

## An evolutionary algorithm approach to designing of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement

Martí, José V.<sup>1</sup>; Yepes, Víctor<sup>2</sup>

### ABSTRACT

This paper describes a methodology to optimize CO<sub>2</sub> emissions and the influence of steel fiber-reinforcement when designing precast-prestressed concrete road bridges with a double U-shape cross-section. A hybrid evolutionary algorithm (EA) combining a genetic algorithm (GA) with variable-depth neighborhood search (VDNS) is applied to two objective functions: the embedded CO<sub>2</sub> emissions and the economic cost of these structures. A span length of 30m and a deck width of 12m were considered. The problem involved 41 discrete design variables. The module computed the objective functions of a solution and checked all the relevant limit states. The application of the algorithm requires the initial calibration. Each heuristic is run nine times so as to obtain statistical information about the minimum, average and deviation of the results. Finally, solutions and run times indicate that heuristic optimization is a forthcoming option for the design of real-life prestressed structures.

*Keywords: Optimization; sustainable design; precast beam; prestressed concrete bridge; steel fiber; structural design.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El diseño tradicional de las estructuras de hormigón se concentra principalmente en la reducción del coste económico. Sin embargo, y debido a una creciente preocupación ambiental, en los últimos años se ha dado cada vez más importancia a la reducción de las emisiones de dióxido de carbono. Distintas organizaciones [1,2] han recopilado datos relacionados con el impacto medioambiental de la fabricación de la mayor parte de los materiales de construcción, lo que ha facilitado enormemente el cálculo del impacto de las emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes al ejecutar una estructura. El hecho que la industria de cemento produzca en torno al 5 % de las emisiones de gas invernadero, justifica ya de por sí obtener diseños óptimos de estructuras de hormigón [3]. Por lo tanto, parece importante incorporar criterios de diseño que permitan reducir al mínimo las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas en la construcción de estructuras de hormigón armado (HA) y pretensado (HP). Así, Paya-Zaforteza et al. [4] y Yepes et al. [5] han realizado estudios que comparan diseños óptimos basados en la eficiencia de emisión-CO<sub>2</sub> y el coste en estructuras como marcos de carreteras y muros.

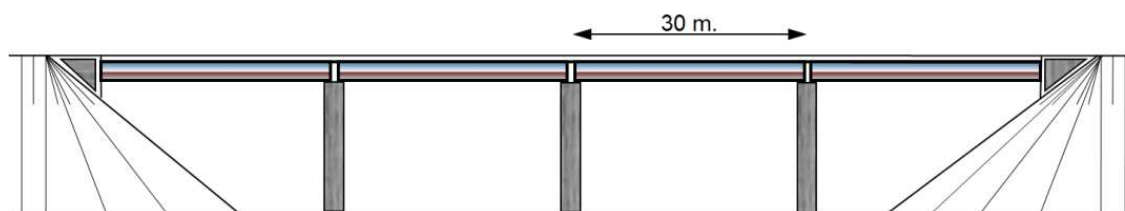
El desarrollo reciente de las técnicas de optimización está ligado a la evolución de la inteligencia artificial que proporciona buenas soluciones en un tiempo computacional razonable. Cohn y Dinovitzer [6] realizaron una revisión exhaustiva de los métodos de optimización de estructuras,

<sup>1</sup> Universitat Politècnica de València, ICITECH. (SPAIN). [jvmartia@upv.es](mailto:jvmartia@upv.es) (Corresponding author)

<sup>2</sup> Universitat Politècnica de València, ICITECH. (SPAIN). [vyepesp@upv.es](mailto:vyepesp@upv.es)

indicando el distanciamiento existente entre los estudios teóricos y la aplicación práctica de los métodos de la optimización, y confirmando que la mayoría de la investigación realizada hasta ese momento estaba centrada en las estructuras de acero mientras que solamente una fracción pequeña se había ocupado de las estructuras de HA. Siguiendo esta línea del trabajo, el grupo de investigación al que pertenecen los autores ha aplicado metaheurísticas a distintas tipologías estructurales [7-14]. La optimización de los puentes prefabricados (Fig.1), estructuras grandes y repetitivas, presenta gran interés en este ámbito de la optimización debido al gran volumen de materiales utilizados en su proceso de fabricación.

