

Composite bridge deck optimization with trajectory-based algorithms

Martínez-Muñoz, David¹; Sánchez-Garrido, A.J.²; J.V. Martí¹; V. Yepes¹

ABSTRACT

Bridge optimization can be difficult due to the large number of variables involved in the problem. In this work, the optimization of a steel-concrete composite box girder bridge has been performed considering cost as objective function. To achieve this objective, Simulated Annealing (SA) has been applied as an example of trajectory-based algorithm for the optimization of the structure. It is observed that the addition of cells to the bridge cross sections improves not only the section behavior but also the optimization results. Finally, it is observed that the proposed double composite-action design materializing slabs on the bottom flange on supports, allows eliminating the continuous longitudinal stiffeners. This method automatize the optimization process of an initial design of a composite bridge, which has traditionally been based on the technician's own experience, allowing to reach results in a more efficient way.

Keywords: Optimization, Structures, Composite bridges, Metaheuristics, Trajectory-based algorithms.

1. INTRODUCCIÓN

Cualquier resolución de un problema se traduce en la búsqueda de una solución que permita satisfacer las necesidades planteadas con la mínima inversión de recursos posible. Además, la propuesta de solución debe contemplar y cumplir con todas las restricciones impuestas, tanto por la propia naturaleza del problema como por cualquier otro tipo de condicionantes externos. En el caso de los problemas estructurales, las necesidades del problema son diversas y las restricciones impuestas tienen relación con la resistencia de las secciones y la compatibilización de las deformaciones con el uso que se le vaya a dar al elemento objeto de diseño. A la solución propuesta, se le exige que utilice la menor cantidad de recursos posible, generalmente en términos de coste. Por tanto, un problema estructural es básicamente un problema de optimización, en el que se busca una solución que cumpla unas restricciones minimizando, en este caso, los costes de la solución. Para llegar a esta solución óptima, los técnicos realizan un proceso iterativo en el que se plantean soluciones, se comprueba si cumplen las restricciones y se comparan los costes de unas y otras. La generación de nuevas soluciones se realizan mediante una ligera modificación de las variables del elemento estructural. Como es de esperar, cuanto mayor es la experiencia del técnico, más rápido se

¹ Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH). Universitat Politècnica de València (ESPAÑA). damarmu1@cam.upv.es (D. Martínez-Muñoz, corresponding author); jvmartia@cst.upv.es (J.V. Martí); vyepesp@cst.upv.es (V. Yepes).

² Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil. Universitat Politècnica de València (SPAIN). ajsangar@doctor.upv.es (A.J. Sánchez-Garrido).

llega a una solución óptima, ya que, normalmente, estos problemas tienen un gran número de variables haciéndolos destacar por su complejidad [1].

La tendencia actual en el campo de investigación de la optimización estructural trata de romper con esa dependencia entre la calidad de la solución y la experiencia del técnico aprovechando la capacidad computacional de los equipos informáticos. Debido a la complejidad de los problemas de optimización estructural, la exploración de todo el espacio de soluciones es imposible y por tanto, se recurre a técnicas heurísticas y metaheurísticas que, si bien no aseguran encontrar la mejor solución, han demostrado obtener buenos resultados [2, 3]. Estos métodos se han aplicado en diversos tipos de estructuras de hormigón como muros de contrafuertes [4, 5, 6], vigas de edificación [1], puentes [7, 8, 9] o incluso a la predicción de longitud de transferencia en cordones de pretensado [10]. Sin embargo, la aplicación de estos métodos a estructuras mixtas no se ha realizado de manera tan extensa tal como se indica en una revisión reciente [11]. En este estudio, además, se hace hincapié en la falta de estudio en temas como en análisis de ciclo de vida de puentes mixtos [12], tal y como se ha hecho, de manera extensa, con los puentes de hormigón [13]. esto hace destacar al campo de las estructuras mixtas como un campo con posibilidades de explotación.

La complejidad de las estructuras mixtas, en especial los puentes mixtos, puede llegar a superar a la de las estructuras de hormigón debido al gran número de variables que definen la geometría las mismas. Además, la disposición de los elementos de la sección transversal es más sensible a los esfuerzos predominantes del tablero, planteando tres geometrías básicas de las secciones transversales: cajón, vigas en I y losa mixta [14]. Este condicionante adicional, abre un gran abanico de posibilidades de cara a la aplicación de técnicas heurísticas a este tipo de estructuras, cuyo comportamiento y resultados a los problemas de optimización no son triviales. La investigación actual en este campo ha aplicado técnicas como el solver de Excel [15] o la función `fmincom` de Matlab® [16] para la resolución de problemas simplificados. Existen estudios aislados en los que se aplican técnicas metaheurísticas en pasarelas [17]. Para problemas más complejos la mayoría de los algoritmos aplicados a este tipo de problemas han sido de enjambre [18, 19], observándose una falta de estudio del comportamiento de los algoritmos basados en trayectorias aplicados a este tipo de estructuras.

En este artículo se plantea el problema de optimización del tablero de un puente mixto en cajón tomando como función objetivo el coste. Para llevar a cabo este problema se utiliza un algoritmo metaheurístico como es el Simulated Annealing (SA) o Recocido Simulado. Esta metaheurística se enmarca dentro de los algoritmos basados en trayectorias que realizan la búsqueda del óptimo mediante la variación de la solución inicial a soluciones próximas a esta, la descripción de la heurística se realiza en la sección 2.3. El objetivo de este trabajo es la obtención de un diseño óptimo con el fin de compararlo con otros trabajos de investigación y diseños tradicionales y añadir conocimiento al campo de la optimización de estructuras mixtas, centrándose el estudio, tanto en los aspectos de diseño, como en el comportamiento del algoritmo en este tipo de problemas.

