

02-016

ENERGY OPTIMIZATION OF POST-TENSIONED CAST-IN-PLACE CONCRETE SLAB ROAD BRIDGES USING KRIGING MODELS

Brun-Izquierdo, Alejandro ⁽¹⁾; Yepes-Bellver, Lorena ⁽¹⁾; Alcalá, Julián ⁽¹⁾; Yepes, Víctor ⁽¹⁾

(1) Universitat Politècnica de València

This work aims to develop a methodology for energy optimization in the construction of lightened prestressed slab panels. A cross-section analysis is carried out to determine the design parameters through a state-of-the-art study. From this analysis, the design variables that will improve the energy efficiency of the slab are identified. The methodology is divided into two phases: first, a statistical technique called Latin hypercube is used to sample the panel variables and determine a response surface; second, the response surface is optimized using a Kriging-based optimization model. As a result, a methodology has been developed that reduces the energy cost in the construction of lightened prestressed slab panels. Recommendations to improve energy efficiency include using high slendernesses (around 1/28), reducing the consumption of concrete and active reinforcement, and increasing the amount of passive reinforcement.

Keywords: optimization; embodied energy; bridges; Kriging; metamodel; sustainability

OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE TABLEROS TIPO LOSA PRETENSADOS ALIGERADOS MEDIANTE MODELOS KRIGING

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología para optimizar la energía en la construcción de tableros losa pretensado aligerados. Se lleva a cabo un análisis de la sección transversal para determinar los parámetros de diseño a través de un estudio del estado del arte. A partir de ese análisis, se identifican las variables de diseño que mejorarán la eficiencia energética del tablero. La metodología se divide en dos fases: primero, se utiliza una técnica estadística llamada hipercubo latino para muestrear las variables del tablero y determinar una superficie de respuesta; y en segundo lugar, se optimiza la superficie de respuesta mediante un modelo de optimización basado en Kriging. Como resultado, se ha desarrollado una metodología que reduce el costo energético en la construcción de tableros losa pretensado aligerados. Las recomendaciones para mejorar la eficiencia energética incluyen emplear esbelteces elevadas (alrededor de 1/28), reducir el consumo de hormigón y armadura activa, y aumentar la cantidad de armadura pasiva.

Palabras clave: optimización; energía; puentes; Kriging; metamodelos; sostenibilidad

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



© 2023 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. Introducción

La construcción es responsable del 25-40% del consumo mundial de energía (IEA, 2018). La energía necesaria para construir una estructura, al igual que las emisiones de CO₂, se utilizan como medida de la sostenibilidad (Wang et al., 2012; Wang & Shen, 2013). Por ello, ha crecido el interés en la optimización de la sostenibilidad ambiental en la construcción en los últimos años (Maureira et al., 2021).

La adecuada selección de materiales y la optimización mejora la sostenibilidad de las estructuras. De hecho, algunos autores han usado la energía como objetivo en la optimización (Yeo & Gabbai, 2011; Quaglia et al., 2014). Miller, Doh y Mulvey (2015) demostraron que las losas postesadas consumen menos energía que las de hormigón armado. La reducción energética disminuye el peso de la estructura, pero un menor peso no garantiza el menor consumo energético posible (Foraboschi, Mercanzin & Trabucco, 2014).

Nuestro grupo ha optimizado el consumo de energía en puentes. Yepes et al. (2011) lo aplicaron a un puente de tres vanos continuos de 20-36-20 m y una anchura de tablero de 11 m, utilizando 33 variables de diseño. Comprobaron que la solución de menor energía era un 9,7% más cara que la obtenida al optimizar el coste. Alcalá et al. (2018) encontraron que la solución de menor coste solo requería un 5,3% más de energía. Martí, García-Segura y Yepes (2016) obtuvieron ahorros de energía del 24% para un puente prefabricado de 30 m. Penadés-Plà, García-Segura y Yepes (2019) presentaron un algoritmo de optimización basado en Kriging para una pasarela de tres vanos 40-50-40 m. Como se puede observar, son muy pocas las investigaciones que optimizan la energía de puentes losa de hormigón.

