

OPTIMIZACIÓN SOSTENIBLE DE TABLEROS DE PUENTES LOSA POSTESADOS USANDO METAMODELOS

Lorena Yepes-Bellver¹, Alejandro Brun-Izquierdo¹, Julián Alcalá² and Víctor Yepes²

1: Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
Universitat Politècnica de València
Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain

2: ICITECH. Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil
Universitat Politècnica de València
Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain

Palabras clave: Optimización, metamodelos Kriging, metaheurísticas, puente losa postesado, sostenibilidad, huella de carbono

Resumen *This paper deals with optimizing embedded carbon dioxide (CO₂) emissions using metamodeling, whether it is the deck of a lightened post-tensioned slab bridge or any other design structure. The main contribution of this proposal is that it allows optimizing structures methodically and sequentially. The proposed methodology is general and can optimize any structure with different objective functions. The approach presents two sequential phases of optimization, the first one of diversification and the second one of intensification of the search for optimums. Specifically, the type of concrete used, the amount of active and passive steel, the lightweight volume, and the area of formwork used. Finally, with the amount of CO₂ emissions and the differentiating characteristics of each design, a heuristic optimization based on a Kriging metamodel is performed. An optimized solution with lower emissions than the analyzed sample is obtained. If CO₂ emissions were to be reduced, design recommendations would be to use slendernesses as high as possible, in the range of 1/30, which implies a more significant amount of passive reinforcement. This increase in passive reinforcement is compensated by reducing the amount of concrete and active reinforcement. Another important conclusion is that reducing emissions is related to cost savings. Therefore, optimizing the cost would be sufficient to diminish the environmental aspects. Furthermore, it has been corroborated that for a cost increase of less than 1 %, decreases for emissions emitted into the atmosphere of more than 2 % can be achieved.*

1. INTRODUCCIÓN

La disminución de emisiones de CO₂ constituye un factor relevante en la situación actual respecto al cambio climático. La necesidad de reducir la huella de carbono afecta a todas las actividades humanas, incluidas las relacionadas con la construcción. En efecto, la construcción contribuye con más del 40% del consumo mundial de energía y sobre un tercio de las emisiones de gases de efecto invernadero [1]. De hecho, se estima que la producción mundial de hormigón estructural supone más del 5% de las emisiones de carbono [2]. Por ello, en los últimos años ha habido un progresivo interés en incorporar la sostenibilidad ambiental optimizando en el sector de la construcción [3].

La optimización sostenible de las estructuras de hormigón se puede llevar a cabo bajo diferentes vías, entre ellas la selección de los materiales de construcción, con diseños que precisen de un mínimo de energía o con la optimización de los sistemas estructurales. De hecho, la optimización de las estructuras de hormigón reduce las emisiones de carbono y el coste de construcción [4]. La optimización heurística de las emisiones de CO₂ se ha realizado en las estructuras de edificación [5-8], pilas de puentes [9] o muros de contención [10-12], entre otros tipos de estructuras. En los casos estudiados, se comprueba que el coste y las emisiones se relacionan, pues disminuyen al reducirse el material empleado.

La optimización heurística de puentes, tomando como función objetivo las emisiones de CO₂, ha sido objeto de diversos trabajos por parte de nuestro grupo de investigación. Yepes et al. [13] optimizaron un puente de vigas artesa prefabricadas, con un algoritmo híbrido basado en luciérnagas, mostrando que la reducción en 1 € puede ahorrar hasta 1.75 kg de CO₂. García-Segura et al. [14] optimizan una pasarela de sección en cajón postesada, cuyos resultados indican que la reducción de emisiones se consigue con mayores cantos, más cables de armadura activa y una menor resistencia característica del hormigón. García-Segura y Yepes [15] realizaron una optimización multiobjetivo con el coste, las emisiones y la seguridad para un puente postesado de sección en cajón. Penadés-Plà et al. [16] compararon dos puentes en cajón mostrando que las emisiones en la fase de demolición son superiores a las de las fases de mantenimiento y reparación. Asimismo, se mostró que, aunque las emisiones de carbono son un indicador importante de impacto ambiental, en algunos casos es insuficiente, debiéndose considerar otros impactos ambientales [17]. Yepes et al. [18] aplican distintas metaheurísticas para la optimización del coste y de las emisiones en una pasarela mixta de hormigón y acero de un solo vano. Martínez-Muñoz et al. [19] realizan una revisión reciente de los trabajos de investigación relacionados con puentes mixtos.

Con todo, una de las limitaciones que presenta la optimización heurística de las estructuras es su coste computacional elevado. Para solucionar este problema, se suelen recurrir a aproximaciones o metamodelos. Un metamodelo sustituye a un modelo de simulación. Kriging es uno de los metamodelos más prometedores en la optimización estructural [20] aunque son pocos los trabajos que lo utilizan para diseñar estructuras reales. Este modelo proporciona una interpolación óptima basada en la regresión de los valores observados, ponderados según los valores de covarianza espacial. Martínez-Frutos y Martí [21] utilizan Kriging para resolver el diseño óptimo robusto de estructuras articuladas, desacoplando los

procesos de la valoración de incertidumbre de la propia optimización. Esta metodología también se aplicó recientemente a otros campos como el de la optimización de aerogeneradores [22] o las vías en placa de ferrocarriles [23].

En el ámbito específico del uso de Kriging en los puentes de sección en cajón, se aplicó para ayudar a su optimización multiobjetivo sujeto a incertidumbre [24]. Un algoritmo de optimización basado en Kriging redujo el tiempo de computación en un 99.06% y obtuvo puentes de sección en cajón que diferían solo un 2.54% respecto a las obtenidas con una optimización heurística mediante recocido simulado [25]. Penadés-Plà et al. [26] aplican este metamodelo para realizar la optimización económica y robusta de una pasarela de sección en cajón pretensada. Otros trabajos recientes aplican Kriging a la optimización de puentes losa aligerados en emisiones de CO₂ [27] y energía [28].

El objeto de este artículo es el diseño de una metodología capaz de reducir la huella de carbono en la ejecución de puentes losa aligerados pretensados. El método propuesto tiene carácter general, pudiéndose usar en cualquier otro tipo de estructura para optimizar diferentes funciones objetivo. En este trabajo, existen dos aportaciones novedosas: la aplicación de un metamodelo Kriging bifase y la optimización ambiental de puentes losa aligerados.

2. DESCRIPCIÓN DEL TABLERO DE PUENTE LOSA ALIGERADO

Es común diseñar un puente losa como una viga continua hiperestática con hormigón pretensado. La solución en losa se emplea para puentes de luces entre los 10 y los 45 m. Compiten con los de vigas prefabricadas debido a ventajas estructurales (mayor rigidez a torsión y a flexión, así como una mayor durabilidad y seguridad debido al hiperestatismo), y ventajas constructivas, pues se adaptan a plantas difíciles, siendo el encofrado y el hormigonado más sencillo que en otras tipologías. A ello habría que añadir otras ventajas como la supresión de las juntas de calzada (aumenta la comodidad del usuario y reduce los riesgos de degradación del tablero), mayor libertad en la disposición de elementos de apoyo y mejores cualidades estéticas. La estética del puente es un factor importante cuando se circula o visita la estructura por debajo, aspecto que se ve favorecido por la adaptación del encofrado a cualquier tipo de sección o curvatura.

En este trabajo se va a optimizar un tablero de puente losa pretensado aligerado de tres vanos, de 24 m, 34 m y de 28 m, con una longitud total de 86 m. Está resuelto mediante una losa ejecutada “in situ” de canto constante y planta recta (Figura 1). El ancho total del tablero es de 8.30 m compuesto por dos carriles de 3.50 m y pretilas a ambos lados de 0.65 m cada uno junto con un pedestal de hormigón. La Figura 2 muestra las características y dimensiones de la sección transversal.

