

Puentes pretensados de alta eficiencia social y medioambiental bajo presupuestos restrictivos: Proyecto BRIDLIFE

Prestressed bridges in terms of social and environmental efficiency and under restrictive budgets: BRIDLIFE Project

Víctor YEPES PIQUERAS

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ICITECH. Universitat Politècnica de València
Profesor Titular de Universidad
vyepesp@cst.upv.es

José Vicente MARTÍ ALBIÑANA

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ICITECH. Universitat Politècnica de València
Profesor Titular de Universidad
jvmartia@cst.upv.es

Eugenio PELLICER ARMIÑANA

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universitat Politècnica de València
Profesor Titular de Universidad
pellicer@cst.upv.es

Fernando GONZÁLEZ VIDOSA

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ICITECH. Universitat Politècnica de València
Catedrático de Universidad
fgonzale@cst.upv.es

Julián ALCALÁ GONZÁLEZ

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ICITECH. Universitat Politècnica de València
Profesor Contratado Doctor
jualgon@cst.upv.es

RESUMEN

El objetivo del proyecto BRIDLIFE consiste en desarrollar una metodología que permita incorporar un análisis del ciclo de vida de puentes de hormigón pretensado definiendo un proceso de toma de decisiones que integre los aspectos sociales y medioambientales mediante técnicas analíticas de toma de decisiones multicriterio. Los resultados esperados pretenden detallar qué tipologías, actuaciones de conservación y alternativas de demolición y reutilización son adecuadas para minimizar los impactos, dentro de una política de fuerte limitación presupuestaria que compromete seriamente la construcción y conservación de las infraestructuras.

ABSTRACT

The objective of BRIDLIFE project is to develop a methodology that takes into consideration the life cycle of prestressed concrete bridges by defining a decision-making process; this way, the social and environmental facets during the life cycle are incorporated using decision-making techniques. The expected findings aim to establish which structural types, maintenance actions and demolition and reuse alternatives are suitable to minimize impacts, within a policy affected by restrictive budgets; this policy seriously compromises the construction and maintenance of infrastructures.

PALABRAS CLAVE: Puentes pretensados, análisis de ciclo de vida, sostenibilidad, optimización.

KEYWORDS: Prestressed bridges, life-cycle assessment, sustainability, optimization.

1. Introducción

La sostenibilidad constituye un enfoque que ha dado un giro radical a la forma de afrontar nuestra existencia. El calentamiento global y las tensiones sociales derivadas de la presión demográfica y del reparto desequilibrado de la riqueza son, entre otros, los grandes retos que debe afrontar nuestra generación. Las actividades humanas son las principales responsables de este problema, provocando un desarrollo alejado de satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, que constituye el núcleo del paradigma de “desarrollo sostenible” [1].

La construcción juega un papel fundamental en el desarrollo de la sociedad. Influye fuertemente en la actividad económica, el crecimiento y en el empleo. Sin embargo, es una actividad que impacta significativamente en el medio ambiente, presenta efectos irreversibles y puede comprometer el presente y futuro de la sociedad. Este sector consume hasta un 60% de las materias primas extraídas [2], generando su transformación sobre el 50% de todas las emisiones de CO₂. En Europa, el 30% de los residuos proceden de la construcción y la demolición; consumiendo la industria y la construcción un 42% de la energía total [3]. Son datos que muestran la brecha de mejora posible en esta industria para acercarse a la sostenibilidad. No basta con construir de forma económica y eficiente, sino que debe ser socialmente aceptable, debe ahorrar recursos naturales no renovables y respetar el medio ambiente a largo plazo.

Otro aspecto con grandes repercusiones sociales es la profunda crisis financiera que afecta a la economía de nuestro país y que ha provocado el hundimiento de la actividad constructora. Las infraestructuras que se crearon con una financiación a largo plazo presentan actualmente déficits de conservación y es posible que las generaciones futuras tengan que pagar unas infraestructuras mermadas en sus requisitos de seguridad y funcionales asociados a la fase de servicio.