2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

La optimización maximiza o minimiza una función objetivo, mientras se varían las variables del problema y se comparan los resultados de esta función objetivo entre iteraciones. En la optimización de puentes, este procedimiento suele minimizar diferentes objetivos, como el coste o las emisiones entre otros. Esta búsqueda del mínimo puede realizarse considerando los objetivos por separado o

conjuntamente, lo que se denomina optimización mono o multiobjetivo, respectivamente. En este caso, el objetivo de optimización es el coste. En la ecuación 1, la función objetivo de coste se define multiplicando el coste unitario de cada material del puente por su medición. Los datos de precios que se muestran en la Tabla 1, se han obtenido del Instituto Tecnológico de la Construcción de Cataluña mediante la base de datos del BEDEC [20]. A lo largo de todo el proceso, deben cumplirse las restricciones impuestas por las normativas y recomendaciones representadas por la ecuación 2.

$$C(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n p_i \cdot m_i(\vec{x}) \quad (1)$$

$$G(\vec{x}) \leq 0 \quad (2)$$

Tabla 1. Datos de precios de los materiales

Unidad	Coste (€)
m ³ de hormigón C25/30	88,86
m ³ de hormigón C30/37	97,80
m ³ de hormigón C35/45	101,03
m ³ de hormigón C40/50	104,08
m ² de prelosa	27,10
kg de acero en barras B400S	1,40
kg de acero en barras B500S	1,42
kg de acero S275	1,72
kg de acero S355	1,85
kg de acero S460	2,01
kg de acero para conectadores	1,70

2.1. Parámetros y variables de diseño

2.1.1. Variables

Se propone la optimización de un puente mixto de acero y hormigón de tres vanos de 60-100-60 metros. Las variables del problema corresponden a la geometría, la armadura, la resistencia del hormigón y el límite elástico del acero de los elementos del puente. Para alcanzar una solución viable desde el punto de vista de su construcción, se han discretizado las variables, lo que configura un problema de optimización discreto. La discretización de las variables ha sido definida en la Tabla 2. Considerando esta discretización de variables, el número de combinaciones para el problema de optimización corresponde a $1,38 \cdot 10^{46}$. Debido a este gran número de combinaciones posibles, se justifica el uso de técnicas metaheurísticas para obtener el óptimo. En total, se consideran 34 variables para la definición global de este problema de optimización. Estas variables del puente se han representado en la Figura 1. Según la naturaleza de las variables, se pueden agrupar en seis categorías. La primera corresponde a las variables geométricas de la sección transversal, que son distancia superior entre alas (b), ángulo de alas y celdas (αw), espesor de la losa superior (hs), altura de la viga (hb), altura mínima de la viga de piso (hfb), espesor del ala superior ($tf1$), ancho del ala superior ($bf1$), altura de las celdas superiores ($hc1$) y espesor ($tc1$), espesor del alma (tw), altura de las celdas inferiores ($hc2$), espesor ($tc2$) y anchura ($bc2$) y espesor de la losa inferior ($hs2$).

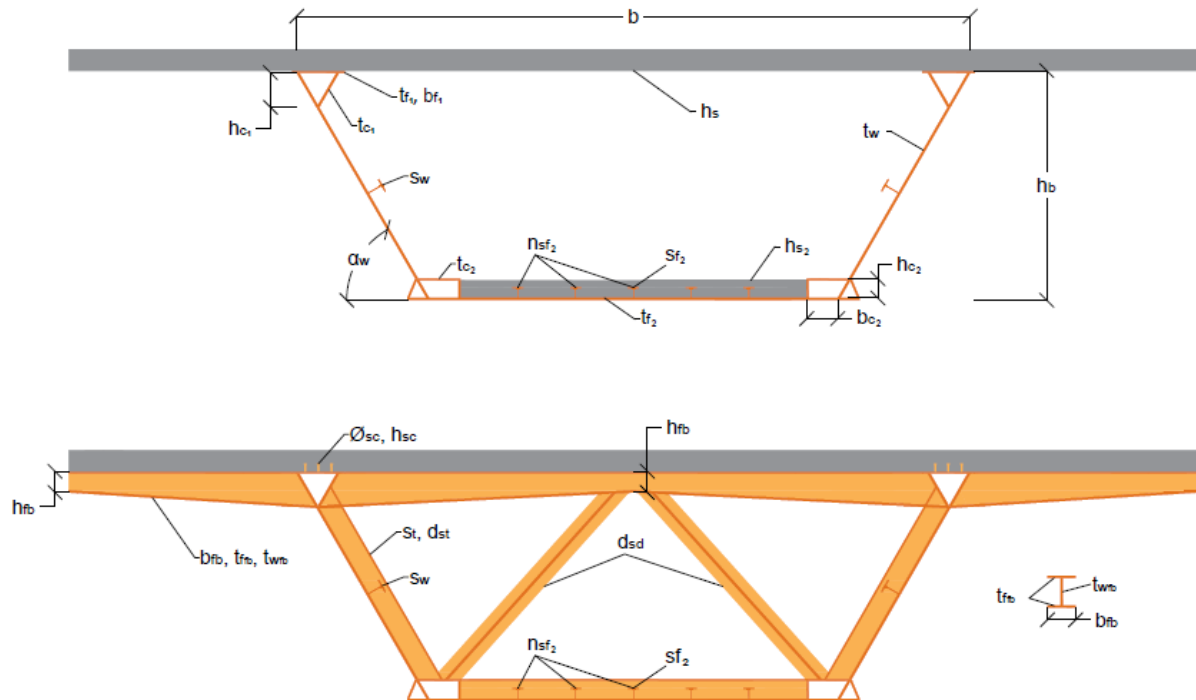


Figura 1. Variables de la sección transversal del puente mixto.

