

Optimización heurística de pórticos de paso de carretera de hormigón armado

Heuristic optimization of reinforced concrete road portal frames

♦
Miguel Carrera Hueso

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ETSI Caminos, Canales y Puertos. Dpto. Ingeniería Construcción. UPV

♦
Julián Alcalá González

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ETSI Caminos, Canales y Puertos. Dpto. Ingeniería Construcción. UPV

♦
Víctor Yepes Piqueras

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ETSI Caminos, Canales y Puertos. Dpto. Ingeniería Construcción. UPV

♦
Fernando González Vidosa

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ETSI Caminos, Canales y Puertos. Dpto. Ingeniería Construcción. UPV

RESUMEN

El trabajo se centra en optimizar los costes de pórticos de paso de carretera mediante métodos heurísticos y metaheurísticos, demostrando su efectividad. 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 externo de elementos finitos y aplicando las cargas de la IAP-98. Los métodos heurísticos utilizados son la búsqueda aleatoria y el gradiente. Y los métodos metaheurísticos son la búsqueda de aceptación por umbrales y la cristalización simulada. Todos los métodos de búsqueda han sido aplicados a un pórtico tipo de 10 metros de luz horizontal. Se concluye que la cristalización simulada es la metaheurística más eficiente de las 4 heurísticas comparadas.

SUMMARY

This paper deals with the optimization of costs of reinforced concrete portal frames used in road construction. It shows the efficiency of four heuristic and metaheuristic optimization algorithms. 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 external finite element code that applies loads according to the national IAP provisions. Heuristic methods used are the random walk and the gradient method. The metaheuristic methods used are the threshold accepting method and the simulated annealing method. The four methods have been

applied to the same portal frame of 10 m of horizontal span. The comparison of the four heuristic algorithms leads to the conclusion that simulated annealing is more efficient.

1. INTRODUCCION

El diseño de estructuras económicas de hormigón está actualmente muy condicionado a la experiencia previa de los ingenieros proyectistas de estructuras. El proceso habitual se basa en la elección de dimensiones y materiales a partir de reglas sancionadas por la práctica. Consecuentemente, se suele predimensionar la estructura a partir de relaciones prácticas de canto/luz, formas de secciones, espesores de almas, esbelteces máximas, etc. Una vez definida la estructura, se procede al análisis de esfuerzos y al dimensionamiento de armaduras activas y pasivas que verifiquen los estados límite de servicio y rotura prescritos por la normativa. Sólo en los casos en que alguna de las dimensiones o resistencia de materiales son escasos, se redefine la estructura por prueba y error; procediendo al reanálisis de la estructura en contadas ocasiones. Tal proceso da lugar a diseños seguros y conformes a la normativa; pero cuya economía queda, por tanto, muy ligada a la experiencia de los ingenieros proyectistas.

Los métodos de optimización de estructuras se pueden clasificar en dos grandes grupos: los métodos exactos y los métodos heurísticos. Los métodos exactos son los más antiguos [1-5]. Se basan en obtener los óptimos mediante técnicas iterativas de optimización lineal a partir de las expresiones

que definen la función objetivo y las restricciones estructurales. La función objetivo es la expresión que se desea optimizar (e.g. el peso de los elementos de una estructura de acero, el coste de una estructura de hormigón, etc.) Estos métodos son computacionalmente muy eficientes cuando el número de variables es reducido. Es decir, requieren pocas iteraciones para converger al óptimo. Sin embargo, en cada iteración suelen resolver un problema de optimización lineal condicionada, lo que encarece el tiempo de computación cuando el número de variables es alto.

El otro gran grupo son los métodos heurísticos, cuyo gran desarrollo va unido al desarrollo de la inteligencia artificial. Este grupo incluye un gran número de algoritmos de búsqueda de soluciones como, por ejemplo, los algoritmos genéticos, la cristalización simulada, las colonias de hormigas, la aceptación por umbrales, la lógica difusa, etc. [6-10]. Estos métodos está comprobado que funcionan en problemas muy distintos al de la optimización estructural. En ingeniería civil, cabe destacar las aplicaciones al estudio de acuíferos y conducciones de agua, a la planificación de proyectos y a la planificación de rutas de vehículos. Se trata de algoritmos sencillos, pero que requieren un gran esfuerzo computacional. Es decir, requieren un gran número de iteraciones en los que evaluar la función objetivo y las restricciones del problema que se desea optimizar.

Entre los primeros trabajos de optimización heurística aplicados a la optimización de estructuras, cabe destacar las aportaciones en 1991-92 de Jenkins [11,12] y de Rajeev y Krishnamoorthy [13]. En ambos casos, aplicaron los algoritmos genéticos (GA en adelante) a la optimización del peso de elementos formados por perfiles metálicos. Posteriormente en 1999, Rath y otros [14] usaron también los GA para optimizar secciones y armados de vigas biapoyadas y continuas, partiendo de secciones rectangulares y evolucionando a secciones en doble T. Recientemente, 2003, se han presentado un buen número de aplicaciones, entre las que cabe destacar las de Hrstka y otros [15] y Leps y Sejnoha [16] que optimizan diversos casos de vigas de hormigón armado. También recientemente, se han presentado aplicaciones de GA a la optimización de pórticos de edificación de hormigón armado [17,18].

Los pórticos de paso de carretera objeto de este trabajo son los que habitualmente se emplean en la construcción de carreteras. Se emplean principalmente con luces entre 8.00 y 20.00 m para resolver cruces de caminos y carreteras secundarias

con la traza principal. Las partes de las que consta el pórtico son las siguientes (ver Figura 1): el dintel o losa superior de hormigón armado que recibe la carga de tierras y de tráfico; los muros laterales que contienen las tierras y transmiten las cargas del dintel a la cimentación; y la cimentación que transmite las cargas al terreno. El espesor del dintel se suele predimensionar entre un 1/10 y un 1/15 de la luz libre horizontal; y el espesor de los muros entre 1/12 de la luz vertical libre y el espesor del propio dintel. Las dimensiones de la zapata dependen de la tensión admisible del terreno, teniendo que pilotar o que emplearse un marco cerrado cuando no hay capacidad portante superficial suficiente. Los principales datos o parámetros que influyen en su diseño son la luz libre horizontal (L_h), la luz libre vertical (L_v), la altura de tierras sobre el pórtico (H_t) y la tensión admisible del terreno (σ_{adm}). Generalmente se calculan para soportar las acciones prescritas por la IAP [19] y deben verificar las prescripciones de estados límites de la EHE [20].

