

(02-010) - Analysis of the pre-dimensioning of optimum prestressed lightened prestressed bridge decks and its incidence on the structural design

Yepes-Bellver, Lorena ¹; Martínez-Pagán, Pedro ²; Alcalá, Julián ³; Yepes, Víctor ¹

¹ Universitat Politècnica de València, ² Universidad Politécnica de Cartagena, ³ Universitat Politècnica de València

Structural design is usually based on the experience of the designer. Sometimes this experience is embodied in pre-dimensioning formulas that, although they offer good results, sometimes have inefficiencies when compared with current optimization techniques that take into account economic and environmental dimensions. This paper compares experience-based pre-sizing rules with optimization techniques. It is applied to the case of prestressed lightened slab bridge deck design. The result of the research highlights the importance of applying methods based on heuristic optimization and metamodeling to update the experience of designers and to propose new pre-dimensioning formulas more adjusted to economic and environmental optimization. In addition, the work provides pre-dimensioning nomograms, with the minimum amount of data possible, which may be useful to the designer in his preliminary designs.

Keywords: Optimization; metamodeling; metaheuristics; post-tensioned slab bridge; sustainability; carbon footprint

Análisis del predimensionamiento de tableros óptimos de puentes losa pretensados aligerados y su incidencia en el proyecto estructural

El proyecto estructural normalmente se basa en la experiencia del proyectista. En ocasiones, dicha experiencia se plasma en fórmulas de predimensionamiento que, si bien ofrecen buenos resultados, en ocasiones arrastran ineficiencias cuando se comparan con técnicas actuales de optimización que tenga en cuenta las dimensiones económicas y ambientales. En este artículo se comparan reglas de dimensionamiento previo de estructuras basadas en la experiencia con técnicas de optimización. Se aplica al caso del proyecto de tableros de puentes tipo losa pretensados aligerados. El resultado de la investigación resalta la importancia de aplicar métodos basados en la optimización heurística y en metamodelos para actualizar la experiencia de los proyectistas y proponer nuevas fórmulas de predimensionamiento más ajustadas a la optimización económica y ambiental. Además, en el trabajo se ofrecen nomogramas de predimensionamiento, con el mínimo número de datos posible, que pueden ser de utilidad al proyectista en sus diseños previos.

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

Correspondencia: Víctor Yepes. email: vyepesp@cst.upv.es

Agradecimientos: Los autores agradecen el apoyo recibido por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto de Investigación PID2020-117056RB-I00).



1. Introducción

En carreteras y líneas ferroviarias, resulta indispensable la construcción de pasos superiores, habitualmente puentes de hormigón pretensado. Esta infraestructura conlleva un costo significativo para los responsables de estas obras, representando entre el 5% y el 15% de los gastos totales de la comunicación terrestre (Yepes *et al.*, 2009). Por consiguiente, es crucial desarrollar proyectos que sean lo más rentables posible. Para lograr este objetivo, se requiere la aplicación de técnicas de optimización.

Los puentes losa, diseñados como vigas continuas hiperestáticas con hormigón pretensado, son comunes para luces de 10 a 45 m, compitiendo con vigas prefabricadas por su rigidez, durabilidad y ventajas constructivas (Aparicio y Estradera, 1985). Eliminan juntas de calzada, mejorando la comodidad y reduciendo la degradación del tablero, ofreciendo flexibilidad en el diseño y mejorando la estética. La adaptabilidad del encofrado a cualquier sección o curvatura realza su atractivo para quienes lo usan. Según Manterola (2006), el puente losa representa un equilibrio entre la construcción fácil y las condiciones resistentes, siendo una opción versátil y sólida en ingeniería estructural.

Los puentes losa construidos "in situ" son competitivos cuando el proceso permite reducir costos en el encofrado o cuando las condiciones del tablero son complejas, como curvaturas fuertes o anchos variables. También son beneficiosos en rasantes de baja altura, lo que requiere cantos reducidos. La cimbra convencional es viable para luces a partir de 20 m. Asimismo, el cimbrado convencional y el hormigonado continuo son prácticas habituales para puentes losa de hasta cuatro vanos, siempre que las pilas no excedan los 20 m de altura. Para luces mayores, se construyen por fases con cimbrado convencional. Sin embargo, para alturas considerables de las pilas, se usan cimbras autoportantes y autolanzables para independizar la construcción del terreno. En pasos superiores en carreteras, es común hormigonar secciones en losa "in situ" para luces de 30 a 60 m. A partir de luces de 25 m, se emplean secciones variables o acartelamientos.

La optimización heurística de estructuras puede ser costosa computacionalmente, impulsando el uso de metamodelos como el Kriging (Terrerros-Bedoya *et al.*, 2023). Este método reemplaza modelos de simulación y ofrece interpolación óptima mediante regresión de valores observados (Cressie, 1990). Aunque pocos estudios han aplicado Kriging en estructuras reales, Martínez-Frutos y Martí (2014) lo usaron para el diseño óptimo robusto de estructuras articuladas, separando la evaluación de la incertidumbre de la optimización. Recientemente, se ha aplicado en la optimización de aerogeneradores (Mathern *et al.*, 2022), vías de placa de ferrocarril (Martínez Fernández *et al.*, 2022), o en la interacción suelo-estructura en edificación (Negrín, Kripka & Yepes, 2023).