Los puentes mixtos aprovechan los materiales en mayor medida porque, en general, cada material que lo compone está sometido a los esfuerzos que mejor resiste. Esto sería cierto en un puente que funcionara como una viga isostática. En este caso, la losa superior de hormigón estaría comprimida en toda la longitud del puente. Esta losa superior está conectada a las alas superiores mediante conectadores. De este modo, la placa de las alas también se rigidiza, lo que evitaría el pandeo. Además, en el caso de una viga isostática, las alas inferiores estarían sometidas a esfuerzos de tracción, lo que también evita los fenómenos de inestabilidad por pandeo. Sin embargo, en el caso actual y con las cargas habituales a las que están sometidos los puentes (que son mayoritariamente de naturaleza gravitatoria), se producirán tensiones de flexión negativas en las zonas apoyadas. Esto dará lugar a una inversión de las fuerzas y, por tanto, a tracciones en la losa superior de hormigón y compresiones en el ala inferior. En este caso, para mejorar el comportamiento de la sección transversal del puente, se ha decidido materializar una losa inferior de hormigón en estas zonas, además del habitual aumento del armado de la losa superior. Para optimizar la armadura de la losa superior, se ha dividido en una armadura de base que es la mínima exigida por la normativa [21, 22, 23] a la que se le añaden dos zonas de refuerzo más en secciones de flexión negativa. Las longitudes de la losa inferior y de la zona de incremento de armadura se han descrito en el apartado 2.1.2. En consecuencia, el segundo grupo de variables corresponde a los diámetros de las barras de armado base, y del primer y segundo refuerzo (ϕ_{base} , ϕ_{r1} , ϕ_{r2}), y el correspondiente número de barras de las zonas de refuerzo de armaduras (n_{r1} , n_{r2}).

El siguiente grupo de variables corresponde a los rigidizadores. Los elementos considerados en este trabajo como rigidizadores son los perfiles medio IPE para alas (sw), ala inferior (sf_2) y rigidización transversal (st). Para los rigidizadores del ala inferior, también se ha considerado como variable el número de rigidizadores (nsf_2). Como se puede ver en la Figura 1, hay dos variables más que definen la distancia entre diafragmas (d_{sd}) y rigidizadores transversales (d_{dst}).

Tabla 2. Variables de diseño y límites

Variables	Unidad	Límite inferior	Incremento	Límite superior	Número de valores
b	m	7	0.01	10	301
α_w	deg	45	1	90	46
h_s	mm	200	10	400	21
h_b	cm	250	1	400	151
h_{fb}	mm	400	100	700	31
t_{f1}	mm	25	1	80	56
b_{f1}	mm	300	10	1000	71
h_{c1}	mm	0	1	1000	101
t_{c1}	mm	16	1	25	10
t_w	mm	16	1	25	10
h_{c2}	mm	0	10	1000	101
t_{c2}	mm	16	1	25	10
b_{c2}	mm	300	10	1000	71
t_{f2}	mm	25	1	80	56
h_{s2}	mm	150	10	400	26
n_{sf2}	u	0	1	10	11
d_{st}	m	1	0.1	5	41
d_{sd}	m	4	0.1	10	61
b_{fb}	mm	200	100	1000	9
t_{ffb}	mm	25	1	35	11
t_{wfb}	mm	25	1	35	11
n_{r1}	u	200	1	500	301
n_{r2}	u	200	1	500	301
ϕ_{base}	mm	6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32			8
ϕ_{r1}	mm	6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32			8
ϕ_{r2}	mm	6, 8, 10, 12, 16, 20, 25, 32			8
s_{f2}	mm	De IPE 200 a IPE 600*			12
s_w	mm	De IPE 200 a IPE 600*			12
s_t	mm	De IPE 200 a IPE 600*			12
h_{sc}	mm	100, 150, 175, 200			4
ϕ_{sc}	mm	16, 19, 22			3
f_{ck}	MPa	25, 30, 35, 40			4
f_{yk}	MPa	275, 355, 460			3
f_{sk}	MPa	400, 500			2

* Siguiendo la serie estándar de perfiles IPE.

Las últimas categorías corresponden a la geometría de las variables de las vigas de piso, a las características de los conectadores, la resistencia del hormigón y el límite elástico de los aceros. Las variables de la viga de piso se definen por la anchura de la viga de piso (b_{fb}), y los espesores de las alas (t_{ffb}) y del alma (t_{wfb}). Los conectadores se han definido por su altura (h_{sc}) y su diámetro (ϕ_{sc}). Por último, el límite elástico del acero laminado (f_{yk}), la resistencia del hormigón (f_{ck}) y el límite elástico de las barras de armado (f_{sk}) completan la definición de las variables.

2.1.2. Parámetros

En todo problema de optimización, es necesario fijar algunas variables o propiedades para acotar el problema. Estas variables fijas se denominan parámetros y permanecen invariables durante todo el proceso de optimización. En este caso, estos parámetros corresponden a límites que se definen a algunos elementos del puente, incluyendo la dimensión, los espesores, las distribuciones de las armaduras, las condiciones ambientales externas o la densidad de los materiales entre otros. Los valores de estos parámetros se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros principales del problema de optimización

Parámetros geométricos		
Ancho del puente (W)	16	m
Número de vanos	3	
Longitud del vano central	100	m
Longitud de los vanos externos	60	m
Mínimo espesor del alma ($t_{w_{min}}$)	15	mm
Mínimo espesor del ala inferior ($t_{f2_{min}}$)	25	mm
Recubrimiento	45	mm
Parámetros de los materiales		
Tamaño máximo de árido	20	mm
Módulo de deformación longitudinal del hormigón (E_{cm})	$22 \cdot ((f_{ck} + 8)/10)^3$	MPa
Módulo de deformación transversal del hormigón (G_{cm})	$E_{cm}/(2 \cdot (1 + 0,2))$	MPa
Módulo de deformación longitudinal del acero (E_s)	210000	MPa
Módulo de deformación transversal del acero (G_s)	80769	MPa
Parámetros impuestos por la normativa		
Normativas	Eurocódigos[21, 22, 23, 24], IAP-11[25]	
Ambiente de exposición	XD2	
Clase estructural	S5	
Vida útil	100	años
Parámetros de carga		
Densidad del hormigón armado	25	kN/m ³
Densidad del acero	78.5	kN/m ³
Densidad del asfalto	24	kN/m ³
Espesor de la capa de asfalto	100	mm
Protecciones de tráfico	5.6	kN/m
Cargas de tráfico	Según normativa	
Gradiente térmico	Según normativa	
Carga de viento	Según normativa	