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

2. 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 (2.1), verificando además las restricciones de la expresión (2.2)

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1, r} p_i * m_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.1)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (2.2)$$

Nótese que en la expresión (2.1) la función objetivo es una función de coste expresada por el sumatorio de precios unitarios por mediciones; y g_j en la expresión (2.2) son todas las restricciones o conjunto de estados límite que debe de verificar la estructura.

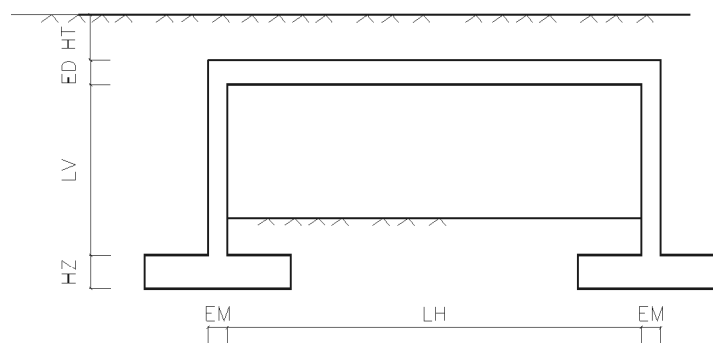


Figura 1. Esquema pórtico tipo paso de carretera.

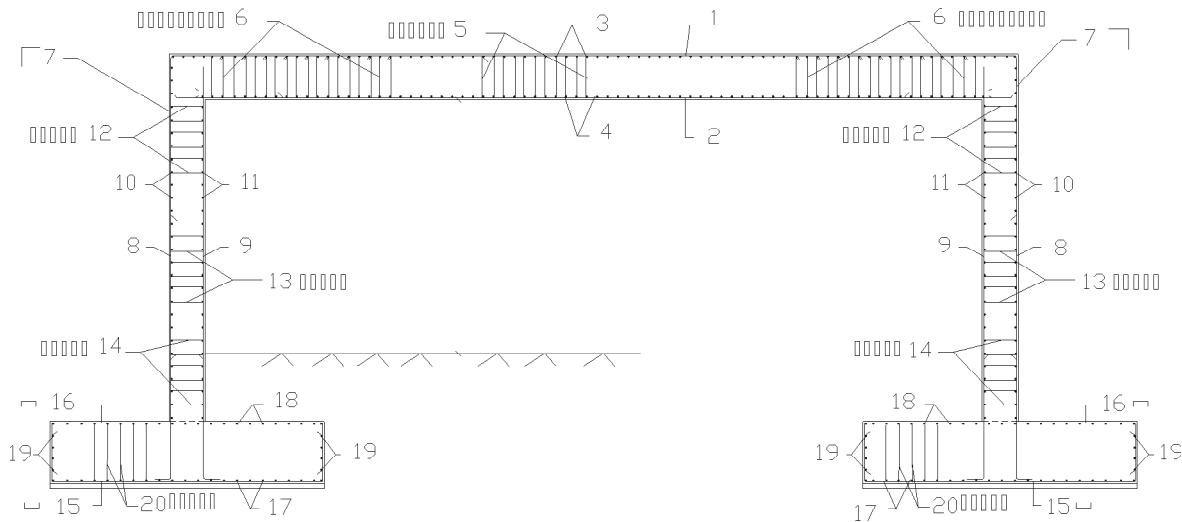


Figura 2. Esquema general de variables de un pórtico.

2.1. Variables

Se han considerado 28 variables para definir una solución de pórtico (ver Figura 2). Estas variables son las que definen la geometría, los tipos 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 2.2. Lógicamente los parámetros son datos de partida y no son objeto de optimización, sino de futuros estudios paramétricos.

Las 5 primeras variables a optimizar son geométricas y se corresponden con el espesor del dintel, el espesor del muro, el canto de la zapata, la puntera de la zapata y el talón de la zapata. Las 3 siguientes definen el tipo de hormigón en dintel, muros y zapatas. Y las 20 variables restantes definen las armaduras pasivas del pórtico, que se han adoptado en acero B500S. El armado del pórtico se ha definido mediante unos armados tipo habituales en el proyecto de estas estructuras. El armado del dintel incluye una armadura de positivos de parte a parte sin refuerzos centrales; una armadura base de negativos de lado a lado; un refuerzo de esquina en negativos; armaduras de cortante en zona de apoyos y en zona de vano; y armaduras superior e inferior de reparto y flexión longitudinal. Por su parte, el armado del muro incluye armaduras base de arriba abajo de positivos y negativos; el citado refuerzo de esquina; armaduras de cortante en arranques, coronación y a media altura; y armaduras interior y exterior de reparto y flexión longitudinal. Por último, la zapata incluye armaduras inferior y superior de flexión de puntera y talón; armadura de cortante constante; y armaduras de reparto longitudinal. Las longitudes de las barras de dintel y muros son constantes, habiéndose dejado para futuros trabajos la posibilidad de hacer variables las medidas del refuerzo de esquina y el incluir algunos refuerzos de longitud también variable.

Es importante señalar que se ha optado por variables discretas y no continuas. Así, por ejemplo, el espesor del dintel puede adoptar 31 valores entre un mínimo de 30 cm y un máximo de 150 cm, con escalones de 2.5 cm para espesores de hasta 60 cm y de 5 cm para espesores mayores. Por su parte, los hormigones pueden adoptar los 6 valores de HA-25 a HA-50 recomendados por la EHE. Finalmente, los armados

también son valores discretos según una tabla de 48 armados de flexión y 24 armados de cortante. Las tablas de armado incluyen diámetro de barra y separación de armaduras, lo que permite la comprobación detallada del ELS de fisuración. Todas las tablas de valores discretos de las variables se detallan en la ref. 23 y se omiten en este trabajo para simplificar la presentación.

El conjunto de combinaciones de valores de las 28 variables lo denominaremos espacio de soluciones. Tal espacio es en la práctica ilimitado por lo que se conoce como explosión combinatoria; en nuestro caso el número de soluciones es del orden de 10^{35} . Cada vector de 28 valores define una solución de pórtico que tendrá un coste aplicando la expresión (2.1). Las soluciones que cumplan las restricciones de los estados límite de la expresión (2.2) las denominaremos soluciones factibles. Las que incumplan alguna restricción las denominaremos soluciones no factibles.

