

Algoritmo híbrido de enjambre de luciérnagas y aceptación por umbrales para diseño de vigas

Tatiana García-Segura¹, Víctor Yepes², José V. Martí³, Julián Alcalá⁴

Resumen—Este estudio convierte el diseño estructural en una optimización de variables discretas. Se propone un algoritmo híbrido de enjambre de luciérnagas para buscar soluciones con menores emisiones totales y anuales. El algoritmo combina la búsqueda colectiva de la optimización de enjambre luciérnagas “*glowworm swarm optimization*”(GSO) y la capacidad de búsqueda local del umbral de aceptación “*threshold accepting*” (TA). La estructura propuesta es una viga de hormigón en doble T biapoyada definida por 20 variables. Se estudia la resistencia del hormigón desde 30MPa hasta 100MPa. Esta comunicación propone un método para calibrar los parámetros del algoritmo con independencia de la función objetivo y del tamaño del enjambre. Los resultados muestran que TAGSO consigue diseños de vigas que emiten un 25% menos de CO₂. La optimización de las emisiones anuales reduce la cantidad de CO₂ al año en un 61% con un incremento total de las emisiones de CO₂ del 9%.

Palabras clave-- Enjambre de luciérnagas, algoritmo híbrido, hormigón de alta resistencia, variables discretas.

1. INTRODUCCIÓN

En ingeniería estructural, el objetivo es lograr una estructura segura y económica. Además de estos objetivos, el impacto ambiental y la durabilidad son cada vez más frecuentes. Las restricciones de resistencia y condiciones en servicio definen un espacio de soluciones en el que los expertos son los únicos capaces de encontrar la mejor solución. La geometría de la sección transversal, la resistencia del hormigón, y la cantidad y distribución del acero son las variables de diseño. Para llegar a la mejor solución se necesita un proceso de prueba y error en el que se va reduciendo el consumo de material, y por consiguiente el coste. Sin embargo, las técnicas de optimización heurística han demostrado su eficacia para encontrar la mejor solución dentro del espacio factible.

Nuestro grupo de investigación ha utilizado el recocido simulado, el umbral de aceptación, la

colonia de hormigas y los algoritmos genéticos para reducir el coste de muros de hormigón armado (HA) [1], marcos de paso de carretera [2], bóvedas de carretera [3], pilas de puentes [4], pórticos de edificación [5], puentes de carretera prefabricados [6, 7]. Paya-Zaforteza et al. [8] y Yepes et al. [9] ampliaron el estudio económico a la optimización de las emisiones de CO₂. Los resultados mostraron que las soluciones ecológicas son también buenas soluciones en términos de coste, ya que ambos objetivos buscan la minimización del material. Camp y Assadollahi [10] estudiaron los diseños de zapatas de hormigón armado para ambos objetivos. Ellos encontraron que ambos son altamente sensibles a los cambios en las cargas y condiciones geotécnicas. Park et al. [11] propuso el uso de técnicas de optimización para estudiar las emisiones y el coste de columnas de hormigón armado, dependiendo del tipo de acero y la resistencia del hormigón. García-Segura et al. [12] utilizaron un algoritmo híbrido de enjambre de luciérnagas y recocido simulado para optimizar vigas en doble T de hormigón autocompactante. Este estudio propone un algoritmo híbrido de enjambre de luciérnagas y aceptación por umbrales para minimizar la huella de carbono de vigas en doble T de hormigón de alta resistencia.

El hormigón de alta resistencia reduce las dimensiones de la sección transversal y, por lo tanto, el consumo de material. Sin embargo, para su producción se necesita más cantidad de cemento. El cemento es un material con una elevada huella de carbono. La producción de cemento Portland es la responsable de aproximadamente el 76% de las emisiones de producción y construcción de una columna de hormigón armado [13]. Asimismo, otros estudios han abordado el uso de hormigón de alta resistencia desde un punto de vista ambiental [14]. Este estudio, además, tiene en cuenta la carbonatación y durabilidad del hormigón de alta resistencia.

