

DISEÑO HEURÍSTICO DE PUENTES DE HORMIGÓN PRETENSADO COMO EJEMPLO DE DOCENCIA EN POSGRADO

J.V. Martí

J. Alcalá

V. Yepes

F. González-Vidosa

Universitat Politècnica de València, ICITECH (SPAIN)

Abstract

This paper deals with a short postgraduate course in automated design and economic optimization of concrete structures. The course forms part of a recent MSc course in Concrete Engineering which has started in October 2007. The course moves to the application of the heuristic 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 prestressed concrete road bridge decks typically used in public road construction are presented as practice cases. SA is firstly applied to a prestressed concrete precast pedestrian bridge. In second case, TA is applied to a posttensioned cast-in-place concrete road bridge deck. Finally, case studies indicate that heuristic optimization is a forthcoming option for improving the design costs of real prestressed structures.

Keywords: *Structural design; optimization; heuristic algorithms; prestressed concrete; road bridges*

Resumen

Este artículo describe la impartición de un curso de posgrado en el diseño automatizado y optimización económica de estructuras de hormigón. El contenido forma parte de un Máster en Ingeniería de Hormigón que comenzó en octubre de 2007. El curso aplica los algoritmos heurísticos al diseño práctico de estructuras reales de hormigón, tales como muros, pórticos y marcos de pasos inferiores de carreteras, pórticos de edificación, bóvedas, pilas, estribos y tableros de puentes. Se presentan como casos prácticos dos tableros de puente de hormigón pretensado usados en la obra pública de construcción de carreteras. En primer lugar, se aplica SA a un tablero de un puente peatonal de viga artesa de hormigón prefabricado. El segundo ejemplo aplica TA a un tablero de losa continua de hormigón postesado. Los casos estudiados indican que la optimización heurística es una buena opción para diseñar estructuras de hormigón pretensado reduciendo los costes.

Palabras clave: *Diseño estructural; optimización; algoritmos heurísticos; hormigón pretensado; puentes de carreteras*

1. Introducción

En los últimos años, tanto los estudios de grado como los de posgrado en ingeniería, están enfrentándose a grandes desafíos en España y en la mayor parte de Europa. 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 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 reciente Máster Oficial 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. El objetivo que pretende el presente artículo será presentar los aspectos más importantes de una asignatura de dicho máster centrada en la optimización heurística de estructuras de hormigón. El contenido docente de la misma es consecuencia 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, 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 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; Carbonell, *et al.*, 2011; Perea, *et al.*, 2008 y 2010; Paya, *et al.*, 2008, 2009 y 2010; Martínez, *et al.*, 2010; Martí, *et al.*, 2010), donde se pueden encontrar referencias bibliográficas adicionales.

El artículo, tras realizar una descripción global del curso de posgrado, presentará un estudio de caso centrado en la optimización de puentes. 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. Por todo ello, la optimización heurística es un proceso que requiere la participación conjunta de la máquina y del hombre en el diseño, 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 es de un gran valor para la práctica de los ingenieros, siendo éste el objeto subyacente del curso.

3. Aplicación de Algoritmos de Optimización Heurística

Los problemas de optimización estructural que se presentan en este trabajo como ejemplos de aplicación práctica del curso consisten en la minimización del coste representado como función objetivo F en la expresión (1), satisfaciendo también las restricciones de la expresión (2).

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1, r} p_i * m_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

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

3.1 El Recocido Simulado (SA)

Como ejemplo de heurística se describe el “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 Boltzmann $\exp(-\Delta E/T)$, 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 geoméricamente ($T=kT$) 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. La temperatura inicial se ajustó aplicando un método similar al propuesto por Medina (2001). Se ejecutaron varios procesos de optimización obteniéndose el valor mínimo, la media y la desviación estándar de los resultados respecto al coste óptimo logrado.