2.2. 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, de propiedades del terreno y del relleno del trasdós, de coeficientes de seguridad y niveles de control considerados y de ambientes exteriores respecto de la durabilidad. Según se ha mencionado anteriormente, los principales parámetros geométricos son la luz libre horizontal (L_h), la luz libre vertical (L_v) y la altura de tierras sobre el pórtico (H_t). Otros parámetros geométricos son el espesor de firme, la altura de tierras sobre las zapatas y los recubrimientos de las armaduras en dintel, muro y zapatas. El principal parámetro del terreno es la tensión admisible (σ_{adm}). Los datos del relleno son la densidad y los coeficientes de empuje activo y al reposo sobre las paredes laterales. En cuanto a los ambientes señalar que se ha considerado dos ambientes, uno para los paramentos enterrados y otro para los paramentos vistos. En la Tabla 1 se dan los parámetros considerados para los cálculos del pórtico de $L_h = 10$ m considerado para la calibración y comparación de los cuatro algoritmos heurísticos de los apartados 3 y 4.

Tabla 1. Datos paramétricos pórtico LH=10.00 m.

Parámetros geométricos	
Luz horizontal	10.00 m.
Luz vertical	6.00 m.
Altura de tierras	0.10 m.
Espesor del firme	0.00 m.
Profundidad cimentación	0.00 m.
Recubrimiento de las armaduras del muro	0.04 m.
Recubrimiento de las armaduras del dintel	0.04 m.
Recubrimiento de armaduras en zapatas	0.06 m.
Parámetros del terreno	
Densidad del terreno.	2.00 t/m ³
Coefficiente de empuje activo	0.33
Coefficiente de empuje al reposo	0.50
Tensión admisible del terreno	2.50 kp/cm ²
Coefficientes de seguridad	
Nivel de control de ejecución	Normal
Nivel de control de los materiales	Normal
Parámetros de los ambientes exteriores	
Tipo de ambiente interior	Iib
Tipo de ambiente exterior	Ila

Tabla 2. Precios básicos de la función de coste.

Precio básico	Euros
Kg. de acero B-500S	0.583
M ² Encofrado zapatas	18.030
M ² Encofrado muros	18.631
M ² Encofrado dintel	30.652
M ³ de cimbra	6.010
M ³ MO hormigonado zapatas	5.409
M ³ MO hormigonado de muros	9.015
M ³ MO hormigonado del dintel	7.212
M ³ alquiler bomba	6.010
M ³ H-25 a pie de obra	48.244
M ³ H-30 a pie de obra	49.379
M ³ H-35 a pie de obra	53.899
M ³ H-40 a pie de obra	58.995
M ³ H-45 a pie de obra	63.803
M ³ H-50 a pie de obra	68.612
M ³ excavación	3.005
M ³ relleno	4.808

2.3. Función de coste

La función objetivo considerada es la función de coste definida en la expresión (2.1), donde p_i son los precios unitarios y m_i son las mediciones de las 10 unidades de obra consideradas. En la función de coste se incluyen no sólo el coste de los materiales, sino todas las partidas necesarias para valorar los pórticos por metro lineal ejecutado. Se incluyen, por ejemplo, la excavación de la cimentación y el relleno localizado en zapatas y del trasdós de la estructura. Los precios básicos considerados se detallan en la Tabla 2. Estos precios se han obtenido de una encuesta entre contratistas y subcontratistas de obras públicas de carreteras en octubre de 2003.

Dadas las 28 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.

2.4. Restricciones estructurales

Las restricciones estructurales de la expresión (2.2) son todos los estados límite que debe verificar la estructura y su cimentación. El paso previo a la comprobación de estados límite es el cálculo de envolventes de esfuerzos debidos a las acciones prescritas por la IAP. La modelización de la estructura se representa en la Figura 3, donde puede observarse que se han empleado 30 barras y 31 nudos. El cálculo de esfuerzos es por metro lineal y se realiza mediante un programa externo de elementos finitos (SAP). El módulo de comprobación estructural programado genera en cada evaluación los ficheros de datos, ejecuta el programa externo y posteriormente postprocesa los esfuerzos y obtiene envolventes de esfuerzos. En lo que respecta a las acciones se ha considerado como cargas permanentes el peso propio, el peso del relleno sobre el dintel y el empuje activo del relleno sobre las paredes. Y como acciones variables el tren de cargas y el posible incremento de empuje lateral debido al empuje al reposo y a una sobrecarga sobre los accesos de 10 kN/m². El carro de la Instrucción IAP se ha repartido en 4.00 m (se han considerado 3 cargas de 50 kN por metro lineal de pórtico), lo que equivale a considerar un número indefinido de carros separados 4.00 m entre sí. El modelo empleado es bidimensional y, por tanto, tiene limitaciones cuyo tratamiento se comentará más adelante.

Conocidas las envolventes de esfuerzos de flexión y cortante en ELS y ELU, se procede a la comprobación de los

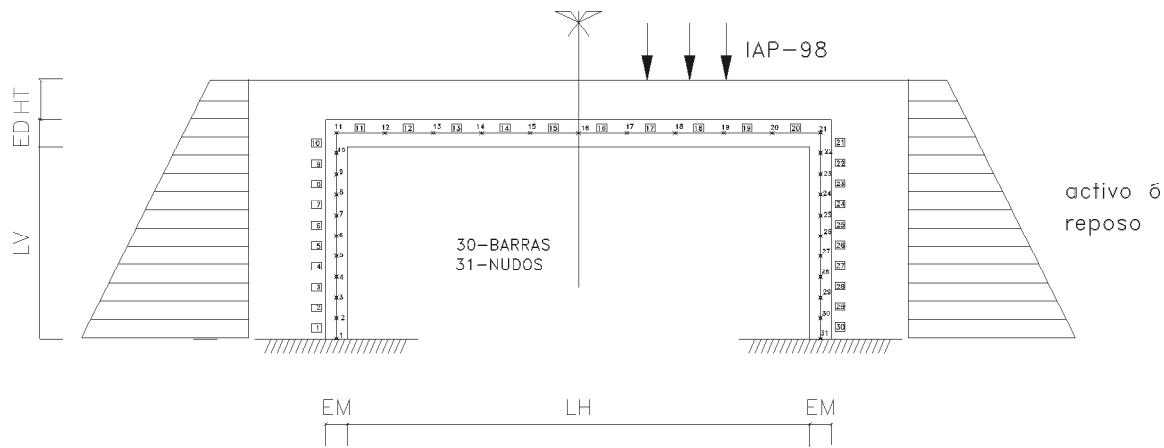


Figura 3. Modelización estructural de pórticos.

correspondientes estados límite conforme a las prescripciones de la EHE. Téngase en cuenta que conocidos los 28 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 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 cortante.