La optimización heurística de estructuras puede ser costosa en términos computacionales, por lo que se recurre a metamodelos para solucionar este problema. Uno de los más efectivos es el Kriging, el cual sustituye a un modelo de simulación y proporciona una interpolación óptima basada en la regresión de valores observados (Cressie, 1990). Sin embargo, son pocos los trabajos que han utilizado Kriging para diseñar estructuras reales. Martínez-Frutos y Martí (2014) han aplicado esta metodología para resolver el diseño óptimo robusto de estructuras articuladas y desacoplar la valoración de incertidumbre de la propia optimización. Recientemente, se ha aplicado a la optimización de aerogeneradores (Mathern et al., 2022) o las vías en placa de ferrocarriles (Martínez Fernández et al., 2022).

García-Segura, Penadés-Plà y Yepes (2018) han empleado Kriging en puentes de sección en cajón para optimizar múltiples objetivos en condiciones de incertidumbre. Un algoritmo basado en Kriging redujo el tiempo de cómputo en un 99,06% y obtuvo resultados similares a una optimización heurística mediante recocido simulado (Penadés-Plà, García-Segura & Yepes, 2019). Penadés-Plà, Yepes y García-Segura (2020) aplicaron este modelo para optimizar una pasarela de sección en cajón pretensada. Recientemente se ha utilizado Kriging para las emisiones de CO₂ (Yepes-Bellver et al., 2022) en puentes losa aligerados.

Este artículo presenta una metodología general para reducir el consumo energético en la construcción de puentes losa aligerados pretensados, aplicable a otras estructuras para optimizar distintas funciones objetivo. Se destacan dos contribuciones novedosas: el uso de un metamodelo Kriging bifásico y la optimización ambiental de puentes losa aligerados.

2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es la propuesta de un procedimiento basado en metamodelos tipo Kriging para reducir el consumo energético en la construcción de tableros de puente tipo losa aligerados pretensados.

3. Descripción del tablero de puente losa aligerado

Es frecuente utilizar una losa continua hiperestática de hormigón pretensado en puentes con luces entre 10 y 45 m. Esta solución compite con las vigas prefabricadas por sus ventajas estructurales (mayor rigidez a torsión y flexión, mayor durabilidad y seguridad debido al hiperestatismo), y constructivas, pues se adapta fácilmente a terrenos complejos, simplificando el encofrado y el hormigonado. Además, elimina las juntas y ofrece mayor libertad en la disposición de los apoyos y mejor estética.

El objetivo de este trabajo es optimizar el diseño de un tablero de puente losa pretensado aligerado con tres vanos de 24 m, 34 m y 28 m. La losa ejecutada "in situ" tiene un canto constante y una planta recta (Figura 1). El ancho del tablero es de 8,30 m, con dos carriles de 3,50 m cada uno, pretilos de 0,65 m a ambos lados y un pedestal de hormigón (Figura 2).

Figura 1: Alzado del puente losa pretensado aligerado

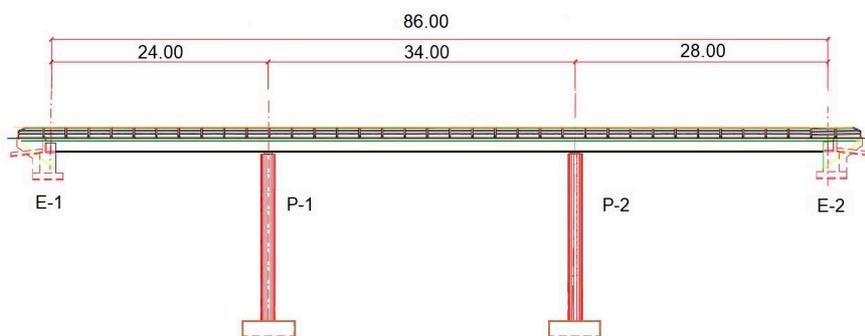
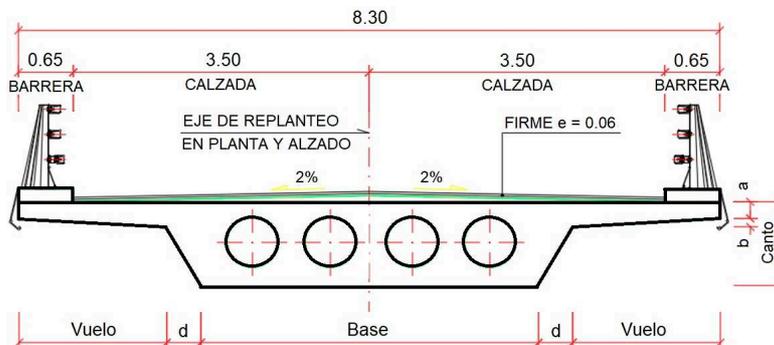