Por otra parte, no es difícil encontrar noticias causantes de alarma social en relación a la interrupción de grandes vías de comunicación debido al deterioro de los puentes, incluso algunos de muy reciente construcción. Uno de cada nueve puentes de Estados Unidos son estructuralmente deficientes, presentando una edad media de 42 años. Para resolver esta situación en el horizonte de 2028, deberían gastarse 20,5 mil millones de dólares anuales, aunque sólo se invierte el 62,4% de lo necesario [4]. El escenario dibuja una verdadera crisis en las infraestructuras. Cualquier actuación que se quiera realizar deberá contar con unos presupuestos muy restrictivos. El reto social será cómo aplicar dichos presupuestos de forma que se minimicen los impactos ambientales, los riesgos a las personas y la gestión sea socialmente sostenible, dentro de una política de conservación del patrimonio. Se trata de un problema de optimización muy complejo, con muchas restricciones y sometido a grandes incertidumbres, lo cual representa un reto científico.

Aspectos contradictorios entre los indicadores sociales y medioambientales a corto y largo plazo complican enormemente la toma de decisiones en el ámbito de la construcción, pues, lejos de ser un problema meramente técnico, debe contemplar aspectos difusos y cualitativos, con un enfoque holístico. Ello se complica cuando el deterioro inevitable de estructuras como los puentes dependen de multitud de parámetros difíciles de estimar que requieren herramientas de identificación estructural que complementen las inspecciones (*Structural System Identification, SSI*) [5]. De hecho, el concepto de infraestructura sostenible debería apoyarse en los pilares social, biofísico, económico y técnico. Los requerimientos de sostenibilidad deberían considerar aspectos globales y deberían definir los objetivos y las necesidades a satisfacer por las infraestructuras: diseño, ejecución, uso y

reutilización. Ello requiere una visión amplia de la sostenibilidad a todos los niveles: ambientales, económicos, sociales, de seguridad, de prevención de riesgos, funcionales e incluso estéticos. Existe una gran labor de investigación pendiente en el estudio de la sostenibilidad social de las infraestructuras, que debería mejorar la calidad de vida, proteger y promover la salud, buscar una distribución equitativa de los costes sociales de la construcción y buscar la equidad intergeneracional. Rackwitz et al. [6] plantean, en este sentido, una optimización socio-económica de las infraestructuras como un punto de arranque a la solución de este problema complejo.

Los puentes forman parte de las infraestructuras básicas en el desarrollo económico y en el equilibrio territorial, cuya construcción, diseño, conservación y desmantelamiento se ven afectados fuertemente cuando los presupuestos son restrictivos. El proyecto BRIDLIFE, ha elegido esta infraestructura básica, en particular los puentes pretensados, para desarrollar una metodología que resuelva el reto social descrito. En efecto, ya se ha indicado que el deterioro de los puentes y su incidencia en la seguridad son objeto de gran alarma social. Además, un mantenimiento ineficiente provoca un mayor coste económico y social por las reparaciones severas que comportan. En este coste tiene una especial relevancia el mantenimiento y los costes derivados por los fallos. Desgraciadamente, los daños estructurales del puente dependen de una gran multitud de parámetros como su situación, los materiales o la historia de las acciones a las que ha estado sometida. Se hace necesario en estos casos un análisis de fiabilidad con modelos probabilísticos sobre las cargas y la capacidad portante de sus materiales [7]. Sin embargo, sería necesario un enfoque holístico que permitiera la toma de decisiones durante el ciclo de vida de una infraestructura considerando, entre otros, los riesgos en la planificación, adjudicación, gestión, procedimientos constructivos y negociación en la materialización de las infraestructuras. Un ejemplo actual es la ampliación del Canal de Panamá [8], o la especial relevancia es la influencia que tiene la contratación de los proyectos [9].

La toma de decisiones constituye una de las características esenciales del ser humano que da idea de su grado de autodesarrollo, conocimiento y libertad. En ella influye la experiencia o la intuición del individuo, su comportamiento racional o emocional. Pues bien, las técnicas de decisión multicriterio abordan la resolución de problemas complejos incorporando diferentes criterios y visiones de la realidad [10]. El empleo de técnicas de análisis del valor y toma de decisiones ha supuesto un gran avance en la definición de un indicador de sostenibilidad. El trabajo de San José y Garrucho [11] aplica un “Modelo integrado de valor para una evaluación sostenible (MIVES)” de forma determinista en el análisis ambiental de la construcción industrial. Esta metodología permite la formulación de objetivos multidimensionales, utiliza una estructura de requerimientos jerarquizada y es capaz de unificar indicadores cuantitativos y cualitativos para llegar a un índice de sostenibilidad ambiental. Sin embargo, la selección de los criterios es una labor compleja que influye mucho en el resultado final y los indicadores empleados distan de ser determinísticos, siendo conveniente aplicar técnicas de simulación Monte Carlo o aritmética difusa para mejorarlo. Una ventaja de MIVES es la asignación de una función de valor a cada indicador, cuantitativos o cualitativos. Sin embargo, esta labor es subjetiva y requiere de un gran conocimiento del problema. Ello, no obstante, permite el trabajo interdisciplinar de grupos de expertos para definir las funciones de valor de los indicadores. Sin embargo, MIVES presenta oportunidades de mejora, objeto de investigación científica.