Los cálculos en ELU de flexión 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. Estas holguras y otras de cortante y de mínimos de armado se han programado en previsión del uso de heurísticas con penalizaciones en la función de coste. 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. Asimismo, se comprueban todas las restricciones de armaduras mínimas de flexión, cortante y geométricas prescritas por la EHE. Dado el procedimiento de cálculo de esfuerzos empleado, las comprobaciones se hacen en los 60 extremos dorsales y frontales de las 30 barras de la modelización. Por otra parte y dado el modelo bidimensional de cálculo empleado, se carece de esfuerzos torsores y de flectores longitudinales. Cuando se conocen, se suele emplear el método de Wood y Armer para obtener los armados de reparto longitudinal. En nuestro caso, las armaduras longitudinales se han dimensionado por mínimos y adoptando valores de armadura longitudinal no menores que un quinto de los armados transversales.

Las zapatas se comprueban a partir de las tensiones obtenidas con las reacciones disponibles en ELS. Se emplea una distribución trapezoidal y triangular si hay despegue, admi-

tiéndose un incremento del 25% en el valor de pico respecto de la tensión admisible. La comprobación de armaduras sigue lo prescrito en la EHE. Al igual que en el alzado se calculan holguras para todas las comprobaciones.

Es importante señalar que este módulo de comprobación no incluye varios estados límite. El ELU de inestabilidad no se comprueba dado que las esbelteces en muros son generalmente inferiores al límite de 35 de la EHE. Tampoco se han incluido los ELU de fatiga, ni los ELS de flechas y de vibraciones. En particular, el ELS de flechas no se ha incluido dado que no hay elementos dañables ni existe una limitación en la normativa de carreteras para ésta y otras tipologías.

3. HEURÍSTICAS EMPLEADAS

Las cuatro heurísticas empleadas en este trabajo son la búsqueda aleatoria, el método del gradiente, la aceptación por umbrales y la cristalización simulada. Las 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 walk* [7], 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 es poco inteligente y 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 generadas. Se programa porque sirve como generador de soluciones factibles que sirvan de partida a otras heurísticas. Los primeros resultados indicaron que el porcentaje de soluciones factibles era sólo del orden del 1%, por lo que se incluyeron algunas horquillas. Las horquillas consisten en acotar algunas variables. Las horquillas empleadas se citan en el siguiente apartado, donde se presentan resultados para un número de 50 a 500000 de iteraciones por este método.

El segundo método empleado es el método del gradiente [7]. 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 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 23 movimientos, 7 libres y 16 coaccionados. Los siete movimientos libres, M01 a M07, han consistido en variar aleatoriamente en más o menos varias variables (1, 2, 4, 8, 12, 20 y 27 variables respectivamente en los movimientos M01 a M07). Y los coaccionados han consistido en relacionar de distintas formas los movimientos de geometría, materiales y armaduras. Estos últimos han resultado menos eficientes que los libres [23] y se omitirán en los resultados del siguiente apartado. Dado que la búsqueda es aleatoria las ejecuciones se repiten 9 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 2 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 propuesto originalmente por Dueck y Scheuert [21]. En la Figura 4 se representa el diagrama de flujo

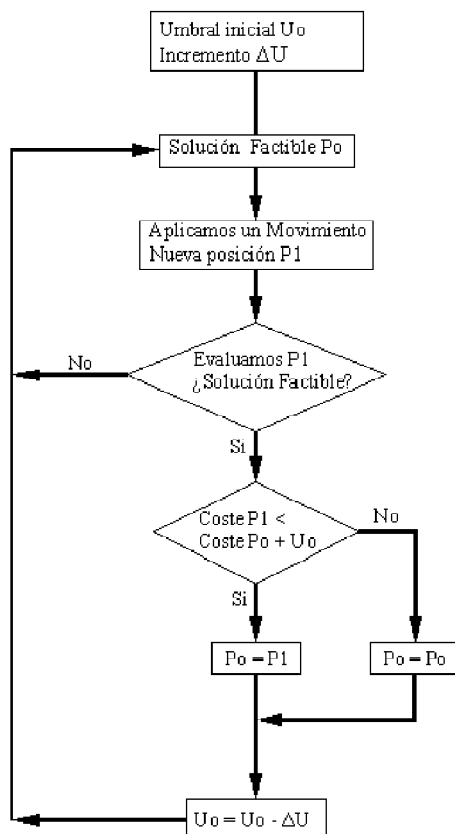


Figura 4. Diagrama de flujo de la aceptación por umbrales.

del algoritmo. 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 hasta que se anula. En cada umbral se permite un número de iteraciones que reciben el nombre de ciclo. El número total de iteraciones se limita a un valor prefijado. El método permite salvar óptimos locales para umbrales altos y gradualmente converge al ir reduciendo a cero el umbral de aceptación. El principal movimiento empleado para este método ha sido el M03 estudiado para el gradiente (variación aleatoria de 4 variables de las 28 del problema), por lo que los resultados del siguiente apartado se darán bajo el nombre de TA3 cuando se emplee este movimiento. El método requiere de calibración para ajustar el umbral inicial, el número de iteraciones y la longitud de los ciclos.

