

EFFICIENT DESIGN OF NON-CONVENTIONAL CONCRETE STRUCTURES BASED ON MULTIOBJECTIVE SUSTAINABLE CRITERIA

Yepes, Víctor

ICITECH. Universitat Politècnica de València

The main objective of this research project (HORSOST) is to develop a methodology to establish efficient design criteria for non-conventional concrete structures that maximize their contribution to sustainability. For its success, it will apply intelligent analysis and data mining techniques, multiobjective heuristic optimization algorithms and life cycle analysis. The types of structures covered by the project are prestressed concrete bridges, road vault underpasses and road frame bridges. The project will focus on high strength concrete, fibre-reinforced concrete and self-compacting concrete. The justification of this project is based on the social expected benefit from the design criteria that maximize sustainability, where a merely economic optimization it is not sufficient. This concern has begun to reflect on the current instruction EHE Annex 13. In addition, innovations in non-conventional concretes allow for expanding the research horizon in the sustainability field; due to its increase in performance and durability in conventional concrete, so that manufacture and placing costs are not the determining factors in their choice.

Keywords: *Concrete; Optimization; Sustainability; Lifecycle; Efficiency*

DISEÑO EFICIENTE DE ESTRUCTURAS CON HORMIGONES NO CONVENCIONALES BASADOS EN CRITERIOS SOSTENIBLES MULTIOBJETIVO

El objetivo principal del proyecto HORSOST consiste en desarrollar una metodología que permita establecer criterios de diseño eficiente para estructuras de hormigón no convencional de forma que se maximice su contribución a la sostenibilidad. Para ello se emplearán técnicas de análisis inteligente y minería de datos, algoritmos de optimización heurística multicriterio y el análisis del ciclo de la vida. La tipología de estructuras objeto del proyecto son los puentes losa y vigas artesa pretensadas, pilas y estribos de puente, marcos y bóvedas de paso en carreteras. El proyecto se centrará en hormigones de alta resistencia, reforzados con fibras y autocompactantes. El proyecto se justifica en el beneficio social esperado procedente de los criterios de diseño que maximicen la sostenibilidad, no siendo suficiente una mera optimización económica. Dicha inquietud se ha empezado a reflejar en el Anejo 13 de la actual instrucción EHE. Además, los hormigones no convencionales permiten ampliar el horizonte de investigación en sostenibilidad; al aumentar las prestaciones y durabilidad del hormigón convencional, de forma que el coste de fabricación y puesta en obra no sea el factor determinante en su elección.

Palabras clave: *Hormigón; Optimización; Sostenibilidad; Ciclo de vida; Eficiencia*

Correspondencia: ICITECH. Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n. C.P. 46022. Valencia

1. Introducción

La investigación en aspectos relacionados con la sostenibilidad en la construcción está creciendo debido a la preocupación por las evidencias del actual cambio climático. Así, se han elaborado bases de datos que miden el impacto ambiental de los materiales (Goedkoop y Spriensma, 2001; Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya [ITCC], 2009), que se han empleado para reducir las emisiones de CO₂ en estructuras (Payá-Zaforteza et al., 2009; Yepes et al., 2012). Con todo, la sostenibilidad requiere contemplar aspectos energéticos, medioambientales, sociales y económicos que deben afectar a todo el ciclo de vida de la estructura (Burón, 2007). Un antecedente fue el Modelo Integrado de Cuantificación de Valor de un Proyecto Constructivo Sostenible: Aplicación a la Edificación Industrial y de Servicios (MIVES) y MIVES II (Aguado, Alarcón y Manga, 2008), que fueron el punto de partida para el Anejo 13 de la actual EHE.

Los ordenadores personales de elevada potencia de cálculo, junto con el desarrollo de técnicas de análisis inteligente, han permitido el crecimiento en el diseño de estructuras óptimas (Sarma y Adeli, 1998; Cohn y Dinovitzer, 1994). Los problemas de optimización de estructuras reales han podido abordarse de forma eficiente mediante técnicas metaheurísticas y bioinspiradas tales como los algoritmos genéticos, el recocido simulado, las colonias de hormigas o las redes neuronales, entre otras (Adeli y Sarma, 2006; Dreo et al., 2006). Una forma que tiene el ingeniero para acercarse a las estructuras óptimas es que se difundan fórmulas de predimensionamiento (Perea et al., 2010; Yepes et al., 2008). Pues bien, para mejorar los diseños, es posible extraer información no trivial de bases de datos de estructuras óptimas empleando la inteligencia artificial.