La carbonatación reduce la alcalinidad del hormigón. Consecuentemente, se acelera la corrosión del acero y se reduce la vida útil de la estructura. Sin embargo, la carbonatación durante la etapa de uso puede reducir las emisiones totales en un 22% [13]. Si no se tiene en cuenta la captura de carbono, las tasas de emisión pueden estar

¹ Institute of Concrete Science and Technology (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022 Valencia. E-mail: tagarse@cam.upv.es

² Institute of Concrete Science and Technology (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022 Valencia. E-mail: vyepesp@upv.es

³ Institute of Concrete Science and Technology (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022 Valencia. E-mail: jvmartia@upv.es

⁴ Institute of Concrete Science and Technology (ICITECH), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n 46022 Valencia. E-mail: jualgon@upv.es

sobreestimadas entre un 13% y un 48% [15]. García-Segura et al. [13] describieron las principales variables que afectan al proceso de carbonatación. Para el caso estudiado, la velocidad de carbonatación dependerá de la resistencia del hormigón y la geometría de la sección.

Los problemas de optimización estructural se caracterizan por ser no convexos con un gran espacio de soluciones de variables discretas. Los sistemas de inteligencia de enjambres son eficaces en estos tipos de problemas [16]. GSO ha sido utilizado con éxito para mejorar el alcance de un sistema de sensores [17] y para seleccionar las dimensiones de los elementos de servicios web [18]. Dutta et al. [19] aplicaron el algoritmo de colonia de abejas y GSO para encontrar las ubicaciones óptimas de sensores. Los resultados indicaron que ambos algoritmos eran robustos para el problema estudiado. Sin embargo, Qu et al. [20] y Zang et al. [21] señalaron ciertos problemas como la baja convergencia y la dificultad de encontrar óptimos globales. GSO fue combinado con el algoritmo de evolución diferencial para resolver problemas de ingeniería. Los resultados mostraron que el algoritmo híbrido mejoró la capacidad de búsqueda [22]. Del mismo modo, García-Segura et al. [12] y Yepes et al. [23] comprobaron que la búsqueda local del recocido simulado “*Simulated Annealing*” (SA) combinada con la habilidad de búsqueda poblacional de GSO mejoraba la calidad de las soluciones.

Este artículo describe un algoritmo híbrido basado en GSO para el diseño sostenible de una viga de hormigón de alta resistencia. A tal efecto, se ha acelerado la búsqueda local con TA. Se valoran las emisiones durante el ciclo de vida, incluyendo la carbonatación y la durabilidad del hormigón, con el objetivo de reducir al mínimo las emisiones totales y anuales. Para ello, se emplean 20 variables discretas, incluyendo el uso de hormigón de alta resistencia. Se propone un método que permite calibrar los parámetros del algoritmo con independencia de la función objetivo y del tamaño del enjambre

II. PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Este estudio tiene como objetivo minimizar las emisiones totales y anuales, determinando el valor óptimo de cada variable que define el diseño de una viga en doble T. Para este propósito se desarrolla un programa que minimiza la función objetivo F de la expresión (1) o (2), al tiempo que satisface las restricciones G de la expresión (3).

$$F(\vec{x}) = \left(\sum_{i=1,r} e_i \cdot m_i(\vec{x}) \right) - C_{CO_2}(\vec{x}) \tag{1}$$

$$F(\vec{x}) = \frac{\left(\sum_{i=1,r} e_i \cdot m_i(\vec{x}) \right) - C_{CO_2}(\vec{x})}{t(\vec{x})} \tag{2}$$

$$G_j(\vec{x}) \leq 0 \tag{3}$$

Las funciones objetivo y las restricciones son evaluadas una vez definida la estructura.

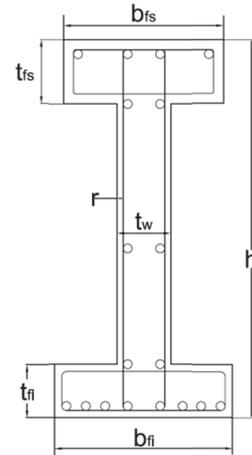


Fig. 1. Variables geométricas de diseño.

El diseño de la viga se define mediante el vector x que contiene un total de 20 variables: siete geométricas, una relativa a la resistencia a compresión del hormigón (fck) y 12 en relación a la armadura. En la Fig. 1 se observan las variables geométricas (h, bfs, bfi, tfs, tfl, tw y r).