El Anejo 13 de la norma EHE de hormigón estructural [12] define un “Índice de contribución de la estructura a la sostenibilidad” utilizando el modelo MIVES. Existen trabajos [13,14] donde se aplica la metodología a piezas de hormigón estructural o edificios que no incluyen técnicas de

optimización. Además, este enfoque queda limitado a aspectos ambientales que no consideran el ciclo completo de la vida de una estructura o el uso de hormigones de baja huella de carbono. Son técnicas jerárquicas que no contemplan las interacciones entre los distintos factores. La investigación propuesta trata de dar respuesta a los retos sociales planteados incorporando la toma de decisiones y la sostenibilidad social y aplicando las tecnologías de la información y comunicaciones, así como el uso de materiales avanzados, como tecnologías facilitadoras esenciales. El aspecto más relevante de BRIDLIFE consiste en incorporar un análisis del ciclo de vida definiendo un proceso de toma de decisiones que integre los aspectos sociales y medioambientales mediante técnicas analíticas de toma de decisiones multicriterio tanto de forma previa a los procesos de optimización multiobjetivo, como posteriormente en la priorización de las soluciones del frente de Pareto. Un análisis crítico de las tareas necesarias para conseguir este objetivo indica la necesidad de coordinar un grupo multidisciplinar amplio capaz de aglutinar no sólo distintas perspectivas técnicas, sino también distintos intereses, públicos y privados.

Existen dificultades al realizar un análisis de ciclo de vida de una infraestructura debido a las incertidumbres presentes en la definición de las entradas y salidas del sistema [10], que incluye la tecnología empleada en la elaboración de las materias primas, la procedencia de los materiales y su transporte, la definición de los procesos constructivos y de demolición y reutilización de los materiales [15]. El reto implica un proceso de toma de decisiones que minimice los impactos sociales y medioambientales al coste más bajo posible. En este sentido, algunos trabajos [16] proponen procesos de toma de decisión eco-amigables basados en AHP [17] que aplican al caso de dos tipologías de puentes. Sin embargo, una de los inconvenientes más importantes que encuentran es la gran dependencia de los resultados en función de los pesos asignados a cada uno de los factores.

La línea de investigación basada en la optimización multiobjetivo empleada por nuestro grupo constituye una técnica sin información a priori de las preferencias del decisor al analista que realiza la optimización y genera un conjunto de alternativas eficientes. El proyecto BRIDLIFE busca un salto cualitativo en nuestra línea de investigación en cuanto a que se pretenden técnicas de decisión con información a priori, donde el decisor proporciona al analista una estructura de preferencias y éste es quien construye el modelo incluyendo en él toda esta información. Sin embargo el conocimiento explícito de las preferencias del decisor no es sencillo (incorporación de criterios de sostenibilidad social y ambiental en la gestión del ciclo de vida del puente). Se necesita conocer la estructura de preferencias, no cometer errores en el proceso de extracción y, además, considerar que el decisor suele modificar sus preferencias a lo largo del proceso de resolución.

2. Hipótesis de partida y objetivos generales del proyecto

La hipótesis de partida es, como se ha comentado anteriormente, que la metodología actual en el diseño de puentes de hormigón pretensado, se hace de forma secuencial, con un predimensionamiento previo que luego se contrasta en un proceso iterativo, hasta que se cumplen con todas las restricciones y estados límite previstos. Este proceso no conduce directamente a una optimización estructural, muy dependiente de la experiencia previa del diseñador. Una alternativa es la utilizada por nuestro grupo consistente en una automatización del proceso de diseño que optimice la estructura simultáneamente con distintas funciones objetivo. Sin embargo, ello supone una elección previa de la tipología constructiva y de los parámetros previos de diseño. Además, el conjunto de soluciones eficientes (frontera de Pareto) debe dar paso a una decisión de la alternativa más adecuada. Esta metodología mejorada presenta, no obstante, serias dificultades. No se atiende

