

COST SENSITIVITY ANALYSIS IN BRIDGES DESIGN

José Vicente Martí¹, Fernando González-Vidosa² y Víctor Yepes²

Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH)
Universitat Politècnica de València (UPV)
46022 Valencia, Spain
web: <http://www.upv.es/entidades/ICITECH/indexc.html>
1: e-mail: jvmartia@upv.es,
2: e-mail: fgonzale@upv.es, vyepesp@upv.es

Keywords: Cost sensitivity analysis, bridges design, heuristic optimisation, metaheuristic techniques, structures, prestressed concrete

Abstract *The application of metaheuristic techniques enables optimizing structures for economic aspects, greenhouse effects, energy consumption and other life cycle impacts. Structural designs obtained with the application of the heuristic algorithms vary according to the above mentioned objectives and with the values of the parameters determined by the boundary conditions of structures and materials. The featured paper presents the cost optimization of prestressed concrete (PC) precast road bridges. The beam has a U-shape cross-section. The deck has a span of 35 m and 12 m in width. The Simulated Annealing algorithm (SA) is used for obtaining the cross-section transverse geometric dimensions, the concrete class and the active and passive reinforcement amounts. Our example is defined by 59 discrete design variables. SA algorithm requires the calibration of the initial temperature, the number of variables modified in each iteration, the length of the Markov chains and the cooling coefficient. It all is subject to the Spanish Structural Concrete Code EHE. The overall objective is to determine whether the structural design is influenced by the unit prices. Hence, different economic scenarios are presented where the concrete and steel unit prices vary. The results show that the application of heuristic techniques delivers structural designs that adapt to the variation of unit prices, in order to reduce the overall cost of the resulting structural design. In this study, an increment in the steel price leads to a reduction in the steel amount, increasing the concrete amount, and vice versa.*

1. INTRODUCCIÓN

Los puentes constituyen infraestructuras imprescindibles en el desarrollo de todo tipo de comunicaciones terrestres. El proyecto de cualquier tipo de infraestructuras supone tomar múltiples decisiones por parte del ingeniero que busca un diseño capaz de minimizar todo tipo de impactos (económicos, ambientales y sociales) a lo largo de su ciclo de vida [1-4]. Por este motivo, los puentes han sido objeto de trabajos de investigación relacionados con la optimización, especialmente en lo referente al diseño de tableros [5-13], pilas [14-16] y estribos [17]. Este tipo de procesos de optimización son especialmente interesantes en el caso de estructuras prefabricadas, donde la fabricación de grandes series permite explotar las ventajas económicas asociadas a la reducción de los costes. Además, la optimización permite reducir el peso de las piezas que supone, a su vez, una reducción de los costes de elevación y transporte de las mismas. Por tanto, la construcción de puentes con vigas prefabricadas para luces moderadas, de 10 a 40 m, supone un campo propicio para la utilización de las técnicas heurísticas de optimización.

La irrupción de la inteligencia artificial a mediados del siglo XX, con la progresiva popularización de los ordenadores personales ha facilitado enormemente la implantación de los métodos de optimización numérica aplicados en distintos ámbitos de la ingeniería. Una de sus aplicaciones se ha dirigido hacia la optimización del diseño de estructuras bajo diferentes objetivos, tales como la reducción del coste económico en la fase de construcción, la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero durante su ejecución o vida útil, el aumento de la seguridad, etc. Para diseñar una estructura se selecciona un grupo de variables conforme a unos condicionantes estructurales de contorno. Las variables del diseño incluyen entre otros, la tipología de los distintos materiales, las dimensiones de las secciones transversales y los refuerzos de acero.

A pesar del elevado potencial y los buenos resultados obtenidos con la aplicación de la inteligencia artificial en la optimización económica, hoy en día, el diseño de estructuras de hormigón está muy condicionado por la experiencia de los ingenieros calculistas. El diseño cotidiano de estructuras de hormigón se fundamenta en el conocimiento y experiencia de los proyectistas, que pretenden obtener estructuras seguras y que a la vez cumplan los condicionantes de durabilidad a lo largo de su vida útil [18]. Hay que añadir que el ingeniero proyectista, que inicialmente diseña y predimensiona las distintas partes y secciones de la estructura, a continuación, mediante la utilización de programas informáticos prueba la bonanza del diseño inicial, y lo ajusta en los lugares críticos que puedan presentar. Si los valores geométricos o la resistencia de los materiales son insuficientes, la estructura se redefine sobre la base del ensayo de prueba y error. Dicha forma de proceder nos dirige hacia diseños seguros, quedando la economía de la estructura muy supeditada a la experiencia del proyectista.

Los métodos metaheurísticos de optimización pretenden minimizar una función objetivo, como es en este caso, el coste de un paso superior de carreteras. Su aplicación a las estructuras de hormigón ha sido muy reducida comparada con las desarrolladas para las estructuras de acero [19]. El grupo de investigación al que pertenecen los autores ha presentado últimamente trabajos de optimización de estructuras de hormigón armado y pretensado con distintas

técnicas heurísticas bajo aspectos económicos, de reducción de gases de efecto invernadero, de reducción de consumo energético y otros impactos sobre el ciclo de vida [9-13,20-23]. De un modo general, los métodos de optimización estructural se pueden agrupar en métodos exactos y métodos heurísticos. Los primeros se corresponden con el sistema tradicional, basados en el cálculo de soluciones óptimas siguiendo las técnicas iterativas de la programación lineal [24,25]. El segundo grupo principal es el de los métodos metaheurísticos, cuyo reciente desarrollo va ligado a la evolución de los procedimientos de la inteligencia artificial. Este grupo incluye un amplio número de algoritmos de búsqueda [26-29], tales como búsqueda por gradiente (DLS), algoritmos genéticos (GA), meméticos (MA), recocido simulado (SA), búsqueda tabú (TS), aceptación por umbrales (TA), colonias de hormigas (ACO), etc. Se basan en algoritmos que contiene un número elevado de iteraciones en las cuales se valora la función objetivo y se comprueban las restricciones estructurales. El objetivo del presente trabajo es optimizar una estructura utilizada como paso superior de carreteras y analizar su sensibilidad a la variación de los precios de las materias que lo constituyen. El artículo, tras realizar el planteamiento del problema, define el algoritmo utilizado, presenta los resultados obtenidos y señala las principales conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

