnicas de búsqueda por entornos como la cristalización simulada y la aceptación por umbrales¹⁸⁻²¹.

Los pórticos de edificación objeto de este trabajo son los que habitualmente se emplean en la construcción de edificios en España, donde aproximadamente el 70% de los edificios de viviendas están constituidos por forjados unidireccionales y pórticos planos de hormigón

armado. El sistema más habitual es el de pórticos paralelos entre sí enlazados por forjados unidireccionales. Los pórticos están ideados para soportar cargas verticales y cargas horizontales no elevadas, siendo necesario disponer sistemas de pantallas 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 elementos verticales conocidos, como pilares cuya altura varía entre 3 y 6 m. A las jácenas se les suele imponer el mismo canto que a los forjados, no permitiéndose las vigas descolgadas, lo que suele conllevar que el estado límite de flechas sea determinante. Por su parte, los pilares deben mantener o reducir las dimensiones con la altura, siendo habitual que se impongan numerosas restricciones arquitectónicas en las dimensiones de los mismos. Jácenas y pilares se calculan para soportar las acciones prescritas por la norma NBE AE-88 y deben verificar los estados límites de la Instrucción de hormigón estructural EHE^{22,23}.

El objetivo de este trabajo es investigar en la optimización heurística de este tipo de estructuras. La metodología ha consistido en tomar como variables las dimensiones, materiales y armados de los pórticos y desarrollar primero un módulo de cálculo de esfuerzos y comprobación de estados límite. Posteriormente se han programado dos metaheurísticas de búsqueda por entornos de coste óptimo. Las dos metaheurísticas empleadas han sido la aceptación por umbrales y la cristalización simulada. También se presentan resultados de dos heurísticas auxiliares que son la búsqueda aleatoria y el método del gradiente.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de optimización de estructuras de hormigón que se plantea consiste en una optimización económica. Se trata de minimizar la función objetivo F de la expresión (1), verificando además las restricciones de la expresión (2).

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

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

Nótese que x_1, x_2, \dots, x_n son las variables discretas de diseño cuya combinación es objeto de optimización y p_1, p_2, \dots, p_m son los parámetros asociados al problema. Obsérvese que en la expresión (1) la función objetivo es una función de coste expresada por el sumatorio de costes unitarios por mediciones; y que g_j en la expresión (2) son todas las restricciones o conjunto de estados límite que debe verificar la estructura.

Variabes

El número de variables considerado es función del número de vanos y de plantas del pórtico de edificación. En la Tabla I se resumen las variables consideradas para un pórtico no simétrico, donde N_v es su número de vanos y N_p su número de plantas o forjados. Nótese que un pórtico habitual en edificación de 4 vanos y 8 plantas tendría 377 variables de diseño, y que el pórtico simétrico simple de 2 vanos y 4 plantas, empleado en la calibración de las metaheurísticas de los siguientes apartados, tiene 81 variables. Estas variables son las que definen la geometría de las secciones de vigas y pilares, los tipos de acero y de hormigones y los armados del pórtico. El resto de datos necesarios para calcular un pórtico concreto son lo que denominamos parámetros en el apartado siguiente. Lógicamente, los parámetros son datos de partida y no objeto de optimización, sino de futuros estudios paramétricos.

Los tres primeros grupos de variables en la Tabla I son el tipo de acero y los hormigones de pilares y vigas de cada planta. El tipo de acero varía entre el B400S y el B500S definidos por la EHE. En cuanto a los hormigones, pueden variar entre HA-25 y HA-50 con escalones

Descripción	Núm. de variables
Límite elástico del acero en vigas y pilares (N/mm ²)	1
Resistencia característica del hormigón en vigas (N/mm ²)	N_P
Resistencia característica del hormigón en pilares (N/mm ²)	N_P
Ancho de vigas (m)	N_P
Canto de vigas (sólo si las vigas son descolgadas) (m)	N_P
Ancho de pilares (m)	$N_P \times (N_V + 1)$
Canto de pilares (m)	$N_P \times (N_V + 1)$
Armadura base inferior en vigas (cm ²)	N_P
Armadura de refuerzo inferior en vigas (cm ²)	$N_P \times N_V$
Armadura base superior en vigas (cm ²)	N_P
Armadura de refuerzo superior en vigas (cm ²)	$N_P \times (N_V + 1)$
Armadura transversal en vigas	$3 \times N_P \times N_V$
Armadura longitudinal en pilares (cm ²)	$N_P \times (N_V + 1)$
Armadura transversal en pilares (cm ²)	$N_P \times (N_V + 1)$
NÚMERO TOTAL DE VARIABLES CON VIGAS DESCOLGADAS	$1 + 11 \times N_P + 9 \times N_V \times N_P$
NÚMERO TOTAL DE VARIABLES CON VIGAS PLANAS	$1 + 10 \times N_P + 9 \times N_V \times N_P$

Tabla I. Número de variables en un pórtico no simétrico

de 5 MPa. Con esta variación de materiales se pretende poder estudiar la idoneidad de los materiales con la altura y el número de plantas. Nótese que en trabajos anteriores de pórticos de edificación, tanto el tipo de acero como el tipo de hormigón eran considerados parámetros del análisis y no variables de diseño^{12,15,16}. Los cuatro siguientes grupos de variables son las dimensiones de secciones de vigas y pilares. Por simplicidad, se ha considerado un único ancho y canto de vigas por planta, pudiendo adoptar 106 valores distintos con un mínimo de 0.15 m y un máximo de 1.20 m. Por su parte, las dimensiones de los pilares son distintas en cada pilar del pórtico. Cada lado del pilar puede adoptar 20 valores entre un mínimo de 0.25 m y un máximo de 1.20 m con escalones de 5 cm. La armadura de las jácenas de cada planta se representa en las Figuras 1 y 2. Nótese que se han dispuesto armaduras base de positivos y negativos con 25 posibles valores con un mínimo de 2Ø10 y un máximo de 5Ø25. La armadura longitudinal se complementa con refuerzos de positivos en vanos y de negativos sobre pilares intermedios y extremos. Las longitudes de las barras de refuerzo de las vigas son constantes, habiéndose dejado para futuros trabajos la posibilidad de hacer variables las medidas de los refuerzos y de las zonas de cortante. Respecto al armado de cortante de las vigas, se han considerado tres zonas distintas en cada una de ellas. En cuanto a la armadura longitudinal de pilares, se han considerado 330 posibles armados con un mínimo de 4Ø12 y un máximo de 34Ø25. Para la armadura transversal en pilares se han considerado 21 posibles armados. Nótese que la combinación de dimensiones y armados puede dar lugar a esquemas de armado que incumplan las distancias mínimas o máximas entre barras de acero, lo que se comprueba descartando las combinaciones no viables. Es importante señalar que se ha optado por variables discretas y no continuas, lo que permite la comprobación detallada del ELS de fisuración, de distancias entre armaduras y de separaciones de armaduras transversales. Todas las tablas de valores discretos de las variables se detallan en la referencia 24 y se omiten en este trabajo para simplificar la presentación. También es importante señalar las diferencias con los trabajos de Lee y Ahn¹⁵ y de Camp *et al.*¹⁶ donde las dimensiones de vigas y pilares se asocian con un único armado, i.e. se consideran vigas y pilares tipo, lo que reduce notablemente la combinatoria de las posibles soluciones.

