

Aplicación de metaheurísticas en la optimización de pasos superiores de carreteras

José V. Martí¹, Víctor Yepes², Tatiana García-Segura³

Resumen—El artículo se ocupa de la optimización económica de los tableros de los pasos superiores de carreteras formados por una losa de hormigón ejecutada in situ y dos vigas artesas prefabricadas de hormigón pretensado autocompactable. Se comprueba la eficacia de las distintas metaheurísticas aplicadas en la optimización: “*descent local search*” (DLS), “*simulated annealing*” (SA), “*threshold accepting*” (TA), “*genetic algorithms*” (GA) y “*memetic algorithms*” (MA). Los cálculos de las tensiones y de sus envolventes, son programados en lenguaje fortran directamente por los autores. Los algoritmos de optimización heurística se aplican a un tablero de 35 m de luz y 12 m de ancho. Los parámetros que definen la forma de la sección de la viga se adaptan a los moldes de una instalación de prefabricados. El ejemplo que se analiza consta de 59 variables discretas. El módulo de la evaluación incluye los estados límite último y de servicio que se aplican comúnmente para estas estructuras: flexión, cortante, torsor, fisuración, flechas, etc. Los algoritmos SA y TA se han calibrado previamente a partir del DLS, y el MA a partir del GA y del SA. Cada heurística se procesa nueve veces, obteniéndose información estadística sobre el valor mínimo, el medio y las desviaciones. Se realiza un análisis del rendimiento de las distintas heurísticas, basado en un estudio de las soluciones Pareto-óptimas entre tiempo de ejecución y rendimiento. Los mejores resultados se obtienen para el SA y el TA, siendo el coste mínimo de 108008 €, correspondiente al SA. Finalmente, entre las principales conclusiones de este estudio, destaca que las soluciones y los tiempos de proceso computacional son tales, que estos métodos se pueden aplicar de un modo práctico a casos reales, y que el conocimiento derivado del uso de estos algoritmos permiten recomendar rangos de valores para emplearlos en el diseño optimizado de estas estructuras y en su aplicación para los predimensionados de las variables.

Palabras clave—Optimización, metaheurística, puentes, pasos superiores, diseño de estructuras.

1. INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial, desde sus comienzos hacia mediados de 1950, se ha ido utilizando progresivamente como herramienta resolutoria en distintos ámbitos técnicos. 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 alto potencial y los buenos resultados obtenidos con la aplicación de la inteligencia artificial en la optimización económica, en el presente, el diseño de estructuras de hormigón está muy condicionado por la experiencia de los ingenieros calculistas. El diseño tradicional de estructuras de hormigón se fundamenta en el conocimiento y experiencia sobre la materia de los proyectistas, que tienen como objetivo la obtención de estructuras seguras y que a la vez cumplan los condicionantes de durabilidad a lo largo de su vida útil [1]. 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. Tal procedimiento conduce a diseños seguros, pero en cambio, la economía de las estructuras de hormigón queda muy condicionada a la experiencia del diseñador calculista.

Los métodos metaheurísticos de optimización pretenden minimizar una función objetivo, como pueda ser en nuestro 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 [2]. Nuestro grupo de investigación ha presentado últimamente trabajos de optimización de estructuras de hormigón armado y pretensado con distintas técnicas heurísticas [3-10]. De un modo general, los métodos de optimización estructural se pueden clasificar en dos amplios grupos: métodos exactos y métodos heurísticos. Los métodos exactos se corresponden con el sistema tradicional. Se basan en el cálculo de soluciones óptimas siguiendo las técnicas iterativas de la programación lineal [11,12]. 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 [13-16], tales como búsqueda por gradiente (DLS), algoritmos genéticos (GA), meméticos (MA), recocido simulado (SA), búsqueda tabú (TS), aceptación por umbrales (TA),

¹ ICITECH. Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022 Valencia. E-mail: jvmartia@upv.es

² ICITECH. Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022 Valencia. E-mail: vyepesp@upv.es

³ ICITECH. Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022 Valencia. E-mail: tagarse@cam.upv.es

colonias de hormigas (ACO), etc. Dichos métodos se han aplicado con éxito en áreas diferentes de la ingeniería estructural [17]. Se basan en algoritmos sencillos, pero que necesitan un gran esfuerzo computacional al contener un número elevado de iteraciones en las cuales se valora la función objetivo y se comprueban las restricciones estructurales.

II. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

El problema planteado pretende optimizar una estructura utilizada como paso superior de carreteras. 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, utilizando 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 que tanto efecto antiestético producen. El problema de optimización está basado en la tesis doctoral del primer autor [18]. La luz del vano es la habitual de 35 m. 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 (ver Fig. 1 y Fig. 2). 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 implementado un módulo que evalúa todos los estados límites relevantes, y posteriormente se han desarrollado, específicamente para este trabajo, los algoritmos metaheurísticos capaces de encontrar soluciones optimizadas en coste. El artículo, tras realizar el planteamiento del problema de optimización, define los algoritmos aplicados y

presenta los resultados obtenidos, recogiendo las principales conclusiones.

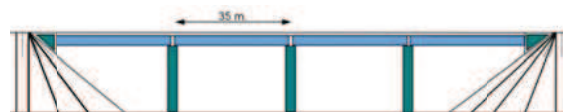


Fig. 1. Perfil longitudinal del paso superior.

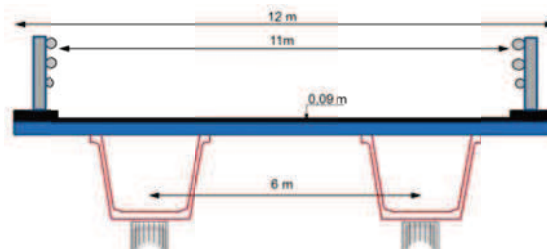


Fig. 2. Sección transversal del tablero.

III. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER

El problema matemático consiste en la optimización económica de la estructura. Para ello se deben encontrar los valores de las variables de diseño (x_1, x_2, \dots, x_n) capaces de minimizar el coste representado por la expresión {1}, satisfaciendo además las condiciones formuladas en la expresión {2}, que indican las restricciones geométricas y de constructibilidad, así como los estados límite que se deben verificar. 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}. Las soluciones que satisfacen las restricciones en la expresión {2} se denominan factibles, y las que no, soluciones no factibles

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

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

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

TABLA I
Precios unitarios de los materiales en euros

Descripción	Precio	Precio
	en viga	en losa
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

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. Finalmente, son 46 variables las que definen la armadura pasiva estándar dispuesta para la viga y la losa superior. Todas las variables en este análisis son discretas, pudiendo tomar cada una de ellas un determinado rango 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.

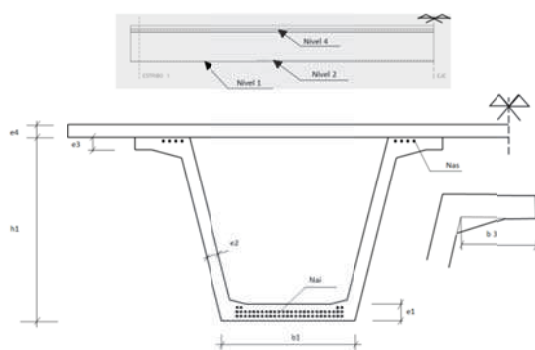


Fig. 3. Variables geométricas del tablero.

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 se han dividido en geométricos, de carga, de coste, de armado y de exposición. Entre ellos destacan el ancho del tablero, la inclinación de las almas, 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 han sido escogidos para facilitar la adaptación de su diseño a los moldes de fabricación existentes en las empresas de prefabricados. Las condiciones de durabilidad son las relativas a la instrucción de hormigón EHE [19].