3.2 Aceptación por umbrales (TA)

El segundo ejemplo de algoritmo aplicado en este trabajo es un método de búsqueda local denominado aceptación por umbrales (threshold accepting –TA–), que fue descrito, inicialmente por Dueck y Scheuer (1990) y por Moscato y Fontanari (1990), como una simplificación de la metaheurística SA. TA supera el problema de pararse en un mínimo local para llegar a una mejor solución aceptando soluciones de peor calidad dentro de un determinado umbral. En este caso, el criterio de aceptación de una solución peor a la anterior es de tipo determinístico, al contrario que en el caso de SA. TA comienza con una solución generada aleatoriamente y con un umbral inicial. Esta solución se modifica por un movimiento pequeño al azar de las variables. La nueva solución se evalúa en términos de coste. Se aceptan soluciones de mayor coste si el incremento se encuentra dentro del umbral de aceptación. La solución aceptada se comprueba estructuralmente, y si es factible se adopta como nueva solución. El umbral inicial decrece geométricamente conforme avanza la búsqueda por medio de un coeficiente k similar al de la temperatura del SA. Se denominan ciclos al número de iteraciones o movimientos que se realizan dentro del mismo umbral. El algoritmo finaliza cuando el valor del umbral de aceptación llega a un pequeño porcentaje del valor inicial (típicamente el 1%). El TA es capaz de sobrepasar óptimos locales en rangos de aceptación altos-medios para converger gradualmente cuando el umbral se acerca a cero. El método requiere una calibración del valor del umbral inicial de aceptación, la longitud de los ciclos y el coeficiente reductor del umbral. Se dan a continuación los valores adoptados en este trabajo. Del mismo modo que con el SA, el valor inicial del umbral se ajusta tal como propone Medina (2001). Como en el caso anterior, se realizaron varios procesos de optimización para obtener el coste mínimo, la media y la desviación estándar respecto al mejor resultado.

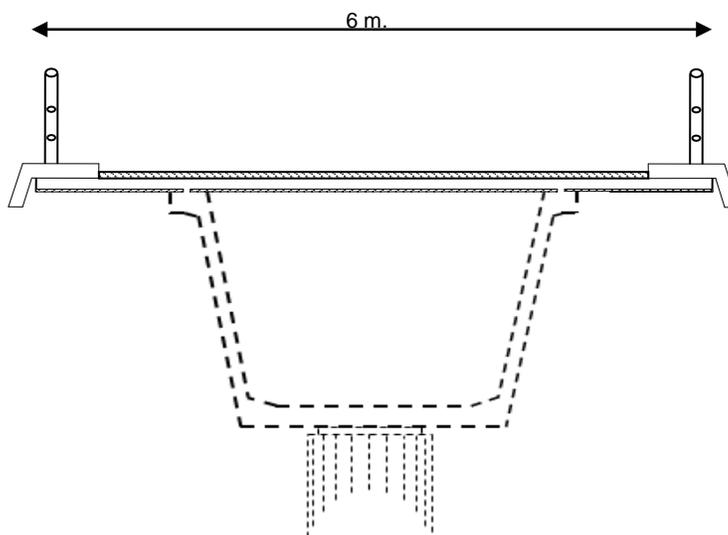
4. Caso de estudio 1. Puente peatonal de viga artesa de hormigón pretensado

El primer ejemplo se corresponde con una tipología de puente peatonal de viga artesa prefabricada construido habitualmente sobre las carreteras. Este puente, comúnmente conocido como pasarela, se ejecuta a partir de una viga pretensada prefabricada, que integra una losa de hormigón armado ejecutada in situ, dando servicio al tráfico peatonal. El análisis incluye 59 variables de diseño. Las variables contienen 7 valores geométricos: canto de la viga, espesor de la losa, espesor del ala inferior, de las alas superiores, el ancho del ala inferior, espesor de las almas y el ancho de las alas superiores de la viga; tipo de hormigón en la losa y también en la viga; 4 variables de la armadura activa: número de torones en las alas superiores y en el ala inferior de la viga y número de tramos con fundas en los niveles segundo y tercero de pretensado del ala inferior; 46 variables de la armadura pasiva longitudinal y transversal de la viga y la losa con una disposición estándar. Todas las variables son discretas en este análisis. El número total de parámetros es elevado, siendo los más importantes la luz libre de la pasarela, el ancho de la losa superior, la inclinación de las almas, las cargas muertas y sobrecargas que actúan en el puente, el tipo de acero utilizado en la armadura activa y pasiva, la exposición ambiental y los coeficientes parciales de seguridad.