a la sostenibilidad social y ambiental del ciclo de vida completo, lo cual puede hacer cambiar la tipología previa elegida en la optimización; además, no contempla el ciclo completo de la vida de la estructura, ni tampoco es capaz de aprovechar al máximo las ventajas tecnológicas de hormigones con baja huella de carbono. Por tanto, es necesario utilizar las técnicas multicriterio como soporte metodológico, tanto de forma previa a la optimización, como posteriormente en la decisión final tras dicha optimización.

Para la consecución de los objetivos del proyecto, es necesario alcanzar una serie de objetivos específicos que, a su vez, se basan en unas determinadas hipótesis:

- Es posible integrar múltiples actores, escenarios y criterios (tangibles e intangibles) en técnicas analíticas que asistan en la toma de decisiones complejas que incluyan aspectos de sostenibilidad social y ambiental mediante herramientas colaborativas entre los actores implicados y la participación de grupos interdisciplinares de expertos.
- Las decisiones públicas (instituciones) y privadas (empresas) adecuadas pueden mejorar la sostenibilidad, las prestaciones a largo plazo y la durabilidad de las infraestructuras como los puentes pretensados incluso con escenarios presupuestarios muy restrictivos.
- Dado un horizonte temporal para una estructura, es posible encontrar un diseño y una gestión posterior de dicho activo que mejore otras alternativas, incluso con presupuestos restrictivos.
- Las medidas estratégicas, de proyecto y preventivas derivadas de un sistema de apoyo a la toma de decisiones multicriterio son preferibles por su menor coste social y ambiental a la reparación severa de los puentes.
- El uso de hormigones de baja huella ecológica es efectivo en la construcción, demolición y reciclaje de puentes pretensados, mejorando la sostenibilidad social y ambiental.
- La identificación y evaluación de los riesgos que afectan a las personas, a lo largo de todo el ciclo de vida de un puente pretensado, mejora significativamente la sostenibilidad social.
- Es posible encontrar buenas prácticas en el diseño, conservación, mantenimiento y desmantelamiento de los puentes pretensados que sean robustas a cambios en los escenarios presupuestarios.

El objetivo general perseguido en este proyecto se basa en afrontar el reto social que supone la creación y la conservación del patrimonio de las infraestructuras en escenarios de fuertes restricciones presupuestarias, mediante la resolución de los problemas complejos planteados en el ámbito de las decisiones públicas y privadas. Para resolver este reto social se precisa un salto científico capaz de integrar a los distintos actores y grupos de expertos en la toma de decisiones considerando criterios de sostenibilidad social y ambiental a lo largo de todo el ciclo de vida de las infraestructuras. Este proceso se integra con técnicas de optimización mutiobjetivo que se aplicarán, al caso particular de puentes pretensados y al uso de hormigones de baja huella de carbono. Un estudio de sensibilidad de los escenarios presupuestarios y de las hipótesis tomadas en los inventarios del análisis del ciclo de vida proporcionará conocimiento no trivial sobre las mejores prácticas. Esta metodología será aplicable a otros tipos de estructuras.

Los objetivos generales se desarrollarán mediante los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollo de un indicador de sostenibilidad que integre aspectos ambientales, sociales y económicos que sirva para la toma de decisión multicriterio.

- Análisis del ciclo de vida de las emisiones equivalentes de gases de efecto invernadero y consumos energéticos para hormigones de baja huella de carbono.
- Identificación de factores de riesgo durante el ciclo de vida de los puentes pretensados.
- Formulación y resolución del problema de optimización multiobjetivo que contemple el ciclo completo de la estructura pretensada.
- Análisis paramétrico y de sensibilidad de la toma de decisiones respecto a cambios en los escenarios presupuestarios y en las hipótesis del análisis del ciclo de vida.