La armadura longitudinal se define mediante el número y diámetro de las barras (n1, Ø1, n2, Ø2, n3, Ø3), y la armadura transversal por el número de barras por metro y su diámetro (n4, Ø4, n5, Ø5, Ø6, Ø7). Ambas quedan reflejadas en la Fig. 2. La armadura transversal en las alas (n4, Ø6, n5, Ø7) y en las almas (n4, Ø4, n5, Ø5) puede tener diferente diámetro, aunque conserva el mismo número de barras por metro. Los parámetros o datos fijos son la luz de la viga (15m), la carga permanente (20kN/m), y la carga variable (10kN/m).

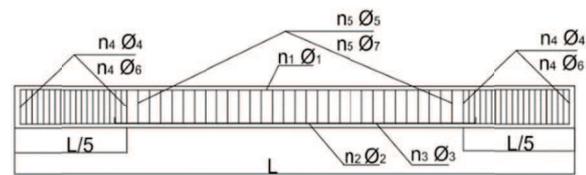


Fig. 2. Armadura longitudinal y transversal

A. Funciones objetivo

Las emisiones durante el ciclo de vida miden la cantidad de CO2 emitida durante la extracción de las materias primas, el transporte, la producción y la colocación del hormigón armado. A esto se le descuenta la captura de CO2 que tiene lugar durante la vida útil de la estructura. Cada unidad tiene una emisión ei (véase la Tabla I) y una medición mi que dependen de las variables de optimización. La emisión unitaria del hormigón se determina a partir

del diseño de la mezcla, incluyendo la producción del material, el transporte y la colocación. Las emisiones se obtuvieron de la base de datos BEDEC [24], salvo la emisión unitaria del plastificante [25] y del humo de sílice, que se considera que no tienen emisiones de producción al ser un residuo industrial [12].

La mayoría de los casos de deterioro del hormigón son debido a la corrosión del acero por carbonatación o cloruros [26], prevaleciendo la carbonatación en ambientes urbanos e industriales en los que hay concentraciones de CO₂ elevadas [27]. La EHE-08 señala la carbonatación como el principal proceso de deterioro del hormigón cuando éste está expuesto a un ambiente de exposición normal (corrosión de origen diferente de los cloruros) [28]. La vida útil t se evalúa de acuerdo a las condiciones ambientales. Este valor se utiliza para el cálculo de la emisión anual (véase la expresión (2)). Al mismo tiempo, la carbonatación absorbe CO₂ (C_{CO_2}) y por lo tanto, esta captura se deduce de las emisiones.

La Instrucción EHE-08 [28] propone la expresión (4) para evaluar la vida útil de la estructura basada en el modelo Tuutti [29].

$$t = \left(\frac{r}{k}\right)^2 + \frac{80 \cdot r}{\phi \cdot v_c} \quad (4)$$

donde: t son los años de vida útil; r es el recubrimiento del hormigón (mm); k es el coeficiente de carbonatación [28] (véase la Tabla I); ϕ es el diámetro de la barra (mm), y v_c es la velocidad de corrosión (2µm/año). La vida útil de la estructura se modeliza como la suma de dos fases. Durante la primera fase, la carbonatación penetra en el recubrimiento del hormigón. La segunda fase comienza cuando el frente llega a la superficie del acero, y termina cuando el nivel de degradación llega a un límite por encima del cual, la consecuencias de la corrosión ya no pueden ser toleradas [28,29]. El aumento de la vida útil reduce las emisiones a largo plazo, en tanto en cuanto se reduce la emisión anual. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las infraestructuras son a menudo reemplazadas por razones funcionales. Por lo tanto, este estudio limita la vida útil máxima a 300 años.

La captura de CO₂ se evalúa según el estudio de García-Segura et al. [13]. La expresión (5) se basa en la primera ley de difusión de Fick. Esta expresión ha sido utilizada por numerosos autores [30-33] para valorar la absorción de CO₂ del hormigón. La Tabla I muestra la cantidad de cemento Portland por metro cúbico de hormigón (c). Se considera que la cantidad CaO que contiene el cemento Portland (CaO) es 0,65, la proporción de óxido de calcio que puede ser carbonatada (η) es 0,75, y la relación entre los pesos moleculares (M) es 0,79 [13, 33]. La superficie de hormigón expuesta A depende de la geometría de la solución.

$$C_{CO_2} = k \cdot \sqrt{t} \cdot c \cdot CaO \cdot \eta \cdot A \cdot M \quad (5)$$

