

AN ENGINEERING POSTGRADUATE COURSE ON HEURISTIC DESIGN OF DIFFERENT TYPES OF RETAINING WALLS

José V. Martí^a; Víctor Yepes^a

^aICITECH, EXCELCON, Universitat Politècnica de València, Spain

Abstract

This paper deals with a postgraduate course in project engineering that forms part of an MSc course in Concrete Engineering at the UPV. This course is focused on the automated design of concrete structures optimizing the material execution cost. The course is concerned first with the basic heuristic algorithms for structural optimization, such as genetic algorithms, ant colonies, simulated annealing, particle swarm optimization, neural networks, etc. And it then moves to the application of such algorithms to the practical design of real concrete structures such as walls, road portal and box frames, building frames, vaults, bridge piers, abutments and decks. Two design cases are presented. Simulated annealing (SA) is firstly applied to a cantilever wall of 10 m high. This example has 20 discrete design variables for the geometry as well as for the characteristics of the materials, and passive reinforcement. The second type of structure analyzed is a 10 m high counterfort retaining wall. This example has 32 variables for its definition. The parameters are the same in both cases. Finally, case studies indicate that the heuristic optimization is a forthcoming tool to design a variety of different types of retaining walls and compare them, reducing costs.

Keywords: Postgraduate education; Structural design; Optimization; Heuristic algorithms; Concrete structures; Earth-retaining walls.

APLICACIÓN A LA DOCENCIA DE POSGRADO EN INGENIERÍA LA OPTIMIZACIÓN DE DISTINTAS TIPOLOGÍAS DE MUROS

Resumen

Este artículo trata sobre la formación universitaria en ingeniería de proyectos en un curso de postgrado dentro del Máster en Ingeniería del Hormigón de la UPV, centrado en el diseño automatizado de estructuras de hormigón optimizando el coste de ejecución material. El curso considera la mayoría de los algoritmos heurísticos básicos aplicándolos al diseño práctico de estructuras reales, tales como muros, pórticos y marcos de pasos inferiores de carreteras, pórticos de edificación, bóvedas, pilas, estribos y tableros de puentes. Se presentan dos tipos distintos de muros de hormigón armado in situ usados en la construcción de carreteras. Se aplica el algoritmo recocido simulado (SA), en primer lugar a un muro ménsula de 10,00 metros de altura, y en segundo lugar a un muro nervado de la misma altura. El primer modelo consta de 20 variables que definen la geometría estructural así como las características del

hormigón y los armados. El segundo modelo necesita 32 variables para su definición. Los parámetros son los mismos para los dos casos. Finalmente, se concluye que la optimización heurística es una buena herramienta para diseñar muros y comparar las distintas tipologías de proyecto, reduciendo los costes.

Palabras clave: Educación posgrado; Diseño estructural; Optimización; Algoritmos heurísticos; Estructuras de hormigón; Muros.

1. Introducción

Los estudios de ingeniería, tanto de grado como de posgrado, se enfrentan últimamente a grandes retos derivados del denominado proceso de Bolonia. La formación en ingeniería, ciencias y tecnologías constituye una prioridad para el desarrollo económico y un factor fundamental en el contexto europeo. Los cursos convencionales de posgrado suelen complementar los conocimientos y competencias no adquiridas en el grado previo. Sin embargo, muchas de las antiguas ingenierías superiores en España se están reconvirtiendo en estudios de grado al que habría que unir otros de posgrado para alcanzar la titulación de máster, nivel ampliamente reconocido en la mayoría de países europeos. En este caso se encuentra el Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón de la Universitat Politècnica de València que se inició en octubre de 2007 a partir del programa de doctorado del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, y que en este momento es uno de los pocos títulos de ingeniería reconocidos por el sello EUR-ACE®. El objetivo del artículo es presentar los aspectos más importantes de una asignatura de dicho máster denominada "Modelos predictivos y de optimización de estructuras de hormigón". Su contenido docente es consecuencia, en gran parte, del resultado del trabajo de investigación de los autores, constituyendo un claro ejemplo donde la docencia y la investigación se encuentran íntimamente relacionadas.

Desde su aparición a mediados de los cincuenta, la inteligencia artificial constituye un área de conocimiento que ha desarrollado en una amplia variedad de campos como son la programación de proyectos, la solución de problemas de optimización condicionados, la investigación operativa, la planificación de operaciones, la logística y las redes de transporte, entre otras. El diseño de las estructuras constituye un campo fecundo donde la inteligencia artificial se aplica de forma satisfactoria. Se puede entender el diseño como una secuencia de toma de decisiones que desembocan en la mejor selección de variables capaces de satisfacer todas las demandas resistentes y funcionales a las que está sometida la estructura y, a su vez, ser capaz de optimizar un conjunto de criterios de diseño.

En este contexto, las técnicas de optimización en el diseño de estructuras de hormigón conducen a diseños eficientes, por lo que resulta de gran interés su aplicación. Dichas técnicas pueden clasificarse en exactas y aproximadas. Las primeras se basan fundamentalmente en la programación matemática y permiten alcanzar el óptimo global de un problema condicionado (Fletcher, 2001 y Hernandez, et al. 2002). Estos métodos son muy eficientes para unas pocas variables de diseño, pero el tiempo de cálculo computacional llega a ser prohibitivo para un gran número de ellas, como ocurre en la mayoría de estructuras reales. Sarma y Adeli (1998) aportan una amplia revisión de artículos relacionados con la optimización de estructuras de hormigón. El segundo grupo de técnicas incluyen a las heurísticas, cuyo desarrollo reciente está unido a la evolución de los procedimientos de inteligencia artificial. Estos métodos incluyen una amplia variedad de algoritmos de búsqueda, como los algoritmos genéticos (Holland, 1975), el recocido simulado (Kirkpatrick, et al. 1983), las colonias de hormigas (Dorigo, et al. 1996), las nubes de partículas (Kenedy, et al. 1995), y otros. Las técnicas heurísticas se han aplicado satisfactoriamente en áreas distintas a la

ingeniería estructural, por ejemplo en hidráulica, planificación de proyectos y en transporte (Yepes y Medina, 2006).

