

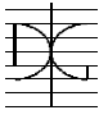
Trabajo de Investigación CST/MIH

**APLICABILIDAD DEL ANÁLISIS MULTIVARIANTE A LAS
TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN DE LOS PUENTES DE HORMIGÓN**

Por:

ALFREDO MARMANEU MENERO

JULIO DE 2016.

Autor / Author: Alfredo Marmaneu Menero	Fecha / Date: Julio 2016	
Título / Title APLICABILIDAD DEL ANÁLISIS MULTIVARIANTE A LAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN DE LOS PUENTES DE HORMIGÓN		
Directores del trabajo / Supervisores: Víctor Yepes Piqueras / José Vicente Martí Albiñana	Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages:
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL		
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Palabras clave / Keywords: Estado del arte / Técnicas de optimización / Puentes de hormigón / Variables Categóricas / Análisis de correspondencias State of the art / Optimization techniques / Concrete bridges / Categorical variables / Correlation analysis		
Código Unesco: 3305.04 Tecnología de la construcción / Puentes		

AGRADECIMIENTOS

Es importante acordarte en los momentos en los que acabas un proyecto, un trabajo o cualquier experiencia, de todas aquellas personas que han compartido contigo el camino y que te han ayudado. Es por ello que doy gracias a mi familia, a mi pareja y a mis compañeros, profesores y tutores del máster.

A mi familia le agradezco la oportunidad que me han dado de haber podido realizar los estudios de máster, sin su apoyo esencial no lo podría haber conseguido.

A mi pareja, gracias por haber sido mi apoyo y mi pilar en estos años, por hacerme mejor persona cada día y hacerme entender que quien quiere algo ha de luchar hasta conseguir sus metas.

A mis compañeros y amigos del máster por tantos momentos de alegrías, de ayuda, de trabajo en equipo, de compartir conocimientos y experiencias. Se han creado vínculos que siempre estarán entre nosotros, por muchos kilómetros que nos separen.

Finalmente, dar las gracias a los profesores por compartir también, sus conocimientos y experiencias, por su respeto y ganas. Con más hincapié, a los tutores que me han guiado en la presente tesis final de máster, por su paciencia y sus ánimos.

A todos gracias.

RESUMEN

La situación socio-cultural en la que nos encontramos en la actualidad, con presupuestos limitados, mayor concienciación con el medio ambiente y con altos niveles de emisión de gases a la atmósfera, hace que el futuro en general y el de la construcción de estructuras en particular está encaminado a la búsqueda de una mayor eficiencia en los diseños.

Desde los años 60 del anterior siglo hasta la actualidad, diversos grupos de investigación repartidos por los 5 continentes, han tratado de llevar a cabo estudios de optimización de puentes de hormigón, ya sea el puente en general o de algunos de sus elementos en particular, publicando artículos en revistas científicas de primer nivel mundial. El análisis de dichos artículos es la base de la presente tesina.

De esta manera, en 1966 Torres et al [1] son los primeros en publicar un artículo de investigación referente a la optimización de puentes de hormigón. En dicha ocasión, desarrollan y verifican con un puente de vigas en I, un programa para el diseño óptimo de puentes de carretera de hormigón pretensado. Tras esta primera divulgación los siguientes artículos se van publicando lentamente hasta la década de los 90, donde hay un mayor desarrollo, destacando la optimización en el diseño de puentes de vigas y en el mantenimiento.

Ya en el siglo XXI, y en paralelo a la mejora de técnicas de optimización y análisis, sigue avanzando el conocimiento y la difusión de artículos. Pero es a partir de 2009/2010 cuando las publicaciones en revistas dan un salto cuantitativo y cualitativo muy grande, se introducen nuevas tipologías de puentes, nuevos elementos analizados, nuevas técnicas, etc. Así pues, se inicia un “periodo de auge” que dura hasta la actualidad. Este hecho lo explica muy bien un parámetro bibliométrico (K) que establece el número de años necesarios para acumular el 50 % de la literatura activa, el cual es de 44 años, coincidiendo pues con el año 2010.

El análisis bibliométrico de los artículos permite destacar que los países con mayor producción en el conocimiento de la optimización de puentes de hormigón son Estados Unidos, con sus grupos de Colorado y Pensilvania liderados por Dam Frangopol y España, con el grupo de Valencia liderado por Víctor Yepes y González-Vidosa.

Una vez analizados cualitativamente los artículos y extraídos datos interesantes, se desarrolla un análisis multivariante de correspondencias, dividido en 19 análisis simples entre pares de variables cualitativas definidas y parametrizadas con la lectura de los artículos publicados. De esta manera, se establecen las relaciones de dependencia entre las diferentes categorías que pueden tomar las variables.

Finalmente, de acuerdo con toda la información extraída de los análisis realizados a lo largo de la tesina final de máster, se establecen unas conclusiones a cerca de los artículos publicados en relación a la optimización de puentes de hormigón. Además se presentan una serie de posibles futuras líneas de investigación, las cuales pueden estar ligadas al estudio de los procesos constructivos, a nuevas tipologías de puentes poco desarrolladas, la sostenibilidad, etc, en definitiva relacionadas con innovación en el área de estudio.

ABSTRACT

The socio-cultural situation in which we find ourselves today, with limited budgets, greater awareness of the environment and high levels of gas emissions into the atmosphere, makes the future in general and the construction of structures in particular aimed at finding more efficient designs.

Since the 60s of last century to the present, several research groups spread across the 5 continents, have tried to carry out optimization studies of concrete bridges, either the bridge in general or some of its elements in particular, publishing articles in scientific journals world-class. The analysis of these items is the basis of this thesis.

Thus, in 1966 Torres et al [1] are the first to publish a research paper concerning the optimization of concrete bridges. On that occasion, they develop and verify with a bridge I-beams, a program for the optimal design of road bridges prestressed concrete. After this first disclosure the following items are slowly publishing until the 90s, where there is a greater development, highlighting the design optimization of beam bridges and maintenance.

Already in the XXI century, and in parallel to improve optimization techniques and analysis, continues to advance the knowledge and dissemination of articles. But, it is from 2009/2010 when publications in magazines give a big quantitative and qualitative leap, new types of bridges, new elements analyzed, new techniques, etc, are introduced. Thus, a "boom period" starts, which lasts until today. This fact explains very well a bibliometric parameter (K) that sets the number of years needed to accumulate 50% of the active literature, which is 44 years, coinciding with the years since 2010.

The bibliometric analysis of articles to emphasize that the countries with the highest production in the knowledge of optimization concrete bridges are the United States, with its clusters of Colorado and Pennsylvania led by Dam Frangopol, and Spain, with Valencia's group led by Victor Yepes and Gonzalez-Vidosa.

Once analyzed qualitatively interesting articles and extracted data, a multivariate correspondence analysis, divided into 19 pairs of simple analysis between qualitative variables defined and parameterized by reading the articles published. Thus, the dependency relationships between different categories that can take the variables are set.

Finally, according to all the information extracted from the analyzes performed over the final thesis master, some conclusions are drawn about the articles published in relation to the optimization of concrete bridges. In addition, a number of possible future research are presented, which may be linked to the study of construction processes, new types of undeveloped bridges, sustainability, etc, ultimately related to innovation in the study area.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE PUENTES	8
1.2. OBJETIVO DEL TRABAJO	8
1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO	9
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS CUALITATIVO Y BIBLIOMÉTRICO	10
2.1. ANÁLISIS CUALITATIVO. LA OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS.....	10
2.1.1. <i>Evolución de la optimización de estructuras</i>	12
2.1.2. <i>Optimización en estructuras de hormigón</i>	13
2.1.3. <i>Optimización de puentes</i>	14
2.2. ANÁLISIS CUALITATIVO. OPTIMIZACIÓN EN PUENTES DE HORMIGÓN... 14	
2.2.1. <i>Visión global</i>	15
2.2.2. <i>Evolución. Los primeros trabajos 1960-1990</i>	15
2.2.3. <i>Evolución. El desarrollo 1990-2010</i>	16
2.2.4. <i>Evolución. El auge 2010-2016</i>	23
2.2.5. <i>Evolución. El futuro</i>	32
2.3. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO.....	33
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS	47
3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	47
3.2. METODOLOGÍA	48
3.3. ESTRUCTURA DEL ANÁLISIS	49
3.4. ANÁLISIS.....	49
3.4.1. <i>Elección de las parejas de variables a estudiar</i>	49
3.4.2. <i>Tablas de comparación</i>	50
3.4.3. <i>Introducción de datos en SPSS</i>	61
3.4.4. <i>Análisis con SPSS</i>	62

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	66
4.1. INTRODUCCIÓN	66
4.2. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN	66
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	127
REFERENCIAS	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Método tradicional de diseño y análisis estructural, Tesis Martí 2010 [2]	11
Figura 2. Método de diseño empleando técnicas de optimización, Tesis Martí 2010 [2]	11
Figura 3. Cuartiles de los artículos	14
Figura 4. Artículos acumulados en el periodo 1966-2009	17
Figura 5. Artículos acumulados	23
Figura 6. Esquema de los tipos de artículos publicados en el periodo 2010-2016.....	24
Figura 7. % Puentes según tipología (periodo 2010-2016)	25
Figura 8. % Puentes según tipología (periodo 2010-2016)	25
Figura 9. % Puentes según tipología (periodo 2010-2016)	27
Figura 10. % Puentes según tipología de vigas (histórico por periodos)	29
Figura 11. % Puentes según tipología de vigas (periodo 2010-2016).....	29
Figura 12. % Puentes según ciclo de vida (periodo 2010-2016).....	30
Figura 13. Nº Artículos publicados & Acumulados por año.....	36
Figura 14. % Artículos acumulados con el paso de los años.....	36
Figura 15. Distribución geográfica de las publicaciones	38
Figura 16. Distribución por países del conjunto de todos artículos estudiados.....	39
Figura 17. Distribución por países de los artículos estudiados - Periodo 2010-2016	40
Figura 18. Distribución por países de los artículos estudiados - Periodo 1966 – 2010.....	41
Figura 19. Distribución por países con método de optimización heurístico	42
Figura 20. Distribución por países con tipología de puentes de vigas	43
Figura 21. Distribución por países en el ciclo de vida diseño	44
Figura 22. Distribución por países en el ciclo de vida mantenimiento	45
Figura 23. Distribución por países con tipo tablero – Vigas en I.....	46
Figura 24. Distribución por países con tipo tablero – Vigas en artesa	46
Figura 25. Distribución por países con tipo tablero – Vigas en cajón.....	46
Figura 26. Distribución por países con tipo tablero – Otros	46
Figura 27. Esquema metodológico del ACOR [146]	48
Figura 28. Introducción de datos en SPSS (1)	61
Figura 29. Introducción de datos en SPSS (2)	61
Figura 30. Ponderar casos en SPSS.....	62
Figura 31. Elección de la variable fila y columna.....	62
Figura 32. Parámetros del modelo.....	63
Figura 33. Estadísticos del modelo	63
Figura 34. Gráficos requeridos.....	64
Figura 35. Definición de rangos	64
Figura 36. Ejecutamos el análisis de correspondencias	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de los avances en el mantenimiento de puentes de hormigón	22
Tabla 2. Índice de productividad (IP) - Países más productores	34
Tabla 3. Índice de productividad (IP) – Grupos de investigación más productores.....	34
Tabla 4. Índice de productividad (IP) – Autores más productores.....	34
Tabla 5. Porcentaje de autores según índice de productividad.....	35
Tabla 6. Cálculos para establecer el Índice de Cooperación	35
Tabla 7. Vida útil (años).....	36
Tabla 8. Variables relacionadas entre sí en el análisis de correspondencias.....	49
Tabla 9. Métodos de optimización – Tipología de puentes.....	50
Tabla 10. Ciclo de vida – Tipo de hormigón.....	50
Tabla 11. Tipo de resolución de la optimización – Tipología de puentes.....	51
Tabla 12. Tipo de heurística – Tipología de puentes	51
Tabla 13. Tipo de resolución de la optimización – Tipología de tablero	52
Tabla 14. Tipología de puentes – Ciclo de vida.....	52
Tabla 15. Elemento optimizado – Método de optimización.....	53
Tabla 16. Tipología del tablero – Método de optimización	53
Tabla 17. Función objetivo - Elemento optimizado	54
Tabla 18. Función objetivo – Tipo de resolución de la optimización	55
Tabla 19. Función objetivo – Método de optimización.....	56
Tabla 20. Función objetivo – Tipología de tablero	56
Tabla 21. Tipo de resolución de la optimización – Tipo de hormigón.....	57
Tabla 22. Tipo de hormigón – Método de optimización.....	57
Tabla 23. Tipo de hormigón – Tipología de puente	58
Tabla 24. Elemento optimizado - Tipo de hormigón	58
Tabla 25. Tipo de hormigón – Tipo de tablero.....	59
Tabla 26. Tipo de resolución de la optimización - Elemento optimizado.....	59
Tabla 27. Tipo de heurística - Elemento optimizado	60

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. OPTIMIZACIÓN EN EL DISEÑO DE PUENTES

El futuro de la construcción de estructuras en general y de los puentes en particular, por sus costes, su elevado consumo de recursos naturales y la contaminación asociada a dicha actividad, está encaminado a la búsqueda de una mayor eficiencia en todas sus fases: diseño, construcción y mantenimiento. Una solución óptima será la que genere una solución con los mínimos costes, mayor calidad y más sostenible, en toda la vida útil de la estructura. Esto hace que aumente el interés en el estudio de técnicas para conseguir dicho objetivo.

En este sentido, se han desarrollado numerosas investigaciones a lo largo de los últimos 50 años, plasmadas en artículos científicos en revistas de primer nivel internacional, en presentaciones para congresos y diversas tesis doctorales.

La presente tesis final de máster pretende analizar la evolución de las investigaciones llevadas a cabo a lo largo del periodo nombrado en el párrafo anterior para poder establecer relaciones entre lo realizado en el pasado, los campos abiertos en el presente y hacia donde pueden ir los futuros estudios.

1.2. OBJETIVO DEL TRABAJO

Los tres principales objetivos del presente trabajo son la realización de un análisis cualitativo y bibliométrico de las diferentes investigaciones, plasmadas en artículos científicos, llevadas a cabo en el ámbito de la optimización de puentes de hormigón, estudiar mediante un análisis multivariante de correspondencias las relaciones temporales, espaciales y cualitativas entre los trabajos realizados y finalmente, establecer cuáles son los campos sin explorar para definir posibles nuevas líneas de investigación.

Los objetivos mencionados se consiguen extrayendo diferentes datos de interés de todos los artículos encontrados en el ámbito de la optimización de puentes de hormigón. Estos son:

- Año de publicación del artículo
- Revista de publicación del artículo
- Región donde se desarrolla la investigación
- Tipología del hormigón
- Tipologías de puentes
- Elemento/s optimizados
- Tipo de tablero
- Uso del puente
- Función/es objetivo
- Tipo de resolución del problema de optimización
- Ciclo de vida en el que se encuentra el puente.

1.3. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El documento se organiza en 5 capítulos:

- Capítulo 1. Presente capítulo de introducción.
- Capítulo 2. Reporta un estudio bibliométrico y cualitativo de los diferentes artículos, publicados en revistas de primer nivel internacional, relacionados con la optimización de puentes de hormigón. En algunas ocasiones se citan algunas conferencias y tesis doctorales de las que parten la mayoría de los artículos.
- Capítulo 3. Describe el análisis de correspondencias, tanto una explicación del método, como las tablas de datos a introducir y los pasos a seguir con el programa de estadística SPSS.
- Capítulo 4. Presenta y discuten los resultados obtenidos en el estudio descrito en el capítulo anterior, de manera que se puedan establecer unas conclusiones significativas.
- Capítulo 5. Resume los resultados obtenidos y propone nuevos campos de estudio, en cuanto a optimización de puentes de hormigón.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS CUALITATIVO Y BIBLIOMÉTRICO

2.1. ANÁLISIS CUALITATIVO. LA OPTIMIZACIÓN DE ESTRUCTURAS.

El sistema tradicional utilizado para el diseño de estructuras en ingeniería civil se basa en el conocimiento y la experiencia de los proyectistas en el ámbito de estudio, los cuales predimensionan y diseñan las distintas partes y secciones de la estructura, para a continuación, comprobar según la normativa vigente, y generalmente con programas informáticos, la solución adoptada, debiendo aplicar ajustes y correcciones sobre el diseño inicial en el caso de ser necesarios. En la mayoría de los casos la solución más adecuada será la más económica, sin embargo, el proyectista tradicional no llega a saber si la solución proyectada está cerca o no del coste y/o diseño óptimo.

El diseño estructural normalmente empleado suele ser un proceso iterativo formado por varios pasos tal como se muestran en la Fig. 1. Este proceso de prueba y error se manifiesta costoso en capital humano y tiempo dedicado. Hay que tener en cuenta que cada estructura depende de unas condiciones de contorno, precios de los materiales, de ejecución, etc., función del emplazamiento y de la coyuntura económica. Por lo que el éxito de dicho proceso consistirá en la adecuación de las citadas reglas de predimensionamiento.

El desarrollo de la potencia de cálculo de los ordenadores personales, la aparición de diferentes técnicas de optimización, entre ellas las heurísticas, y la participación de proyectistas experimentados en el desarrollo del software de la aplicación, permiten realizar de manera completamente automatizada el diseño y optimización de la estructura, sin la necesidad de intervención de un calculista experto y además, con un rendimiento superior. El diseño con técnicas de optimización se muestra en la Fig. 2.

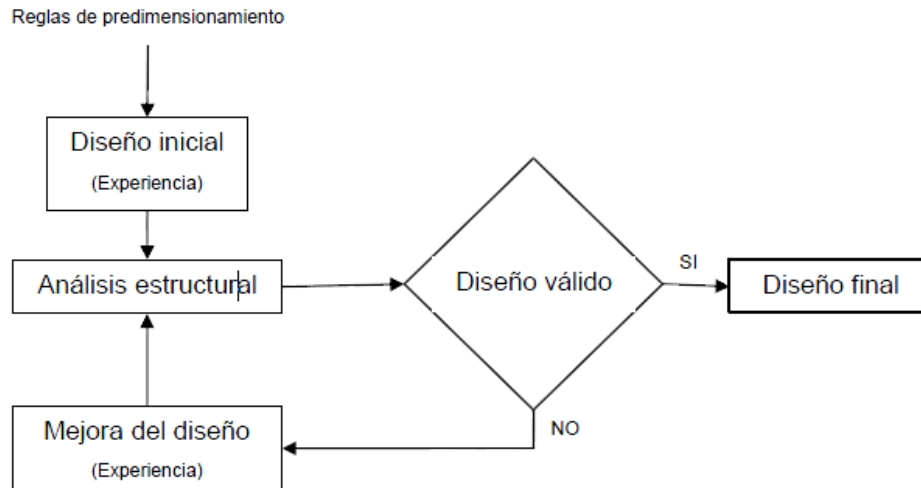


Figura 1. Método tradicional de diseño y análisis estructural, Tesis Martí 2010 [2]

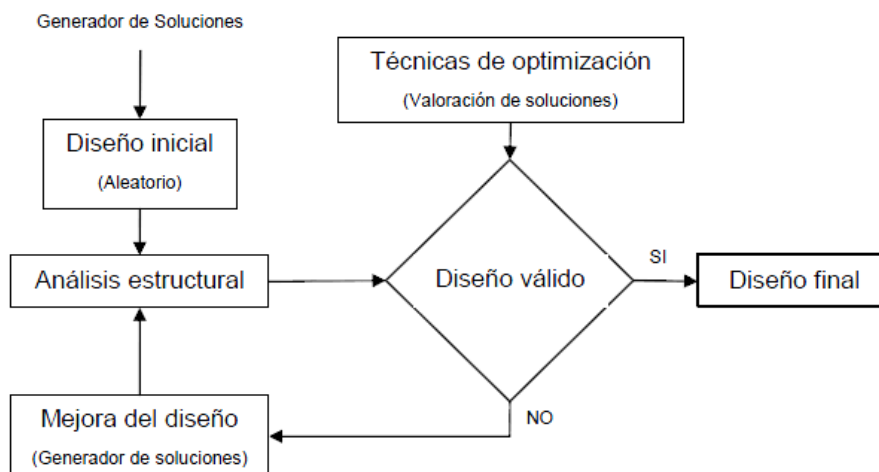


Figura 2. Método de diseño empleando técnicas de optimización, Tesis Martí 2010 [2]

Los procesos de optimización en la ingeniería no se ciñen únicamente al diseño de estructuras en sí, sino que también se han desarrollado estudios en diferentes áreas. Buena prueba de ello se da en el departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universitat Politècnica de València (UPV) donde se han utilizado las técnicas de optimización, entre otros, en trabajos relacionados con las redes de transporte, Tesis Doctoral de Víctor Yepes [3]; con la toma de decisiones, Yepes et al 2015 [4]; con el diseño [5] y mantenimiento de pavimentos [6], Cristina Machí et al 2014; en mejoras en la construcción de firmes [7], Pellicer et al 2012; con las emisiones que se generan en el ciclo de vida del hormigón [8], García Segura et al 2014.

Tal y como se especifica en el punto 2 del capítulo 1 (objetivo del trabajo), los análisis que se llevan a cabo en la presente tesina se basan en los artículos científicos publicados en revistas de primer nivel que tratan de la optimización de puentes de hormigón. No obstante, a lo largo de la tesina se hace referencia también a conferencias y tesis doctorales, que en su gran mayoría son el prelude de un futuro artículo científico. Es interesante recalcar, que hay algunos artículos que no

aparecen en la presente tesina, ya que no todos los artículos están abiertos a la comunidad universitaria, ni algunos autores han querido ceder al autor estos artículos.

2.1.1. Evolución de la optimización de estructuras

Para analizar la evolución de la optimización de estructuras hay que empezar por el primer autor que se interesó por ello, y fue Galileo Galilei [9] en 1630, realizando estudios sobre vigas, llegando a predecir la forma óptima de algunas estructuras elementales. Nuestra teoría moderna de la construcción es en buena medida sucesora directa de la teoría de la solidez de las construcciones presentada en ella. Bien es cierto que algunos de los grandes maestros del siglo XVII como Newton, Euler, Bernoulli, Parent y Lagrange también estudiaron este tipo de estructuras.

Más tarde, el desarrollo del cálculo infinitesimal de Leibniz(1646-1716) y el cálculo de variaciones de Lagrange (1736-1813) sentarían las bases de la optimización de funciones moderna. Posteriormente llegaría el principio de mínima acción de Hamilton (1808-1865).

La siguiente referencia que cabe destacar fue ya en el siglo XIX con Maxwel [10]en 1869 y Levy [11] en 1874, y a comienzos del siglo XX con Mitchel [12] en 1904. Estos autores analizaron el diseño óptimo de estructuras de arcos y cerchas metálicas para conseguir un mínimo peso, para un estado tensional dado. Estos estudios fueron pioneros en el establecimiento de una base científica para la optimización estructural, al desarrollar por primera vez una metodología capaz de proporcionar soluciones optimizadas (Navarrina [13]), aunque el diseño obtenido no fuera construible.