El descubrimiento de conocimiento en bases de datos es un área donde se están realizando muchos esfuerzos, tanto en metodología como en investigación. En este contexto, la minería de datos constituye un conjunto de herramientas empleadas para la extracción de información no trivial que reside de manera implícita en los datos (Fayyad, 1996). Algunas herramientas más representativas son las redes neuronales, las máquinas de soporte vectorial, los árboles de decisión, modelos estadísticos avanzados multivariantes y de diseños de experimentos y el agrupamiento.

Por otra parte, la investigación en hormigones no convencionales ha permitido mejorar sus prestaciones. Así, aunque el refuerzo con fibras reduce la fisuración y mejora la durabilidad al impedir el acceso de agua y contaminantes, razones económicas han limitado su uso. El hormigón autocompactante ha conseguido estructuras más durables, ha mejorado la producción y los procesos constructivos, así como ha facilitado el diseño de elementos complejos y acabados. Todo ello abre horizontes inexplorados, donde una simple optimización económica de las estructuras haría inviable el empleo de muchos hormigones especiales, pero donde una visión más amplia que contemple criterios de sostenibilidad y de análisis del ciclo de vida, puede cambiar la perspectiva en cuanto a su empleo.

En este contexto se formula el proyecto de investigación denominado “*Diseño eficiente de estructuras con hormigones no convencionales basados en criterios sostenibles multiobjetivo mediante el empleo de minería de datos*”, cuyo acrónimo es HORSOST y su referencia es BIA2011-23602. Se trata de un proyecto financiado dentro del Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental del Ministerio de Ciencia e Innovación, dentro del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011. Se trata de un proyecto de 3 años de duración, iniciado con el año 2012 y que terminará al final del 2014. El proyecto se realiza íntegramente por investigadores del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), de la Universitat Politècnica de València. Su investigador principal es el autor de la presente comunicación, que conforma un equipo formado por 5 investigadores más y cuenta con la participación de un becario FPI adscrito al proyecto.

El artículo trata, por tanto, de explicar qué metodología y métodos matemáticos se han utilizado en el desarrollo del proyecto de investigación HORSOST. Se desarrollará en primer lugar las hipótesis de partida y los objetivos del proyecto, se describirá la metodología empleada y se describirán brevemente las metaheurísticas y otras técnicas matemáticas empleadas. Por último se aportan los trabajos de investigación desarrollados con estas técnicas y las conclusiones.

2. Hipótesis de partida y objetivos

El objetivo fundamental del proyecto de investigación HORSOST consiste en establecer criterios de diseño eficiente basados en el análisis del ciclo de la vida de estructuras de hormigón no convencional, aplicando para ello técnicas procedentes de la inteligencia artificial y la minería de datos a amplios conjuntos de estructuras optimizadas heurísticamente bajo objetivos múltiples de sostenibilidad (ahorro energético y de recursos naturales, aspectos ambientales, sociales y económicos).

2.1. Hipótesis de partida

La necesidad social de construir de forma sostenible con estructuras de hormigón determina el contexto en el que se plantea este proyecto. El objetivo fundamental de HORSOST consiste en establecer criterios de diseño eficiente basados en el análisis del ciclo de la vida de estructuras de hormigón no convencional, aplicando para ello técnicas procedentes de la inteligencia artificial y la minería de datos a amplios conjuntos de estructuras optimizadas heurísticamente bajo objetivos múltiples de sostenibilidad (ahorro energético y de recursos naturales, aspectos ambientales, sociales y económicos). Las hipótesis de partida en la que nos basamos son:

- Es posible mejorar los diseños de las estructuras de hormigón a través de pautas de predimensionamiento sólo disponibles por algunos proyectistas de gran experiencia.
- Existen criterios de diseño que permiten compatibilizar las exigencias derivadas de la sostenibilidad con reducciones de coste, con aumentos en seguridad y constructibilidad. Sin embargo, estos criterios no son triviales.
- Los hormigones no convencionales presentan propiedades que permiten contribuir a la sostenibilidad de las estructuras cuando se analiza el ciclo de vida.
- La inteligencia artificial y la minería de datos permiten aflorar relaciones no triviales cuando existen bases de datos suficientemente amplias.
- La optimización heurística permite elaborar bases masivas de datos de estructuras optimizadas bajo objetivos múltiples basados en la sostenibilidad (huella ecológica, reducción de CO₂, etc.).