García-Segura, Penadés-Plà y Yepes (2018) emplearon 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). Además, Penadés-Plà, Yepes y García-Segura (2020) aplicaron este modelo para optimizar una pasarela de sección en cajón pretensada. Recientemente, Kriging se ha utilizado para estudiar el coste (Yepes-Bellver, 2018), las emisiones de CO₂ y energía (Yepes-Bellver *et al.*, 2022; 2023) en puentes losa aligerados.

Este artículo analiza el predimensionamiento de los tableros de puentes losa pretensados aligerados comparando las recomendaciones habituales con la realidad del proyecto y los resultados de la optimización mediante metamodelos con tres funciones objetivo: coste, emisiones de CO₂ y energía. Como resultado, se corrigen dichas recomendaciones para mejorar la efectividad del proyecto de este tipo de estructuras.

2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es analizar las recomendaciones de predimensionamiento de puentes losa pretensados aligerados y compararlas con los resultados de la optimización basada en metamodelos tipo Kriging para reducir costes, emisiones de CO₂ y consumo energético en la construcción de tableros de puente tipo losa aligerados pretensados. Asimismo, se revisan las recomendaciones habitualmente seguidas por los proyectistas a la vista de los puentes optimizados. Por otra parte, se aportan nomogramas que, con el mínimo número de datos, permitan realizar un diseño previo.

3. Predimensionamiento del tablero de puente losa aligerado

Es común emplear una losa continua hiperestática de hormigón pretensado en puentes con luces de 10 a 45 m. Esta opción compite con las vigas prefabricadas debido a sus ventajas estructurales (mayor rigidez a torsión y flexión, mayor durabilidad y seguridad gracias al hiperestatismo) y constructivas. Se adapta fácilmente a terrenos complejos, simplificando el encofrado y el hormigonado. Además, elimina las juntas de manera efectiva y brinda mayor flexibilidad en la disposición de los apoyos, lo que contribuye a una estética mejorada en la estructura del puente.

Sin embargo, el proyectista debe encajar un diseño geométrico inicial que luego le sirva como base para los cálculos. Por lo general, la experiencia en este tipo de estructuras simplifica esta tarea. No obstante, si el resultado no es satisfactorio, se inicia un proceso de prueba y error con varios diseños hasta alcanzar un resultado satisfactorio. Desgraciadamente, este proceso suele ser lento y poco eficiente. Para agilizar el trabajo, los proyectistas suelen recurrir a reglas de predimensionamiento habituales que contrastan con su experiencia. Pero este enfoque supone cierta rigidez en la búsqueda de una solución óptima. Es por esta razón que es necesario revisar este tipo de reglas de diseño previo.

Según la Dirección General de Carreteras (DGC, 2000), en secciones con voladizos, la relación núcleo/ancho total no debe ser menor a 0,35, y los voladizos no deben exceder los 3,50 m en dimensión transversal. El aligeramiento, eficaz para cantos mayores a 0,90-1,20 m, economiza material. Para cantos menores a 0,90 m, la sección maciza es más económica. Por encima de 1,20 m, el aligeramiento es ventajoso, pero en situaciones intermedias, se recomienda un estudio detallado antes de su aplicación.

Para el proyectista es importante tener conocimiento de las cuantías necesarias de materiales. Esto no solo ayuda a estimar el costo del puente, sino que también permite verificar que el diseño se ajusta a cifras esperadas y razonables. En este sentido, lo habitual para estos puentes pretensados es una cuantía de 0,55 a 0,70 m³ de hormigón por cada m² de losa, de 10 a 100 kg de armadura pasiva y de 10 a 25 kg de armadura activa por cada m³ de hormigón, respectivamente (DGC, 2000).

La esbeltez, definida como la relación entre el canto y la luz, es un parámetro crucial en el diseño de puentes losa. En losas pretensadas de canto constante, es común una esbeltez de 1/25. La DGC (2000) ofrece valores más detallados según el tipo de sección, como se muestra en la Tabla 1. SETRA (1989) sugiere esbelteces de 1/22 a 1/25 para losas de un vano y 1/28 para losas rectangulares de dos vanos, o 1/25 con amplios voladizos. Para tres vanos, son de 1/33 y 1/28.

Yepes *et al.* (2009) analizaron 61 losas aligeradas de canto constante en puentes construidos, como se detalla en la Tabla 2. No se hallaron luces menores a 18,00 m, ni superiores a los 45,00 m, lo que delimita los rangos de diseño práctico en estas estructuras. Estos resultados reflejan el apego de los puentes losa ejecutados a las recomendaciones de la Dirección General de Carreteras. En la Figura 1 se representa lo que significa el aligeramiento interior y exterior en la Tabla 2.

