

Integración de investigación y docencia de posgrado a través del diseño eficiente de estructuras

Cristina Torres-Machí, Víctor Yepes, Julián Alcalá, Eugenio Pellicer
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
critorma@upv.es, vyepesp@upv.es, jualgon@upv.es, pellicer@upv.es

Abstract

Este artículo presenta, a partir de un caso práctico, la metodología docente empleada en un programa de máster en la que se introducen enfoques propios de la investigación a la formación de los alumnos de posgrado. A lo largo del curso, los alumnos aplican distintos algoritmos de optimización heurística en el diseño de una estructura de hormigón y analizan los resultados obtenidos con cada uno de ellos. Como trabajo final, deben emplear alguna herramienta heurística novedosa para el diseño de la estructura analizada y presentar los resultados obtenidos en formato de artículo científico. El caso presentado consiste en la optimización de vigas biapoyadas de hormigón de alta resistencia a través de una estrategia de optimización híbrida basada en la búsqueda en entornos variables y la aceptación por umbrales. En una primera parte, el artículo plantea el problema de optimización. A continuación se presenta la aplicación del algoritmo propuesto de optimización. Finalmente se realiza un estudio paramétrico para vigas de luces comprendidas entre 10 y 20 m. La aplicación de esta metodología docente ha supuesto un reto adicional para los alumnos de máster, que se enfrentan no sólo a adquirir los conocimientos de la materia sino a aplicarla a un ejemplo práctico y a publicar los resultados obtenidos en revistas científicas.

This paper describes, with a case study, the teaching methodology in which a research perspective is introduced in a master program. Throughout the semester, students are asked to apply and analyze the results obtained with the implementation of different heuristic algorithms for the optimal design of a concrete structure. As a final report, students should implement a heuristic algorithm different to those implemented in class for the optimal design of the concrete structure. The results obtained should be presented in the format of a scientific paper. The case study presented in this paper consists on the optimization of the mix design of simply supported beams made of high-performance concrete (HPC). The optimization algorithm implemented is an hybrid strategy based on a variable neighborhood search and threshold acceptance algorithm. This paper begins by defining the optimization problem. It will then go on to present the results of applying the optimization algorithm. Finally, a parametric study is undertaken, analyzing beams with lengths varying from 10 to 20 m. The application of this teaching methodology has supposed an additional challenge to postgraduate students, as they not only have to acquire the technical competences of the subject but they also have to apply them in a practical example and publish the results in the format of a scientific journal.

Keywords:

Optimización estructural, Construcción sostenible, Emisiones CO₂, Hormigón de alta resistencia, Heurística. Structural optimization, sustainable construction, CO₂ emissions, high strength concrete, Heuristics.

1 Introducción

La Universitat Politècnica de València viene fomentando desde 2010 la creación de Equipos de Innovación y Calidad Educativa. En este contexto se crea el grupo EXCELCON (Excelencia e Innovación en el Proceso de Aprendizaje del Proceso Proyecto-Construcción en la Ingeniería Civil), constituido por un grupo de 12 profesores, que tiene como propósito la aplicación de nuevas tecnologías y enfoques innovadores en la docencia. Desde la creación del grupo, se han introducido mejoras docentes de diversa índole en los programas de posgrado (Máster en Ingeniería del Hormigón y/o del Máster en Planificación y Gestión en Ingeniería Civil) [18]: introducción de una nueva metodología basada en el caso de estudio [9]; análisis de las competencias desarrolladas en el programa de máster y en programas intensivos de intercambio [17]; análisis estratégico del programa desde el punto de vista de los profesores [10]; análisis de las competencias necesarias [22]; así como un estudio de la empleabilidad [16] y la motivación [23] de los alumnos.