Aunque, muchos de los aspectos básicos de la optimización se desarrollaron en los siglos XVIII y XIX con los trabajos de Lagrange o Euler, el verdadero desarrollo de la Programación Matemática comienza con los trabajos de Kantorovich y Dantzing en los años cuarenta. Sin embargo, no es hasta la revolución informática de los años 70 (como se especifica en párrafos posteriores) cuando, apoyados en el poder de cálculo de los ordenadores, cuando la programación matemática comienza a ser una herramienta ampliamente utilizada en muchas aplicaciones. De hecho hoy en día existen una cantidad importante de códigos que cada vez pueden resolver problemas más grandes y complejos.

Siguiendo con la evolución, en 1955 Klein [14] planteó que los problemas de optimización estructural deberían formularse como problemas de optimización condicionada, a partir de cual comenzó a aplicarse dicha premisa, gracias a la potencia de cálculo que estaban a punto de traer los ordenadores. Schmit [15] en 1960 desarrolla la síntesis estructural, combinando por primera vez los elementos finitos en el análisis estructural, con una programación lineal para la optimización matemática.

Debido a que el análisis estructural suele ser un problema no lineal de muchas variables, la aplicación del método descrito en el apartado anterior se pudo realizar a base de linealizar el problema, ya fuera mediante cambios de variable o mediante simplificaciones del mismo. Así comenzaron a desarrollarse y a emplearse técnicas que permitían resolver problemas no lineales, destacando los criterios de optimalidad de Karush [16], y Kuhn y Tucker [17] en su búsqueda del óptimo global.

Ya en los años setenta comienzan a aplicarse los multiplicadores de Lagrange aumentados o el gradiente generalizado reducido. Desde entonces, se han ido perfeccionando las técnicas, pasando por resoluciones cuadráticas, por programas y softwares de elementos finitos, con heurísticas y metaheurísticas y redes neuronales. No obstante, en algunas ocasiones se ha seguido utilizando la técnica de prueba y error.

En general, la optimización de estructuras ha evolucionado a lo largo de los años en paralelo al desarrollo y mejora de las técnicas de resolución de problemas de alta complejidad resolutive por la no linealidad y el aumento del número de variables.

También intervienen en la evolución las condiciones económicas, ya que por ejemplo en tiempos de crisis económicas los presupuestos en diseño, construcción y mantenimiento se restringen, por lo que la optimización de los recursos alcanza un nivel de importancia mayor. En esta línea, la conciencia social por el medio ambiente ha llevado a que algunos investigadores se interesen por la optimización de recursos naturales consumidos, la búsqueda de materiales alternativos, disminución de las emisiones al medio ambiente (generalmente representadas por las emisiones de CO₂).

Por otro lado, la ampliación de conocimiento sobre las estructuras genera investigaciones que se centran en optimizar aspectos meramente estructurales, como son tensiones, deflexiones y refuerzos entre otras.

2.1.2. Optimización en estructuras de hormigón

En lo referente a las estructuras de hormigón, la evolución sigue la mismas pautas que en las estructuras en general, a medida que se mejoran las técnicas de resolución se avanza hacia mejores soluciones, y se distinguen dos grandes bloques, el del hormigón armado (HA) y el del hormigón pretensado (HP).

En los años 70, 80 y 90 se desarrollaron numerosos estudios relacionados con la optimización de estructuras de hormigón, desarrollándose investigaciones para diversos tipos de estructuras como bien se recogen Kamal et al en 1998 [18]. Ya en el siglo XXI, no cesa la actividad, siguiendo con más estudios con técnicas más avanzadas que permiten aumentar el número de variables de diseño y así la complejidad de los problemas a resolver. En lo que resta del presente punto se muestran algunos ejemplos de artículos que tratan de optimización de estructuras de hormigón.

En cuanto al HA, se han optimizado más tipologías de estructuras como son:

- Estructuras aporricadas (Moragues 1980 [19])
- Muros (Yepes et al 2008 [20])
- Tanques de agua (Saxena et al 1987 [21] y Tan et al 1993 [22])
- Bóvedas (Carbonell et al 2008 [23] y 2011 [24])
- Estructuras de edificación (Surahman & Rojiani 1983 [25], Balling & Yao 1997 [26], Payá et al 2006 [27] - 2008 [28] - 2009 [29] - 2010 [30])

y de elementos tales como:

- Vigas (Coelo et al 1997 [31], García-Segura et al 2014 [32]) [33]
- Pilas de viaductos (Arenas et al 1989 [34])
- Losas macizas (Paul et al 1990 [35])
- Forjados reticulares (Gasch 1991 [36])
- Estribos de puentes (Ivars 2015 [37]).

Por lo que respecta a HP, las investigaciones se han centrado mayormente en estructuras de hormigón lineales, como son diferentes tipos de vigas aisladas (Erbatur et al 1992 [38]), de vigas continuas (Lounis & Cohn 1993 [39] y Al-Gahtani et al 1993 [40]), placas alveolares (Koskisto & Ellingwood 1997 [41]) y diversos elementos de puentes (en varias tipologías), así como todo

en conjunto. Este último caso, el de los puentes, es uno de los objetivos de la presente tesis final de máster, por lo que se ampliará en puntos sucesivos.

2.1.3. Optimización de puentes

Situados ya en contexto, tras una visión global en cuanto a la optimización de estructuras y más puntual en estructuras de hormigón, para acabar de contextualizar el tema que confiere a la tesina, la optimización de puentes de hormigón, en el presente punto se pretende dar una visión general a la optimización de puentes.

Los estudios destinados a optimizar puentes, se inician en los años 60-70. En estos primeros años, el desarrollo en optimización de estructuras de puentes era mayoritariamente con acero, debido al mayor uso de este material en puentes y a su mayor conocimiento. Esto es así hasta la década de los 90, donde la búsqueda de soluciones eficientes para puentes de acero y hormigón ya avanza en paralelo. Es la búsqueda de diseños más eficientes y encontrar las estrategias de mantenimiento óptimas para minimizar los costes, manteniendo en todo momento la fiabilidad de la estructura, lo que predomina en la década de los 90 y los primeros años del siglo XXI, debido a que existe un número elevado de puentes construidos que van envejeciendo. Es a partir de 2009/2010 cuando la optimización de puentes genera un gran número de publicaciones. El interés crece exponencialmente en gran medida por la situación económica y por el gran parque de puentes de hormigón que precisan mantenimiento.

2.2. ANÁLISIS CUALITATIVO. OPTIMIZACIÓN EN PUENTES DE HORMIGÓN

El presente punto se va a desarrollar en base a las investigaciones que se han publicado en revistas científicas difusión mundial, en forma de artículos. Para asegurar que los artículos fueran de repercusión mundial, se ha tenido en cuenta en la búsqueda, la categoría de las revistas, por lo que la gran mayoría de estas pertenecen al cuartil Q1, otros a los Q2 y Q3 y esporádicamente algunas al Q4 (Fig. 3).

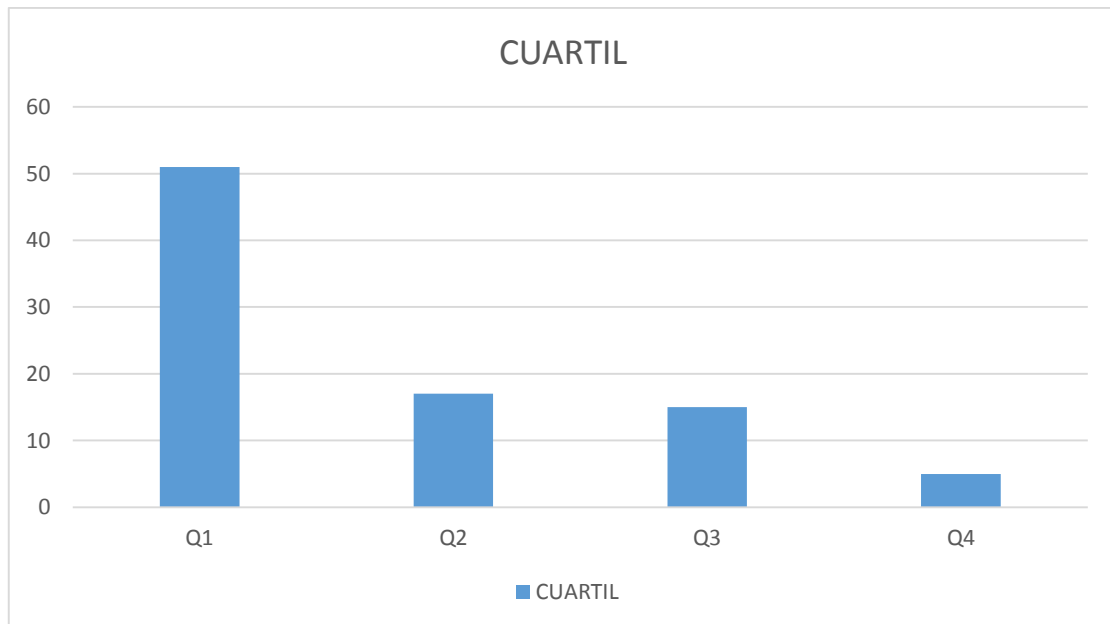


Figura 3. Cuartiles de los artículos

Se han consultado más de 150 artículos, conferencias y tesis doctorales que han ayudado a entender la evolución de la optimización en los puentes de hormigón. En lo que sigue se muestra una visión global a modo de resumen y se analiza la evolución distinguiendo 4 fases:

- Los primeros trabajos: 1960-1990
- El desarrollo 1990-2010
- El auge 2010-2016
- El futuro

2.2.1. *Visión global*

En 1966 Torres et al [1], presentan el primer artículo científico que trata de optimización de puentes de hormigón. En este caso, desarrollan un programa para el diseño óptimo de puentes de carretera de hormigón pretensado.

El desarrollo inicial fue lento, publicándose apenas 4 artículos hasta los años 90. En las primeras investigaciones la tipología de puentes es de vigas y tratan de buscar el mínimo coste de las vigas que forman parte del tablero. En algunas ocasiones comparando con las vigas tipo que los códigos establecían, en otras buscando la geometría óptima mediante modelos matemáticos y con pocas variables de diseño.

La evolución computacional y de las técnicas de resolución, hace que con los años se incorporen un mayor número de variables al sistema, por lo que se empiezan a estudiar otros elementos de los puentes, tableros, superestructuras. Además, se introducen nuevas funciones objetivo, incluso multiobjetivos y otras tipologías de puentes diferentes a la de puente de vigas. No obstante, la gran mayoría de los puentes que se optimizan son de vigas.

Paralelamente, a partir de la segunda mitad de los 90, sobretudo en Estado Unidos, surge la necesidad de mantenimiento de puentes. Esto genera un interés y un gran número de investigaciones acerca de minimizar los costes de mantenimiento y rehabilitación, sin menosprecio de la seguridad, así como la introducción en el diseño del mantenimiento para minimizar los costes de la vida útil de los puentes. Los estudios en mantenimiento siguen desarrollándose en la actualidad.

Ya en el siglo XXI siguen aumentando el número de grupos de investigación que se interesan por la optimización de puentes de hormigón y que se empiecen a utilizar técnicas heurísticas y algoritmos más avanzados. La enorme crisis financiera que ha sufrido el mundo, no ha frenado el desarrollo de este tipo de trabajos, ya que la disminución de los presupuestos y los fondos destinados a la ingeniería civil ha disminuido, por lo que minimizar los costes de diseño, construcción y mantenimiento ha tomado aún más importancia.

2.2.2. *Evolución. Los primeros trabajos 1960-1990*

Como se comenta en el primer párrafo del punto anterior, el primer artículo que trata sobre la optimización en puentes de hormigón se presenta en 1966. Torres et al desarrollan un programa para el diseño óptimo de puentes de carretera de hormigón pretensado. Se presenta el programa en 3 fases: (1) definición de las cargas, unidades de medida y materiales, (2) se definen las variables y los estándares, y (3) se llama a la optimización, que es matemática con programación lineal. Se verifica el programa mediante un ejemplo de puente de vigas en I.

Tras el primer artículo en 1966, el desarrollo en la materia de optimización de puentes de hormigón se estanca un poco más de una década, hasta que en 1979 Templeman [42] estudia el diseño óptimo de tableros celulares de hormigón aramado.

Unos años más tarde en 1982 Rabbat et al [43] se plantean como de eficiente eran las vigas pretensadas de hormigón tipo de la norma AASTHO para el diseño de puentes, con las que se diseñaban la gran mayoría de estos. Esta cuestión les lleva a optimizar dichas vigas para promoverlas como nuevos estándares. La investigación estaba limitada a secciones en I y T y para vanos de más de 24,4 m (80 pies) y con resistencias a la compresión de hormigón de hasta 7000 psi (48,3 MPa).

En 1985 Harry L. Jones, en su grupo de investigación en Texas (EEUU), ejemplifica en un puente la optimización de vigas en forma de cajón [44]. Por otro lado, en Singapur Yu et al 1986 [45] estudiaron la optimización en puentes de vigas de hormigón pretensado, programando el diseño óptimo de vigas en cajón.

Tras los escasos artículos nombrados en el párrafo anterior, que inician la difusión en revistas internacionales la optimización de puentes, en los años 90, empiezan a aparecer de manera continua numerosos artículos para desarrollar el conocimiento de las técnicas de optimización y de sus aplicaciones.

2.2.3. Evolución. El desarrollo 1990-2010

Los primeros artículos destacables de la década no optimizan en si un puente de vigas de hormigón, pero estudian la optimización de puentes mixtos de vigas de acero con losa de hormigón armado, teniendo en cuenta el espesor de la losa de hormigón. Dhillon et al 1991 [46] minimizan la masa del tablero de un puente de vigas en I, mientras que Jenkins 1992 [47] estudia minimizar el coste de la estructura de un puente atirantado con vigas y losa de hormigón mediante algoritmos genéticos.

En 1993 irrumpen en el escenario de la optimización de puentes de hormigón Lounis y Cohn, investigador y profesor respectivamente, los cuales desarrollarán diversos artículos durante 4 años. Los primeros trabajos, desarrollados en 1993, analizan por una parte la superestructura con el coste como función objetivo [48] y por otra el tablero con una optimización multiobjetivo [49]. Este último incluye así una segunda función objetivo, el mínimo peralte inicial, que acompaña al mínimo coste como función objetivo. El conflicto entre ellas se resuelve mediante el óptimo de Pareto. Este artículo se convierte en el primero en el que se estudia una optimización multiobjetivo en puentes y en estructuras en general, ya que los problemas resueltos hasta la fecha con más de un objetivo eran muy limitados (Koski 1984 [50]; Eschenauer et al. 1990 [51]).

A partir de este momento y hasta el año 1997 siguen apareciendo grupos de investigación y publicando artículos donde se optimizaban vigas y tableros en su mayoría, con función objetivo el coste y generalmente hormigón pretensado. De esta manera Geren & Tardon 1994 [52] desarrollan una nueva serie de vigas pretensadas prefabricadas en I utilizadas en el diseño de puentes (NU2000 series) para superar las limitaciones de las vigas en I estándar definidas en la normativa. Las vigas fueron desarrolladas para un rendimiento óptimo en puentes postesados continuos de dos vanos. Estudiando también la optimización de vigas de hormigón, en 1996, Fereig [53] lleva a cabo un trabajo que proporciona al ingeniero un simple y directo método para el diseño económico óptimo vigas pretensadas en forma de I para puentes de un vano y con losa in-situ de hormigón armado. También en 1996, Lin et al presentan un enfoque óptimo para el diseño de vigas de hormigón armado para puentes de carretera, basado en las especificaciones de la "American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)".

Por otra parte, Lounis & Cohn siguen con sus investigaciones y en 1994 [54] analizan el diseño óptimo del sistema estructural de puentes de hormigón como un proceso “multinivel y multiobjetivo”, teniendo en cuenta cinco configuraciones transversales (Tablero de vigas pretensadas en I más losa armada, viga en cajón, dos vigas en cajón, losa aligerada y losa sólida). En 1995 [55], optimizan el diseño de tableros celulares de hormigón pretensado, considerando una o dos celdas en el sistema de “forjado” aligerado. Resuelven con el algoritmo lagrangiano y demuestran que este tipo de tableros son más económicos que los tableros de vigas en cajón para vanos cortos y tablero amplio.

Cabe destacar que Kasuga et al en 1995 [56] establecen en su investigación el mínimo trabajo de fuerza de tensado en los cables de un puente atirantado con tablero mixto acero-hormigón armado. Veremos más adelante como a lo largo de los años, de manera aislada de van desarrollando estudios de este tipo.

Anteriormente, se destaca el año 1997 porque aparecen en escena varios grupos que, a partir de este año, publican artículos relacionados con el mantenimiento de puentes de hormigón, optimizando las estrategias de mantenimiento, maximizando la vida útil del puente (incluyendo el mantenimiento en el diseño), minimizando los costes de rehabilitación, entre otros. El grupo más importante, por artículos publicados tanto en el mantenimiento como en el diseño, es el que lidera en la Universidad de Colorado (EEUU) el ingeniero Dam M. Frangopol.

Así pues, durante la década comprendida entre 1997 y 2007 e incluso hasta el año 2010, sigue el desarrollo de artículos relacionados con la optimización de puentes de hormigón, intercalando diseño con mantenimiento, con algún caso aislado que se centra en el proceso de construcción. A continuación se presenta una breve descripción de los estudios llevados a cabo durante estos 13 años, diferenciando entre diseño, construcción y mantenimiento (Fig. 4).

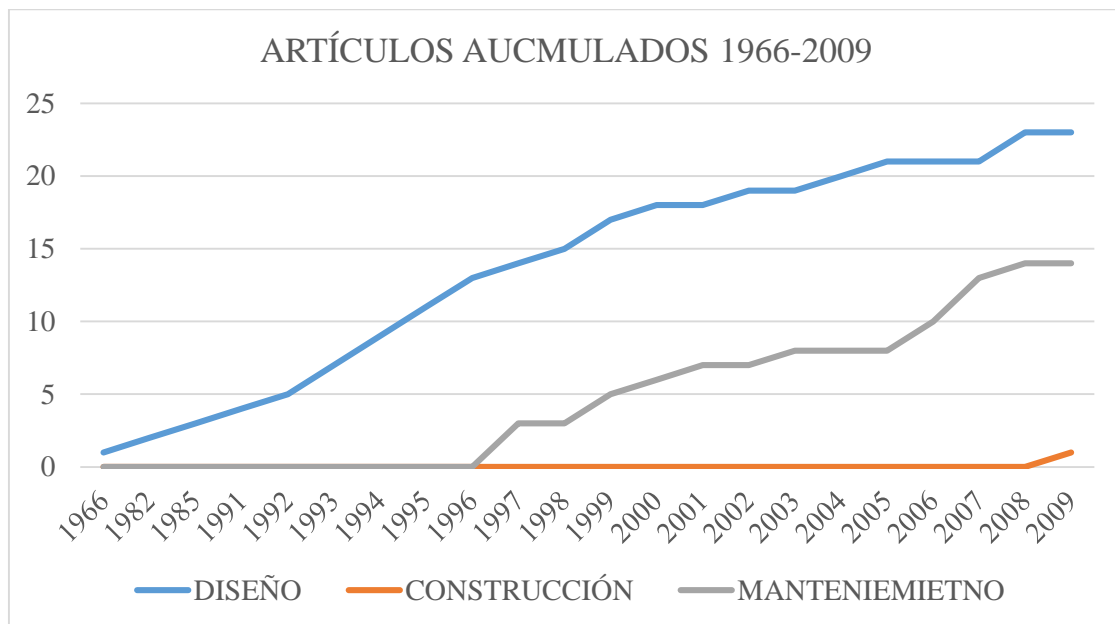


Figura 4. Evolución de los artículos acumulados en el periodo 1966-2009

i. Diseño

Durante el periodo descrito en el párrafo anterior, las publicaciones en materia de optimización en puentes de hormigón, en fase de diseño, sigue su desarrollo mediante trabajos que optimizan vigas y/o tableros de puentes, se introduce el hormigón de altas resistencias (HPC) como herramienta de optimización económica y se empiezan a utilizar con más frecuencia

métodos de programación no lineal, heurísticas y algoritmos neuronales. Cabe comentar que, de manera aislada se estudia la zona de anclaje en puentes posteados y secciones mixtas acero-hormigón.

Ya en sus últimos años de colaboración en el ámbito de la optimización de puentes de hormigón, Lounis, Mirza & Cohn en 1997 [57] optimizan mediante programación no lineal vigas en I de hormigón para puentes, con el objetivo de maximizar la separación de las vigas y minimizar así el peso del tablero en su conjunto. Tal y como realizaran en algún trabajo anterior, el análisis los realizan para varios sistemas, tres en este caso: (1) puente continuo (2 vanos) de vigas postesadas mediante empalmes, (2) puente continuo (2 vanos) de vigas pretensadas convencionales y para puente de un solo vano de vigas pretensadas convencionales simplemente apoyadas. Además, las secciones investigadas son las vigas estándar de Florida, Nebraska, "AASHTO-Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI)", AASHTO-PCI modificadas por bulbo en soporte, y "Canadian Prestressed Concrete Institute (CPeI) standard I-sections".

Ohkubo et al en 1998 [58] innovan con un trabajo de optimización del sistema estructural de un puente de hormigón pretensado con técnicas de sub-optimización y técnicas de toma de decisión difusas (fuzzy), con dos objetivos: el coste total de construcción y **la sensación estética**, nuevo concepto optimizado no estudiado hasta el momento.

Hassanain & Loov 1999 [59], introducen el hormigón de altas resistencias en la optimización de puentes de hormigón (HPC) con el objetivo de evaluar los beneficios económicos de este tipo de material en los puentes de carreteras de vigas en I prefabricadas de hormigón pretensado. Con este trabajo observan que los beneficios económicos del uso de HPC son muy altos, ya que se reduce de forma considerable el número de vigas, maximizándose la separación de vigas. En la misma línea, Priyan Mendis et al en el 2000 [33] analizan el uso óptimo del hormigón de alta resistencia en las vigas prefabricadas super-T de hormigón pretensado, observando las mejoras económicas consecuencia de minimizar el coste y la masa de las vigas. De esta manera se optimiza el uso de vigas en forma de T para puentes de hormigón pretensado.

Zhongguo et al 1999 [60]. Optimizan la **zona de anclaje** de puentes de hormigón pretensado con vigas en I postesadas. El anclaje estándar propuesto es adecuado para tendones de hasta 15 mm de diámetro, con una anchura de 725 mm y que se estrecha a una distancia de 7000 mm de la anchura de banda de la viga en I estándar. Demuestran mediante un ejemplo de puente los avances conseguidos.

Ya en el nuevo siglo XXI, Alex Aswad et al en 2002 [61] desarrolla un programa de ordenador que permite el diseño óptimo de la superestructura de puentes de hormigón pretensado en Pennsylvania, basado en el factor de diseño "carga y resistencia" (LRFD), recientemente implementado en dicho estado. El enfoque de la optimización es de regresión lineal múltiple. Al otro lado del pacífico, Cho et al 2004 [62] introducen a Corea del sur en el área de la optimización de puentes mejorando la eficiencia económica de las secciones estándar (definidas en la normativa) utilizadas en los puentes de vigas pretensadas de hormigón en dicho país. Volviendo a EEUU, Sirca & Adeli 2005 [63] en Ohio, van más allá y optimizan el coste total del tablero teniendo en cuenta las vigas en forma de I, la losa armada y los encofrados. El problema se formula mediante programación no lineal y se resuelve con el modelo de dinámicas neuronales de Adeli y Park.