Figura 1: Aligeramiento interior y exterior en losa pretensada

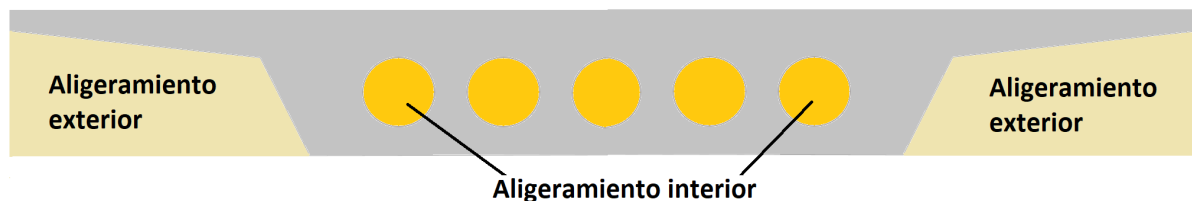


Tabla 1: Canto/luz habituales para tableros aligerados de hormigón pretensado (DGC, 2000)

Tipo de estructura	Posición	Canto/luz
Canto constante		1/22 – 1/30
Canto variable	Centro	1/35 – 1/45
	Apoyos	1/18 – 1/22
Canto acartelado	Centro	1/35 – 1/45
	Apoyos	1/18 – 1/22

Tabla 2: Estadística de una muestra de 61 puentes de losa aligerada (Yepes *et al.*, 2009)

Losas aligeradas	media	C.V.	min	máx	P.25	P.50	P.75
Longitud total (m)	91,87	60,7 %	22,18	300,20	60,50	72,00	92,40
Número de vanos	3,79	47,0 %	1	12	3	3	4
Anchura tablero (m)	11,42	24,5 %	7,60	23,00	9,90	11,00	12,45
Luz principal (m)	29,97	20,6 %	18,00	45,00	25,00	31,00	35,48
Canto tablero (m)	1,25	14,2 %	0,85	1,75	1,13	1,25	1,32
Luz / canto	23,93	12,0 %	18,46	30,40	21,74	23,33	26,39
Apoyos pila	1,70	36,2 %	0	4	1	2	2
Apoyos estribo	1,20	26,0 %	2	4	2	2	2
Hormigón (m ³ /m ²)	0,65	17,3 %	0,44	0,97	0,56	0,66	0,71
Armadura activa (kg/m ²)	22,64	28,9 %	11,17	38,16	17,99	21,99	26,85
Armadura pasiva (kg/m ³)	102,50	23,0 %	66,81	187,08	85,92	100,87	109,87
Armadura pasiva (kg/m ²)	64,92	14,9 %	42,80	92,91	57,76	65,27	69,91
Aligeramiento exterior (m ³ /m ²)	0,40	30,8 %	0,12	0,74	0,31	0,39	0,47
Aligeramiento interior (m ³ /m ²)	0,20	24,2 %	0,11	0,33	0,16	0,20	0,24
Encofrado (m ² /m ²)	1,12	3,9 %	1,01	1,23	1,09	1,12	1,15

En las Tablas 3, 4 y 5 se recogen los modelos de regresión múltiple que permiten determinar, respectivamente, la cuantía de armadura activa, el canto del tablero y la cuantía de hormigón (Yepes *et al.*, 2009). La bondad del ajuste se evalúa mediante el coeficiente de determinación R^2 , que se interpreta como la proporción de variación de la variable de respuesta explicada mediante el modelo de regresión.

Para facilitar el predimensionamiento de estas losas aligeradas, se han elaborado tres nomogramas originales que se reproducen en las Figuras 2, 3 y 4. La metodología para elaborar estos nomogramas puede verse en trabajos como el de Martínez-Pagán & Roschier (2022) o Martínez-Pagán *et al.* (2023). Como puede comprobarse, basta conocer la luz principal del puente, así como los aligeramientos interiores y exteriores, para determinar la cuantía de armadura activa, canto del tablero y cuantía del hormigón necesario. En los nomogramas se ha representado la secuencia de cálculo para un puente cuya luz principal sea de 34 m y valores medios para la cuantía de aligeramiento exterior ($0,40 \text{ m}^3/\text{m}^2$) y para el aligeramiento interior ($0,20 \text{ m}^3/\text{m}^2$).

Tabla 3: Modelo de regresión lineal para la cuantía de armadura activa (kg/m^2). Límites superior e inferior de confianza de los coeficientes del 95 %. (Yepes *et al.*, 2009)

Modelo	R^2	Coefficientes	Error típico	Límite inferior	Límite superior
Constante	0,723	2,151	2,510	-2,875	7,177
Luz principal (m)		1,169	0,109	0,950	1,387
Aligeramiento exterior (m^3/m^2)		-16,520	4,249	-25,029	-8,012
Aligeramiento interior (m^3/m^2)		-40,047	12,907	-64,893	-14,201

Tabla 4: Modelo de regresión lineal para el canto del tablero (m). Límites superior e inferior de confianza de los coeficientes del 95 %. (Yepes *et al.*, 2009)

Modelo	R^2	Coefficientes	Error típico	Límite inferior	Límite superior
Constante	0,823	0,383	0,054	0,274	0,491
Luz principal (m)		0,013	0,002	0,008	0,018
Aligeramiento exterior (m^3/m^2)		0,575	0,092	0,391	0,759
Aligeramiento interior (m^3/m^2)		1,256	0,279	0,698	1,814

Tabla 5: Modelo de regresión lineal para la cuantía de hormigón (m^3/m^2). Límites superior e inferior de confianza de los coeficientes del 95 %. (Yepes *et al.*, 2009)

Modelo	R^2	Coefficientes	Error típico	Límite inferior	Límite superior
Constante	0,925	0,041	0,029	-0,017	0,100
Luz principal (m)		0,742	0,028	0,685	0,798
Aligeramiento exterior (m^3/m^2)		-0,795	0,041	-0,877	-0,714