Otro de los retos a los que se enfrenta el grupo es el de introducir enfoques propios de la investigación en la formación de los alumnos. Con esta idea, en la asignatura de "Modelos predictivos y de optimización de estructuras de hormigón" del Máster en Ingeniería de Hormigón se forma a los alumnos para la aplicación de algoritmos heurísticos en el diseño de estructuras: vigas, muros, marcos de pasos inferiores de carreteras, etc. A lo largo del curso, los alumnos aplican distintos algoritmos (gradiente, cristalización simulada, etc.) en el diseño de una estructura, analizando los resultados obtenidos con cada uno de ellos. Para ello, los alumnos cuentan con un módulo básico de comprobación de una estructura de hormigón facilitado por el profesor. A medida que en las sesiones teóricas se explican los distintos métodos de optimización heurística, los alumnos cuentan con sesiones prácticas en las que deben programar estos algoritmos de forma individual para optimizar la estructura planteada. Como trabajo final de curso, los alumnos deben emplear alguna herramienta heurística novedosa para el diseño de la estructura analizada en clase y presentar los resultados obtenidos en formato de artículo científico. Este trabajo final, también desarrollado de forma individual, tiene un peso del 10% en la evaluación de la asignatura, que se complementa con cuatro evaluaciones mediante pruebas objetivas (con un peso del 40%) y una prueba escrita de respuesta abierta (con un peso del 50%). En la evaluación de este trabajo final se tiene en cuenta el rigor científico de la optimización realizada así como la calidad de la expresión escrita con la que se exponen los resultados obtenidos. En este artículo se recoge la experiencia llevada a cabo durante el curso 2010/2011 en el que se modelizó y optimizó en términos económicos y medioambientales el diseño de una viga de hormigón armado de alta resistencia.

2 Definición del problema de optimización

La necesidad de optimización estructural en términos económicos y medioambientales surge ante la preocupación creciente por el diseño sostenible de estructuras. Las industrias del cemento son las responsables del 5% de las emisiones de CO₂ generadas a nivel mundial [19], por lo que resulta fundamental incluir la sostenibilidad como criterio adicional a los utilizados tradicionalmente en el diseño estructural (principalmente, el económico). Una de las formas de reducir las emisiones de CO₂ generadas en la construcción de hormigón puede realizarse con el uso de materiales de altas prestaciones que reduzcan la sección transversal de la estructura y, en consecuencia, el volumen de hormigón. Este estudio aborda la optimización discreta en términos de coste económico y de emisiones de CO₂ de dosificaciones de hormigón de alta resistencia (HAR)

extraídas de distintas publicaciones en tecnología de HAR. Se ha recogido datos experimentales de 22 fuentes, seleccionando, para cada resistencia, aquellas que presentan valores mínimos de coste y de emisión de CO₂ [1, 3, 4, 6, 11, 12, 15, 20]. La resistencia a compresión se considera función de seis inputs: cemento, agua, árido grueso, árido fino, superplastificante y humo de sílice.

La resolución de un problema de optimización estructural puede abordarse utilizando métodos exactos o métodos aproximados. Los métodos exactos constituyen una aproximación tradicional del problema, si bien la eficiencia de estos métodos se limita a la resolución de problemas con pocas variables de diseño. Dentro de los métodos aproximados, cabe destacar los métodos heurísticos. Coello et al. [2] realizaron una de las primeras aplicaciones de estos métodos a estructuras de hormigón armado, mediante la optimización económica de vigas de hormigón armado. El grupo de investigación de los autores ha empleado recientemente métodos heurísticos para la optimización económica y medioambiental de marcos de edificación [14] y muros de contención de tierras [21].

2.1 Función objetivo

El problema consiste en una optimización mono-objetivo en la que se minimiza el coste económico de la estructura (F_1 , definido en la ecuación (1)) o las emisiones de CO₂ (F_2 , definido en la ecuación (2)); cumpliendo con una serie de restricciones.

$$F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^r c_i m_i, \tag{1}$$

$$F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^r e_i m_i, \tag{2}$$

donde, x_1, x_2, \dots, x_n : Variables de diseño del problema.
 c_i : Precios unitarios de las unidades de obra.
 e_i : Emisiones unitarias de CO₂ de las unidades de obra.
 m_i : Mediciones de las unidades de obra.

Las emisiones y precios unitarios considerados en el problema de optimización han sido obtenidos de la base de datos de materiales BEDEC PR/PCT ITEC, del Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya[8] en Mayo 2012.

Unidad	Coste (€)	Emisiones CO ₂ (kg)
kg de cemento	0,11	0,83
dm ³ de agua	1,19	0,29
kg de superplastificante	1,27	13,73
kg de árido grueso	0,02	0,01
kg de árido fino	0,02	0,01
kg de humo de sílice	0,94	1,05
m ² de encofrado	27,34	2,96
kg de acero B-400-S	1,19	3,03
kg de acero BS-500-S	1,21	3,03

Tabla 1: Precios y emisiones de CO₂ unitarios considerados en el estudio [8].