TABLA I
EMISIONES UNITARIAS Y PROPIEDADES DEL
HORMIGÓN

Medición unitaria	Emisión (kg CO ₂)	k (mm/año ^{0.5})	Cemento (kg/m ³)
HA-30 (m ³)	259,61	3,71	280
HA-35 (m ³)	277,61	3,01	300
HA-40 (m ³)	295,61	2,50	320
HA-45 (m ³)	313,61	2,11	350
HA-50 (m ³)	331,61	1,81	400
HA-55 (m ³)	349,61	1,57	457
HA-60 (m ³)	367,61	1,38	485
HA-70 (m ³)	403,61	1,09	493
HA-80 (m ³)	439,61	0,89	497
HA-90 (m ³)	475,61	0,74	517
HA-100 (m ³)	511,61	0,63	545
Acero B500SD (kg)	3,03		
Encofrado (m ²)	2,08		
Colocación de la viga (m)	39,43		

B. Restricciones

Las restricciones estructurales comprueban los Estados Límite Últimos (ELU) y Estados Límite de Servicio (ELS) en base a la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 [28]. Las limitaciones de ELU controlan la flexión, el cortante y la rasante. Referente al ELS, se comprueba que la abertura de fisura no supera el límite fijado por las condiciones de durabilidad y la flecha total no es superior a 1/250 de la luz de la viga. Se comprueban también las restricciones geométricas y constructivas. En cuanto a durabilidad, se requiere una vida útil mínima de 100 años

III. ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

Se propone el algoritmo híbrido (TAGSO) que combina el enjambre luciérnagas y el umbral de aceptación. GSO fue propuesto por Krishnanand y Ghose para encontrar múltiples soluciones óptimas en funciones continuas [34]. TA, propuesto por Dueck y Scheuer [35], se caracteriza por aceptar soluciones peores siempre y cuando el incremento sea menor que un valor umbral.

El método propuesto comienza con la generación de una población de n luciérnagas o

soluciones factibles que quedan distribuidas por todo el espacio de soluciones. A cada luciérnaga se le asigna una luciferina inicial l_o y un rango inicial del sensor radial r_s . Se actualiza la luciferina según la expresión (6), en la que interviene los coeficientes ρ y γ , el valor de la función objetivo de dicha luciérnaga $f(x_i)$ y el valor máximo de las funciones objetivo $fmax$.

A continuación, se produce el movimiento de la luciérnaga hacia una vecina según la probabilidad expresada en la ecuación (7). La luciérnaga i escoge a la vecina j dentro del conjunto $N_i(t)$. Este conjunto está compuesto por aquellas luciérnagas que están dentro de su rango del sensor radial r_d , son factibles y tienen más luciferina que la luciérnaga i . Cuanto menor sea el valor de la función objetivo, mayor será la cantidad de luciferina, y consecuentemente, mayor será la probabilidad de ser elegida. La nueva posición o valor discreto de cada variable depende del factor de paso s (>0) y de la distancia euclídea d_{ij} (ver ecuación (8)). Seguidamente, se actualiza el rango del sensor radial según la expresión (9). Siendo β y n_t parámetros que habrá que calibrar.

Por último, se actualiza la posición de la luciérnaga con la estrategia de búsqueda local TA. Se modifica el valor de n_v variables en una posición. El umbral de aceptación comienza con un umbral inicial T_0 que se reduce gradualmente hasta cero durante las primeras 10 iteraciones. Después, se aceptan sólo las mejores soluciones.

El proceso se repite para las n luciérnagas durante t_{max} iteraciones. Una vez finalizado el proceso se repite nueve veces con el fin de obtener el mejor valor de todos ellos.

$$l_i(t+1) = (1 - \rho) \cdot l_i(t) + \gamma(f_{max} - f(x_i(t+1))) \quad (6)$$

$$p_{ij}(t) = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} l_k(t) - l_i(t)} \quad (7)$$

$$x_i(t+1) = \text{int} \left[x_i(t) + s \left(\frac{x_j(t) - x_i(t)}{d_{ij}} \right) \right] \quad (8)$$

$$r_d^i(t+1) = \min \left\{ r_s, \max \left[r_d^i(t) + \beta(n_t - |N_i(t)|) \right] \right\} \quad (9)$$