2.2. Objetivos del proyecto

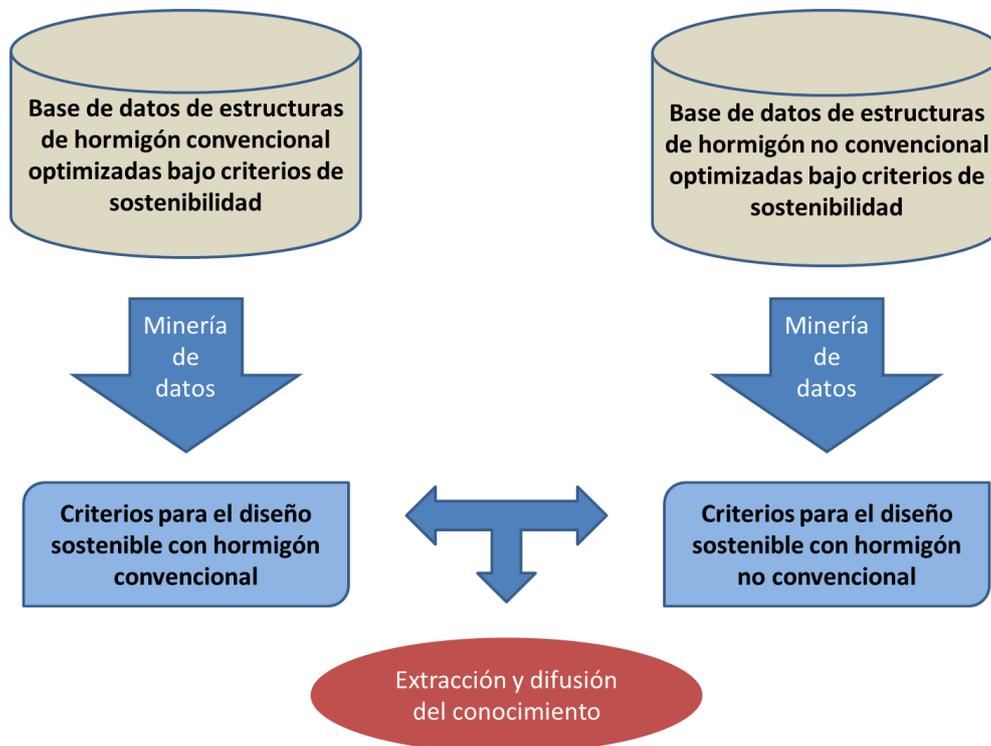
1. Desarrollar una metodología capaz de extraer información no trivial de bases de datos masivas de estructuras de hormigón no convencional optimizadas con múltiples objetivos basados en la sostenibilidad.
2. Obtener reglas de predimensionamiento optimizadas para cada una de las tipologías estructurales. La novedad y relevancia consiste en utilizar herramientas procedentes del "*data mining*" y de "*machine learning*".
3. Comparar las reglas de diseño obtenidas para hormigones convencionales y no convencionales, así como con criterios obtenidos de la práctica habitual de diseño y de la bibliografía existente.

4. Divulgar el conocimiento adquirido para que los proyectistas puedan utilizar estos criterios de predimensionamiento, de forma que se puedan conseguir mejoras respecto a la sostenibilidad a lo largo del ciclo de vida de las estructuras de hormigón no convencional.

3. Metodologías empleadas y resultados del proyecto

El proyecto de investigación se ha basado fundamentalmente en la aplicación de técnicas metaheurísticas de optimización a diversos objetivos, incluidos los medioambientales, y la extracción de información no trivial de las bases de datos generadas por dichas herramientas, para cuyo análisis se han empleado técnicas basadas en minería de datos. La Figura 1 resume el proceso seguido. Básicamente se aplican las técnicas señaladas tanto a bases de datos de estructuras reales como a las optimizadas. La particularidad del proyecto estriba en utilizar, además, hormigones no convencionales y numerosas estructuras, básicamente del campo de la ingeniería civil y la edificación.

Figura 1: Extracción y difusión del conocimiento por contraste de criterios de diseño



A continuación se describen brevemente cada una de las técnicas empleadas en el proyecto de investigación y se mencionan los resultados obtenidos haciendo sólo referencia a los trabajos publicados en revistas de impacto JCR.

3.1. Recocido simulado

El recocido simulado “*Simulated Annealing*” (SA) (Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi, 1983; Cerny, 1985) se basa en la analogía de la energía de un sistema termodinámico con la función de coste de un problema de optimización. Conceptualmente es un algoritmo de búsqueda por entornos, donde una solución sustituye a la anterior si mejora a la anterior ($\Delta \leq 0$); en caso contrario, será aceptada con una probabilidad ($e^{-\Delta/T}$) si $\Delta > 0$, donde T es un parámetro denominado *temperatura*) decreciente con el aumento Δ de la diferencia entre los costes de

la solución candidata y la actual. La selección aleatoria de soluciones degradadas permite eludir los óptimos locales.