Se puede encontrar una amplia revisión de distintos métodos de optimización estructural en el trabajo de Cohn y Dinovitzer (1994). En cuanto a las estructuras de hormigón armado, las primeras aplicaciones heurísticas se centraron tanto en la optimización de vigas apoyadas de hormigón armado (Coello, et al. 1997) como en el estudio de pórticos de hormigón armado tridimensionales (Balling y Yao, 1997). Recientemente, nuestro grupo de investigación ha empleado algoritmos heurísticos en la optimización económica y en emisiones de CO₂ de muros, bóvedas y marcos de puentes, pórticos de edificación, pilas de puentes y tableros de puentes de carreteras de hormigón pretensado in situ y prefabricados (Yepes, et al. 2008, 2012, 2015; Perea, et al. 2010; Paya, et al. 2010; Martínez, et al. 2010; Martí, et al. 2010, 2013, 2015; García-Segura, et al. 2014), donde se pueden encontrar referencias bibliográficas adicionales.

Este artículo, tras realizar una descripción global del curso de posgrado, presentará un estudio de caso centrado en la optimización de dos tipos de muros: muros ménsula y muros nervados. Para ello se describirán los algoritmos utilizados y dos ejemplos prácticos donde se expone claramente el nexo entre el contenido docente y la investigación realizada. El resultado del análisis es directamente aplicable por los alumnos tanto en sus futuras investigaciones con casos similares como en su práctica profesional.

2. Panorámica general del curso

El curso de posgrado que presentamos tiene como objetivo proporcionar a los alumnos las competencias, destrezas y conocimientos necesarios para aplicar las técnicas de optimización heurística al diseño del hormigón estructural. No obstante, el curso permite extender fácilmente las habilidades adquiridas a otros campos de la ingeniería o de la administración de empresas como la programación de proyectos, las redes de transporte o la planificación hidráulica. La docencia se estructura en los partes que, en apretada síntesis, se esbozan a continuación.

Las clases presentan una primera parte centrada en la descripción, análisis y discusión de los algoritmos de optimización heurística más empleados en el campo de las estructuras y una revisión de las últimas novedades. En la Sección 3 se han descrito brevemente, y a modo de ejemplo, dos de las técnicas heurísticas frecuentemente empleadas y que luego se han aplicado en las Secciones 4 y 5. En este sentido, los autores entienden que la docencia de las técnicas se entiende mejor si éstas se dividen en dos grupos: los algoritmos basados en la búsqueda local por entornos y aquellos otros que se basan en poblaciones de soluciones. Tanto unas como otras heurísticas constituyen métodos aproximados que permiten encontrar buenas soluciones en tiempos de cálculo razonables. Esta razón justifica su uso en las estructuras reales, donde el elevado número de variables provoca que los métodos exactos fuesen impracticables. En cuanto a la función objetivo de la optimización, ésta suele ser el coste económico, aunque no existe ningún problema en atender a otro tipo de objetivos como la reducción del CO₂ emitido a la atmósfera, la reducción energética en la ejecución de la estructura, la mejora de la seguridad o de la constructibilidad.

La segunda parte del curso se centra en la aplicación de los métodos heurísticos a estructuras reales de hormigón estructural, donde los autores han adquirido una amplia experiencia de diseño fundamentada en la investigación realizada en los últimos años. Las estructuras consideradas incluyen muros de contención de tierras, pórticos, marcos y bóvedas de paso inferior de carreteras, pilas de puentes de sección rectangular hueca y tableros de puentes de hormigón pretensado. Resulta evidente que una estructura definida al azar va a ser difícil que cumpla con todos y cada uno de los estados límite que definen la restricción del problema. Es en este momento cuando al alumno se le hace ver la dificultad intrínseca del problema que

está manejando. Normalmente la combinación de posibles soluciones en base a las posibilidades que brinda los valores que puede adquirir cada una de las variables es suficientemente alto como para considerar el problema como intratable desde el punto de vista computacional. De hecho, la generación totalmente aleatoria de soluciones –estrategia denominada “random walk”- y la elección de la mejor de las soluciones visitadas, muchas veces hace difícil encontrar, siquiera, una solución factible. Además, salvo por puro azar, la mejor de las soluciones presenta una valoración de su función objetivo mediocre. Ello justifica la necesidad del uso de otros algoritmos más eficaces, como aquellos que hemos descrito en las secciones 4 y 5.

Uno de los aspectos docentes clave del curso es hacer comprender a los alumnos que la aplicación directa e inmediata de los resultados obtenidos por el software de optimización requiere de la supervisión y del sentido común de un ingeniero experimentado. Este aspecto resulta crucial para evitar patologías o problemas posteriores en el caso de la construcción de este tipo de estructuras. Así por ejemplo, algunas estructuras óptimas resultan tan esbeltas que el sentido común lleva a tener que aplicar estados límite de deformación máxima. En otras ocasiones, estados límite poco determinantes como la fatiga resulta ser los estados limitantes en las estructuras óptimas. Por todo ello, la optimización heurística es un proceso que requiere en el diseño la participación conjunta de la máquina y del hombre, considerando que, en numerosas ocasiones, existen aspectos como la estética, que difícilmente es cuantificable en un modelo matemático. El diseño implica un compromiso entre las condiciones particulares objetivas y subjetivas de una estructura individual (Schlaich y Scheef, 1982). Con todo, los resultados de este esfuerzo en la investigación de las estructuras son de gran valor para la práctica de los ingenieros, siendo éste el objeto subyacente del curso.

3. Aplicación de algoritmos de optimización heurística (SA)

En este estudio, el problema de la optimización estructural se enmarca en una optimización mono-objetivo del coste de la estructura. Por lo tanto, esta optimización apunta a reducir al mínimo la función objetivo f_1 o Eq. (1) mientras que satisface las restricciones de Eq. (2).