IV. RESULTADOS DEL ALGORITMO TAGSO

Se ha programado en Intel Visual Fortran Compiler Integration para Microsoft Visual Studio 2010 con procesador CPU un INTEL® Core™ i7-3820 con 3,6 GHz. Para la calibración de los parámetros del algoritmo se ha propuesto un método capaz de dar unos valores óptimos, independientemente de la función objetivo y del tamaño del enjambre. El valor de luciferina inicial (l_o) se define como un porcentaje (p_n) del valor medio de la función objetivo inicial. Y por tanto, se obtiene una vez se ha generado la población. El parámetro para controlar el número de vecinas (n_t) se calcula como un porcentaje del enjambre (p_n). El

rango inicial del sensor radial (r_s) es aquel que alberga en su interior una cantidad de luciérnagas (n_t). El factor de paso (s) y el parámetro (β) se evalúan, respectivamente, como el porcentaje p_s y p_β del rango inicial del sensor radial. Por último, el umbral inicial (T_0) se ajusta como el porcentaje (p_t) de cada función objetivo inicial. Por lo tanto, cada luciérnaga tiene su propio umbral inicial.

TABLA II
RESULTADOS ESTADÍSTICOS DE LOS PARÁMETROS TAGSO

	Optimización de la emisión total		Optimización de la emisión anual	
	Media	Coefficiente de variación	Media	Coefficiente de variación
l_o	10378,1	9%	44,0	8%
n_t	10,0	0%	10,0	0%
r_s	56,9	5%	56,6	4%
s	34,1	5%	39,6	4%
β	2,8	4%	2,8	4%
T_0	259,5	9%	1,1	9%

La calibración de los parámetros TAGSO recomendó un tamaño de 40 luciérnagas (véase la Fig. 3) y un valor de los coeficientes ρ y γ de 0,5. El número de iteraciones de TA fue 2000, modificando el valor de tres variables en cada iteración. Los resultados mostraron que tanto la optimización total como anual de las emisiones encontraron su mejor solución con $p_l=40$, $p_n=25$, $p_s=60$, $p_\beta=5$, $p_t=1$. La Tabla II muestra la media y la desviación típica de los parámetros tras las nueve repeticiones del algoritmo.

La Fig. 3 muestra el valor de la función objetivo después de cada iteración. Cabe señalar que los valores de CO₂ pertenecientes a cada luciérnaga tienden a igualarse con las iteraciones, y después de la iteración 13 los valores se mantienen constantes. Por lo tanto, consideramos t_{max} como 15 iteraciones.

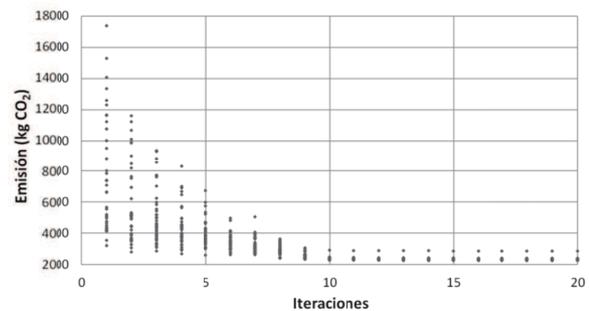


Fig. 3. Evolución de las emisiones en cada luciérnaga

La Fig. 4 analiza el número óptimo de luciérnagas. Se muestra la conveniencia de utilizar 40 luciérnagas cuando se busca el óptimo de emisión y tiempo de cálculo. En esta figura se puede observar como disminuye la eficacia conforme se disminuye el número de luciérnagas, mientras que el aumento de luciérnagas requiere un mayor tiempo de cálculo. Soluciones de vigas para este estado de carga suelen emitir en torno a 3000 kgCO₂. Sin embargo, TAGSO consigue reducir las emisiones en un 25%.