3. Metodología

La investigación que se pretende llevar a cabo en este proyecto combina técnicas y disciplinas diversas: análisis estructural, toma de decisiones multicriterio, optimización heurística multiobjetivo, análisis del ciclo de vida y técnicas de minería de datos. Por tanto, se trata de una combinación que se integra en una propuesta cuyo objetivo es la priorización del tipo de diseño y del mantenimiento posterior de puentes pretensados optimizados, basándose en criterios de sostenibilidad social y ambiental bajo presupuestos restrictivos. Nuestro grupo de investigación, centrado hasta el momento en la optimización multiobjetivo, ha empleado técnicas sin información a priori del decisor. En este caso, la optimización proporciona alternativas eficientes al decisor. Sin embargo, este enfoque reduce mucho las posibilidades en la toma de decisiones. En efecto, la otra posibilidad son las técnicas con información a priori, donde el decisor informa sobre las preferencias al analista, que realiza la optimización con su modelo. Por tanto, la metodología general propuesta (Figura 1) se basa en un enfoque mixto e interactivo, donde el decisor proporciona información sobre las preferencias al analista que, tras la optimización multiobjetivo aporta un conjunto de soluciones eficientes que el decisor debe evaluar antes de tomar su decisión.

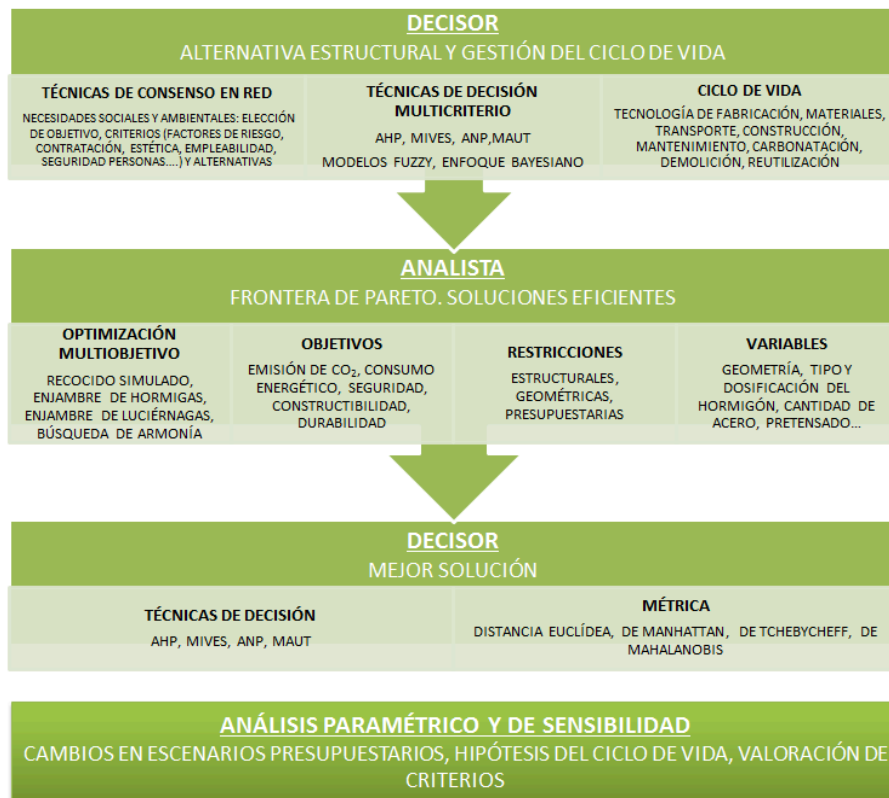


Figura 1. Esquema metodológico.

Por tanto, la novedad de la propuesta metodológica trifase se basa en la integración de técnicas de información a priori, donde el decisor (grupos de interés) informa de las preferencias al analista (en cuanto a tipologías, métodos constructivos, conservación, etc.), produciéndose con esta información una optimización multiobjetivo capaz de generar alternativas eficientes. La última fase pasa por un proceso de información a posteriori para que el decisor contemple aspectos no considerados en la optimización para dar la solución final completa.

4. Resultados

El proyecto BRIDLIFE pretende incorporar aportaciones significativas en el campo de la toma de decisiones relacionadas con el diseño y conservación de puentes pretensados, teniendo en cuenta escenarios presupuestarios muy restrictivos. La principal contribución es la incorporación de criterios de sostenibilidad social, especialmente centrados en aspectos de seguridad para las personas y equidad social intergeneracional. Estos resultados se dirigen hacia un mejor conocimiento en el diseño de las estructuras de hormigón, mejorando la capacitación tecnológica de las empresas del sector y optimizando sus procesos de diseño, con el objetivo último de generar un beneficio social y medioambiental. Los resultados transferirse a códigos y normativas, paquetes informáticos de software para proyectistas y recomendaciones de proyectos.