SA se aplicó en un estudio paramétrico de muros óptimos de contención de tierras (Yepes et al., 2008). En este trabajo se puso de manifiesto la necesidad de limitar la deformación en la cabeza del muro a 1/150 de su altura. Es decir, la optimización de estructuras pone de manifiesto la necesidad de incorporar estados límites poco habituales en el dimensionamiento habitual de las estructuras. Además, el estudio permitió establecer reglas de predimensionamiento óptimo para estos muros ménsula.

El trabajo de Payá et al. (2008) utilizó SA multiobjetivo para optimizar pórticos de edificación atendiendo a distintas funciones objetivo: el coste, la constructibilidad, el impacto ambiental y la seguridad global de la estructura. La constructibilidad se basó en la simplificación del número de armaduras necesarias y el impacto ambiental se midió con el Ecoindicator 99 (Goedkoop y Spriensma, 2001). La seguridad global se definió como el mínimo ratio existente entre la resistencia de la estructura y las acciones mayoradas, para todos los estados límite. Se comprobó que un ligero incremento de coste era capaz de mejorar significativamente el resto de objetivos.

La reducción de las emisiones de CO₂ y la reducción del coste de pórticos de edificación fue el objeto del trabajo de Payá-Zaforteza et al. (2009). Se emplearon las bases de datos del ITCC para las funciones objetivo. Se comprobó que ambos objetivos se encontraban relacionados, de modo que las soluciones con mejores emisiones sólo eran un 2,77% más caras. Un trabajo posterior (Payá-Zaforteza et al., 2010) utilizó la teoría del valor extremo junto con el recocido simulado para estas mismas estructuras.

Otros trabajos relevantes fueron la aplicación de SA a marcos usados como paso inferior en vías de comunicación (Perea et al., 2008), en la optimización de pilas de puentes (Martínez-Martín et al., 2012) y tableros de puentes de vigas artesa prefabricadas (Martí et al., 2013).

3.2. Aceptación por umbrales

La aceptación por umbrales "*Threshold Accepting*" (TA) (Dueck y Scheuer, 1990) emplea un enfoque parecido a SA para eludir los óptimos locales, pero donde la toma de decisiones es más sencilla. Se autoriza el menoscabo en la calidad de las soluciones siempre y cuando no se exceda en cierta magnitud la aptitud de la solución actual.

La optimización de marcos como paso inferior en carreteras (Perea et al., 2008) mostró que TA encontró soluciones un 1,4% más baratas que SA. Además, se comprobó que era necesario introducir los estados límite de deformación máxima y fatiga, estados que no suelen comprobarse en el dimensionamiento habitual de este tipo de estructuras. Posteriormente, el trabajo de Perea et al. (2010) utilizó TA para realizar un estudio paramétrico de marcos con luces entre 8 y 16 m, lo cual permite el uso de fórmulas de predimensionamiento.

Carbonell, González-Vidosa y Yepes (2011) aplicaron un meta-TA, donde un algoritmo previo a TA, basado también en TA, optimizaba el mejor ajuste de parámetros en la optimización de bóvedas como paso inferior en carreteras.

3.3. Algoritmo multiarranque de búsqueda exhaustiva

En el trabajo de Carbonell, González-Vidosa y Yepes (2011) utilizó un algoritmo de optimización original que superó tanto a SA como a TA en la optimización de bóvedas de paso inferior. El método consistía en una codificación binaria de las soluciones y un rastreo completo del entorno de cada solución. El algoritmo se iniciaba desde puntos aleatorios del espacio de soluciones para mejorar la diversificación de la búsqueda. Se comprobó que la mejor solución era un 10% más económica que la misma estructura calculada por un

calculista experto para un caso real. En el estudio realizado por Carbonell, Yepes y González-Vidosa (2011) se comprobó cómo la estructura de coste mínimo presenta una esbeltez importante en la bóveda, con una relación canto/luz inferior a 1/40.

3.4. Sistema de colonia de hormigas

El sistema de colonia de hormigas “*Ant Colony Optimization*” (ACO) (Dorigo, Maniezzo y Coloni, 1996) se basa en la analogía del comportamiento de estos insectos cuando encuentran el camino más corto entre la comida y su hormiguero. Tan pronto como un individuo encuentra una fuente de comida, evalúa su cantidad y calidad y transporta un poco al hormiguero. Durante el regreso, la hormiga deja por el camino feromonas, para que las demás puedan seguirla. Después de un tiempo, el camino hacia el alimento se indicará por un rastro oloroso que crece con el número de hormigas que pasen por él, y que va desapareciendo en caso contrario. El resultado final es la optimización del trabajo de todo el hormiguero en su búsqueda de comida.