Kim et al 2008 [64] continúan con el desarrollo de trabajos en Corea del Sur, planteando el diseño óptimo de un tablero mixto de vigas de acero en I y superestructura formada por viguetas armadas más losa de hormigón armado (LB-Deck), en puentes de carretera. El algoritmo de optimización es SUMT.

Finalmente, es importante destacar el artículo de Perea et al en 2008 [65], ya que es el despegue del grupo de investigación de Valencia en el área de Optimización de puentes de hormigón. Este equipo, liderado por los profesores Víctor Yepes y González Vidoso, es uno de los más importantes en dicha materia en la actualidad. El grupo sigue con el desarrollo de la optimización económica de vigas en I para puente de vigas de hormigón pretensado y además inicia en la utilización de técnicas heurísticas en este tipo de trabajos, ya que la técnica heurística de Algoritmos Genéticos tenía un gran uso, pero en los trabajos de optimización realizados en la fase de mantenimiento. En el artículo se utilizan 4 técnicas heurísticas distintas (Simulated Annealing (SA), Threshold Accepting (TA), Random Walk y Descent Local Search) y se comparan los resultados. Cabe destacar que el grupo de Valencia, ya se había iniciado en el uso de las técnicas heurísticas en el hormigón en años anteriores, en la optimización de marcos [66], [67], [68], [69] y pórticos de paso de carreteras [70], muros ménsula [71], bóvedas [72] y [73], pilas de puentes [74] y estructuras aporricadas [27].

ii. Construcción

Como se ha especificado en un párrafo previo, los estudios en fase de construcción se publican de manera aislada. En 2009 Marzouk et al [75] presentan un trabajo en el que optimizan la construcción de tableros de puentes de hormigón mediante el sistema de vigas empujadas. El módulo de optimización se resuelve con la heurística de colonia de hormigas y el enfoque es multiobjetivo, minimizando el coste y el tiempo de ejecución

iii. Mantenimiento

El mantenimiento en los puentes de hormigón, como en las estructuras en general, es esencial para que las condiciones de seguridad y uso se mantengan con el paso de los años. Estas necesidades junto con las limitaciones presupuestarias hace que se empiecen a desarrollar estudios de optimización de las estrategias de mantenimiento a llevar a cabo para mantener los niveles de seguridad y confort adecuados al mínimo coste.

Los diferentes grupos de investigación intentan ir mejorando las técnicas anteriores disminuyendo la incertidumbre con métodos probabilísticos más avanzados. Se estudian tanto puentes aislados como redes de puentes, incluso se tienen en cuenta los efectos del fallo de uno de los puentes en el conjunto de la red.

El método de resolución utilizado para el problema de optimización es mayoritariamente heurístico con los algoritmos genéticos, aunque en algunas ocasiones se utiliza la prueba y error y la simulación de Montecarlo. Una característica importante es que las variables del problema de optimización para en el ciclo de vida del mantenimiento generalmente varían entre 3-5, pocas respecto a las que se utilizan en diseño.

Los artículos publicados relacionados con el mantenimiento de puentes, se podrían dividir en tres grandes bloques, puentes de hormigón, puentes mixtos de acero-hormigón y redes de puentes. Aunque en ocasiones no se trata de puentes de hormigón propiamente dicho, debido a la gran importancia de los estudios, el autor ha decidido incluir las publicaciones.

Como se ha comentado anteriormente, el grupo más importante en cuanto al estudio del mantenimiento de puentes de hormigón en el periodo de estudio (1990-2010) es el encabezado por Dam Frangopol, primero en Colorado y posteriormente en Pensilvania (a partir de 2010). En la etapa de Colorado, el profesor trabaja con varios alumnos con los que intenta mejorar y ampliar el conocimiento, estos son Lin, Liu, Enright, Estés, Neves y Marsh. Por otro lado, el desarrollo del mantenimiento toma importancia en Japón, donde diversas universidades repartidas por el país se interesan por dicha área de estudio.

El grupo de Colorado, en los primeros trabajos estudian la optimización a lo largo de la vida útil de las estructuras, Liu et al 1997 [76] y Frangopol et al 1997 [77]. El primero con Liu optimizan la estrategia de mantenimiento a largo plazo de los tableros de puentes con algoritmos genéticos, demostrando la factibilidad del método comparando los resultados obtenidos para la red de puentes real de Nagoya en Japón y el plan de mantenimiento convencional. En el segundo, en colaboración con Lin, estudian una metodología de optimización a lo largo de la vida útil de las estructuras para planear las inspecciones y reparaciones. La optimización se basa en minimizar el coste total de la vida útil que permite mantener el nivel de confianza de la estructura, donde el coste total minimizado incluye el coste inicial y los costes de mantenimiento preventivo, inspección, reparación y fallo. La metodología es ilustrada utilizando vigas en forma de T armadas para puentes de carretera. La resolución del problema de optimización se lleva a cabo con programación dinámica estocástica junto con el programa de Simulación de Montecarlo

También en 1997, Liu siguiendo con su trabajo anterior y ahora en Japón, realizan una optimización multiobjetivo de la rehabilitación de tableros de puentes con algoritmos genéticos [78]. En este caso analizan 6 puentes aislados por una parte y la red de puentes de Nagoya por otra. Asimismo en Japón, pero en la universidad de Osaka, Morikawa et al 1998 [79], proponen un enfoque basado en atributos de utilidad múltiples para el mantenimiento óptimo de puentes de hormigón existentes. Introducen así el enfoque multi-atributo. Se trata de una optimización multiobjetivo para conseguir un efectivo diseño de la viga útil, seguridad y capacidad de carga, maximizando el grado de fortalecimiento.

Volviendo a EEUU, ahora con Enright y en 1999 [80], Frangopol y dicho autor presentan un estudio que se centra en los planes de mantenimiento para puentes de hormigón deteriorados. El efecto de reparar en la probabilidad de fallo, en tiempo variable, se ilustra con varias estrategias de reparación/reemplazo, mientras que la fiabilidad de cálculo se cumple combinando toma de muestras con integración numérica. Se presentan las estrategias de mantenimiento óptimas que hacen que los tiempos de inspección/reparación se optimicen basándose en el mínimo coste esperado sin menosprecio de la fiabilidad. Uno de los resultados muestra que el tiempo óptimo de reparación aumenta hasta que alcanza un límite superior que depende de la restricción en probabilidad de fallo del sistema. Los resultados pueden aplicarse a la predicción del plan óptimo de mantenimiento para puentes de hormigón bajo corrosión. Alumno y profesor, y ahora con la colaboración de Estés, continúan el trabajo integrando las decisiones de mantenimiento, reparación y reemplazo en la administración basada en la fiabilidad, la optimización y el coste de la vida útil [81]. El enfoque propuesto, se ilustra mediante dos ejemplos (un puente de carretera nueva y uno existente). El tablero tenido en cuenta es mixto de vigas de acero y losa de hormigón.

Ya en el siglo XXI, en la universidad de Yamaguchi (Japón), Miyamoto et al [82] desarrollan un nuevo sistema de gestión (BMS) para puentes de hormigón deteriorados. El método propuesto (BMS) ofrece varios planes de mantenimiento basados en una combinación de mínimo coste en mantenimiento y máxima calidad. La elección del mantenimiento óptimo se lleva a cabo con algoritmos genéticos.

Ahora con Estes, Frangopol en 2001 [83] proponen un marco probabilista para optimizar el tiempo y el tipo de mantenimiento sobre el uso de la vida útil esperado de una estructura deteriorada. La optimización se lleva a cabo mediante prueba y comparación

De manera aislada, en Canadá, Morcous et al en 2003 [84] optimizan las condiciones ambientales y operacionales específicas de los puentes. Determinan con un enfoque basado en algoritmos genéticos, las combinaciones de los parámetros de deterioro para tableros de hormigón utilizando las bases de datos actuales para una red de puentes en una región dada.

En 2006, Liu y Frangopol [85], vuelven a colaborar optimizando la gestión del mantenimiento de una red de puentes bajo incertidumbre con criterios en conflicto: El coste total de

mantenimiento en la vida útil del puente, el fallo y los costes de los usuarios. Presentan un nuevo marco analítico y computacional para la gestión del mantenimiento de una red de puentes utilizando la optimización. El trabajo integra la predicción de la fiabilidad estructural dependiente del tiempo, la evaluación del rendimiento de la red de carreteras y el análisis de los costes a lo largo de la vida útil. Tiene en cuenta los efectos en el conjunto de la red el fallo de un puente individual, evaluándolo probabilísticamente. Muestran la aplicación del método en la gestión del mantenimiento de una red de puentes en Colorado con soleras de hormigón armado deterioradas. Al mismo tiempo, Frangopol y Neves [86] desarrollan un completo enfoque probabilístico y multiobjetivo para el mantenimiento de puentes considerando tipos de mantenimiento individuales. El problema es resuelto utilizando algoritmos genéticos multiobjetivo y las técnicas hipercúbicas de muestreo latinas. Se presentan y discuten aplicaciones multiobjetivo para componentes de puentes de hormigón armado existentes bajo deterioro probabilístico y tipos individuales de mantenimiento definidos probabilísticamente.

En 2007 Liu y Frangopol [87] continúan su trabajo. En esta ocasión optimizan el mantenimiento de una red de puentes existente utilizando Programación dinámica (DP) estocástica. Se trata de un complejo problema de optimización multiobjetivo resuelto usando dos fases del enfoque DP. En la primera fase se identifica los planes óptimos de mantenimiento para cada puente individual con el mínimo coste para la vida útil, sin menoscabo de la seguridad y en la segunda fase entra en juego el límite de presupuesto. La red de puentes tiene puentes de todo tipo, de acero, de hormigón y mixtos. También en 2007, Frangopol tutoriza a Marsh en su trabajo [88] realizan una optimización multiobjetivo del coste y el espaciado de los sensores que miden la velocidad de corrosión embebidos en tableros de hormigón armado deteriorados. Es una manera de optimizar el mantenimiento ya que se monitoriza el deterioro del puente, lo que permite una mejor toma de decisiones.

Otro país asiático, en esta ocasión Corea del Sur también se interesa por el mantenimiento de puentes. De esta manera Lee et al 2007 [89] sugieren un algoritmo para el sistema de gestión de puentes para priorizar las actividades de mantenimiento del puente (BMS) a nivel de red y muestran su implementación. La selección de las actividades de mantenimiento se modela como un problema de optimización combinatoria multiobjetivo, que se resuelve con un algoritmo genético. Utilizan tableros de hormigón como ejemplo para demostrar la factibilidad de la metodología. Un año más tarde, también en Corea del Sur, Koh et al 2008 [90] ejemplifican con un puente de vigas de hormigón pretensado de 5 vanos, un nuevo método para planificar el mantenimiento de puentes que considera simultáneamente la minimización del coste de mantenimiento y la maximización del rendimiento de este.

La tabla- 1 trata de resumir los avances en materia de mantenimiento que se dan en el periodo de 2010 a 2016.

AUTORES	AÑO	PAIS	ESTADO	OPTIMIZACION	AVANCE
Lui et al (1)	1997	EEUU	Colorado	La estrategia de mantenimiento	Estrategia
Frangopol et al 1997	1997	EEUU	Colorado	El planeamiento de inspecciones y reparaciones con un coste mínimo en la vida útil	Planeamiento
Lui et al (2)	1997	Japan	Nagoya	La rehabilitación con estudio multiobjetivo	Rehabilitación y multiobjetivo
Morikawa et al	1998	Japan	Osaka	Efectivo diseño teniendo en cuenta toda la vida útil, con análisis multiobjetivo	Análisis multi-atributo
Enright et al	1999	EEUU	Colorado	El planeamiento de inspecciones y reparaciones con un coste mínimo en tiempo variable bajo fiabilidad de puentes deteriorados	Afección en la probabilidad de fallo y tiempo variable
Frangopol et al	1999	EEUU	Colorado		Integra decisiones de mantenimiento, rehabilitación y reemplazo
Miyamoto et al	2000	Japan	Tokyo	Planes de mantenimiento combinando mínimo coste en mantenimiento y máxima calidad	Nuevo sistema de gestión (BMS) para puentes
Estes & Frangopol	2001	EEUU	Colorado	El tiempo y el tipo de mantenimiento	Marco probabilista para optimizar
Morcous	2003	Canadá	Ontario	Las condiciones ambientales y operacionales	Medio ambiente
Liu et al	2006	EEUU	Colorado	Gestión del mantenimiento con criterios en conflicto: El coste total en la vida útil, el fallo y los costes de los usuarios	El coste del fallo y para los usuarios
Neves et al	2006	EEUU	Colorado	Mantenimiento de puentes de hormigón armado	Enfoque probabilístico y multiobjetivo
Frangopol et al	2007	EEUU	Colorado	Mantenimiento de puentes con límite de presupuesto	Programación dinámica (DP) estocástica
Marsh and Frangopol	2007	EEUU	Colorado	Enfoque multiobjetivo del coste y el espaciado de los sensores que miden la velocidad de corrosión	Introducen la monitorización en el sistema
Lee et al 2007	2007	South Korea	Seoul	Las actividades de mantenimiento con nuevo BMS	Optimización combinatoria multiobjetivo,
Koh et al 2008	2008	South Korea	Seoul	Mantenimiento de puentes considerando mínimo coste y el máximo rendimiento.	Introducen el rendimiento del puente

Tabla 1. Resumen de los avances en el mantenimiento de puentes de hormigón

2.2.4. Evolución. El auge 2010-2016

A partir del año 2010 se produce un “auge” en cuanto a artículos publicados se refiere (Fig. 5). Aparecen nuevos grupos de investigación que tratan la optimización de puentes de hormigón, aunque algunos de ellos ya trabajaban con estructuras e incluso habían publicado algunos artículos aislados.

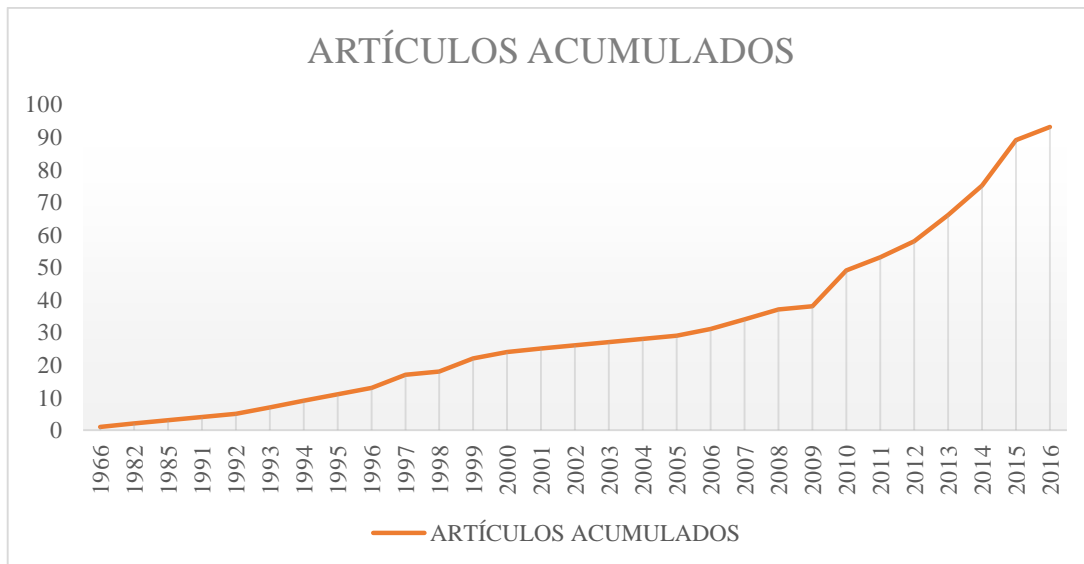


Figura 5. Artículos acumulados

Se realizan estudios de optimización muy variados (Ver esquema de la Fig. 6) diferenciando según: el elemento optimizado, la tipología de puentes y sistema constructivo, el método de resolución del problema de optimización, ciclo de vida en el que se encuentra el puente. Además, existen algunos casos aislados, como por ejemplo tener en cuenta las acciones de fenómenos naturales u optimizar el sistema de cierre de un puente de hormigón pretensado en cajón.

Antes de analizar en profundidad el periodo de 2010 a 2016, cabe destacar el caso de tres países sobre el resto, estos son los de España, China y Estados Unidos.

- En España, emergen dos equipos de trabajo, uno en A Coruña, que diversifican sus estudios entre puentes atirantados, empujados y de vigas, y otro en Valencia (presentan la mayoría de artículos en España) más enfocado a los puentes de vigas de hormigón pretensado optimizando costes y emisiones y en pilas de hormigón armado. Entre ambos grupos, solo en 2010 publican 5 artículos y durante los cinco años hasta la actualidad presentan más de 10 artículos.
- En China los estudios se diversifican entre 8 universidades, optimizando el conjunto o elementos de puentes arco, de vigas, suspendidos, buscando óptimos en el mantenimiento y la construcción, y otro caso aislado que tiene en cuenta el efecto de la acción de las olas. En su conjunto publican 8 artículos entre 2010 y 2016.
- En EEUU, el país que más contribuye en los artículos relacionados con la optimización de puentes de hormigón, en su conjunto o en parte de sus elementos, sigue trabajando en el desarrollo del conocimiento con 11 artículos presentados en el periodo descrito. Aunque aparecen nuevos grupos de investigación, cabe destacar de nuevo al Dr. D. Frangopol, el cual se traslada a la universidad de Bethlehem, en el estado de Pensilvania, donde sigue sus investigaciones con el nuevo equipo, publicando solo ellos un total de 5 artículos científicos.

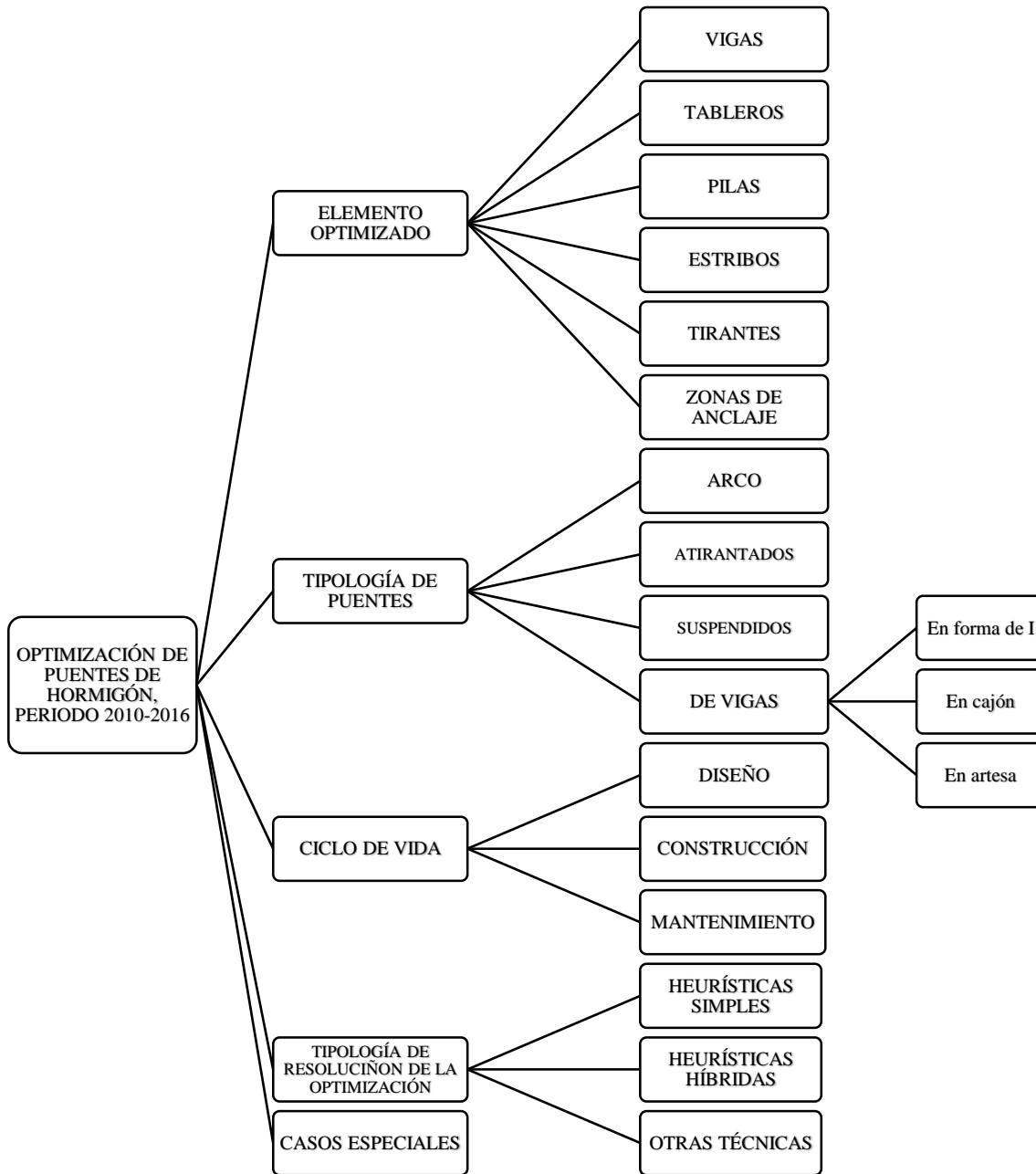


Figura 6. Esquema de los tipos de artículos publicados en el periodo 2010-2016

Si analizamos el elemento optimizado (Fig. 7 y Fig. 8), la variedad es muy amplia, desde puentes en general, a tableros o elementos aislados, como son vigas, pilas, estribos, tirantes y zonas de anclaje. En el camino de facilitar la lectura se distinguen los diferentes elementos, analizando en cada caso su evolución.