Como se ha mencionado anteriormente, este problema de optimización corresponde a un puente mixto de acero y hormigón de tres vanos de 60-100-60 metros con un ancho de tablero (W) de 16 metros sin variación de canto. En la sección transversal, se han definido cuatro celdas: dos en la parte superior de las almas y dos más en la parte inferior; como se puede ver en la Figura 1. Estas celdas permiten rigidizar estas partes del alma, creando una chapa de clase uno a tres que no necesita ser reducida según los Eurocódigos [21, 23]. Para permitir que el proceso de optimización defina si estas celdas mejoran el comportamiento estructural de la sección transversal (y en consecuencia son relevantes para obtener un mínimo de la función objetivo), la altura mínima de estas celdas se fija en cero. Los límites de todas las variables, incluyendo las alturas de las celdas ($hc1$, $hc2$), se pueden ver en la Tabla 2. Los límites de las variables se han definido siguiendo la publicación de diseño de puentes de Monleón [26]. La altura de celda ($hc1$, $hc2$) define la altura de la viga de piso en la zona de contacto con las alas. Si la altura de la celda es menor que la altura mínima de la viga de piso (hfb), entonces se toma ese valor mínimo para la altura de la viga en esa zona. Los perfiles colocados para materializar las secciones de los diafragmas son 2L 150x15. Además, se ha considerado el uso de prelasas prefabricadas como encofrado. Hay que tener en cuenta que este elemento está diseñado para formar parte de la sección resistente. Por lo tanto, el módulo de medición del software lo resta de la cantidad total de hormigón.

El armado base tanto para la losa superior como para la inferior de hormigón se obtiene de acuerdo con la necesidad mínima de refuerzo definida en el Eurocódigo 2 [23]. La conexión entre la viga de acero y la losa de hormigón se dimensiona para resistir la tensión del hormigón considerando la anchura efectiva que viene dada por el Eurocódigo 4 [21] debida al arrastre a cortante. Dado que el

único ancho considerado como resistente (tanto en la losa de hormigón como en el ala inferior) es el efectivo, la armadura de acero de refuerzo definida se coloca sólo en ese ancho.

Para optimizar algún material en este tipo de estructuras, es habitual modificar los espesores de las almas y las alas para reducir la cuantía total de acero. En este trabajo se ha programado la variación de espesores considerando una ley teórica de flexión y cortante para una carga distribuida en toda la superficie del puente. El espesor del ala inferior se modifica a lo largo del puente, variando desde un valor mínimo t_{f2min} hasta el definido como t_{f2} . Esta variación corresponde a la ley teórica de flexión. En cambio, el espesor del ala varía según la ley de cortantes desde t_{wmin} hasta t_w . El valor mínimo de estos espesores se ha definido según las recomendaciones de Monleón [26].

Por último, se definen las armaduras de acero y las áreas de la losa inferior. La losa inferior se coloca en tramos de flexión negativa para movilizar la doble acción mixta en estos tramos. Para definir las longitudes en las que se puede producir la flexión negativa, se ha considerado la distancia definida por el Eurocódigo 4 [21] para las tensiones de arrastre de cortante que se corresponden con un tercio de la longitud del vano. Como se ha dicho anteriormente, es necesario aumentar la armadura de la losa superior para resistir los esfuerzos de tracción producidos. En este caso de estudio, hemos considerado dos zonas de refuerzo. La primera se coloca en zonas donde la sección puede estar sometida a flexión negativa y el refuerzo de la base no puede resistir los esfuerzos. La segunda se coloca en la parte superior de los apoyos, correspondiente a un tercio de la distancia entre el apoyo y el punto de cambio de signo de la flexión de la ley teórica. Esta decisión está relacionada con la posición del centro de gravedad de la parábola, que se encuentra a un tercio de su longitud total.

2.2. Análisis estructural

Como se menciona en la sección 2, los procedimientos de optimización deben cumplir de las restricciones impuestas al problema. En la optimización de puentes, estas restricciones vienen impuestas por la normativa [21, 22, 23] y las recomendaciones [14, 26].

Las restricciones impuestas por las normativas pueden dividirse en dos grupos principales: los Estados Límite Últimos (ELU) y los Estados Límite de Servicio (ELS). El primer grupo está relacionado con la resistencia estructural de los elementos del puente sometidos a los esfuerzos debidos a las cargas actuantes. Por otra parte, los ELS está relacionado con las restricciones que garantizan la capacidad de servicio de la estructura durante su vida útil. Todas las cargas aplicadas y su combinación están definidas en la normativa [24]. La Tabla 3 resume los casos de carga que hemos considerado.

Para comprobar el ELU para todos los elementos del puente, se ha considerado tanto el análisis global como el local. Las comprobaciones consideradas para el análisis global incluyen la flexión, el cortante, la torsión y la interacción flexión-cortante. Se ha utilizado un análisis elástico lineal considerando la sección completa para obtener los pesos muertos y las tensiones. Para obtener la resistencia de la sección, se ha considerado la sección eficaz aplicando tanto las reducciones por retardo de cortante [21] como la reducción de la sección de las chapas de acero clasificadas como clase 4 [22]. Para ello se ha impuesto una precisión de 10⁻⁶ metros para el proceso iterativo. Para obtener el valor de las características mecánicas de la sección homogeneizada, se ha obtenido la relación (n) entre el módulo de deformación longitudinal del hormigón (E_{cm}) y del acero (E_s) según la ecuación 3. La fluencia y la retracción del hormigón se han considerado según las normas [23, 21]. Además, se ha considerado un

modelo local para la comprobación de las vigas de piso, rigidizadores y diafragmas a ELU, considerando las comprobaciones de flexión, cortante, pandeo y características mecánicas mínimas.

$$n = \frac{E_s}{E_{cm}} \quad (3)$$

Los ELS considerados para el análisis son el límite de tensión para los materiales, la fatiga y las flecha máxima. No existe un límite claro para la flecha en los Eurocódigos, pero la normativa española IAP-11 [25] da un máximo de $L/1000$ para la combinación frecuente del valor de la flecha de la sobrecarga de uso, con L representando la longitud del vano. Este se ha impuesto como el valor máximo de la flecha. Además, se han considerado los requisitos geométricos y de factibilidad de cara a la construcción.