2.2 Restricciones estructurales

El módulo de comprobación estructural implementado comprueba que la solución planteada es factible. Para ello, calcula la envolvente de esfuerzos de la estructura y comprueba el cumplimiento de restricciones estructurales, geométricas y constructivas. Las restricciones estructurales consisten en la verificación de los estados límites de servicio (ELS) y últimos (ELU) de acuerdo a la normativa española para el diseño de elementos estructurales de hormigón EHE-08 [7]. Así, las verificaciones consideradas en el ELU incluyen comprobaciones de flexión (3) y de cortante (4 y 5).

$$A_s f_{yd} \geq \frac{W_1}{z} f_{ct,m,fl} \quad (3)$$

donde,

A_s : Área de armadura pasiva.

f_{yd} : Resistencia de cálculo del acero de la armadura pasiva a tracción.

$f_{ct,m,fl}$: Resistencia media a flexotracción del hormigón.

W_1 : Módulo resistente de la sección bruta relativo a la fibra más traccionada.

z : Brazo mecánico de la sección.

$$V_{rd} \leq f_{1cd} \cdot b_0 \cdot d \cdot \frac{\cotg\theta + \cotg\alpha}{1 + \cotg^2\theta}, \quad (4)$$

$$V_{rd} \leq z \text{sen}\alpha \cdot (\cotg\alpha + \cotg\theta) \sum A_\alpha f_{y\alpha,d} + \frac{0.15}{\gamma_c} \xi (100\rho_l f_{cv})^{1/3} \beta b_0 d \quad (5)$$

donde,

V_{rd} : Esfuerzo cortante efectivo.

f_{1cd} : Resistencia a compresión del hormigón.

f_{cv} : Resistencia efectiva del hormigón a cortante.

$f_{y\alpha,d}$: Resistencia de cálculo de la armadura A_α .

γ_c : Coeficiente parcial de seguridad del hormigón.

A_α : Área por unidad de longitud de cada grupo de armaduras que forman un ángulo α con la directriz de la pieza.

ρ_l : Cuantía geométrica de la armadura longitudinal principal de tracción.

b_0 : Anchura neta mínima del elemento.

d : Profundidad de la armadura desde la fibra más comprimida de la sección.

z : Brazo mecánico de la sección.

θ : Ángulo entre las bielas de compresión del hormigón y el eje de la pieza.

α : Ángulo de las armaduras con el eje de la pieza.

β : Coeficiente calculado en función del ángulo de referencia de inclinación de las fisuras.

ξ : Coeficiente calculado a partir de d .

Las verificaciones del ELS (6) comprueban que la fisuración no supera las limitaciones propias de las condiciones de durabilidad en las que se encuentra la estructura.

$$w_{\max} \geq \beta s_m \epsilon_{sm}, \tag{6}$$

donde,

w_{\max} : Abertura máxima de fisura.

β : Coeficiente que relaciona la abertura media de fisura con el valor característico.

s_m : Separación media de fisuras.

ϵ_{sm} : Alargamiento medio de armaduras considerando la colaboración del hormigón entre fisuras.

Por último se han considerado restricciones relativas a las disposiciones mínimas de armado indicadas en la normativa así como restricciones geométricas y constructivas.

2.3 Variables

El problema de optimización propuesto está definido por 14 variables (Figura 1 y 2) que definen la geometría, el tipo de acero, la disposición de armado y la dosificación del HAR. Concretamente, las dos primeras variables son geométricas y se corresponden con la altura (h) y el ancho (b) de la sección transversal. Las siguientes 10 variables definen el armado a disponer a partir de dos variables: número de barras (n) y diámetro (\emptyset). El armado longitudinal superior se dispone a lo largo de toda la longitud de la viga (n_1, \emptyset_1). El armado a flexión incluye dos disposiciones de armado, una capa inferior continua a lo largo de toda la viga (n_2, \emptyset_2) y un refuerzo longitudinal inferior dispuesto en la parte central de la viga (n_3, \emptyset_3). El armado a cortante se define con cuatro variables: el refuerzo central (n_5, \emptyset_5) y un refuerzo situado en una longitud de $L/3$ cercana a los apoyos (n_4, \emptyset_4), siendo L la luz de la viga. La siguiente variable define la resistencia a tracción del acero corrugado empleado (f_{yk}), pudiendo variar entre B-400-S y BS-500-S. La última variable es la dosificación de HAR empleada. Para cada uno de los valores posibles de resistencia a compresión del HAR (55, 60, 70, 80, 90 y 100 MPa), se han seleccionado dos dosificaciones óptimas: una en términos económicos y otra en términos medioambientales. Cada dosificación propuesta se compone de siete valores: resistencia a compresión y cantidad de cemento, agua, superplastificante, árido grueso, árido fino y humo de sílice para cada m^3 de HAR.