El conjunto de combinaciones de valores de las n variables de diseño del pórtico lo denominaremos espacio de soluciones. Tal espacio es en la práctica ilimitado, por lo que se conoce como explosión combinatoria; en el ejemplo de 2 vanos y 4 plantas usado más adelante el número de soluciones es del orden de 10^{108} . Cada vector de n variables de diseño define una solución de pórtico que tendrá un coste aplicando la expresión (1). Las soluciones que cumplan las restricciones de los estados límite de la expresión (2) las denominaremos soluciones factibles, y las que incumplan alguna restricción, soluciones no factibles.

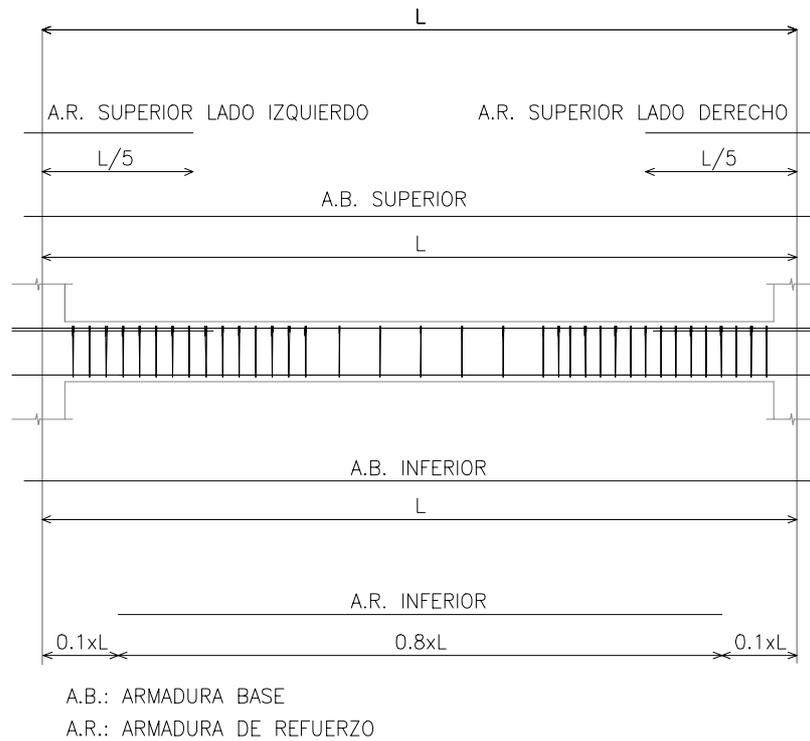


Figura 1. Armaduras longitudinales en vigas

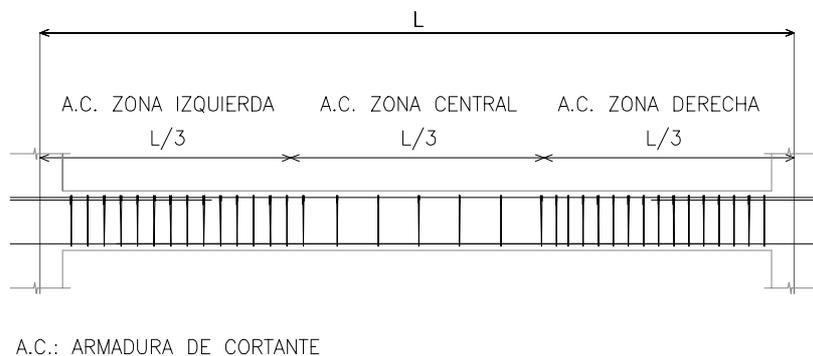


Figura 2. Armadura de cortante en vigas

Parámetros

Los parámetros del cálculo del pórtico son todas aquellas magnitudes que se toman como datos y que no son parte de la optimización. Se dividen en geométricos, relativos a las acciones consideradas, de coeficientes de seguridad y de ambiente exterior respecto de la durabilidad. Los principales parámetros geométricos son las luces de los vanos y las alturas de las plantas. En la Figura 3 se representa el pórtico de 2 vanos y 4 plantas considerado para la calibración de las heurísticas de los siguientes apartados. Las acciones consideradas se detallan en la Tabla II, habiéndose considerado un reparto de las cargas por ámbitos de actuación, que los pórticos se encuentran separados 5 m en sentido transversal y que los forjados son unidireccionales de 0.29 m de canto. Asimismo, se ha considerado que las vigas son descolgadas, que el nivel de control de la ejecución es normal y que la clase general de exposición ambiental es I. Finalmente se ha adoptado un recubrimiento de las armaduras de 30 mm y un tamaño máximo del árido de 25 mm.