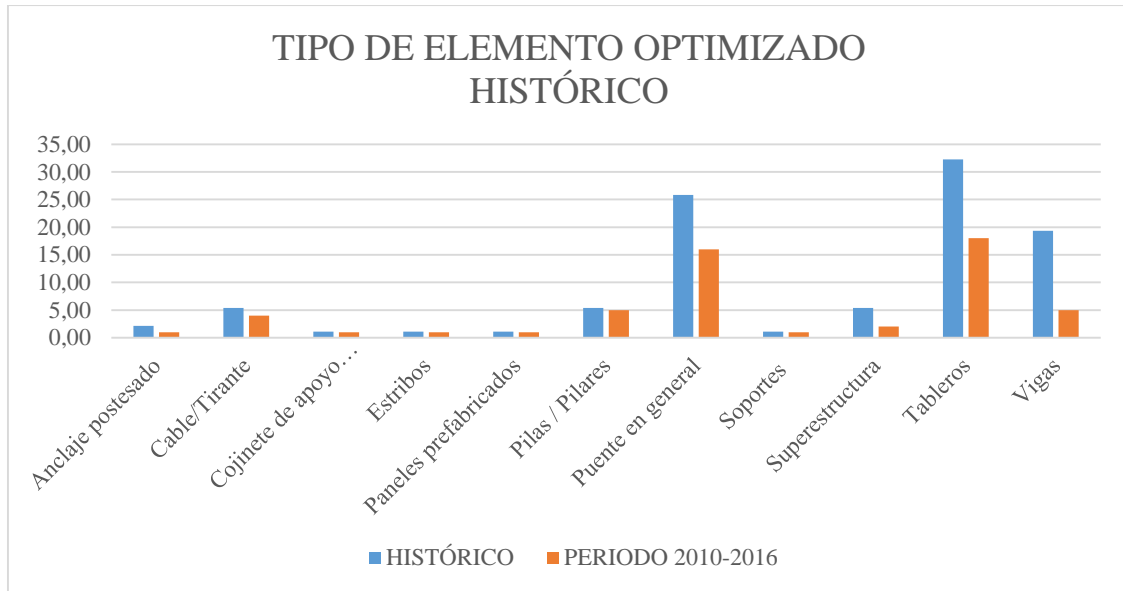


Figura 7. % Puentes según tipología (periodo 2010-2016)

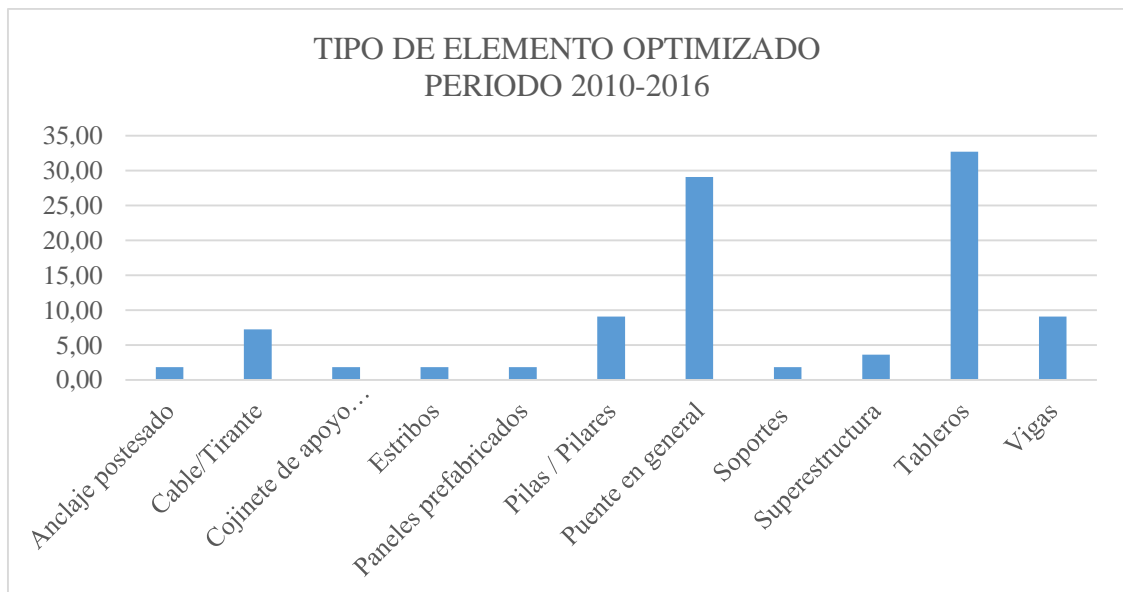


Figura 8. % Puentes según tipología (periodo 2010-2016)

- ❖ **Vigas.** Como se desprende del análisis realizado en puntos anteriores, las vigas son el elemento más optimizado. En el periodo tenido en cuenta en el presente punto siguen las investigaciones que las examinan. De esta manera, Hernández et al 2010 [91], Aydin et al 2010 [92] y Ahsan et al 2012 [93] optimizan el coste de vigas en forma de I pretensadas para puentes. Hernández et al 2010 desarrollan un programa para ingenieros que optimiza vigas pretensadas y tableros de puentes de hormigón y validan el programa con un ejemplo de viga en I. Aydin et al 2010 establecen un método para optimizar la topología y la forma de vigas y tableros de hormigón para puentes, y lo validan optimizando vigas en forma de I. Ahsan et al 2012 optimizan el coste de vigas postesadas de hormigón en forma de I para puentes.

Por otro lado, Perea et al 2010, Kaveh et al 2014 y García Segura et al 2015 analizan las vigas en forma de cajón. Perea et al 2010 analiza un estudio paramétrico de vigas óptimas huecas rectangulares de hormigón armado, Kaveh et al 2014 minimizan el coste de vigas en cajón con sección mixta acero (viga en forma de U) y hormigón (cierra el ajo non losa de hormigón) y García Segura et al 2015 optimizan el coste total de vigas postesadas para pasarelas peatonales.

- ❖ **Tableros.** Numerosos autores optimizan los tableros en su conjunto, en varias tipologías de puentes, como se puede y podrá ver en el presente punto. Algunos ejemplos son: Rousan et al 2014 [94] y Cai & Aref 2015 [95] los cuales minimizan el coste del tablero de hormigón mixto con fibras poliméricas de puentes atirantados. Otros como grupo de Valencia, optimizan tableros con vigas en artesa.
- ❖ **Pilas,** estudiadas por un grupo en Valencia (España), encabezado por Francisco J. Martínez, durante aproximadamente 4 años (2010-2013), de los que se extraen cuatro artículos [96], [97], [98], [99], que optimizan pilas rectangulares huecas con distintas técnicas heurísticas, objetivos y usos de puentes.

En otro estudio Sung & Su 2010 [100] en el que minimizan el coste total de construcción de las pilas armadas rectangulares y circulares para puentes de hormigón bajo acciones sísmicas. Utilizan los algoritmos genéticos para resolver el problema

- ❖ **Estribos.** Este tipo de elemento es únicamente estudiado por Luz et al 2015 [101], examinando los estribos abiertos de hormigón armado en puentes de carretera mediante optimización híbrida de escalada estocástica.
- ❖ **Tirantes.** Son varios grupos los que se preocupan por optimizar los tirantes de puentes atirantados de hormigón o mixtos (acero/hormigón). Baldomir et al 2010 [102] y Hassan et al 2013 [103], optimizan la sección transversal del cable teniendo como restricciones la fuerza del cable y los desplazamientos del tablero. La diferencia es el procedimiento de resolución, donde Baldomir et al desarrollan un programa que interacciona con ABAQUS, mientras que Hassan et al integran los elementos finitos, algoritmos genéticos y curvas “B” de contorno en la estrategia de optimización.

Martins et al 2015 [104] calculan la fuerza de tesado mínima en puentes de hormigón atirantados para lograr la geometría final deseada. El procedimiento incluye un análisis de sensibilidad discreto directo y una optimización estructural mediante un algoritmo basado en la entropía. Además también en 2015 [105] presentan un artículo con el mismo elemento a optimizar pero en el que incluyen los estados constructivos y los efectos a largo tiempo del tiempo debidos a fluencia, contracción y envejecimiento del hormigón. Martins colabora con Simões y Negrão, los cuales ya habían llevado a cabo estudios anteriormente, pero en acero.

- ❖ **Zonas de anclaje** en vigas postesadas. Yail et al 2014 [106], presentan una óptima configuración de anclaje con el correspondiente comportamiento fortalecido de las vigas de hormigón pretensado utilizando bandas de polímero reforzado con fibras de carbono montadas cerca de la superficie postensionada.

En cuanto a tipologías de puentes, también hay diversidad, pero siendo mayoritarios los trabajos de puentes de vigas (Fig. 9). Se estudian puentes arco, atirantados, suspendidos y de vigas.

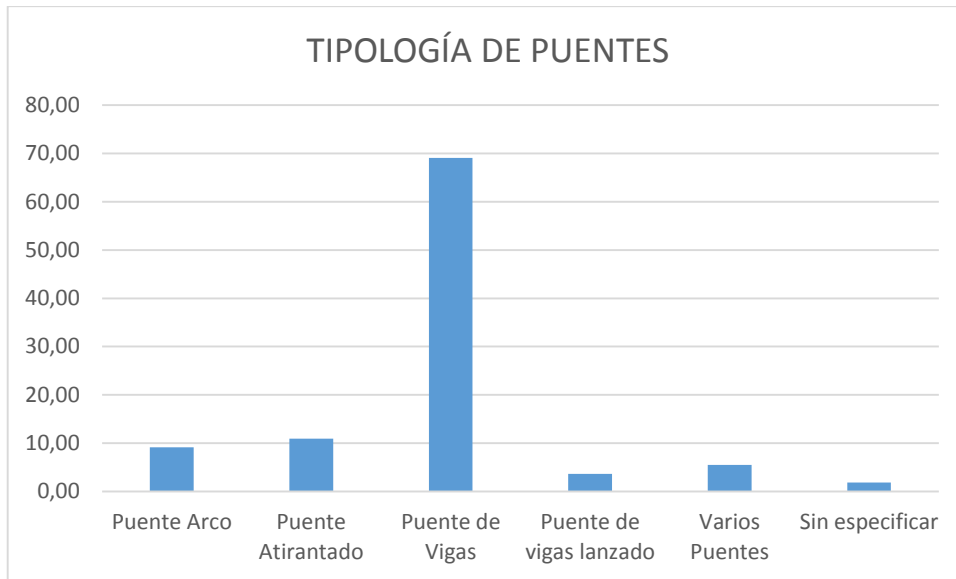


Figura 9. % Puentes según tipología (periodo 2010-2016)

- ❖ **Puentes arco.** En los últimos años se han iniciado los estudios de optimización relacionados con los puentes tipo arco. Islam et al 2014 [107] minimizan el coste total de la superestructura del puente, en concreto del arco de hormigón reforzado y de las perchas de acero. También en 2014, Zordan et al [108] presentan una óptima calibración de un programa de elementos finitos para minimizar las diferencias entre los datos modales y los experimentales. Esto favorece a la optimización de este tipo de puentes, en orden de obtener mejores resultados.

Qiao et al 2015 [109] optimizan el coste del puente arco en todo su conjunto. El método de resolución alterna el álgebra con ANSYS y un módulo de optimización desarrollado por los autores. El mismo año, Pouraminian et al en 2015 [110] en Teheran optimizan la forma de un puente arco de tímpanos abiertos. Ya en 2016, Bruno et al [111], busca la configuración óptima del puentes optimizando de los miembros estructurales del puente, el arco y los tirantes, minimizando la cantidad de material y el rendimiento de la fuerza del tirante.
- ❖ **Puentes atirantados.** Lute et al 2011 [112], minimizan el coste total de un puente atirantado con pilas rectangulares huecas de acero y sección transversal del tablero mixta, formada por vigas en cajón de acero y losa de hormigón armado. También como se ha visto anteriormente, se incluyen aquí los artículos que optimizan los tirantes de puentes atirantados de hormigón.
- ❖ **Puentes suspendidos.** Chen et al 2015 [113] desarrollan un método heurístico mejorando el algoritmo de enjambre de partículas con los algoritmos genéticos para la optimización en puentes. Verifican el método con un puente suspendido en China (Yingwuzhou Yangtze River Bridge), con torres de hormigón armado y tablero mixto de acero/hormigón.
- ❖ **Puentes de vigas.** A las históricamente (Fig. 10) secciones transversales en I y en cajón estudiadas, se unen en estos años de “auge”, las vigas en artesa que estudia el grupo de Valencia, España (Fig. 11), además de otros tipos aislados como son tipo PI [114] rectangular [115] y de doble cubierta [116].

En cuanto a la sección transversal *En forma de I*, Deng & Cai 2010 [117] optimizan las frecuencias naturales del análisis modal en FE y las tensiones/deflexiones de test estáticos, de manera que se mejora el análisis estructural de puente, en este caso de vigas en I; Rana et al 2012 [118] utilizan un operador evolutivo para la optimización del coste total del tablero de un puente de vigas pretensadas de hormigón; Aydin & Ayvaz 2013 [119] optimizan el coste total de un puente de vigas en I de hormigón pretensado; Madhkhan et al 2013 [120] determinan los valores óptimos de las variables de diseño de vigas en I prefabricadas y pretensadas simples ensambladas longitudinalmente para tableros de puentes considerando el coste del puente en toda su vida útil; Bisadi et al 2015 [121] Optimizan el coste de puentes de hormigón con vigas en I con una función de estado de coste límite, dependiente del tiempo, a diferencia de los enfoques tradicionales con límite estructural; Honavar et al 2015 [122] minimizan el volumen de hormigón de ultra-alta resistencia (UHPC) y así el coste en el diseño de unos paneles de UHPC que junto a las vigas en I de hormigón pretensado forman el tablero.

Por otro lado, los puentes de *vigas en cajón* son poco estudiados. En el ICITECH (Valencia), Julián Alcalá en su tesis doctoral en 2009, llevó a cabo una optimización heurística económica de tableros de puentes losa pretensados [123]. Wang et al 2012 [124] minimizan el coste total de construcción de un puente con viga en cajón con 3 nieles de optimización: (1) superestructura, (2) capa de rodadura, (3) subestructura. También en 2012 Guo et al [125] desarrollan una metodología para la optimización del diseño, control de la velocidad y la elección de estrategias de mantenimiento y reparación para puentes para trenes de alta velocidad de vigas en cajón pretensadas. En 2013, Nguyen et al optimizan el coste y la calidad de puentes de hormigón pretensado de vigas en cajón, con un enfoque basado en la fiabilidad, considerando el ataque por picadura de corrosión.

Finalmente, como se especifica anteriormente, el grupo de investigación de Valencia se interesa por la *sección transversal en artesa*. Martí et al 2010 [126] optimiza el coste total del tablero, simplemente apoyado y para distintas luces, formado por una viga pretensada en artesa con losa superior de hormigón armado con las heurísticas “Threshold Accepting” (TA) y “Simulated Annealing” (SA); Martí et al 2013 [127] sigue con la optimización de tableros de vigas en artesa con losa superior, pero en este caso para puentes de carretera, con la heurística “Simulated Annealing” (SA) e introduciendo la fabricación, transporte y montaje de las vigas pretensadas; Martí et al 2014 [128], trabajo que continúa el anterior, optimiza ahora con algoritmos meméticos híbridos; Martí et al 2015 [129] introducen fibras de acero al hormigón y analizan su influencia en el coste total del tablero con los mismos algoritmos meméticos (MA) que en su trabajo anterior; Yepes et al 2015 [130] optimizan el coste y las emisiones de CO₂ para puentes isostáticos de vigas en artesa pretensadas prefabricadas resolviendo el problema con “hybrid glowworm swarm optimization algorithm (SAGSO)”; Martí et al 2016 [131] realizan una optimización del coste y de la energía embebida en el puente de vigas en artesa pretensadas prefabricadas teniendo en cuenta la fabricación, el transporte y el montaje de las vigas.

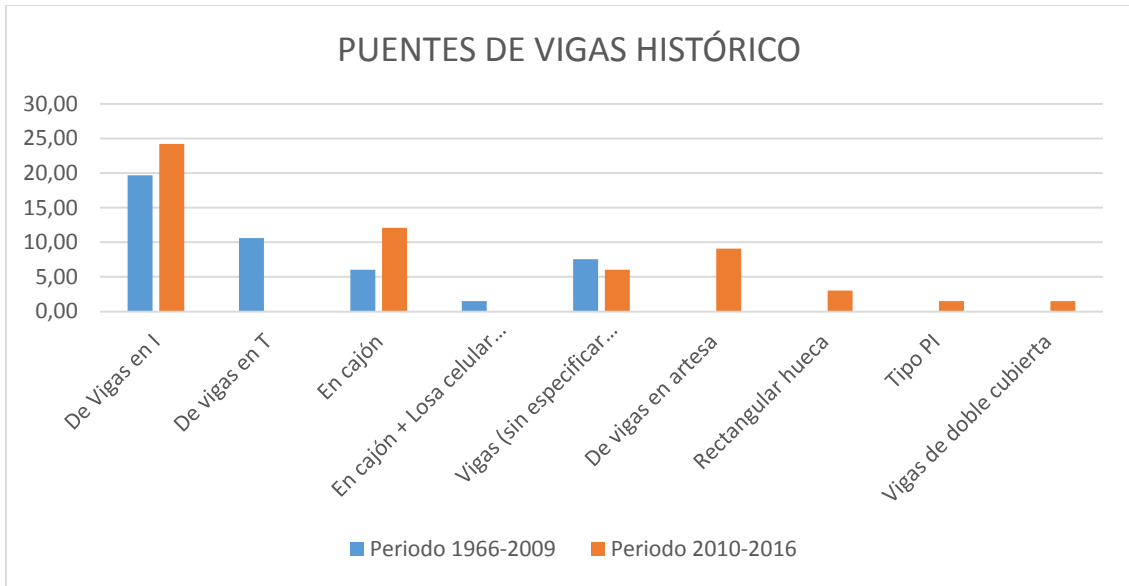


Figura 10. % Puentes según tipología de vigas (histórico por periodos)

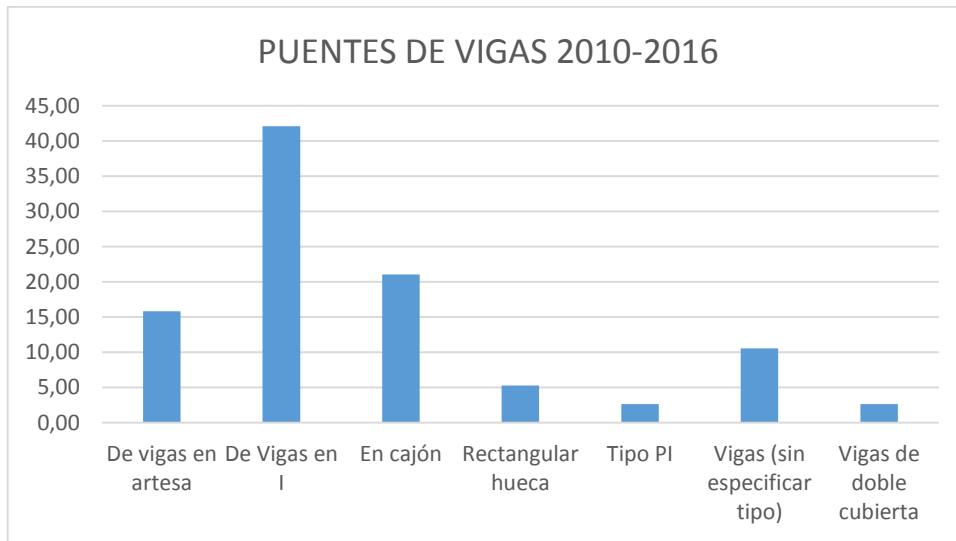


Figura 11. % Puentes según tipología de vigas (periodo 2010-2016)

Por otro lado, si examinamos las publicaciones por el ciclo de vida (Fig. 12) en el que se encuentra el puente, como se ha establecido anteriormente podemos dividir tres bloques: diseño, construcción y mantenimiento. La fase de construcción, como en años anteriores, es la que menos publicaciones genera, algunas de ellas son Wang et al 2012 [124], Fontan et al 2014 [132] y Martins et al 2015 [105]. En cambio, la fase de diseño como se ha podido apreciar en párrafos anteriores es la que más publicaciones genera, debido al interés en reducir costes y hacer lo más eficiente posible la estructura y/o el puente en general. Finalmente, la fase de mantenimiento sigue con su desarrollo marcado por la figura de Dam Frangopol, ya que es su grupo, ahora en Pensilvania (EEUU), el que publica la mayor parte de los artículos, evolucionando respecto de los enfoques de los anteriores 10 años, buscando nuevos retos. Esto es Nader et al 2010 [133] proponen un enfoque novedoso de optimización en el cual el problema se formula para proporcionar estrategias de mantenimiento óptimas con una o ambas acciones esenciales de mantenimiento preventivo utilizando funciones de ciclo de vida. Específicamente la falta de disponibilidad y la redundancia

son utilizadas como indicadores de rendimiento. Unos años después, Zhu et al en 2013 [134] optimizan el mantenimiento de puentes bajo las acciones del tráfico y de terremotos, con un enfoque basado en el riesgo, estableciendo las estrategias de prevención y mantenimiento esencial óptimas. Un año más tarde Barone et al 2014 [135] analizan el mantenimiento óptimo en el ciclo de vida de puentes deteriorados con respecto al ratio del fallo anual del sistema esperado y al coste acumulado esperado. En la misma línea que el trabajo de Barone et al 2014, pero ya en 2015, Sabatino et al [136] publican una optimización del mantenimiento sostenible de puentes de carretera considerando múltiples atributos de utilidad y la actitud frente al riesgo con el objetivo de reducir las consecuencias de un fallo estructural en la economía, la sociedad y el ambiente de alrededor. También en 2015 Saydam & Frangopol 2015 [137] llevan a cabo una optimización multiobjetivo del mantenimiento basada en el riesgo para puentes deteriorados. Buscan minimizar el coste total en la vida útil (y el tiempo de duración de las actividades de mantenimiento) buscando el máximo valor de las pérdidas esperadas.

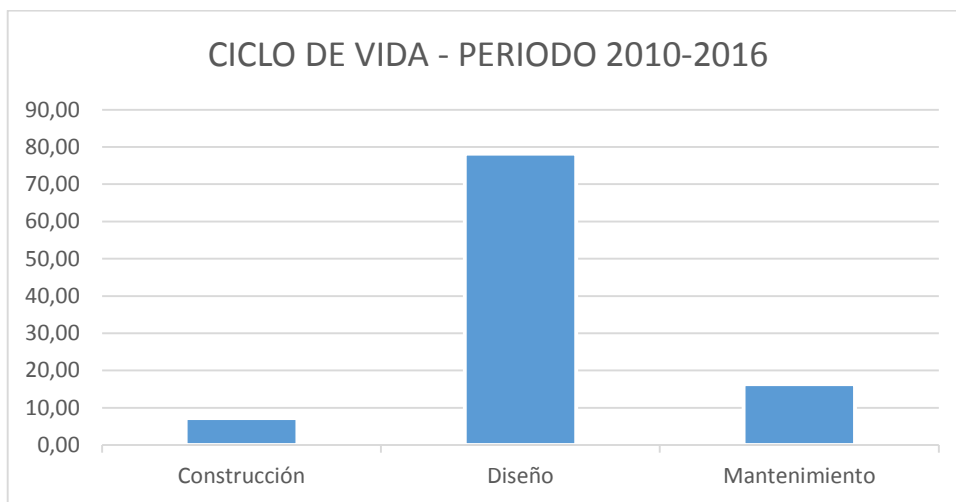


Figura 12. % Puentes según ciclo de vida (periodo 2010-2016)

Además de los artículos del equipo de Pensilvania Orcersi y Sang en 2010 y Zhu en 2013 también estudian el mantenimiento de puentes de hormigón. Orcersi et al 2010 [138] en París (France) optimizan el mantenimiento de una red de puentes teniendo en cuenta los costes para los usuarios si se produce el fallo. Sang et al 2010 [139] en Corea del Norte Tratan de mejorar el comportamiento de puentes de hormigón bajo sismo optimizando la fricción que los apoyos tablero/pilas pueden soportar. La función objetivo depende de dos parámetros: las fuerzas de corte y los desplazamientos de los cojinetes. Y por último, Zhu et al 2013 [115], discípulo de Dam Frangopol, desarrolla en China una estrategia de mantenimiento optimizada para vigas de puentes reforzadas basado en el rendimiento del coste de la vida útil.

Si nos centramos en la tipología de resolución del problema de optimización, se observa una acentuación en el uso de las heurísticas. Los grupos de investigación utilizan heurísticas más comunes como GA, SA o TA, pero también desarrollan heurísticas híbridas e incluso algunas propias. Otros van más allá y resuelven problemas con algoritmos meméticos.