Figura 2: Sección transversal tipo del tablero de puente losa pretensado aligerado



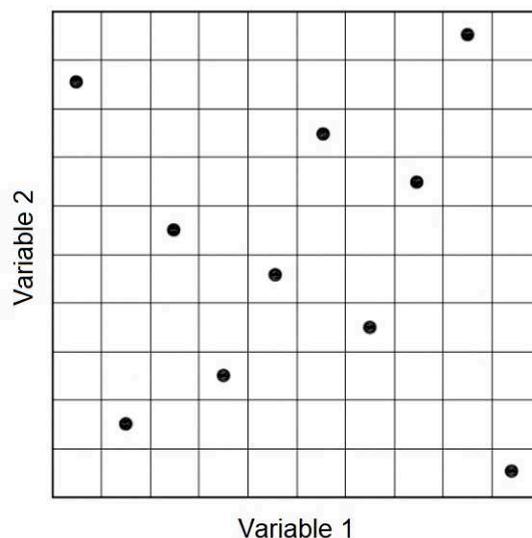
La teoría de los estados límite se utiliza para comprobar la resistencia estructural mediante coeficientes parciales de seguridad. En cada situación de diseño, se verifica que no se sobrepase ningún estado límite, incluyendo tanto los últimos como los de servicio. En este caso, se utilizó el software CSiBridge v.21.0.0 para modelar, analizar y dimensionar el tablero. Cada alternativa se analizó para obtener las solicitudes actuantes y resistentes, representadas por esfuerzos seccionales. Estas solicitudes se obtienen para cada elemento estructural y se detallan en el trabajo de Brun-Izquierdo (2020).

3. Metodología

La metodología propuesta optimiza en una fase de diversificación y otra de intensificación. Se utiliza el muestreo de hipercubo latino (LHS) para seleccionar números aleatorios uniformemente distribuidos. Para cada alternativa, se analiza la energía embebida y se optimiza una superficie de respuesta generada por un metamodelo Kriging.

El LHS selecciona una muestra aleatoria en cada intervalo para cada variable. El modelo numérico se ejecuta tantas veces como intervalos considerados en la división de las distribuciones de probabilidad. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de cómo funciona el LHS para un muestreo con dos variables de diseño y diez muestras.

Figura 3: Ejemplo de muestreo LHS para dos variables y 10 puntos de muestras



El muestreo depende del tamaño y la posición de los puntos seleccionados. Para lograr la misma precisión en el metamodelo, el tamaño de la muestra aumenta proporcionalmente con el número de variables. En el caso de estructuras de hormigón, se han obtenido buenos resultados con una muestra de 30 individuos (Mathern et al., 2022; Martínez-Fernández et al., 2022). El siguiente paso sería encajar los valores en los rangos de cada variable. Este muestreo genera diseños que se utilizan como entrada en el modelo de optimización.

Cada tablero consume energía, y para comparar diferentes diseños, se analizan diversos elementos como el tipo de hormigón, la superficie de encofrado, la cantidad de acero y el volumen de aligeramientos (Tabla 1).