Se ha implementado un modelo numérico en el lenguaje de programación Python [27] para obtener las tensiones y realizar todas las comprobaciones de ELU, ELS, geométricas y de solución constructiva. Para obtener las deformaciones y tensiones, este software aplica el método de las fuerzas de empotramiento perfecto, tomando como datos de entrada las 34 variables del puente que hemos seleccionado. Este software divide cada tramo del puente en un número definido de barras. En este caso, el número total de barras es de 44, distribuidas en 12-20-12 correspondientes a los tres vanos del puente; discretizando así el puente en barras de 5 metros de longitud. Una vez obtenidas las tensiones, el programa realiza las comprobaciones estructurales y devuelve los resultados de las mediciones, el coste, las emisiones y los coeficientes de las comprobaciones. Estos coeficientes corresponden al cociente entre los valores de diseño de los efectos de las acciones (E_d) y su correspondiente valor de resistencia (R_d), tal y como se muestra en la ecuación 4. Si estos valores de coeficiente son mayores o iguales que uno, entonces la sección cumple con la restricción impuesta.

$$\frac{R_d}{E_d} \geq 1 \quad (4)$$

2.3. Algoritmo basado en trayectorias: Simulated Annealing (SA)

El Simulated Annealing (SA) o Recocido Simulado fue desarrollado por Kirkpatrick et al. [28]. Este algoritmo es una analogía basada en el comportamiento termodinámico de un grupo de átomos que forman un cristal. Esta metaheurística introduce la aceptación probabilística de las soluciones de peor calidad en el proceso de huida de los óptimos locales y dirige la búsqueda hacia mejores valores de la función objetivo. Por ello, acepta las soluciones con una probabilidad P_a . La expresión viene dada por la expresión de Boltzmann (5), donde T es un parámetro que disminuye con el tiempo y ΔC es la diferencia de coste entre la solución actual y la última seleccionada por el algoritmo. En consecuencia, el algoritmo tiene de un primera fase de fijación de la temperatura inicial (T_0). La definición de la temperatura inicial se realiza según el procedimiento propuesto por Medina [29], este procedimiento fija una temperatura inicial en la que la aceptación de soluciones se encuentre entre el 20 % y el 40 %. En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo.

Los parámetros de los que depende el algoritmo son la longitud de las cadenas de Markov, que representa el número de iteraciones a realizar antes de reducir la temperatura, el número de variables que cambian en cada iteración y el coeficiente de enfriamiento, que es el factor que reduce la temperatura una vez superado el número de iteraciones de la cadena de Markov. Respecto al criterio de parada, se han definido dos para este estudio. El primero es que la temperatura se haya

reducido hasta un 5 % del valor de la temperatura inicial (T₀) y el segundo el número de cadenas sin mejora, que en este caso se ha fijado en 5. Respecto al resto de parámetros la longitud de la cadena de Markov se ha fijado en 1000, el número de variables en 5 y el coeficiente de enfriamiento en 0,8.

$$P_a = e^{\frac{\Delta C}{T}} \tag{4}$$

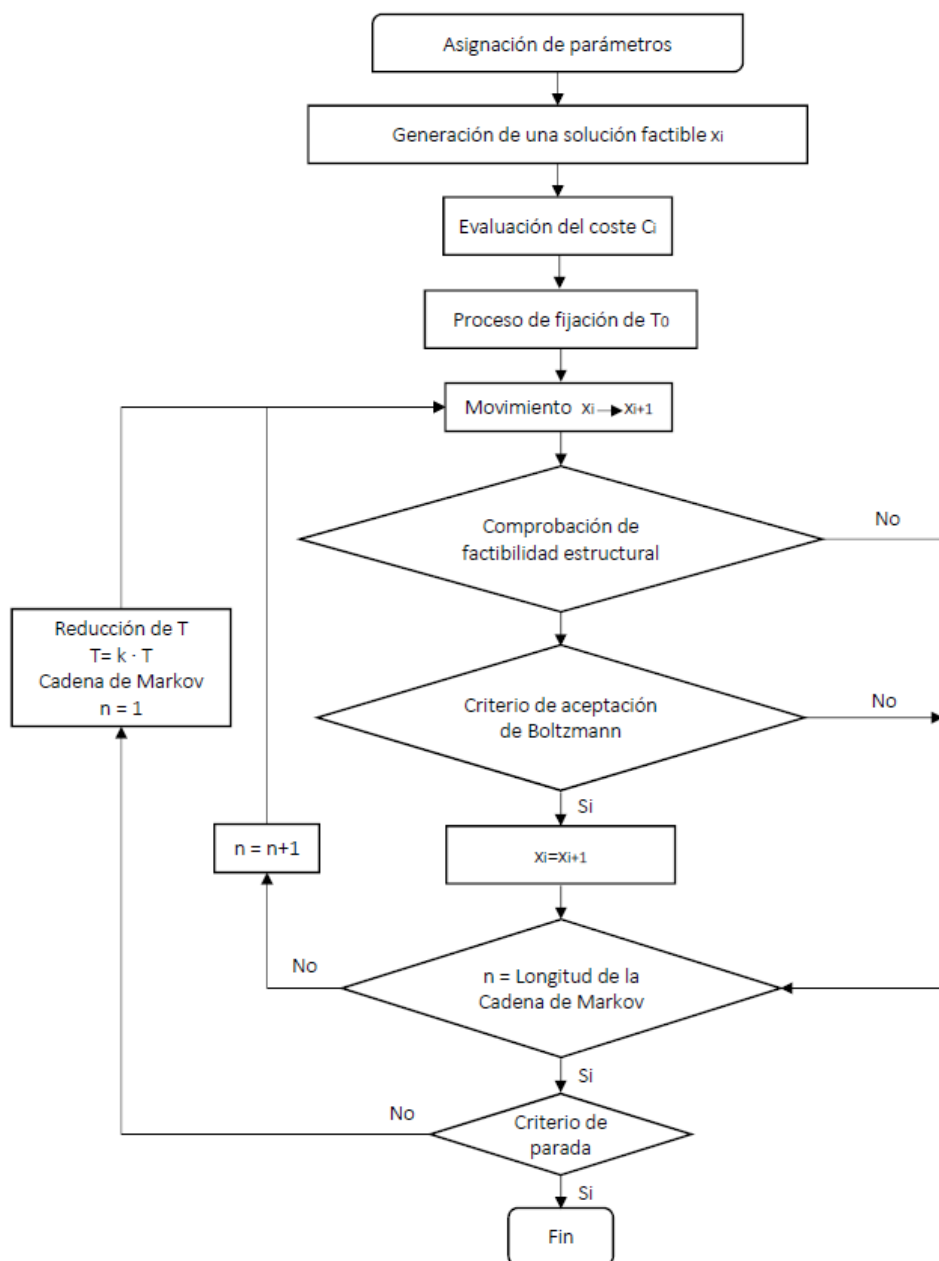


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo Simulated Annealing.