La investigación en hormigones no convencionales constituye hoy día una de las líneas de investigación más importantes dentro del mundo de los nuevos materiales de construcción. Sus propiedades permiten mejorar las prestaciones del hormigón, como la durabilidad y la resistencia. Los hormigones reforzados con fibras de acero (HRFA), tal como se entienden hoy, empezaron a emplearse en la década de 1960 [15]. Mecánicamente, las fibras de acero soportan esfuerzos a tracción que transmiten por adherencia al hormigón, controlan la fisuración y reducen la intensidad de la misma a la vez que mejoran la tenacidad. A pesar del potencial de las fibras en el hormigón, su aplicación actual es escasa por varias razones: coste elevado de las fibras de acero y conocimiento incompleto del comportamiento de estos hormigones [16]. El hormigón autocompactante (HAC) ha mejorado significativamente la tecnología del hormigón en la última década. Ello se consigue con cambios en la dosificación que provocan que las propiedades mecánicas cambien respecto al hormigón convencional, por ejemplo en lo concerniente al comportamiento adherente [17]. Un reciente trabajo de Vilanova et al. [18] evalúa la estimación de las propiedades del HAC según distintas normas. Sin embargo, a veces es imposible estudiar por separado estos hormigones con los de altas prestaciones, puesto que a modo de ejemplo un HRFA suele ser HAC. Todo ello abre horizontes inexplorados, donde una simple optimización económica de las estructuras haría inviable el empleo de muchos hormigones especiales, pero donde una visión más amplia que contemple criterios de sostenibilidad y de análisis del ciclo de vida, puede cambiar la perspectiva en cuanto a su empleo.



**Figura 1.** Perfil longitudinal del puente.

Este artículo describe una metodología para el diseño de los puentes prefabricados de carreteras de vigas artesa de HRFA y HAC, con la sección representativa de la doble U que integra una losa de hormigón armado en la parte superior para el tráfico de vehículos (Fig. 2). El diseño de esta

estructura queda definida en la tesis doctoral de Martí, J.V. [19], con las variaciones: a) la separación entre vigas  $S_v$  (Fig.2) se convierte en una variable y b) los refuerzos de la armadura transversal se unifican cada dos secciones consecutivas del modelo, reduciendo el número de variables a un total de 41. La metodología consiste en desarrollar un módulo de evaluación computacional a partir de las dimensiones de la sección transversal, los materiales y el refuerzo de acero. Este módulo evalúa el peso de las emisiones de CO<sub>2</sub> de una solución y comprueba todos los estados límite y de servicio relevantes [20]. El procedimiento utilizado para resolver el problema es un algoritmo memético (MA) [21], que combina un algoritmo genético (GA) en cada generación para una población dada de soluciones y un algoritmo de búsqueda local (VDNS) para cada una de estas soluciones en cada nueva generación (GA-VDNS). El algoritmo se aplica a una función objetivo: las emisiones generadas de CO<sub>2</sub> de estas estructuras en diversas etapas de la producción de materiales, de la fabricación, del transporte y de la construcción, y simultáneamente obtiene el coste económico de la solución.

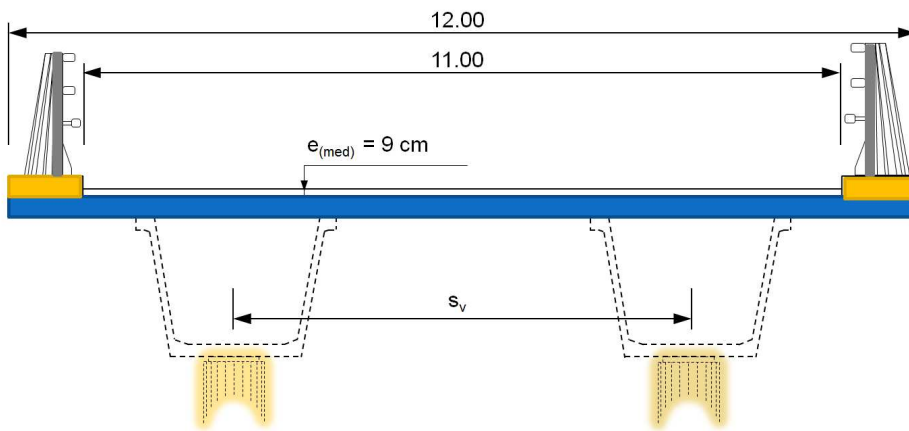


Figura 2. Sección transversal del puente.

## 2. EL PROBLEMA DEL DISEÑO ÓPTIMO

En este estudio, el problema de la optimización estructural se enmarca en una optimización mono-objetivo del CO<sub>2</sub> emitido. Esta optimización apunta a reducir al mínimo la función objetivo  $f_1$  o ecuación (1) y a calcular  $f_2$  o ecuación (2) mientras que satisface las restricciones de la ecuación (3).