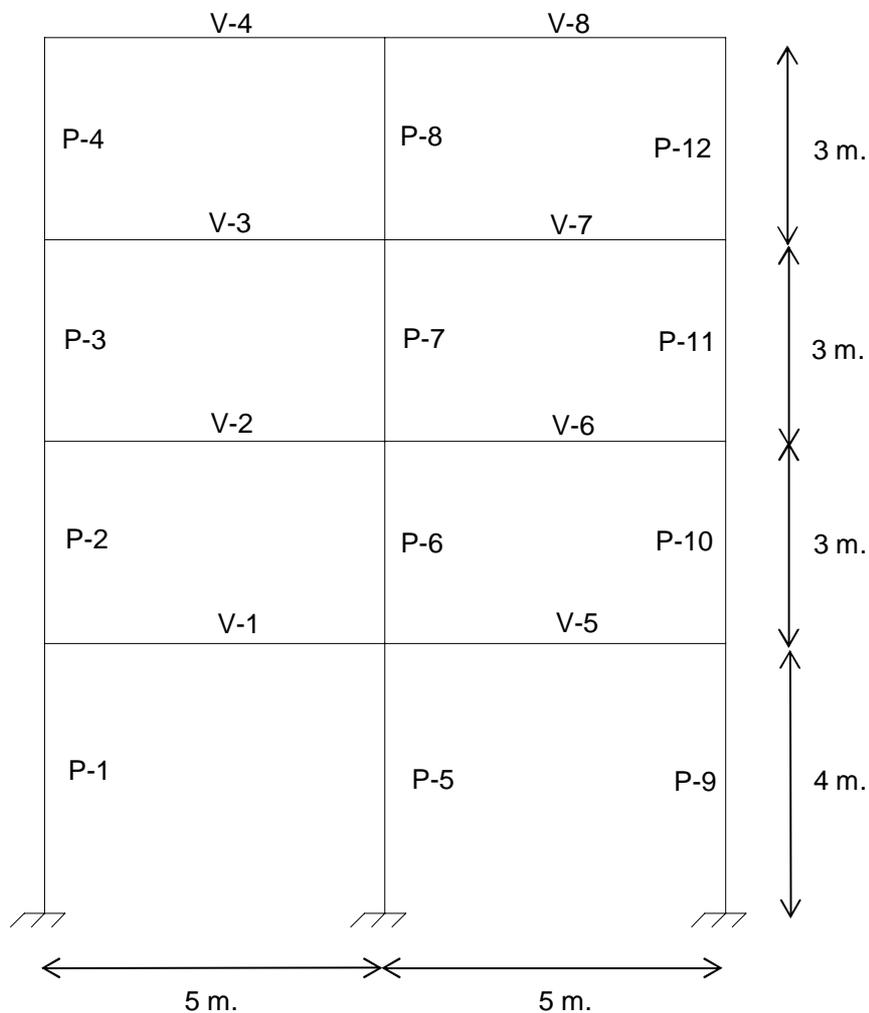


Figura 3. Definición geométrica del pórtico optimizado

Descripción del parámetro	Valor
Cargas permanentes en forjados en plantas 1, 2 y 3	Peso propio forjados: 3 KN/m ² Peso pavimentos, falsos techos: 1 KN/m ²
Cargas permanentes en forjado de cubierta	Peso propio forjados: 3 KN/m ² Peso material de cubierta, falsos techos: 3 KN/m ²
Sobrecarga de uso en forjados de plantas 1, 2 y 3	3 KN/m ²
Sobrecarga de uso en forjado de cubierta	1 KN/m ²
Altitud topográfica del emplazamiento del edificio	0 m.
Zona eólica del emplazamiento del edificio	X
Situación topográfica del edificio	Normal
Nivel de control de la ejecución	Normal
Porcentaje que supone el peso de los elementos no estructurales sobre las cargas permanentes totales	Plantas 1, 2 y 3: 25 % Cubierta: 50 %
Edad de la estructura cuando se descimbra	14 días
Edad de la estructura cuando se aplican las cargas muertas y la sobrecarga cuasi-permanente	28 días
Edad de la estructura para el cálculo de las flechas	8.000 días

Tabla II. Parámetros relativos a las acciones

Función de coste

La función objetivo considerada es la función de coste definida en la expresión (1), donde c_i son los precios unitarios y m_i las mediciones de las 16 unidades de obra consideradas. La función de coste 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 básicos considerados se detallan en la Tabla III. Estos precios se han obtenido de una encuesta entre contratistas y subcontratistas de obras públicas de edificación en septiembre de 2004. Nótese el elevadísimo precio del acero de armar debido a la fortísima subida de la demanda en China.

Dadas las 81 variables de nuestro problema, la medición y valoración de una solución es inmediata. El principal esfuerzo de computación para evaluar una solución se centra principalmente en las restricciones o estados límite del siguiente apartado. En este punto es importante señalar que numerosos trabajos, especialmente los que aplican algoritmos genéticos, suelen transformar el problema en uno sin restricciones introduciendo penalizaciones en la función de coste cuando se incumplen las restricciones del problema. Las penalizaciones son pequeñas para incumplimientos leves y muy fuertes para incumplimientos mayores. En este trabajo se ha optado por trabajar sólo con soluciones factibles, descartándose todas las no factibles y el uso de penalizaciones.

Unidad	Descripción del precio	Coste (€)
Kg.	Acero B-400 en vigas	1.27
Kg.	Acero B-500 en vigas	1.30
m ³	Hormigón HA-25 en vigas	78.40
m ³	Hormigón HA-30 en vigas	82.79
m ³	Hormigón HA-35 en vigas	98.47
m ³	Hormigón HA-40 en vigas	105.93
m ³	Hormigón HA-45 en vigas	112.13
m ³	Hormigón HA-50 en vigas	118.60
Kg	Acero B-400 en pilares	1.23
Kg	Acero B-500 en pilares	1.25
m ³	Hormigón HA-25 en pilares	77.80
m ³	Hormigón HA-30 en pilares	82.34
m ³	Hormigón HA-35 en pilares	98.03
m ³	Hormigón HA-40 en pilares	105.17
m ³	Hormigón HA-45 en pilares	111.72
m ³	Hormigón HA-50 en pilares	118.26
m ²	Encofrado-desencofrado de vigas	25.05
m ²	Encofrado-desencofrado de pilares	22.75
m ²	Cimbrado-descimbrado de vigas	38.89

Tabla III. Precios de las unidades de obra

Restricciones estructurales

Las restricciones estructurales de la expresión (2) son todos los estados límite que debe verificar la estructura. El paso previo a la comprobación de estados límite es el cálculo de envolventes de esfuerzos debidos a las acciones prescritas por la NBE AE-88. La estructura se ha calculado por el método matricial incluyendo la deformabilidad por axiles mediante un análisis estándar elástico lineal con características mecánicas brutas de las secciones. La estructura se supone arriostrada transversalmente por los forjados, por lo que se consideran tres grados de libertad por nudo. Los 6 casos de carga considerados son cargas permanentes, sobrecarga de uso en vanos pares e impares, sobrecarga en todos los vanos y viento en dos direcciones opuestas. Se consideran 48 combinaciones de las que se obtienen envolventes de flectores de ELS de cuasipermanentes, ELS en combinación rara y ELU de flectores, axiles y cortantes. También se calculan las flechas activas y totales de las jácenas del pórtico.

Conocidas las flechas y las envolventes de esfuerzos en ELS y ELU, se procede a la comprobación de los correspondientes estados límite conforme a las prescripciones de la EHE. Téngase en cuenta que conocidos los 81 valores que definen una solución, se conoce la geometría, materiales y armados dispuestos. Nótese que se realiza una comprobación y no se intenta dimensionar las armaduras en el sentido habitual. En este sentido cabe señalar que generalmente se dimensionan las armaduras en ELU de flexión, para seguidamente comprobar y redimensionar en ELS de fisuración y flechas, y finalmente se dimensiona a cortante sin alterar la armadura longitudinal. Este orden convencional es efectivo, pero 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 que puede resultar más económico que disponer armadura de cortante²¹.