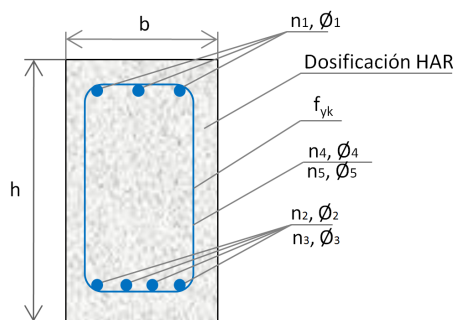


Figura 1: Variables de diseño: sección transversal.

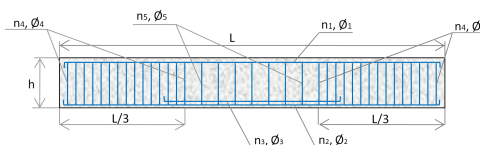


Figura 2: Variables de diseño: sección longitudinal.

Las combinaciones de posibles valores de las 14 variables define el espacio de soluciones. Cada vector compuesto por 14 variables define una solución con un coste económico según (1) y una emisión de CO_2 según (2). Las soluciones que cumplan las restricciones serán soluciones factibles del problema. Aquellas soluciones que no cumplan estas restricciones serán consideradas como

soluciones no factibles.

2.4 Parámetros

Los parámetros son magnitudes que se toman como dato del problema y, por lo tanto, su valor permanece constante en el proceso de optimización. Los parámetros considerados son geométricos y de cargas (Tabla 2), de coste (Tabla 1) y durabilidad (clase de exposición IIa, alta humedad y nivel de control normal).

Parámetro	Valor
Luz de la viga (L)	15 m
Carga permanente repartida (g)	20 kN/m
Carga variable repartida (q)	10 kN/m
Carga móvil (Q)	4 kN

Tabla 2: Parámetros considerados en el proceso de optimización.

3 Búsqueda en entornos variables: BVNS-TA

El método propuesto para la herramienta de optimización consiste en una búsqueda en entornos variables basada en el método básico (BVNS) propuesto originalmente por Mladenovic y Hansen [13] que emplea como heurística de búsqueda local el método de aceptación por umbrales (TA). El método propuesto BVNS-TA (Figura 3) combina la búsqueda diversificada en entornos variables (BVNS) con la intensificación en la búsqueda local de la aceptación por umbrales (TA). En la aplicación de este problema, la búsqueda local se ha calibrado utilizando cadenas de 12.000 iteraciones para la optimización económica y 24.000 iteraciones para la optimización de emisiones de CO₂. El umbral inicial considerado (U_0) ha sido de 80€ en la optimización económica y 160 kg en la optimización medioambiental.

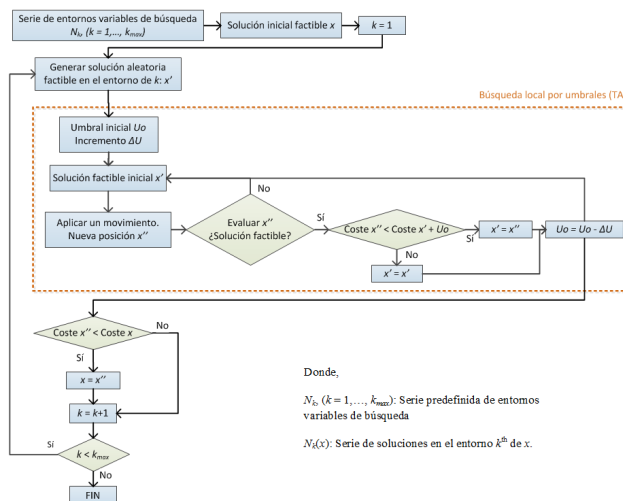


Figura 3: Diagrama de flujo del método de optimización propuesto (BVNS-TA).