En la actualidad, la práctica totalidad de los tableros de estos pasos superiores se construyen ya sea con losa continua de hormigón ejecutado in situ o con vigas prefabricadas de hormigón y losa superior ejecutada en obra. La prefabricación de tableros con vigas ha experimentado una evolución importante desde sus inicios, ofreciendo soluciones de gran calidad estética y un mayor número de tipologías. En cuanto a la sección transversal, desde las propuestas iniciales constituidas por un conjunto de vigas prefabricadas doble T se ha pasado a la utilización de vigas artesa con forma de U, más pesadas, con gran separación entre ejes, que van de 5 o 6 m a 12 m, recurriendo a placas superiores prefabricadas, que constituyen un encofrado colaborante de la losa superior que se completa con un hormigonado in situ. Estas soluciones permiten eliminar completamente los cabezales sobre pila de los tableros de viga doble T cuyo valor estético deja bastante que desear. Estos puentes consisten en dos vigas de hormigón pretensado con armadura pretesa HP en forma de “U” y una losa superior colaborante parcialmente prefabricada o construida in situ (Fig.1 y Fig. 2). La luz del vano es la habitual de 35 m. El problema de optimización se basa en la tesis doctoral del primer autor [8].

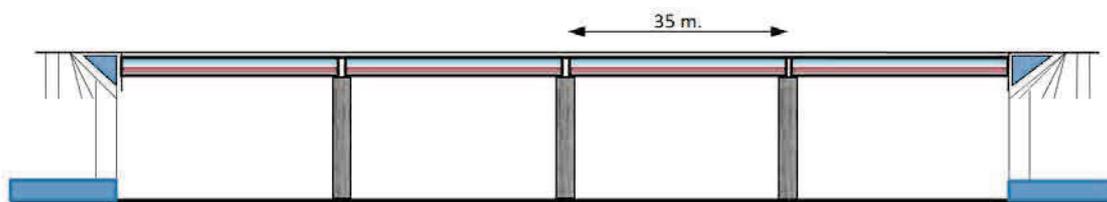


Figura 1. Perfil longitudinal del paso superior.

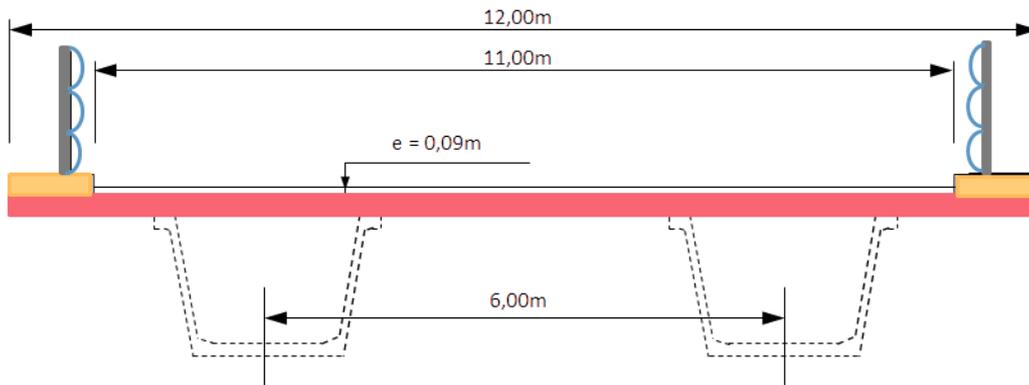


Figura 2. Sección transversal del tablero.

Esta tipología cuenta a su favor, entre otras, con las ventajas derivadas de la prefabricación como son la construcción industrializada, los moldes reutilizables, los plazos de ejecución en obra reducidos y la baja interferencia con el tráfico inferior. Las dos vigas son de hormigón autocompactante, que integran en la parte superior una losa de hormigón armado (HA) para el tráfico de vehículos de 12 m de anchura (Fig. 2). La optimización del diseño se basa en el cálculo del coste de cada una de las soluciones evaluadas, en función de las variables geométricas, los materiales y los refuerzos activo y pasivo. A continuación se ha codificado un módulo que evalúa todos los estados límites relevantes, y posteriormente se ha desarrollado, específicamente para este trabajo, el algoritmo metaheurístico capaz de encontrar soluciones optimizadas en coste.

3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El problema planteado reside en la optimización económica de un diseño estructural de HP. Se ocupa de la minimización de la función objetivo F de la expresión (1), satisfaciendo también las restricciones formuladas en la expresión (2).

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

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (2)$$

$$x_i \in (d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{iq_i}) \quad (3)$$

Los valores x_1, x_2, \dots, x_n son las variables de diseño del problema, que pueden tomar uno de los valores discretos indicados en la expresión (3). Obsérvese que la función objetivo en la expresión (1) es la suma de los precios unitarios multiplicados por las mediciones de las unidades de obra (hormigón, acero, encofrado, transporte, colocación, etc.). La expresión (2) indica las restricciones geométricas y de constructibilidad, así como todos los estados últimos

y de servicio que la estructura ha de cumplir. Las soluciones que satisfacen las restricciones en la expresión (2) se denominan factibles, y las que no, soluciones no factibles.

3.1. Función coste, variables de diseño y parámetros

El coste del tablero depende tanto del volumen de los materiales empleados como de la mano de obra, de la maquinaria y de los medios auxiliares necesarios para su ejecución. La función de coste se obtiene como la suma de los precios unitarios de cada unidad de obra por su medición, incluyendo los costes indirectos (Tabla 1). Se trata de un problema de optimización combinatoria, puesto que se formula con valores discretos de las variables para garantizar su constructibilidad.

El análisis incluye 59 variables del diseño. La Figura 3 muestra las variables geométricas principales consideradas en este análisis. Las variables geométricas incluyen siete variables: el canto de la viga (h_1), el espesor de la losa (e_4), el ancho del ala inferior de la viga (b_1) y su espesor (e_1), el ancho y espesor de las alas superiores de la viga (b_3 y e_3) y el espesor de las almas (e_2). Con respecto a la resistencia del material, son dos las variables que definen el tipo de hormigón, el de la losa y el de la viga. El pretensado con armadura activa se encuentra definido por cuatro variables: el número de torones en las alas superiores, el número de torones dispuesto entre las primeras, segundas y terceras capas del ala inferior, el número de secciones con fundas dispuestas en la segunda capa y el número de secciones con fundas en la tercera capa. En último lugar, son 46 variables las que definen la armadura pasiva estándar dispuesta para la viga y la losa superior. Todas las variables son discretas en este análisis, pudiendo tomar cada una de ellas un rango fijo de valores que forman un espacio aproximado de 1.60×10^{65} soluciones. Este desorbitado espacio de soluciones es el que justifica la adopción de algoritmos heurísticos para encontrar soluciones económicas en tiempos de cálculo razonables.