Se aplican las restricciones estructurales estándares de la normativa española para el diseño de este tipo de estructuras (M. Fomento, 1998 y 2008), eso incluye las comprobaciones en estado último y de servicio a flexión cortante y torsión para las envolventes de la tensión debida a las cargas de tráfico y del pretensado. Como cargas del tráfico se considera una carga distribuida uniforme de 4 kN/m^2 . La carga muerta considerada es una carga distribuida uniforme de 2 kN/m^2 . Las tensiones y las reacciones se obtienen como resultado de un programa de desarrollo propio de elementos finitos que aplica la matriz de rigidez de un emparrillado en 2-D acoplado 20 barras que equivalen a 21 secciones. Las flechas se limitan a $1/1000$ de la luz para la combinación de cargas quasi-permanente. No se considera la fatiga del hormigón y del acero, puesto que para los puentes peatonales raramente se llega a este estado límite último.

Se aplicó el algoritmo de SA a un tablero 6 metros de ancho, formado por una losa de HA y una viga artesana de HP, y una luz de 40 metros (Fig. 1). Los coeficientes parciales de seguridad son de 1.50 para la carga variable, 1.35 para el peso propio y carga permanente, 1.00 para la acción del pretensado; 1.50 coeficiente de seguridad para el hormigón, 1.15 de seguridad para el acero pasivo y 1.00 para el acero activo.

Figura 1: Geometría de la sección del tablero de viga artesana

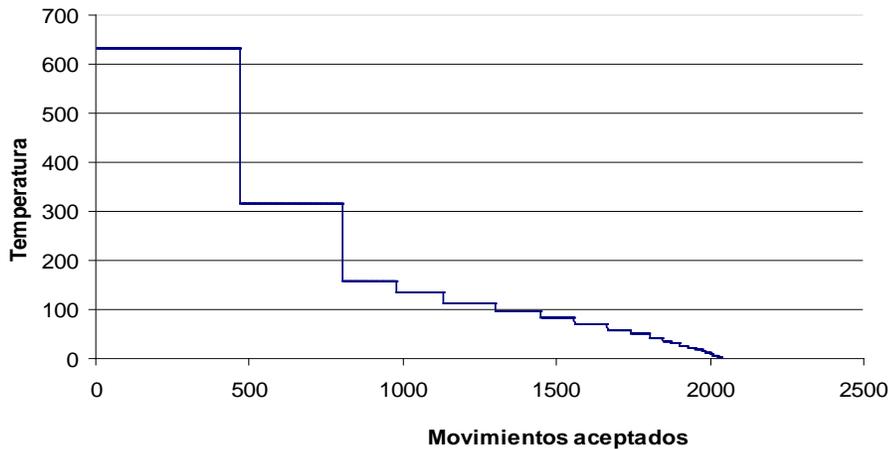


El algoritmo fue programado en Fortran 95 con compilador 6.6.0 de Compaq Visual-Fortran Professional. Los funcionamientos típicos de SA de 80.000 iteraciones duraron 260 minutos para un procesador Intel Core Duo E6850 (3.00GHz, 1333MHz, 4MB cache). La calibración de los parámetros de SA requerido duró cerca de 100 horas de cálculo y recomendó los valores siguientes: La temperatura inicial T_0 se ajustó siguiendo el método propuesto por Medina (2001), la longitud de la Cadena de Markov de 1000, el coeficiente reductor de la temperatura de 0.95, el número de cadenas sin mejora de 2 y el número de procesos de 9 para una desviación estándar de 1.61%.

La heurística aplicada, inicialmente acepta soluciones con cierta facilidad, aumentando su dificultad conforme avanza el proceso. Se observa en la Fig. 2 cómo se reduce el número de soluciones aceptadas conforme va disminuyendo la temperatura, de tal modo que en el primer escalón se aceptan casi el 25% del total de las soluciones. Con las primeras siete cadenas,