El diseño de esta estructura cumple con la Instrucción sobre las Acciones a considerar en el Proyecto de puentes de carretera (IAP-11), el Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón (EC-2) y la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-08). La IAP-11 determina los valores característicos, combinación de acciones y el cálculo de las acciones necesarias para el dimensionamiento. EC-2 y EHE-08 se han empleado en el cálculo y verificación de los estados límite último y de servicio de los elementos estructurales.

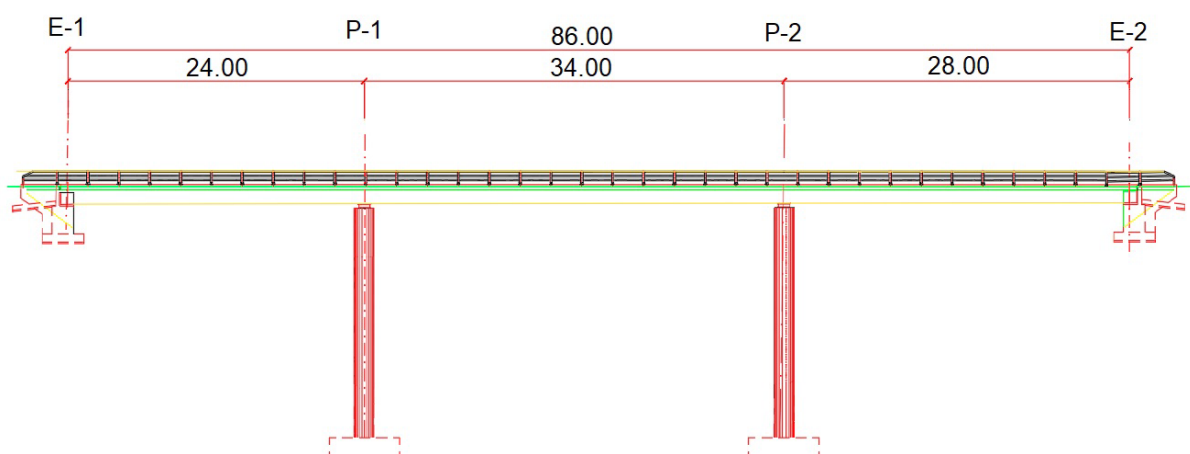


Figura 1. Alzado del puente losa pretensado aligerado.

La teoría de los estado límite permite comprobar las estructuras mediante el método de los coeficientes parciales de seguridad. En cada situación de proyecto, se controla que no se supera ningún estado límite, considerando tanto los últimos como los de servicio.

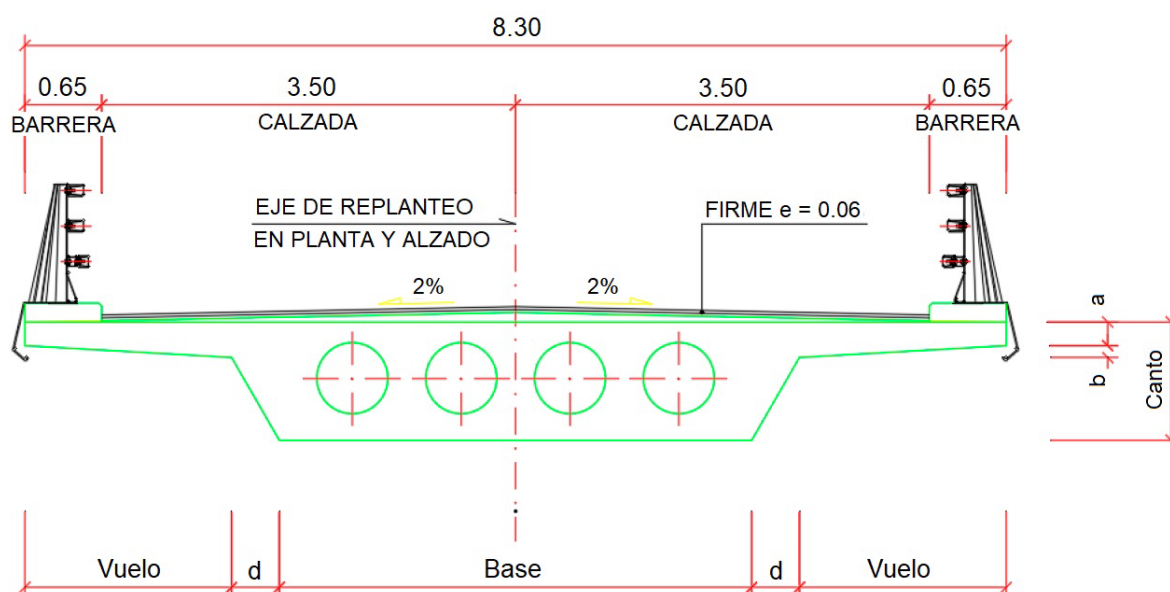


Figura 2. Sección transversal tipo del tablero de puente losa pretensado aligerado.

Para el cálculo del tablero se ha utilizado el programa de modelado, análisis y dimensionamiento de puentes CSiBridge v.21.0.0. El análisis estructural de cada una de las alternativas obtiene las solicitaciones actuantes, representadas en forma de esfuerzos seccionales derivados del modelo matemático de cálculo sobre el que se aplican las acciones.

Además, se recaban las solicitaciones resistentes de cada elemento, representadas como los esfuerzos que resiste cada sección. La obtención de la solicitación actuante y la resistente se realiza por separado, con una concepción seccional del proyecto de cada elemento estructural. Los detalles pormenorizados del cálculo de esta estructura se encuentran en el trabajo de Yepes-Bellver [27].

3. METODOLOGÍA

Este trabajo propone un procedimiento que permita reducir las emisiones de carbono en la ejecución de tableros de puente tipo losa aligerados pretensados. La metodología despliega dos fases consecutivas de optimización; la primera de diversificación y la segunda de intensificación en la búsqueda de los óptimos. En ambas se realiza un muestreo de hipercubo latino, se analiza cada alternativa de tablero para obtener las emisiones de CO₂. Con estos valores, se optimiza una superficie de respuesta generada por un metamodelo Kriging.

3.1. Método de muestreo

El muestreo de hipercubo latino (LHS, por sus siglas en inglés) selecciona números aleatorios en los que las muestras se distribuyen uniformemente en un espacio muestral. Genera una muestra aleatoria en cada intervalo y para cada variable, y realiza un enlace aleatorio entre variables, para obtener un vector de valores de entrada para cada intervalo.

El modelo numérico se ejecuta tantas veces como intervalos considerados en la división de las distribuciones de probabilidad, de forma independiente al número de variables muestreadas. En la Figura 3 se puede ver un ejemplo de cómo funciona el LHS para el caso de un muestreo con dos variables de diseño y diez muestras.

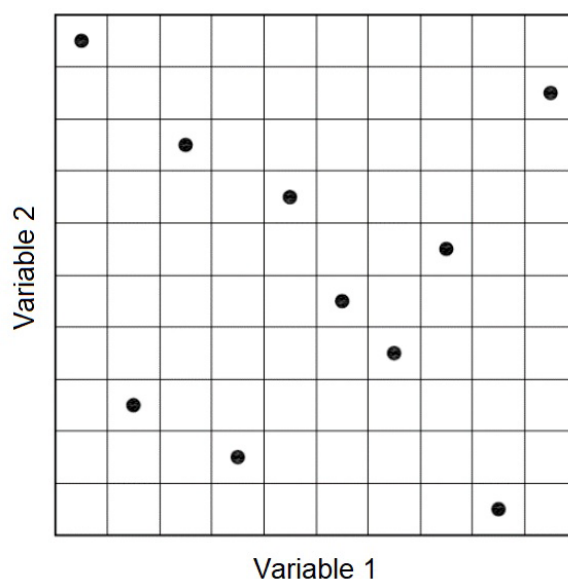


Figura 3. Ejemplo de muestreo de hipercubo latino para dos variables y 10 puntos de muestra.