Figura 2: Nomograma para estimar la armadura activa (kg/m²)

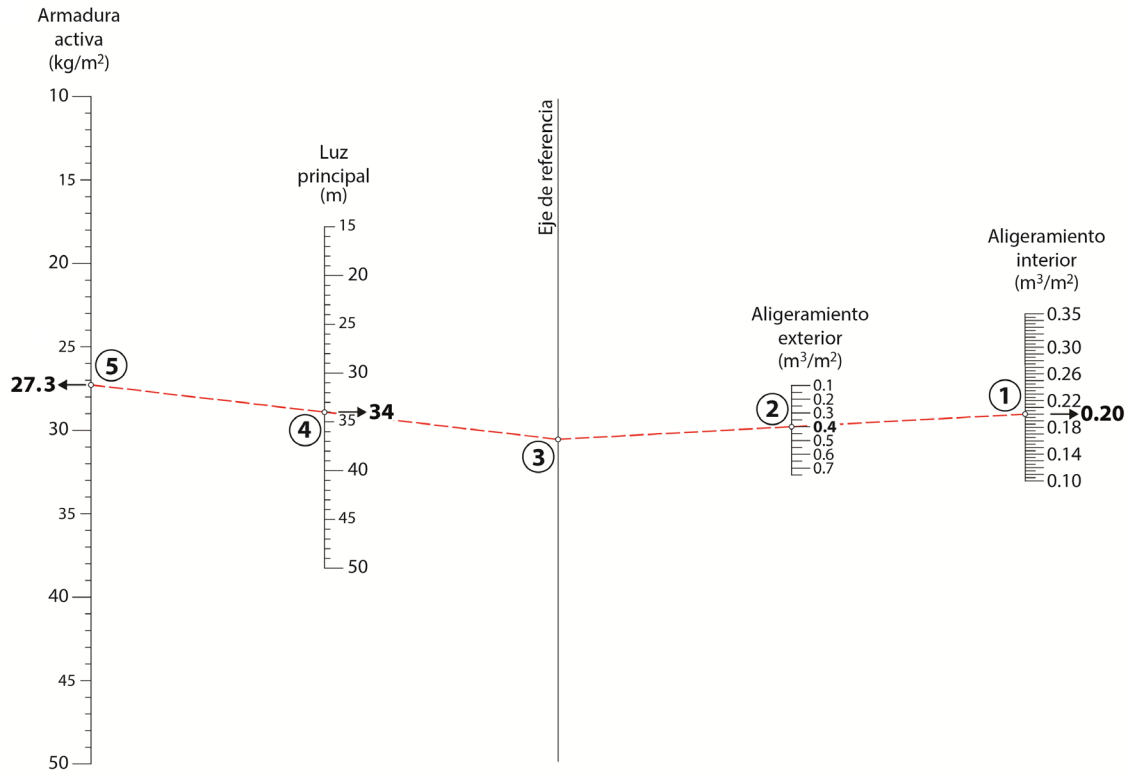


Figura 3: Nomograma para estimar el canto del tablero (m)