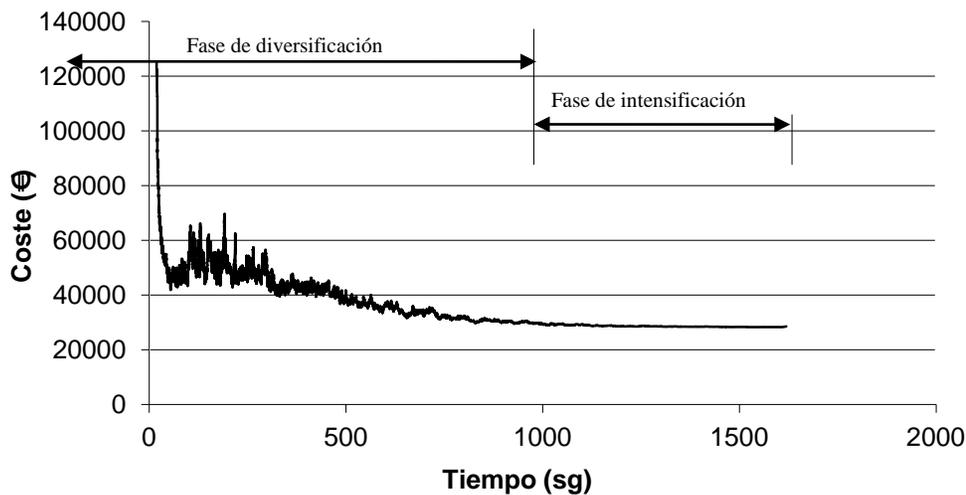
equivalente al 8.8% del tiempo total de proceso se obtienen más del 75% de las soluciones aceptadas. Con el 66% del tiempo de proceso se aceptan el 95% de las soluciones. La primera parte se corresponde con la fase de diversificación, y la segunda con la de intensificación.

Figura 2: Evolución del número de movimientos aceptados respecto a la temperatura.



Dichas fases quedan identificadas en la Fig. 3 donde se muestra la evolución del coste en relación al tiempo de proceso.

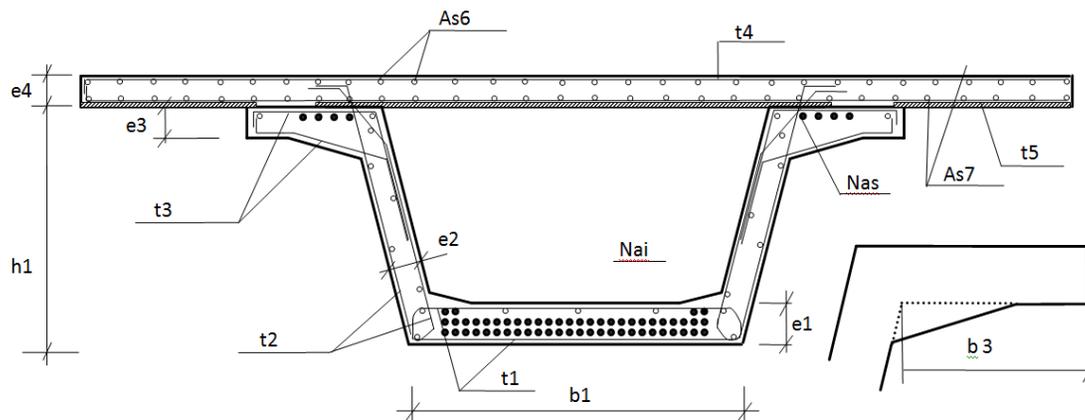
Figura 3: Evolución del coste de las soluciones aceptadas. Fases.



El coste de la mejor solución es 27,586 euros, sin incluir el transporte y colocación de la viga. El canto de la viga es de 2.95 metros, el espesor de la losa es de 0.15 metros, el ancho del ala

inferior es de 1.18 metros, el espesor del alma es de 0.10 metros, el número de torones de diámetro 0.6" en el ala inferior es de 29, y 3 en cada ala superior, el hormigón es HA-25 en losa y HP-35 en viga. La disposición de las armaduras activas y pasivas se representa en la Fig.4.

Figura 4: Disposición de las variables geométricas y de armado.



La armadura pasiva en la sección del apoyo se resume en la Tabla 1. El coste resultante de la mejor solución es de 112.14 € por metro cuadrado de tablero. Con el método SA se permite ahorrar aproximadamente un 5% respecto al método tradicional de diseño.