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

$$g_j(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad (2)$$

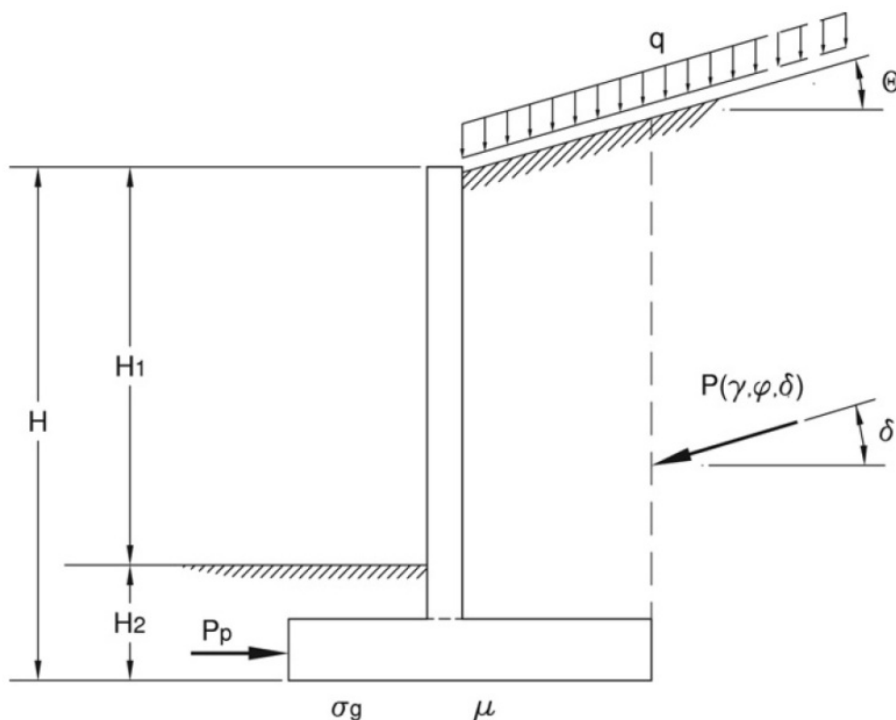
Obsérvese que x_1, x_2, \dots, x_n son las variables del diseño elegidas para la formulación. La heurística aplicada al problema se denomina “recocido simulado” (simulated annealing SA). El algoritmo se utilizó por primera vez por Kirkpatrick et al. (1983) para el diseño de circuitos electrónicos. El término “recocido” al que hace referencia el método es el proceso consistente en calentar y enfriar un material de manera controlada. Si existe un descenso suave de la temperatura, el metal adquirirá una estructura cristalina que corresponderá a un estado termodinámico de mínima energía. Si se enfría demasiado rápido, las moléculas pueden llegar a estados meta-estables, sin alcanzar configuraciones adecuadas. Este símil termodinámico es el que ha permitido el diseño de un algoritmo de optimización heurística, considerando que los estados alcanzados son cada una de las soluciones y que la energía es la función objetivo. El criterio de aceptación de nuevas soluciones está gobernado por la expresión de Metropolis et al. (1953) $\exp(-\Delta E/T)$, donde ΔE es el incremento del coste y T es un parámetro denominado temperatura. El algoritmo comienza con una solución generada aleatoriamente y con una temperatura inicial elevada. La solución de trabajo inicial se modifica por un pequeño movimiento al azar de los valores de las variables. La nueva solución se comprueba en términos de coste, aceptándose algunas de mayor coste cuando un número aleatorio entre 0 y 1 es más pequeño que la expresión $\exp(-\Delta E/T)$. Dicha solución se comprueba estructuralmente, y si es factible se adopta como nueva solución. La temperatura inicial se

reduce geométricamente ($T=kT$) por medio de un coeficiente de enfriamiento k . En cada paso de temperatura se ejecutan un número determinado de iteraciones denominado *Cadena de Markov*. El algoritmo se detiene cuando la temperatura queda reducida a un porcentaje pequeño de la temperatura inicial y, simultáneamente, no hay mejoras en un número consecutivo de cadenas de Markov (típicamente 1% ó de 1 a 2 Cadenas de Markov). Este método, es capaz de sobrepasar óptimos locales en temperaturas de rango alto-medio para converger gradualmente cuando la temperatura se reduce a cero. El método del SA requiere la calibración de la temperatura inicial, de la longitud de las Cadenas de Markov y del coeficiente de enfriamiento. En el ejemplo que sirve de muestra en el presente artículo, los parámetros que gobiernan la heurística se obtuvieron de la forma que se explica a continuación. Se ejecutaron varios procesos de optimización obteniéndose el valor mínimo, la media y la desviación estándar de los resultados respecto al coste óptimo logrado.

4. Caso de estudio 1. Muro ménsula de hormigón armado

Los muros ménsula de contención de tierras (Figura 1) constituyen una de las estructuras más frecuentes en la construcción de obras civiles y de edificación. El proyecto de estos elementos de contención constituye un problema de interacción entre el suelo y la estructura cuya finalidad consiste en retener un material de forma suficientemente segura y económica. Tradicionalmente se diseñan habitualmente con un espesor en la base del alzado que es igual a 1/10 de su altura. El predimensionado del espesor de la zapata suele ser de 1/10 de la altura del alzado. La anchura de la zapata normalmente oscila entre el 50 y el 80% de la altura del muro. La sistemática empleada en el trabajo consiste, en primer lugar, en el desarrollo de un módulo de evaluación donde las dimensiones, materiales y armaduras se consideran como variables.

Figura 1: Geometría muro ménsula



El análisis incluye un total de 20 variables discretas (Tabla 1 y Figura 2), de las cuales 4 son

geométricas, 4 están relacionadas con el tipo de hormigón y acero en alzados y zapatas, y 12 describen los armados. Los parámetros son todos los valores fijados en el problema planteado y relacionan las acciones consideradas, valores geométricos, coeficientes parciales de seguridad y datos de la durabilidad. La Tabla 2 proporciona una relación de los parámetros principales aplicados al caso y sus valores.