Por ello, el tamaño y la posición de los puntos determina el muestreo. El tamaño de la muestra se relaciona de forma creciente con el número de variables para la misma precisión del metamodelo. Para estructuras de hormigón, tamaños de la muestra en torno a 30 individuos proporcionan resultados suficientemente buenos [22-25].

Una vez realizado el LHS, los valores aleatorios obtenidos oscilan entre 0 y 1, asociados a cada parámetro a modificar. El siguiente paso sería encajar los valores en los rangos establecidos para cada variable. Tras este encaje, los valores obtenidos se ajustarán para las variables dentro de los rangos establecidos, dando lugar a las distintas soluciones.

Con este muestreo se obtienen diseños que conforman la entrada al modelo de optimización tras su análisis estructural y cumpliendo con todos los Estados Límite, siendo un tablero de puente que realmente sea posible su ejecución.

3.2. Valoración de las emisiones de CO₂

Cada tablero de puente tiene asociado unas emisiones de CO₂. Para comparar los diseños, se analizan los elementos relevantes en las emisiones, en particular, el tipo de hormigón, la superficie de encofrado empleado, la cuantía de acero y el volumen de aligeramientos. La valoración de las emisiones se ha realizado según los datos recogidos en la Tabla 1.

Tipo de material	kg CO ₂ /kg	kg CO ₂ /m ³	kg CO ₂ /m ²
Hormigón HP-30		227.01	
Hormigón HP-35		263.96	
Hormigón HP-40		298.57	
Hormigón HP-45		330.25	
Hormigón HP-50		358.97	
Acero (B 500S)	3.03		
Acero Y1860-S7	5.64		
Encofrado			2.24
Aligeramiento		604.42	

Tabla 1. Emisiones de CO₂ [12].

Las emisiones se asocian a las mediciones de cada material obteniéndose como resultado la cantidad de CO₂. Se consideran las emisiones directas de los materiales empleados, pues son las que marcan la diferencia entre las alternativas.

Llegado a este punto, un estudio de soluciones convencional concluiría con la selección del tablero qué menor cantidad de emisiones produjese. Sin embargo, se plantea una metodología que, basándose en el conjunto de alternativas resultantes del muestreo, sea capaz de reducir las emisiones aplicando la optimización sobre un modelo predictivo como es el Kriging.

3.3. Método de optimización y generación de la superficie de respuesta

Frente a un análisis tradicional, la metodología que se plantea presenta un enfoque diferente. Basándose en el muestreo realizado mediante el LHS, se ajusta un metamodelo predictivo tipo Kriging que sea susceptible de ser optimizado mediante un algoritmo heurístico.

Los algoritmos heurísticos aprovechan técnicas basadas en la inteligencia artificial para seleccionar un diseño, analizar la estructura, controlar las restricciones y rediseñar la estructura alterando las variables hasta optimizar la función objetivo. De hecho, la optimización heurística resulta muy efectiva pues, aunque no garantiza la obtención del óptimo global del problema, aporta soluciones casi óptimas en tiempos de cálculo razonables.

Usualmente, la optimización estructural se realiza mediante la optimización heurística debido a la complejidad de los problemas estructurales. Sin embargo, la optimización heurística convencional todavía consume una gran cantidad de tiempo.

Una solución eficaz para optimizar con un menor costo computacional es el uso de superficies de respuesta aproximadas obtenidas por modelos sustitutos o metamodelos. Los metamodelos habituales son la regresión polinómica, las redes neuronales y el Kriging. Estos modelos se ajustan tras la evaluación de un conjunto de puntos del espacio de soluciones generados mediante muestreo, obteniendo una respuesta aproximada de forma más rápida que manejando el modelo real.

La optimización heurística basada en Kriging se plantea como una alternativa a la optimización heurística convencional para llevar a cabo una optimización acelerada de problemas complejos [25]. Kriging proporciona una interpolación óptima basada en la regresión en contraposición de los valores observados de los puntos de los datos circundantes, ponderados según los valores de covarianza espacial. Esto quiere decir, que el modelo considera las aproximaciones globales y locales al mismo tiempo. Así, Kriging toma en cuenta las variaciones locales de la respuesta objetiva.

La idea básica del Kriging consiste en predecir el valor desconocido de un atributo z en el punto de coordenadas u , a partir de n valores conocidos de z , cuyas coordenadas son u_α , con $\alpha = 1, \dots, n$. La Figura 3 expresa dicha idea. En este caso, el atributo lo constituye las emisiones producidas por la ejecución del tablero y los puntos son el conjunto de soluciones extraídas mediante un muestreo LHS.

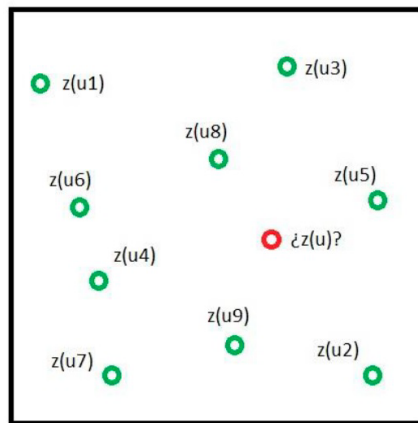


Figura 3. Idea básica del modelo predictivo Kriging.

El fundamento de los metamodelos es montar un modelo aproximado de la función objetivo partiendo de un conjunto de puntos en el espacio de soluciones (muestreo inicial) para predecir la salida de datos sin necesidad de realizar un análisis estructural completo.

La construcción de un metamodelo se centraliza en tres partes principales: la obtención de los puntos de entrada inicial dentro del espacio de diseño, la selección del tipo de metamodelo para construir el modelo matemático aproximado y la elección del patrón de conexión. El objetivo principal al construir un metamodelo es alcanzar la mejor precisión posible para pronosticar la respuesta objetivo.

Esto quiere decir, que la parte más lenta del proceso de optimización heurística convencional, que es el análisis estructural y la evaluación de la función objetivo, se sustituye por una predicción del metamodelo. Consiguientemente, el costo computacional necesario para la optimización heurística basada en metamodelos, como se observa en la Figura 4, es menor que el costo computacional necesario para la optimización heurística convencional [25].