Tabla 1: Armadura pasiva en la sección de apoyo

As6	24Φ6
As7	24Φ6
t1	12Φ6/m
t2	12Φ6/m
t3	12Φ6/m
t4	8Φ10/m
t5	16Φ10/m

5. Caso de estudio 2. Puente losa de hormigón pretensado

El segundo ejemplo estudiado está relacionado con los tableros de puentes losa de hormigón postesado, típicamente utilizado en pasos superiores de carreteras. Debido a las excesivas deformaciones longitudinales que se producen bajo cargas constantes, y para evitar la fisuración producida bajo cargas repetidas, la mayoría de los tableros de puentes de hormigón son pretensados. Por lo tanto, el tablero analizado consiste en una losa pretensada con armadura activa adherente, aligerada y con sección transversal tipo ala de gaviota (Fig. 5). Esta estructura de hormigón se ejecuta con postesado in situ. El caso optimizado tiene tres vanos longitudinales de 20-36-20 m (Fig. 6) y una anchura total de 11 m.

Para la definición de un tablero losa son necesarias cinco variables (Fig. 5) para definir la sección transversal, una para definir el tipo de hormigón, otra para definir la cuantía de pretensado y veintiséis para definir la armadura pasiva, de acuerdo con un esquema de armado lógico y típico de este tipo de tableros, con las que queda determinado el diámetro y separación

de todas las barras de la estructura. Todas las variables de análisis son discretas. Los aligeramientos de la sección se disponen según la forma de su contorno exterior de forma unívoca, respetando criterios constructivos de separación a los bordes y de anchura de alma.

Figura 5: Sección tablero aligerado con ala de gaviota

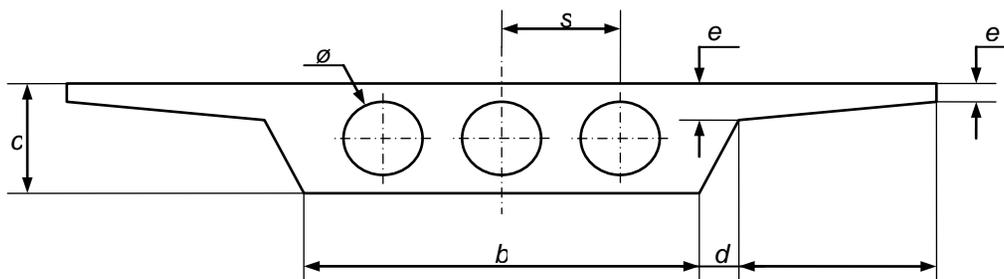
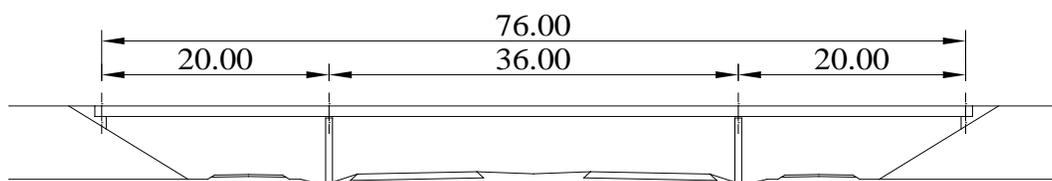


Figura 6: Perfil longitudinal del puente



La resistencia a tracción de los aceros son: 1860 MPa para la armadura activa y 500 MPa, para la pasiva. El número total de cables del pretensado es variable, y su sección es de 0.6 pulgadas. Una vez fijado el número de cables, éstos se distribuyen según el número de torones, de tal modo, que todos tengan el mismo número de cables. Además, los anclajes de los tendones deben espaciarse para que las placas de anclaje quepan en los extremos del puente. Los tendones se disponen siguiendo trazados curvos. El trazado medio de los cables tiene en la práctica pocas posibilidades de variación, y básicamente se trata de alcanzar las máximas excentricidades posibles en las secciones críticas del tablero.

Las 26 variables restantes que define cada tablero se refieren a las armaduras pasivas. Se utilizan diferentes criterios para distribuir las armaduras longitudinales respecto a las transversales. La primera se dispone en forma de un armado base corrido a todo el tablero, y un sistema de refuerzos en lugares estratégicos, tales como, armadura superior e inferior de núcleo y lateral de alma. La armadura transversal se ha tratado de otro modo. Las variables consisten en una armadura perimetral de núcleo, transversal superior, transversal inferior de voladizo y cercos de cortante distribuidos por el núcleo de la sección. El tablero se divide en zonas, dentro de las cuales la armadura transversal es constante, pero sí varía de unas zonas a otras. El criterio de separación de zonas es el siguiente: Cada vano se divide en tres tramos, siendo los extremos de longitud igual al 20% de la luz, y el central del 60% restante. Las zonas corresponden a estos tramos, pero se considera la misma zona en los extremos de dos vanos contiguos (sobre pilas). Cada una de estas armaduras en cada zona viene dada por su diámetro, y una separación que solamente puede ser de 10 cm, 12.5 cm ó 15 cm, o el doble de

estas cantidades. Todas las variables referentes a la armadura definen medio tablero, pues el armado es simétrico, tanto longitudinal como transversalmente.