Se han considerado las restricciones estructurales de la IAP-98 [20], eso incluye comprobaciones en los estados límite últimos y de servicio para flexión, cortante y torsor, así como fatiga, fisuración y las deformaciones para la envolvente de tensiones debida al peso propio y a las cargas del tráfico. Las tensiones y las reacciones se obtienen como resultado de un programa de desarrollo propio que considera los distintos estados tensionales que se producen en la fabricación de la viga y en su puesta en obra, mediante dos modelos de elementos finitos de emparrillado plano aplicando el conocido método de la rigidez. El primer modelo está compuesto por 20 barras y 21 nodos, y el segundo por 103 barras y 84 nudos. Tanto el módulo de comprobación estructural como los algoritmos aplicados han sido programados en lenguaje Fortran 95 con un compilador Compaq Visual Fortran Professional 6.6.0. en un ordenador con un procesador Intel Core TM2 Quad CPU Q6600 2.40 GHz.

IV. ALGORITMOS EMPLEADOS

A. Descent local search (DLS)

Esta heurística se aplica para ayudar a calibrar el *SA* y *TA*, que a priori tienen mayor potencia para optimizar las funciones objetivo. El proceso se inicia con la solución obtenida de un modo aleatorio. A continuación se modifica la solución variando el valor de algunas de sus variables (movimiento). Si el coste del nuevo tablero mejora al anterior, entonces se comprueba y si resulta factible se acepta, reemplazando al anterior como solución de trabajo. Se repite el proceso hasta que no se encuentre ninguna nueva solución con coste inferior a la de trabajo después de un número determinado de iteraciones. Para tener en cuenta la componente aleatoria del método se repite el proceso un número determinado de veces (9 veces). El movimiento que se ha empleado modifica un número fijo (tipo justo) de variables elegidas al azar incrementando o disminuyendo un paso o unidad el valor de cada variable también de forma aleatoria.

Los movimientos aplicados al problema se han definido modificando el 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, y 30% de las variables, equivalente a 3, 6, 9, 12, 15 y 18 variables. Para cada tipo el algoritmo se repite 9 veces, y cada uno se procesa hasta que se produce un máximo de 25000 iteraciones seguidas sin mejora de la solución. En la Figura 4 se muestra la evolución del coste y tiempo para los distintos

movimientos de las variables y con 100, 500, 1000, 5000, 10000, 15000, 20000 y 25000 iteraciones sin mejora. Los óptimos de pareto más equilibrados entre coste/tiempo se corresponden con V9 (5000 iteraciones), y V12 (para 10000 y 15000 iteraciones). Se puede apreciar que el movimiento V9 presenta el mejor resultado, pues para este movimiento con 5000 iteraciones sin mejora su coste es de 134529 € y su tiempo de proceso es de 790 segundos. A partir de este punto, una mejora del 1.6% se consigue con un incremento del 72.2% en tiempos de computación para V12 (10000 iteraciones), y para el siguiente óptimo de pareto, una mejora del 2.8% en costes implica un incremento de más del doble en tiempos. La mejor solución encontrada se ha producido en una de las ejecuciones variando el 15% de las variables (V9), y su coste es de 115459 €.

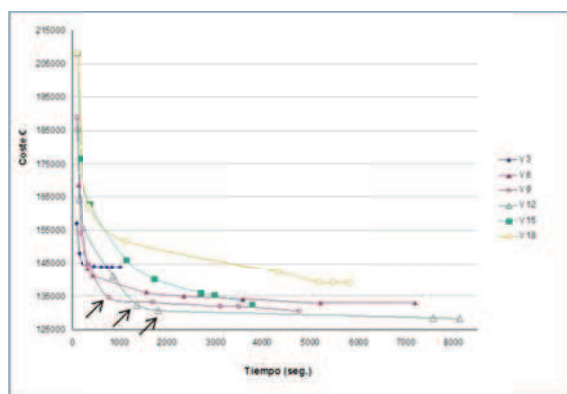


Fig. 4. Evolución del algoritmo DLS en el tiempo para distintas iteraciones y variables

B. Simulated annealing (SA) y Threshold accepting (TA)

El primero de los dos métodos, el SA, se funda en el fenómeno físico de la cristalización de los metales fundidos, originalmente propuesto por Kirkpatrick et al. [21]. Es una técnica similar al DLS, pero admite soluciones de trabajo de peor calidad (coste mayor) siempre que cumplan un cierto criterio de aceptación y a la vez sean factibles, permitiendo así escapar de óptimos locales. Hoy en día es una técnica muy conocida y desarrollada. El criterio de aceptación empleado es probabilístico. Al principio permite aceptar soluciones de trabajo más costosas con mucha probabilidad, reduciéndose dicha probabilidad conforme avanza el proceso, siendo al final de éste la probabilidad prácticamente nula para aceptar una solución peor, asemejándose en ese momento a un DLS.