$$CO_2 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

$$C = f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2)$$

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (3)$$

Obsérvese que  $x_1, x_2, \dots, x_n$  son variables de diseño discretas elegidas para la formulación. El análisis incluye 41 variables del diseño. Las variables contemplan ocho valores geométricos (Fig. 3): la profundidad de la viga ( $h_1$ ), la anchura del ala inferior de la viga ( $b_1$ ) y del canto del ala inferior ( $e_1$ ), la anchura y el canto de las alas superiores de la viga ( $b_3$  y  $e_3$ ), el ancho de las almas ( $e_2$ ), el canto de la losa ( $e_4$ ) y el espaciamiento entre las vigas ( $s_v$ ). Con respecto a la resistencia del material, dos variables definen el tipo de hormigón de la losa y de la viga, y una tercera variable define la resistencia a tracción del HRFA. El pretensado formado por torones de 0.6" se define por cuatro variables: primera, el número de torones en las alas superiores, segunda, el número de torones en la primera, segunda y tercera capa del ala inferior, tercera, el número de secciones desde el exterior hacia el interior en que se modeliza la viga con fundas que envuelven los torones en la segunda capa

y cuarta, el número de secciones con fundas en la tercera capa. Finalmente, 26 variables definen los diámetros de las barras, el espaciamiento y las longitudes de los refuerzos de barras siguiendo una disposición estándar para la viga y la losa superior. Los parámetros son todos los valores fijados en el problema planteado. La Tabla 1 proporciona los detalles de los 21 parámetros principales analizados.

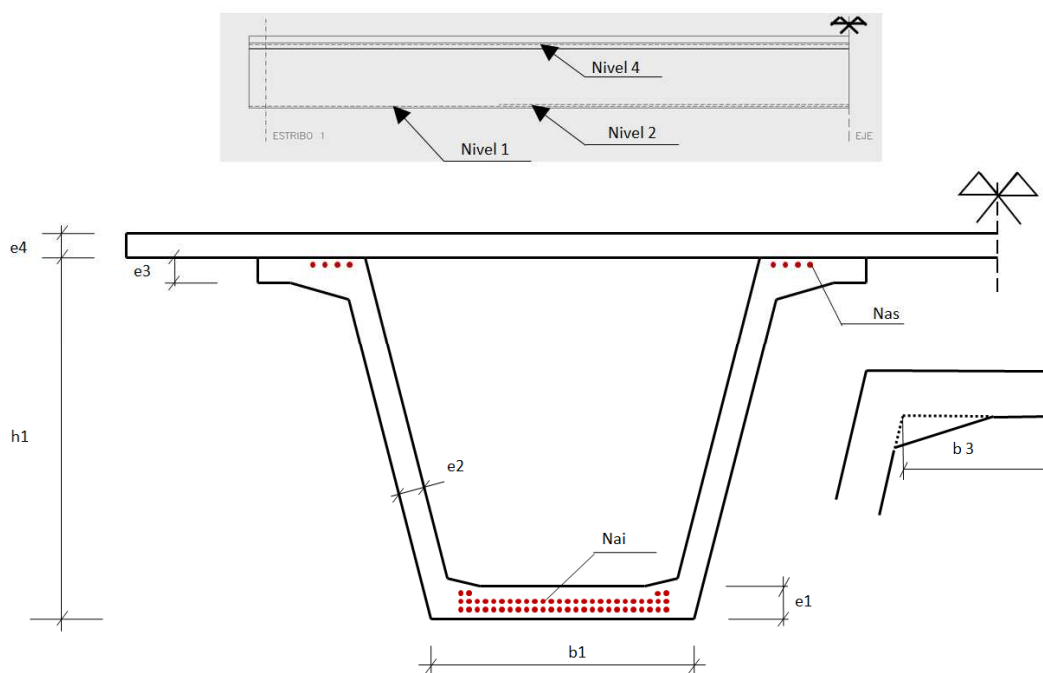


Figura 3. Variables geométricas del tablero.

La función objetivo cuantifica las emisiones generadas en todo el proceso constructivo hasta finalizar la obra. Para ello se consideran los valores de la base de datos de los materiales de BEDEC [2]. Se aplican unos valores de emisión de CO<sub>2</sub> a cada unidad de obra que interviene en la ejecución. Ello permite analizar diversas alternativas estructurales y compararlas desde un punto de vista ambiental. El actual estudio analiza los puentes prefabricados de HRFA con criterios sostenibles en base a una función de emisiones de CO<sub>2</sub>, expresándose la función (1) como sigue:

$$CO_2 = \sum_{i=1,r} e_i \times m_i \quad (4)$$

Considerando que  $e_i$  son las unidades de las emisiones de CO<sub>2</sub> unidad;  $m_i$  son las mediciones de las unidades de obra (dependiendo de las geometría y armado de las variables de diseño), mientras que  $r$  es el número total de unidades de obra.