En cuanto al uso que se le da a los puentes optimizados, los puentes para carretera se estudian entre un 80-90 % de los casos (en alguno artículos no se especifica el uso), y únicamente se analizan puentes peatonales o para tren en un par de ocasiones cada uno.

Finalmente, como se expresa anteriormente, existen casos especiales, ya que se establecen condiciones, acciones o tipologías de puentes poco comunes y estudiados. En los siguientes párrafos se muestran algunos de los casos especiales.

Fontan et al en 2011 [140] y 2014 [132] desarrollan procesos de optimización para puentes empujados con vigas de hormigón pretensado. En 2011 minimizan el momento de flexión en el empuje de las vigas mientras que en 2014 minusvaloran el coste total del proceso constructivo.

Por otra parte, Zhang et al 2015 [116] y Dong et al 2014 [141] tienen en cuenta las acciones del oleaje en la búsqueda de la mejor sección transversal de las vigas que forman el tablero o de pre-terremotos a la hora de definir las óptimos planes de mantenimiento respetivamente en la optimización .

En 2011, Yuang et al [114] investigan varios sistemas de cierre para puentes multi-vano construidos vano a vano en voladizos con la intención de optimizar dio sistema y obtener las tensiones apropiadas para un correcto estado de servicio.

Ya inmersos en el año de presentación de la tesina, Saad et al 2016 [142] desarrollan una optimización basada en la fiabilidad del coste total de puentes de hormigón reforzado en toda su vida útil teniendo en cuenta la degradación por corrosión y fatiga. También en 2016, en Italia, Bruno et al [143] terminan un trabajo que iniciaron con una publicación en 2013 [144], mediante la que estudian el comportamiento óptimo de soportes tipo membrana en forma de arco inferior de hormigón. El problema se resuelve mediante SIMP, un método que aúna elementos finitos con optimización.

Más recientemente (artículo no incluido en los análisis), En Mayo de 2016, Simões et al en paralelo a los dos artículos que optimizan los tirantes, realizan un estudio global de puentes atirantados de hormigón minimizando el coste total, las deflexiones y las tensiones [145].

Para finalizar con el periodo de “auge”, el autor considera importante destacar los trabajos más recientes que se están llevando a cabo en el departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la UPV (a partir de ahora DICPIC) en el ámbito de la optimización de puentes de hormigón e incluso en la optimización de otros elementos estructurales y no estructurales, así como todos aspectos que tengan en cuenta los puentes de hormigón. También se destaca a grandes rasgos los principales puntos de las investigaciones que lleva a cabo el grupo liderado por D. Frangopol por la importancia de dicho autor y sus equipos y por su relación con el instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), dependiente en gran medida del personal del DICPIC.

En este sentido, en el DICPIC, una de las principales líneas de investigación es la que llevan a cabo García Segura. T et al, liderados por Víctor Yepes. La autora, en su fase final del doctorado, que ha llevado a cabo en los últimos años, ha realizado una optimización multiobjetivo de un puente de hormigón postesado con sección en cajón. Este trabajo lo ha llevado a cabo en tres fases y que le ha servido para escribir tres artículos aún no publicados.

1. En primer lugar busca el puente óptimo bajo los criterios mínimo coste, mínimas emisiones y seguridad estructural, resolviendo el problema con la heurística “Harmony Shearch” (HS).
2. En una segunda fase, introduce tres novedades respecto a la primera, cambia en criterio de mínimas emisiones por el de inicio de la corrosión, introduce dentro del proceso de resolución con HS las redes neuronales y acaba el proceso de optimización con un cálculo exacto con el programa informático “Bridge”. La introducción de las redes neuronales dentro de la heurística permite que el proceso de optimización sea más rápido, ya que no tiene que calcular cada vez el puente, ya que al tener la red entrenada con datos de la fase 1, esta puede predecir si con las variables obtenidas el puente será capaz de cumplir las restricciones del problema.

3. Finalmente, en una última fase 3, con la frontera de Pareto establecida con las mejores soluciones de la fase 2, García Segura lleva a cabo un análisis de fiabilidad a lo largo de la vida útil (life-time reliability analysis) del puente bajo el ataque por cloruros anteriores. Esto hace que analice el puente en el ciclo de vida de diseño y de mantenimiento, ya que este último estudio permite el cálculo del coste total a lo largo de la vida útil, bajo el ataque mencionado, lo que lleva a poder escoger la solución que genera un menor coste para los usuarios a largo plazo.

Siguiendo con el grupo de Víctor Yepes, y con la optimización de puentes de hormigón propiamente dicha, en 2016 se inició un nuevo proyecto bajo el nombre de “BRIDLIFE”, en el que la línea de investigación es la toma de decisiones en el ciclo de vida en puentes de hormigón. En dicho proyecto, el investigador candidato ha realizado por ahora dos trabajos a destacar: (1) un estado del arte (Review) completo de los métodos de toma de decisiones utilizados en cada etapa del ciclo de vida en los puentes y (2) una toma de decisiones a partir de una frontera de Pareto en un problema de optimización multiobjetivo. En este segundo trabajo cuenta con la colaboración de García Segura y desarrollan un nuevo método: AHP-VIKOR bajo incertidumbre.

Por otro lado, en el DICPIC el equipo liderado por Eugenio Pellicer y Víctor Yepes y como pieza fundamental en las investigaciones Cristina Torres Machí, se encarga del estudio de pavimentos, en el que entre otros trabajos tratan de optimizar el mantenimiento de los pavimentos [146]. Además, en otra línea que tiene en cuenta puentes de hormigón, analizan infraestructuras en base a criterios sociales [147]. Otro equipo, el liderado por I. Payá Zortea y Calderón, analiza el comportamiento al fuego de puentes, entre otros tipos de estructuras. Finalmente, el grupo encabezado por P. Serna estudia hormigones especiales y novedosos, entre otros, el uso de fibras en el hormigón. Esto los ha llevado, entre otros tipo de elementos, al diseño de pilares de hormigón reforzado con fibras para una pasarela peatonal.

En cuanto al equipo de D. Frangopol, siguen con el análisis del mantenimiento de puentes de hormigón e introducen riesgos en estructuras debido a terremotos, tsunamis, socavaciones y cargas del transporte.

2.2.5. Evolución. El futuro

La evolución de las investigaciones, como ha pasado a lo largo de la historia, vendrán marcadas por las necesidades del momento, los avances en tecnológicos y de las inversiones que se quieran realizar, en este caso, en materia de puentes de hormigón. Se observa que se en las últimas investigaciones se tienen en cuenta acciones externas a los puentes, como terremotos, oleaje, etc, también aumenta el número de variables y cada vez tiene más importancia una correcta toma de decisiones para lograr el mejor mantenimiento a menor coste.

En el punto 4 se analizarán los resultados de análisis de correspondencias realizado en el punto 3. Estos resultados marcarán áreas poco estudiadas y que podrían ser interesantes para futuras investigaciones. No obstante, la actual situación socio-económica y el aumento de la cantidad de puentes con cierta antigüedad, invitan la continua búsqueda de herramientas que optimicen el diseño de puentes y su mantenimiento. Además, la optimización del sistema constructivo de los puentes está muy poco estudiado, lo que invita a estudiar este campo.

Un reto importante en el área de análisis que estudia la presente tesina, es poder conseguir que los avances conseguidos puedan estar al alcance de los ingenieros de forma comercial y con una interfaz sencilla.

2.3. ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

Tras un análisis cualitativo de los artículos publicados hasta la actualidad en optimización de puentes de hormigón, en el presente punto se expone un análisis bibliométrico, analizando algunos de los indicadores que la ciencia estudia y calculando porcentajes.

La bibliometría es una parte de la cienciometría que aplica métodos matemáticos y estadísticos a toda la literatura de carácter científico y a los autores que la producen, con el objetivo de estudiar y analizar la actividad científica, proporcionando información sobre los resultados del proceso investigador, su volumen, evolución, visibilidad y estructura. En el caso que ocupa a la presente tesina, se aplica a los artículos científicos publicadas en revistas científicas a nivel mundial y los autores que los han producido. Para ello se ayuda de leyes bibliométricas, basadas en el comportamiento estadístico regular que a lo largo del tiempo han mostrado las diferentes publicaciones. Los instrumentos utilizados para medir los aspectos de este fenómeno son los indicadores bibliométricos, medidas que proporcionan información sobre los resultados de la actividad científica en cualquiera de sus manifestaciones y que se pueden clasificar en dos grandes grupos: los indicadores de actividad y los de impacto.

En el caso de estudio, los indicadores de actividad visualizan el estado real de las publicaciones y dentro de estos se encuentran: número y distribución de publicaciones, productividad, dispersión de las publicaciones, cooperación en las publicaciones, conexiones entre autores, entre otros. Por otro lado, entre los indicadores de impacto se encuentran la evaluación de documentos muy citados y el factor de impacto (FIN) de las revistas donde se publican los artículos, siendo este último el más conocido.

Los índices estudiados, por su interés en la presente tesina, son:

- Índice de productividad (IP)
- Índice de transitoriedad (IT)
- Índice de colaboración o cooperación (IC)
- Cuenta de artículos (se establece en al calcular el IP)
- Distribución geográfica

A continuación se explican y calculan los índices nombrados en el listado anterior, para poder entender la actividad investigadora con cifras, en cuanto a la optimización de puentes de hormigón, de artículos publicados en revistas científicas.

Índice de productividad (IP)

Se define el IP como el logaritmo en base de 10 de los artículos en los que ha participado un autor, grupo o institución, mediante el cual medimos la productividad. En este caso se estudian los IP de autores, grupos de investigación y países. Un $IP \geq 1$ indica la producción de 10 artículos o más, mientras que un $IP = 0$ indica una producción de un solo artículo. De esta manera se identifican tres clases de productividad:

- Grandes productores: $IP \geq 1$
- Productores intermedio: $0 \leq IP < 1$ (entre 2 y 9 trabajos)
- Productores transitorios: $IP < 0$

Del análisis anterior, se desprende que los grupos más productores en el ámbito de la optimización de puentes de hormigón, con un $IP > 1$, son Estados Unidos (EEUU) y España (tabla- 2), con los grupos de Colorado y Pensilvania en EEUU (tabla- 3) y el de Valencia en España (tabla- 4). Es notable la gran diferencia con el tercer país más productor, China, con un número de artículos publicados de 8.

PAIS	ARTÍCULOS PUBLICADOS	IP
EEUU	30	1,477
Spain	18	1,255

Tabla 2. Índice de productividad (IP) - Países más productores

GRUPO DE INVESTIGACIÓN	ARTÍCULOS PUBLICADOS	IP
Valencia	14	1,146
Colorado	10	1,000
Pensilvania	8	0,903

Tabla 3. Índice de productividad (IP) – Grupos de investigación más productores

En cuanto a los autores, los más productores participan en los grupos de investigación que más artículos publican. Por un lado, Frangopol, como se muestra en el análisis cualitativo, es el líder de los grupos de Colorado y Pensilvania y es el autor más productor, y por otro González-Vidosa y Yepes, en el grupo de Valencia, son los tres autores con un índice de productividad mayor de 1, siendo así los autores más productivos.

AUTOR	PARTICIPACIÓN EN ARTÍCULOS DE OPTIMIZACIÓN PUENTES	IP
Frangopol	15	1,176
González-Vidosa	11	1,041
Yepes	12	1,079

Tabla 4. Índice de productividad (IP) – Autores más productores

Índice de transitoriedad (IT)

El índice de transitoriedad hace referencia a la cantidad de autores que realizan un solo trabajo de una rama específica de la ciencia. En la optimización de puentes de hormigón el porcentaje de autores ocasionales o transitorios (IP=0) es de 26,53% del total de autores analizados (tabla- 5).

INDICE PRODUCTIVIDAD	TOTAL AUTORES	%
IP=0	39	26,53
0<IP<1	105	71,43
IP≥1	3	2,04

Tabla 5. Porcentaje de autores según índice de productividad

Índice de cooperación (IC)

El IC mide el grado de colaboración entre varios autores en los trabajos de investigación. El índice viene dado por la estadística que resulta de calcular la media ponderada de autores por documento y dividirlo por el número total de documentos publicados relacionados con la optimización de puentes de hormigón. De esta manera, según los cálculos de la tabla- 6, el cociente entre 296 y 93 establece el Índice de Cooperación en 2,892.

Nº FIRMAS (a)	Nº TRABAJOS (b)	% (b)	a x b
1	7	7,53	7
2	28	30,11	56
3	34	36,56	102
4	18	19,35	72
5	4	4,30	20
6	2	2,15	12
TOTAL	93		269

Tabla 6. Cálculos para establecer el Índice de Cooperación

Vida media (V_{mt})

Según Burton y Kebler se define como “el tiempo durante el cual fue publicada la mitad de la literatura activa circulante sobre un tema determinado”. Se establece la siguiente fórmula para establecer el V_{mt} (Fig. 13, Fig. 14 y tabla- 7):

$$V_{mt} = K + \left(\frac{a - a1}{a2 - a1} \right)$$

Dónde: K es el número entero de años necesarios para acumular el 50 % de la literatura activa, a es el 50 % de la literatura activa, a1 el valor % acumulado antes de llegar al 50% y a2 el % acumulado después de llegar al 50%. Tras el cálculo la **vida media es de 43,5 años**.

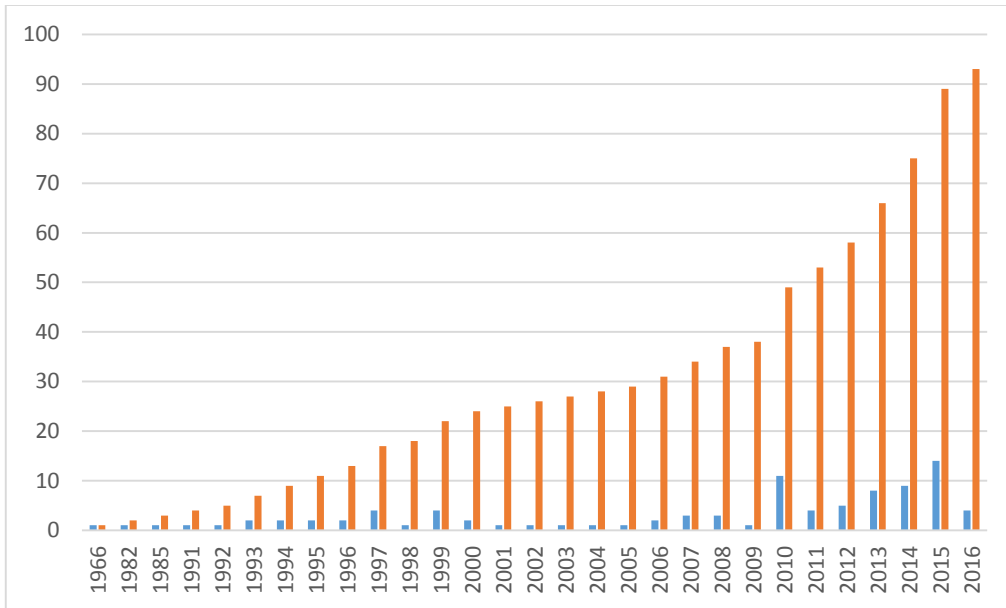


Figura 13. N° Artículos publicados & Acumulados por año

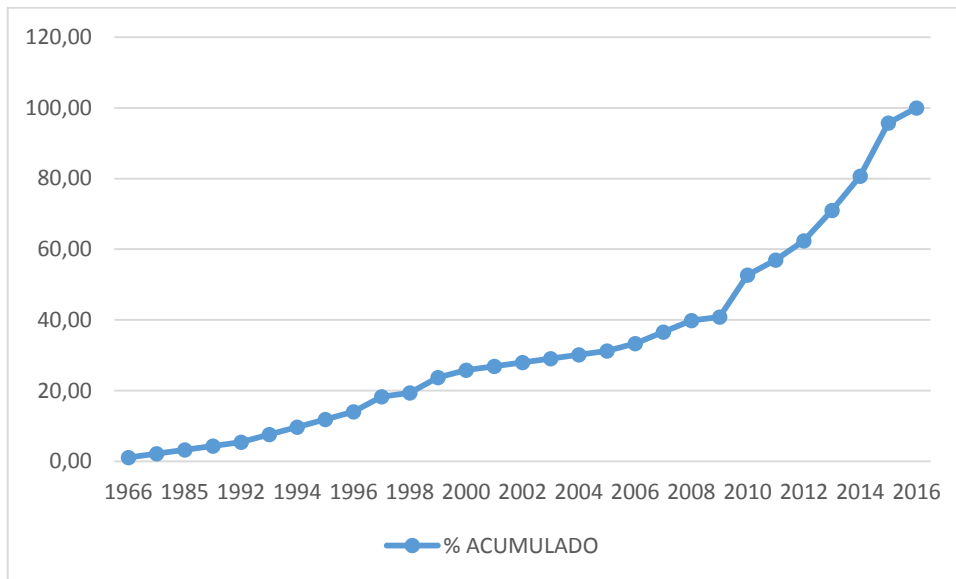


Figura 14. % Artículos acumulados con el paso de los años

V_{mt} (años)	43,5
K (años)	44
a	50
a1	49,46236559
a2	50,53763441

Tabla 7. Vida útil (años)

Distribución geográfica

En la definición y cálculo del índice de producción (IP), en las tablas 2 y 3 se puede observar cual es la distribución geográfica de los países y estados más productores en cuanto a publicación de artículos en revistas científicas relacionados con la optimización de puentes de hormigón. No obstante, el autor ha considerado interesante mostrar visualmente como es la distribución geográfica donde se ubican los grupos de investigación que generan los artículos (Fig. 15). Se muestran con un punto las localizaciones de las universidades donde se ejecutan los trabajos, indicando el tamaño de los puntos la importancia en número de artículos publicados por dicha universidad (más grande indica más artículos).

Por otra parte, se han elaborado una serie de mapas interactivos donde se puede observar también visualmente la distribución de una serie de características extraídas de las publicaciones. Cuanto más rojo está pintado un país mayor es su aportación en dicha característica. Por ejemplo, en la Fig. 16 se puede observar como EEUU y España son los países con mayor número de artículos publicados, seguidos por Canadá, China y Japón, y notificándose una serie de países que aportan poco con un rosa claro, como por ejemplo Australia, Egipto, etc. Así pues, en las figuras que siguen se plasman en un mapamundi las siguientes características:

- Los artículos en el periodo de “auge” 2010-2016 (Fig. 17)
- Los artículos en el periodo 1966-2009 (Fig. 18)
- Los artículos que son resueltos mediante heurísticas (Fig. 19)
- Los artículos que tratan puentes de vigas (Fig. 20)
- Se comparan los artículos según ciclo de vida: en Diseño (Fig. 21) y Mantenimiento (Fig. 22)
- Se comparan los artículos según tipos de vigas: en I (Fig. 23), artesa (Fig. 24), en cajón (Fig. 25) y otros (Fig. 26)

El sistema de coloración de los mapas especificados en la enumeración anterior sigue las siguientes pautas:

- Más coloración roja a mayor importancia, en número de artículos publicados en el país coloreado, de la característica plasmada en el mapa.
- Gris claro, países sin artículos en dicha característica.