Figura 2: Variables consideradas en la definición del muro

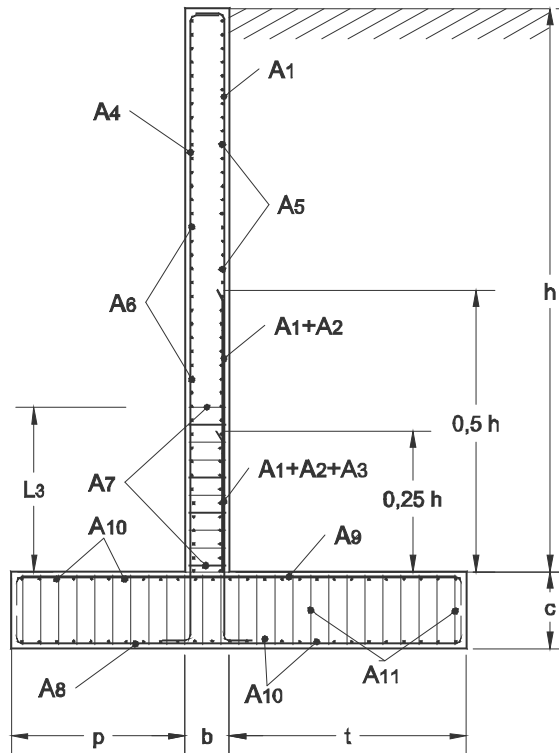


Tabla 1. Variables del muro ménsula

Variables	
Variables geométricas	
b	Espesor del alzado [m].
p	Longitud de la puntera de la zapata [m].
t	Longitud del talón de la zapata [m].
c	Espesor de la zapata [m].
Variables relativas a los materiales	
$f_{ck,alz}$	Resistencia característica del hormigón en el alzado [N/mm^2].
$f_{ck,cim}$	Resistencia característica del hormigón en la zapata [N/mm^2].
$f_{yk,alz}$	Límite elástico del acero en el alzado [N/mm^2].
$f_{yk,cim}$	Límite elástico del acero en la zapata [N/mm^2].
Variables relativas a la armadura	
A ₁	Cuantía armadura vertical en trasdós del alzado [cm^2/m].
A ₂	Cuantía armadura vertical en primer refuerzo del trasdós del alzado [cm^2/m].
A ₃	Cuantía armadura vertical en segundo refuerzo del trasdós del alzado [cm^2/m].
A ₄	Cuantía armadura vertical en intradós del alzado [cm^2/m].
A ₅	Cuantía armadura horizontal en trasdós del alzado [cm^2/m].
A ₆	Cuantía armadura horizontal en intradós del alzado [cm^2/m].

A ₇	Cuantía armadura de cortante en alzado [cm ² /m ²].
A ₈	Cuantía de armadura transversal inferior de zapata [cm ² /m].
A ₉	Cuantía de armadura transversal superior de zapata [cm ² /m].
A ₁₀	Cuantía de armadura longitudinal de zapata [cm ² /m].
A ₁₁	Cuantía de armadura de cortante en cara zapata [cm ² /m ²].
L ₃	Longitud de la zona armada a cortante [m].

Tabla 2. Parámetros principales y valores considerados

Parámetros principales del muro	
Parámetros geométricos	
H	Altura del muro: 10m
H ₂	Profundidad de cimentación: 2,0m
Parámetros relativos a cargas y parámetros geotécnicos	
q _{sc}	Sobrecarga sobre la coronación del trasdós: 10 kN/m ²
γ _{ap}	Peso específico aparente del relleno del trasdós: 20 KN/m ³
φ	Ángulo de rozamiento interno del material de relleno: 30°
δ	Ángulo de rozamiento del material de relleno con el hormigón del trasdós: 0°
M	Coefficiente de rozamiento del material de la cimentación con la zapata: tg 20
σ _{adm}	Tensión admisible del terreno de cimentación: 300 kN/m ²
Parámetros relativos a los coeficientes de seguridad exigidos a la estructura	
Γ _{sv}	Coefficiente de seguridad a vuelco: 1,8
Γ _{sd}	Coefficiente de seguridad a deslizamiento: 1,6
CTR	Nivel de control de ejecución: normal
γ _c	Coefficiente de seguridad del hormigón en estado límite último: 1,50
γ _s	Coefficiente de seguridad del acero en estado límite último: 1,15
f/a	Limitación de flecha en alzado: 1/125
Parámetros relativos al grado de exposición de la estructura	
A _{alz}	Tipo de ambiente en el alzado: IIa
A _{cim}	Tipo de ambiente en la zapata: IIa
Parámetros relativos a los refuerzos de las armaduras en alzado	
L ₁	Longitud del primer refuerzo del trasdós del alzado [m], igual a ½ del alzado.
L ₂	Longitud del segundo refuerzo del trasdós del alzado [m], igual a ¼ del alzado.

La función objetivo cuantifica el coste por metro lineal de muro como la suma de los productos de los precios unitarios de las unidades de obra por sus mediciones (Eq. 1). Las unidades de obra son consecuencia del proceso constructivo previsto para la ejecución del muro, mostrándose en la Tabla 3 los precios unitarios. Todos los valores aplicados a este caso 1 se corresponden con los del trabajo de Yepes et al. (2008).

Las restricciones g_j en la ecuación (2) contempla todos los estados límite de servicio (ELS) y los estados límite últimos (ELU) que debe satisfacer la estructura, así como las limitaciones geométricas y de constructibilidad del problema. Este estudio sólo se limita a soluciones viables sin tomar en consideración las no factibles. Se ha considerado para el cálculo de la comprobación del muro: para el empuje de tierras la teoría de Rankine (Jimenez Salas et al. 1981), la Norma Española de Hormigón Estructural del Ministerio de Fomento (2008), criterios de cálculo de Calavera (2001) y la Guía de cimentaciones en obras de carretera del Ministerio de Fomento (2009).