La función coste de la estructura se define en la ecuación (5), donde  $p_i$  son los precios unitarios;  $m_i$  son las mediciones de las unidades de obra, y  $r$  es el número total de unidades de obra. La función coste incluye el valor de los materiales (hormigón, pretensado, armadura pasiva, fibras de acero) y todos los elementos necesarios para evaluar el coste total del proceso constructivo del puente. Los precios básicos se han obtenido de una encuesta de 2012 de contratistas y figuran en la Tabla 2, y el criterio aplicado para la formación de los precios es el desarrollado en la tesis doctoral del primer autor [19].

$$C = \sum_{i=1,r} p_i \times m_i \quad (5)$$

**Tabla 1.** Parámetros principales del problema

<i>Parámetros</i>	<i>Notación y valores</i>
<b>Geométricos</b>	
Ancho del tablero	$b_{total} = 12,00$ m
Inclinación alma (°sexagesimales)	$i_a = 80^\circ$
Pendiente cartela ala superior (1: ns3)	$ns_3 = 3$
División base ala superior	$s_3 = 3$
Pendiente cartela ala inferior (1: ni3)	$ni_3 = 3$
División base ala inferior	$i_4 = 4$
Entrega de la viga	Ent= 0,47 m
Esbeltez mínima viga	Esb= (L/18)
<b>De carga</b>	
Ancho de las barreras	$a_{bar} = 2 \times 0,5$ m.
Espesor nominal del pavimento	$e_{pav} = 9$ cm.
Carga muerta no procedente del pavimento	$Q_m = 2 \times 5,0$ kN/m
<b>De coste</b>	
Distancia transporte (ida)	$d_{transporte} = 25$ Km.
Despunte armadura activa	25%
<b>De armado</b>	
Tipo de acero pasivo (B-500-S)	$f_{yk} = 500$ N/mm <sup>2</sup>
Tipo de acero activo (Y1860-S7)	$f_{pk} = 1700$ N/mm <sup>2</sup>
Diámetro torones acero activo	$\Phi = 0.6''$
Fundas torones	Nivel 2 y 3
Esbeltez vertical cercos	200 (longitud / $\Phi$ )
<b>De exposición</b>	
Ambiente de exposición externo	IIb (EHE)

El presente problema sólo minimiza la función objetivo de las emisiones del CO<sub>2</sub> (4), y calcula para dicha solución la función coste (5). Las restricciones  $g_j$  en la ecuación (3) contempla todos los estados límite de servicio (ELS) y los estados límites últimos (ELU) que debe satisfacer la estructura, así como las limitaciones geométricas y de constructibilidad del problema. Este estudio no sólo se limita a soluciones viables, sino que durante el proceso de optimización toma en consideración soluciones no viables aplicando una penalización al valor de las emisiones (4).

**Tabla 2.** Precios básicos y emisiones CO<sub>2</sub>

<i>Descripción</i>	<i>CO2 (Kg.)</i>	<i>Precio unitario (€)</i>
Kilogramo del acero pasivo viga (B-500-S)	3,03	2,81
Kilogramo del acero pasivo losa (B-500-S)	3,04	1,50
Kilogramo del acero activo (Y-1860-S7)	3,13	3,62
Kilogramo del acero fibras	2,35	1,10
m de molde en viga	15,49	80,37
m <sup>2</sup> de encofrado en losa	41,91	32,00
m <sup>3</sup> de hormigón HA-25	282,08	70,00
m <sup>3</sup> de hormigón HA-30	303,47	75,00
m <sup>3</sup> de hormigón HA-35	303,47	80,00
m <sup>3</sup> de hormigón HA-40	303,47	85,00
m <sup>3</sup> de hormigón HP-35	332,21	130,81
m <sup>3</sup> de hormigón HP-40	332,21	142,74
m <sup>3</sup> de hormigón HP-45	332,21	152,10
m <sup>3</sup> de hormigón HP-50	332,21	163,59

### 3. MÓDULO DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

Una vez generados los datos necesarios que definen una estructura, el módulo de evaluación estructural calcula los estados tensionales y comprueba todos los estados límite y las restricciones geométricas representadas por la ecuación (3). Las restricciones estructurales consideradas siguen los estándares seguidos por la Normativa Española [22,23] para este tipo de estructuras, incluyendo las comprobaciones en los ELS y ELU a flexión, cortante y torsión debido a las cargas [19, 21].

### 4. ALGORITMO EVOLUTIVO

Los algoritmos evolutivos constituyen una clase de metaheurísticas estocásticas que combinan la naturaleza de búsqueda en paralelo realizada por los algoritmos genéticos con la búsqueda local que mejora cada una de las soluciones que forman una población. Esta hibridación de los algoritmos genéticos también ha sido denominada como algoritmos meméticos. El calificativo de meméticos lo aplicó por primera vez Moscato [24] en 1989 a estos algoritmos híbridos inspirándose en el término inglés meme, acuñado por Dawkins [25] para referirse al análogo del gen en el contexto de la evolución cultural. La idea de emplear la hibridación entre metaheurísticas basadas tanto en algoritmos poblacionales como en otros de búsqueda local permite mejorar la efectividad de los híbridos al combinar los esfuerzos de diversificación e intensificación [26]. Krasnogor y Smith [27] proporcionan una guía y ejemplos de aplicación para este tipo de algoritmos.