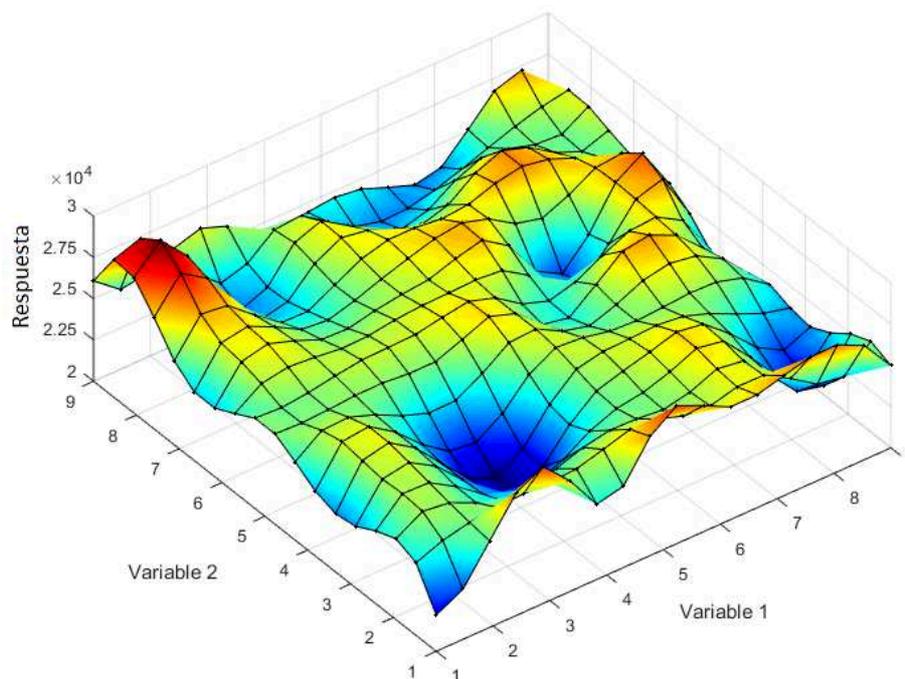
Tabla 1: Coste energético de los materiales (Penadés-Plà et al., 2019)

Material	kWh/kg	kWh/m ³	kWh/m ²
Hormigón HP-30		596,91	
Hormigón HP-35		612,22	
Hormigón HP-40		646,61	
Hormigón HP-45		681,00	
Hormigón HP-50		715,39	
Acero (B 500S)	10,44		
Acero Y1860-S7	12,99		
Encofrado			8,70
Aligeramiento		1137,50	

Aunque un estudio convencional concluiría con la selección del tablero que requiera menor energía, se plantea un modelo predictivo tipo Kriging, para optimizar las alternativas resultantes del muestreo mediante un algoritmo heurístico. Kriging interpola basándose en la regresión de los valores observados de los puntos circundantes, ponderados según la covarianza espacial. El modelo considera tanto las aproximaciones globales como las locales simultáneamente, permitiendo considerar las variaciones locales de la respuesta.

Kriging se basa en la predicción del valor de un atributo z en un punto de coordenadas u , a partir de n valores de z (Figura 4). En este caso, el atributo lo constituye la energía necesaria para ejecutar el tablero y los puntos son el conjunto de soluciones extraídas mediante un muestreo LHS. Este proceso predice la respuesta sin necesidad de un análisis estructural completo. Se ha utilizado el "MATLAB Kriging Toolbox" (DACE), que construye un modelo Kriging a partir de datos de un experimento informático, que consiste en pares de inputs y respuestas del modelo (Lophaven, Nielsen & Sondergaard, 2002).

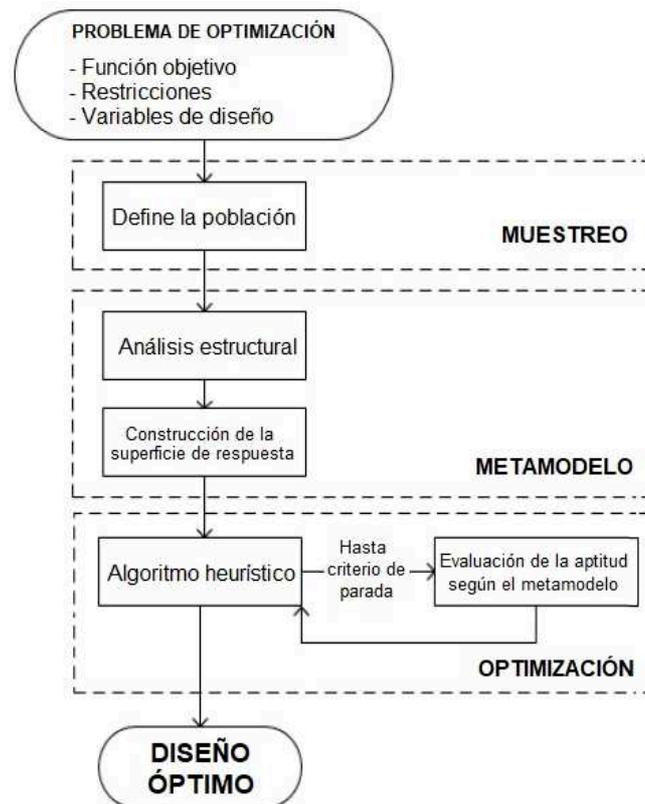
Figura 4: Ejemplo de superficie de respuesta