Tabla 3. Precios básicos en muros

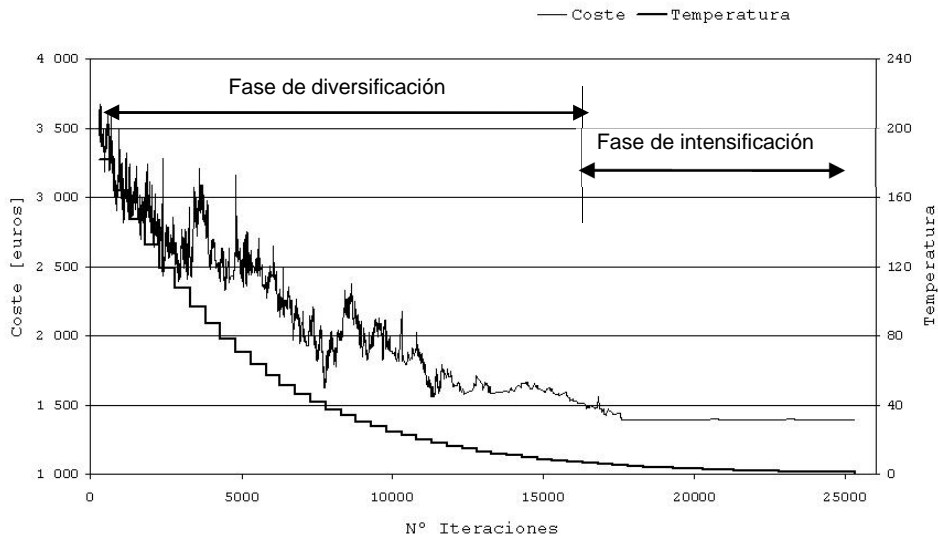
Unidad	Precio unitario	
	Ménsula	Nervados
Excavación en cimientos	3.01 €/ m ³	3.01 €/ m ³
Encofrado en cimientos	18.03 €/ m ²	18.03 €/ m ²
Encofrado alzados	18.63 €/ m ²	21.61 €/ m ²
Acero en armaduras B-500S	0.58 €/ kg	0.58 €/ kg
Acero en armaduras B-400S	0.56 €/ kg	0.56 €/ kg
Hormigón HA-25 colocado en cimientos	50.65 €/ m ³	50.65 €/ m ³
Hormigón HA-30 colocado en cimientos	54.79 €/ m ³	54.79 €/ m ³
Hormigón HA-35 colocado en cimientos	59.31 €/ m ³	59.31 €/ m ³
Hormigón HA-40 colocado en cimientos	64.40 €/ m ³	64.40 €/ m ³
Hormigón HA-45 colocado en cimientos	69.21 €/ m ³	69.21 €/ m ³
Hormigón HA-50 colocado en cimientos	74.02 €/ m ³	74.02 €/ m ³
Hormigón HA-25 colocado en alzados	56.66 €/ m ³	56.66 €/ m ³
Hormigón HA-30 colocado en alzados	60.80 €/ m ³	60.80 €/ m ³
Hormigón HA-35 colocado en alzados	65.32 €/ m ³	65.32 €/ m ³
Hormigón HA-40 colocado en alzados	70.41 €/ m ³	70.41 €/ m ³
Hormigón HA-45 colocado en alzados	75.22 €/ m ³	75.22 €/ m ³
Hormigón HA-50 colocado en alzados	80.03 €/ m ³	80.03 €/ m ³
Relleno en trasdós	4.81 €/ m ³	5.56 €/ m ³
Relleno en intradós	4.81 €/ m ³	4.81 €/ m ³

Se aplicó el algoritmo de SA a un muro de hormigón armado de 10 m de altura y el resto de valores de los parámetros de la Tabla 2. El algoritmo fue programado en Visual Basic 6.3 dentro de una hoja de cálculo MS Excel 2002, en un ordenador con procesador Pentium IV a 3.2 GHz. El tiempo medio de computación fue de 22 minutos de uso medio de CPU para cada caso analizado con la metaheurística. Para la calibración de los parámetros del SA se consideraron distintos movimientos de las variables, longitudes de cadenas, coeficientes reductores de temperatura, valores iniciales de la temperatura recomendándose los valores siguientes: Variación simultánea de 14 de las 20 variables totales, longitud de Cadena de Markov de 1000, coeficiente reductor de la temperatura del 0,85, valor inicial de la temperatura igual a 1/20 del coste de la primera solución, ajustándose al método propuesto por Medina (2001), y el criterio de parada, alcanzar una temperatura de 0.01% respecto de la inicial. El número de procesos de 9 para una desviación estándar del 2,51%.

La heurística aplicada, inicialmente acepta soluciones con cierta facilidad, aumentando su dificultad conforme avanza el proceso y se va reduciendo la temperatura. Se muestra la evolución del coste en relación al número de iteraciones en la Figura 3. Se puede observar cómo se reduce rápidamente el coste de la solución en la primera parte de la fase de diversificación, hasta las 7500 iteraciones, y cómo a partir de las 15000 hasta las 25000 la reducción es escasa (fase de intensificación).

El coste medio obtenido es 1981 euros/m. El espesor del alzado del muro b es de 0,99 m, el canto de la zapata c es de 1,74 m, la longitud de la puntera p es de 1,20 m, la longitud del talón t es de 3,02 m, los hormigones en alzados y zapata son HA25, y los aceros en ambos casos son B500. Las cuantías de hormigón son de 18,85 m³/m, y las cuantías de acero son de 57,65 kg/m³ de hormigón, equivalente a 1086 Kg/m de muro.

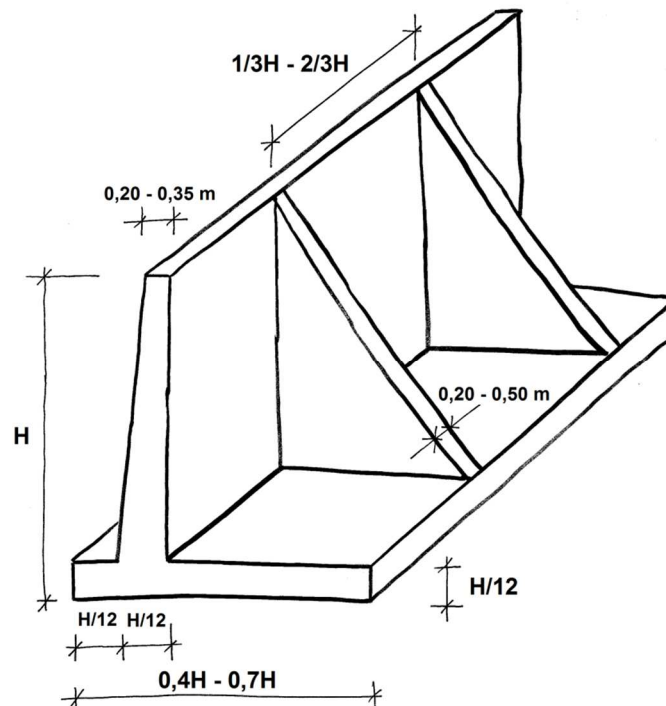
Figura 3: Evolución tipo de un algoritmo SA



5. Caso de estudio 2. Muro nervado de hormigón armado

Cuando la altura de un muro ménsula empieza a ser importante, la dimensión de la sección del alzado y por tanto, el volumen de hormigón requerido, empieza a crecer considerablemente. A partir de unos 8 m de altura, los muros con contrafuertes compiten económicamente con los muros ménsula, a pesar de que el ferrallado, el encofrado, y el relleno de tierras trasdós sean más laboriosos.