El segundo método, el TA, originalmente propuesto por Dueck y Scheuer [22]. Se diferencia básicamente del SA en que el criterio de aceptación es determinista, aceptando soluciones de trabajo de mayor coste siempre que la diferencia entre ambos

costes sea menor a un umbral que va decreciendo durante el proceso.

El movimiento empleado en ambas metaheurísticas es el mejor obtenido con el DLS (nueve variables). Los rangos de aceptación para fijar la temperatura inicial (umbral inicial en TA) se ha tomado entre el 20% y el 40% (baja aceptación). Se emplean longitudes de la cadena de Markov (CM), número de iteraciones (NI) a umbral constante en TA, iguales a 500, 1000 y 5000 iteraciones sin mejora. La temperatura desciende linealmente durante el proceso, siendo el coeficiente reductor (RT), (RU) en TA, para cada CM 0.80 (bajo), 0.90 (medio) y 0.95 (alto). En total, 16 algoritmos distintos. Cada uno se procesa nueve veces. Se ha tomado como temperatura inicial T_0 el 0.5% del coste de la primera solución obtenida de modo aleatorio, que permite a lo sumo en tres cadenas de Markov fijar la T_0 . Como criterio de parada se establece el cumplimiento simultáneo: temperatura menor del 2% de la temperatura inicial T_0 y agotamiento de la cadena de Markov sin haber encontrado ninguna solución mejor que la mejor solución encontrada durante dos cadenas consecutivas. El menor coste obtenido con el SA es de 108008 € para CM=5000 y RT=0.85, mientras que para el TA es de 108580 € para NI=5000 y RU=0.95.

En la Figura 5 se representan los valores medios de los resultados obtenidos al aplicar las distintas combinaciones, 16 para cada una, de ambas metaheurísticas en función del tiempo. Se señalan cinco óptimos de pareto con flechas indicativas. Se han agrupado los valores por encima de 126000 € en "A", y los valores inferiores a 111000 € en "B" y "C". De los valores de la Figura 5 se desprende que: a) De los cinco óptimos de pareto, cuatro de ellos se corresponden al SA. Ello equivale al 80%. b) Con el SA, hay 3 procesos de los 16, que están por debajo de 111000 €. Ello equivale al 19% de los casos. c) Con el TA, hay un proceso por debajo de 111000 €, que equivale al 6% de los casos. d) Con el TA, hay 2 procesos que están por encima de 126000 €, que equivale al 13% de los casos. e) Con el SA, no hay ningún proceso de los 18 que están por encima de 126000 €.

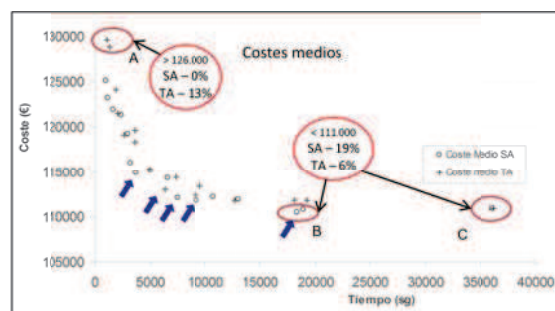


Fig. 5. Costos medios SA vs TA para las 16 combinaciones de cada una en función del tiempo

Se puede resumir al comparar las dos heurísticas (SA vs TA), lo siguiente: a) El coste más bajo, aunque sea por una magnitud insignificante, le corresponde al SA. b) Los costes medios son algo menores en el SA. c) Los tiempos medios de proceso son similares en ambos casos. d) Por lo tanto, se puede considerar que ambas heurísticas proporcionan resultados similares, aunque si se toman valores medios, podría decantarse ligeramente por el SA.