El último método programado es el de la cristalización simulada o *simulated annealing* (SA en adelante), que fue propuesto originalmente por Kirkpatrick y otros [21] 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 5. Se parte de una solu-

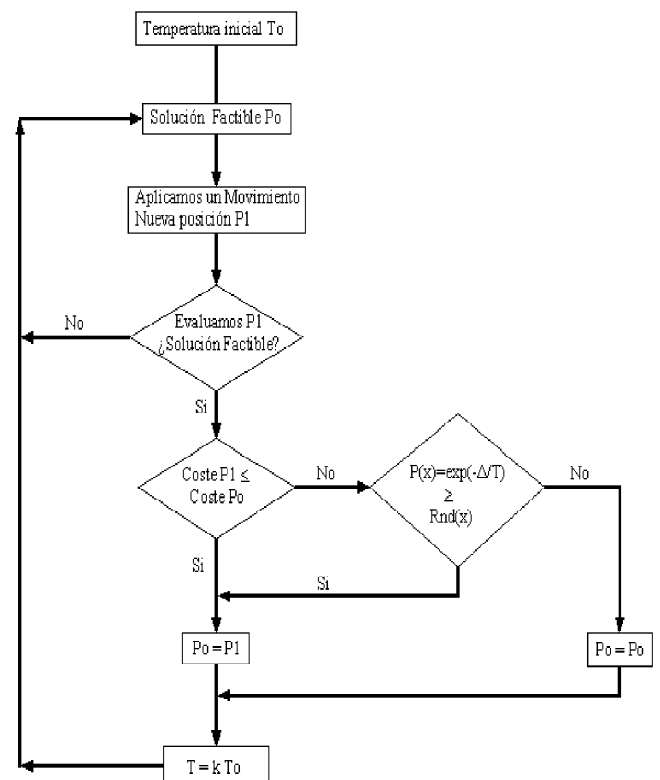


Figura 5. Diagrama de flujo de la cristalización simulada.

ción 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 que también reciben el nombre de cadenas de Markov. El número total de iteraciones se limita a un valor prefijado. 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. El movimiento empleado para este método ha sido el M03 estudiado para el gradiente (variación aleatoria de 4 variables de las 28 del problema) por lo que los resultados del siguiente apartado se darán bajo el nombre de SA3. El método requiere de calibración para ajustar la temperatura inicial, el número de iteraciones, la longitud de las cadenas de Markov y el coeficiente de enfriamiento.

4. APLICACIÓN DE LAS BUSQUEDAS HEURISTICAS

Las cuatro heurísticas del apartado anterior se han aplicado a un mismo pórtico 10 m de luz horizontal cuyos parámetros se dan en la Tabla 1, con el objeto de poder comparar la eficiencia de las mismas. La cristalización simulada se ha aplicado también a otro pórtico similar de 15 m de luz horizontal. A continuación se detallan los principales resultados obtenidos.

4.1. Búsqueda aleatoria

Según se ha mencionado anteriormente, los primeros resultados de esta búsqueda daban un porcentaje inferior al 1% de soluciones factibles. Por esta razón, se incluyeron horquillas en algunas variables. Las horquillas consisten en acotar algunas variables en función de otras. Los dos tipos de horquillas programadas han consistido en imponer al menos los mínimos mecánicos de flexión en las variables de armado; y en incluir un máximo de talón y de puntera de las zapatas en función del canto de las mismas. Con estas horquillas el porcentaje de soluciones factibles asciende al 25%.

Los resultados de la búsqueda aleatoria con horquillas se detallan en la Figura 6. Los resultados son para un número de iteraciones de 50, 100, 500, 40000, 100000, 300000 y 500000. La solución más económica tiene un coste de 4285 euros. Obsérvese que con 40000 iteraciones se obtiene una solución de 4399 euros, con un esfuerzo de computación muy inferior (el coste mejora un 2.6% con 12.5 veces de tiempo de computación).

4.2. Método del gradiente

Este método se programa para evaluar los movimientos más eficientes. Se han considerado 23 movimientos, 7 libres y 16

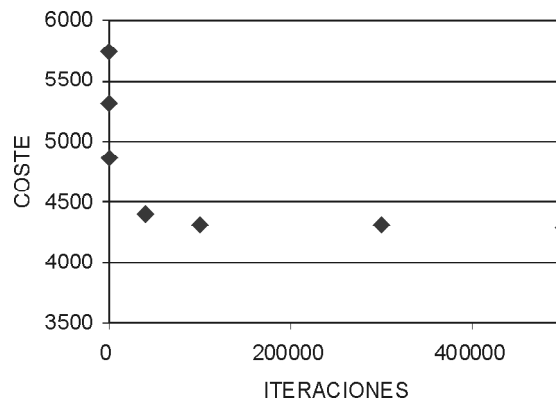


Figura 6. Método random. Variación del coste con el número de iteraciones.

coaccionados [23]. Los siete movimientos libres, M01 a M07, han resultado más eficientes que los coaccionados. Estos movimientos libres han consistido en variar aleatoriamente en más o en menos 1, 2, 4, 8, 12, 20 y 27 variables respectivamente. En todos los casos se ha partido de una misma solución factible inicial obtenida mediante un random de 10 iteraciones y cuyo coste es de 6520 euros. Dado que el procedimiento es aleatorio, los resultados se han repetido 9 veces para obtener resultados medios y mínimos.

Los movimientos más efectivos han resultado ser los M03, M04 y M05 (variación aleatoria de 4, 8 y 12 variables respectivamente). En la Figura 7 se representan los resultados de coste mínimo en función del número de iteraciones para estos 3 movimientos. El mejor resultado tiene un coste de 2785 euros con 50000 iteraciones usando el movimiento M03 (variando 4 variables a la vez aleatoriamente). Consecuentemente, se optó preferentemente por este movimiento M03 para programar las dos metaheurísticas restantes.

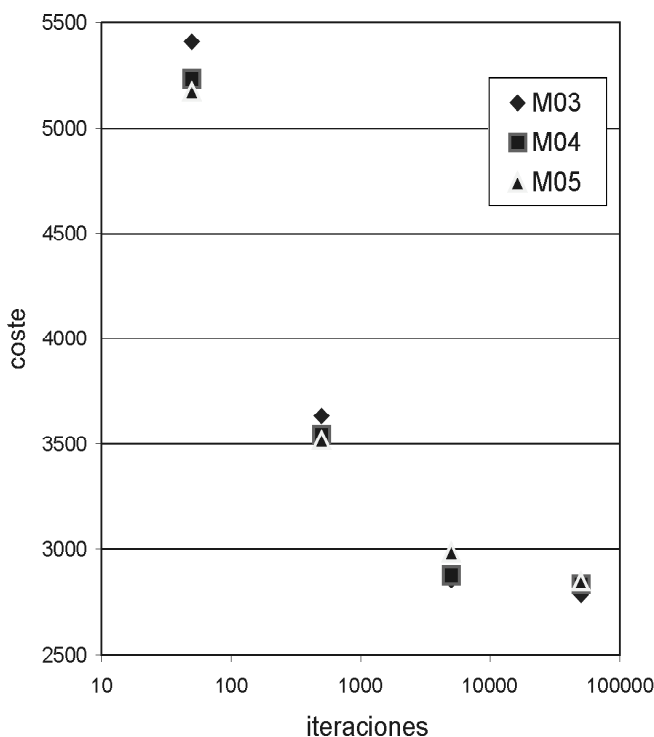


Figura 7. Método del Gradiente. Variación del coste con el número de iteraciones. Movimientos M03, M04 y M05.