Figura 4: Predimensionado tipo de un muro nervado



El alzado de estos muros resiste los empujes del terreno como una losa continua apoyada en los contrafuertes (Figura 4). Los contrafuertes suelen situarse en la zona del trasdós por motivos estéticos, funcionando la losa frontal como cabeza de una sección en T para resistir los momentos flectores producidos por los empujes (Calavera, 2001). Las aplicaciones de esta estructura son diversas. Son abundantes en obra civil para pasos superiores e inferiores de carreteras, o como muros de contención de taludes. Otras aplicaciones se tienen en obras de ferrocarril, como estribos de pasos a distinto nivel, muros de contención de taludes o de la plataforma ferroviaria, etc.

Cada solución queda completamente definida por 32 variables de diseño (Figuras 5 y 6). Se incluyen entre ellas seis variables geométricas, una variable que indica el tipo de hormigón, otra que indica el tipo de acero y 24 variables que indican la disposición del armado, todas ellas discretas. El canto de la zapata c oscila entre $H/20$ a $H/6$, con incrementos de 1 cm. El espesor del muro b y de los contrafuertes e_c , entre 25 y 224 cm, con incrementos de 1 cm. La puntera p , entre 20 y 219 cm, con incrementos de 1 cm. El talón t entre 20 y 619 cm, con incrementos de 1 cm. La distancia entre los contrafuertes d , entre $H/4$ y $H/2$, con incrementos de 1 cm. Las variables que definen la resistencia característica de los hormigones varían entre 25 MPa a 50 MPa, en escalones de 5 MPa. Las armaduras pueden ser B400 o B500. Por último, son necesarias 24 variables para definir la disposición del armado.

Figura 5: Variables geométricas (sección) y de armado

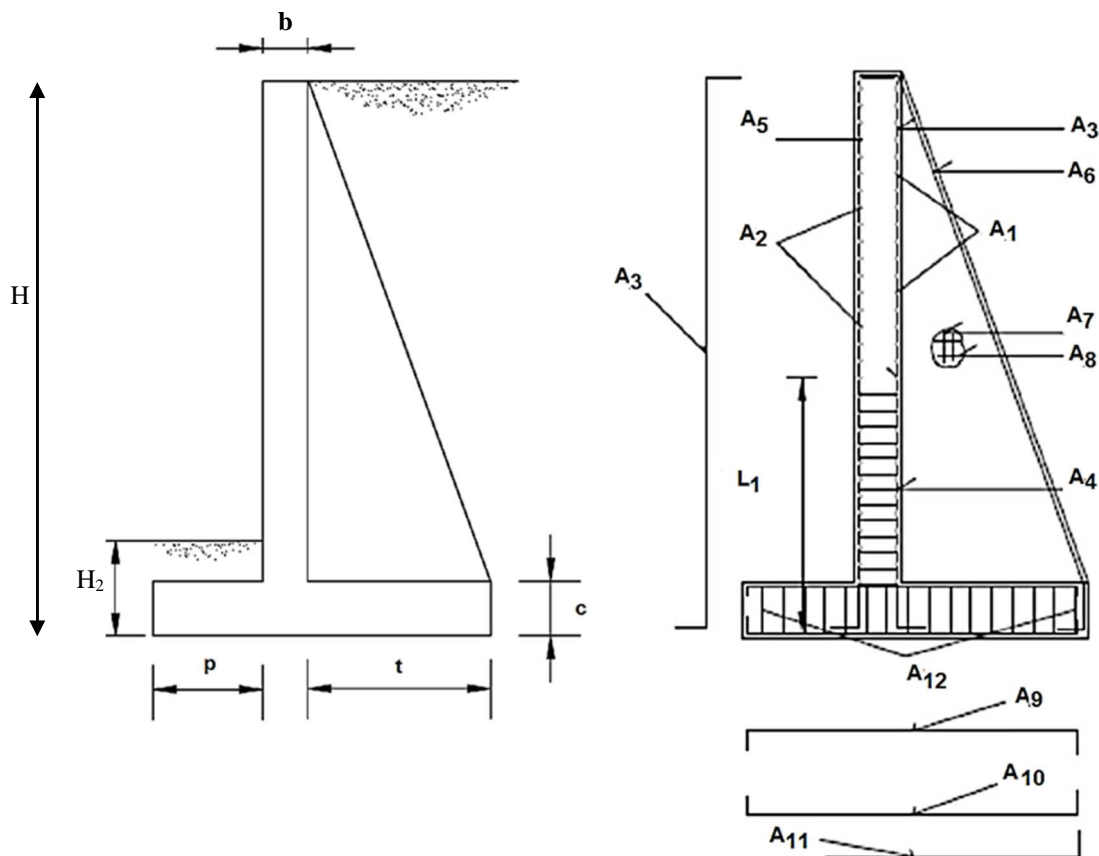
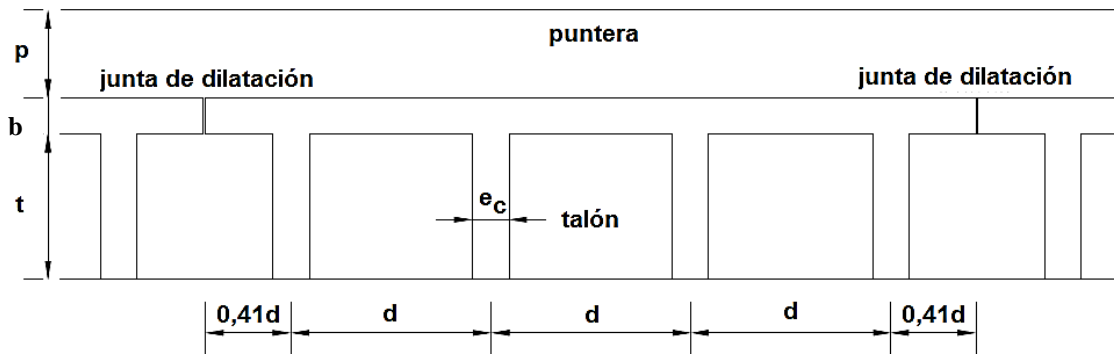


Figura 6: Variables geométricas (planta)



Los parámetros aplicados al estudio son los mismos que los definidos para el Caso 1 (Tabla 2). Lo mismo ocurre con las restricciones estructurales, aplicándose para el cálculo de las comprobaciones la teoría de Rankine para materiales granulares sin cohesión, distribución rectangular de las tensiones del terreno en cimentación, recomendaciones de cálculo de Calavera (2001), y la normativa española del Ministerio de Fomento (2008, 2009).