3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos corresponden a los valores de las variables, las cuantías de material y al coste de la solución. Para poder realizar un análisis estadístico de los resultados obtenidos se han realizado 9 corridas del algoritmo descrito en la sección 2.3 siguiendo el procedimiento de otros artículos publicados previamente en los que se resuelven problemas de optimización estructural [30]. Por tanto, en las Figuras 3, 4, 5 y 6 se muestran los resultados de las variables, mientras que en la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos de cuantías de acero. Cabe destacar que solo se han representado los elementos más representativos de la sección.

En la Figura 3 se muestran los resultados de los valores obtenidos del canto de la viga metálica, ángulos de las almas y separación de los elementos de rigidización de la sección transversal de puente. La media de los valores de canto de la viga corresponde a un valor aproximado de 3.3 metros y varía de forma más frecuente entre los 3.2 y los 3.5 m. Respecto a los valores de la inclinación de las almas, observamos que el diseño óptimo obtenido resulta en valores de inclinación de las almas de entre 55 y 70 grados.

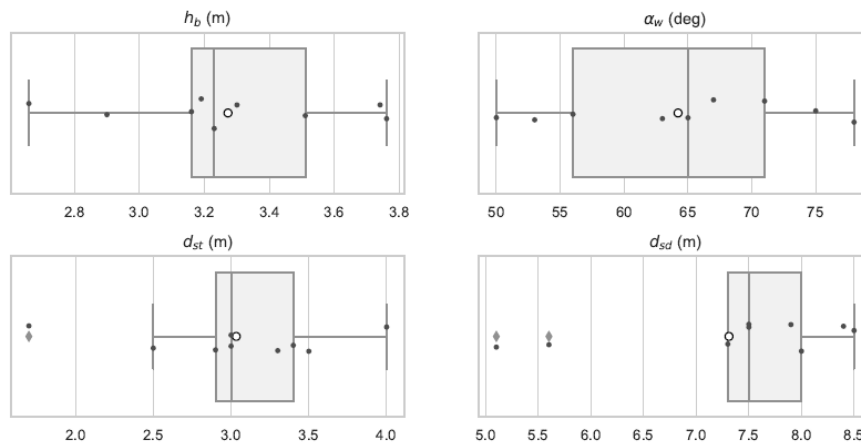


Figura 3. Valores de las variables de la sección transversal obtenidos de la optimización.

En la Figura 4 se observa que los valores de espesores del alma y el ala inferior siempre dan el mismo valor siendo 25 mm para las alas y 16 mm para el alma, mientras que las dimensiones de ancho y espesor del ala superior toman valores de entre 0.37 y 0.65 m y 30 y 45 mm respectivamente para un diseño óptimo con función objetivo coste.

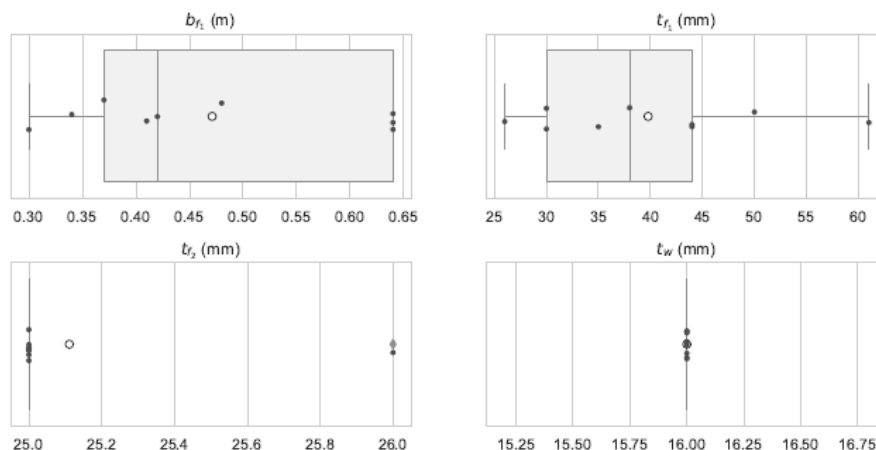


Figura 4. Valores de las variables de las alas y las almas obtenidos de la optimización.

Uno de los objetivos de esta investigación es la validación del diseño con celdas para la generación de un diseño óptimo. Como se ha descrito en la sección 2, se ha propuesto un diseño con celdas en la sección transversal con la intención de generar paneles de dimensiones menores que permitan evitar su reducción de sección. Los resultados obtenidos para estos elementos se muestran en la Figura 5, en las que aparecen los valores obtenidos de estos elementos para los diferentes diseños óptimos encontrados. Los parámetros de altura de ambas celdas resultan positivos en la mayoría de los casos. Además, se obtienen rangos de espesor de los paneles que conforman estos elementos.