4.3. Aceptación por umbrales

El *threshold accepting* (TA) se ha aplicado de nuevo al mismo pórtico de 10 m de luz horizontal objeto de resultados para las dos heurísticas anteriores (parámetros en Tabla 1). Dada su mayor efectividad en el método del gradiente, el método se ha programado con los movimientos M03, M04 y M05 (variación aleatoria de 4, 8 y 12 variables respectivamente), dando lugar a las heurísticas TA3, TA4 y TA5. Según se ha mencionado, el método requiere calibrar el número de iteraciones, el umbral inicial y la longitud de los ciclos. El número de iteraciones se calibró usando el TA3 con un umbral inicial de 100 euros y se estimó en unas 15000 iteraciones. El umbral inicial, se calibró usando el método de Yepes y Medina [10] y se estimó en 10 euros (ver Figura 8). En todos los casos se ha empleado una longitud de ciclos de 1. Consecuentemente, se ha procedido empleando un incremento de umbral de U_0 (umbral inicial) dividido por el número de iteraciones.

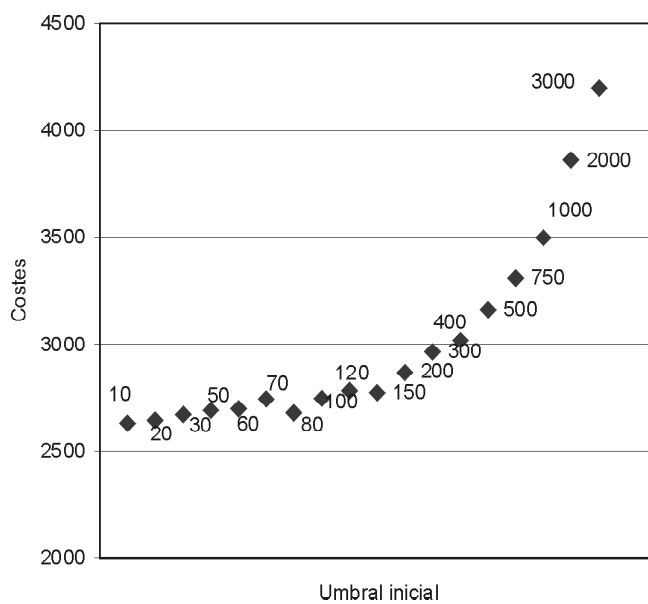


Figura 8. Método umbrales. Variación del coste con el umbral inicial. Método TA3, 15.000 iteraciones.

En la Tabla 3 se reproducen los resultados de costes mínimos y medios de las metaheurísticas TA3, TA4 y TA5, con un umbral inicial de 10 euros y 15 iteraciones. Obsérvese que el mejor resultado es de 2632 euros para la heurística TA3, lo que mejora los resultados de costes con el método del gradiente en un 5.5%). De nuevo los resultados se corresponden con 9 ejecuciones de la heurística, dándose valores medios y mínimos.

Tabla 3. Costes mínimos y medios metaheurísticas TA3, TA4 y TA5. (15.000 iteraciones, umbral inicial = 10 euros)

Tipo Movimiento	TA3	TA4	TA5
Mínimo	2632	2629	2661
Media	2655	2687	2732
Varianza	19.27	66.71	72.48

4.4. Cristalización simulada

Finalmente, el *simulated annealing* (SA) se ha aplicado al mismo pórtico de 10 m de luz horizontal. En vista de los resultados en el método del gradiente y en la aceptación por umbrales, el método se ha programado con los movimientos M03, M04 y M05 (variación aleatoria de 4, 8 y 12 variables respectivamente), dando lugar a las heurísticas SA3, SA4 y SA5. El método requiere calibrar el número de iteraciones, la temperatura inicial, el coeficiente de enfriamiento y la longitud de las cadenas de Markov. El número de iteraciones se calibró usando el SA3 con una temperatura inicial de 100, coeficiente de enfriamiento de 0.85 y longitud de cadenas de Markov de 500 y se estimó en unas 7500 iteraciones. La temperatura inicial, se calibró usando de nuevo el método de Yepes y Medina [10] y se estimó en 100 (ver Figura 9). La longitud de las cadenas de Markov se estimó en 375 iteraciones. Y finalmente, el coeficiente de enfriamiento se calibró en 0.70 (ver Figura 10).

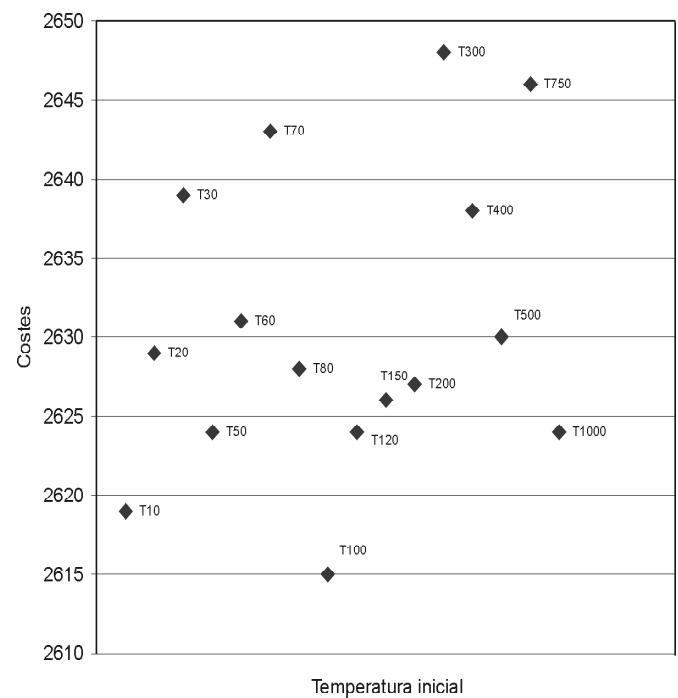


Figura 9. Ajuste temperatura inicial annealing SA3. (7.500 iteraciones)