4 Resultados

La metodología de optimización propuesta (BVNS-TA) ha sido aplicada a la viga biapoyada descrita anteriormente. La serie predefinida entornos variables de búsqueda considerada ha sido N_k , $k = 1, 8, 2, 9, 3, 10, 4, 11, 5, 12, 6, 13, 7, 14$, de forma que en la búsqueda se alterna cambios de muchas variables con pequeños cambios. El problema de optimización se ha programado en Fortran 95 con un compilador Silverfrost Plato 4.3.0. El tiempo de computación de cada ejecución de 100 iteraciones es de 2 minutos de media en un PC AMD Phenom II X6 1055T Processor 2.80 GHz. La Tabla 3 muestra los valores mínimos de coste y emisiones de CO₂ así como las características principales de las soluciones óptimas obtenidas para una luz de 15 m.

	Opt. coste	Opt. CO ₂	
Coste (€)	1.807,26	5.174,16	
CO ₂ (kg)	6.188	3.017	
Altura (m)	0,75	0,85	donde,
Anchura (m)	0,30	0,30	A_{s_1} : Arm. superior.
A_{s_1}	7 Ø 6	8 Ø 6	A_{s_2} : Arm. inferior continuo.
A_{s_2}	9 Ø 25	12 Ø 20	A_{s_3} : Arm. inferior central.
A_{s_3}	11 Ø 10	7 Ø 12	A_{s_4} : Arm. cortante en $L/3$ cercanos a apoyos.
A_{s_4}	4 Ø 6	5 Ø 6	A_{s_5} : Arm. a cortante en $L/3$ centrales.
A_{s_5}	4 Ø 6	4 Ø 6	
Dosificación	11	8	
f_{ck} (MPa)	100	80	
f_{yk} (MPa)	500	500	

Tabla 3: Parámetros considerados en el proceso de optimización.

5 Estudio paramétrico

Esta sección describe el estudio paramétrico realizado considerando como parámetro la luz de la viga (L , ver Figura 2). Se han considerado valores de L variando entre 10 y 20 m con incrementos de 1 m. Los resultados obtenidos muestran un buen ajuste parabólico de los valores de coste y CO₂ con la luz de la viga: Coste (€) = $7.65L^2 - 1.231L + 93.58$ ($R^2 = 0.9999$) y CO₂ (kg) = $14.14L^2 - 22.18L + 170.76$ ($R^2 = 0.9999$).

Resulta también interesante determinar si las características de las vigas óptimas en términos económicos son similares de las vigas optimizadas en términos medioambientales. Para ello, la tabla 4 muestra las características de las vigas optimizadas medioambientalmente y el ratio de estas características entre vigas optimizadas medioambientalmente y económicamente.

En cuanto a la definición geométrica de las vigas óptimas, se puede concluir que tanto las vigas óptimas tienen el mínimo ancho establecido por criterios constructivos (0.30 m) y una altura de la sección transversal con un ajuste lineal aceptable (Figura 4): h_{coste} (m) = $0.046L + 0.027$ ($R^2 = 0.939$) y h_{co2} (m) = $0.071L - 0.168$ ($R^2 = 0.975$).

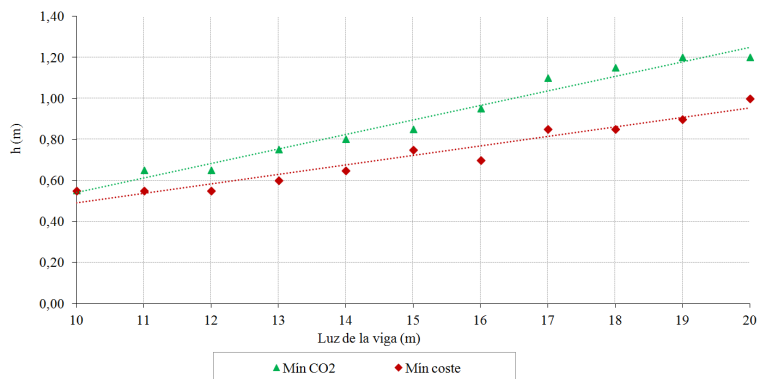


Figura 4: Variación de la altura de la sección transversal en función de la luz de la viga.