C. Algoritmos genéticos (GA)

Esta técnica metaheurística fue propuesta por Holland [23], inspirándose en el proceso observado en la evolución natural de los seres vivos. Mediante el cruzamiento genético y la mutación, los individuos de una población evolucionan creando individuos mejor adaptados. De las soluciones de la población anterior y las soluciones creadas mediante combinación y mutación se seleccionan las que formarán parte de la siguiente población. La nueva población puede seleccionarse de manera elitista, asegurando la supervivencia de las mejores soluciones de la población actual. La combinación entre dos soluciones se produce según un grado de cruzamiento de una de las variables al azar. En esta técnica se aplican penalizaciones para las soluciones no factibles afectando de ese modo a su aptitud.

Primeramente se han realizado nueve ejecuciones con la combinación de los valores de cruzamiento 0.25, 0.50 y 0.75, y con tamaños de población de 100, 250 y 500 individuos, tomando resultados para 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175 y 200 generaciones. A estos procesos se les ha aplicado elitismo y no elitismo. En este primer análisis no se ha aplicado mutación. Los resultados muestran un comportamiento similar al aplicar o no elitismo. El coste medio mejora y el tiempo de proceso aumenta con el aumento del tamaño de población. El mejor coste medio se obtiene para un tamaño de la población de 500 individuos y un valor de cruzamiento de 0.50, siendo dicho valor de 138863 €, con una mejora del 3.1% respecto a sin elitismo.

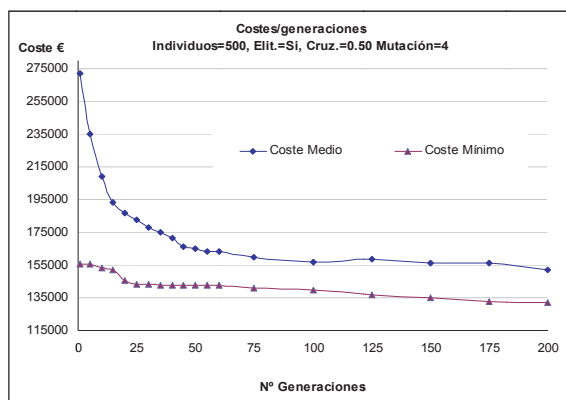


Fig. 6. Evolución de los costes medios y mínimos de un GA con mutación

TABLA II Aplicación de la mutación en el GA

Individuos =	500				
Cruzamiento =	0.50				
Generaciones =	200				
Mutación	Coste medio(€)	sg.	Coste mínimo(€)	% Desv.	% Mejora
0	138,743	21,964	132,618	4.6%	-
1	134,846	22,469	130,424	3.4%	2.8%
2	133,962	22,479	126,366	6.0%	3.4%
3	133,091	22,487	125,187	6.3%	4.1%
4	132,678	22,499	123,078	7.8%	4.4%
5	132,707	22,131	125,345	5.9%	4.4%

D. Algoritmos meméticos (MA)

Los algoritmos meméticos, Moscátó [24], combinan la búsqueda global de carácter poblacional y una metaheurística de búsqueda local. Tal como se ha comprobado en GA, cuando se aplicaba mutación –equivalente a una búsqueda local de carácter reducido–, algunas soluciones mejoraban significativamente.

Para la mejora de las soluciones aplicando búsqueda local se ha utilizado la metaheurística que mejores resultados ha ofrecido anteriormente, como es el SA, pero con el objeto de no llegar a una convergencia prematura, se han considerado los siguientes parámetros: CM igual a 50, T_0 igual al 5% del coste, y criterio de parada 10, 25 y 50 cadenas. Para cada uno de los tres criterios de parada, se han realizado 9 ejecuciones con la mejor heurística obtenida del GA, cuyos valores son: 500 individuos, 200 generaciones, elitismo, cruzamiento igual a 0.50, mutación = 4. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla III, donde el coste medio se refiere a la media de los valores mínimos de las 9 ejecuciones. Es de destacar el incremento en tiempo computacional que se produce respecto al GA, variando desde el 194% hasta el 575%.