<i>Descripción</i>	<i>Precio en viga</i>	<i>Precio en losa</i>
kg acero pasivo (B-500-S)	2,63	1,40
kg acero activo (Y-1860-S7)	3,38	NA
m de molde en viga	75,11	NA
m ² de encofrado en losa	NA	30,00
m ³ de hormigón HA-25	NA	64,99
m ³ de hormigón HA-30	NA	69,95
m ³ de hormigón HA-35	NA	74,03
m ³ de hormigón HA-40	NA	79,12
m ³ de hormigón HP-35	122,25	NA
m ³ de hormigón HP-40	133,40	NA
m ³ de hormigón HP-45	142,15	NA
m ³ de hormigón HP-50	152,89	NA

Tabla 1. Precios unitarios de los materiales (€).

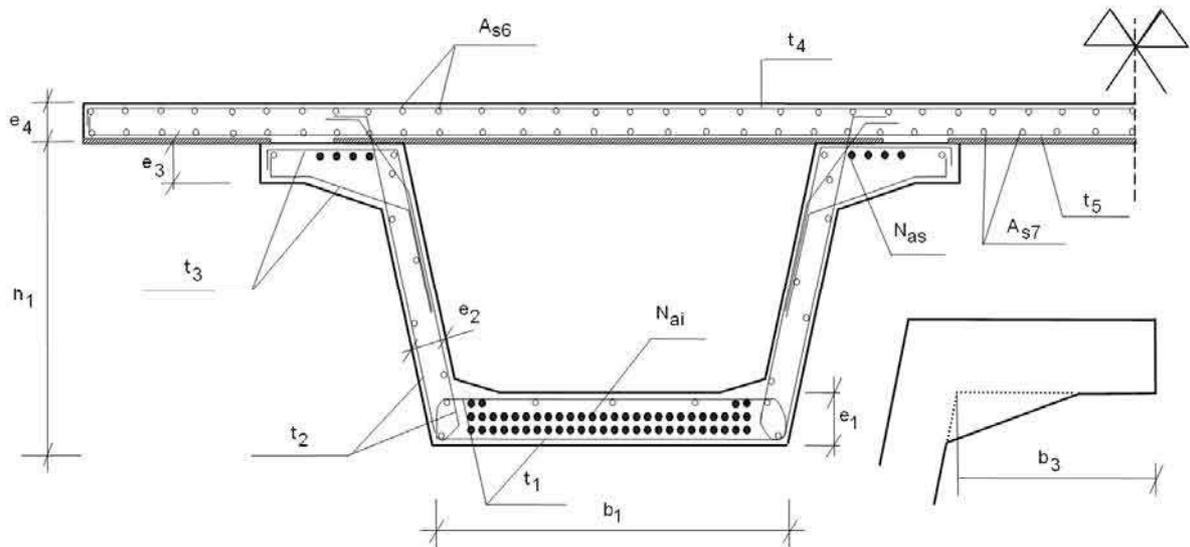


Figura 3. Variables geométricas y armadura activa y pasiva.

En cuanto a los parámetros, éstos son magnitudes que se toman como datos fijos y que, por tanto, no afectan a la optimización de la estructura. Los principales parámetros empleados en este problema se han dividido en geométricos, de carga, de coste, de armado y de exposición [8]. Entre ellos destacan el ancho del tablero, la inclinación de las alas, la luz de las vigas, la esbeltez mínima de la viga, las cargas muertas, la distancia de transporte, la dificultad de montaje de las vigas y los tipos de acero. Los parámetros de las vigas se han escogido para facilitar la adaptación de su diseño a los moldes de fabricación existentes en las empresas de prefabricados. Se han considerado las condiciones de durabilidad relativas a la instrucción de hormigón estructural [30], y las restricciones estructurales correspondientes [31].

3.2. Modelo estructural y comprobación del tablero

El empleo de las técnicas heurísticas en el ámbito del diseño estructural implica la comprobación de los estados límite a los que se encuentra sometida una estructura completamente definida. Para conocer la factibilidad de la estructura frente a los estados límite, es obligatorio conocer las acciones que intervienen durante el proceso constructivo de la viga prefabricada y de su puesta en obra. La viga artesana se ve sometida a las acciones que provienen de la fuerza de pretensado y del peso propio en la planta de prefabricados, además del peso propio de la losa ejecutada in situ sobre la viga y del peso propio y acciones variables sobre el conjunto estructural formado por las vigas y la losa. El conocido método de la rigidez proporciona los desplazamientos en los nodos de la estructura $\{D\}$, una vez conocidos el vector de cargas nodales $\{F\}$ y la matriz de rigidez $[K]$, mediante la ecuación matricial $\{F\} = [K] * \{D\}$.

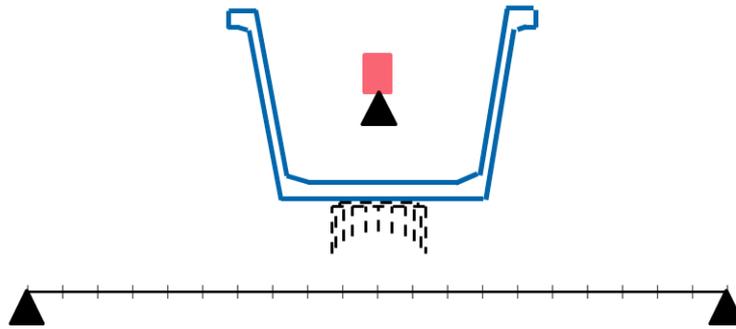


Figura 4. Modelización de la viga en la planta.