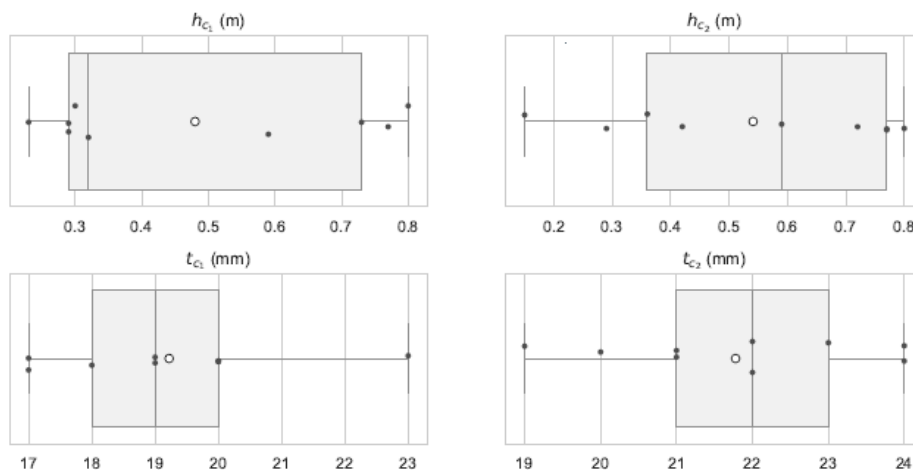


Figura 5. Valores de las variables las celdas obtenidos de la optimización.

Para finalizar la presentación de resultados de las variables, en la Figura 6 se muestran los valores de los elementos transversales superiores de la sección del puente que conforman las vigas de piso. Estos valores dependen directamente de la distancia superior entre almas decidida por el algoritmo y por tanto se observa una gran variación respecto a los valores obtenidos.

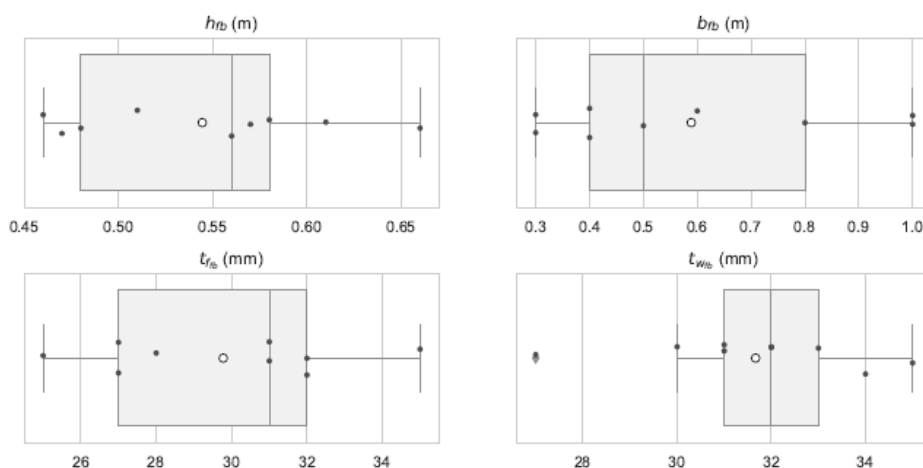


Figura 6. Valores de las variables de las vigas de piso obtenidos de la optimización.

Finalmente, en la Figura 7 se plasman los resultados de cuantías tanto de acero estructural como de acero en barras tomando como unidad funcional el metro cuadrado de tablero. Cabe destacar que las cuantías de acero son altas debido a que no se realiza ningún tipo de variación de canto en la estructura. Además, en la parte inferior de la figura, se muestran las trayectorias de estas cuantías a lo

largo de las iteraciones realizadas por el algoritmo. Respecto a los resultados obtenidos en relación con la resistencia de los materiales, para todas las corridas del algoritmo se obtiene el mismo valor, siendo este de 275 MPa para el límite elástico del acero estructural, 500 MPa para el acero de barras y 25 MPa de resistencia compresión del hormigón. Respecto a las dimensiones de la losa siempre se va al valor mínimo del espesor, por tanto, la medición de hormigón es la misma en todos los casos.

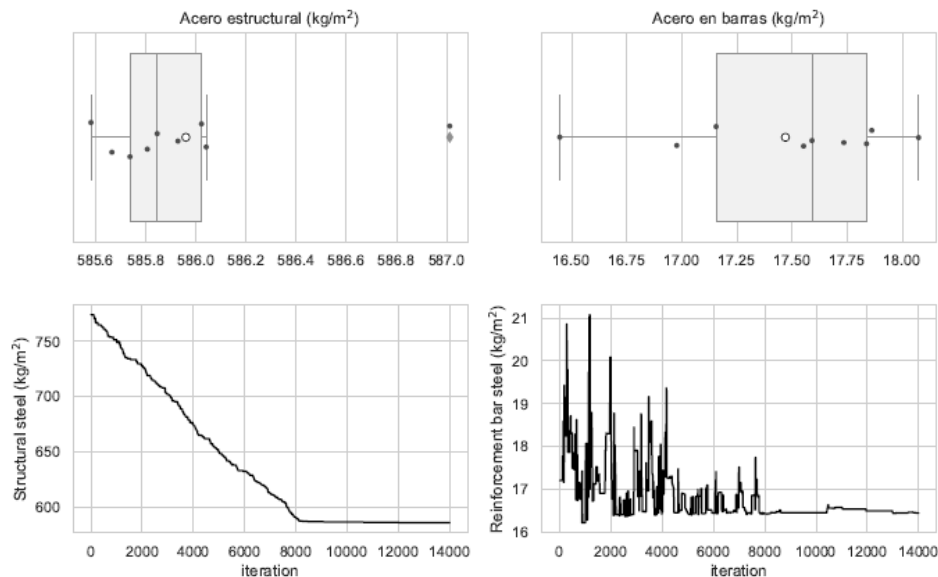


Figura 7. Valores de las variables de las vigas de piso obtenidos de la optimización.

4. CONCLUSIONES

En el diseño de puentes, existe una clara tendencia a considerar nuevas técnicas para obtener nuevas alternativas de diseño estructural. En consecuencia, la optimización de puentes de hormigón mediante el uso de algoritmos se ha desarrollado en gran medida. Por el contrario, los estudios de optimización de puentes mixtos de acero y hormigón son pocos y no se conoce el comportamiento de estas técnicas para este tipo de estructura. Se ha propuesto el tradicional Simulated Annealing (SA), que pertenece a los algoritmos basados en la trayectoria, como algoritmo para llevar a cabo la optimización de la estructura.