Los cálculos en ELU de flexión en vigas incluyen el cálculo del diagrama de interacción N_u - M_u y de las holguras de la solución medidas radialmente, es decir, lanzando radios por

el origen que pasen por los esfuerzos de cálculo N_d-M_d y buscando la intersección con el diagrama de interacción. El cálculo de pilares en ELU incluye las excentricidades adicionales de pandeo prescritas por 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 un cálculo de holguras medidas como relación entre la abertura de fisura obtenida y la máxima permitida según el ambiente. Por su parte, el ELU de cortante incluye las comprobaciones de los dos cortantes últimos y las correspondientes holguras. 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. Finalmente se comprueban las disposiciones relativas a las armaduras en cuanto a cuantías mecánicas mínimas y máximas, cuantías geométricas mínimas, separaciones mínimas y máximas de armaduras y cuantías mínimas de armadura transversal y separaciones máximas de cercos. De todas las prescripciones se calculan holguras en previsión del uso de heurísticas con penalizaciones en la función de coste en futuros trabajos. Dados los armados empleados, las comprobaciones se hacen en arranque y cabeza de pilares y en los extremos y centros de vano de las vigas.

HEURISTICAS EMPLEADAS

Las cuatro heurísticas empleadas en este trabajo son la búsqueda aleatoria, el método del gradiente, la aceptación por umbrales y la cristalización simulada. Los dos primeros métodos son lo que se denomina heurísticas, es decir, métodos que proporcionan buenas soluciones pero que no convergen al óptimo global. Los dos segundos se denominan metaheurísticas porque son capaces de resolver problemas difíciles de optimización combinatoria y, además, está comprobado que son aplicables a problemas de optimización de distinta naturaleza.

El primer método empleado es la búsqueda aleatoria o random walk⁴, que consiste en generar soluciones dando valores aleatorios a las variables del problema. Cada solución se valora y se evalúa para comprobar si verifica las restricciones. El proceso se repite un número prefijado de iteraciones conservando la solución factible de menor coste. El algoritmo no alcanza generalmente ningún valor óptimo, pero sirve para explorar el espacio de soluciones y determinar el porcentaje de soluciones factibles respecto del total de las generadas. Se programa porque se emplea como un generador de soluciones factibles que sirven de partida a otras heurísticas. Asimismo, disponer de un generador de soluciones permite estudiar la dependencia de la solución inicial de los resultados de las metaheurísticas. Los primeros resultados indicaron que el porcentaje de soluciones factibles era inferior al 1%, por lo que se incluyeron algunas horquillas para mejorar este porcentaje según se explica en el siguiente apartado.

El segundo método empleado es el método del gradiente⁴. Este método requiere una solución factible de partida. A partir de esta solución se aplican movimientos a los valores de las variables. Se entiende por movimiento una variación pequeña en más o en menos de los valores de varias o de todas las variables que definen la solución actualizada. Dada una solución, se aplica un movimiento y se obtiene una nueva solución. Esta nueva solución se valora y se evalúa. Si mejora el coste y es factible, se adopta como nueva solución de partida. El proceso se repite hasta que las mejoras se agotan, adoptándose un número máximo de iteraciones sin mejora como criterio de parada. El método mejora los resultados de la búsqueda aleatoria, pero es poco eficiente, ya que es conocido que converge a óptimos locales de los que no es capaz de salir. Se han programado un total de diez movimientos aleatorios. Los diez movimientos, llamados GFB01 a GFB10, han consistido en variar aleatoriamente en más o menos varias variables (3, 6, 9, 12 y 24 variables para los cinco primeros y hasta 3, 6, 9, 12 y 24 para los cinco segundos). Dado que la búsqueda es

aleatoria las ejecuciones se repiten nueve veces para obtener valores medios y mínimos de la búsqueda. El interés de programar este método radica en obtener los movimientos más eficientes para centrarse en ellos en las dos metaheurísticas restantes: la aceptación por umbrales y la cristalización simulada.

Seguidamente se ha programado la metaheurística de la aceptación por umbrales o threshold accepting (TA en adelante), que fue propuesta originalmente por Dueck y Scheuert²⁵. En la Figura 4 se representa el diagrama de flujo de este algoritmo y el de la cristalización simulada. Se parte de una solución inicial P_0 y se define un umbral inicial de aceptación de soluciones U_0 . Se da un movimiento a la solución, como en el método del gradiente anterior, y se valora y evalúa la nueva solución P_1 . La nueva solución se acepta si es factible y si el coste es menor que la anterior o, aunque sea mayor, si el incremento de coste es menor que el umbral que se permite. El umbral inicial de aceptación se va decreciendo mediante una progresión geométrica, realizándose un número de iteraciones en cada umbral que reciben el nombre de ciclo. En este trabajo el proceso se detiene cuando no se produce ninguna mejora de la solución tras un número de ciclos. El método permite salvar óptimos locales para umbrales altos y gradualmente converge al ir reduciendo a cero el umbral de aceptación. Los movimientos empleados han sido variar 3 o hasta 3 variables en cada iteración. El método requiere de calibración para ajustar el umbral inicial, el número de iteraciones de cada ciclo, la velocidad de disminución del umbral y el número de ciclos sin mejora como criterio de parada.

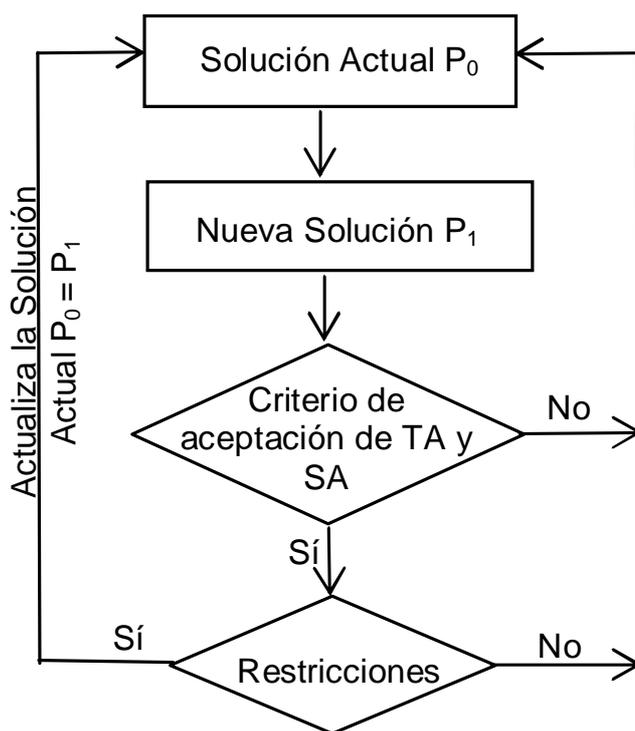


Figura 4. Diagrama de flujo de las metaheurísticas TA y SA.