Las restricciones estructurales impuestas al tablero son todas las preceptivas para este tipo de estructuras. De acuerdo con la norma española EHE-08 (2008) se incluyen las comprobaciones de los estados límite últimos de flexión, cortante, torsión, fatiga, efectos locales en el voladizo, y rasantes voladizo alma. También se incluyen comprobaciones de los estados límites de servicio de flechas y tensiones y fisuración, teniendo en cuenta las pérdidas tanto instantáneas como diferidas en el pretensado. La evaluación de esfuerzos se lleva a cabo sobre un modelo de viga formado por 10 elementos finitos unidimensionales en cada vano, suponiendo comportamiento elástico y lineal del hormigón. El modelo toma los tres grados de libertad por nodo, propio de emparrillados planos, y en él se incluye el efecto de las riostras transversales sobre apoyos, aunque se condensan los grados de libertad en la matriz de rigidez de la estructura. Sobre este modelo se hacen actuar las cargas definidas por la norma española IAP (M. Fomento, 1998): peso propio, cargas muertas, sobrecarga de uso, efectos térmicos verticales y asientos diferenciales. En la implementación del algoritmo de optimización se incorpora una subrutina que efectúa las comprobaciones sobre la solución de tablero a chequear, que está en ese momento totalmente definida.

El algoritmo TA propuesto fue programado en Fortran 95 con compilador 6.6.0 de Compaq Visual-Fortran Professional. Cada proceso TA consumía alrededor de 2.8 horas en procesador Intel Core 2 Quad CPU Q6600 (2.4 GHz, 3.21 GB RAM). En este caso, la calibración recomendada para el TA fue determinada con una longitud de ciclo de 20000 iteraciones y un coeficiente de reducción del umbral de 0.90. El criterio de parada fue llegar a una reducción del umbral inferior al 2% del umbral inicial, y sin obtener mejoras en dos movimientos consecutivos. Se ejecutaron 30 procesos de TA obteniéndose la mejor solución en el último. La Tabla 2 resume las características del tablero optimizado.

Tabla 2: Características del tablero óptimo

Luces de los vanos (m)	20-36-20
Canto del tablero (m)	1.45
Esbeltez	1/24.83
Anchura base del tablero (m)	4.40
Espesores del voladizo (m)	0.35-0.15
Tipo de hormigón	35 MPa
Composición del pretensado	8x16/0.6"
Coste (€/m ² tablero)	196.66
Hormigón (m ³ /m ² tablero)	0.58
Cuantía activa (kg/m ² tablero)	12.82
Cuantía pasiva (kg/m ² tablero)	63.52
Cuantía pasiva (kg/m ³ hormigón)	109.79
Cuantía pasiva longitudinal (kg/m ³ hormigón)	19.06 (17%)
Cuantía pasiva transversal (kg/m ³ hormigón)	90.73 (83%)

El tablero optimizado muestra, comparado con los valores típicos para esta tipología de diseño de puentes, una reducción del volumen de hormigón, una menor esbeltez, una menor cuantía de acero activo, que se encuentra relacionado con la generosidad del canto del tablero, y una

mayor cuantía de acero pasivo, especialmente en la armadura transversal. El método TA permite reducir el coste sobre un 7.5% con respecto a diseños basados en la experiencia de los calculistas de puentes.

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 de un nuevo Máster en Ingeniería del Hormigón, 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 dos puentes de hormigón pretensado utilizados muy comúnmente en ingeniería de la obra pública. Los métodos metaheurísticos aplicados indican que se producen ahorros de entre el 5 y el 7% respecto a los métodos tradicionales de diseño. 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 puede producir modelos de diseño cuya constructibilidad sea 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 expresan su agradecimiento al Ministerio de Ciencia e Innovación (proyecto de investigación BIA2011-23602) y a los fondos FEDER de la Unión Europea.