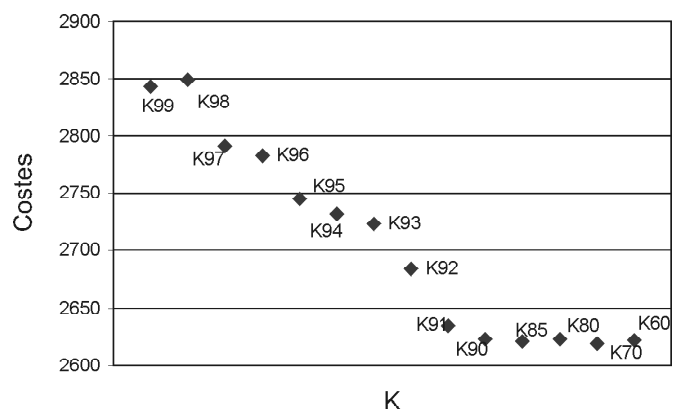


Figura 10. Ajuste coeficiente de enfriamiento, annealing SA3 (7.500 iteraciones).

Tabla 4. Resultados costes annealing SA3, SA4 y SA5 (7.500 iteraciones $T_0 = 100$, $K = 0.70$)

Iteración	SA3	SA4	SA5
1	2822	2803	2895
2	2646	2717	2827
3	2619	2716	2866
4	2649	2890	3061
5	2665	2829	2767
6	2666	2779	2834
7	2722	2691	3014
8	2686	2845	3041
9	2683	2771	2811
Media	2685	2782	2902
Mínimos	2619	2691	2767

En la Tabla 4 se reproducen los resultados de costes mínimos y medios de las metaheurísticas SA3, SA4 y SA5, con los parámetros calibrados según se ha explicado. El mejor resultado es de 2619 euros para la heurística SA3, lo que iguala da resultados similares en costes a los del método de la aceptación por umbrales; pero con la mitad de tiempo de computación. De nuevo los resultados se corresponden con 9 ejecuciones de la heurística, dándose valores medios y mínimos. Las principales variables geométricas, de materiales y de armado de la solución más económica obtenida se resumen en la Tabla 5. Este método SA3 se aplicó finalmente a un pórtico de 15 m de luz horizontal obteniéndose los resultados detallados en la ref. 23.

5. ANALISIS DE RESULTADOS

La Tabla 6 resume los resultados de costes y tiempo de computación de las 4 heurísticas empleadas. (Los tiempos de ejecución son con programación en Visual Basic 6.3 en un ordenador personal con procesador AMD de 1.49 GHz.) Se observa que tanto el método de los umbrales como el de la cristalización simulada dan resultados similares de 2632-2619 euros de coste para la solución más económica. La mejora respecto de los métodos de busca aleatoria y del gradiente es del 63.8 y del 5.5% respectivamente. En tiempos de computación, la cristalización simulada es la más eficiente, con un tiempo de computación de 10.78 horas para las 7500 iteraciones resultado de la calibración del método, lo que resulta 7.7 veces menos tiempo de computación que con el método del gradiente. De los resultados, se concluye que el SA3 (*simulated annealing* con 7500 iteraciones y el movimiento M03), resulta ser la heurística más eficiente de las 4 programadas.

Los resultados de pórtico más económico obtenido se detallan en la Tabla 5. Destaca la esbeltez de las variables geométricas y las cuantías de armado. El espesor del dintel es de 0.375 m, lo que supone un 26.67 de relación canto/luz libre.

Tabla 5. Solución menor coste optimización por annealing (pórtico LH=10.00 m., parámetros tabla 1)

Variables geométricas	
Espesor dintel	0.375 m
Espesor muro	0.400 m
Canto zapata	0.400 m
Puntera zapata	0.950 m
Tacón zapata	0.750 m
Variables hormigones	
Hormigón dintel	HA-25
Hormigón muro	HA-25
Hormigón zapata	HA-25
Armaduras principales	
A. positivos flexión dintel	10Ø20 / m
A. negativos base dintel	15Ø12 / m
A. negativos refuerzo esquina	15Ø12 / m
A. negativos base muro	8Ø16 / m
A. positivos muro	12Ø8 / m
A. puntera zapata	10Ø16 / m
A. tacón zapata	12Ø10 / m
A. cortante esquina dintel	12.06 cm ² / m
A. cortante zapata	9.05 cm ² / m

Tabla 6. Comparación costes y tiempos de ejecución de las cuatro heurísticas

	Horas	Coste
SA3	10.764	2.619
TA3	24.951	2.632
M03	83.385	2.785
RND	116.739	4.311

Y el espesor del muro es de 0.40 m, un quinceavo de la altura libre. Los armados del dintel son de 10Ø20/m en positivos (cuantía geométrica del 8.4‰) y 3Ø12/m en negativos (cuantía geométrica del 9.0‰, incluye armadura base y refuerzo de esquina). Los armados del muro son de 12Ø8/m en positivos y 8Ø16 en negativos. La zapata tiene un canto de 0.40 m, una puntera de 0.95 m y un talón de 0.75 m. Los armados principales de la zapata son de 10Ø16/m en puntera y 12Ø10 en talón. En todos los elementos el hormigón elegido es HA-25, lo que coincide con la práctica habitual en el proyecto de estos pórticos.

Dada la gran esbeltez del dintel, se ha procedido a comprobar si verifican las flechas del pórtico obtenido. Se han recalculado manualmente, obteniéndose unas flecha en la combinación casipermanente de 21.24 mm, lo que supone un 1/470

de la luz horizontal libre. La flecha para la combinación poco frecuente (100% del tren de cargas) es de 51.03 mm, un 1/195 de la luz. La normativa española deja a juicio del proyectista la limitación de flecha. Si consideramos la limitación general del Eurocódigo 2 [24] de 1/250 de la luz para las cargas casi-permanentes, entonces la estructura parece aceptable en cuanto a flechas. No obstante, la flecha de la combinación poco frecuente parece elevada.