TABLA III Resultados aplicando MA

C. Markov	Num. Cadenas	Coste medio(€)	sg.	Coste mínimo(€)	% Desv.	% Mejora/GA
50	10	129,718	43,639	124,446	4.2%	2.2%
	25	124,564	76,934	119,332	4.4%	6.1%
	50	119,703	129,441	116,933	2.4%	9.8%

En la Figura 7 se representa la evolución respecto a las generaciones, de los valores medios poblacionales y los mínimos para los parámetros de la Tabla III.

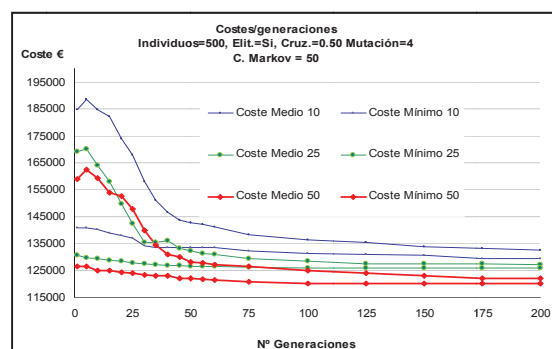


Fig. 7. Evolución de los costes medios y mínimos en un MA

El punto de partida viene determinado por la aproximación a un óptimo local de baja calidad mediante un SA. Se observa un comportamiento similar para las tres metaheurísticas, donde los valores medios van reduciéndose rápidamente al principio, para después ir haciéndolo más lento, y a continuación permanecer prácticamente constante. Hay que resaltar que al principio aumentan los costes medios respecto a los obtenidos por el SA, pero mínimamente, y a continuación continúan con un comportamiento típico de un GA. Si se compara la mejor heurística del MA con la mejor estudiada hasta el momento, el SA, se tiene con respecto al coste, que el menor valor medio, 119703 €, es un 8.4% superior al del SA, 110477 €, y que el tiempo empleado ha sido más de 7 veces al empleado por el SA. En cuanto al coste mínimo, en el MA es de 116933 € (Figura 7), mientras que en el SA ha sido de 108008 €, es decir un 8.3% superior.

V. RESUMEN DE LOS COSTES Y COMPARACIÓN DE LAS SOLUCIONES

En la Tabla IV se presenta un cuadro resumen con los valores de los mejores parámetros obtenidos de las heurísticas aplicadas.

TABLA IV Resumen de los costes

	DLS	SA	TA	GA(1)*	GA(2)*	GA(3)*	MA
Coste medio (€)	128309	110477	110865	143414	138743	132678	119703
Coste mínimo (€)	115459	108008	108580	126418	127969	123078	116933
Tiempo medio (seg.)	8122	18322	36233	20732	21960	22499	129441
% Coste medio/SA	16.1%	0.0%	0.4%	29.8%	25.6%	20.1%	8.4%

* GA(1) sin elitismo, (2) con elitismo, (3) con elitismo y mutación 4.

Se incluyen los costes medios y tiempos medios, el coste mínimo y el incremento en % de los costes medios de cada una de ellas respecto a la mejor, el SA. Las heurísticas que han obtenido mejores resultados son el SA y el TA, las cuales destacan sobre las demás. De lo descrito en el apartado 4.B de este artículo, y en especial por la representación de los óptimos de pareto dentro de la Figura 5, podríamos decantarnos por el SA, aunque debería señalarse que cualquiera de las dos podría utilizarse indistintamente.

En la Tabla V se resumen los resultados geométricos, hormigones y armadura activa para las mejores soluciones.