Para lograr la máxima precisión en la respuesta, se sustituye la parte más lenta de la optimización convencional, es decir, el análisis estructural y la evaluación de la función objetivo, por una predicción del metamodelo. Como resultado, el costo computacional requerido para la optimización basada en metamodelos es menor que el convencional. De esta manera, el uso de este modelo permite resolver estructuras que requieren un alto costo computacional, al mismo tiempo que reduce la complejidad de otros problemas. En la Figura 5 se muestra el diagrama de flujo del proceso.

El algoritmo heurístico utilizado es el recocido simulado (Kirkpatrick, Gelatt & Vecchi, 1983). La aceptación de una nueva solución se gobierna por la expresión $\exp(-\Delta E/T)$, donde ΔE es la diferencia entre la función objetivo de la solución candidata y la actual y T es la temperatura. La temperatura inicial T_0 se fija siguiendo el método de Medina (2001), y se reduce geométricamente cada vez que ultima 1000 cadenas de Markov, según un coeficiente de enfriamiento del 80 %. Este algoritmo se emplea para optimizar estructuras, dada su buena convergencia hacia el óptimo global (Payá-Zaforteza et al., 2010).

Figura 5: Flujograma de la optimización basada en metamodelos (Penadés-Plà et al., 2019)



4. Resultados

Las variables son la resistencia del hormigón a compresión simple y el canto y la base en relación con la sección transversal de los distintos tableros (Figura 2). Las restantes dimensiones, así como los aligeramientos, se determinan según las relaciones descritas en la Tabla 2. Por tanto, se procede a modificar la resistencia característica del hormigón, tomando valores desde 30 a 50 MPa. Se varía el canto desde 1,15 m hasta 1,70 m, incrementándose los diseños 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 escalones de 5 cm.

Tabla 2: Rangos dimensionales y sus limitaciones establecidas por normativa (DGC, 2000)

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

4.1 Fase de diversificación

En la primera fase se realiza un muestreo LHS para diversificar la búsqueda del óptimo local. 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. Sin embargo, se ha establecido la premisa de que las dimensiones tanto del canto como de la base inferior estarían comprendidas en múltiplos de 5 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 3.

Tabla 3: Valores obtenidos para las variables de diseño dentro de los rangos establecidos

Tablero	Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)	Tablero	Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)
1	1,45	4,75	35	16	1,65	3,45	45
2	1,70	3,80	45	17	1,25	3,50	45
3	1,20	3,85	40	18	1,40	3,30	40
4	1,55	3,60	45	19	1,45	3,90	45
5	1,20	4,85	50	20	1,35	3,60	35
6	1,15	4,50	50	21	1,50	3,35	45
7	1,35	3,95	30	22	1,50	4,50	45
8	1,30	4,45	30	23	1,55	3,20	30
9	1,35	4,25	45	24	1,25	3,00	50
10	1,50	4,55	30	25	1,40	3,45	45
11	1,60	4,20	40	26	1,50	3,55	35
12	1,25	4,70	40	27	1,70	3,85	45
13	1,50	4,05	45	28	1,20	3,60	40
14	1,45	4,35	35	29	1,30	4,90	40
15	1,55	4,10	35	30	1,65	3,65	35

En este muestreo, se seleccionan los datos que alimentan el modelo Kriging. Se lleva a cabo un análisis y verificación de los tableros, tanto para los límites últimos como para los estados de servicio, y se calcula el consumo energético.

Para hacer una comparación entre los diferentes tableros, se evalúan los elementos relevantes que contribuyen al consumo energético, como el tipo de hormigón utilizado, la superficie de encofrado requerida, la cantidad de acero utilizado (pasivo y activo) y el volumen de aligeramientos. La energía se relaciona con las mediciones de cada material, como se muestra en la Tabla 4.