Los precios básicos de las unidades de obra han sido los mismos que los aplicados para el muro ménsula (Tabla 3), pero teniendo en cuenta el mayor esfuerzo en la realización de alguna de las actividades, como encofrados de alzado y rellenos trasdós, donde se ve incrementada la mano de obra, no así los materiales, para poder salvar las dificultades de la geometría quebrada. En estos casos se ha incrementado la mano de obra y la maquinaria en un 50%.

El algoritmo aplicado aquí prácticamente es el mismo que el utilizado por Yepes et al. (2008) para el Caso 1, pero se ha calibrado teniendo en cuenta por un lado, el avance tecnológico producido en los últimos años en los que los ordenadores personales han mejorado su rendimiento, y en la consideración del número de variables más adecuado en su movimiento simultáneo, que depende del problema. Con todo se ha pretendido que el tiempo de proceso fuera comparable, por lo que el número de Cadenas de Markov a pasado de 1000 a 10000 y el número de variables movidas simultáneamente que mejores resultados han producido han sido 3. El algoritmo fue programado en MATLAB versión R2013a. Un ordenador personal con un procesador INTEL® Core TMi7 CPU X980 con 3,33 GHz necesitó alrededor de 3 minutos de media para procesar el algoritmo. Con todo, el número de movimientos realizados por el algoritmo han sido unos 340000, muy superior a los realizados con los muros ménsula, que ha sido sobre 25000, por lo que con un tiempo 7 veces inferior permite realizar 13 veces más movimientos, permitiendo una exploración en el espacio de soluciones muy superior, mejorando considerablemente los resultados obtenidos. Se procesaron 9 ejecuciones y en la Figura 7 se representa la evolución del algoritmo con los valores aceptados y los valores record en función del número de movimientos para la heurística que ha dado mejores resultados, 1242 €, siendo la desviación de la media respecto a este valor del 1,02%. Se observa la evolución de los resultados, mejorando con facilidad hasta el movimiento 175000, fase de diversificación, y mejorando escasamente a partir de ahí hasta el final, fase de intensificación. Los valores medios obtenidos son los de la Tabla 4.

Figura 7: Evolución del algoritmo SA en los muros nervados

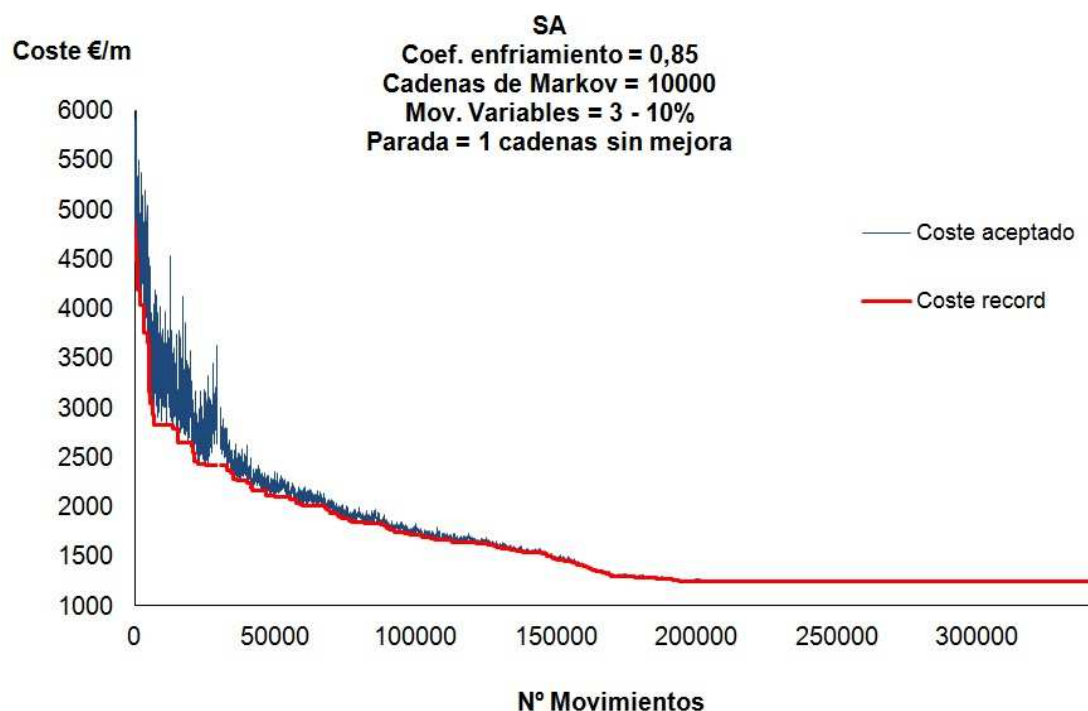


Tabla 4. Valores de las variables principales de los muros nervados

Resultado	Valor
Coste	1267€/m
Canto de la zapata	0,55 m
Espesor del muro	0,26 m
Longitud de la puntera	0,36 m
Longitud del talón	4,32 m
Espesor del contrafuerte	0,25 m
Distancia entre contrafuertes	4,49 m
Tipo de hormigón	HA25
Tipo de acero	B500
Volumen de hormigón	6,33 m ³ /m
Peso de acero	356 kg/m
Ratio acero/hormigón	56,24 kg/m ³

Comparando los resultados entre ambas tipologías para una altura de 10 m, se consideran las siguientes observaciones:

- Los hormigones, HA25, y los aceros, B500, son los mismos para las dos tipologías.
- El muro nervado resulta apreciablemente más económico, pero si bien hay que tener en cuenta que la exploración de soluciones para la misma heurística ha sido más de 7

veces superior.