Resulta también interesante determinar si las características de las vigas óptimas en términos económicos son similares de las vigas optimizadas en términos medioambientales. De esta análisis se puede concluir que el tipo de acero obtenido en ambos casos y para todas las longitudes analizadas es el de mayor resistencia (500 MPa). A pesar de que el tipo de acero a emplear es el mismo, el consumo total de acero varía según la función objetivo utilizada en la optimización. También se puede concluir que, generalmente, las vigas ecológicas necesitan mayores cantidades de acero para su armadura longitudinal superior y de cortante. Sin embargo, al analizar la cantidad total de acero necesario, se puede concluir que las vigas optimizadas medioambientalmente necesitan, en promedio, un 14% menos de acero que las vigas económicas.

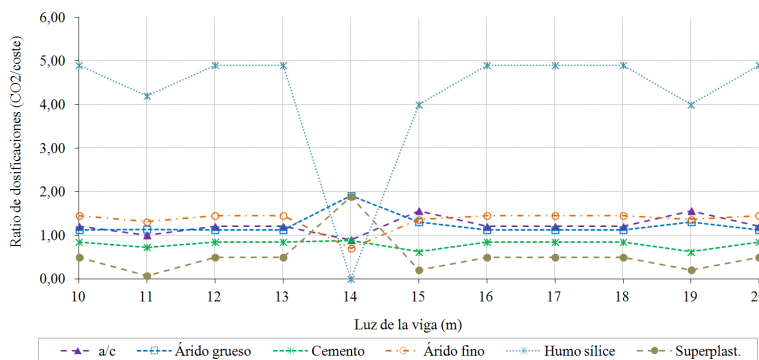


Figura 5: Variación de cantidades de material empleado en la dosificación en función de la luz de la viga.

En cuanto al tipo de dosificación empleada, se detecta una tendencia al uso de hormigones de altas resistencias (entre 70 y 100 MPa) en ambos procesos de optimización. A la vista de los resultados mostrados en la Figura 5, puede concluirse que, en general, las vigas económicas utilizan mayor cantidad de cemento y superplastificante, relaciones agua/cemento más bajas y una menor cantidad de humo de sílice y áridos fino y grueso que las vigas optimizadas medioambientalmente.

6 Conclusiones

La aplicación de esta metodología docente en la que se introducen enfoques propios de la investigación en la educación de posgrado, se ha constatado que supone un reto adicional para los alumnos, ya que se enfrentan no sólo a adquirir los conocimientos de la materia sino a aplicarla a un ejemplo práctico y a publicar los resultados obtenidos en revistas científicas.

Del ejemplo de aplicación presentado, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los costes y emisiones de CO₂ de las vigas óptimas presentan un buen ajuste parabólico con la longitud de la viga.
- Las vigas óptimas tienen secciones transversales con un ancho mínimo por disposiciones constructivas y una altura que varía linealmente con la luz de la viga. Además utilizan acero de la mayor resistencia disponible (500 MPa) y hormigones con elevados valores de resistencia (entre 70 y 100 MPa).
- Las vigas optimizadas medioambientalmente utilizan, en promedio, un 14% menos de acero en armaduras y un 23% más de hormigón que las vigas económicas. Las vigas económicas utilizan mayor cantidad de cemento y superplastificante, relaciones agua/cemento más bajas y una menor cantidad de humo de sílice y áridos fino y grueso que las vigas optimizadas medioambientalmente.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (BIA2011-23602).