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

Tablero	Coste energético (MW·h)	Tablero	Coste energético (MW·h)
1	1.163,59	16	1.145,07
2	1.182,89	17	1.073,75
3	1.065,87	18	1.152,33
4	1.140,79	19	1.145,21
5	1.170,72	20	1.094,86
6	1.199,59	21	1.134,93
7	1.103,18	22	1.189,53
8	1.180,31	23	1.103,41
9	1.132,71	24	1.101,04
10	1.138,00	25	1.201,73
11	1.267,85	26	1.105,44
12	1.191,65	27	1.165,47
13	1.183,17	28	1.083,41
14	1.119,17	29	1.215,82
15	1.162,92	30	1.149,88

Un análisis convencional de soluciones llevaría a la elección del tablero 3, dado que produce el menor costo energético. No obstante, para lograr una solución aún más eficiente, se ha optado por emplear un modelo Kriging para la optimización. Con la ayuda del recocido simulado se ha logrado una superficie de respuesta óptima y los resultados se encuentran resumidos en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultado tras la optimización de la fase de diversificación

Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)	Coste energético (MW·h)
1,15	3,35	40	1.051,00

4.1 Fase de intensificación

La segunda fase tiene como objetivo intensificar la búsqueda de soluciones óptimas a partir de la mejor solución obtenida en la fase anterior. En esta etapa, se han reducido las variables en torno a la solución óptima de la diversificación y se han agregado 10 individuos más para verificar si es suficiente para mejorar la solución obtenida. Después de analizar los nuevos tableros, se verifican las restricciones exigidas por la normativa y se evalúa la energía según lo indicado en la Tabla 6.

Tabla 6: Soluciones y coste energético de cada tablero en fase de intensificación

Tablero	Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)	Coste energético (MW·h)
31	1,20	3,40	40	1.059,87
32	1,15	3,90	35	1.129,22
33	1,05	3,50	35	1.237,89
34	1,10	3,80	45	1.178,72
35	1,15	3,35	45	1.074,77
36	1,25	3,60	45	1.078,71
37	1,10	3,45	40	1.124,21
38	1,20	3,35	45	1.065,44
39	1,25	3,40	45	1.084,92
40	1,15	3,60	45	1.104,77

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 17,1 %, en el peor de los casos y del 1,5 % en el mejor.

Los nuevos individuos no perfeccionan la mejor solución encontrada durante la fase de diversificación. Sin embargo, una vez se completa la optimización de la nueva superficie de respuesta, se obtiene un óptimo diferente que supera al anterior (como se puede apreciar en la Tabla 7). Al comparar el resultado de la energía obtenido después de la optimización de esta segunda fase, se logra una disminución de hasta un 1.21 %.

Tabla 7: Resultado tras la optimización de la fase de diversificación

Canto (m)	Base (m)	f_{ck} (MPa)	Coste energético (MW·h)
1,15	3,70	40	1.038,28

5. Discusión de resultados

Para los puentes losa pretensados con voladizos, las recomendaciones de la Dirección General de Carreteras (DGC, 2000) sugieren una relación de esbeltez entre 1/22 y 1/30, mientras que SETRA (1989) recomienda una relación de esbeltez de 1/28 para tableros losa de tres vanos con amplios voladizos. En nuestro caso, la relación de esbeltez del puente optimizado según la energía es de 1/29,57, lo que se encuentra dentro de los límites recomendados por la DGC (2000) y muy cercano al límite establecido por SETRA (1989).

La optimización del tablero reduce el canto, lo que origina una relación de esbeltez muy elevada para estos puentes. Si comparamos la relación de esbeltez del puente optimizado según la energía con los datos del estudio de Yepes et al. (2009), el cual analizó estadísticamente 61 losas aligeradas, podemos observar que la relación de esbeltez supera el percentil 75 % (1/26,39). Solo un tablero en dicho estudio presentaba una relación de esbeltez superior a 1/30, lo que sugiere que el diseño de tableros tan esbeltos no es común.

En relación a la cantidad de hormigón, se recomienda por parte de la DGC (2000) un rango de valores entre 0,55 y 0,70 m³/m² para el tablero. El tablero optimizado según la energía

tiene una cantidad de $0,60 \text{ m}^3/\text{m}^2$, situándose dentro de la recomendación de la DGC (2000). Al comparar esta cantidad de hormigón con los datos proporcionados por Yepes et al. (2009), se observa que se encuentra ligeramente por debajo de la mediana de la muestra.