TABLA V Geometría, hormigones y activa

	Coste (€)	h1 (m)	e4 (m)	b1 (m)	b3 (m)	e1 (m)	e2 (m)	e3 (m)	Hv (MP)	Hi (HA)	p1 (n)	p2 (n)	p3 (n)	p4 (n)
DLS	115459	1.93	0.27	1.90	0.38	0.25	0.10	0.31	45	40	35	26	0	2
SA	108008	1.94	0.19	1.99	0.29	0.18	0.10	0.23	40	40	36	20	0	2
TA	108580	1.92	0.19	1.99	0.29	0.18	0.10	0.23	45	40	36	20	0	2
GA(1)	126418	1.78	0.24	1.92	0.33	0.17	0.16	0.20	45	30	35	29	0	6
GA(2)	127969	1.78	0.24	1.92	0.33	0.17	0.16	0.20	45	30	35	29	0	6
GA(3)	123078	1.69	0.22	1.98	0.41	0.23	0.14	0.32	40	35	36	34	0	6
MA	116933	1.80	0.23	1.78	0.38	0.22	0.10	0.30	50	35	32	31	0	2

Tanto el SA como el TA tienen valores geométricos muy similares, con cantos de viga altos y espesores de la losa pequeños; además coinciden

con las dimensiones de las alas y el número de torones en todos los niveles.

Las dimensiones de las alas inferiores son del orden de magnitud del canto de la viga, ello puede estar asociado a los parámetros del problema (anchura del tablero y número de vigas). La optimización estructural del hormigón va dirigida a dimensionar alas superiores cortas, puesto que éstas no ayudan a mejorar la resistencia a solicitaciones normales. El menor canto de la viga del TA es compensado con un hormigón de mayor resistencia (HP-45). Hay que señalar, que la aplicación en el GA de elitismo o no, no afecta a la geometría de las mejores soluciones, puesto que los valores de las variables son los mismos. Su diferencia en coste viene determinada por la armadura pasiva, tal como se puede ver en la Tabla VI.

TABLA VI Resultados: Armadura pasiva

Acero	DLS	SA	TA	GA(1)	GA(2)	GA(3)	MA
en viga (Kg)	6325	5562	5643	8554	8496	7167	6359
en losa (Kg)	17341	19561	19668	22105	22181	20015	19419
Total (Kg)	23666	25123	25311	30659	30677	27182	25778
% Acero/record	-5.8%	0.0%	0.7%	22.0%	22.1%	8.2%	2.6%

Las menores cantidades de acero en la viga se corresponden con el DLS y a continuación con el SA y el TA. Los mayores espesores de la losa en el DLS le permiten disponer de menos cantidad de acero en ella que el SA y el TA. En conjunto, son bastante similares en el SA, DLS, TA y MA, todos ellos tienen en común que han dispuesto, al menos en algún momento de su proceso, una búsqueda de aproximación a un óptimo local.

De los resultados de las tablas se desprende que:

a) Las tres heurísticas de búsqueda local (DLS, TA y SA), tienden a cantos máximos con espesores mínimos. De hecho, coinciden todos los valores geométricos para los mejores del TA y del SA, sólo cambia el canto de la viga.

b) Se tiende a economizar el volumen de hormigón. Hay una búsqueda de una sección que proporcione mayor inercia y sea a la vez lo más ligera posible. Ello se refleja en cantos de viga altos y espesores pequeños, y repercute en una necesidad menor de pretensado, por lo que no hay torones en el tercer nivel.

c) En el intento de aligerar la estructura se condiciona a utilizar hormigones de mayor resistencia, entre 40 y 50 MPa, en viga. En la losa, cuanto mayor es el canto, menor resistencia del hormigón se necesita, entre 30 y 40 MPa.

d) La medición de acero en la armadura pasiva se asemeja en el DLS, SA, TA y MA.

e) Los mejores resultados se obtienen con armadura activa mínima en el ala superior, la suficiente para impedir que fisure dicha ala durante el tesado.

f) Los espesores menores de losa en el TA y SA, respecto al DLS, se compensa con mayor armadura pasiva.

g) La optimización tiende a dimensiones cortas de las alas superiores de la viga.