En cuanto a la búsqueda local empleada dentro del algoritmo evolutivo, se presenta en este trabajo una variante de la técnica de búsqueda de entornos a gran escala denominada "*Very Large-Scale Neighborhood Search*" (VLSN). En particular, y siguiendo la clasificación propuesta por Ahuja et al. [28], ésta pertenece a los métodos de búsqueda por entornos variables, "*Variable-Depth Neighborhood Search*" (VDNS). Aunque una de las primeras aplicaciones de esta estrategia puede encontrarse en la resolución de problemas de rutas [29], VDNS se basa en realizar una búsqueda local con un movimiento hasta alcanzar un óptimo local; a continuación se cambia el movimiento a otro más amplio que permita escaparse de dicho óptimo y se sigue así hasta completar un número predefinido de movimientos, cada uno de ellos más amplio que el inmediatamente anterior. En el algoritmo propuesto en el presente artículo, el primer movimiento se define por el cambio aleatorio de una sola variable, eligiendo siempre la nueva solución si mejora a la anterior. El segundo movimiento mueve dos variables simultáneamente, y así sucesivamente. Debe definirse, en este caso, un número de movimientos sin mejora para pasar de un movimiento al siguiente.

Por tanto, el proceso del algoritmo híbrido completo se inicia con la generación aleatoria de una población, en nuestro caso de 500 individuos ( $n$ ). Cada una de estas soluciones se mejora mediante una búsqueda VDNS, hasta alcanzar un óptimo local. Para ello, comienza moviendo sólo una variable, y cuando lleva diez movimientos continuos sin mejora ( $no\_mej$ ), se incrementa en uno el número variables ( $var$ ) simultáneas que se mueven, hasta un máximo de ocho, equivalente al 20% del total. Con esta nueva población mejorada de 500 individuos, se procede a la aplicación de un algoritmo genético, con una calibración similar a la mejor que obtuvo Martí [19]: cruzamiento igual a 0,50 y elitismo. Para la evaluación de la población se valora el CO<sub>2</sub> penalizado; sin embargo, en la heurística VDNS el CO<sub>2</sub> considerado está sin penalizar para evitar la divergencia prematura del algoritmo. A la nueva generación obtenida, se le vuelve a aplicar el VDNS, repitiéndose el proceso hasta un máximo de 150 generaciones.

### 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los algoritmos y el módulo de comprobación estructural se programaron en *Intel® Visual Fortran Compiler Integration for Microsoft Visual Studio 2008*. Cada proceso duró una media de 1500

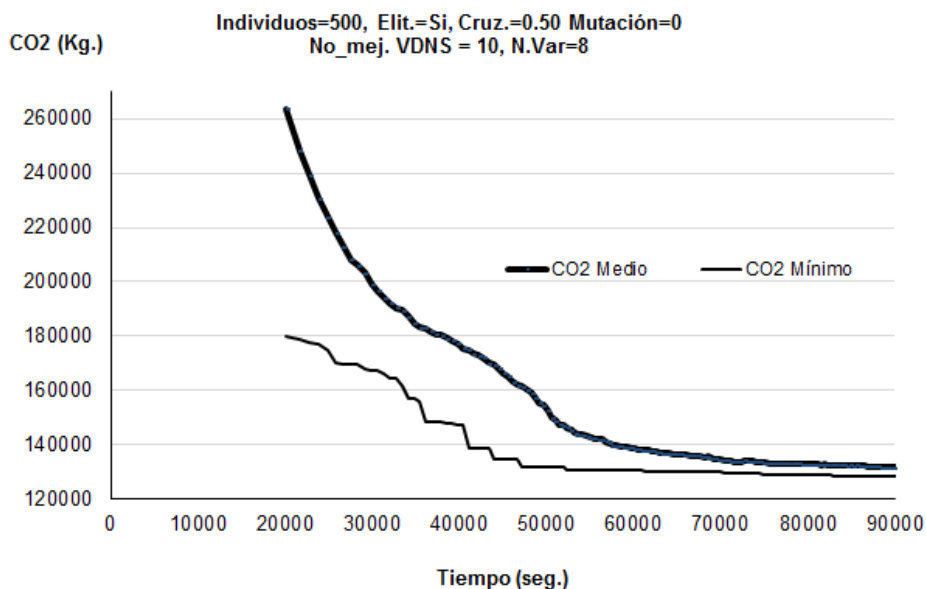
minutos sobre un ordenador con un procesador INTEL® Core™ i7 CPU X980 con 3,33 GHz. Se procesaron nueve ejecuciones, y descartando los valores extremos superior e inferior, se obtuvo valores mínimos, medios y desviaciones de los resultados obtenidos para el CO<sub>2</sub>, el coste, las variables geométricas y la armadura activa. En la Tabla 3 se muestran los valores medios, comparándolos con los valores medios obtenidos al optimizar con criterios de coste. Se hace notar que el valor medio de las variables no toma necesariamente los valores normalizados permitidos para cada variable.