La cantidad de acero pasivo utilizada en el tablero optimizado según la energía supera en un 12% las recomendaciones de la DGC (2000), que establecen un rango de valores entre 70 y 100 kg de acero pasivo por metro cúbico de hormigón. El puente optimizado requiere una cantidad de $112,32 \text{ kg}/\text{m}^3$ de acero pasivo, lo que representa un incremento significativo respecto a las recomendaciones.

Sin embargo, el valor mediano del trabajo de Yepes et al. (2009) es de $100,87 \text{ kg}/\text{m}^3$, lo que indica que estamos cerca de la cantidad habitual de acero pasivo utilizada en puentes construidos en España anteriormente. También podemos decir que los valores proporcionados por la DGC (2000) están por debajo de lo que se ha ejecutado realmente.

La cuantía de acero pasivo del puente optimizado por consumo energético es menor que el valor máximo encontrado en el estudio de Yepes et al. (2009), que fue de $187,08 \text{ kg}/\text{m}^3$. Además, la cuantía de armadura pasiva por metro cuadrado de puente está cerca de la mediana del mismo estudio. El puente optimizado a energía utiliza una cantidad de $67,32 \text{ kg}/\text{m}^2$ de tablero, mientras que la mediana es de $65,27 \text{ kg}/\text{m}^2$ de tablero. En cuanto a la cuantía de armadura activa, el puente optimizado consume una cantidad de $16,48 \text{ kg}/\text{m}^2$ de tablero, la cual se encuentra dentro de los límites establecidos por la DGC (2000) de 10 a $25 \text{ kg}/\text{m}^2$. Sin embargo, este valor está por debajo del percentil 25% del trabajo de Yepes et al. (2009), lo que sugiere que la optimización energética de puentes losa tiende a reducir la cantidad de pretensado y hormigón a cambio de aumentar la cantidad de armadura pasiva.

6. Conclusiones

A continuación, se presentarán las conclusiones obtenidas a partir del estudio realizado. Es importante destacar que en este trabajo se ha desarrollado una metodología de optimización de estructuras utilizando metamodelos, lo que ha permitido resolver de manera sistemática y eficiente un problema existente.

En primer lugar, se ha logrado responder a la pregunta de investigación planteada, proporcionando una metodología bifásica basada en un metamodelo Kriging que permite mejorar el coste energético asociado a la construcción de un tablero losa postesado aligerado.

A partir de la discusión de los resultados, se han obtenido las siguientes conclusiones: El diseño de tableros losa que permita reducir el consumo energético implica aumentar ligeramente las esbelteces típicas de estos elementos. Esta acción conlleva una reducción del volumen de hormigón utilizado y de la cantidad de pretensado necesario, al tiempo que se incrementa el consumo de armadura pasiva. Asimismo, al disminuir el volumen de materiales, como el acero para la armadura activa y el hormigón, se logra reducir el consumo energético. Para conseguir esto, se recomienda utilizar amplios voladizos y aligeramientos interiores con la mayor altura posible dentro del diseño, lo que permitirá reducir el volumen de hormigón empleado.

Para reducir las emisiones en un puente losa pretensado de tres vanos y una luz principal de 34 m, se recomienda una esbeltez en torno a $1/28$, una cuantía de hormigón entre $0,55$ y $0,60 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de tablero, un cuantía de armadura pasiva entre 100 y $130 \text{ kg}/\text{m}^3$, la cuantía de armadura activa debe rondar los $17 \text{ kg}/\text{m}^2$ de tablero, la resistencia característica del hormigón debe ser de 40 MPa, los aligeramientos interiores deben ser inferiores a $0,18 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de tablero y los exteriores deben estar entre $0,45$ y $0,55 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de tablero.