ACO se ha utilizado en la optimización económica de pilas de puente, tanto para carreteras (Martínez-Martín et al. 2010) como para ferrocarriles (Martínez-Martín et al., 2013). En este último trabajo, se realizó un estudio paramétrico para pilas altas, entre 40 y 100 m, lo cual permite fórmulas de predimensionamiento de este tipo de estructuras.

3.5. Optimización mediante enjambre de luciérnagas

El algoritmo de optimización mediante enjambre de luciérnagas “*Glowworm Swarm Optimization*” (GSO) (Krishnanand y Ghose, 2009) se basa en el comportamiento de estos insectos que utilizan una señal luminosa, luciferina, para atraer a una pareja. Cada luciérnaga selecciona, mediante un mecanismo probabilístico, una vecina que tiene un valor superior de luciferina y se mueve hacia ella. Este mecanismo permite que las luciérnagas se subdividan en grupos disjuntos que se dirigen y encuentran en múltiples óptimos locales de la función objetivo.

Un algoritmo híbrido de GSO y SA se aplicó en el trabajo de García-Segura et al. (2014) para optimizar tanto el coste como las emisiones de CO₂ de una viga de hormigón armado se sección en “I”. En este caso, se analizaron tanto hormigones convencionales como autocompactantes con distintas dosificaciones. Se encontró que las secciones que más superficie expuesta a la atmósfera y el uso de los hormigones autocompactantes reducía la emisión de CO₂. La reducción se debía a la inclusión de la carbonatación del hormigón como sumidero de este tipo de emisiones. Este efecto se estudió en un trabajo previo de García-Segura, Yepes y Alcalá (2014).

3.6. Búsqueda local iterada

La idea de la búsqueda local iterada “*Iterated Local Search*” (ILS) (Lourenço, Martin y Stülze, 2003) consiste en rastrear la solución entre el subespacio definido por los óptimos locales. Dado que un algoritmo de búsqueda es capaz de transformar una solución s en otra s^* que es un óptimo local, para pasar a otro óptimo local cercano s' , se provoca una pequeña perturbación. Aplicando el algoritmo de búsqueda a s' se encuentra otra solución s^{**} . La metaheurística acepta el paso de s^* a s^{**} mediante algún criterio como el de máximo gradiente (si s^{**} es mejor que s^* , se acepta) o no (se puede pensar en un mecanismo TA o SA para evitar estancamientos dentro del subespacio de los óptimos locales s^*).

El trabajo de Carbonell, Yepes y González-Vidosa (2012) aplicó ILS junto con una búsqueda de búsqueda local exhaustiva basada en código Gray en la optimización de bóvedas de paso inferior. Se comprobó que la estructura mínima apenas difería en un 0,81% respecto al valor del óptimo global mínimo deducido por la Teoría del Valor Extremo.

3.7. Búsqueda en entornos variables

La búsqueda en entornos variables “*Variable Neighborhood Search*” (VNS) (Mladenovic y Hansen, 1997) consiste en cambiar de operador de búsqueda cuando el anterior ha llegado a un óptimo local. De este modo, VNS oscilará entre dos o más operadores con la esperanza que los cambios en la estructura del entorno permitirán escapar de muchos óptimos locales. Para que este principio trabaje bien, los operadores empleados deberán ser lo suficientemente distintos en relación con la estructura del vecindario que generan.

VNS se aplicó en la optimización, tanto económica como de CO₂, de vigas de hormigón de alta resistencia (Torres-Machí et al., 2013), utilizando como mecanismo de búsqueda local un TA y la Teoría del Valor Extremo. Este trabajo realizó un estudio paramétrico con vigas entre 10 y 20 m y un total de 120 dosificaciones diferentes. Se comprobó una buena correlación entre la optimización en coste y en emisiones, de forma que las mejores soluciones presentaban bajas relaciones agua/cemento, no incluían el humo de sílice y contenidos de superfluidificantes menores que las dosificaciones habituales.

El trabajo de Yepes et al. (2012) realizó un estudio paramétrico de muros de contención optimizando las emisiones de CO₂. Para ello se aplicó un algoritmo híbrido VNS junto con un TA. Se comprobó cómo el ahorro de 1 euro en costes equivale a una reducción de 2,28 kg en las emisiones de CO₂. Además, se pudo constatar que los muros optimizados económicamente requieren aproximadamente un 4,8% más de hormigón que los optimizados desde el punto de vista de las emisiones, que necesitarían un 1,9% más de acero.

VNS también se ha utilizado en la optimización de tableros de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas hibridados con algoritmos meméticos (Martí et al., 2014; Martí, Yepes & González-Vidoso, 2014).