8. Referencias

- Balling R.J. and Yao X. Optimization of reinforced concrete frames. *ASCE Journal of Structural Engineering* 1997, 123(2): 193-202.
- Carbonell A, Gonzalez-Vidosa F. and Yepes V. Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization. *Advances Engineering Software* 2011; (in press).
- Coello C.A., Christiansen A.D. and Santos F. A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams, *Engineering with Computers* 1997; 13(4): 185-196.
- Cohn M.Z. and Dinovitzer A.S. Application of structural optimization. *ASCE Journal of Structural Engineering* 1994, 120(2): 617-649.
- Dorigo M., Maniezzo V. and Coloni A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B* 1996, 26(1): 29-41.
- Dueck G. and Scheuer T. Threshold accepting: A general purpose optimization algorithm superior to simulated annealing. *Journal of Computational Physics* 1990; 90: 161-175.
- Fletcher R. *Practical methods of optimization*. Chichester: Wiley, 2001.
- Hernandez S. and Fontan A. *Practical applications of design optimization*. Southampton: WIT Press, 2002.

- Holland J.H. Adaptation in natural and artificial systems. Ann Arbor: University of Michigan Press, 1975.
- Kennedy J. and Eberhart R. Particle swarm optimization. IEEE International Conference on Neural Networks, IV, 1942-1948, Piscataway, NJ, IEEE Service Center, 1995.
- Kirkpatrick S., Gelatt C.D. and Vecchi M.P. Optimization by simulated annealing. Science 1983, 220(4598): 671-680.
- M. Fomento. EHE: Code of Structural Concrete (in Spanish). Madrid: M.Fomento, 2008.
- M. Fomento. IAP-98: Code about the actions to be considered for the design of road bridges (in Spanish), Madrid: M.Fomento, 1998.
- Marti J.V. and Gonzalez-Vidoso F. Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization. Advances in Engineering Software 2010, 41(7-8): 916-922.
- Martinez F.J., Gonzalez-Vidoso F., Hospitaler A. and Yepes V. Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections. Computers & Structures 2010, 88(5-6):375-386.
- Medina J.R. Estimation of incident and reflected waves using simulated annealing, ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering 2001; 127(4): 213-221.
- Moscato P. and Fontanari J. Stochastic versus deterministic update in Simulated Annealing. Physics Letters A 1990; 146: 204-208.
- Paya I., Yepes V., Gonzalez-Vidoso F. and Hospitaler A. Multiobjective optimization of concrete frames by simulated annealing. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 2008; 23(8): 596-610.
- Paya I., Yepes V., Gonzalez-Vidoso F. and Hospitaler A. On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing. Meccanica 2010, 45(5): 693-704.
- Paya I., Yepes V., Hospitaler A. and Gonzalez-Vidoso F. CO₂-Efficient design of reinforced concrete building frames. Engineering Structures 2009, 31(7):1501-1508.
- Perea C., Alcalá J., Yepes V., Gonzalez-Vidoso F. and Hospitaler A. Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization. Advances Engineering Software 2008; 39(8): 676-688.
- Perea C., Yepes V., Alcalá J., Hospitaler A. and Gonzalez-Vidoso F. A parametric study of optimum road frame bridges by threshold acceptance. Indian Journal of Engineering & Materials Sciences 2010, 17(6): 427-437.
- Sarma K.C. and Adeli H. Cost optimization of concrete structures. ASCE Journal of Structural Engineering 1998, 124 (5): 570-578.
- Schlaich J. and Scheef H. Concrete box-girder bridges. Zürich: IABSE, 1982.
- Yepes V. and Medina J.R. Economic heuristic optimization for the heterogeneous fleet VRPHESTW. ASCE Journal of Transportation Engineering 2006, 132(4): 303-311.
- Yepes V., Alcalá J., Perea C. and Gonzalez-Vidoso F. A parametric study of earth-retaining walls by simulated annealing. Engineering Structures 2008; 30(3): 821-830.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Víctor Yepes Piqueras.

Phone: + 34 96 387 70 07 Ext. 75639

Fax: + + 34 96 387 75 69

E-mail: vyepesp@cst.upv.es