En lo que respecta al ELS vibraciones, se han calculado las frecuencias naturales de la solución, tanto por vibraciones horizontales como verticales, en la hipótesis de pórtico exento y con EI brutas. La frecuencia natural de vibraciones horizontales resulta ser de 4.16 Hz y la de verticales de 9.04 Hz. El valor de las horizontales aunque bajo no parece preocupante, dado que la estructura está arriostrada horizontalmente por las tierras del relleno. Sin embargo, hay que señalar que se carece de normativa que limite estas frecuencias.

Más importante que los ELS de flechas y vibraciones ha resultado el ELU de fatiga, que tampoco estaba incluido en las restricciones del módulo de comprobación estructural empleado. En este caso, la IAP prescribe un tren de 390 kN similar al carro con un coeficiente de impacto de 1.2. La comprobación manual de este ELU en la sección de positivos del dintel, indica que los incrementos de tensión en hormigón y armaduras son de 7.32 MPa y de 124.8 MPa. Tal incremento es aceptable en las pasivas si consideramos la limitación de 150 MPa de la EHE. Sin embargo, la variación de tensiones en el hormigón no verifica las prescripciones del Código Modelo 1990 [25], dado que el número de ciclos admisible es de 490907, inferior al millón de ciclos exigible.

6. CONCLUSIONES

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

- La generación aleatoria de soluciones no es eficaz, dado que sólo un 1% de las soluciones resultan factibles. El empleo de horquillas, sobre todo de cuantías mecánicas mínimas para los armados, eleva el número de soluciones factibles al 25%.
- Los mejores movimientos estudiados han resultado ser los M03, M04 y M05, consistentes en variar aleatoriamente 4, 8 y 12 de un total de 28 variables del pórtico. De estos 3, el M03 ha resultado ser a su vez el más eficiente.
- En la comparación de las 4 heurísticas empleadas, la más eficaz ha resultado ser el *simulated annealing* SA3 con 7500 iteraciones, temperatura inicial de 100, cadenas de Markov de 375 y coeficiente de enfriamiento de 0.70.
- Las soluciones estructurales han resultado ser muy esbeltas. Se concluye que es preciso incluir restricciones de flechas, vibraciones y de fatiga en futuros trabajos de optimización.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] Hernández S., “Métodos de diseño óptimo de estructuras”, Ed. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puentes, C. Seiner 8, 402 pp, ISBN 843800038X, 1990.

[2] Goberna M.A., Jornet V. y Puente R., “Optimización lineal. Teoría, métodos y modelos.”, Ed. McGraw-Hill, 329 pp, ISBN 8448140729, 2004.

[3] Torrano Mtez. M.S., “Diseño óptimo de secciones y elementos estructurales de hormigón armado”, tesis doctoral, Dpto. Estructuras y Construcción, Un. Politécnica Cartagena, 215 pp, 2003.

[4] Moragues J.J., “Diseño óptimo de estructuras aperticadas de hormigón armado”, tesis doctoral, ETSI Caminos Valencia, Universidad Politécnica de Valencia, 1980.

[5] Gasch M., “Optimización de estructuras de forjados reticulares”, tesis doctoral, Dpto. Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Universidad Politécnica de Valencia, 1991.

[6] Jones M.T., “Artificial intelligence application programming”, Ed. Charles River Media, 363 pp, ISBN 1584502789, 2003.

[7] Diaz A., Glover F., Ghaziri H.M., González J.L., Laguna M., Moscazo P., Tseng F.T., “Optimización heurística y redes neuronales”, Ed. Paraninfo, 235 pp, Madrid 1996, ISBN 8428322694.

[8] Holland J.H., “Adaptation in natural and artificial systems”, Ed. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

[9] Goldberg, “Genetic algorithms in search, optimization and machine learning”, Ed. Addison-Wesley, 412 pp, ISBN 0201157675, 1989.

[10] Yepes V., “Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW”, tesis doctoral, 352 pp, Departamento de Ingeniería del Transporte, Universidad Politécnica de Valencia. Mayo 2002.

[11] Jenkins W.M., “Structural optimization with the genetic algorithm”, The Structural Engineer, Vol. 69, No. 24/17, pp 418-422, December 1991.

[12] Jenkins W.M., “Plane Frame Optimum Design Environment Based on Genetic Algorithm”, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 11, pp. 3103-3112, November 1992.

[13] Rajeev S. and Krishnamoorthy C.S., “Discrete optimization of structures using genetic algorithms”, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 5, pp. 1233-1250, May 1992.

[14] Rath D.P., Ahlawat A.S. and Ramaswamy A., “Shape Optimization of RC Flexural Members”, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 125, No. 12, pp 1439-1446, December 1999.

[15] Hrstka O., Kucerova A., Leps M. and Zeman J., “A competitive comparison of different types of evolutionary algorithms”. Computers and Structures, Vol. 81, pp 1979-1990, 2003.

[16] Leps M. and Sejnoha M. “New approach to optimization of reinforced concrete beams”. Computers and Structures, Vol. 81, pp 1957-1966, 2003.

[17] Lee C. and Ahn J. “Flexural Design Reinforced Concrete Frames by Genetic Algorithm”, Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 6, pp 762-774, June 2003.

[18] Camp C.V., Pezeshk S. and Hansson H., "Flexural Design Reinforced Concrete Frames Using a Genetic Algorithm". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 1, January 2003.

[19] M. Fomento, "EHE-98. Instrucción de hormigón estructural", Ed. M.Fomento, 470 pp, RD 2661/1998.

[20] M. Fomento, "IAP-98. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera", Ed. M.Fomento, 79 pp, OM 12 febrero 1998.

[21] Dueck G. and Scheuert T., "Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm superior to simulated annealing", *Journal of Computation Physics*, 161-175, 1990.

[22] Kirkpatrick S., Gelatt C.D. and Vecchi M.P., "Optimization by simulated annealing", *Science*, Vol. 220, No. 4598, pp 671-680, May 1983.

[23] Carrera M., "Optimización heurística de pórticos de paso de carretera", trabajo investigación CST/GPRC-02, 205 pp, Dpto. Ingeniería Construcción, Universidad Politécnica Valencia, abril 2004.

[24] CEN, "Eurocódigo 2. Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación", Ed. AENOR, 213 pp, 1991.

[25] CEB, "CEB-FIP Model Code 1990", Ed. Thomas Telford, 437 pp, 1991.