3.8. Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos “*Genetic Algorithms*” (Holland, 1975) simulan el proceso de evolución de las especies que se reproducen sexualmente. Un nuevo individuo se genera a través del *cruzamiento*, que combina parte del patrimonio genético de cada progenitor para elaborar el del nuevo individuo, y de la *mutación*, que supone una modificación espontánea de esta información genética. Si los hijos heredan buenos atributos de sus padres, su probabilidad de supervivencia será mayor, reproduciéndose con mayor probabilidad.

El trabajo de Martínez-Martín et al. (2010) empleó dos variantes de algoritmos genéticos para optimizar pilas huecas de puentes, mostrando soluciones de similar calidad respecto a otros algoritmos probados como ACO y TA.

3.9. Algoritmos meméticos

Los algoritmos meméticos “*Memetic Algorithms*” (MA) (Moscato, 1989) derivan de GA, donde el empleo de una población de soluciones se compagina con heurísticas de búsqueda local. La idea consiste en recombinar la información de las soluciones provenientes del subespacio de óptimos locales. El éxito de estos métodos puede ser atribuido a su balance entre la búsqueda rápida, y el mantenimiento de la diversidad para evitar la convergencia prematura.

MA se han aplicado de forma híbrida con SA para optimizar tableros de puentes de viga artesa. El trabajo de Martí et al. (2013) realizó una parametrización con luces de 20 a 40 m, lo cual permite extraer fórmulas de predimensionamiento. En este estudio se comprobó cómo un cambio de escenario económico, con un incremento del 20% en el precio del acero conduce a incrementos del 11,82% en el coste del tablero, mientras que ese mismo incremento en el precio del hormigón lleva a un incremento de sólo del 4,20%. En el trabajo

de Martí et al. (2014) se han comprobado ahorros entre el 8 y el 50% respecto a estructuras similares calculadas para casos reales. Por último, Martí, Yepes y González-Vidosa (2014) han estudiado la posibilidad de usar hormigón con fibras en estas estructuras. Se comprueba que, incluso con el mayor coste del hormigón con fibras, estas estructuras son económicamente viables.

3.10. Regresión lineal múltiple

Los modelos de regresión lineal múltiple se ajustan por mínimos cuadrados de forma que la variable de respuesta se encuentre explicada al máximo posible por las variables independientes. El proceso se inicia intentando explicar la respuesta en función de aquella variable con la que presenta una mayor correlación. El objetivo es aumentar el coeficiente de regresión agregando variables independientes explicativas, usando para ello el método *stepwise* de pasos sucesivos (Hocking, 1976).

La regresión lineal múltiple se utilizó en el trabajo de Yepes et al. (2009) sobre una muestra de 87 tableros de puentes losa postesados reales. Con ello se consiguieron fórmulas de predimensionamiento, de forma que la luz principal y los voladizos, junto con la anchura del tablero para el caso de losas macizas, o el aligeramiento interior en el caso de las aligeradas, bastan para predimensionar la losa, con errores razonables en la estimación económica. Algunos resultados interesantes fueron que la variable que mejor explica (71,3%) el coste por unidad de superficie de tablero en losa maciza es el canto, mientras que en las aligeradas es la luz (51,9%). Además, se comprobó que las losas macizas son económicas en vanos inferiores a los 19,24 m.

3.11. Análisis por componentes principales

El análisis de componentes principales examina la interdependencia entre variables para reducir su dimensión a un nuevo subconjunto formado por variables no observables. En síntesis, calcula unos factores que sean combinación lineal de las variables originales y que, además, sean independientes entre sí. La primera componente principal se escoge de forma que explique la mayor parte de la varianza posible, y así sucesivamente. Para facilitar la interpretación, se emplea una rotación ortogonal que minimiza el número de variables que tienen saturaciones altas en cada factor (Kaiser, 1958).

Este análisis se utilizó en el trabajo de Yepes et al. (2009) de caracterización estadística de puentes losa postesados. Así, bastan 3 componentes para explicar el 80,8% de la varianza de los datos de las losas macizas y 4 componentes para explicar el 79,0% de la información de las variables de las losas aligeradas.

3.12. Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales artificiales "*Artificial Neural Networks*" (ANN) simulan un sistema de procesamiento de la información altamente complejo, no lineal y en paralelo parecido al cerebro humano. McCulloch y Pitts (1943) presentaron el primer modelo de neurona como un dispositivo no lineal multientrada con interconexiones "con peso". La neurona suma las entradas ya ponderadas, les aplica una función no lineal y transmite una salida. La red puede ser preparada, utilizando ejemplos, para reconocer ciertas estructuras, como puede ser la clasificación de objetos por sus características o la inferencia a partir de los datos de entrada.