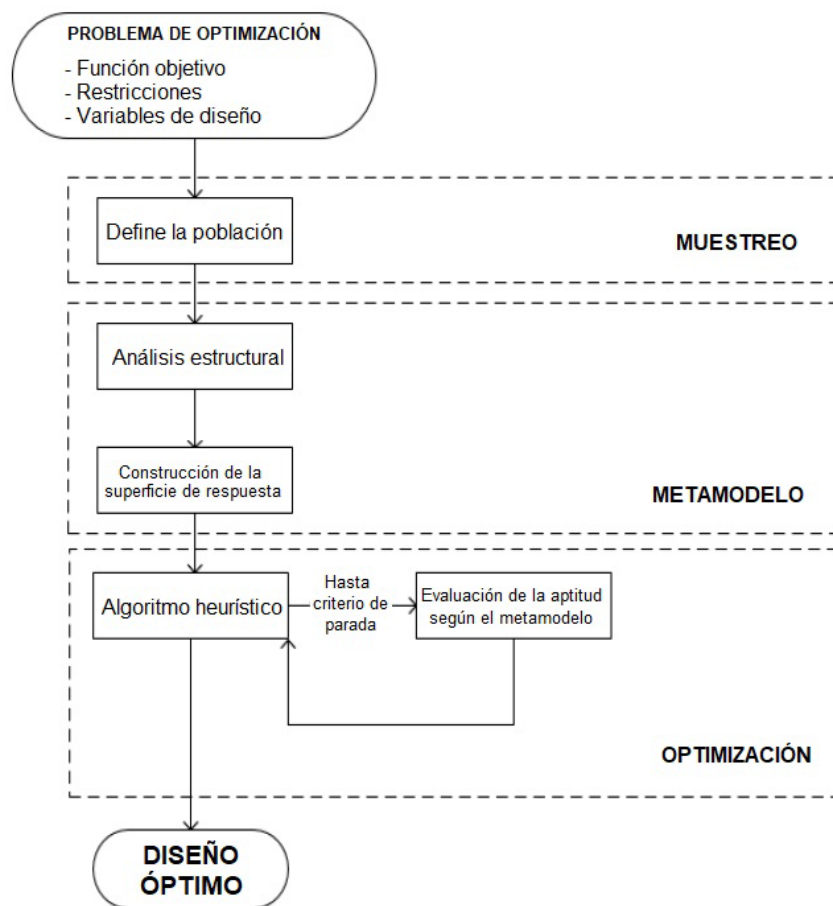


Figura 4. Diagrama de flujo de optimización heurística basada en metamodelos [25].

La optimización basada en Kriging proporciona resultados cercanos a los de la optimización heurística convencional empleando menos tiempo [25]. Por lo tanto, el uso de este modelo resuelve estructuras que requieren un costo computacional muy alto, a la vez que reduce la dificultad de otros problemas.

Para ello, se ha empleado el “MATLAB Kriging Toolbox” (DACE, Design and Analysis of Computer Experiments). Se trata de una caja de herramientas para trabajar con aproximaciones Kriging [29]. El uso típico de este software es construir un modelo Kriging basado en los datos de un experimento informático, y utilizarlo como sustituto del original. Aquí, un experimento informático es una colección de pares de inputs y respuestas de las ejecuciones del modelo.

La finalidad es obtener la superficie de respuesta para optimizarla. En la Figura 5 se muestra un ejemplo propuesto en dicho documento, donde a partir de una serie de puntos en el espacio se obtiene una correlación entre los mismos. Cabe destacar que todo el aparataje matemático se explica en el documento DACE, a MATLAB Kriging Toolbox, Version 2.0 [29].

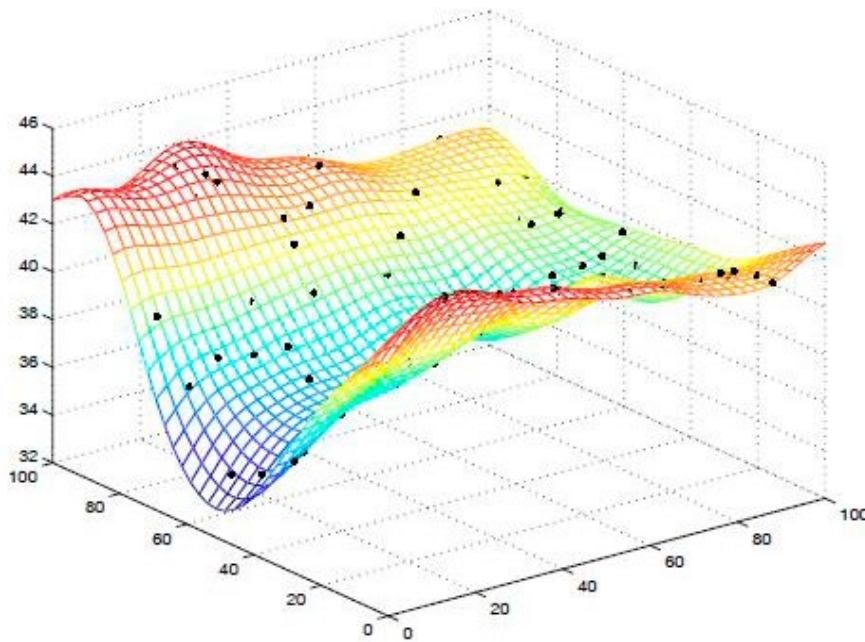


Figura 5. Ejemplo de superficie de respuesta [29].

El algoritmo heurístico utilizado es el recocido simulado [30]. Su nombre se debe a que el proceso de optimización simula el proceso mediante el cual las moléculas del cristal alcanzan un estado de mínima energía. La aceptación de una nueva solución se gobierna por la expresión probabilística $\exp(-\Delta E/T)$, donde ΔE es el incremento de energía de una nueva configuración (diferencia entre los valores de la función objetivo de la solución candidata y la actual) y T es la temperatura. Por tanto, este método admite soluciones que

empeoren la función objetivo, y así escapar de los óptimos locales para encontrar el óptimo global. La temperatura inicial T_0 se fija siguiendo el método de Medina [31], que divide por dos la temperatura cuando el porcentaje de aceptación excede del 40%, y la duplica cuando la proporción es inferior al 20%. La temperatura se reduce geométricamente mediante la expresión $T=kT$ cada vez que ultima 1000 cadenas de Markov, según un coeficiente de enfriamiento $k=0.8$. Esta reducción de temperatura reduce la probabilidad de aceptar una solución peor. Otros autores utilizan este algoritmo para optimizar estructuras, dada su buena convergencia hacia el óptimo global [32].

4. RESULTADOS

4.1. Fase de diversificación

En la primera fase se realiza un muestreo LHS para diversificar la búsqueda del óptimo local. Las variables son la resistencia del hormigón a compresión simple y el canto y la base en relación con la geometría de la sección transversal de los distintos tableros. Las restantes dimensiones, así como los aligeramientos, se determinan según las relaciones descritas en la Tabla 2. La nomenclatura de las variables se corresponde con la Figura 2. Por tanto, se procede a modificar la resistencia característica del hormigón a compresión simple, tomando valores desde 30 a 50 MPa. Además, se va a variar el canto, en un rango que va desde 1.15 m hasta 1.70 m, incrementándose los diseños obtenidos en 5 cm, así como la base de la sección, que tomará valores desde 3.00 m hasta 5.00 m, aumentando, de igual modo, en 5 cm cada uno de los diseños.

Variables de diseño	Rango	Limitación
Resistencia característica del hormigón (f_{ck})	30 – 50 MPa	-
Canto (c)	1.15 – 1.70 m	> 0.90 m
Base inferior (b)	3.00 – 5.00 m	-
Vuelo (v)	Variable	< 3.50 m
Distancia entre el voladizo y el núcleo (d)	0.40 m	-
e_1 ($a+b$)	0.35 m	-
e_2 (a)	0.25 m	> 0.20 m
Recubrimiento mínimo aligeramiento	0.225 m	> 0.15 m

Tabla 2. Rangos de dimensiones y sus limitaciones establecidas por normativa [33].

Una vez determinadas las variables de diseño, se obtiene una muestra mediante LHS para establecer las distintas combinaciones de las variables que formarán parte del metamodelo. Los valores obtenidos oscilan entre 0 y 1 (Tabla 3).

Sin embargo, se ha establecido la premisa de que las dimensiones tanto del canto como de la base inferior estarían comprendidas en múltiplos de cinco cm. Además, los valores de la resistencia a compresión simple del hormigón únicamente toman números enteros múltiplos de cinco. Por ello, las dimensiones finales que darán lugar a las distintas soluciones de tableros a analizar son las que se recogen en la Tabla 4.

Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)
0.5826	0.6089	0.2743
0.7425	0.4785	0.3058
0.5207	0.8556	0.1706
0.9869	0.2804	0.7923
0.0978	0.3115	0.5900
0.7623	0.1802	0.8297
0.1379	0.9096	0.9126
0.0279	0.7122	0.9587
0.4156	0.3811	0.1105
0.3320	0.6892	0.0841
0.3632	0.5605	0.6733
0.6303	0.7525	0.0455
0.8158	0.5336	0.4944
0.2148	0.8164	0.5432
0.6779	0.4281	0.8661

Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)
0.2990	0.9583	0.3752
0.9335	0.2116	0.2405
0.8788	0.0916	0.6252
0.1865	0.1069	0.7426
0.4901	0.0005	0.4473
0.5792	0.9689	0.6405
0.3699	0.6077	0.1738
0.8529	0.3570	0.7397
0.5770	0.7815	0.7289
0.7156	0.2095	0.0778
0.1805	0.0020	0.9883
0.4774	0.4561	0.8703
0.6829	0.5889	0.3681
0.9772	0.8742	0.5576
0.0564	0.7591	0.4492

Tabla 3. Valores obtenidos tras el muestreo de hipercubo latino.

Tablero	Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)
1	1.45	4.35	35
2	1.55	4.10	35
3	1.45	4.75	35
4	1.70	3.80	45
5	1.20	3.85	40
6	1.55	3.60	45
7	1.20	4.85	50
8	1.15	4.50	50
9	1.35	3.95	30
10	1.30	4.45	30
11	1.35	4.25	45
12	1.50	4.55	30
13	1.60	4.20	40
14	1.25	4.70	40
15	1.50	4.05	45

Tablero	Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)
16	1.30	4.90	40
17	1.65	3.65	35
18	1.65	3.45	45
19	1.25	3.50	45
20	1.40	3.30	40
21	1.45	3.90	45
22	1.35	3.60	35
23	1.50	3.35	45
24	1.50	4.50	45
25	1.55	3.20	30
26	1.25	3.00	50
27	1.40	3.45	45
28	1.50	3.55	35
29	1.70	3.85	40
30	1.15	3.70	40

Tabla 4. Valores obtenidos para las variables de diseño dentro de los rangos establecidos.

Este muestreo determina los datos que alimentan el modelo Kriging. Se analizan y comprueban los tableros, tanto para los estados límite últimos como de servicio y se cuantifican las emisiones. Para comparar los tableros, se valoran aquellos elementos relevantes en la cantidad de carbono: el tipo de hormigón empleado, la superficie de encofrado necesaria, la cuantía de acero pasivo y activo y el volumen de aligeramientos. Las emisiones se relacionan con las mediciones de cada material obteniéndose como resultado los kilos de CO₂. Se consideran las emisiones directas de cada material, pues son las que marcan la diferencia en el volumen de CO₂ generado entre las alternativas (Tabla 5).

Tablero	Emisiones de CO ₂ (kg)	Tablero	Emisiones de CO ₂ (kg)
1	439416.04	16	477491.15
2	460392.78	17	444713.58
3	455722.34	18	464050.70
4	484897.39	19	420513.71
5	407988.18	20	443839.50
6	456668.42	21	464535.64
7	472401.00	22	416583.96
8	471362.45	23	455442.46
9	406654.38	24	490669.44
10	436703.35	25	403971.90
11	455373.86	26	423111.90
12	434673.91	27	470007.91
13	503797.39	28	418839.00
14	462914.73	29	468897.98
15	482659.32	30	394616.39

Tabla 5. Emisiones de CO₂ de cada uno de los tableros analizados.

Un estudio de soluciones convencional concluiría con la selección del tablero 30, que es el que menos CO₂ produce. Sin embargo, se plantea la optimización sobre un modelo Kriging para obtener una solución con menor huella de carbono que la muestra analizada. Una vez optimizada la superficie de respuesta con el recocido simulado, las características del tablero óptimo serían las que se recogen en la Tabla 6.

Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)	Emisiones de CO ₂ (kg)
1.15	3.55	40	391370.00

Tabla 6. Resultado tras la optimización de la fase de diversificación.

Como se puede observar, el tablero optimizado en la fase de diversificación reduce porcentualmente el valor de todos los tableros muestreados, obteniéndose una rebaja de hasta un 29%, en el peor de los casos y del 1% en el mejor.

4.2. Fase de intensificación

La segunda fase intensifica la búsqueda de las soluciones óptimas en torno a la mejor solución obtenida en la fase previa. En primer lugar, se va a realizar un muestreo en el espacio cercano a la solución óptima de la fase de diversificación. Como se ha argumentado antes, las variables de diseño son la resistencia del hormigón a compresión simple y el canto y la base en relación con la sección transversal de los distintos puentes losa pretensados que van a ser objeto de análisis. En esta fase dichas variables se han reducido en torno a la solución óptima de la diversificación. Las restantes dimensiones, así como el número de aligeramientos de la sección transversal, quedan determinadas por las relaciones descritas en la Tabla 7.

Variables de diseño	Rango	Limitación
Resistencia del hormigón a compresión simple (f_{ck})	35-45 MPa	-
Canto (c)	1.05-1.25 m	> 0.90 m
Base inferior (b)	3.20-3.90 m	-
Vuelo (v)	Variable	< 3.50 m
Distancia entre el voladizo y el núcleo (d)	0.40 m	-
e_1 ($a+b$)	0.35 m	-
e_2 (a)	0.25 m	> 0.20 m
Recubrimiento mínimo aligeramiento	0.225 m	> 0.15 m

Tabla 7. Rangos de dimensiones de las variables de diseño de la fase de intensificación.

Por tanto, para la intensificación se modifica la resistencia característica del hormigón, desde 35 a 45 MPa. Además, en cuanto a la geometría de la sección transversal, se va a variar el canto, desde 1.05 m hasta 1.25 m, incrementándose los diseños obtenidos en 5 cm, así como la base de la sección, que tomará valores desde 3.20 m hasta 3.90 m, aumentándose, de igual modo, en 5 cm.

Una vez determinadas las variables, el muestreo LHS establece las distintas combinaciones de las variables que formarán parte del metamodelo. Se ha optado por sumar cinco individuos más en torno a la mejor solución de la diversificación para corroborar si es un número suficiente de individuos que mejoran la solución obtenida. Una vez analizados los nuevos tableros, se comprueban las restricciones que exige la normativa y se valoran las emisiones (Tabla 8).

Tablero	Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)	Emisiones de CO ₂ (kg)
31	1.15	3.40	35	411077.14
32	1.25	3.35	35	398614.42
33	1.15	3.65	45	422934.14
34	1.15	3.35	40	395465.24
35	1.15	3.25	40	397153.86

Tabla 8. Soluciones y emisiones de cada uno de los tableros en la fase de intensificación.

Estos nuevos individuos no perfeccionan la mejor solución encontrada en la fase de diversificación. Pero una vez realizada la optimización de la nueva superficie de respuesta, se obtiene un óptimo diferente que sí mejora al anterior (Tabla 9). Comparando el resultado obtenido de emisiones tras la optimización de esta segunda fase, se obtiene una disminución de hasta un 1.26%, con respecto a la diversificación, y una rebaja incluso de un 30.34% en el peor de los casos.

Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)	Emisiones de CO ₂ (kg)
1.10	3.40	35	386514.57

Tabla 9. Resultado tras la optimización de la fase de diversificación.

5. DISCUSIÓN

A continuación, se discuten los resultados para extraer conclusiones prácticas del puente optimizado a emisiones (POE, por simplificar) que sirvan para el proyecto de este tipo de estructuras. La relación entre el canto y la luz del POE es de $1/30.91$, lo cual supone una esbeltez en el límite de la recomendada por la Dirección General de Carreteras [33], que aconseja una esbeltez entre $1/22$ y $1/30$ para las losas con voladizos. No obstante, si atendemos a las sugerencias del SETRA [34], para losas con tres o más vanos y voladizos amplios, su recomendación es de $1/28$. En ambos casos, el POE trata de reducir el canto del tablero. Si comparamos esta esbeltez con los datos estadísticos del trabajo de Yepes et al. [35], vemos que la esbeltez es mayor que el percentil del 75%, $1/26.39$; además, solo uno de los casos analizados mostraba una esbeltez superior a $1/30$, lo cual confirma que este óptimo exhibe grandes esbelteces.