**Tabla 3.** Resumen de los valores medios de las emisiones, costes y de las principales variables

	CO <sub>2</sub> (Kg.)	Coste (€)	<i>h1</i> (m)	<i>e4</i> (m)	<i>b1</i> (m)	<i>b3</i> (m)	<i>e1</i> (m)	<i>e2</i> (m)	<i>e3</i> (m)	<i>Hv</i> (3)	<i>Hl</i> (3)	<i>p1</i> (n)	<i>p2</i> (n)	<i>p3</i> (n)	<i>p4</i> (n)	<i>S</i> (m)	<i>fr3k</i> (3)
(1)	137245	85197	1,58	0,19	1,39	0,28	0,17	0,10	0,14	36	31	25	20	0	3	5,54	5,1
(2)	133409	85210	1,56	0,17	1,53	0,29	0,15	0,10	0,11	37	29	27	20	0	2	5,56	5,1

(1) Optimización de la función Coste  
 (2) Optimización de la función CO<sub>2</sub>  
 (3) *Mpa.*

La Figura 4 muestra una evolución típica del CO<sub>2</sub> respecto al tiempo de cálculo. Se observa la dificultad en la obtención de las primeras 500 soluciones, alrededor de 20000 segundos. Ello se debe a la complejidad que encuentra el algoritmo en alcanzar una combinación de variables en la que encaje el pretensado, para elaborar una solución factible -alrededor de 40 segundos-. El punto de partida para la aplicación del GA viene determinado por la aproximación a un óptimo local mediante el VDNS. El comportamiento de todos los procesos es similar, donde los valores medios van reduciéndose rápidamente al principio, para después ir haciéndolo más lento, y a continuación permanecer prácticamente constante. Se aprecia que a partir de unos 52000 segundos, equivalente a la generación 50, el mejor CO<sub>2</sub> mejora poco -1,7%-, y es prácticamente inapreciable a partir de los 75000 segundos, generación 106, hasta el final -0,5%-.



**Figura 4.** Evolución típica del coste medio y del menor coste de la población de 500 soluciones respecto al tiempo de cálculo.

Esta heurística híbrida permite dos tipos de mejoras, la genética para la población de 500 individuos y la local para cada uno de ellos en las 150 combinaciones genéticas. Las mejoras genéticas se producen a lo largo de las generaciones, con un valor medio de 33 mejoras genéticas. El algoritmo VDNS produce como valor medio 72 mejoras que se originan en las primeras generaciones. En la Figura 5 se observa las diferencias en su funcionamiento, mostrándose la última generación donde ha habido mejora local y mejora genética, señalando la concentración en ambos casos.

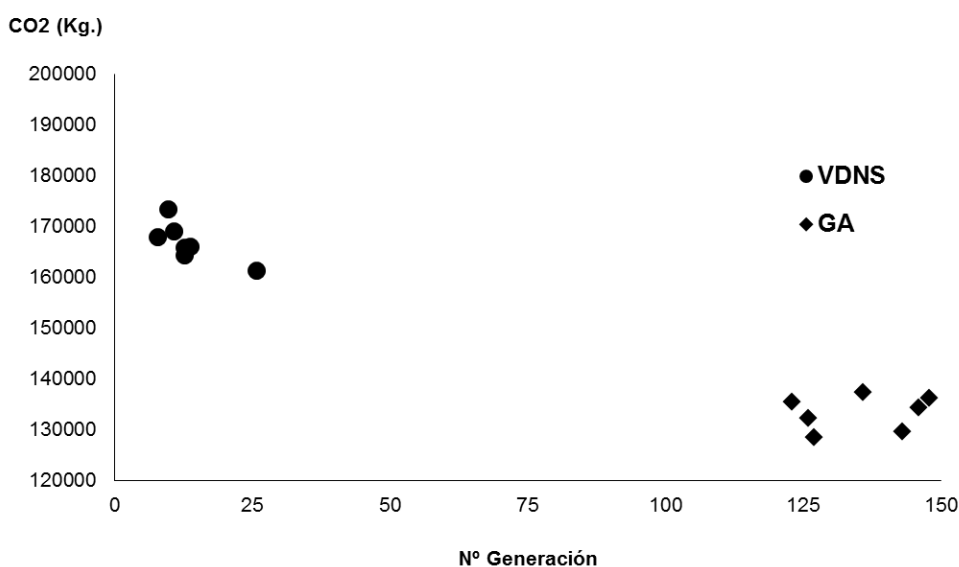


Figura 5. Última generación con mejora VDNS/GA para las soluciones

De los resultados geométricos obtenidos, mostrados en la Tabla 4 se pueden comprobar los siguientes extremos:

El canto medio de la viga tiene una esbeltez  $L/19,2$ , inferior al límite impuesto de  $L/18$ , pero aun así, bastante cercano. El espesor medio de la losa es muy reducido, de 0,17 m, tendente a reducir el peso propio del tablero, pero necesario para resistir la flexión transversal de las sobrecargas variables.