El trabajo de Martí-Vargas, Ferri y Yepes (2013) utilizó ANN en la predicción de las longitudes de transferencia del esfuerzo de pretensado. Se comprobó que el empleo de esta técnica permitió reducir un 30% el error derivado de la utilización de modelos de regresión lineal, y un 60% el uso de fórmulas empleadas de forma habitual para la estimación de esta longitud.

3.13. Teoría del valor extremo

Si se acepta que el óptimo local encontrado por un algoritmo de búsqueda estocástico puede considerarse como una solución extrema de una muestra aleatoria simple constituida por las soluciones visitadas, entonces se podría aplicar la teoría del valor extremo “*Extreme Value Theory*” (McRoberts, 1971; Golden y Alt, 1979) para estimar el óptimo global del problema. Para ello se ha comprobado que los óptimos locales encontrados constituyen valores extremos que ajustan a una función Weibull de tres parámetros, siendo el de posición, γ , una estimación del óptimo global.

La teoría del valor extremo se utilizó en la optimización de pórticos de edificación (Payá-Zaforteza et al., 2010), de bóvedas de hormigón (Carbonell, Yepes y González-Vidosa, 2012) y vigas de hormigón armado elaboradas con hormigón de alta resistencia (Torres-Machí et al., 2013).

4. Conclusiones

Existe una importante área de mejora en los diseños de estructuras de hormigón no convencional de forma que se obtenga un importante beneficio social si estos diseños maximizan la sostenibilidad en la construcción de estas estructuras considerando todo el ciclo de vida del producto.

Es posible emplear técnicas procedentes del descubrimiento de conocimiento en bases de datos para extraer información no trivial de bases de datos de estructuras de hormigón generadas a partir de la optimización heurística multiobjetivo basada en la sostenibilidad. Esta información puede servir para el predimensionamiento óptimo de estructuras para calculistas que no dispongan de los algoritmos de optimización.

Los hormigones no convencionales presentan prestaciones que favorecen su durabilidad y, por ello, pueden contribuir a la sostenibilidad si se consideran aspectos medioambientales, sociales y económicos a lo largo de toda su vida útil. Por tanto, se deben analizar en detalle para comprobar su validez frente a los hormigones convencionales y ofrecer criterios de diseño aplicables por los proyectistas.

La experiencia de los resultados obtenidos en el proyecto recomienda precaución con el uso de algoritmos de optimización. Es posible que aparezcan nuevas patologías con un futuro uso masivo de estas técnicas (fatiga, deformabilidad, vibraciones, etc.). Ello puede llevar a la revisión de los criterios de diseño de las normas actuales. Además, esta precaución debería extremarse a aquellos usuarios con poca experiencia ingenieril.

Agradecimientos

This research was financially supported by the Spanish Ministry of Science and Innovation (research project BIA2011-23602)

Referencias

- Adeli, H., & Sarma, K.C. (2006). *Cost optimization of structures. Fuzzy logic, genetic algorithms and parallel computing*. Chichester: Wiley.
- Aguado, A., Alarcón, D.B., & Manga, R. (2008). Razón de ser del anejo ICES de la EHA y características del mismo. *Revista Técnica Cemento Hormigón*, 913, 16-23.
- Burón, M. (2007). La sostenibilidad de las construcciones de hormigón. *Revista Técnica Cemento Hormigón*, 897, 58-65.
- Carbonell, A., González-Vidosa, F., & Yepes, V. (2011). Heuristic optimization of reinforced concrete road vault underpasses. *Advances in Engineering Software*, 42(4), 151-159.