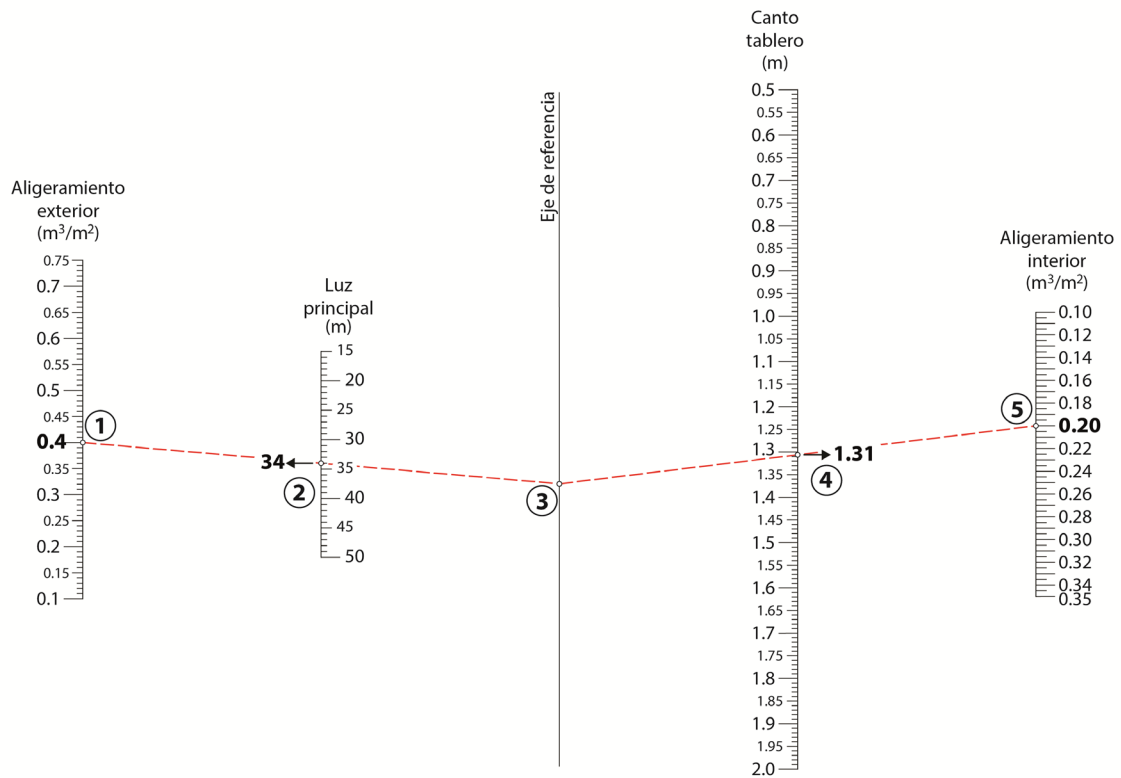
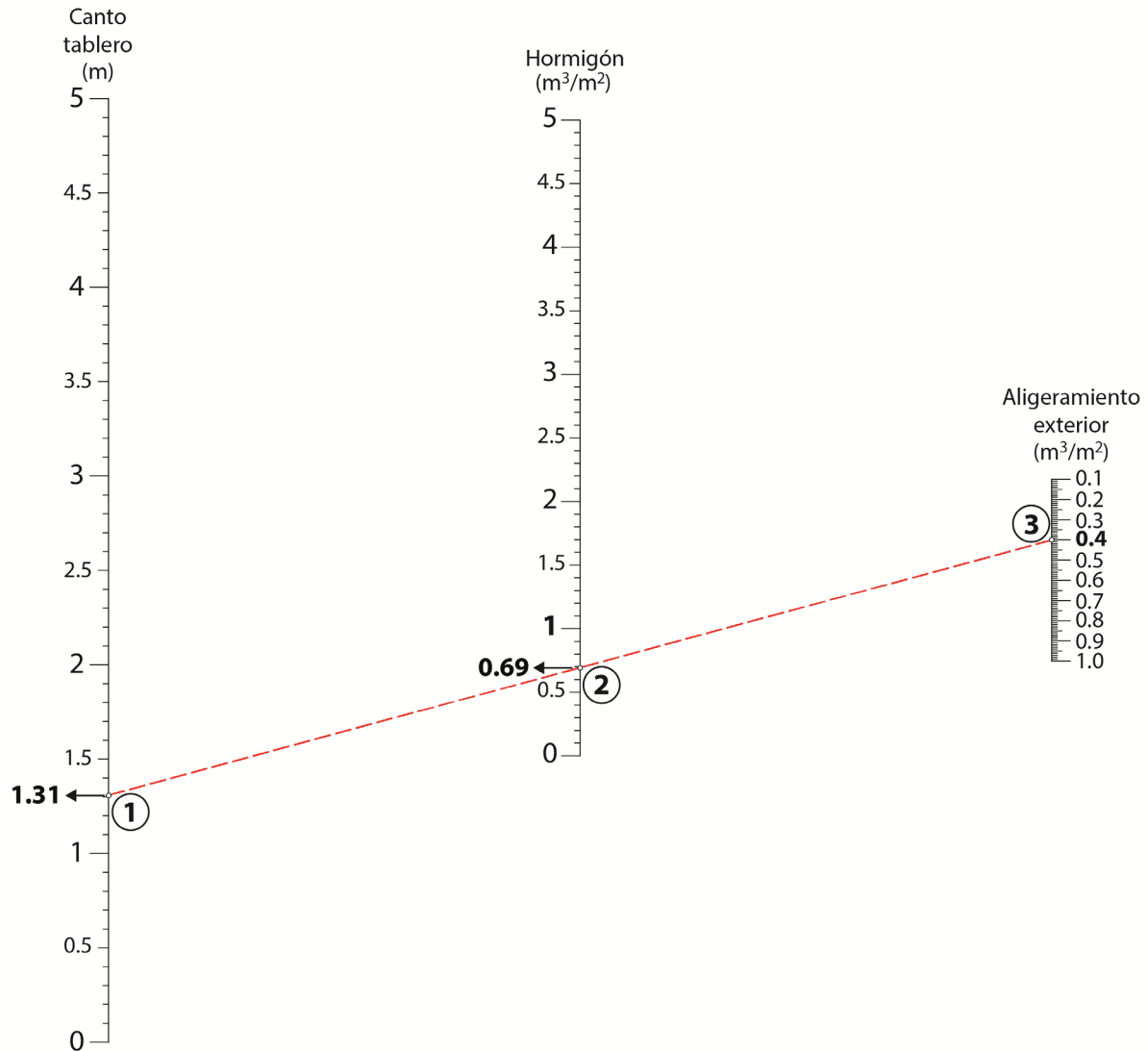


Figura 4: Nomograma para estimar la cuantía de hormigón (m^3/m^2)



3. Descripción del tablero de puente losa aligerado

El objetivo de este trabajo es analizar 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 5). 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 6).

Este es un puente real que se corresponde con un paso superior en el kilómetro 441 de la autovía A-7, en el término municipal de Cocentaina (Alicante). Este puente se diseñó con un canto de 1,35 m, con una base inferior de 4,00 m, un vuelo de 1,75 m, siendo $a = 0,20$ m, $b = 0,10$ m y $d = 0,40$ m. Los aligeramientos interiores fueron cuatro secciones circulares de diámetro 0,60 m. Estas dimensiones suponen un aligeramiento interior de $0,14 m^3/m^2$ y exterior de $0,51 m^3/m^2$. La optimización económica de este puente fue estudiada en el trabajo de Yepes-Bellver (2018).