Este estudio muestra la optimización de un puente mixto en cajón mediante el uso de técnicas heurísticas. En conclusión, se ha observado que el algoritmo elimina los rigidizadores de las alas inferiores debido a la doble acción mixta de las losas de hormigón sobre los apoyos. Además, se ha considerado el uso de celdas interiores en la sección del puente, teniendo como resultado que estas celdas permiten mejorar las resistencias a los esfuerzos de la sección y reducir la distancia entre zonas no rigidizadas en las placas de acero del alma. Este trabajo permite al investigador estructural ampliar sus conocimientos sobre la optimización de puentes mixtos al considerar nuevas técnicas para obtener un diseño óptimo, y abre una puerta a la utilización de estos elementos para obtener nuevos criterios de diseño que permitan obtener alternativas de puentes mixtos más sostenibles y eficientes.

AGRADECIMIENTOS

Proyecto PID2020-117056RB-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por FEDER Una manera de hacer Europa.

Ayuda FPU-18/01592 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por FSE invierte en tu futuro.

REFERENCIAS

- [1] I. Payá-Zaforteza, V. Yepes, F. González-Vidoso, and A. Hospitaler, "On the weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing," *Meccanica*, vol. 45, no. 5, pp. 693–704, 2010.
- [2] K. C. Sarma and H. Adeli, "Cost optimization of concrete structures," *Journal of Structural Engineering*, vol. 124, no. 5, pp. 570–578, 1998.
- [3] W. Hare, J. Nutini, and S. Tesfamariam, "A survey of non-gradient optimization methods in structural engineering," *Advances in Engineering Software*, vol. 59, pp. 19–28, 2013.
- [4] D. Martínez-Muñoz, J. V. Martí, J. García, and V. Yepes, "Embodied energy optimization of buttressed earth-retaining walls with hybrid simulated annealing," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 4, p. 1800, 2021.
- [5] F. Molina-Moreno, T. García-Segura, J. V. Martí, and V. Yepes, "Optimization of buttressed earth retaining walls using hybrid harmony search algorithms," *Engineering Structures*, vol. 134, pp. 205–216, 2017.
- [6] F. Molina-Moreno, J. V. Martí, and V. Yepes, "Carbon embodied optimization for buttressed earth retaining walls: Implications for low-carbon conceptual designs," *Journal of Cleaner Production*, vol. 164, pp. 872–884, 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*, vol. 56, p. 139–150, 2017.
- [8] V. Penadés-Plà, T. García-Segura, and V. Yepes, "Accelerated optimization method for low embodied energy concrete box-girder bridge design," *Engineering Structures*, vol. 179, pp. 556–565, 2019.
- [9] V. Penadés-Plà, T. García-Segura, J. V. Martí, and V. Yepes, "An optimization-lca of a prestressed concrete precast bridge," *Sustainability*, vol. 10, no. 3, p. 685, 2018.
- [10] J. R. Martí-Vargas, F. J. Ferri, and V. Yepes, "Prediction of the transfer length of prestressing strands with neural networks," *Computers and Concrete*, vol. 12, no. 2, pp. 187–209, 2013.
- [11] D. Martínez-Muñoz, J. V. Martí, and V. Yepes, "Steel-concrete composite bridges: Design, life cycle assessment, maintenance, and decision-making," *Advances in Civil Engineering*, vol. 2020, p. 8823370, 2020.
- [12] D. Martínez-Muñoz, J. V. Martí, and V. Yepes, "Comparative life cycle analysis of concrete and composite bridges varying steel recycling ratio," *Materials*, vol. 14, no. 15, 2021.
- [13] V. Penadés-Plà, D. Martínez-Muñoz, T. García-Segura, I. J. Navarro, and V. Yepes, "Environmental and social impact assessment of optimized post-tensioned concrete road bridges," *Sustainability*, vol. 12, no. 10, 2020.
- [14] I. Vayas and A. Iliopoulos, *Design of steel-concrete composite bridges to Eurocodes*. Boca Raton: CRC Press, 2017.

- [15] Y. I. Musa and M. A. Diaz, “Design optimization of composite steel box girder in flexure,” *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, vol. 12, no. 3, p. 146–152, 2007.
- [16] N. Lv and L. Fan, “Optimization of quickly assembled steel-concrete composite bridge used in temporary,” *Modern Applied Science*, vol. 8, no. 4, p. 134–143, 2014.
- [17] V. Yepes, M. Dasi-Gil, D. Martínez-Muñoz, V. J. López-Desfilis, and J. V. Martí, “Heuristic techniques for the design of steel-concrete composite pedestrian bridges,” *Applied Sciences*, vol. 9, no. 16, p. 3253, 2019.
- [18] A. Kaveh, T. Bakhshpoori, and M. Barkhori, “Optimum design of multi-span composite box girder bridges using cuckoo search algorithm,” *Steel and Composite Structures*, vol. 17, no. 5, p. 703–717, 2014.
- [19] A. Kaveh and M. M. M. Zarandi, “Optimal design of steel-concrete composite i-girder bridges using three meta-heuristic algorithms,” *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 63, no. 2, p. 317–337, 2019.
- [20] “Catalonia Institute of Construction Technology. BEDEC ITEC materials database <https://metabase.itec.cat/vid/e/s/bedec>,” accessed on January 2021.
- [21] CEN, Eurocode 2: Design of concrete structures. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2013.
- [22] CEN, Eurocode 3: Design of steel structures. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2013.
- [23] CEN, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2013.
- [24] CEN, Eurocode 1: Actions on structures. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2019.
- [25] MFOM, IAP-11: Code on the actions for the design of road bridges. Madrid: Ministerio de Fomento, 2011.
- [26] S. Monleón, *Diseño estructural de puentes* (in Spanish). València: Universitat Politècnica de València, 2017.
- [27] G. Van Rossum and F. L. Drake, *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009.
- [28] S. Kirkpatrick, C. D. J. Gelatt, and M. P. Vecchi, “Optimization by simulated annealing,” *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [29] J. R. Medina, “Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing,” *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 127, no. 4, pp. 213–221, 2001.
- [30] V. Yepes, J. V. Martí, and T. García-Segura, “Cost and CO2 emission optimization of precast prestressed concrete u-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm,” *Automation in Construction*, vol. 49, pp. 123–134, 2015.