- Carbonell, A., Yepes, V., & González-Vidosa, F. (2011). Búsqueda exhaustiva por entornos aplicada al diseño económico de bóvedas de hormigón armado. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 27(3), 227-235.
- Carbonell, A., Yepes, V., & González-Vidosa, F. (2012). Automatic design of concrete vaults using iterated local search and extreme value estimation. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 9(6), 675-689.
- Cerny, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Optimization Theory and Applications*, 45, 41-51.
- Cohn, M.Z., & Dinovitzer, A.S. (1994). Application of structural optimization. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120(2), 617-649.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Colomi, 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.
- Dreo, J., Petrowsky, A., Siarry, P., & Taillard, E. (2006). *Metaheuristics for hard optimization. Methods and case studies*. Berlin: Springer.
- Dueck, G., & Scheuer, T. (1990). Threshold accepting: a general purpose optimization algorithm superior to simulated annealing. *Journal of Computational Physics*, 90(1), 161-175.
- Fayyad, U.M. (1996). Data mining and knowledge discovery: Making sense out of data. *IEEE Expert*, 11(5), 20-25.
- García-Segura, T., Yepes, V., & Alcalá, J. (2014). Life-cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), 3-12.
- García-Segura, T., Yepes, V., Martí, J., & 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.
- Goedkoop, M., & Spriensma, R. (2001). *The Ecoindicator 99: A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report*. Amersfoort, Netherlands: Product Ecology Consultants.
- Golden, B.L., & Alt, F.B. (1979). Interval estimation of a global optimum for large combinatorial problems. *Naval Research Logistics Quarterly*, 26(1), 69-77.
- Hocking, R. (1976). The analysis and selection of variables in linear regression. *Biometrics*, 32, 1-49.
- Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Ann Arbor: University of Michigan Press.
- Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya (2009). BEDEC PR/PCT ITEC base de datos de materiales. [consultado 1 abril 2014]. Disponible en: <http://www.itec.es/nouBedec.e/presentaciobedec.aspx>
- Kaiser H.F. (1958). The Varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23(3), 187-200.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., & Vecchi, M.P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- Krishnanand, K.N., & Ghose, D. (2009). Glowworm swarm optimization: a new method for optimizing multi-modal functions. *International Journal of Computational Intelligence Studies*, 1(1), 93-119.
- Lourenço, H.R., Martin, O.C., & Stülze, T. (2003). Iterated local search. In F.W. Glover & G.A. Kochenberger (Eds.), *Handbook of metaheuristics*, (pp. 321-353). Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Martí, J.V., González-Vidosa, F., Yepes, V., & Alcalá, J. (2013). Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Engineering Structures*, 48, 342-352.

- Martí, J.V., Yepes, V., & González-Vidosa, F. (2014). A memetic algorithm approach to designing of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement. *Journal of Structural Engineering ASCE*, (en prensa)
- Martí, J.V., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Luz, A. (2014). Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, (en prensa). doi:10.1016/j.rimni.2013.04.010
- Martínez-Martín, F.; González-Vidosa, F.; Hospitaler, A.; Yepes, V. (2010). Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections. *Computers & Structures*, 88(5-6), 375-386.
- Martínez-Martín, F., González-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V. (2012). Multi-objective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, 13(6), 420-432.
- Martínez-Martín, F., González-Vidosa, F., Hospitaler, A., & Yepes, V. (2013). A parametric study of optimum tall piers for railway bridge viaducts. *Structural Engineering and Mechanics*, 45(6), 723-740.
- Martí-Vargas, J.R., Ferri, F.J., & Yepes, V. (2013). Prediction of the transfer length of prestressing strands with neural networks. *Computers and Concrete*, 12(2), 187-209.
- McCulloch, W., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5, 115-133.
- McRoberts, K. (1971). A search model for evaluating combinatorially explosive problems. *Operations Research*, 19(6), 1331-1349.
- Mladenovic, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research*, 24(11), 1097-1100.
- Moscato, P. (1989). *On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms*. Technical Report Caltech Concurrent Computation Program Report 826, Caltech, Pasadena, California.
- Payá, I., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Hospitaler, A. (2008). Multiobjective optimization of reinforced concrete building frames by simulated annealing. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(8), 596-610.
- Payá-Zaforteza I., Yepes, V., Hospitaler, A., & González-Vidosa, F. (2009). CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing. *Engineering Structures*, 31(7), 1501-1508.
- Payá-Zaforteza, I., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Hospitaler, A. (2010). On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing. *Meccanica*, 45(5), 693-704.
- Perea, C., Alcalá, J., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Hospitaler, A. (2008). Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 39(8), 676-688.
- Perea, C., Yepes, V., Alcalá, J., Hospitaler, A., & González-Vidosa, F. (2010). A parametric study of optimum road frame bridges by threshold acceptance. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 17(6), 427-437.
- Sarma, K.C., & Adeli, H. (1998). Cost optimization of concrete structures. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 124(5), 570-578.
- Torres-Machí, C., Yepes, V., Alcalá, J., & Pellicer, E. (2013). Optimization of high-performance concrete structures by variable neighborhood search. *International Journal of Civil Engineering*, 11(2), 90-99.
- Yepes, V., Alcalá, J., Perea, C., & González-Vidosa, F. (2008). A parametric study of optimum earth retaining walls by simulated annealing. *Engineering Structures*, 30(3), 821-830.
- Yepes, V., Díaz, J., González-Vidosa, F., & Alcalá, J. (2009). Caracterización estadística de tableros pretensados para carreteras. *Revista de la Construcción*, 8(2), 95-109.

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.