Figura 5: Alzado del puente losa pretensado aligerado

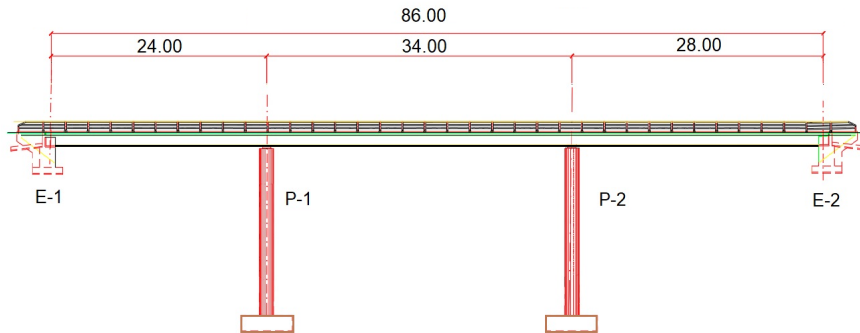
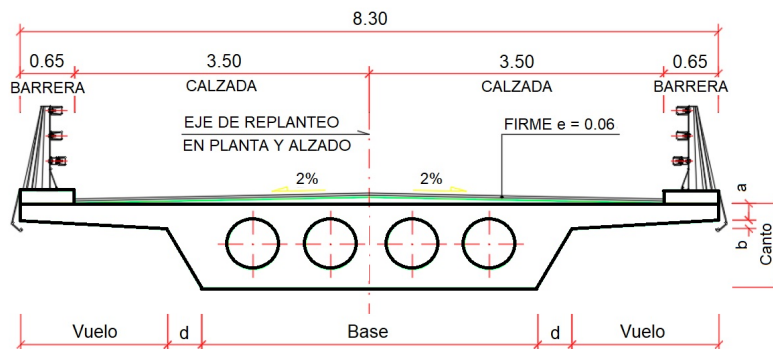


Figura 6: Sección transversal tipo del tablero de puente losa pretensado aligerado



4. Metodología

La metodología utilizada en la optimización es una optimización bifase de la superficie de respuesta generada por un metamodelo Kriging (Yepes-Bellver, 2018; Yepes-Bellver *et al.*, 2022; 2023). 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. Este muestreo genera diseños que se utilizan como entrada en el modelo de optimización.

Cada tablero presenta un coste, emite CO₂ y consume energía en su construcción. 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. En la Tabla 1 se recogen los distintos costes correspondientes a las funciones objetivo de coste, emisiones y consumo energético (Yepes-Bellver, 2018; Yepes-Bellver *et al.*, 2022; 2023).

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.

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.

Tabla 6: Coste económico, de emisiones y energético de los materiales

Material	Coste	CO ₂	Energía	CO ₂ /Coste	Energía/Coste
Hormigón HP-30	99,81 €/m ³	227,01 CO ₂ /m ³	596,91 kWh/m ³	2,27	5,98
Hormigón HP-35	104,57 €/m ³	263,96 CO ₂ /m ³	612,22 kWh/m ³	2,52	5,85
Hormigón HP-40	109,33 €/m ³	298,57 CO ₂ /m ³	646,61 kWh/m ³	2,73	5,91
Hormigón HP-45	114,10 €/m ³	330,25 CO ₂ /m ³	681,00 kWh/m ³	2,89	5,97
Hormigón HP-50	118,87 €/m ³	358,97 CO ₂ /m ³	715,39 kWh/m ³	3,02	6,01
Acero (B 500S)	1,16 €/kg	3,03 CO ₂ /kg	10,44 kWh/kg	2,61	9,00
Acero Y1860-S7	3,40 €/kg	5,64 CO ₂ /kg	12,99 kWh/kg	1,66	3,82
Encofrado	33,81€/m ²	2,24 CO ₂ /m ²	8,70 kWh/m ²	0,07	0,26
Aligeramiento	99,81 €/m ³	604,42 CO ₂ /m ³	1137,50 kWh/m ³	6,06	11,40

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 geoméricamente 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).

5. 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 6). Las restantes dimensiones, así como los aligeramientos, se determinan según las relaciones descritas en la Tabla 7. 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 7: 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

En la Tabla 8 se recogen los resultados más importantes de los puentes losa analizados. En las cuatro primeras columnas se recoge el valor medio y los cuartiles (percentiles del 25 %, 50 % y 75 %) de los 61 puentes analizados en el trabajo de Yepes *et al.* (2009). La comparación entre el valor medio y los percentiles permite comprobar hasta qué punto hay asimetría en la distribución de los valores. Por otra parte, valores por encima o por debajo del primer y tercer cuartil, informan de los valores menos empleados por los proyectistas.

La cuarta de las columnas informa sobre los resultados resultantes del modelo lineal multivariante utilizado (Tablas 3, 4 y 5). En este artículo se aportan tres nomogramas originales (Figuras 2, 3 y 4) que permiten obtener rápidamente los resultados. Conociendo la luz central del puente (en este caso, 34 m) y la magnitud de los aligeramientos, podemos predecir directamente el canto y las cuantías de armadura activa y hormigón. Según la Tabla 2, se han empleado valores medios para la cuantía de aligeramiento exterior (0,40 m³/m²) y para el aligeramiento interior (0,20 m³/m²). Se considera un valor medio también para la cuantía de armadura pasiva.