Por otra parte, el POE presenta una cuantía de hormigón de 0.56 m^3 por cada m^2 de tablero. Este valor se encuentra en el límite inferior de las recomendaciones, que aconseja cifras entre 0.55 y $0.70 \text{ m}^3/\text{m}^2$ [33]. Además, coincide con el percentil del 25% de la muestra [35]. El resultado confirma que el POE pretende reducir la cantidad de hormigón. La cuantía de armadura activa para el POE, de 16.48 kg/m^2 de tablero, si bien está entre los límites sugeridos [33], entre 10 y 25 kg/m^2 , está por debajo del percentil del 25% [35]. Esto también indica una tendencia a rebajar la cantidad utilizada de armadura de activa.

La cuantía de armadura pasiva del POE es de 136.85 kg/m^3 de hormigón, lo cual supera las sugerencias, que aconseja cifras entre 70 y 100 kg/m^3 [33]. Sin embargo, la realidad indica que la mediana es de 100.87 kg/m^3 [35], lo cual implica que las recomendaciones [33] están por debajo de lo ejecutado en puentes reales. Además, la cuantía de armadura pasiva del mejor puente es inferior al máximo de la muestra, que fue de 187.08 kg/m^3 . Si analizamos la ratio del POE, de 77.00 kg/m^2 de tablero, la cifra sigue siendo alta, superando el percentil del 75% de la muestra, aunque sin llegar al máximo de 92.91 kg/m^2 . Estas cifras nos llevan a que los tableros de menores emisiones prefieren una mayor cuantía de armadura pasiva a cambio de reducir el hormigón y la armadura activa.

A continuación, se compara el POE respecto a los valores previstos [35]. Ello implica conocer si la optimización de la huella de carbono supone cambios respecto a los modelos lineales ajustados en [33]. En efecto, en aquel trabajo, conociendo la luz principal y los aligeramientos interior y exterior, se podría predecir la armadura activa necesaria, el canto del tablero y la cuantía de hormigón. En el caso del puente de menor emisiones, la armadura activa estimada sería de 21.22 kg/m^2 . Sin embargo, la realidad es que ha sido necesaria solo una cuantía de 16.48 kg/m^2 . Por tanto, el POE tiende a usar un menor volumen de armadura activa respecto a lo que usualmente se utiliza. La recomendación de diseño sería reducir esta cuantía al máximo posible. Del mismo modo, el canto estimado sería de 1.13 m , mientras que en POE es de 1.10 m , que es sensiblemente igual. El volumen de hormigón estimado es de $0.52 \text{ m}^3/\text{m}^2$, que es similar a los $0.56 \text{ m}^3/\text{m}^2$ del POE. Dichas recomendaciones son consistentes con las obtenidas por trabajos previos [36] utilizando técnicas de optimización heurística, aunque en ese caso, con la función objetivo coste.

Otro aspecto relevante es comprobar la dependencia entre la ratio luz principal/canto y la cuantía de hormigón. En la Figura 6 se observa que interesan esbelteces altas, superiores a 1/28 y volúmenes de hormigón lo más bajos posibles, menores a $0.60 \text{ m}^3/\text{m}^2$. La cuantía de hormigón obtenida es coherente con el trabajo de Alcalá [36], que para la optimización económica de este tipo de puentes propone magnitudes de alrededor de $0.50 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Lo mismo ocurre con las esbelteces, en torno a 1/25 con tableros económicos de mayor luz.

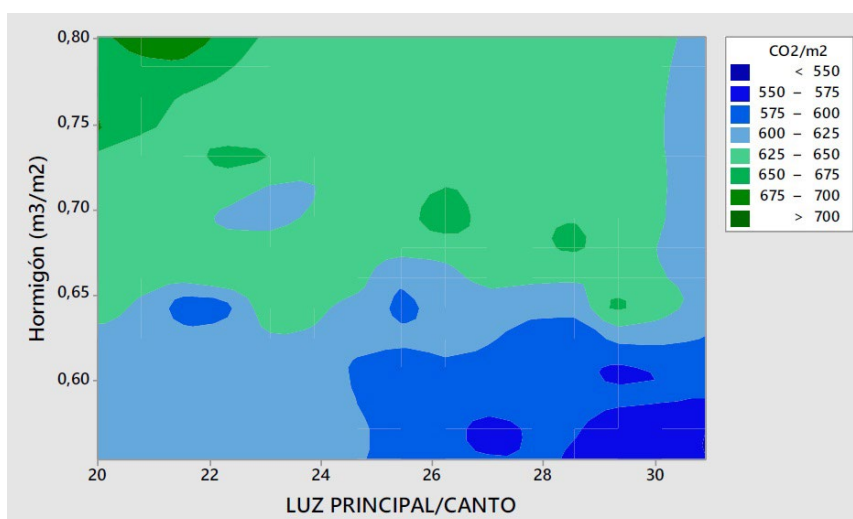


Figura 6. Gráfica de contorno del CO_2/m^2 respecto a luz principal/canto y a la cuantía de hormigón.

Por otro lado, se va a comparar qué diferencias se podrían establecer entre el coste económico de los tableros de puentes analizados en comparación con la reducción de emisiones. En la Tabla 10 se muestran los costes unitarios en función del tipo de material. Cabe destacar que solo se han analizado y contrastado aquellos costes equiparables y relevantes a la hora de realizar una comparativa con las emisiones de CO_2 [37]. Se comprueba, analizando el coste de los tableros analizados, que un incremento del coste menor al 1% permite reducciones en la cantidad de CO_2 mayores al 2%.

Tipo de material	€/kg	€/m ³	€/m ²
Hormigón HP-30		99.81	
Hormigón HP-35		104.57	
Hormigón HP-40		109.33	
Hormigón HP-45		114.10	
Hormigón HP-50		118.87	
Acero (B 500S)	1.16		
Acero Y1860-S7	3.40		
Encofrado			33.81
Aligeramiento		99.81	

Tabla 10. Precios unitarios de los materiales [37].

A continuación, se ha realizado un dendrograma de las variables de los tableros de puentes que se han calculado durante todo el proceso de doble etapa (Figura 7). Ello permite ver cómo se agrupan las variables y los resultados conseguidos en función de la similitud de los datos.