Aunque el proyecto de investigación tuvo inicio en el 2015 y termina a finales del 2017, ya se han publicado aportaciones que, de forma muy breve, y atendiendo a publicaciones indexadas en la Web of Science, se detallan a continuación. Como antecedentes necesarios se indican algunos trabajos previos, fruto del proyecto HORSOST, precedente al actual. La optimización de un puente de vigas artesa se abordó con algoritmos híbridos basados en el recocido simulado [18] y algoritmos meméticos [19]; se utilizaron algoritmos de enjambres de luciérnagas para optimizar el coste y las emisiones de CO₂ de vigas en I, incorporando la carbonatación en el ciclo de vida [20]; asimismo se evaluó el ciclo de vida de hormigones con distintas adiciones incluyendo la carbonatación y la durabilidad [21].

Las primeras aportaciones realizadas en el año 2015, ya dentro del proyecto, fueron la optimización de estribos abiertos mediante algoritmos híbridos de escalada estocástica [22]; la optimización del coste de puentes en vigas artesa con hormigón con fibras [23] y la optimización de las emisiones de CO₂ de pasarelas de hormigón pretensado y sección en cajón [24]. Destaca también el trabajo desarrollado, basándose en una aproximación cognitiva, de una metodología que permite la toma de decisiones tras la aplicación de técnicas de optimización multiobjetivo [25].

En el año 2016 se empezaron a realizar aportaciones realizadas, fundamentalmente con la evaluación de los impactos sociales de las infraestructuras a lo largo del ciclo su ciclo de vida [26,27]. Se avanzó con la optimización de la energía embebida en puentes de vigas artesa [28] y en la optimización multiobjetivo del coste, las emisiones de CO₂ y la seguridad a lo largo del ciclo de vida de puentes cajón [29]. Se han comparado puentes losa postesados y puentes prefabricados óptimos [30]. Otra aportación de interés se realizó con la colaboración del profesor Dan M. Frangopol, que realizó una estancia en nuestro grupo de investigación. Se comparó el coste del ciclo de vida de puentes cajón usando una aproximación basada en la fiabilidad [31].

Durante el año 2017, último del proyecto, existen trabajos ya publicados y otros en proceso de revisión. Se describen brevemente los ya publicados. Se aplicó el análisis de ciclo de vida completo atendiendo a todo tipo de impactos ambientales a muros de contrafuertes [32], introduciendo una metodología que se está aplicando a estructuras más complejas como los puentes. Se a introducido

un metamodelo basado en redes neuronales para mejorar el rendimiento en el proceso de optimización multiobjetivo de puentes en cajón [33]. También se optimizaron las emisiones de CO₂ en puentes de vigas artesa realizados con hormigones con fibras [34].

Aparte de estas aportaciones, directamente relacionadas con el proyecto BRIDLIFE, durante este periodo de tiempo destacan dos trabajos similares aplicados a la optimización del mantenimiento de pavimentos de carreteras desde los puntos de vista económicos y medioambientales [35,36].

Cabe destacar, por último, que durante los años 2015-2016 se han leído cinco tesis doctorales relacionadas, de forma directa o indirecta, con los objetivos desarrollados por el presente proyecto de investigación [37-41], existiendo otras cinco en estado avanzado de desarrollo.

5. Conclusiones

Con los antecedentes y realizaciones realizadas en el proyecto BRIDLIFE, se puede indicar que, la línea de investigación ha profundizado en proyectos anteriores, basados fundamentalmente en la optimización multiobjetivo en fase de diseño y construcción. Sin embargo, el objetivo de este proyecto es dar un salto científico al incorporar la visión social y el análisis completo del ciclo de vida en la toma de decisiones. Para ello se han elegido los puentes pretensados como elemento de estudio para determinar el alcance del proyecto.