- Aunque las longitudes de las zapatas son muy similares, el espesor de la zapata y el canto del muro son muy inferiores en los nervados, por lo que a pesar de disponer de contrafuertes cada 4,49 m, como su espesor es escaso, el volumen del hormigón es mucho menor en los nervados.
- El ratio del acero respecto al hormigón es similar, 56,24 Kg/m³ en nervados, comparándolo con los 57,65 kg/m³ en ménsula.

6. Conclusiones

Este artículo ha descrito los principales elementos de un curso posgrado sobre técnicas metaheurísticas aplicadas al diseño automatizado de estructuras de hormigón. El curso, que forma parte del Máster Universitario en Ingeniería del Hormigón de la Universitat Politècnica de València, comprende los algoritmos de optimización básicos y su aplicación a ejemplos prácticos de estructuras de hormigón. Dentro del campo de la investigación, en este curso se han presentado algunos algoritmos aplicados a casos concretos. En particular, el trabajo contiene la optimización económica de un muro ménsula y un muro nervado, ambos de 10 metros de altura, utilizados muy comúnmente en ingeniería de la obra pública. Los métodos metaheurísticos aplicados indican que se producen ahorros de entre el 5 y el 20% respecto a los métodos tradicionales de diseño. En la comparación de las dos tipologías, el resultado ha sido el esperado para la altura de muro estudiada, si bien la diferencia en coste ha sido superior a la prevista, motivado principalmente por el superior barrido del espacio de soluciones en el caso de los muros nervados, más de 7 veces. Conforme a la experiencia de los autores, como parte de su trabajo de investigación, indican que es necesario realizar una comprobación detallada de la funcionalidad de los diseños de las estructuras obtenidas. Además, los autores señalan que el desarrollo del software de diseño automatizado por ingenieros inexpertos podría producir modelos de diseño cuya constructibilidad fuera discutible. Es más, el desarrollo del software requiere ingenieros experimentados que puedan ser críticos y descubrir las desventajas funcionales de las estructuras diseñadas. No se deben tomar como correctos los resultados obtenidos directamente del ordenador. Habría que añadir, que los modelos fiables obtenidos mediante técnicas heurísticas, han de ser el resultado final de un proceso continuo de desarrollo donde se critiquen las estructuras intermedias obtenidas.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación del Ministerio de Economía y Competitividad del Gobierno de España y Fondos FEDER (proyecto BIA2014-56574-R) y de la Universitat Politècnica de València (Proyecto de Investigación SP20120341).

8. Referencias

- Balling, R.J. and Yao, X. (1997). Optimization of reinforced concrete frames. *ASCE Journal of Structural Engineering* 1997, 123(2): 193-202.
- Calavera, J. (2001). Muros de contención y muros de sótano. 3ª Edición. Madrid: Intemac.
- Coello, C.A., Christiansen A.D. and Santos, F. (1997). A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams, *Engineering with Computers*; 13(4): 185-196.
- Cohn, M.Z. and Dinovitzer, A.S. (1994). Application of structural optimization. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120(2): 617-649.

- Dorigo M., Maniezzo, V. and Colorni, A. (1996). The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, 26(1): 29-41.
- Fletcher, R. (2001). *Practical methods of optimization*. Chichester: Wiley.
- García-segura, T.; Yepes, V.; Martí, J.V.; Alcalá, J. (2014). Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(7):1190 – 1205.
- Hernandez, S. and Fontan, A. (2002). *Practical applications of design optimization*. Southampton: WIT Press.
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Jiménez Salas, J.A., Justo, J.L., Serrano, A.A. (1981). *Geotecnia y Cimientos*. Tomo II. 2ª edición. Editorial Rueda, Madrid.
- Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks, IV, 1942-1948*, Piscataway, NJ, IEEE Service Center.
- Kirkpatrick, S., Gelatt C.D. and Vecchi, M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598): 671-680.
- Kirkpatrick, S., Gelatt C.D. and Vecchi, M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598): 671-680.
- Martí, J.V. and Gonzalez-Vidoso, F. (2010). Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 41(7-8): 916-922.
- Martí, J.V., González-Vidoso, F., Yepes, V. and Alcalá, J. (2013). Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing, *Engineering Structures* 48 342-352.
- Martí, J.V., Yepes, V., Gonzalez-Vidoso, F. (2015). Memetic Algorithm Approach to Designing Precast-Prestressed Concrete Road Bridges with Steel Fiber Reinforcement. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 141(2): 1-9.
- Martinez, F.J., Gonzalez-Vidoso, F., Hospitaler, A. and Yepes, V. (2010). Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections. *Computers & Structures*, 88(5-6):375-386.
- Medina, J.R. (2001). Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE*, 127(4), 213-221.
- Metropolis, N., Rosenbluth, A.W., Rosenbluth, M.N., Teller, A.H., & Teller, E. (1953). Equation of State Calculation by Fast Computing Machines. *Journal of Chemical Physics*, 21, 1087-1092
- Ministerio de Fomento (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural EHE*. Madrid.
- Ministerio de Fomento (2009). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. Madrid.
- Paya, I., Yepes, V., Gonzalez-Vidoso, F. and Hospitaler, A. (2010). On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing. *Meccanica*, 45(5): 693-704.
- Perea, C., Yepes, V., Alcalá, J., Hospitaler, A. and Gonzalez-Vidoso, F. (2010). A parametric study of optimum road frame bridges by threshold acceptance. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 17(6): 427-437.
- Schlaich, J. and Scheef, H. (1982). *Concrete box-girder bridges*. Zürich: IABSE.

- Sarma, K.C. and Adeli H. (1998). Cost optimization of concrete structures. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 124 (5): 570-578.
- Yepes, V. and Medina, J.R. (2006). Economic heuristic optimization for the heterogeneous fleet VRPHESTW. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 132(4): 303-311.
- Yepes, V., Alcala, J., Perea, C. and Gonzalez-Vidoso, F. (2008). A parametric study of earth-retaining walls by simulated annealing. *Engineering Structures*; 30(3): 821-830.
- Yepes, V.; González-Vidoso, F.; Alcalá, J.; Villalba, P. (2012). 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.
- 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.