VI. CONCLUSIONES

Las conclusiones resumidas son las siguientes:

a) Se han aplicado cinco metaheurísticas con sus variantes –DLS, SA, TA, GA y MA–, para el diseño automatizado y optimizado de tableros de pasos superiores de carreteras con vigas artesa pretensadas, siendo las más eficaces el SA y el TA. Los tiempos de proceso para estas dos últimas son suficientemente aceptables como para poder utilizarse de un modo práctico en casos reales.

b) La heurística que mejores resultados ha obtenido se corresponde con el algoritmo SA, con cadenas de Markov de 2500 iteraciones y coeficiente de enfriamiento de 0.95. Su tiempo de proceso es de unas cinco horas con el procesador utilizado en este trabajo.

c) El conocimiento derivado del uso de las metaheurísticas permiten recomendar rangos de valores para emplearlos en el diseño optimizado de estas estructuras y en su aplicación para los predimensionados de las variables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto de Investigación BIA2011-23602) y de la Universitat Politècnica de València (Proyecto de Investigación SP20120341).

REFERENCIAS

- [1] British Standards, BS 8110-1: 1997 Structural use of concrete. Part 1: Code of practice for design and construction, British Standards, London, 1997.
- [2] Cohn, M.Z. and Dinovitzer A.S., Application of structural optimization. ASCE Journal of Structural Engineering, 120(2), pp 617-649, 1994.
- [3] Martínez, F. J., González-Vidos, F., Hospitaler, H. and Yepes, V. Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections, Computers & Structures 88 375-386, 2010.
- [4] Martí, J.V. and González-Vidos, F. Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization, Advances in Engineering Software 41 916-922, 2010.
- [5] Carbonell, A., González-Vidos, F. and Yepes, V. Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization, Advances in Engineering Software 42 151-159, 2011.
- [6] Martínez, F.J., González-Vidos, F., Hospitaler, A. and Yepes, V. A parametric study of optimum tall piers for railway bridge viaducts, Structural Engineering and Mechanics 45 723-740, 2013.
- [7] Yepes, V., González-Vidos, F., Alcalá, J. and Villalba, P. CO₂-Optimization design of reinforced concrete retaining walls based on a VNS-threshold acceptance strategy. ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, 26 (3):378-386, 2012.
- [8] Martí, J.V., González-Vidos, F., Yepes, V. and Alcalá, J. Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing, Engineering Structures 48 342-352 2013
- [9] García-Segura, T.; Yepes, V.; Martí, J.V. and Alcalá, J. Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm. Latin American Journal of Solids and Structures, 11(7):1190-1205, 2014.
- [10] Martí, J.V.; Yepes, V. and González-Vidos, F. A memetic algorithm approach to designing of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement. ASCE Journal of Structural Engineering, 04014114, 2015.
- [11] Hernández S. and Fontan A., Practical Applications of Design Optimization, WIT Press: Southampton, 2002.
- [12] Fletcher, R., Practical Methods of Optimization, Wiley: Chichester, 2001.
- [13] Jones, M.T., Artificial Intelligence Application Programming, Charles River Media: Hingham (Massachusetts), 2003.
- [14] Holland, J.H., Adaptation in natural and artificial systems, University of Michigan Press: Ann Arbor, 1975.
- [15] Goldberg, D.E., Genetic algorithms in search, optimization and machine learning, Addison-Wesley, 1989.
- [16] Glover, F. and Laguna M., Tabu Search, Kluwer Academic Publishers: Boston, 1997.
- [17] Yepes, V. and Medina J.R. Economic heuristic optimization for the heterogeneous fleet VRPHESTW. ASCE Journal of Transportation Engineering, 132(4), pp 303-311, 2006.
- [18] Martí, J.V., Optimización de tableros isostáticos de vigas artesa. Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG. ISSN 9783844339451. 2011.
- [19] M. Fomento, EHE. Instrucción de Hormigón Estructural (in Spanish), M.Fomento, Madrid, 2008.
- [20] M. Fomento, IAP-98. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera, M.Fomento: Madrid, 1998.
- [21] Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. and Vecchi, M.P., Optimization by simulated annealing, Science, 220(4598), pp. 671-680, 1983.
- [22] Dueck, G. and Scheuer, T. Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm superior to simulated annealing. Journal of Computational Physics 1990, 90: 161-175.
- [23] Holland, J. "Adaptation In Natural and Artificial Systems.", The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [24] Moscato, P., "On evolution, search, optimization, genetic algorithms and Martial Arts: Towards Memetic Algorithms", Caltech Concurrent Computation Program, C3P Report 826, 1989.