Los espesores de las alas y alma de la viga son los mínimos para permitir reducir su peso, pero a la vez, poder albergar las armaduras activas en las alas y resistir a cortante y torsor en las almas. La longitud de las alas superiores de las vigas es reducido, con un valor medio de 0,29 m, espacio suficiente para ubicar la armadura activa superior. El ala superior colabora con la losa para incrementar el canto del conjunto y así resistir mejor la sollicitación a flexión transversal que produce la acción de la sobrecarga variable; sin embargo, su dimensión no se ve muy condicionada.

Las calidades del hormigón requerido no son elevadas. En la viga, el valor medio de la resistencia característica  $f_{ck}$  es de 37 MPa, para un máximo de 50 MPa; y en la losa,  $f_{ck}$  es de 29 MPa para un máximo de 40 MPa. Las fibras de acero contribuyen a la resistencia del hormigón con un valor de  $f_{R3k}$  de 5,1 MPa, para un valor máximo de 7 MPa. El número de torones medio en el ala inferior es de 47, distribuidos en dos niveles, y dos torones en las alas superiores, lo mínimo para que no fisuren a tracción las alas en el banco de la planta de prefabricados cuando se tesan los torones inferiores. La separación media entre vigas  $S_v$  es de 5,56 m. Esta separación es inferior a la mitad de la dimensión del tablero (6 m), para poder ajustarse mejor a la distribución de la sobrecarga variable, en la que el carro se encuentra desplazado del extremo.



En la Figura 6 se representan los valores obtenidos de las producciones de CO<sub>2</sub> y del coste de las soluciones para las distintas funciones objetivo. Se aprecia que ambos objetivos van muy ligados, de tal modo que si se optimiza económicamente una estructura, por cada euro que se ahorra de valor medio, se dejan de emitir 1,61 Kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (ver Tabla 4).

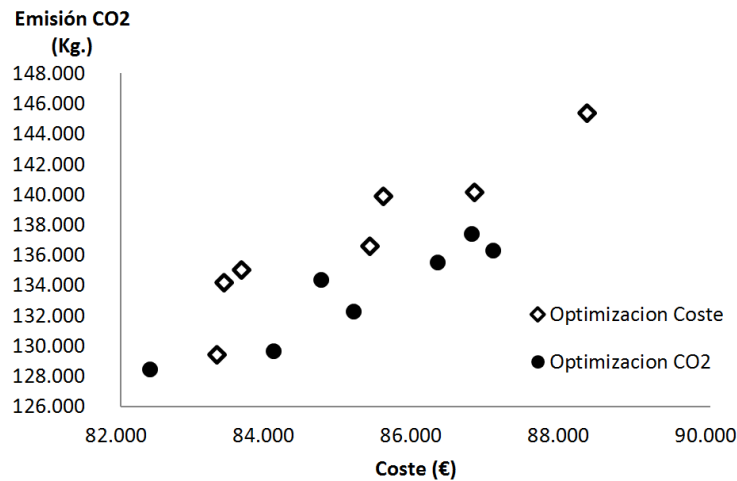


Figura 6. Valores de CO<sub>2</sub> y Coste de las distintas soluciones con distintos criterios de optimización.

## 6. CONCLUSIONES

El trabajo presenta un algoritmo evolutivo que realiza una hibridación entre un GA y un algoritmo VDNS de búsqueda local aplicado con éxito al diseño automático y a la optimización en reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> en pasos superiores prefabricados de hormigones con fibras. Este algoritmo, ejecutado varias veces, proporciona escasas variaciones respecto a la media de los valores encontrados, alcanzando buenas soluciones, incluso en el caso de una sola ejecución. Del estudio realizado para luces de 30 m, se ha comprobado un valor medio en la relación del canto de la viga con la luz,  $L/19,2$ . El espesor medio de la losa resultante es de apenas 0,17 m, de forma que las soluciones optimizadas tienden a reducir al máximo el peso de la estructura, pues los espesores de alas y alma de la viga también son muy reducidos. La resistencia característica del hormigón en la viga es superior al de la losa, con valores medios de 37 MPa y 29 MPa, respectivamente, no habiendo sido necesario llegar hasta la máxima resistencia posible en ninguno de los casos. De igual modo, las fibras de acero contribuyen a la resistencia del hormigón a tracción con un valor de 5,1 MPa, sin acercarse al límite posible. Por último, las heurísticas muestran que los resultados en las reducciones del CO<sub>2</sub> y del coste están íntimamente ligados cuando se optimizan las estructuras, por cada euro que se ahorra de valor medio, se dejan de emitir 1,61 Kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el aporte financiero realizado para este trabajo por el Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto de Investigación BIA2011-23602) y por la Universitat Politècnica de València (Proyecto de Investigación SP20120341).