7. Referencias

- Alcalá, J., González-Vidosa, F., Yepes, V., & Martí, J. V. (2018). Embodied energy optimization of prestressed concrete slab bridge decks. *Technologies*, 6, 43.
- Brun-Izquierdo, A. (2020). *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.
- Cressie, N. (1990). The origins of Kriging. *Mathematical Geology*, 22, 239–252.
- Dirección General de Carreteras (2000). *Obras de paso de nueva construcción: conceptos generales*. Ministerio de Fomento, Centro de Publicaciones, Madrid.
- Foraboschi, P., Mercanzin, M., & Trabucco, D. (2014). Sustainable structural design of tall buildings based on embodied energy. *Energy and Buildings*, 68, 254–269.
- García-Segura, T., Penadés-Plà, V., & Yepes, V. (2018). Sustainable bridge design by metamodel-assisted multi-objective optimization and decision-making under uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 202, 904–915.
- IEA, UNEP. (2018). 2018 *Global Status Report: Towards a Zero-Emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*; International Energy Agency and the United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 671–680.
- Lophaven, N. S., Nielsen, H. B., & Sondergaard, J. (2002). *MATLAB Kriging Toolbox DACE* (Design and Analysis of Computer Experiments) Version 2.0.
- Martí, J. V., García-Segura, T., & Yepes, V. (2016). Structural design of precast-prestressed concrete U-beam road bridges based on embodied energy. *Journal of Cleaner Production*, 120, 231–240.
- Martínez Fernández, P., Villalba Sanchis, I., Insa Franco, R., & Yepes, V. (2022). Slab track optimisation using metamodels to improve rail construction sustainability. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148, 04022053.
- Martínez-Frutos, J., & Martí, P. (2014). Diseño óptimo robusto utilizando modelos Kriging: Aplicación al diseño óptimo robusto de estructuras articuladas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30, 97–105.
- Mathern, A., Penadés-Plà, V., Armesto Barros, J., & Yepes, V. (2022). Practical metamodel-assisted multi-objective design optimization for improved sustainability and buildability of wind turbine foundations. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 65, 46.
- Maureira, C., Pinto, H., Yepes, V., & García, J. (2021). Towards an AEC-AI industry optimization algorithmic knowledge mapping. *IEEE Access*, 9, 110842–110879.
- Medina, J.R. (2001). Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 127, 213–221.
- Miller, D.; Doh, J. H., Mulvey, M. (2015). Concrete slab comparison and embodied energy optimisation for alternate design and construction techniques. *Construction and Building Materials*, 80, 329–338.
- Payá-Zaforteza, I, Yepes, V., González-Vidosa, F., & Hospitaler, A. (2010). On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing. *Meccanica*, 45, 693–704.
- Penadés-Plà, V., García-Segura, T., & Yepes, V. (2019). Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete box-girder bridge design. *Engineering Structures*, 179, 556–565.
- Penadés-Plà, V., Yepes, V., & García-Segura, T. (2020). Robust decision-making design for sustainable pedestrian concrete bridges. *Engineering Structures*, 209, 109968.

- Quaglia, C. P., Yu, N., Thrall, A. P., & Paolucci, S. (2014). Balancing energy efficiency and structural performance through multi-objective shape optimization: case study of a rapidly deployable origami-inspired shelter. *Energy and Buildings*, 82, 733-745.
- SETRA (1989). *Ponts-dalles. Guide de conception*. Ministère de l'Équipement, du logement des Transports et de la Mer, Bagneux, France.
- Wang, E.; Shen, Z. (2013). A hybrid Data Quality Indicator and statistical method for improving uncertainty analysis in LCA of complex system - application to the whole-building embodied energy analysis. *Journal of Cleaner Production*, 43, 166-173.
- Wang, T.; Lee, I. S.; Kendall, A., Harvey, J., Lee, E. B., & Kim, C. (2012). Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance. *Journal of Cleaner Production*, 33, 86-96.
- Yeo, D., & Gabbai, R. D. (2011). Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization. *Energy and Buildings*, 43, 2028-2033.
- Yepes, V., Díaz, J., González-Vidosa, F., & Alcalá, J. (2009). Statistical characterization of prestressed concrete road bridge decks. *Revista de la Construcción*, 8, 95-109.
- Yepes, V., Villalba, P., Alcalá, J., & González-Vidosa, F. (2011). Energy consumption optimization design of prestressed concrete slab bridge decks. *Proceedings of 4th International Congress on Energy and Environment Engineering and Management*, Mérida (Spain), pp. 153.
- Yepes-Bellver, L., Brun-Izquierdo, A., Alcalá, J., & Yepes, V. (2022). CO₂-optimization of post-tensioned concrete slab-bridge decks using surrogate modeling, *Materials*, 15, 4776.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