El primer caso analizado corresponde al estado de cargas más desfavorable encontrado cuando la viga se halla en la planta de prefabricados y cuando se coloca en obra y recibe el hormigón fresco de la losa (Fig. 4). La viga se discretiza en 20 barras y 21 nodos, usándose el método del emparrillado plano que ha sido resuelto mediante un análisis matricial lineal elástico. El segundo caso examinado se basa en un modelo estructural representado por un emparrillado plano, formado por dos vigas paralelas discretizadas como antes, pero con conexiones entre los nudos de las barras anteriores (Fig. 5). Para la representación de las características mecánicas de las barras se ha considerado el emparrillado tipo “1” definido por Manterola [32], lo que permite obtener la sollicitación longitudinal de cada una de las vigas cajón y las flexiones transversales en la losa de unión debidas al reparto transversal entre cajones. El cálculo de la sección transversal propiamente dicho, con apoyos indeformables, se ha realizado aparte. En el cálculo se han considerado las combinaciones de las acciones que producen máximos flectores, cortantes y torsores para los diferentes estados límite, tanto de servicio como últimos.

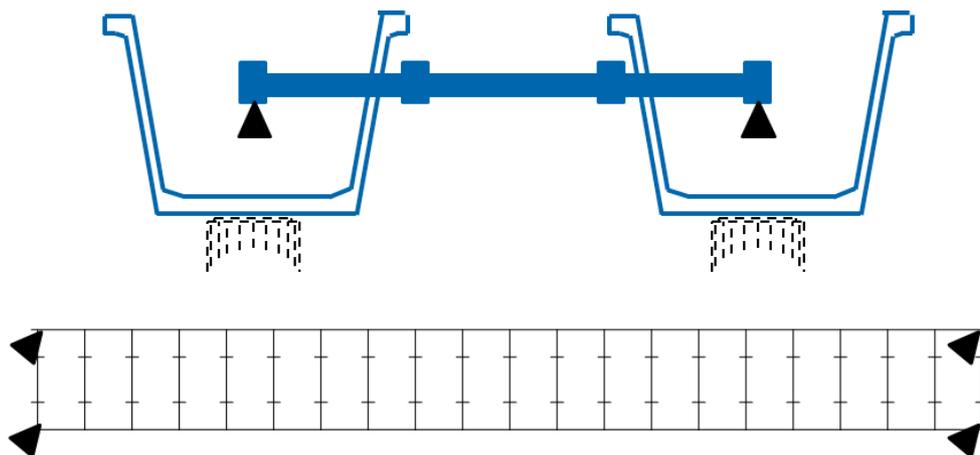


Figura 5. Modelización del tablero como emparrillado.

Las acciones permanentes de valor constante consideradas son el peso propio y las cargas muertas (pavimento y pretilos). Los pretilos presentan una carga distribuida uniforme de 5 kN/m; las cargas de valor no constante sobre la viga consideradas son el pretensado, la retracción y la fluencia. Las acciones variables aplicadas sobre el tablero se corresponden al tren de cargas en puentes [31], si bien cabe señalar que recientemente en España se ha modificado dicho tren para adaptarse al contenido de los Eurocódigos. En cada estado individual de cargas se aplica una sobrecarga repartida uniforme de 4 kN/m² sobre el área limitada entre dos nodos, el eje de una viga y el extremo del tablero o el eje del mismo. Además, se considera una carga puntual de 600 kN, que en cada estado de cargas actúa sobre un nodo y a la máxima excentricidad exterior, teniendo en cuenta la separación a los pretilos. Por otra parte, se han considerado las restricciones habituales que prescribe la normativa española para este tipo de estructuras [30,31]. Eso incluye las comprobaciones de los estados límites últimos y de servicio para flexión, cortante y torsor, así como fisuración, fatiga y las deformaciones (instantáneas y diferidas) para la envolvente de tensiones debida al peso propio y a las cargas del tráfico. La acción que ejerce el pretensado en la viga se ha desglosado en cuatro niveles, tres en el ala inferior y uno en las alas superiores. Se ha tomado como simplificación en este trabajo la colocación de las fundas sobre todos los torones de un mismo nivel. Cuando en una sección existe uno o varios niveles de fundas, en ellos no actúan el pretensado, no teniéndose en cuenta ni en su acción, ni en las características mecánicas de la sección. Las pérdidas de la acción del pretensado sobre toda la viga se calculan por nivel y se reparten entre las secciones donde la armadura activa es adherente.

3. HEURÍSTICA APLICADA. SIMULATED ANNEALING (SA)

La heurística aplicada en la búsqueda de soluciones para la optimización económica es el del recocido simulado -simulated annealing (SA)-, que fue propuesto originalmente por Kirkpatrick et al. [33] para el diseño de circuitos electrónicos. “Annealing”, en castellano “recocido”, es el proceso químico de calentar y enfriar un elemento de modo controlado. Cuando un metal se calienta por encima de su punto de fundición sus propiedades cuando se enfríe dependerán, en gran medida, del proceso de enfriamiento. En el punto de fundición una gran cantidad de energía está presente en el material, por lo que las moléculas se podrán mover libremente. Si disminuye la temperatura se reducirá la energía en el sistema y simultáneamente los movimientos del material. Si el metal se enfría lentamente se formarán cristales cuya disposición es la de energía mínima. Si se enfría excesivamente rápido, las moléculas pueden llegar a estados meta-estables, sin conseguir configuraciones adecuadas. El algoritmo se inicia con una solución generada aleatoriamente. Esta solución se comprueba bajo las restricciones estructurales, y si es factible se toma como una primera solución con una alta temperatura. La solución inicial se cambia por un pequeño movimiento aleatorio de los valores de las variables. La nueva solución actual se analiza estructuralmente, y si es viable se evalúa su coste. Se aceptan soluciones de mayor coste cuando un número aleatorio entre 0 y 1 es más pequeño que la expresión $\exp(-\Delta E/T)$, donde ΔE es el incremento del coste y T es la temperatura actual, y se adopta como la nueva solución de trabajo. La temperatura

inicial decrece geoméricamente ($T=kT$) por medio de un factor de enfriamiento k . Para cada temperatura se ejecutan un número fijado de iteraciones llamado *cadena de Markov*. El algoritmo se para cuando la temperatura se reduce a un porcentaje pequeño de la inicial y, al mismo tiempo, no hay mejoras en un número consecutivo de *cadena de Markov* (típicamente 1% y 1 o 2 cadenas de Markov). Este método, es capaz de sobrepasar óptimos locales en temperaturas de rango alto-medio para converger gradualmente cuando la temperatura tiende a cero. La heurística SA requiere la calibración de la temperatura inicial, de la longitud de las cadenas de Markov y del coeficiente de enfriamiento.