Referencias

- [1] B. Chen, J. Liu. Effect of aggregate on the fracture behavior of high strength concrete, *Constr. Build. Mater.*, **18**(8), 585–590 (2004).
- [2] C.A. Coello, A. D. Christiansen, F. Santos. A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams, *Eng. Comput.*, **13**(4), 185–196 (1997).
- [3] Y. Ding, Y. Zhang, A. Thomas, A. The investigation on strength and flexural toughness of fiber cocktail reinforced self-compacting high performance concrete, *Constr. Build. Mater.*, **23**(1), 448-452 (2009).
- [4] H. Donza, O. Cabrera, E.F. Irassar. High-strength concrete with different fine aggregate”, *Cem. Concr. Res.*, **32**(11), 1755–1761 (2002).
- [5] G. Dueck, T. Scheuer. Threshold accepting: a general purpose optimization algorithm superior to simulated annealing, *J. Comput. Phys.*, **90**(1), 161–175 (1990).
- [6] R. Duval, E.H. Kadri. Influence of silica fume on the workability and the compressive strength of high-performance concretes, *Cem. Concr. Res.*, **8**(4), 533–547 (1998).
- [7] M. Fomento. EHE: instrucción de hormigón estructural, Madrid: Fomento, (2008).
- [8] Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya, BEDEC PR/PCT ITEC base de datos de materiales. (<http://www.itec.es/nouBedec.e/bedec.aspx>), (2012).
- [9] J. Jiménez, E. Pellicer, V. Yepes, V. Teaching and learning using a case study: application to a master degree in construction management, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, **15**, 696–702 (2011).
- [10] J. Jiménez, V. Yepes, M. Picornell, E. Pellicer. Strategic analysis applied to a master degree in construction management: a view from the faculty. *Proceedings of the 6th International Technology, Education and Development Conference INTED 2012*, 5-7 marzo, Valencia, pp. 5607-5615.
- [11] V.K.R. Kodur, F.P. Cheng, T.-C. Wang, M. A. Sultan. Effect of strength and fiber reinforcement on fire resistance of high-strength concrete columns, *J. Struct. Eng. ASCE*, **129**(2), 253–259 (2003).
- [12] C.-H. Lim, Y.-S. Yoon, J.-H. Kim. Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete, *Cem. Concr. Res.*, **34**(3), 409-420 (2004).

- [13] N. Mladenovic, P. Hansen. Variable neighborhood search, *Comput. Oper. Res.*, **24**(11), 1097–1100 (1997).
- [14] I. Paya-Zaforteza, V. Yepes, V., A. Hospitaler, F. González-Vidoso. CO₂ efficient design of reinforced concrete building frames, *Eng. Struct.*, **31**(7), 1501-41508 (2009).
- [15] B. Persson. Correlating laboratory and field tests of creep in high-performance concrete, *Cem. Concr. Res.*, **31**(3), 389–395 (2000).
- [16] C. Torres-Machí, A. Carrión, V. Yepes, E. Pellicer. Employability of Graduate Students in Construction Management: A Case Study. *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract.* **139**(2), 163–170 (2013).
- [17] C. Torres-Machí, E. Pellicer, V. Yepes, D. Eaton. An evaluation of an international academic exchange programme in construction management. IV ELAGEC Encuentro Latino-Americano de Gestión y Economía de la Construcción, Santiago (Chile), (2011).
- [18] C. Torres-Machí, E. Pellicer, V. Yepes, M. Picornell . Excelencia e innovación en el proceso de aprendizaje del proceso proyecto-construcción en la ingeniería civil, IX Foro Internacional sobre la Evaluación de la Calidad de la Investigación y de la Educación Superior (FECIES). Santiago de Compostela, 12-15 de junio, (2012).
- [19] E. Worrell, L. Price, N. Martin, C. Hendriks, L. O. Meida. Carbon dioxide emissions from the global cement industry , *Annu. Rev. Energy Environ.*, **26**(8), 303–329 (2008).
- [20] K.R. Wu, B. Chen, W. Yao, D. Zhang. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete , *Cem. Concr. Res.*, **31**(10), 1421–1425 (2001).
- [21] V. Yepes, F. González-Vidoso, J. Alcalá, P. Villalba. CO₂-Optimization Design of Reinforced Concrete Retaining Walls based on a VNS-Threshold Acceptance Strategy, *J. Comput. Civil. Eng.*, **26**(3), 378–386 (2012).
- [22] V. Yepes, E. Pellicer, J. A. Ortega. Designing a benchmark indicator for managerial competences in construction at the graduate level. *J. Prof. Issues Eng. Educ. Pract. ASCE*, **138**(1), 48–54 (2012).
- [23] V. Yepes, M. Picornell, C., Torres-Machi, E. Pellicer. Motivation of postgraduate students enrolled in a master degree in construction management, Proceedings of the 6th International Technology, Education and Development Conference INTED 2012, 5-7 marzo, Valencia, pp. 5626–5633.