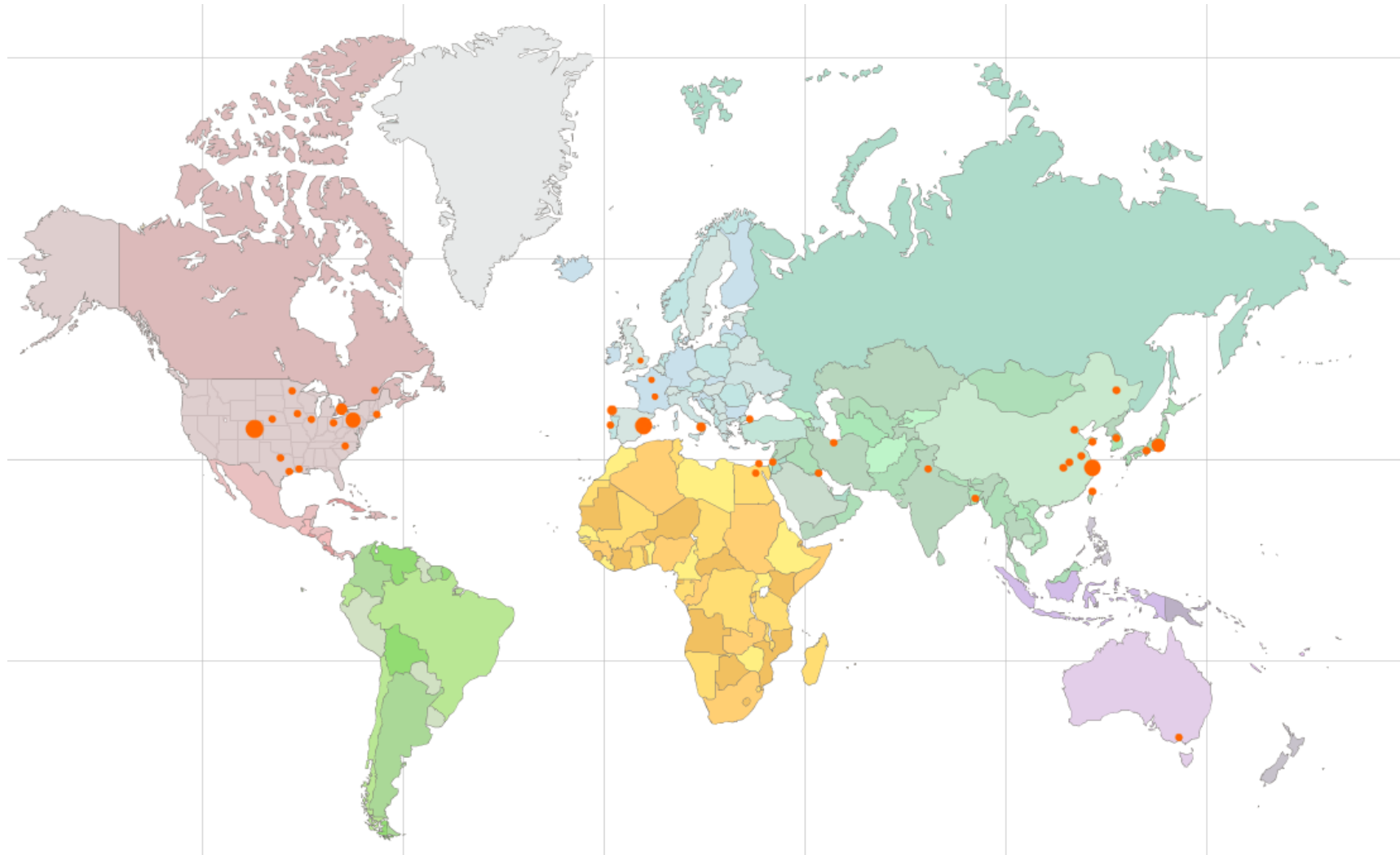


Figura 15. Distribución geográfica de las publicaciones

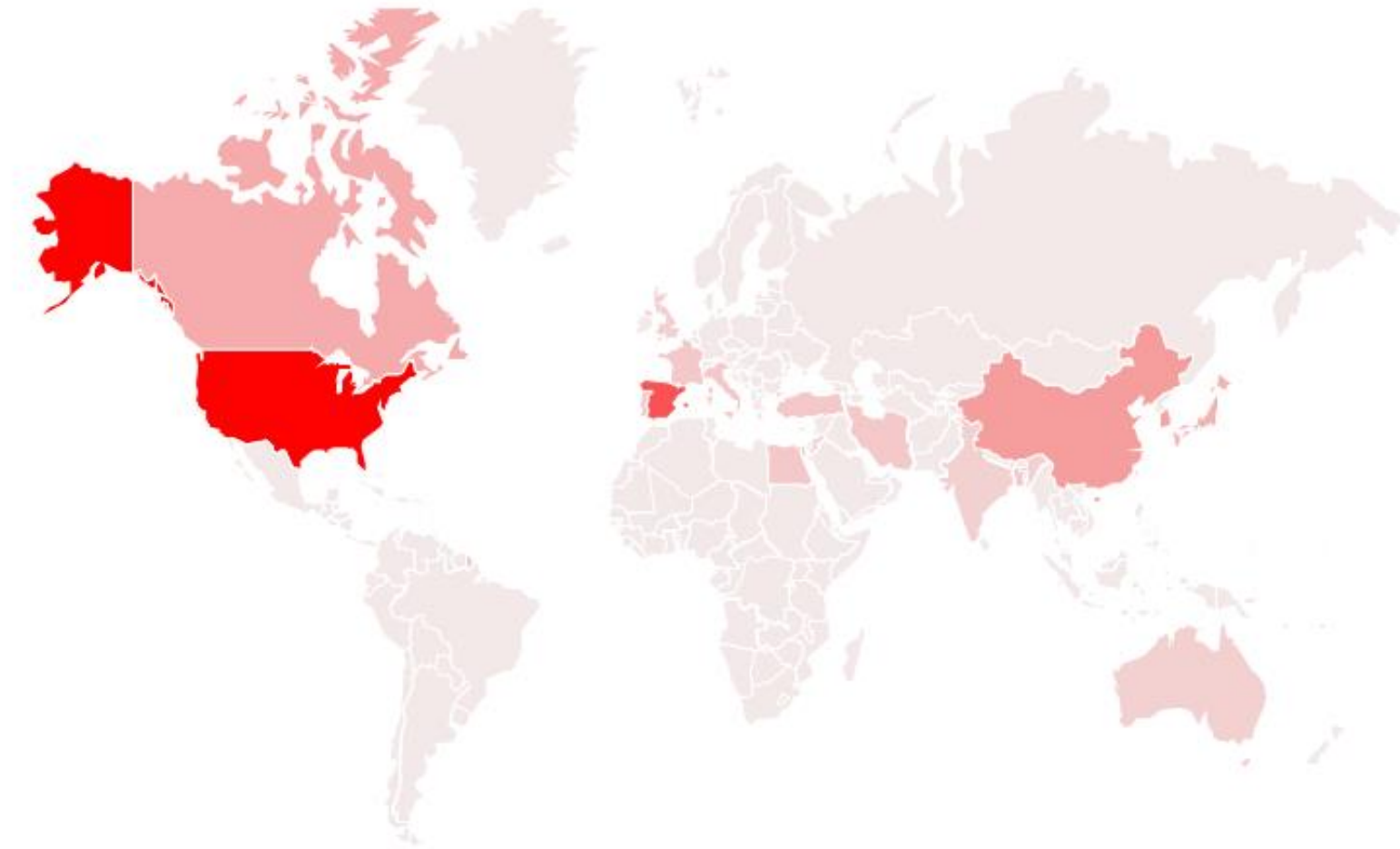


Figura 16. Distribución por países del conjunto de todos artículos estudiados

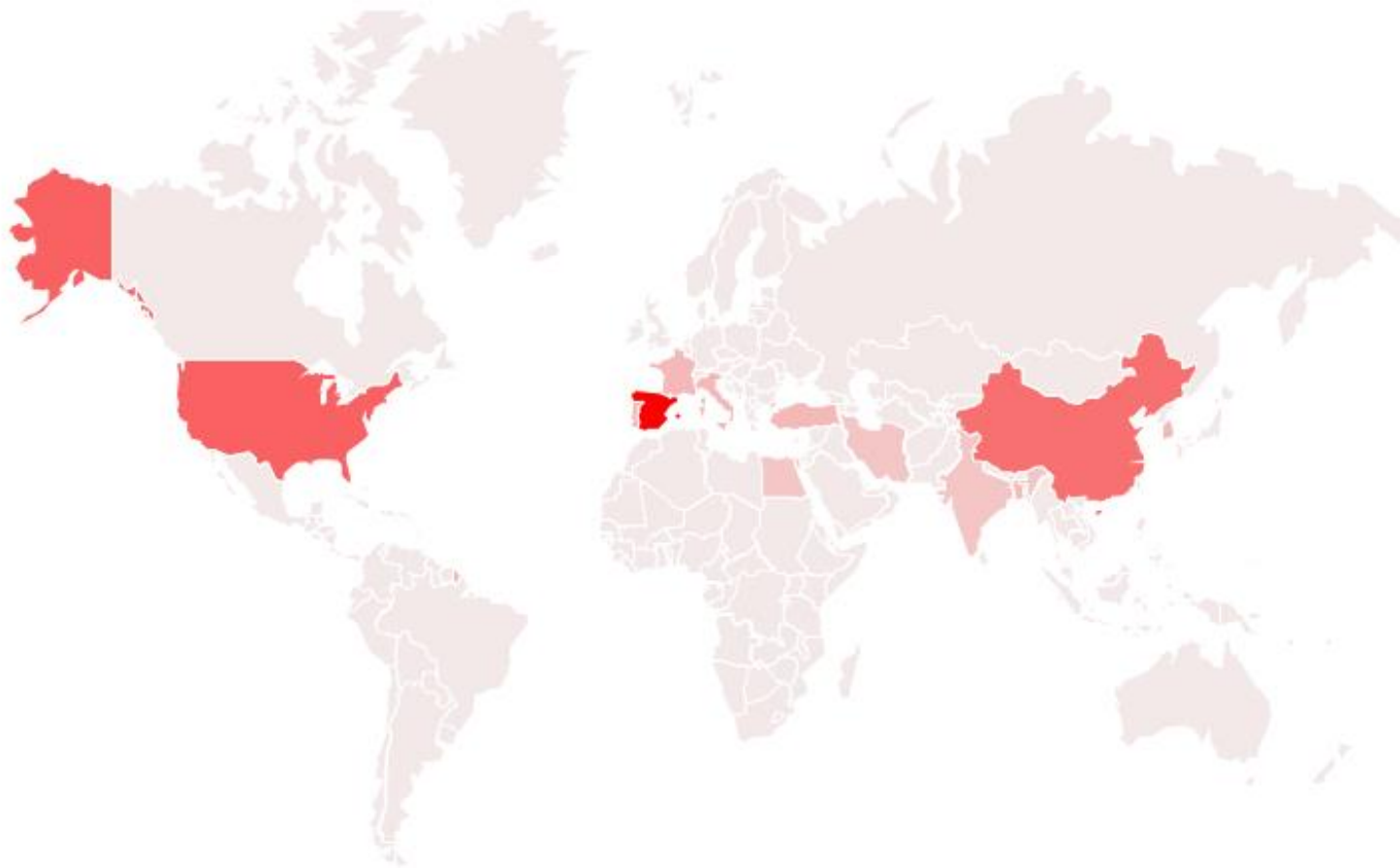


Figura 17. Distribución por países de los artículos estudiados - Periodo 2010-2016

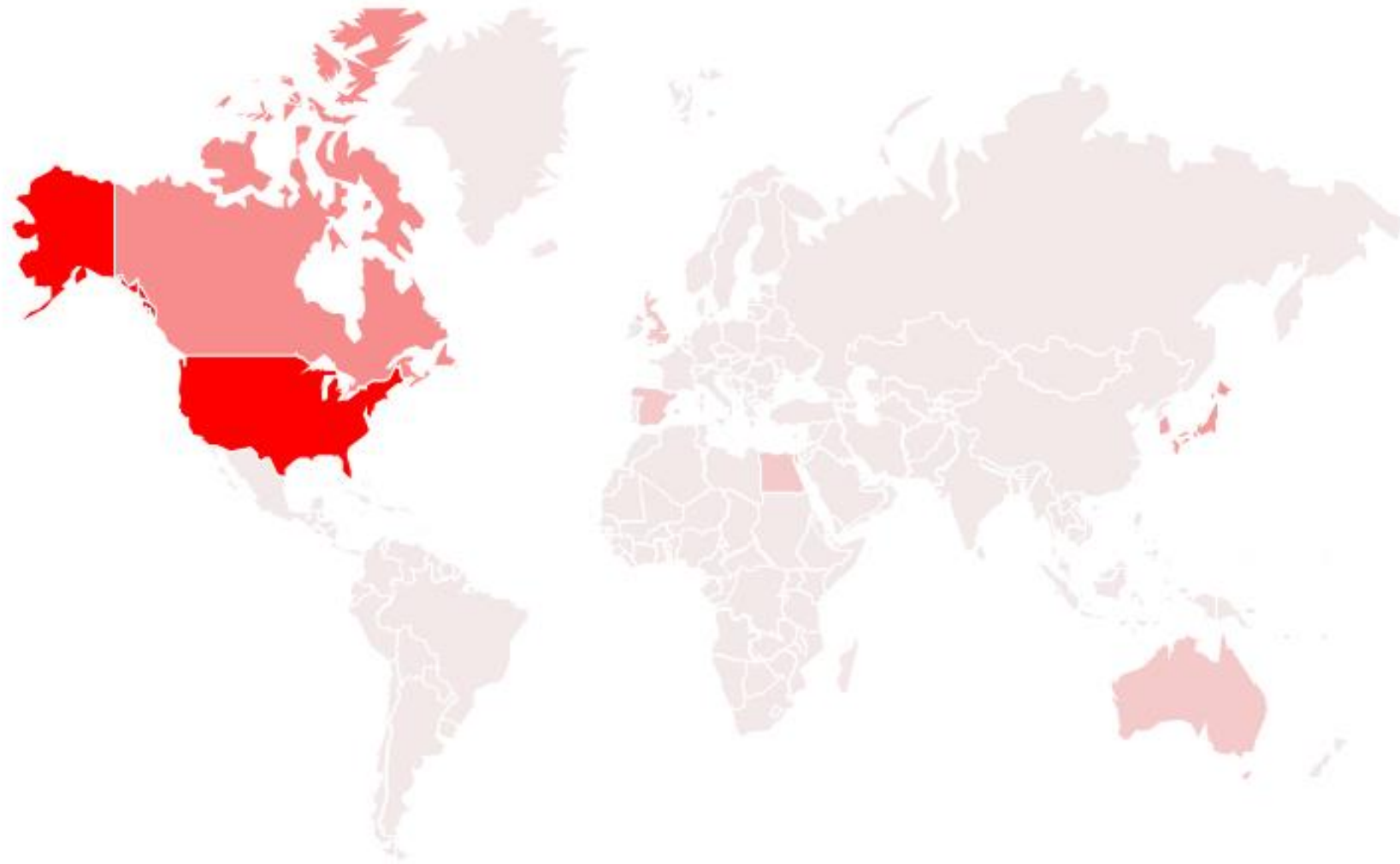


Figura 18. Distribución por países de los artículos estudiados - Periodo 1966 – 2010