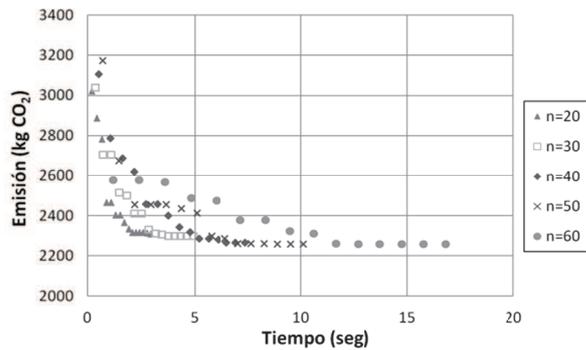


Fig. 4. Evolución de las emisiones según el número de luciérnagas

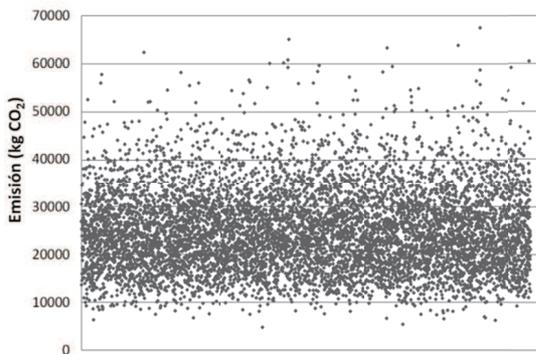


Fig. 5. Resultados de soluciones factibles aleatorias

También es importante señalar el rendimiento del algoritmo de optimización. La Fig. 5 ilustra soluciones factibles al azar. La mayoría de las soluciones tienen un valor de emisión entre 5.000 y 60.000 kg de CO₂, mientras que la mejor solución encontrada por el algoritmo TAGSO emite 2.237,6 kg de CO₂. Por lo tanto, los resultados demuestran el éxito de la inteligencia de enjambre en este problema estructural.

V. SOLUCIÓN ESTRUCTURAL

Las mejores soluciones para ambos objetivos se resumen en la Tabla III. La mejor solución de emisión anual logró disminuir las emisiones anuales en un 61%, mientras se incrementan las emisiones totales en un 9%. Cuando se optimiza la emisión

anual la vida útil es de 300 años. Se destaca la influencia del recubrimiento y de la resistencia del hormigón en la mejora de la durabilidad. El recubrimiento aumenta de 19 a 24mm y la resistencia del hormigón de 30 a 50MPa. Vale la pena señalar que ambas soluciones tienen grandes perímetros con el fin de maximizar la captura de CO₂ y consecuentemente, reducir las emisiones. Para ambos objetivos, la relación *L/h* es de alrededor de 8.

TABLA III
MEJORES DISEÑOS EN TÉRMINOS DE EMISIONES
TOTALES Y EMISIONES ANUALES

Variable	Optimización de la emisión total	Optimización de la emisión anual
h (mm)	1850	1750
bfs (mm)	550	400
bfi (mm)	200	200
tfs (mm)	80	90
tfi (mm)	110	140
tw (mm)	80	90
r (mm)	19	24
fck (MPa)	30	50
Vida útil (años)	107,85	300,00
Cantidad de acero (kg)	349,08	353,89
Volumen de hormigón (m ³)	2,94	2,97
Captura de CO ₂ (kg CO ₂)	314,31	327,26
Emisión (kg CO ₂)	2237,56	2448,87
Emisión anual (kg CO ₂ /año)	20,75	8,16

La inteligencia de enjambre imita el comportamiento colectivo de agentes auto-organizados que siguen reglas descentralizadas para interactuar a nivel local. Finalmente, los agentes adoptan posiciones dentro del espacio de soluciones que en la mayoría de los casos corresponden a mínimos locales. El análisis de estas posiciones ofrece información valiosa. Por ejemplo, dos luciérnagas pueden tener el mismo valor objetivo ocupando diferentes posiciones.

La minimización de las emisiones anuales se lleva a cabo a través de dos vías: la reducción de las emisiones y la mejora de la durabilidad. Estos son, de hecho, objetivos opuestos ya que la mejora de la durabilidad implica un aumento de las emisiones. La Fig. 6 muestra la resistencia del hormigón y el recubrimiento de cada solución final de luciérnaga. Se pueden observar diferentes opciones para obtener valores similares de emisión anual. Aumentando tanto el recubrimiento como la resistencia se

consiguen vidas útiles más largas. Por lo tanto, para alcanzar 8,45 kg CO₂/año, el proyectista puede elegir entre un hormigón de 35MPa con un recubrimiento de 33mm o un hormigón 30MPa con un recubrimiento de 34mm.