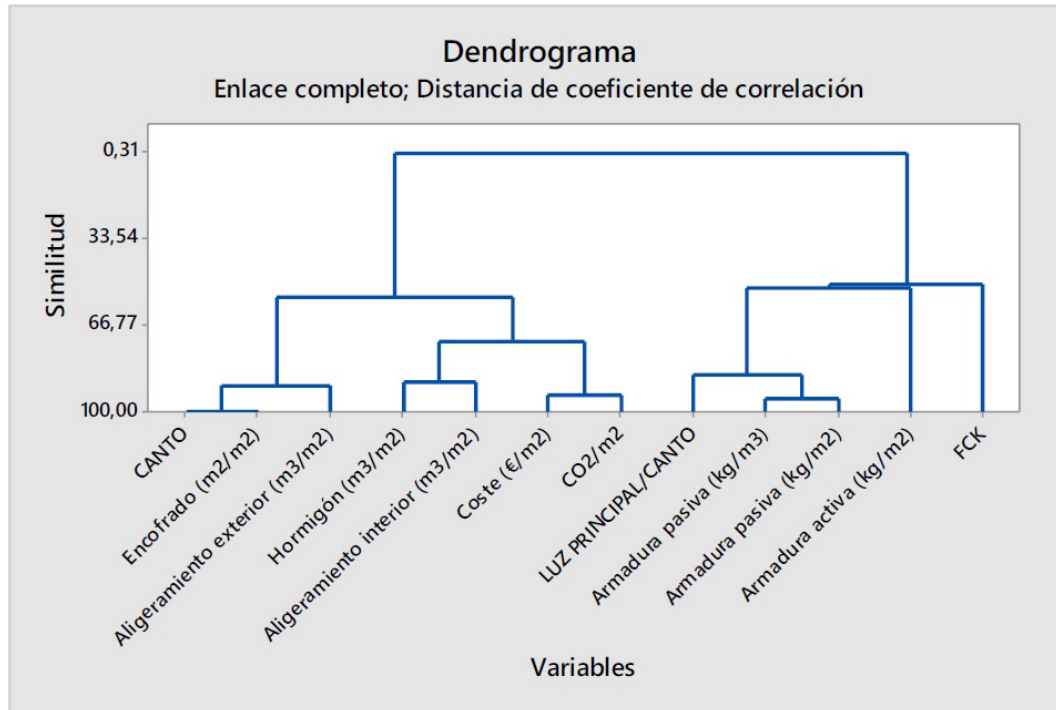


Figura 7. Dendrograma de las variables de los tableros de puente losa aligerados calculados.

Lo primero que llama la atención del análisis de dendrograma es que los resultados de los puentes analizados (las emisiones de CO_2 y el coste, referidos al m^2 de tablero) están agrupados entre sí. Ello implica una similitud elevada entre estos resultados y, por tanto, bastaría optimizar una de ellas para reducir la otra. De hecho, un análisis de la matriz de correlaciones nos indica que la correlación de Pearson entre el coste (€/m^2) y las emisiones ($\text{kg CO}_2/\text{m}^2$) es de 0.869, que es una correlación alta y positiva. La explicación a este resultado se puede argumentar por el hecho de que la valoración de estas dos funciones se basa en la cantidad de material utilizado.

En la Figura 8 se representa la línea ajustada a un modelo lineal, donde puede estimarse el coste del puente en función de las emisiones. Se observa que la variabilidad explicada por el modelo es alta, en torno al 75%. No obstante, el punto correspondiente a la menor emisión obtenida de los tableros de puentes calculados, se encuentra con un coste un 1,05% superior al previsto por el modelo (251.69 €/m^2), aunque dentro del intervalo de confianza del 95% para la media. El modelo nos viene a decir que, quitando los costes fijos de 129.2 €/m^2 , por cada $\text{kg de CO}_2/\text{m}^2$ que reduzcamos en nuestro diseño, ahorraremos 0.2262 €/m^2 .

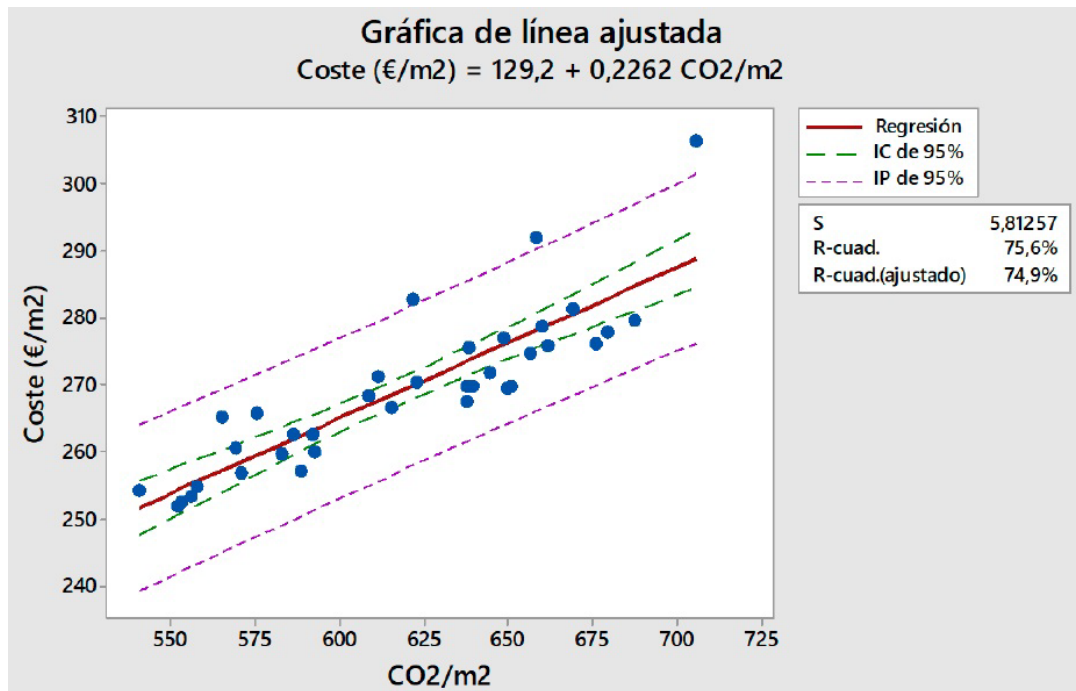


Figura 8. Ajuste lineal entre las emisiones y el coste de los tableros de puentes calculados, referidos a la unidad de superficie del tablero.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una metodología de optimización de estructuras apoyada en metamodelos que ha resuelto el problema de forma ágil y sistemática. Se ha mostrado que la propuesta bifase basada en un metamodelo Kriging mejora el diseño medioambiental de un tablero de puente losa pretensado para mitigar las emisiones de CO_2 . No obstante, queda fuera del alcance del trabajo y, por tanto, constituye una clara línea de investigación futura, aplicar esta metodología al análisis completo del ciclo de vida y su aplicación a otras funciones objetivo como pudiera ser la constructibilidad, la seguridad, el consumo de energía u otros. Además, también se debería estudiar la sensibilidad de los parámetros en los resultados finales. No obstante, salvo un cambio drástico en la tecnología, las emisiones de CO_2 de cada una de las unidades de obra son valores más estables que las fluctuaciones de los precios.

Las recomendaciones de diseño, si se quieren reducir las emisiones, pasan por utilizar esbelteces lo más altas posibles, en el entorno de 1/30, lo cual supone una mayor cantidad de armadura pasiva. Este aumento de armadura pasiva se ve compensado por la reducción en la cuantía de hormigón y de la armadura activa. A su vez, para reducir el volumen de hormigón, se recomienda aumentar en lo posible los aligeramientos. También se comprueba que la reducción del CO_2 se encuentra directamente relacionada con el coste. Por tanto, bastaría una optimización del coste para reducir los aspectos medioambientales. Además, se ha podido corroborar que por un incremento del coste menor al 1 % se consiguen reducciones en la cantidad de emisiones de CO_2 emitidas a la atmósfera mayor al 2 %.

A nivel práctico, para reducir las emisiones en el caso de un puente losa pretensado de tres vanos y una luz principal de 34 m, se recomienda lo siguiente:

- Esbelteces superiores a 1/28.
- Cuantías de hormigón inferiores a 0.60 m³/m² de tablero.
- Cuantías de armadura pasiva por encima de 120 kg/m³ de hormigón.
- Cuantías de armadura activa por debajo de 17 kg/m² de tablero.
- Resistencias características del hormigón entre 35 y 40 MPa.
- Aligeramientos exteriores entre 0.40 y 0.50 m³/m² de tablero.
- Aligeramientos interiores por debajo de 0.20 m³/m² de tablero.

AGRADECIMIENTOS

Grant PID2020-117056RB-I00 funded by MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 and by “ERDF A way of making Europe”.