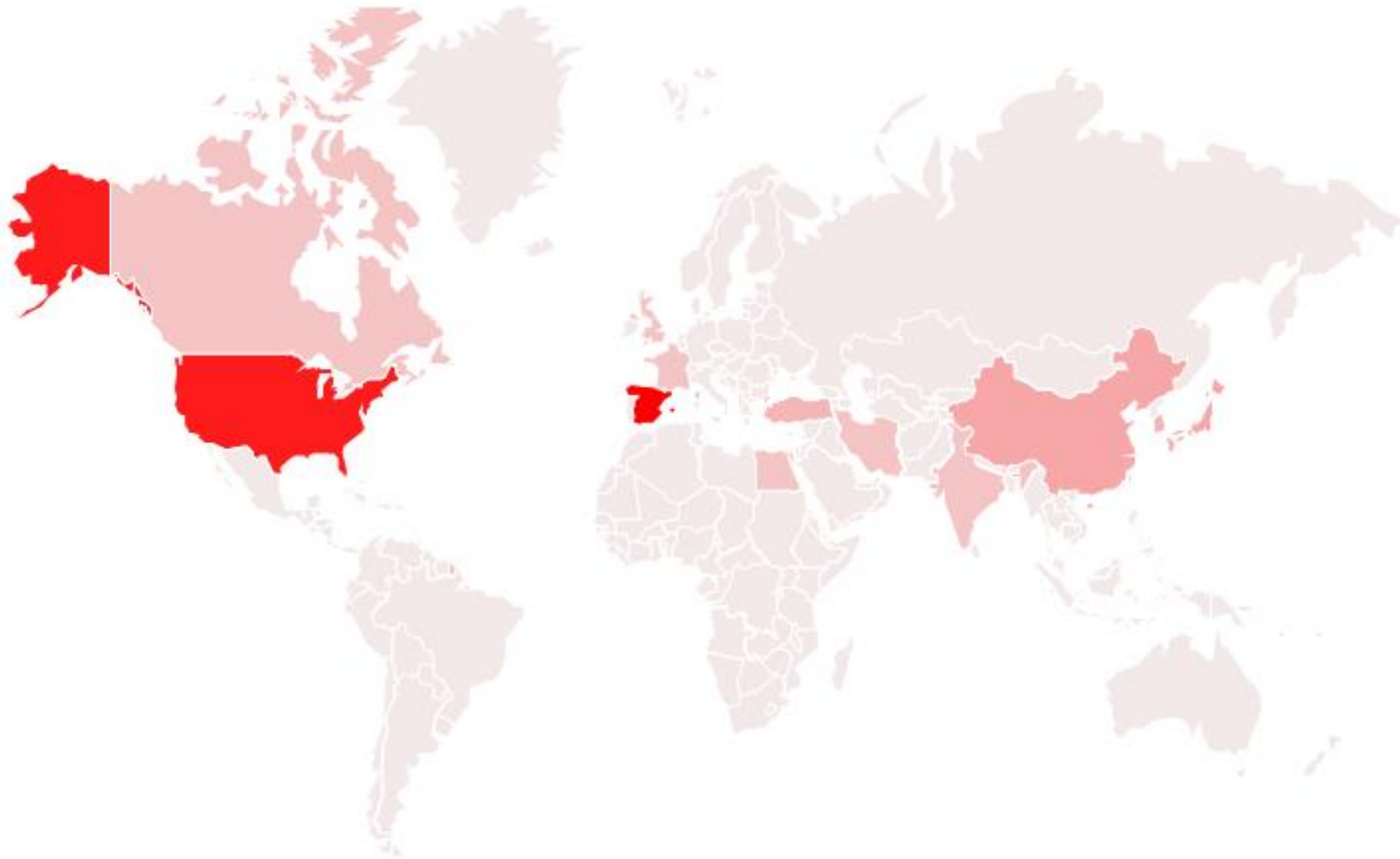


Figura 19. Distribución por países con método de optimización heurístico

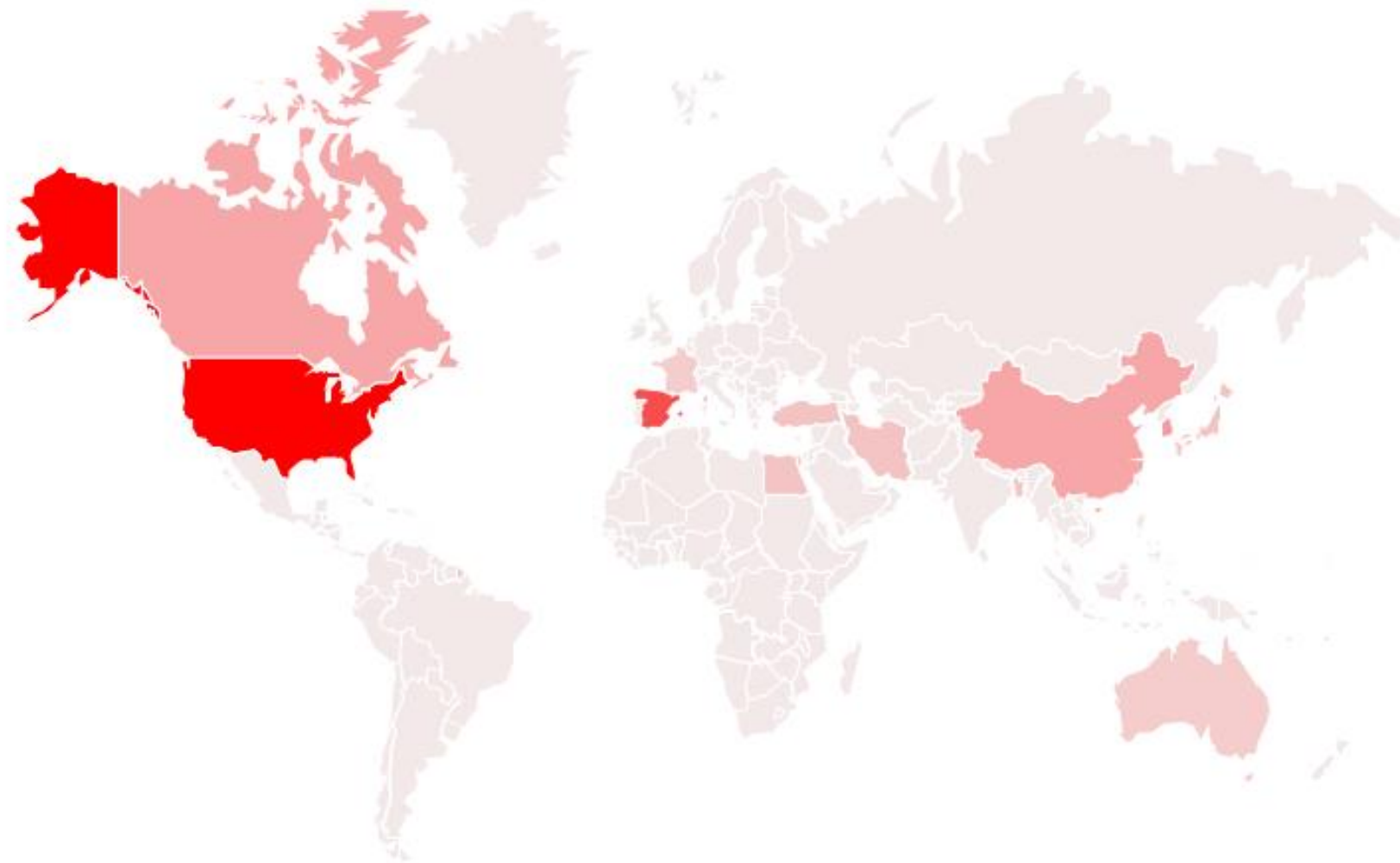


Figura 20. Distribución por países con tipología de puentes de vigas

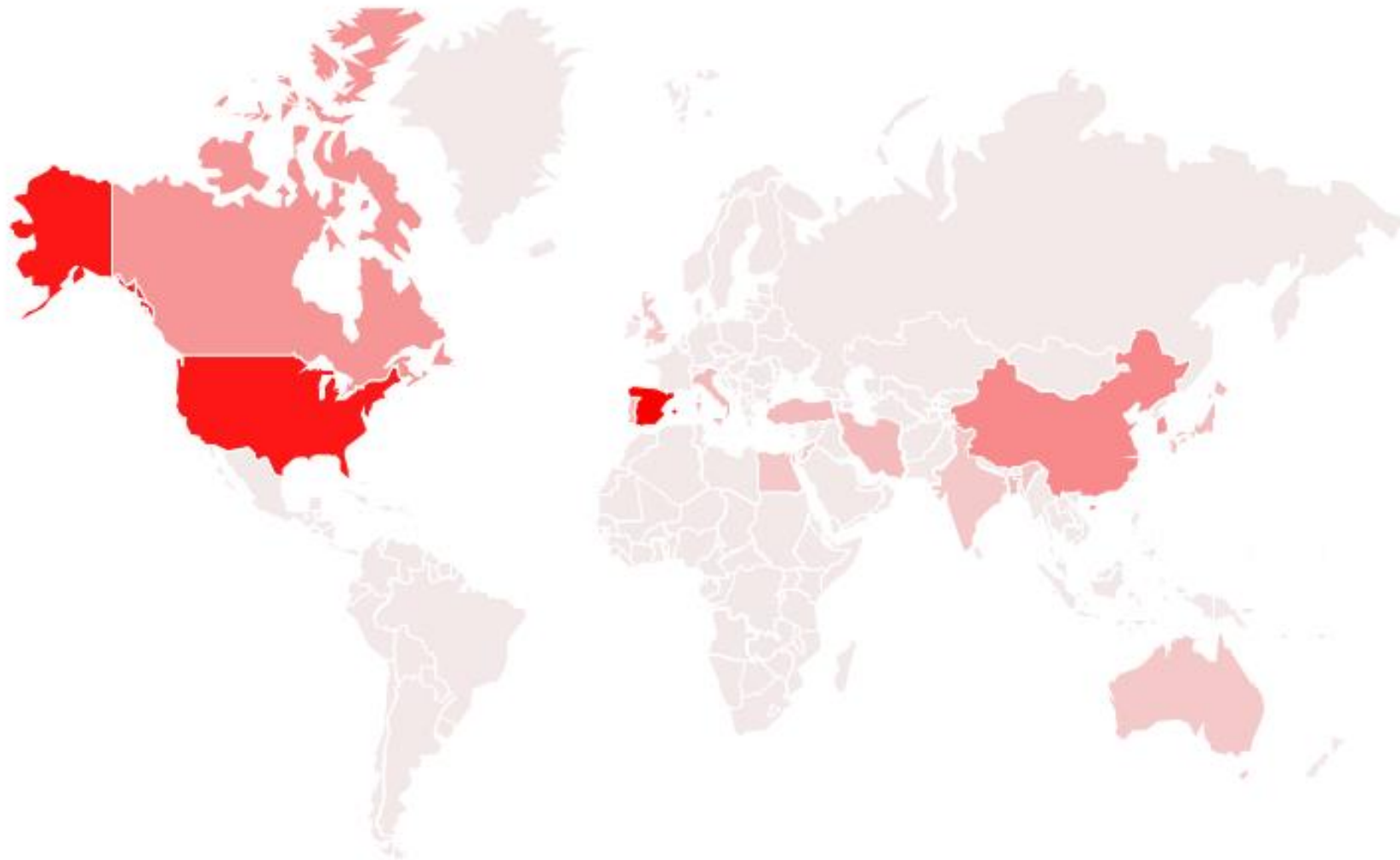


Figura 21. Distribución por países en el ciclo de vida diseño

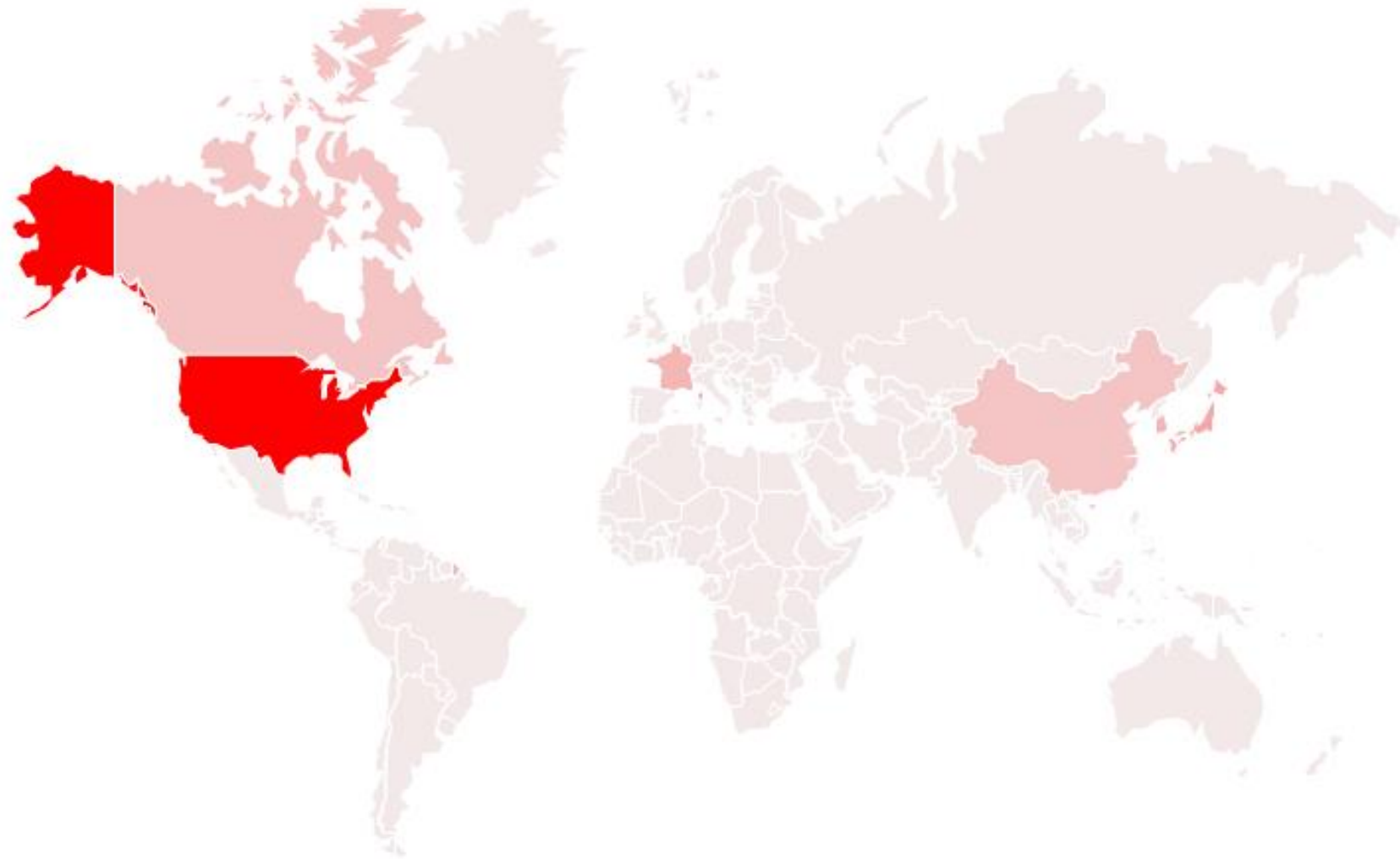


Figura 22. Distribución por países en el ciclo de vida mantenimiento

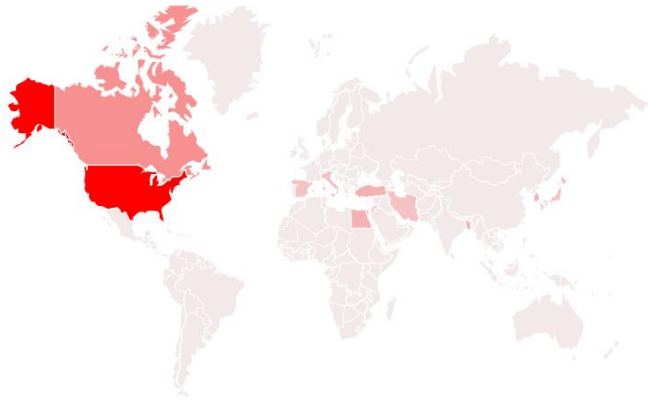


Figura 23. Distribución por países con tipo tablero – Vigas en I

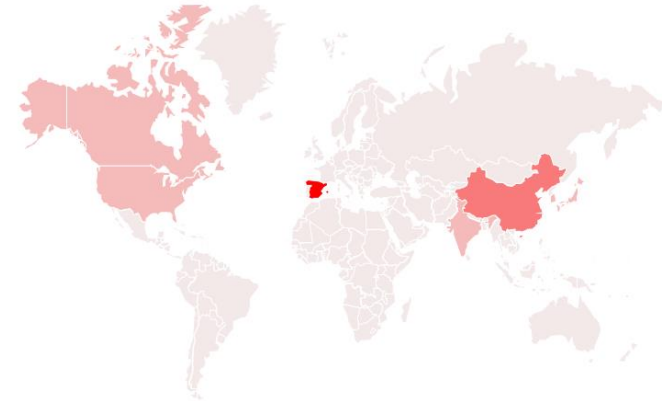


Figura 25. Distribución por países con tipo tablero – Vigas en cajón



Figura 24. Distribución por países con tipo tablero – Vigas en artesa

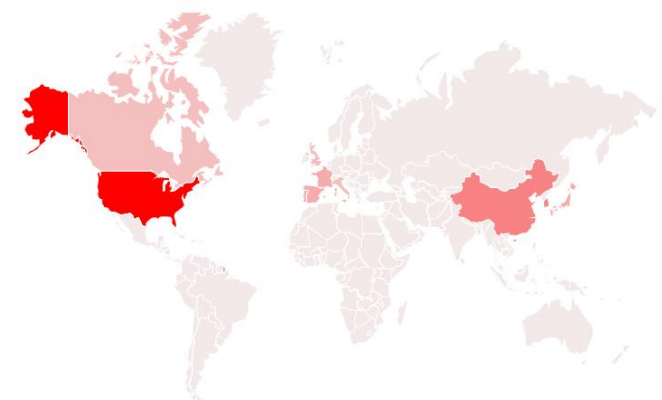


Figura 26. Distribución por países con tipo tablero – Otros

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE CORRESPONDENCIAS

3.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dentro de los objetivos generales nombrados en la introducción: relaciones temporales, espaciales y cualitativas entre los trabajos realizados, se establecen para el análisis de correspondencias, los siguientes objetivos como específicos para la metodología utilizada:

- Observar la influencia del ciclo de vida en el que se encuentra el puente en el tipo de hormigón y en la tipología de puentes a la hora de optimizar pasos superiores de hormigón.
- Entender de qué variables depende la elección del elemento a optimizar y observar cuales son los más optimizados y cuáles pueden ser potencialmente estudiados en el futuro.
- Ver como varía la función objetivo según el método de optimización, el tipo de resolución de la optimización y el tipo de tablero utilizados.
- Saber si el método de optimización escogido guarda relación con la tipología del puente, del tablero o del hormigón para los pasos superiores analizados.
- Averiguar cómo intervienen del tipo de puente, de tablero y del método de resolución de la optimización. En el tipo de hormigón del puente a optimizar en la elección.
- Conocer los métodos utilizados para resolución del problema de optimización en general y el tipo de heurística en partículas en algunos casos, según el tipo de puentes, el tipo de tablero y de las demás características relacionadas en los puntos anteriores.

3.2. METODOLOGÍA

Según el profesor de la Universidad Politécnica de Valencia Víctor Yepes, el análisis de correspondencias (ACOR) es una técnica que permite representar las categorías de dos (análisis de correspondencias simple) o más variables (análisis de correspondencias múltiple) cualitativas en un espacio de pequeñas dimensiones. Es un equivalente del análisis de componentes principales (ACP), pero con variables cualitativas. Se trata de reflejar en un mapa la posición relativa de las variables cualitativas para ver el grado de asociación entre ellas. Utilizaremos dos dimensiones para la nueva representación.

Según la “Universitat Oberta de Catalunya”, es posible esquematizar la metodología del análisis de correspondencias (Fig. 27) del siguiente modo:

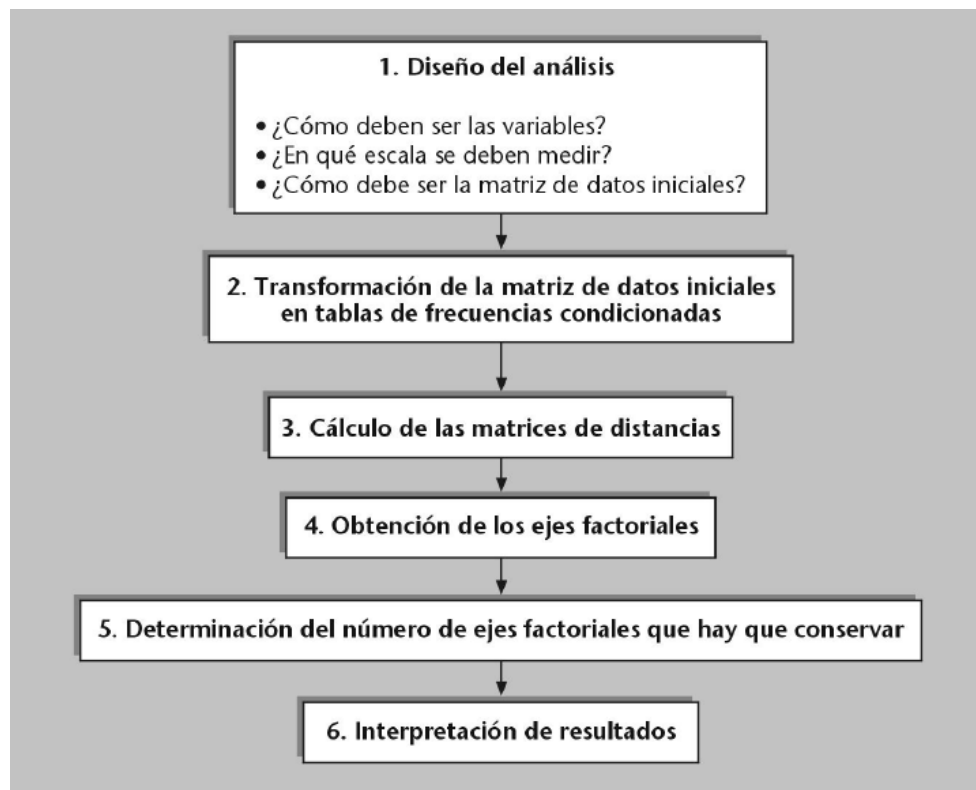


Figura 27. Esquema metodológico del ACOR [148]

En el proceso de cálculo hay tres etapas principales (etapas 2, 3 y 4) en las cuales se encuentran las diferencias fundamentales con el análisis factorial.

De esta manera y mediante el programa informático de análisis estadístico SPSS, se evaluarán los objetivos definiendo parejas de variables cualitativas.

3.3. ESTRUCTURA DEL ANÁLISIS

La estructura del análisis que se va a llevar a cabo sigue la siguiente estructura:

1. Elección de las parejas de variables a estudiar
2. Establecer tablas de comparación
3. Introducción de datos en el programa de análisis estadístico en este caso el SPSS
4. Ejecución del análisis de correspondencias
5. Lectura y análisis de los resultados (Ver en Capítulo 4. Resultados y discusión)

Desarrollando las cinco fases descritas llegaremos a las conclusiones del capítulo 5.

3.4. ANÁLISIS

En el presente punto se muestran las cuatro primeras fases establecidas en el punto anterior, de manera que, ya en el capítulo 4, se puedan extraer, leer y analizar los resultados del estudio.

3.4.1. Elección de las parejas de variables a estudiar

De entre la variables definidas en el punto 2 del capítulo 1 (Objetivo del trabajo), utilizadas también en el análisis cuantitativo y el bibliométrico del capítulo 2, se definen, en base a los objetivos específicos del análisis de correspondencias, una serie de parejas de variables **cuantitativas** que se relacionan entre sí (tabla- 8) mediante el análisis que nos ocupa.

VARIABLE A	VARIABLE B	TABLA
Métodos de optimización	Tipología de puentes	tabla- 9
Ciclo de vida	Tipo de hormigón	tabla- 10
Tipo de resolución de la optimización	Tipología de puentes	tabla- 11
Tipo de heurística	Tipología de puentes	tabla- 12
Tipo de resolución de la optimización	Tipología de tablero	tabla- 13
Tipología de puentes	Ciclo de vida	tabla- 14
Elemento optimizado	Método de optimización	tabla- 15
Tipología del tablero	Método de optimización	tabla- 16
Función objetivo	Elemento optimizado	tabla- 17
Función objetivo	Tipo de resolución de la optimización	tabla- 18
Función objetivo	Método de optimización	tabla- 19
Función objetivo	Tipología de tablero	tabla- 20
Tipo de resolución de la optimización	Tipo de hormigón	tabla- 21
Tipo de hormigón	Método de optimización	tabla- 22
Tipo de hormigón	Tipología de puente	tabla- 23
Elemento optimizado	Tipo de hormigón	tabla- 24
Tipo de tablero	Tipo de hormigón	tabla- 25
Elemento optimizado	Tipo de resolución de la optimización	tabla- 26
Elemento optimizado	Tipo de heurística	tabla- 27

Tabla 8. Variables relacionadas entre sí en el análisis de correspondencias

3.4.2. *Tablas de comparación*

Para las parejas de variables definidas en el punto anterior y como paso previo a la introducción de datos en el SPSS, se preparan unas tablas bidimensionales en las que se cruzan los artículos que tienen en común una de las opciones de las variables de estudio. A continuación se muestran dichas tablas.

1. Métodos de optimización – Tipología de puentes

TIPOLOGÍA	MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN			
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática
Puente Arco		4		1
Puente Atirantado		2	3	3
Puente de Vigas	2	6	30	28
Puente de vigas lanzado				2
Varios Puentes			8	1
Sin especificar			2	1

Tabla 9. Métodos de optimización – Tipología de puentes

2. Ciclo de vida – Tipo de hormigón

TIPO DE HORMIGÓN *	CICLO DE VIDA		
	Construcción	Diseño	Mantenimiento
HA	1	13	11
HP	3	35	3
HPHR		1	
HPFR		3	
H-A	1	16	10

Tabla 10. Ciclo de vida – Tipo de hormigón

* HA: Hormigón armado; HP: Hormigón pretensado; HPHR: Hormigón Pretensado de alta resistencia; HPFR: Hormigón Pretensado reforzado con fibras; H-A: Mixta Hormigón-Acero.

3. Tipo de resolución de la optimización – Tipología de puentes

TIPO DE RESOLUCIÓN *	TIPOLOGÍA PUENTE						
	Puente Arco	Puente Atirantado	Puente Vigas	Puente lanzado	Varios Puentes	Puente Suspendido	Sin especificar
AL			5				
AND			1				
AP	2		1				
CC		1	7				1
CP	2	2	11	1	1		
EVOP	1		2				
HH			5			1	1
HS		3	24		7		2
MM			3	1			
NLP			1				
NLPQL			1				
S		2	7				

Tabla 11. Tipo de resolución de la optimización – Tipología de puentes

* AL: Algoritmo Lagrangiano; AND: Algoritmo Neuronal Dinámico; AP: Algoritmo propio desarrollado; CC: Cálculo-Comparación; CP: Computer Program (Software); EVOP: EVOP Algorithm; HH: Heurística Híbrida; HS: Heurística Simple; MM: Modelo matemático; NLP: NLP Algorithm; SQ: Sequential Quadratic Programming-NLPQL algorithm; S: Sin especificar.

4. Tipo de heurística – Tipología de puentes

HEURÍSTICA*	TIPOLOGÍA PUENTE				
	Puente Atirantado	Puente Vigas	Puente Suspendido	Varios Puentes	Sin especific.
ACO		4			
CS		1			
HS		2			
PSO		1	1		
GA	3	17	1	7	2
ME		2			
RW		2			1
SA		6		1	2
LS		1			1
TA		6			
GSO		1			

Tabla 12. Tipo de heurística – Tipología de puentes

* ACO: Colonia de Hormigas; CS: Cuckoo Search; HS: Harmony Search; PSO: Particle Swarm Optimization; GA: Genético; ME: Memético; RW: Random Walk; SA: Simulated Annealing; LS: Descent Local Search; TA: Threshold Accepting; GSO: Glowworm swarm optimization.

5. Tipo de resolución de la optimización – Tipología de tablero

TIPO DE RESOLUCIÓN **	TIPO DE TABLERO *											
	AR	I	T	C	LH	RH	PI	VT	VL	V	DC	S
AL		3		2	1							
AND		1										
AP		2							1			
CC		5	1	2			1					1
CP		8	3	4				1		2		
EVOP		2							1			
HH	3			2								2
HS	3	10	1	5		2		3	1	4		7
MM		1		2						1		
NLP			1									
NLPQL				1								
S		2	1						2	3	1	

Tabla 13. Tipo de resolución de la optimización – Tipología de tablero

** AL: Algoritmo Lagrangiano; AND: Algoritmo Neuronal Dinámico; AP: Algoritmo propio desarrollado; CC: Cálculo-Comparación; CP: Computer Program (Software); EVOP: EVOP Algorithm; HH: Heurística Híbrida; HS: Heurística Simple; MM: Modelo matemático; NLP: NLP Algorithm; SQ: Sequential Quadratic Programming-NLPQL algorithm; S: Sin especificar.

*AR: Vigas en artesa; I: Vigas en forma de I; T: vigas en forma de T; C: Vigas en cajón; LH: Losa hormigón pretensado; RH: Vigas en forma rectangular hueca; PI: vigas tipo PI; VT: varios tipos de tableros; VL: mixto viga acero y losa hormigón; V: De vigas sin especificar el tipo; DC: Vigas de doble cubierta; S: sin especificar el tipo de tablero.

6. Tipología de puentes – Ciclo de vida

TIPOLOGÍA DE PUENTES	CICLO DE VIDA		
	Construcción	Diseño	Mantenimiento
Puente Arco		5	
Puente Atirantado		8	
Puente de Vigas	3	50	13
Puente de vigas lanzado	1	1	
Varios Puentes			8
Sin especificar		1	2
Puente Suspendido	1	1	

Tabla 14. Tipología de puentes – Ciclo de vida

7. Elemento optimizado – Método de optimización

ELEMENTO OPTIMIZADO	MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN			
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática
Anclaje postesado		1		1
Cable/Tirante		2		3
Cojinete de apoyo viga-pilar		1		
Estribos			1	
Paneles prefabricados		1		
Pilas / Pilares			5	
Puente en general		3	15	6
Soportes		1		
Superestructura			2	3
Tableros		3	14	13
Vigas	2		6	10

Tabla 15. Elemento optimizado – Método de optimización

8. Tipología del tablero – Método de optimización

TIPOLOGÍA DEL TABLERO *	MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN			
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática
AR			6	
I	1	5	10	16
T	1		1	5
C		3	9	6
LH				1
LHA				1
RH			2	
PI		1		
VT			3	1
VL		1	1	2
V	1	2	3	4
DC				1
S			8	1

Tabla 16. Tipología del tablero – Método de optimización

*AR: Vigas en artesa; I: Vigas en forma de I; T: vigas en forma de T; C: Vigas en cajón; LH: Losa hormigón pretensado; LHA: Losa de hormigón armado; RH: Vigas en forma rectangular hueca; PI: vigas tipo PI; VT: varios tipos de tableros; VL: mixto viga acero y losa hormigón; V: De vigas sin especificar el tipo; DC: Vigas de doble cubierta; S: sin especificar el tipo de tablero.

9. Función objetivo - Elemento optimizado

FUNICIÓN OBJETIVO	ELEMENTO OPTIMIZADO *										
	AN	C/T	COJ	E	PP	P	PG	S	SUP	T	V
Anclaje	1										
Calidad							2		1	2	
Ciclo de vida							1		1		
Coste		1		1		5	18		5	24	14
Deflexiones										2	
Desplazamiento			1				1				
Emisiones CO2						1				1	1
Estetica							1				
Otros	1		1		1	1	5			2	1
Peso								1		1	1
Rendimiento							1				
Seguridad							2			3	
Separación Vigas									1		1
Sostenibilidad							1			1	
Tensiones							1			2	
Tensiones cable		4								1	
Tensiones tesado											2

Tabla 17. Función objetivo - Elemento optimizado

* AN: Anclaje del postesado; C/T: Cable/Tirante; COJ: Cojinete de apoyo viga-pilar; E: Estribo; PP: Paneles prefabricados; P: Pilares/Pilas; PG: Puente en general; S: Soporters; SUP: Superestructura; T: Tableros; V: Vigas

10. Función objetivo – Tipo de resolución de la optimización

FUNCIÓN OBJETIVO	TIPO DE RESOLUCIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN *											
	AL	AND	AP	CC	CP	EVOP	HH	HS	MM	NLP	SQ	S
Anclaje				1								
Calidad								3	2			
Ciclo de vida								2				
Coste	4	1	2	5	11	3	6	29	3	1	1	4
Deflexiones				1	1							
Desplazamiento				1				1				
Emisiones CO2							3	1				
Estetica	1											
Otros	1			1	2		1	6				2
Peso			1		1			1				
Rendimiento								1				
Seguridad				1				4				
Separación Vigas	1				1							
Sostenibilidad							1	1				
Tensiones			1				1					1
Tensiones cable				1	1			1				2
Tensiones tesado				1	1				1			

Tabla 18. Función objetivo – Tipo de resolución de la optimización

* AL: Algoritmo Lagrangiano; AND: Algoritmo Neuronal Dinámico; AP: Algoritmo propio desarrollado; CC: Cálculo-Comparación; CP: Computer Program (Software); EVOP: EVOP Algorithm; HH: Heurística Híbrida; HS: Heurística Simple; MM: Modelo matemático; NLP: NLP Algorithm; SQ: Sequential Quadratic Programming-NLPQL algorithm; S: Sin especificar.

11. Función objetivo – Método de optimización

FUNCIÓN OBJETIVO	MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN			
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática
Anclaje				1
Calidad			3	2
Ciclo de vida			2	
Coste	2	3	37	26
Deflexiones		2		
Desplazamiento		2		
Emisiones CO2			3	
Estetica				1
Otros		4	5	3
Peso		1	1	1
Rendimiento			1	
Seguridad			4	1
Separación Vigas				2
Sostenibilidad			2	
Tensiones			1	1
Tensiones cable		2		3
Tensiones tesado				2

Tabla 19. Función objetivo – Método de optimización

12. Función objetivo – Tipología de tablero

FUNCIÓN OBJETIVO	TIPOLOGÍA DE TABLERO *												
	AR	I	T	C	LH	LA	RH	PI	VT	VL	V	DC	S
Anclaje		1											
Calidad			1	2							1		1
Ciclo de vida		1											
Coste	5	20	6	16	1	1	2		4		9		7
Deflexiones		1		1									
Desplazamiento								1			1		
Emisiones CO2	1			1									1
Estetica				1									
Otros		8		2					1				2
Peso	1	1								1			
Rendimiento										1			
Seguridad		1					1						3
Separación Vigas		1									1		
Sostenibilidad	1								1				
Tensiones												1	1
Tensiones cable		4								2			
Tensiones tesado		2											

Tabla 20. Función objetivo – Tipología de tablero

* AR: Vigas en artesa; I: Vigas en forma de I; T: vigas en forma de T; C: Vigas en cajón; LH: Losa hormigón pretensado; LA: Losa de hormigón armado; RH: Vigas en forma rectangular hueca; PI: vigas tipo PI; VT: varios tipos de tableros; VL: mixto viga acero y losa hormigón; V: De vigas sin especificar el tipo; DC: Vigas de doble cubierta; S: sin especificar el tipo de tablero.