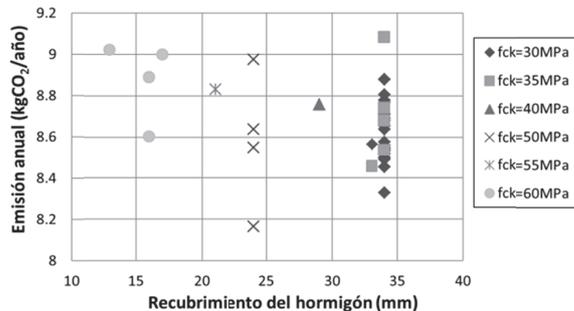


Fig. 6. Relación entre la resistencia del hormigón y el recubrimiento en la minimización de las emisiones anuales

VI. CONCLUSIONES

Este artículo presenta un algoritmo híbrido (TAGSO) capaz de dar un diseño óptimo sostenible de una viga de hormigón armado. La formulación del modelo incluye el objetivo ambiental a través de la evaluación de las emisiones durante el ciclo de vida, la carbonatación del hormigón y la vida útil. El objetivo del programa de optimización es minimizar las emisiones totales y las emisiones anuales, mientras se satisfacen los requisitos estructurales, constructivos y geométricos.

La calibración del TAGSO muestra que el algoritmo es eficaz para ambos objetivos cuando la luciferina inicial, el umbral inicial, el parámetro n_s , el rango inicial del sensor radial, el factor de paso y parámetro β son un porcentaje de la función objetivo y del tamaño del enjambre.

La interpretación de la posición final de las luciérnagas da información sobre las alternativas para conseguir un mismo objetivo. Las luciérnagas llegan en muchos casos a óptimos locales que corresponden a diferentes soluciones con emisiones similares. Por lo tanto, el proyectista puede elegir la solución que mejor se adapte a las necesidades particulares.

La emisión anual parece ser un buen objetivo para el diseño sostenible, puesto que con un 9% de aumento de las emisiones totales se puede ahorrar hasta un 61% kgCO₂/año. Para lograr tal fin, se aumenta el recubrimiento y la resistencia a compresión del hormigón, logrando una vida útil de 300 años. Los resultados indican que desde el punto de vista ambiental se buscan grandes perímetros para aumentar la captura de CO₂ y, por tanto, la reducción de sus emisiones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación (Proyecto de Investigación BIA2011-23602) y de la Universitat Politècnica de València (Proyecto de Investigación SP20120341).

REFERENCIAS

- [1] Yepes, V.; Alcalá, J.; Perea, C.; Gonzalez-Vidosa, F. A parametric study of optimum earth retaining walls by simulated annealing. *Engineering Structures*, 30(3):821-830, 2008.
- [2] Perea, C.; Alcalá, J.; Yepes, V.; Gonzalez-Vidosa, F., Hospitaler, A. Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 39(8):676-688, 2008
- [3] Carbonell, A.; Gonzalez-Vidosa, F.; Yepes, V. Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 42(4):151-159, 2011.
- [4] Martínez, F.J.; Gonzalez-Vidosa, F.; Hospitaler, A.; Alcalá, J. Design of tall bridge piers by ant colony optimization. *Engineering Structures*, 33(8): 2320-2329, 2013.
- [5] Paya-Zaforteza, I.; Yepes, V.; Gonzalez-Vidosa, F.; Hospitaler, A. On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing. *Meccanica*, 45(5):693-704, 2010.
- [6] Martí, J.V.; Yepes, V.; González-Vidosa, F. A memetic algorithm approach to designing of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 04014114, 2015.
- [7] Martí, J.V.; González-Vidosa, F.; Yepes, V.; Alcalá, J. Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Engineering Structures*, 48:342-352, 2013.
- [8] Paya-Zaforteza, I.; Yepes, V.; Hospitaler, A.; Gonzalez-Vidosa, F. CO₂-efficient design of reinforced concrete building frames. *Engineering Structures*, 31(7):1501-1508, 2009.
- [9] Yepes, Gonzalez-Vidosa, F.; Alcalá, J.; Villalba, P. CO₂-optimization design of reinforced concrete retaining walls based on a VNS-threshold acceptance strategy. *ASCE Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(3):378-386, 2012
- [10] Camp, C.V.; Assadollahi, A. CO₂ and cost optimization of reinforced concrete footings using a hybrid big bang-big crunch algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 48(2): 411-426, 2013.
- [11] Park, H.S.; Kwon, B.; Shin, Y.; Kim, Y.; Hong, T.; Choi, S.W. Cost and CO₂ Emission Optimization of Steel Reinforced Concrete Columns in High-Rise Buildings. *Energies*, 6(11): 5609-5624, 2013.
- [12] García-Segura, T.; Yepes, V.; Martí, J.V.; Alcalá, J. Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(7):1190-1205, 2014.