El algoritmo SA y el módulo de comprobación estructural se han programado en Fortan. Los parámetros empleados en la heurística son: *cadena de Markov* de 2500 iteraciones, coeficiente de enfriamiento de la temperatura k de 0,95, temperatura inicial ajustada al 0,5% del coste de la solución inicial; la mutación más eficiente se corresponde con un movimiento aleatorio de nueve variables, y criterio de parada del 2% de la temperatura inicial T_0 y dos cadenas sin mejora. Se procesaron nueve ejecuciones, obteniéndose valores mínimos, medios y desviaciones de los resultados. La Tabla 2 detalla los principales valores medios de las variables.

Coste	h_1	e_4	b_1	b_3	e_1	e_2	e_3	$f_{c,viga}$	$f_{c,losa}$	Na_i	Na_s
(euros)	(m)	(MPa)	(MPa)	(n)	(n)						
110,477	1,92	0,22	1,96	0,25	0,17	0,10	0,21	47	37	57	2

Tabla 2. Valores medios de las variables geométricas, hormigón y acero activo.

4. INFLUENCIA DE LOS PRECIOS UNITARIOS

A continuación se analiza la sensibilidad del problema a la variación de los precios unitarios. Se plantea cómo se adapta la solución optimizada ante un incremento en el precio del mercado del acero, o del hormigón; cuánto aumenta el coste de la solución óptima cuando se reduce la cantidad del material que ve incrementado su precio. Para este estudio se han considerado incrementos del precio del acero, que incluye ambas armaduras activa y pasiva, en un 5, 10, 15 y 20% manteniendo el precio del hormigón, y la reciprocidad en el incremento del precio del hormigón, tanto armado como pretensado, también en un 5, 10, 15 y 20%.

4.1. Variación en el coste de la solución optimizada

En la Tabla 3 se muestran los resultados para nueve ejecuciones de los costes obtenidos con variaciones de precios del acero y del hormigón, desde el 5 hasta el 20% del incremento en precio. En la Figura 6 se representan los valores medios.

Ejec.	Acero					Hormigón			
	20%	15%	10%	5%	0%	5%	10%	15%	20%
1	124872	123487	115403	112515	109912	111093	113670	110966	117123
2	123773	121820	117298	113150	111849	114902	110225	112915	116470
3	123369	122117	118189	115703	111362	111500	115634	113209	115292
4	124206	119172	115901	112415	111219	112015	113046	111226	115197
5	121137	121570	118234	114316	109004	113112	110208	112491	113898
6	122817	120044	117844	114999	109034	111527	110762	111885	114784
7	122327	120796	123370	113583	112868	111833	112002	113557	113741
8	123752	119843	117712	114432	109770	111931	113661	116441	114606
9	125578	122239	115761	114151	109277	112085	114162	112867	114931

Tabla 3. Costes optimizados con las variaciones del precio del acero y del hormigón

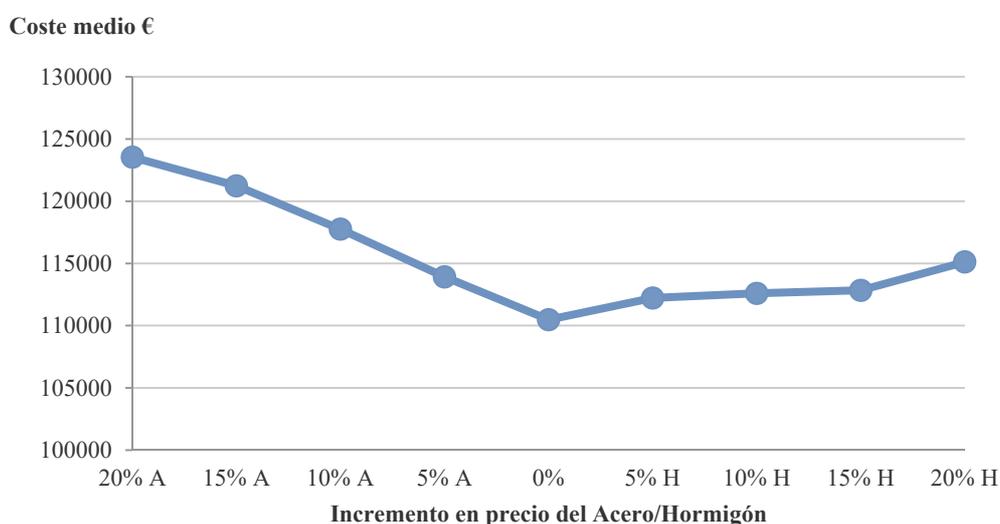


Figura 6. Costes medios con las variaciones del precio del acero y del hormigón

Se observa que es mucho más acusada la repercusión sobre el coste cuando el incremento en precio se produce en el acero. En el caso extremo, cuando se incrementa el 20% el precio del acero, el coste se ve aumentado en un 11,82%; mientras que si dicho incremento se ocasiona en el hormigón, el coste del tablero aumenta un 4,20%, equivalente a 2,8 veces menos.

4.2. Variación en las cuantías de acero y hormigón

Con respecto a la sensibilidad de la cuantía del acero en función de la variación de precios, se ha tomado como primera aproximación, la suma de la cuantía del acero activo y del pasivo. Se pretende conocer si la cuantía se altera ante los nuevos parámetros del problema. En la Figura 7 se muestran los resultados medios obtenidos. La heurística en su objetivo de optimizar el coste adapta, con cierta lógica, la cuantía del acero a la variación del precio del

acero y del hormigón, reduciéndola cuando aumenta el precio del acero, y aumentándola cuando se incrementa el precio del hormigón. Si se presta atención, y se comparan las pendientes de las ecuaciones de las rectas, el efecto es más acusado cuando la variación del precio se produce en el acero.