El motivo de este planteamiento no solo es un desafío científico, sino también una necesidad social. En efecto, las incertidumbres relacionadas con la toma de decisiones en el diseño de nuevas infraestructuras que contemplen aspectos de sostenibilidad social y ambiental en situaciones extremas de restricciones presupuestarias, así como la decisión en las políticas de mantenimiento y gestión de activos, demolición y reutilización de las infraestructuras es un problema altamente complejo que afecta directamente a las estructuras de hormigón. Se hace necesario profundizar en la incorporación de la durabilidad y el uso de hormigones no convencionales con baja huella de carbono en la toma de decisiones. Asimismo, sería de gran interés completar y mejorar algunos criterios tomados en la norma EHE relacionados con el cálculo del índice de sostenibilidad, de forma que incorpore el análisis completo del ciclo de vida de las estructuras, incluyendo aspectos como el mantenimiento, la demolición y reutilización de las estructuras. Además, se considera necesario incorporar un índice de sostenibilidad social en la normativa actual.

Sin haber terminado el proyecto, de los resultados obtenidos y publicados hasta el momento, se puede concluir que la línea de investigación ofrece una amplia posibilidad de ramificaciones. Ello obliga a profundizar en aspectos complejos que, probablemente requieran de acuerdos de colaboración con otros grupos de investigación para conseguir resultados de mayor alcance.

Agradecimientos

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio Español de Economía y Competitividad y fondos FEDER (proyecto de investigación BIA2014-56574-R).

Referencias

- [1] G. Bruntland, Our common future, Report of the World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, Oxford, 1987.
- [2] Vital Signs 2005. Washington: Worldwatch Institute, 2005.
- [3] F. Pacheco-Torgal, S. Jalali, Eco-efficient Construction and Building Materials, Springer Verlag London Limited, 2011.

- [4] ASCE, Report card for America's infrastructure, 2013 progress report, Washington DC, 2013.
- [5] ASCE, Structural identification (St-Id) of constructed facilities, Technical report, ASCE SEI Committee on Structural Identification of Constructed Systems, 2011.
- [6] R. Rackwitz, A. Lentz, M. Faber, Socio-economically sustainable civil engineering infrastructures by optimization, *Structural Safety*. 27(3) (2005) 187-229.
- [7] D.F. Wisniewski, J.F. Casas, M. Ghosn, Simplified probabilistic non-linear assessment of existing railway bridges, *Structure and Infrastructure Engineering*. 5(6) (2006) 439-453.
- [8] L.F. Alarcón, D.B. Ashley, A.S. de Hanily, K.R. Molenaar, R. Ungo, Risk Planning and Management for the Panama Canal Expansion Program, *Journal of Construction Engineering and Management ASCE*. 137(10) (2011) 762-771.
- [9] K.R. Moleenar, N. Sobin, E.I. Antillon, A synthesis of best-value procurement practices for sustainable design-build projects in the public sector, *Journal of Green Building*. 5(4) (2010) 148-157.
- [10] D. Jato-Espino, E. Castillo-López, J. Rodríguez-Hernández, J.C. Canteras-Jordana, A review of application of multi-criteria decision making methods in construction, *Automation in Construction*. 45 (2014) 151-162.
- [11] J.T. San José, I. Garrucho, A system approach to the environmental analysis of industrial buildings, *Building and Environment*. 45 (2010) 673-683.
- [12] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [13] O. Pons, A. Aguado, Integrated value model for sustainable assessment applied to technologies used to build schools in Catalonia, Spain, *Building and Environment*. 53 (2012) 49-58.
- [14] O. Pons, A. de la Fuente, Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns, *Construction and Building Materials*. 49 (2013) 882-893.
- [15] C. Knoeri, C.B. Binder, H.J. Althaus, Decisions on recycling: Construction stakeholders' decisions regarding recycled mineral construction materials, *Resources, Conservation and Recycling*. 55 (2011) 1039-1050.
- [16] S.H. Kim, M.S. Choi, H.S. Mha, J.Y. Joung, KIM, Environmental impact assessment and eco-friendly decision-making in civil structures, *Journal of Environmental Management*. 126 (2013) 105-112.
- [17] T.L. Saaty, *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York, 1980.
- [18] J.V. Martí, F. González-Vidosa, F.; V. Yepes, J. Alcalá, Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing, *Engineering Structures*. 48 (2013) 342-352.
- [19] J.V. Martí, V. Yepes, F. González-Vidosa, A. Luz, 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*. 30(3) (2014) 145-154.
- [20] T. García-Segura, V. Yepes, J.V. Martí, J. Alcalá, Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm, *Latin American Journal of Solids and Structures*. 11(7) (2014) 1190-1205.
- [21] T. García-Segura, V. Yepes, J.V. Martí, J. Alcalá, Life-cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability, *International Journal of Life Cycle Assessment*. 19(1) (2014) 3-12.
- [22] A. Luz, V. Yepes, F. González-Vidosa, J.V. Martí, Diseño de estribos abiertos en puentes de carretera obtenidos mediante optimización híbrida de escalada estocástica, *Informes de la Construcción*. 67(540) (2015) e114.
- [23] J.V. Martí, V. Yepes, F. González-Vidosa, Memetic algorithm approach to designing of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement, *Journal of Structural Engineering ASCE*. 141(2) (2015) 04014114.