Se puede comprobar que los valores medios de la Tabla 8 corresponden a un rango amplio de puentes, con luces principales que varían entre los 18 y los 45 m. Pero si se emplea la luz correspondiente al caso estudiado, los resultados son más precisos y difieren de los valores medios. Los nomogramas originales aportados pueden resultar de interés para facilitar el cálculo de los resultados, pues se han elaborado con los modelos lineales multivariantes (Yepes *et al.*, 2009).

Las últimas tres columnas corresponden a los puentes optimizados con las funciones objetivo de coste económico, emisiones de CO₂ y consumo energético necesario para construir la losa aligerada pretensada. Estos valores se han obtenido de los trabajos previos de Yepes-Bellver (2018) y de Yepes-Bellver *et al.* (2022, 2023). Como puede verse, los resultados de los puentes óptimos difieren sensiblemente de los resultados medios y los correspondientes a la predicción del modelo lineal multivariante, que no dejan de ser un reflejo de la realidad de los 61 puentes reales construidos. Pero, además, también difieren de las reglas de predimensionamiento habitualmente aceptadas. Es por ello que se debe realizar una discusión de estos resultados.

Tabla 8: Valores del puente medio, cuartiles, predicción y puentes optimizados

	Medio	P.25	P.50	P.75	Predicción	Coste	CO ₂	Energía
Canto (m)	1,25	1,13	1,25	1,32	1,31	1,30	1,10	1,15
Luz/canto	23,93	21,74	23,33	26,39	25,95	26,15	30,91	29,57
Hormigón (m ³ /m ²)	0,65	0,56	0,66	0,71	0,69	0,61	0,56	0,60
Armadura activa (kg/m ²)	22,64	17,99	21,99	26,85	27,28	14,76	16,48	16,48
Armadura pasiva (kg/m ²)	64,92	57,76	65,27	69,91	69,92	73,53	77,00	67,32
Armadura pasiva (kg/m ³)	102,50	85,92	100,87	109,87	102,50	120,54	136,85	112,32

6. Discusión de resultados

Los resultados de la Tabla 8 permiten distinguir ciertas discrepancias entre los valores de los puentes realmente construidos (muestra de 61 individuos), la predicción realizada por el modelo multivariante para el caso de una luz principal de 34 m, y los resultados obtenidos en la optimización de la superficie de respuesta de un metamodelo tipo Kriging cuando las funciones objetivo son el coste, las emisiones de CO₂ y la energía consumida en la construcción de puentes losa aligerados pretensados. A continuación, se discuten estas diferencias.

El canto del puente optimizado para el coste es prácticamente el mismo que la predicción realizada para esta luz. Sin embargo, cuando se trata de optimizar las emisiones o la energía, los cantos son menores. La interpretación es que existe una penalización a la cantidad de hormigón empleado. El puente real que ha servido de modelo presenta un canto de 1,35 m, en línea con la predicción, pero superior a los puentes sostenibles.

Para los puentes losa pretensados con voladizos, la recomendación para la relación entre el canto y la luz, indica lo siguiente: la Dirección General de Carreteras (DGC, 2000) establece un rango para la esbeltez de 1/22 a 1/30, el SETRA (1989), de 1/28 y Manterola (2006) de 1/25. De hecho, el puente realmente construido presenta una esbeltez dentro de las recomendaciones, de 1/25,19. No obstante, el puente económico es menos esbelto que los optimizados para emisiones y energía. Por tanto, la recomendación sería subir dicha relación por encima de 1/26 para garantizar la economía, y llegar a 1/30 en el caso de priorizar la sostenibilidad. Por otra parte, la predicción muestra una esbeltez más cerca de los puentes óptimos que la media o la mediana. Esta pauta de aumentar la esbeltez es poco común en los proyectistas actuales, que la emplean en menos del 25 % de las ocasiones.

La cuantía de hormigón de los puentes optimizados es claramente inferior a la predicción y a los valores medios reales. La DGC (2000) establece una recomendación entre 0,55 y 0,70 m³ por cada m² de tablero. Los puentes económicos y de poco consumo energético deberían ir a una cuantía máxima de 0,60 m³/m², y en el caso de reducir las emisiones, acercarse al límite inferior de la DGC. Al comparar estas cantidades con los datos proporcionados por Yepes *et al.* (2009), se observa que se encuentran por debajo de la mediana de la muestra.

La cuantía de armadura activa recomendada por la DGC (2000) es de 10 a 25 kg/m². Los puentes optimizados utilizan menos cuantía de armadura activa que la resultante de la predicción. La recomendación sería unos 15 kg/m² en este caso, que entra dentro del rango de la DGC. La predicción sobrevalora la armadura activa necesaria. Además, se puede observar que los valores óptimos se encuentran por debajo del percentil del 25 %, lo cual supone que los proyectistas no son proclives a reducir la cuantía del pretensado. Los valores de las estructuras óptimas están por debajo del percentil 25% del trabajo de Yepes *et al.* (2009), lo que sugiere que la optimización de puentes losa tiende a reducir la cantidad de pretensado y hormigón a cambio de aumentar la cantidad de armadura pasiva.