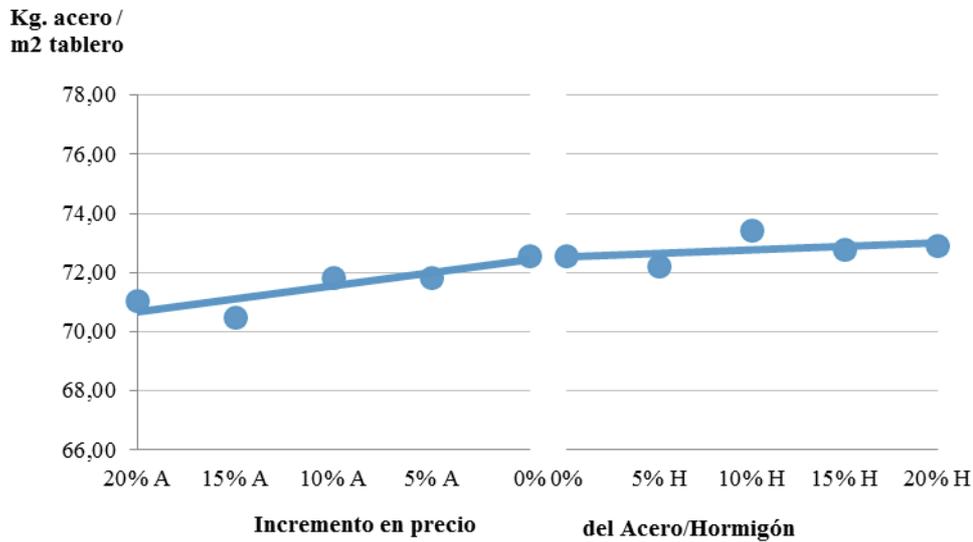


Figura 7. Cuantías de acero con las variaciones del precio del acero y del hormigón

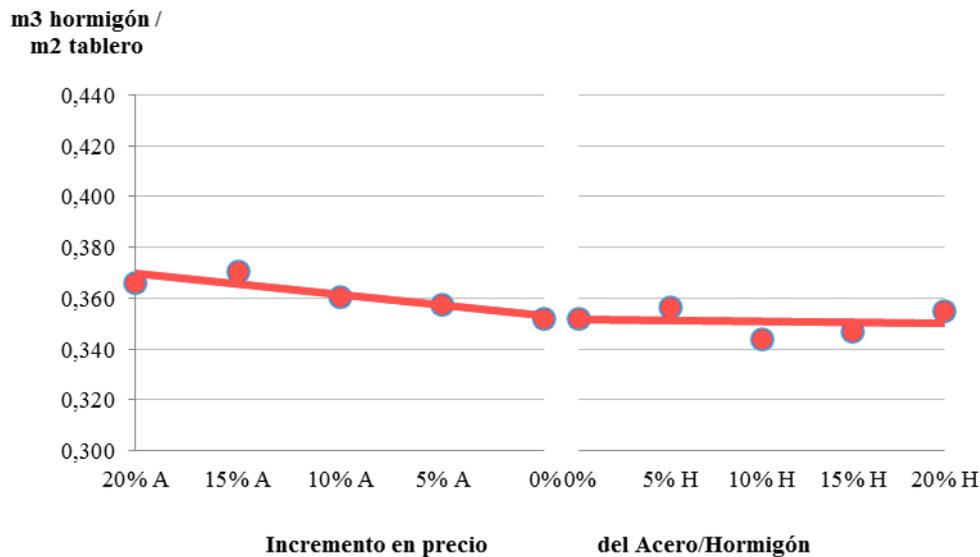


Figura 8. Cuantía de hormigón con las variaciones del precio del acero y del hormigón

La respuesta de la heurística respecto a la sensibilidad mostrada por la cuantía del hormigón en función de la variación de precios del acero y del hormigón sigue un comportamiento similar a la cuantía de acero. En la Figura 8 se representa el valor medio. Se ha actuado igual que en el caso de la cuantía del acero al combinar dos gráficas y añadir las líneas de tendencia. En este caso, se observa también como la heurística adapta la cuantía del hormigón a la variación del precio del acero y del hormigón, aumentándola cuando aumenta el precio del acero, y reduciéndola cuando se incrementa el precio del hormigón. El efecto es más acusado con la variación del precio del acero.

4.3. Variación en la geometría, armadura activa y tipos de hormigón

En las Figuras de la 9 a la 13 se representan los valores medios de las variables más importantes, para las soluciones óptimas cuando se adaptan a la variación de los precios. El canto de la viga (Fig. 9) se mantiene prácticamente constante. Su valor medio es de 1,91 metros, con una esbeltez próxima al 1/18 de la luz.

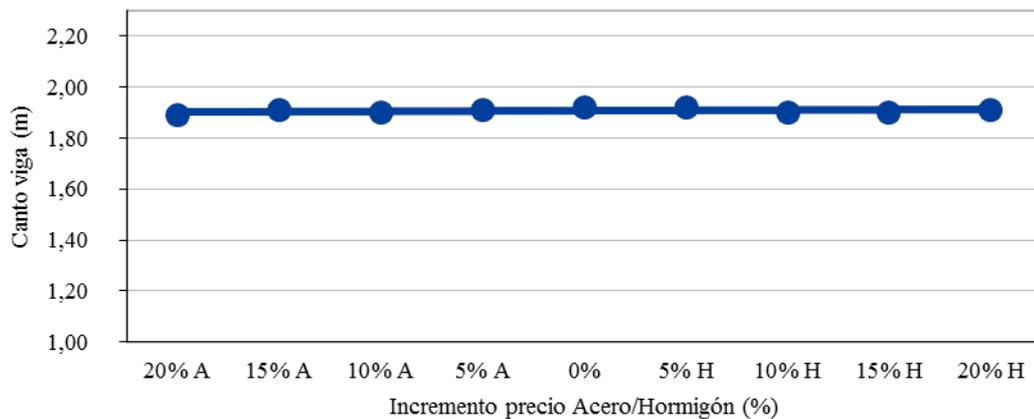


Figura 9. Sensibilidad del canto medio de la viga respecto a la variación del precio del acero y del hormigón

El espesor de la losa (Fig. 10) tiene tendencia escasa a reducirse cuando aumenta el precio del hormigón, y a aumentar cuando lo hace el acero. El número de torones (Fig. 11) permanece prácticamente constante, con un valor medio de 58 torones. Y finalmente, tanto los hormigones de la viga (Fig. 12) como de la losa (Fig. 13) toman valores muy uniformes, siendo las resistencias características medias de 48 MPa y de 38 MPa, respectivamente.