- [24] T. García-Segura, V. Yepes, J. Alcalá, E. Pérez-López, Hybrid harmony search for sustainable design of post-tensioned concrete box-girder pedestrian bridges, *Engineering Structures*. 92 (2015) 112-122.
- [25] V. Yepes, T. García-Segura, J.M. Moreno-Jiménez, A cognitive approach for the multi-objective optimization of RC structural problems, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 15(4) (2015) 1024-1036.
- [26] E. Pellicer, L.A. Sierra, V. Yepes, Appraisal of infrastructure sustainability by graduate students using an active-learning method, *Journal of Cleaner Production*. 113 (2016) 884-896.
- [27] L.A. Sierra, E. Pellicer, V. Yepes, Social sustainability in the life cycle of Chilean public infrastructure, *Journal of Construction Engineering and Management ASCE*. 142(1) (2016) 05015020.
- [28] J.V. Martí, T. García-Segura, V. Yepes. Structural design of precast-prestressed concrete U-beam road bridges based on embodied energy, *Journal of Cleaner Production*. 120 (2016) 231-240.
- [29] T. García-Segura, V. Yepes, Multiobjective optimization of post-tensioned concrete box-girder road bridges considering cost, CO₂ emissions, and safety, *Engineering Structures*. 125 (2016) 325-336.
- [30] J.V. Martí, J. Alcalá, T. García-Segura, V. Yepes, Heuristic design of precast-prestressed concrete U-beam and post-tensioned cast-in-place concrete slab road bridges, *International Conference on High Performance and Optimum Design of Structures and Materials (HPSM/OPTI 216)* (2016), 10 pp.
- [31] T. García-Segura, V. Yepes, D.M. Frangopol, D.Y. Yang, Comparing the life-cycle cost of optimal bridge designs using a lifetime reliability-based approach, *Fifth International Symposium on Life -Cycle Civil Engineering (IALCCE 2016)*. (2016) 1146-1153.
- [32] P. Zastrow, F. Molina-Moreno, T. García-Segura, J.V. Martí, V. Yepes. Life cycle assessment of cost-optimized buttress earth-retaining walls: a parametric study, *Journal of Cleaner Production*. 140 (2017) 1037-1048.
- [33] T. García-Segura, V. Yepes, J. Alcalá, Computer-support tool to optimize bridges automatically, *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 5(2) (2017) 171-178.
- [34] V. Yepes, J.V. Martí, T. García-Segura, Design optimization of precast-prestressed concrete road bridges with steel fiber-reinforcement by a hybrid evolutionary algorithm, *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 5(2) (2017) 179-189.
- [35] C. Torres-Machi, A. Chamorro, E. Pellicer, V. Yepes, C. Videla, Sustainable pavement management: Integrating economic, technical, and environmental aspects in decision making, *Transportation Research Record*. 2523 (2015) 56-63.
- [36] V. Yepes, C. Torres-Machi, A. Chamorro, E. Pellicer, Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid greedy randomized adaptive search procedure algorithm, *Journal of Civil Engineering and Management*. 22(4) (2016) 540-550.
- [37] C. Torres-Machi, Optimización heurística multiobjetivo para la gestión de activos de infraestructuras de transporte terrestre, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València y Pontificia Universidad Católica de Chile, 2015.
- [38] A.M. Rodríguez-Calderita, Optimización heurística de forjados de losa postesa, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, 2015.
- [39] A.J. Luz, Diseño óptimo de estribos abiertos de hormigón armado en puentes de carretera mediante optimización heurística, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, 2016.
- [40] F. Navarro-Ferrer, Modelos predictivos de las características prestacionales de hormigones fabricados en condiciones industriales, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, 2016.
- [41] T. García-Segura, Efficient design of post-tensioned concrete box-girder road bridges based on sustainable multi-objective criteria, Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, 2016.