## REFERENCIAS

- [1] Goedkoop, M., Spriensma, R. (2001). The Ecoindicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment. *Methodology Report. Product Ecology Consultants, Amersfoort, Netherlands.*
- [2] Catalonia Institute of Construction Technology. (2009). *BEDEC PR/PCT ITEC materials database.*
- [3] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., Meida, LO. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual Review of Energy and the Environment*; 26:303-329.
- [4] Paya-Zaforteza, I., Yepes, V., Hospitaler, A., Gonzalez-Vidosa, F. (2009). CO2-efficient design of reinforced concrete building frames. *Engineering Structures*; 31(7):1501-8.
- [5] Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F., Alcalá, J., Villalba, P. (2011). CO2-Optimization Design of Reinforced Concrete Retaining Walls based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy. *Journal of Computing in Civil Engineering ASCE*, 26(3), 378-386.
- [6] Cohn, MZ., Dinovitzer, AS. (1994). Application of structural optimization. *Journal of Structural Engineering* 1994;120(2),617-49.
- [7] Yepes, V., Alcalá, J., Perea, C., Gonzalez-Vidosa, F. (2008). A parametric study of optimum earth retaining walls by simulated annealing. *Engineering Structures*; 30(3):821-30.
- [8] Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., Gonzalez-Vidosa, F., Hospitaler, A. (2008). Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software* ;39(8):676-88.
- [9] Paya, I., Yepes, V., González-Vidosa, F., Hospitaler, F. (2008). Multiobjective Optimization of Reinforced Concrete Building Frames by Simulated Annealing. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*; 23(8):596-610.
- [10] Martínez, F.J., Gonzalez-Vidosa, F., Hospitaler, A., Yepes, V. (2010). Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections. *Computers & Structures*; 88(5-6):375-86.
- [11] Martínez, F.J., Gonzalez-Vidosa, F., Hospitaler, A., Alcalá, J. (2011). Design of tall bridge piers by ant colony optimization. *Engineering Structures*; 33(8):2320-9.
- [12] Carbonell, A., Gonzalez-Vidosa, F., Yepes, V. (2011). Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*; 42(4):151-9.
- [13] Martí, J.V., Gonzalez-Vidosa, F. (2010). Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*; 41(7-8):916-22.
- [14] Martí, J.V., González-Vidosa, F., Yepes, V., Alcalá, J. (2013). Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Engineering Structures* 48, 342–352.
- [15] Romualdi, J.P., Mandel, J.A. (1964). Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement. *ACI Journal of American Concrete Institute* 61(6)

- [16] Slater, E.; Moni, M.; Alam, M. (2012). Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 423-436.
- [17] Martí, J.R.; Serna-Ros, P.; Arbeláez, C.A.; Rigueira-Víctor, J.W. (2006). Comportamiento adherente del hormigón autocompactante en transmisión y anclaje. *Materiales de Construcción*, 56(284): 27-42.
- [18] Vilanova, A.; Fernández, J.; Agranati, G. (2010). Evaluación de los modelos de predicción del ACI-08, Eurocódigo 2 y EHE-08, para estimar las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante. *Informes de la Construcción*, 62(520): 43-55.
- [19] Martí, J.V., (2011). Optimización de tableros isostáticos de vigas artesa. *Lap Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG. ISSN 9783844339451*.
- [20] Yepes, V. Martí, J.V., García-Segura, T. (2015). Cost and Co2 emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm. *Automation in Construction*, 49: 123-134.
- [21] Martí, J.V., González-Vidosa, F., Yepes, V. and Alcalá, J. (2014). Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. 30: 145-154.
- [22] M. Fomento, EHE. (2008). Instrucción de Hormigón Estructural (in Spanish), *M.Fomento, Madrid*.
- [23] M. Fomento, IAP-98. (1998). Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera, *Madrid*.
- [24] Moscato, P. (1989). On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms, *Technical Report Caltech Concurrent Computation Program Report 826, Caltech, Pasadena, California, USA*.
- [25] Dawkins, R. (1976). The selfish gene, *Clarendon Press, Oxford, UK*.
- [26] Blum, C.; Puchinger, J.; Raidl, G.R.; Roli, A. (2011). Hybrid metaheuristics in combinatorial optimization: A survey, *Applied Soft Computing* 11 4135-4151.
- [27] Krasnogor, N.; Smith, J. (2005). A tutorial for competent memetic algorithms: model, taxonomy, and design issues, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 9 474-488.
- [28] Ahuja, R.K.; Ergun, Ö.; Orlin, J.B.; A.P. (2002). Punnen, A survey of very large-scale neighborhood search techniques, *Discrete Applied Mathematics* 123 75-102.
- [29] Lin, S.; Kernighan, B. (1973). An effective heuristic algorithm for the traveling salesman problem, *Operations Research* 21 498-516.