El último método programado es el de la cristalización simulada o simulated annealing (SA en adelante), que fue propuesto originalmente por Kirkpatrick y otros²⁶ para el diseño de circuitos electrónicos. El algoritmo está basado en la analogía de la formación de cristales a partir de masas fundidas a altas temperaturas y dejadas enfriar lentamente. Para altas temperaturas se forman configuraciones de mayor energía que las previas de forma aleatoria

y según se enfría la masa se reduce la probabilidad de configuraciones de mayor energía que las previas. El proceso se rige por la expresión de Boltzmann $\exp(-\Delta E/T)$ donde ΔE es el incremento de energía de la nueva configuración y T es la temperatura. A medida que se enfría la masa, se reduce la probabilidad de que se formen configuraciones de mayor energía. El diagrama de flujo del algoritmo se representa en la Figura 4. Se parte de una solución inicial factible generada aleatoriamente y de una temperatura inicial alta. Se da un movimiento a la solución como en el método del gradiente anterior y se valora y evalúa la nueva solución P_1 . La nueva solución se acepta si es factible y si el coste es menor que la anterior o, aunque sea mayor, si el valor de un número aleatorio de 0 a 1 es menor que $\exp(-\Delta/T)$ -donde Δ es el incremento de coste y T es la temperatura-. La temperatura inicial se va decreciendo geométricamente ($T=kT$) mediante un coeficiente de enfriamiento k . En cada temperatura se permite un número de iteraciones denominadas cadenas de Markov. Al igual que el TA, el SA permite salvar óptimos locales especialmente para, temperaturas altas y, gradualmente converge al, ir reduciendo a cero la temperatura. En la Figura 5 se representa una típica evolución del coste y la temperatura según avanza el proceso. El criterio de parada se suele limitar a reducir la temperatura a un 1% de la inicial o a detener el proceso cuando no se produce ninguna aceptación tras un número prefijado de cadenas de Markov. Los movimientos empleados para este método ha sido de nuevo los consistentes en variar 3 ó hasta 3 de las variables en cada iteración. El método requiere de calibración para ajustar la temperatura inicial, la longitud de las cadenas de Markov, el coeficiente de enfriamiento y el número de cadenas sin mejora como criterio de parada.

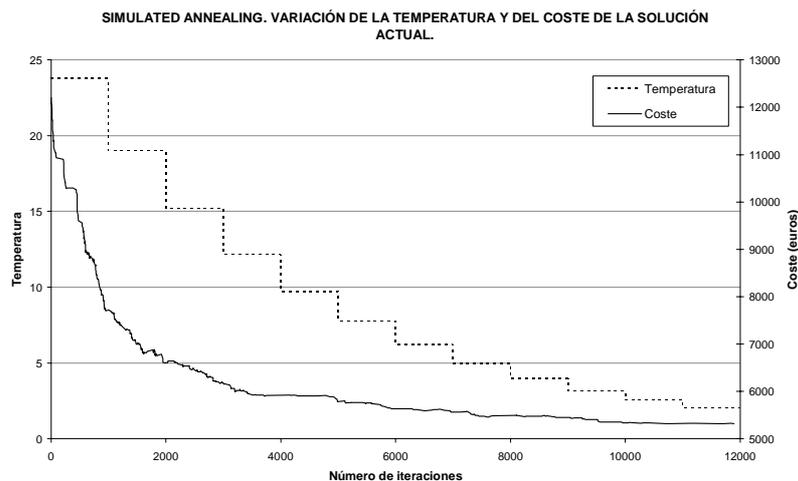


Figura 5. Evolución de la temperatura y del coste de la solución actual en una ejecución de un algoritmo tipo SA

APLICACIÓN DE LAS BUSQUEDAS HEURISTICAS

Las cuatro heurísticas del apartado anterior se han aplicado al mismo pórtico de 2 vanos y 4 plantas de la Figura 3 con los parámetros de cargas indicados en la Tabla II, con el objeto de poder comparar la eficiencia de las mismas. A continuación se detallan los principales resultados obtenidos.

Resultados de la búsqueda aleatoria

Según se ha mencionado anteriormente, para incrementar el porcentaje de soluciones factibles se incluyeron horquillas en algunas variables. Las horquillas consisten en acotar algunas variables de modo que la verificación de algunas restricciones sea automática. Así,

en pilares se ha adoptado una armadura longitudinal que cumple los mínimos geométricos, una armadura de cortante superior a la mínima y una separación de las armaduras longitudinales y de cortante que cumple las distancias mínimas y máximas. En lo que respecta a vigas, se ha comprobado que la armadura base supera la cuantía mínima geométrica, que la armadura base superior e inferior supera los mínimos de armadura de compresión, que el total de la armadura inferior y superior supera los mínimos mecánicos de flexión y que la armadura de cortante supera las cuantías mínimas. Con estas horquillas el porcentaje de soluciones factibles asciende al 10%.

En la Figura 6 se dan los resultados de la búsqueda aleatoria para un random walk de 500 iteraciones con horquillas. Los resultados para un número de iteraciones de 100, 500, 1000, 5000, 10000, 50000 y 100000 se detallan en la referencia 24, habiéndose obtenido como mejor resultado una solución de 12538€ con un tiempo de 3.5 horas de computación en un ordenador personal Pentium IV a 2.53 GHz con programación en Visual Basic 6.0.

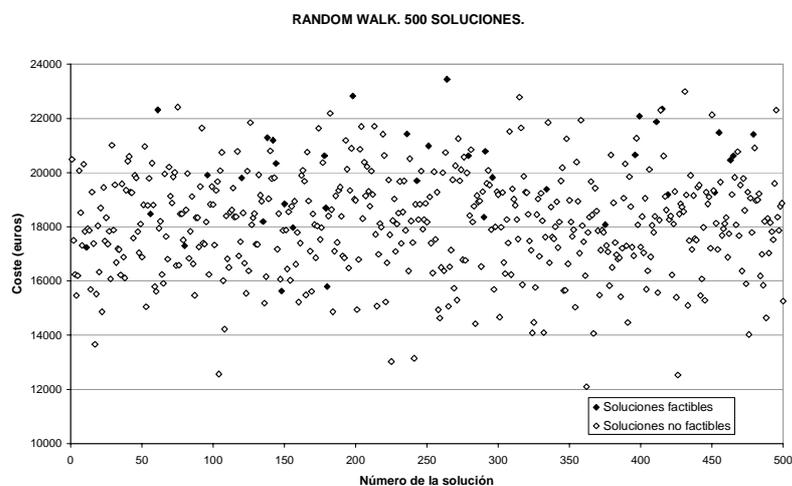


Figura 6. Ejemplo de los resultados de la aplicación de una heurística Random Walk