REFERENCIAS

- [1] IEA, UNEP, *Global Status Report: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector*, International Energy Agency and the United Nations Environment Programme, (2018).
- [2] A.P. Gursel, E. Masanet, A. Horvath and A. Stadel, “Life-cycle inventory analysis of concrete production: a critical review”, *Cem. Concr. Compos.*, Vol. **51**, pp. 38-48, (2014).
- [3] C. Maureira, H. Pinto, V. Yepes and J. García, “Towards an AEC-AI industry optimization algorithmic knowledge mapping”, *IEEE Access*, Vol. **9**, pp. 110842-110879, (2021).
- [4] V.J.L. Gan, C.L. Wong, K.T. Tse, J.C.P. Cheng, I.M.C. Lo and C.M. Chan, “Parametric modelling and evolutionary optimization for cost-optimal and low-carbon design of high-rise reinforced concrete buildings”, *Adv. Eng. Inform.*, Vol. **42**, pp. 100962, (2019).
- [5] I. Payá, V. Yepes, F. González-Vidosa and A. Hospitaler, “Multiobjective optimization of reinforced concrete building frames by simulated annealing”, *Comput.-Aided Civ. Infrastruct. Eng.*, Vol. **23**, pp. 596-610, (2008).
- [6] I. Payá-Zaforteza, V. Yepes, A. Hospitaler and F. González-Vidosa, “CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing”, *Eng. Struct.*, Vol. **31**, pp. 1501-1508, (2009).
- [7] D. Yeo and R.D. Gabbai, “Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization”, *Energy Build.*, Vol. **43**, pp. 2028-2033, (2011).
- [8] A. Kaveh, R.A. Izadifard and L. Mottaghi, “Optimal design of planar RC frames considering CO₂ emissions using ECBO, EVPS and PSO metaheuristic algorithms”, *J. Build. Eng.*, Vol. **28**, pp. 101014, (2020).
- [9] F.J. Martínez-Martín, F. González-Vidosa, A. Hospitaler and V. Yepes, “Multi-objective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms”, *J. Zhejiang Univ-SCI A*, Vol. **13**, pp. 420-432, (2012).
- [10] V. Yepes, F. González-Vidosa, J. Alcalá and P. Villalba, “CO₂-optimization design of reinforced concrete retaining walls based on a VNS-threshold acceptance strategy”, *J. Comput. Civil Eng.*, Vol. **26**, pp. 378-386, (2012).
- [11] F. Molina-Moreno, J.V. Martí and V. Yepes, “Carbon embodied optimization for buttressed earth-retaining walls: Implications for low-carbon conceptual designs”, *J. Clean. Prod.*, Vol. **164**, pp. 872-884, (2017).

- [12] V. Yepes, J.V. Martí and J. García, “Black hole algorithm for sustainable design of counterfort retaining walls”, *Sustainability*, Vol. 12, pp. 2767, (2020).
- [13] 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”, *Autom. Constr.*, Vol. **49**, pp. 123-134, (2015).
- [14] T. García-Segura, V. Yepes, J. Alcalá and E. Pérez-López, “Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges”, *Eng. Struct.*, Vol. **92**, pp. 112-122, (2015).
- [15] T. García-Segura and V. Yepes, “Multiobjective optimization of post-tensioned concrete box-girder road bridges considering cost, CO₂ emissions, and safety”, *Eng. Struct.*, Vol. **125**, pp. 325-336, (2016).
- [16] V. Penadés-Plà, J.V. Martí, T. García-Segura and V. Yepes, “Life-cycle assessment: A comparison between two optimal post-tensioned concrete box-girder road bridges”, *Sustainability*, Vol. **9**, pp. 1864, (2017).
- [17] V. Penadés-Plà, T. García-Segura, J.V. Martí and V. Yepes, “An optimization-LCA of a prestressed concrete precast bridge”, *Sustainability*, Vol. **10**, pp. 685, (2018).
- [18] V. Yepes, M. Dasí-Gil, D. Martínez-Muñoz, V. López-Desfilís and J.V. Martí, “Heuristic techniques for the design of steel-concrete composite pedestrian bridges”, *Appl. Sci.*, Vol. **9**, pp. 3253, (2019).
- [19] D. Martínez-Muñoz, J.V. Martí and V. Yepes, “Steel-concrete composite bridges: design, life cycle assessment, maintenance and decision making”, *Adv. Civ. Eng.*, Vol. **2020**, pp. 8823370, (2020).
- [20] N. Cressie, “The origins of Kriging”, *Math. Geol.*, Vol. **22**, pp. 239-252, (1990).
- [21] J. Martínez-Frutos and P. Martí, “Diseño óptimo robusto utilizando modelos Kriging: aplicación al diseño óptimo robusto de estructuras articuladas”, *Rev. Int. Métodos Numér. Cál. Diseño Ing.*, Vol. **30**, pp. 97-105, (2014).
- [22] A. Mathern, V. Penadés-Plà, J. Armesto Barros and V. Yepes, “Practical metamodel-assisted multi-objective design optimization for improved sustainability and buildability of wind turbine foundations”, *Struct. Multidiscip. Optim.*, Vol. **65**, pp. 46, (2022).
- [23] P. Martínez Fernández, I. Villalba Sanchis, R. Insa Franco and V. Yepes, “Slab track optimisation using metamodels to improve rail construction sustainability”, *J. Constr. Eng. Manag.*, (accepted, in press).
- [24] T. García-Segura, V. Penadés-Plà and V. Yepes, “Sustainable bridge design by metamodel-assisted multi-objective optimization and decision-making under uncertainty”, *J. Clean. Prod.*, Vol. **202**, pp. 904-915, (2018).
- [25] V. Penadés-Plà, T. García-Segura and V. Yepes, “Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete box-girder bridge design”, *Eng. Struct.*, Vol. **179**, pp. 556-565, (2019).
- [26] V. Penadés-Plà, V. Yepes and T. García-Segura, “Robust decision-making design for sustainable pedestrian concrete bridges”, *Eng. Struct.*, Vol. **209**, pp. 109968, (2020).
- [27] L. Yepes-Bellver, *Diseño óptimo de tableros de puentes losa pretensados aligerados frente a emisiones de CO₂ utilizando metamodelos*, Trabajo Fin de Máster, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de València, (2020).
- [28] A. Brun-Izquierdo, *Optimización energética de tableros tipo losa pretensados aligerados mediante modelos Kriging*, Trabajo Fin de Máster, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de València, (2020).
- [29] N.S. Lophaven, H.B. Nielsen and J. Sondergaard, *MATLAB Kriging Toolbox DACE* (Design and Analysis of Computer Experiments) Version 2.0, (2002).

- [30] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt and M.P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, Vol. **220**, pp. 671-680, (1983).
- [31] J.R. Medina, "Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing", *J. Waterw. Port, Coast. Ocean Eng.*, Vol. **127**, pp. 213-221, (2001).
- [32] I. Payá-Zaforteza, V. Yepes, F. González-Vidosa and A. Hospitaler, "On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing", *Meccanica*, Vol. **45**, pp. 693-704, (2010).
- [33] Dirección General de Carreteras, *Obras de paso de nueva construcción: conceptos generales*, Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, Madrid, (2000).
- [34] SETRA, *Ponts-dalles. Guide de conception*, Ministère de l'Équipement, du logement des Transports et de la Mer, Bagneux, France, (1989).
- [35] V. Yepes, J. Díaz, F. González-Vidosa and J. Alcalá, "Statistical characterization of prestressed concrete road bridge decks", *Rev. Constr.*, Vol. **8**, pp. 95-109, (2009).
- [36] J. Alcalá, *Optimización heurística económica de tableros de puentes losa pretensados*, Tesis doctoral, Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, Universitat Politècnica de València, (2010).
- [37] V. Yepes, E. Pérez-López, J. Alcalá and T. García-Segura, "Parametric study of concrete box-girder footbridges", *J. Constr. Eng. Manag. Innov.*, Vol. **1**, pp. 67-74, (2018).