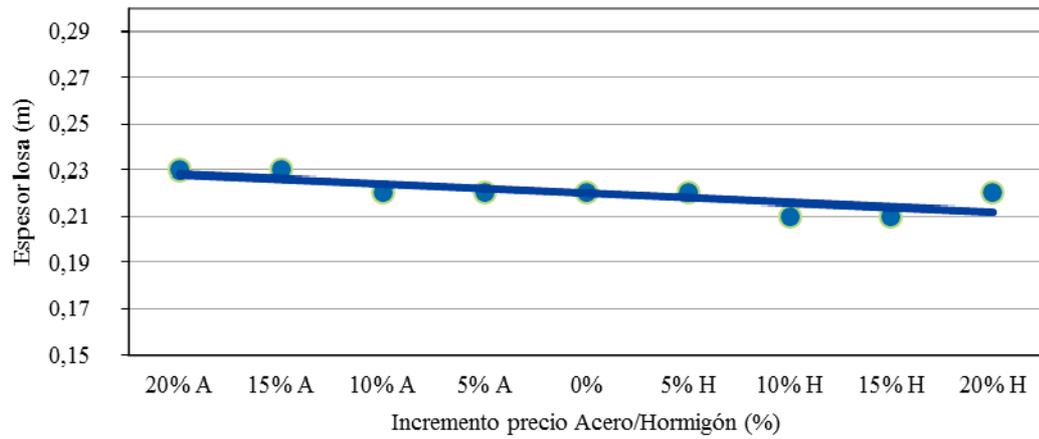


Figura 10. Sensibilidad del espesor de la losa respecto a la variación del precio del acero y del hormigón

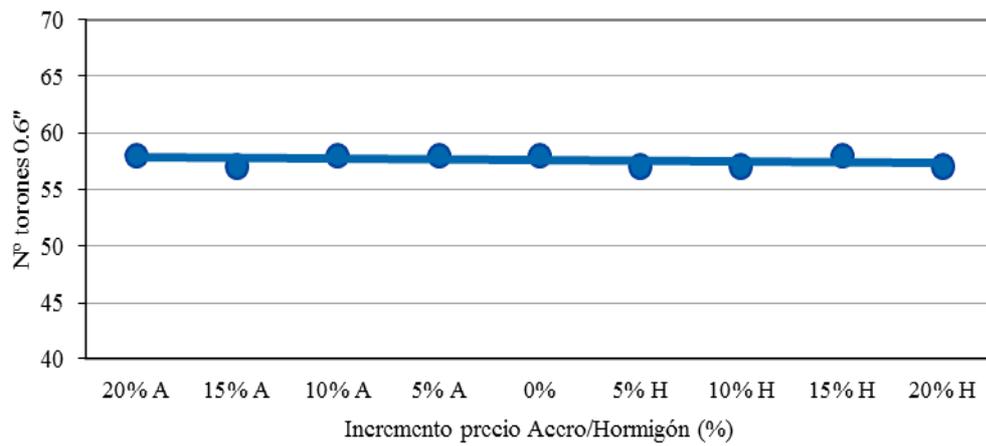


Figura 11. Sensibilidad de la armadura activa respecto a la variación del precio del acero y del hormigón

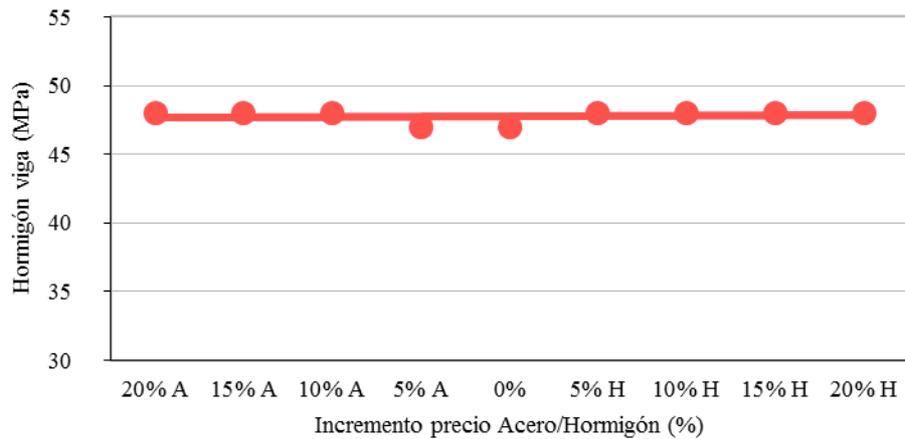


Figura 12. Sensibilidad de la resistencia del hormigón de la viga respecto a la variación del precio del acero y del hormigón

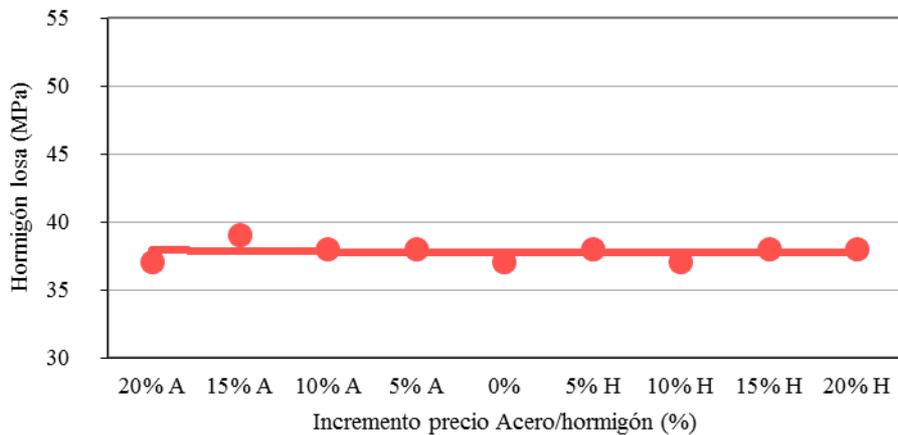


Figura 13. Sensibilidad de la resistencia del hormigón de la losa respecto a la variación del precio del acero y del hormigón

5. CONCLUSIONES

Se ha aplicado la heurística SA en el desarrollo de un programa propio en lenguaje Fortran para el diseño automatizado y optimizado de tableros para puentes con vigas artesa pretensadas, pudiendo utilizarse de un modo práctico en casos reales. El modelo se adapta a la variación de precios para optimizar el coste de la estructura. Al incrementarse el precio del acero, disminuye su cuantía y aumenta la del hormigón, y al aumentar el precio del hormigón, ocurre lo contrario. Es coste es más sensible a la variación del precio del acero que del hormigón, del orden de tres veces. Sin embargo, prácticamente no se ve afectada la geometría de la sección, incluido el pretensado, salvo una ligera adaptación del canto de la losa. Ello muestra la robustez de la sección y del pretensado ante las variaciones de los precios.