Resultados del método del gradiente

Este método se programa para evaluar los movimientos más eficientes. Los diez movimientos considerados han sido del GFB01 al GFB10, que han consistido en variar aleatoriamente en más o menos varias variables (3, 6, 9, 12 y 24 variables para los cinco primeros y hasta 3, 6, 9, 12 y 24 variables para los cinco segundos). Se ha variado también el número de iteraciones sin mejora de 10 a 10000, habiéndose probado un total de 62 heurísticas. En todos los casos se ha partido de una misma solución factible inicial obtenida mediante el mejor random del apartado anterior cuyo coste es de 12538€. Dado que el procedimiento es aleatorio, los resultados se han repetido nueve veces para obtener resultados medios y mínimos.

Los movimientos más efectivos han resultado ser los GFB01 y GFB06 (variación aleatoria de 3 y de hasta 3 variables, respectivamente). En la Figura 7 se representan los resultados de coste mínimo en función del número de iteraciones sin mejora para un número fijo de variables modificadas en cada movimiento. El mejor resultado tiene un coste de 4668€ con 10000 iteraciones sin mejora usando el movimiento GFB01 (variando 3 variables a la vez aleatoriamente). Consecuentemente, se optó preferentemente por este movimiento GFB01 para programar las dos metaheurísticas restantes. El tiempo de computación es de 1.9 horas.

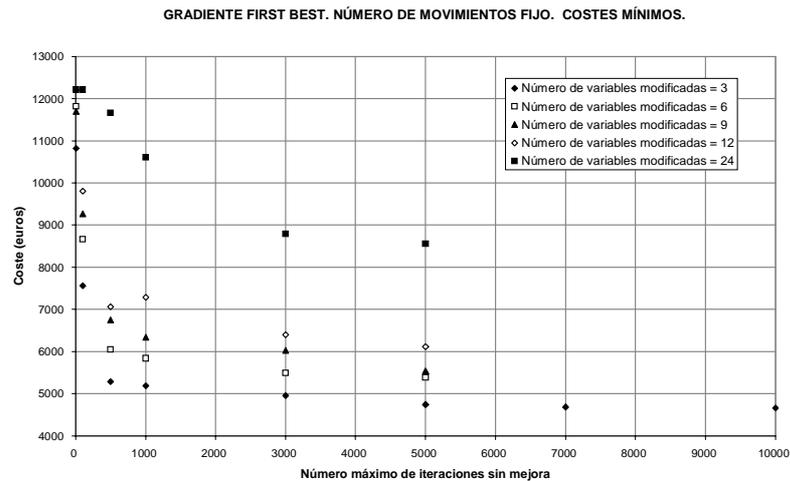


Figura 7. Costes mínimos de las soluciones óptimas encontradas mediante el empleo de heurísticas tipo Gradiente

Resultados de la aceptación por umbrales

El TA se ha aplicado de nuevo al mismo pórtico de 2 vanos y 4 alturas empleándose los movimientos que proporcionaron los mejores resultados en el método del gradiente (heurísticas GFB01 y GFB06). El método requiere calibrar el umbral inicial, la velocidad de reducción del umbral, el número de iteraciones por ciclo y el número de ciclos sin mejora como criterio de parada. El umbral inicial se calibró usando el método de Medina²⁷, que ajusta el umbral inicial partiendo de un valor inicial y modificándolo hasta que el porcentaje de aceptaciones con coste mayor al de la solución inicial esté entorno al 30%. Se probaron 52 heurísticas con 500, 1000, 3000, 5000 y 70000 iteraciones por ciclo, velocidades de reducción del umbral de 0.80, 0.90 y 0.99 y con uno y dos ciclos sin mejora como criterio de parada. Los mejores resultados se obtuvieron modificando un número máximo de 3 variables en cada movimiento, empleando 70000 iteraciones por ciclo, una velocidad de reducción del umbral de 0.90, y dos ciclos sin mejora como criterio de parada (véase la Figura 8). La mejor solución óptima encontrada tiene un coste de 3586€ habiéndose empleado un tiempo de computación de 20,2 horas en obtenerla.

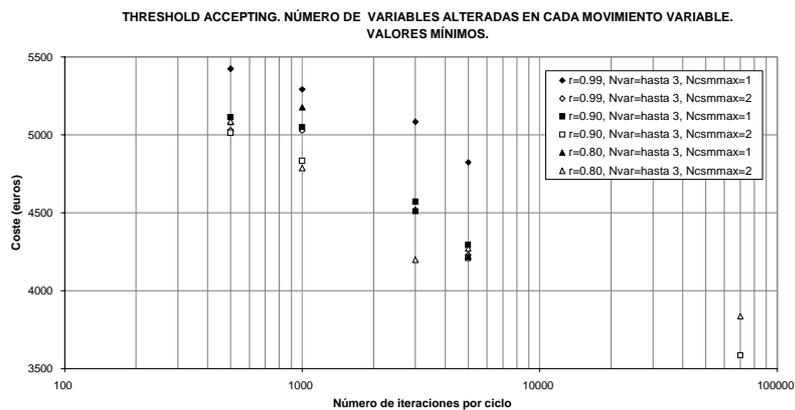


Figura 8. Costes mínimos de las soluciones óptimas encontradas mediante varias heurísticas TA

Resultados de la cristalización simulada

Finalmente se ha aplicado a la estructura objeto de estudio la heurística SA empleando los movimientos GFB01 y GFB06. El método requiere calibrar la temperatura inicial, el coeficiente de enfriamiento, la longitud de las cadenas de Markov y el número de cadenas sin mejora como criterio de parada. La temperatura inicial se calibró usando de nuevo el método de Medina²⁷ y se probaron 64 heurísticas con longitudes de cadenas de Markov de 500, 1000, 3000, 5000, 7000, 10000 y 70000; coeficientes de enfriamiento de 0.80, 0.90 y 0.99, y 1-2 cadenas sin mejora como criterio de parada. Los mejores resultados se obtuvieron para la cadena más larga, con un coeficiente de enfriamiento de 0.80, y dos cadenas de Markov sin mejora como criterio de parada (véase la Figura 9).