La cantidad de acero pasivo recomendada por la DGC (2000) es de 70 a 100 kg/m². Claramente, la recomendación es acercarse, por arriba, al extremo inferior, de 70 kg/m². Si se trata de bajar el consumo energético, podríamos bajar algunos kilos más, en cambio, para reducir las emisiones, deberíamos subir dicha cifra. Sin embargo, vemos que los proyectistas no son proclives a exceder de 70 kg/m², que sería el percentil del 75 %.

Si se evalúa esta cuantía de armadura pasiva en función del volumen de hormigón, los valores suben claramente respecto a los valores medios o a la predicción. Se recomiendan cuantías entre 120 y 135 kg/m³ en el caso de puentes económicos o de baja emisión, mientras que el consumo energético nos llevaría cuantías algo menores, no obstante, representan incrementos significativos respecto a las recomendaciones habituales. Aquí

queda más clara la animadversión a usar más cuantía de armadura pasiva, pues el percentil del 75 % apenas llega a 110 kg/m³.

La resistencia característica del hormigón también es un factor a tener en cuenta. Si nos fijamos en la Tabla 8, un aumento de la resistencia supone un incremento claro de las emisiones, sin embargo, esto no ocurre con la energía, donde prácticamente es constante. Eso significa que la optimización de coste o de emisiones tenderá a hormigones de resistencia algo menor, de 35 MPa. En cambio, la reducción de energía lleva a un hormigón de 40 MPa. La recomendación es el uso de un hormigón de 35 MPa de resistencia característica.

7. Conclusiones

A partir de la discusión de los resultados, se han obtenido las siguientes conclusiones: El diseño de tableros losa óptimos desde el punto de vista del coste, de las emisiones y del 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, reduce costes, emisiones y energía. 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 comprueba que se deben afinar los criterios de predimensionamiento habituales para este tipo de estructuras. Para ello se incluyen las siguientes recomendaciones prácticas. En primer lugar, se debería subir la relación canto/luz por encima de 1/26, llegando a 1/30 en el caso de priorizar la sostenibilidad. Se recomienda una cuantía máxima de hormigón de 0,60 m³/m² de tablero para conseguir puentes económicos y de poco consumo energético, bajando a 0,55 m³/m² en el caso de priorizar la reducción de emisiones. La cuantía de armadura pasiva recomendada debe aumentarse respecto a los criterios habituales, subiendo, al menos, a unos 125 kg por cada m³ de hormigón. La cuantía de armadura activa debe ser inferior a 17 kg/m² de tablero. La resistencia característica del hormigón debe estar entre los 35 y los 40 MPa, los aligeramientos interiores deben rondar los 0,20 m³/m² de tablero y los exteriores deben estar en torno a 0,50 m³/m² de tablero. Ello supone grandes voladizos para reducir, en la medida de lo posible, las cuantías de material usado.

En futuras investigaciones, esta línea será ampliada para incluir la aplicación de otros metamodelos, como las funciones de base radial, para comparar su eficacia. Asimismo, se planea extender esta metodología a diversas estructuras utilizadas en ingeniería civil y edificación, tales como muros, marcos de carretera y diferentes tipos de puentes.

8. Referencias

- Aparicio, A.C., & Estradera, J.M. (1985). Aplicación del método de elementos finitos al estudio de la distorsión de tableros de puente de sección losa aligerada. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 1, 3–26.
- 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.
- 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.

- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220, 671-680.
- Manterola, J. (2006). *Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Colección Escuelas, Madrid.
- 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.
- Martínez-Pagán, P., & Roschier, L. (2022). Nomography: A renewed pedagogical tool to sciences and engineering high-education studies. *Heliyon*, 8 (6), e09731.
- Martínez-Pagán, P., Yepes, V., Roschier, L., Boulet, D., & Blight, T. (2023). Introducción de los códigos abiertos Pynomo y Nomogen para la elaboración de nomogramas en el ámbito de la ingeniería civil y minería. *Ingeopres*, 302, 54-58.
- 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.
- Navarro, I., Villalba, I., Yepes-Bellver, L., & Alcalá, J. (2024). Social life cycle assessment of railway track substructure alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 450, 142008.
- Negrín, I., Kripka, M., & Yepes, V. (2023). Metamodel-assisted meta-heuristic design optimization of reinforced concrete frame structures considering soil-structure interaction. *Engineering Structures*, 293, 116657.
- 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.
- SETRA (1989). *Ponts-dalles. Guide de conception*. Ministère de l'Équipement, du logement des Transports et de la Mer, Bagneux, France.
- Terreros-Bedoya, A., Negrín, I., Payá-Zaforteza, I., & Yepes, V. (2023). Hybrid steel girders: review, advantages and new horizons in research and applications. *Journal of Constructional Steel Research*, 207, 107976.
- 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-Bellver, L. (2018). Estudio del diseño óptimo para el tablero del viaducto situado en el Km 441 de la A-7 en el T.M. de Cocentaina (Alicante). Optimización mediante modelo Kriging. Trabajo Final de Máster, E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València.
- 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.
- Yepes-Bellver, L., Brun-Izquierdo, A., Alcalá, J., & Yepes, V. (2023). Embodied energy optimization of prestressed concrete road flyovers by a two-phase Kriging surrogate model. *Materials*, 16, 6767.

**Comunicación alineada con los Objetivos de
Desarrollo Sostenible**