- [13] García-Segura, T.; Yepes, V.; Alcalá, J. Life-cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1):3-12, 2013.
- [14] Tae, S.; Baek, C.; Shin, S. Life cycle CO₂ evaluation on reinforced concrete structures with high-strength concrete. *Environmental Impact Assessment Review*, 31(3):253-260, 2011.
- [15] Flower, D.J.M.; Sanjayan, J.G. Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(5): 282-288, 2007.
- [16] Felkner, J.; Chatzi, E.; Kotnik, T. Interactive Particle Swarm Optimization for the Architectural Design of Truss Structures. In *Proceedings of IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI) (Singapore, April 2013)*
- [17] Liao, W.; Kao, Y.; Li, Y. A sensor deployment approach using glowworm swarm optimization algorithm in wireless sensor networks. *Expert Systems with Applications*, 38(10):12180-12188, 2011.
- [18] Khan, K.; Sahai, A. A Glowworm Optimization Method for the Design of Web Services. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 4(10):89-102, 2012.
- [19] Dutta, R.; Ganguli, R.; Mani, V. Swarm intelligence algorithms for integrated optimization of piezoelectric actuator and sensor placement and feedback gains. *Smart Materials and Structures*, 20(10):105018, 2011.
- [20] Qu, L.; He, D.; Wu, J. Hybrid Coevolutionary Glowworm Swarm Optimization Algorithm with Simplex Search Method for System of Nonlinear Equations. *Journal of Information & Computational Science*, 8(13):2693–2701, 2011.
- [21] Zhang, J., Zhou, G., Zhou, Y. A New Artificial Glowworm Swarm Optimization Algorithm Based on Chaos Method. B.Y. Cao, S. Chen, G. Wang and S. Guo, (eds.) *Quantitative Logic and Soft Computing*, AISC 82, Springer-Verlag, Heidelberg, 683–693, 2010.
- [22] Luo, Q.F.; Zhang, J.L. Hybrid Artificial Glowworm Swarm Optimization Algorithm for Solving Constrained Engineering Problem. *Advanced Materials Research*, 204-210: 823-827, 2011.
- [23] Yepes, V.; Martí, J.V.; García-Segura, T. 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, 2015.
- [24] Catalonia Institute of Construction Technology. 2009. BEDEC PR/PCT ITEC materials database. Barcelona, Spain.
- [25] EFCA. 2006. Environmental Product Declaration (EPD) for Normal Plasticising admixtures. Environmental Consultant, Sittard.
- [26] Basheer, P.A.M.; Chidiac, S.E.; Long, A.E.; Predictive models for deterioration of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 10 (1): 27–37, 1996.
- [27] Song, H.W.; Kwon, S.J.; Byun, K.J.; Park, C.K. Predicting carbonation in early-aged cracked concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(5): 979–989, 2006.
- [28] Ministerio de Fomento. Instrucción de Hormigón Estructural EHE, Madrid, 2008.
- [29] Tuutti, K. Corrosion of steel in Concrete. CBI Forskning Research Report. Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden, 1982.
- [30] Pade, C.; Guimaraes, M. The CO₂ uptake of concrete in a 100-year perspective. *Cement and Concrete Research*, 37(9): 1384–1356, 2007.
- [31] Doodoo, A.; Gustavsson, L.; Sathre, R. Carbon implications of end-of-life management of building materials. *Resources, Conservation and Recycling* 53(5): 276-86, 2009.
- [32] Collins, F. Inclusion of carbonation during the life cycle of built and recycled concrete: influence on their carbon footprint. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(6): 549–556, 2010.
- [33] Lagerblad, B. Carbon dioxide uptake during concrete life-cycle: State of the art. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 2005.
- [34] Krishnanand, K.N.; Ghose, D. Glowworm swarm optimization: a new method for optimizing multimodal functions. *International Journal of Computational Intelligence Studies*, 1(1): 93-119, 2009.
- [35] Dueck, G.; Scheuer, T. Threshold accepting: a general purpose optimization algorithm superior to simulated annealing. *Journal of Computational Physics*, 90(1):161-175, 1990.