Consecuentemente, la esbeltez de la viga tampoco varía, manteniéndose en el límite del 1/18 de la luz.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio Español de Economía y Competitividad y fondos FEDER (proyecto de investigación BIA2014-56574-R).

REFERENCIAS

- [1] V. Penadés-Plà, T. García-Segura, J.V. Martí and V. Yepes. “A review of multi-criteria decision making methods applied to the sustainable bridge design”, *Sustainability*, Vol. **8**, 1295, (2016).
- [2] V. Yepes, C. Torres-Machí, A. Chamorro and E. Pellicer, “Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm”, *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. **22**, pp. 540-550, (2016).
- [3] L.A. Sierra, E. Pellicer and V. Yepes, “Method for estimating the social sustainability of infrastructure projects”, *Environmental Impact Assessment Review*, (accepted, in press), (2017).
- [4] I. Zamarrón-Mieza, V. Yepes and J.M. Moreno-Jiménez, “A systematic review of application of multi-criteria decision analysis for aging-dam management”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. **147**, pp. 217-230, (2017).
- [5] T. García-Segura and V. Yepes, “Multiobjective optimization of post-tensioned concrete box-girder road bridges considering cost, CO2 emissions, and safety”, *Engineering Structures*, Vol. **125**, pp. 325-336, (2016).
- [6] V. Yepes, J.V. Martí, T. García-Segura and F. González-Vidosa. “Heuristics in optimal detailed design of precast road bridges”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, doi:10.1016/j.acme.2017.02.006, (2017).
- [7] T. García-Segura, V. Yepes and D.M. Frangopol. “Multi-Objective Design of Post-Tensioned Concrete Road Bridges Using Artificial Neural Networks”, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, doi:10.1007/s00158-017-1653-0, (2017).
- [8] J.V. Martí, *Optimización de tableros isostáticos de vigas artesa*. Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG. ISSN 9783844339451, (2011).
- [9] J.V. Martí, V. Yepes and F. González-Vidosa, “A memetic algorithm approach to designing of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 04014114, (2015).
- [10] J.V. Martí, T. García-Segura and V. Yepes, “Structural design of precast-prestressed concrete U-beam road bridges based on embodied energy”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. **120**, pp. 231-240, (2016).
- [11] J.V. Martí, V. Yepes, F. González-Vidosa and A. Luz, “Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos”, *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. **30**, pp. 145-154, (2014).
- [12] J.V. Martí and F. González-Vidosa, “Design of prestressed concrete precast pedestrian

- bridges by heuristic optimization”, *Advances in Engineering Software*, Vol. **41**, pp. 916-922, (2010).
- [13] J.V. Martí, F. González-Vidoso, V. Yepes and J. Alcalá, “Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing”, *Engineering Structures*, Vol. **48**, pp. 342-352, (2013).
- [14] F.J. Martínez, F. González-Vidoso, A. Hospitaler and V. Yepes, “Heuristic Optimization of RC Bridge Piers with Rectangular Hollow Sections”, *Computers & Structures*, Vol. **88**, pp. 375-386, (2010).
- [15] F.J. Martínez-Martín, F. González-Vidoso, A. Hospitaler and V. Yepes, “Multi-objective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms”, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, Vol. **13**, pp. 420-432, (2012).
- [16] F.J. Martínez-Martín, F. González-Vidoso, A. Hospitaler and V. Yepes, “A parametric study of optimum tall piers for railway bridge viaducts”, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. **45**, pp. 723-740, (2013).
- [17] A. Luz, V. Yepes, F. González-Vidoso and J.V. Martí, “Diseño de estribos abiertos en puentes de carretera obtenidos mediante optimización híbrida de escalada estocástica”, *Informes de la Construcción*, Vol. **67**, e114, (2015).
- [18] British Standards, *BS 8110-1: 1997 Structural use of concrete. Part 1: Code of practice for design and construction*, British Standards, London, (1997).
- [19] M.Z. Cohn and A.S. Dinovitzer, “Application of structural optimization”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. **120**, pp. 617-649, (1994).
- [20] A. Carbonell, F. González-Vidoso and V. Yepes, “Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization”, *Advances in Engineering Software*, Vol. **42**, pp. 151-159, (2011).
- [21] V. Yepes, F. González-Vidoso, J. Alcalá and P. Villalba, “CO₂-Optimization design of reinforced concrete retaining walls based on a VNS-threshold acceptance strategy”, *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. **26**, pp. 378-386, (2012).
- [22] T. García-Segura, V. Yepes, J.V. Martí and J. Alcalá, “Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm”, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. **11**, pp. 1190-1205, (2014).
- [23] P. Zastrow, F. Molina-Moreno, T. Garcia-Segura, J. V. Marti and V. Yepes, “Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: A parametric study”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. **140**, pp. 1037-1048, (2016).
- [24] S. Hernández and A. Fontan, *Practical Applications of Design Optimization*, WIT Press: Southampton, (2002).
- [25] R. Fletcher, *Practical Methods of Optimization*, Wiley: Chichester, (2001).
- [26] M.T. Jones, *Artificial Intelligence Application Programming*, Charles River Media: Hingham (Massachussets), (2003).
- [27] J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press: Ann Arbor, (1975).
- [28] D.E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, (1989).
- [29] F. Glover and M. Laguna, *Tabu Search*, Kluwer Academic Publishers: Boston, (1997).

- [30] M. Fomento, EHE. *Instrucción de Hormigón Estructural*. M. Fomento, Madrid, (2008).
- [31] M. Fomento, IAP-98. *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*. M. Fomento: Madrid, (1998).
- [32] J. Manterola, *Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción*. Colección Escuelas, Madrid, (2006).
- [33] S. Kirkpatrick S., C.D. Gelatt and M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, Vol. **220**, pp. 671-680, (1983).