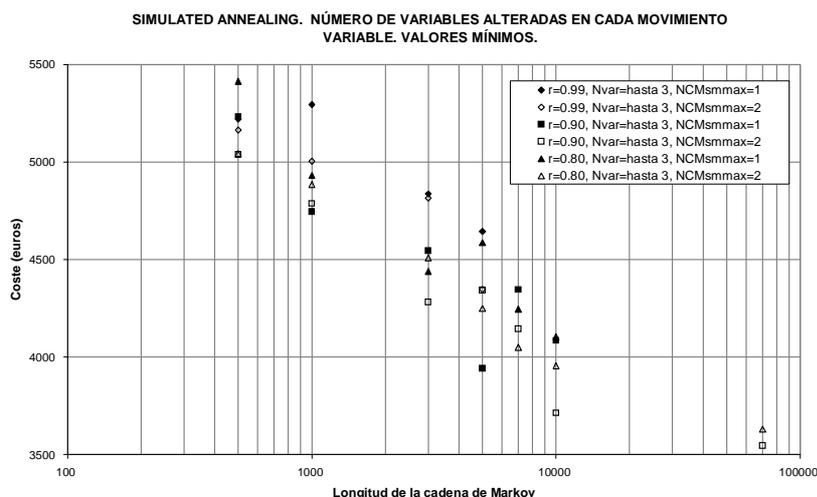


Figura 9. Costes mínimos de las soluciones óptimas encontradas mediante varias heurísticas SA

Ejecución	Coste (€)	Tiempo de computación (h)
R1	3634	13.0
R2	3932	10.3
R3	3824	18.2
R4	4097	7.8
R5	4065	11.7
R6	3546	21.7
R7	4226	9.7
R8	3893	17.8
R9	3724	17.8
MEDIA	3882	14.2
DESVIACIÓN TÍPICA	225	4.8

Tabla IV. Resultados de las nueve ejecuciones de la mejor heurística SA

El mejor resultado obtenido tiene un coste de 3546€ y su obtención ha requerido un tiempo de computación de 21.7 horas, lo que mejora los resultados en costes del método de la aceptación por umbrales un 1.1% con un incremento del tiempo de computación del 7.4%.

De nuevo los resultados se corresponden con nueve ejecuciones de la heurística, dándose los nueve valores obtenidos en la Tabla IV, donde también figuran los valores medios y desviaciones típicas de tiempos y costes. Las principales variables geométricas y de armado de la solución más económica obtenida se resumen en la Figura 10 y en la Tabla V. Los materiales resultan ser: acero B-500-S; hormigones en pilares, HA-30 en la primera y última planta y HA-40 en las dos intermedias, y hormigones HA-30 en las vigas de todas las plantas.

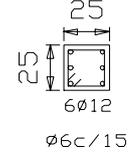
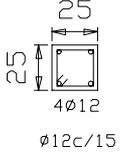
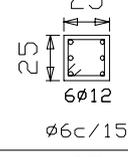
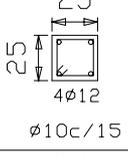
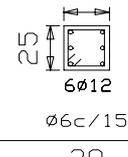
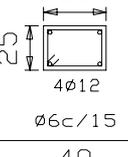
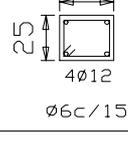
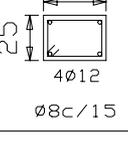
PILAR	DIM.	PILAR	DIM.	
P4=P12		P8		PLANTA CUBIERTA
P3=P11		P7		PLANTA TERCERA
P2=P10		P6		PLANTA SEGUNDA
P1=P9		P5		PLANTA PRIMERA
				CIMENTACIÓN

Figura 10. Dimensiones geométricas y armado de los pilares de la estructura óptima

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Comparación de heurísticas

La Tabla VI resume los resultados de costes y tiempos de computación de las cuatro heurísticas empleadas. Se observa que tanto TA como SA dan resultados similares de 3586-3546€ de coste para la solución más económica. La mejora respecto de los métodos de búsqueda aleatoria y del gradiente es del 253.6% y del 31.6%, respectivamente. En tiempos de computación, TA y SA emplean tiempos del mismo orden de magnitud (21 horas), mientras que la estrategia de búsqueda aleatoria y el gradiente emplean tiempos 5.7 y 10.4 veces menores, respectivamente. Es importante señalar que para el tiempo reducido de 1.9 horas del gradiente las metaheurísticas SA-TA dan resultados que mejoran los del gradiente en torno a un 8% en costes.

NOMBRE	DIMENSIONES (cm)		ARMADURA INFERIOR		ARMADURA SUPERIOR			ARMADURA DE CORTANTE		
	b	h	BASE	REFUERZO	BASE	REF. IZQDA.	REF. DERECHA	Z. IZQUIERDA	Z. CENTRAL	Z. DERECHA
VIGA 1	0,20	0,51	2 ϕ 10	1 ϕ 20	2 ϕ 20	—	1 ϕ 25	ϕ 8c/15	ϕ 6c/25	ϕ 12c/25
VIGA 2	0,20	0,60	2 ϕ 12	2 ϕ 12	2 ϕ 12	1 ϕ 12	1 ϕ 25	ϕ 10c/25	ϕ 6c/25	ϕ 8c/15
VIGA 3	0,20	0,59	2 ϕ 10	1 ϕ 20	2 ϕ 10	2 ϕ 12	1 ϕ 25	ϕ 8c/20	ϕ 6c/25	ϕ 8c/15
VIGA 4	0,20	0,63	2 ϕ 10	2 ϕ 16	2 ϕ 16	—	2 ϕ 12	ϕ 10c/30	ϕ 8c/30	ϕ 8c/15

Tabla V. Dimensiones y armados de las vigas de la estructura óptima

Heurística	Coste (€)	Tiempo de computación (h)
Random Walk	12538	3.5
Gradiente	4668	1.9
Threshold Accepting	3586	20.2
Simulated Annealing	3546	21.7

Tabla VI. Resultados de los mejores resultados obtenidos mediante los algoritmos planteados

Estructura óptima

La referencia 24 contiene un análisis detallado de la estructura óptima. Las principales conclusiones que se extraen de ella son:

1) Análogamente a como se ha comprobado en otros estudios^{18,20,21}, la estructura óptima tiene acero B-500-S, por lo que, en posteriores trabajos, podría directamente considerarse la calidad del acero como un parámetro más y no como una variable. Asimismo, la estructura óptima tiene hormigones de diferentes tipos y de calidad superior a la habitualmente empleada en este tipo de estructuras (HA-25).

2) Los estados límites que condicionan el diseño de las vigas son los siguientes: el de deformaciones (especialmente el cumplimiento de las flechas activas); el de agotamiento por solicitaciones normales, y el cortante de agotamiento por tracción en el alma en las zonas extremas de las vigas. La fisuración no es en ningún caso un estado límite dimensionante.

3) Las vigas de la estructura óptima se caracterizan por tener anchos mínimos y descuelgues de hasta 34 cm, lo que aconseja introducir como una restricción más el canto máximo que pueden tener. Por otra parte, la armadura de compresión resulta necesaria por cálculo y las cuantías de armadura longitudinal son superiores a los mínimos reglamentarios. La armadura de cortante en la zona central viene condicionada por las disposiciones constructivas y mínimos reglamentarios.

4) Las restricciones que condicionan el diseño de pilares son el estado límite último de inestabilidad y el cumplimiento de las cuantías geométricas mínimas en los pilares interiores y de plantas bajas.

5) Los pilares de la estructura óptima se caracterizan porque las cuantías de la armadura longitudinal son mayores en los pilares de plantas altas y/o de medianería; la armadura de cortante viene condicionada por el cumplimiento de los mínimos y de las disposiciones constructivas de la EHE; y la esbeltez mecánica es lo suficientemente alta como para que el pandeo deba ser tenido en cuenta en el cálculo, pero lo suficientemente baja como para que este fenómeno pueda ser analizado con el método simplificado de la EHE.

CONCLUSIONES

En vista de lo expuesto anteriormente, cabe señalar las siguientes conclusiones:

1) La generación aleatoria de soluciones no es eficiente, dado que sólo un 1% de las soluciones resultan factibles. El empleo de horquillas permite elevar el número de soluciones factibles al 10%.

2) Los algoritmos que permiten una degradación acotada de la solución actual (como TA y SA) proporcionan óptimos de mayor calidad que aquéllos que no la permiten (como la búsqueda aleatoria y el gradiente). La mejora del SA frente al gradiente y la búsqueda aleatoria es del 31.6% y 253.6%, respectivamente, en términos del coste de la solución óptima.

3) Las técnicas metaheurísticas planteadas han sido capaces de suplir la experiencia del proyectista en la búsqueda de la solución óptima de un problema estructural.

4) Las características de la solución óptima no hacen necesaria la introducción de modificaciones en los métodos habituales de diseño de pórticos de edificación de hormigón armado.

REFERENCIAS

- 1 M.T. Jones, “*Artificial Intelligence Application Programming*”, Charles River Media, Hingham, Massachusetts, (2003).
- 2 S. Hernández y A. Fontan, “*Practical Applications of Design Optimization*”, WIT, Southampton, (2002).
- 3 R. Fletcher, “*Practical Methods of Optimization*”, Wiley, Chichester, (2001).
- 4 A. Diaz, F. Glover, H.M. Ghaziri, J.L. González, M. Laguna, P. Moscazo y F.T. Tseng, “*Optimización heurística y redes neuronales*”, Paraninfo, Madrid, (1996).
- 5 J.H. Holland, “*Adaptation in natural and artificial systems*”, University of Michigan Press, Ann Arbor, (1975).
- 6 D.E. Goldberg, “*Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*”, Addison-Wesley, (1989).
- 7 F. Glover F. y M. Laguna, “*Tabu Search*”, Kluwer Academic Publishers, Boston, (1997).
- 8 V. Yepes, “Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW”, Tesis doctoral, pp.352, Departamento de Ingeniería del Transporte, Universidad Politécnica de Valencia, (2002).
- 9 W.M. Jenkins, “Structural optimization with the genetic algorithm”, *The Structural Engineer*, Vol. **69**, N° 24/17, pp. 418-422, (1991).
- 10 S. Rajeev y C.S. Krishnamoorthy, “Discrete optimization of structures using genetic algorithms”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. **118**, N° 5, pp. 1233-1250, (1992).
- 11 C.A. Coello, A.D. Christiansen y F. Santos, “A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams”, *Engineering with Computers*, Vol. **13**, pp. 185-196, (1997).
- 12 S. Rajeev y C.S. Krishnamoorthy, “Genetic algorithm-based methodology for design optimization of reinforced concrete frames”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. **13**, pp. 63-74, (1998).
- 13 O. Hrstka, A. Kucerova, M. Leps y J. Zeman, “A competitive comparison of different types of evolutionary algorithms”, *Computers and Structures*, Vol. **81**, pp. 1979-1990, (2003).
- 14 M. Leps y M. Sejnoha, “New approach to optimization of reinforced concrete beams”, *Computers and Structures*, Vol. **81**, pp. 1957-1966, (2003).
- 15 C. Lee y J. Ahn, “Flexural design of reinforced concrete frames by genetic algorithm”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. **129**, N° 6, pp. 762-774, (2003).
- 16 C.V. Camp, S. Pezeshk y H. Hansson, “Flexural design of reinforced concrete frames using a genetic algorithm”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. **129**, N° 1, pp. 105-115, (2003).
- 17 M.G. Sahab, A.F. Ashour y V.V. Toporov, “Cost optimisation of reinforced concrete flat slab buildings”, *Engineering Structures*, Vol. **27**, pp. 313-322, (2005).
- 18 C. Perea, J. Alcalá, V. Yepes y F. González-Vidosa, “Heuristic optimization of reinforced concrete road box frames”, en prensa 2004.

- 19 F. González-Vidosa, V. Yepes, J. Alcalá, M. Carrera y C. Perea, "Simulated annealing optimization of walls, portal and box reinforced concrete road structures", *Proceedings of the Ninth International Conference on Computer Aided Optimum Design in Engineering (OPTI-2005)*, pp. 175-186, Skiathos, Greece, (2005).
- 20 M. Carrera, J. Alcalá, V. Yepes y F. González-Vidosa, "Optimización heurística de pórticos de paso de carretera de hormigón armado", *Hormigón y Acero*, N°. **236**, pp. 85-95, (2005).
- 21 J. Alcalá, M. Carrera, V. Yepes, y F. González-Vidosa, "Cristalización simulada aplicada a la optimización económica de muros ménsula de contención de hormigón armado", *Hormigón y Acero*, N°. **236**, pp. 97-108, (2005).
- 22 M. Fomento, "NBE AE-88. Acciones en la edificación", M.Fomento, (1988).
- 23 M. Fomento, "EHE-98. Instrucción de hormigón estructural", M.Fomento, (1998).
- 24 I. Payá, "Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado", *Trabajo investigación CST/GPRC-04*, pp. 290, Dpto. Ingeniería Construcción, Universidad Politécnica Valencia, abril 2005.
- 25 G. Dueck y T Scheuert, "Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm superior to simulated annealing", *Journal of Computation Physics*, Vol, **90**, pp. 161-175, (1990).
- 26 S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt y M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, Vol. **220**, N°. 4598, pp. 671-680, (1983).
- 27 J.R. Medina, "Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing", *ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. **127**, pp. 213-221, (2001).