13. Tipo de resolución de la optimización – Tipo de hormigón

TIPO DE RESOLUCIÓN **	TIPO DE HORMIGÓN *				
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A
AL		5			
AND		1			
AP	1				2
CC	2	7			
CP	5	7			5
EVOP	1	2			
HH	2	4			1
HS	12	11		3	13
MM	1	3			
NLP			1		
NLPQL	1				
S	1	3			5

Tabla 21. Tipo de resolución de la optimización – Tipo de hormigón

** AL: Algoritmo Lagrangiano; AND: Algoritmo Neuronal Dinámico; AP: Algoritmo propio desarrollado; CC: Cálculo-Comparación; CP: Computer Program (Software); EVOP: EVOP Algorithm; HH: Heurística Híbrida; HS: Heurística Simple; MM: Modelo matemático; NLP: NLP Algorithm; SQ: Sequential Quadratic Programming-NLPQL algorithm; S: Sin especificar.

* HA: Hormigón armado; HP: Hormigón pretensado; HPHR: Hormigón Pretensado de alta resistencia; HPFR: Hormigón Pretensado reforzado con fibras; H-A: Mixta Hormigón-Acero.

14. Tipo de hormigón – Método de optimización

TIPO DE HORMIGÓN *	MÉTODO DE RESOLUCIÓN			
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática
HA		2	14	9
HP	2	3	17	19
HPHR				1
HPFR		1	2	
H-A		6	13	7

Tabla 22. Tipo de hormigón – Método de optimización

* HA: Hormigón armado; HP: Hormigón pretensado; HPHR: Hormigón Pretensado de alta resistencia; HPFR: Hormigón Pretensado reforzado con fibras; H-A: Mixta Hormigón-Acero.

15. Tipo de hormigón – Tipología de puente

TIPO DE HORMIGÓN*	TIPOLOGÍA DE PUENTE						
	Puente Arco	Puente Atirantado	Puente Vigas	Puente lanzado	Puente Suspendido	Varios Puentes	Sin especificar
HA	3		15			4	3
HP		2	36	2		1	
HPHR			1				
HPFR		1	2				
H-A	2	6	13		1	4	

Tabla 23. Tipo de hormigón – Tipología de puente

* HA: Hormigón armado; HP: Hormigón pretensado; HPHR: Hormigón Pretensado de alta resistencia; HPFR: Hormigón Pretensado reforzado con fibras; H-A: Mixta Hormigón-Acero.

16. Elemento optimizado - Tipo de hormigón

ELEMENTO OPTIMIZADO **	TIPO DE HORMIGÓN *				
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A
AN		1		1	
C/T		1			4
COJ		1			
E	1				
PP					1
P	5	1			
PG	7	9		1	9
S	1				
SUP	1	3			1
T	5	15		1	9
V	5	10	1		2

Tabla 24. Elemento optimizado - Tipo de hormigón

* HA: Hormigón armado; HP: Hormigón pretensado; HPHR: Hormigón Pretensado de alta resistencia; HPFR: Hormigón Pretensado reforzado con fibras; H-A: Mixta Hormigón-Acero.

** AN: Anclaje del postesado; C/T: Cable/Tirante; COJ: Cojinete de apoyo viga-pilar; E: Estribo; PP: Paneles prefabricados; P: Pilares/Pilas; PG: Puente en general; S: Soporters; SUP: Superestructura; T: Tableros; V: Vigas

17. Tipo de hormigón – Tipo de tablero

TIPO DE TABLERO	TIPO DE HORMIGÓN *				
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A
De vigas en artesa		4		1	1
De Vigas en I	2	18		1	11
De vigas en T	4	1	1		1
En cajón	5	12			2
Losa Hormigón pretensado (celular)		1			
Losa Hormigón armado	1				
Rectangular hueca	1	1			
Tipo PI		1			
Varios	2	1			2
Viga-losa	1			1	3
Vigas	3	5			2
Vigas de doble cubierta					1
Sin especificar	6				3

Tabla 25. Tipo de hormigón – Tipo de tablero

* HA: Hormigón armado; HP: Hormigón pretensado; HPHR: Hormigón Pretensado de alta resistencia; HPFR: Hormigón Pretensado reforzado con fibras; H-A: Mixta Hormigón-Acero.

18. Tipo de resolución de la optimización - Elemento optimizado

TIPO DE RESOLUCIÓN **	ELEMENTO OPTIMIZADO*										
	AN	C/T	COJ	E	PP	P	PG	S	SUP	T	V
AL							1		1	2	1
AND										1	
AP								1		2	
CC	1	1					2			2	3
CP		1					4		2	4	6
EVOP									1	2	
HH				1		1	1			3	1
HS	1	1	1			5	13		2	10	3
MM							1			2	1
NLP											1
NLPQL							1				
S		2			1		1			2	3

Tabla 26. Tipo de resolución de la optimización - Elemento optimizado

** AL: Algoritmo Lagrangiano; AND: Algoritmo Neuronal Dinámico; AP: Algoritmo propio desarrollado; CC: Cálculo-Comparación; CP: Computer Program (Software); EVOP: EVOP Algorithm; HH: Heurística Híbrida; HS: Heurística Simple; MM: Modelo matemático; NLP: NLP Algorithm; SQ: Sequential Quadratic Programming-NLPQL algorithm; S: Sin especificar.

* AN: Anclaje del postesado; C/T: Cable/Tirante; COJ: Cojinete de apoyo viga-pilar; E: Estribo; PP: Paneles prefabricados; P: Pilares/Pilas; PG: Puente en general; S: Soporters; SUP: Superestructura; T: Tableros; V: Vigas

19. Tipo de heurística - Elemento optimizado

TIPO DE HEURÍSTICA **	ELEMENTO OPTIMIZADO *								
	AN	C/T	COJ	E	P	PG	SUP	T	V
ACO					3			1	
CS								1	
LS					1				1
GA		1	1		3	15	2	6	2
HS								1	1
ME								2	
PSO						1		1	
RW	1				1				1
SA				1	2			4	1
TA				1	1			1	3
GSO								1	

Tabla 27. Tipo de heurística - Elemento optimizado

* AN: Anclaje del postesado; C/T: Cable/Tirante; COJ: Cojinete de apoyo viga-pilar; E: Estribo; PP: Paneles prefabricados; P: Pilares/Pilas; PG: Puente en general; S: Soporters; SUP: Superestructura; T: Tableros; V: Vigas

** ACO: Colonia de Hormigas; CS: Cuckoo Search; HS: Harmony Search; PSO: Particle Swarm Optimization; GA: Genético; ME: Memético; RW: Random Walk; SA: Simulated Annealing; LS: Descent Local Search; TA: Threshold Accepting; GSO: Glowworm swarm optimization.

3.4.3. Introducción de datos en SPSS

La introducción de datos en el SPSS se realiza en la pantalla “Editor de datos” del programa (Fig. 28 y Fig. 29), definiendo las variables cualitativas como nominales y el número de artículos como escalar. De esta manera, cada opción que pueden tomar las variables se introducen con indicadores del 1 al número total de opciones de cada variable.

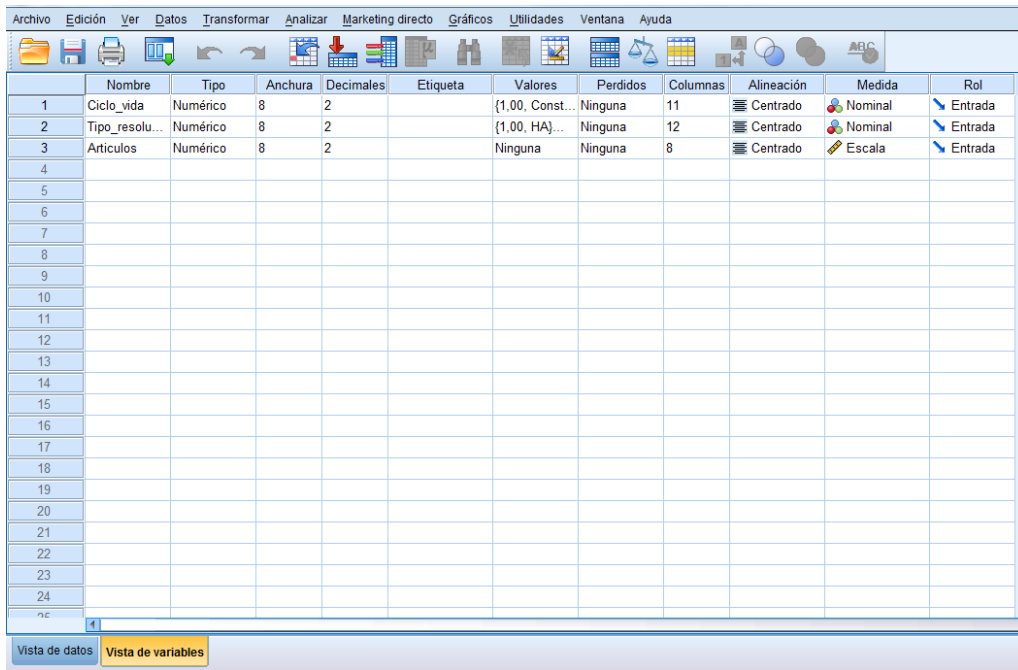


Figura 28. Introducción de datos en SPSS (1)

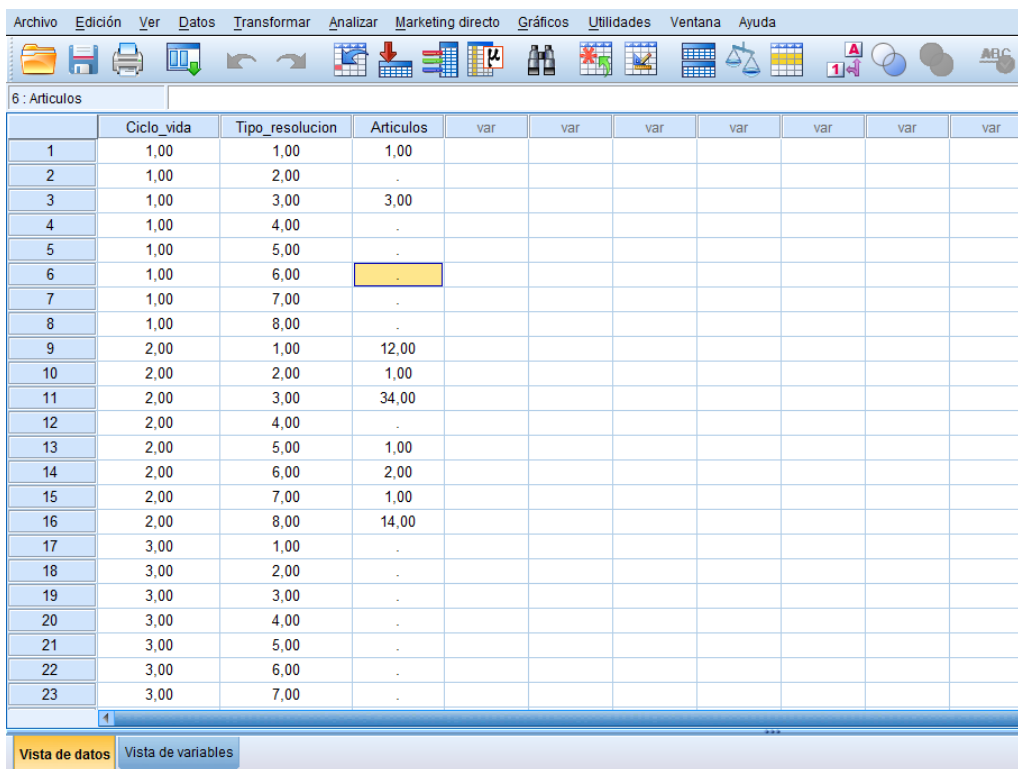


Figura 29. Introducción de datos en SPSS (2)

3.4.4. Análisis con SPSS

Una vez introducidos los datos y antes de ejecutar el análisis de correspondencias se ponderan los casos (Datos/Ponderar de casos) mediante la variable de frecuencia “Artículos” (Fig. 30).

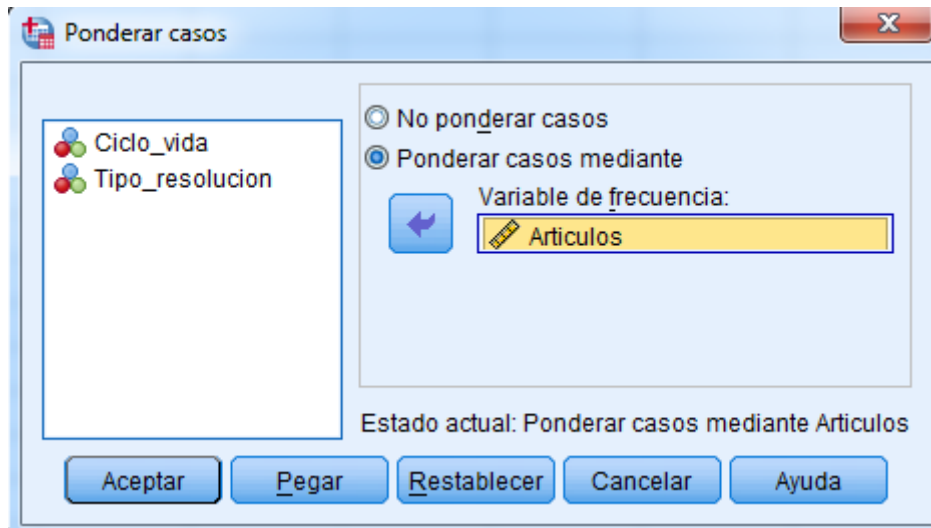


Figura 30. Ponderar casos en SPSS

Tras la ponderación, se pasa a la ejecución del análisis de correspondencias (Analizar/Reducción de dimensiones/Análisis de correspondencias), donde aparece la pantalla en la que definiremos el estudio. En primer lugar escogemos la variable que va en la “fila” y la de “columna” (Fig. 31). A continuación, escogemos los parámetros del modelo (Fig.32), los estadísticos que queremos obtener (Fig. 33) y los gráficos que deseamos que el SPSS nos muestre (Fig. 34). Finalmente definimos los rangos de la fila y la columna (Fig. 35) y ejecutamos el análisis pinchando en “Aceptar” (Fig. 36).

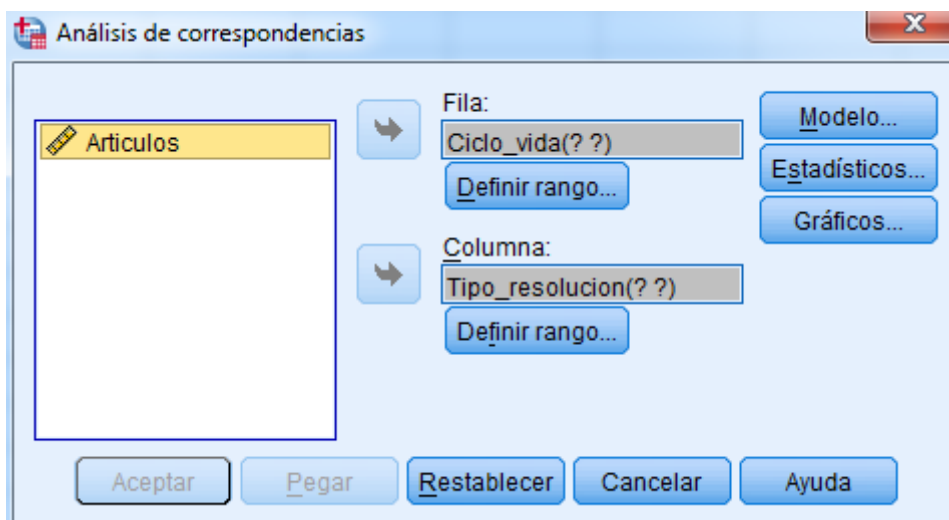


Figura 31. Elección de la variable fila y columna

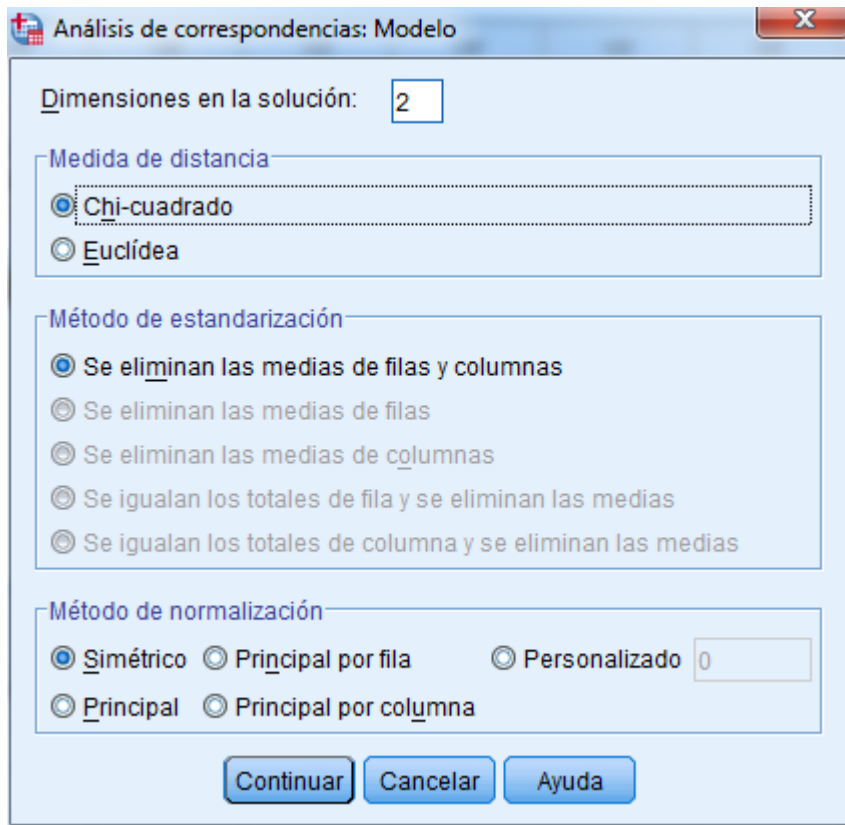


Figura 32. Parámetros del modelo

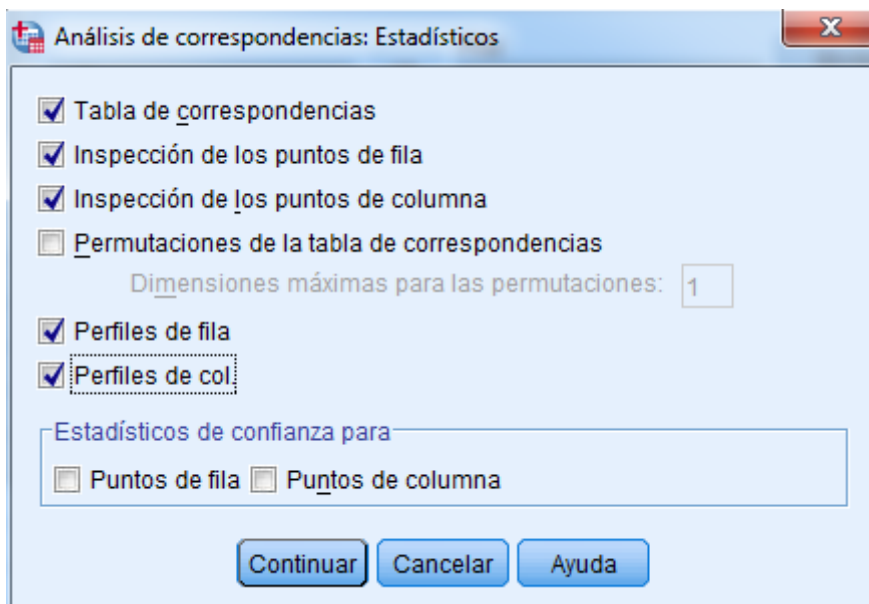


Figura 33. Estadísticos del modelo

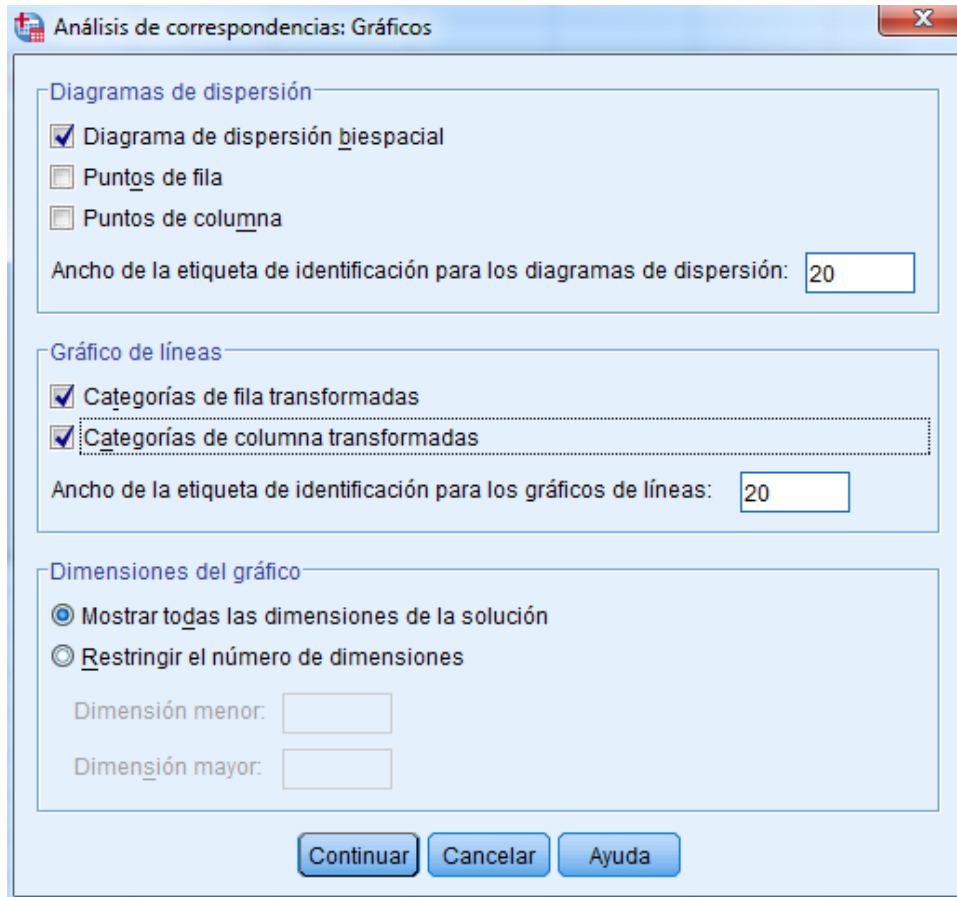


Figura 34. Gráficos requeridos

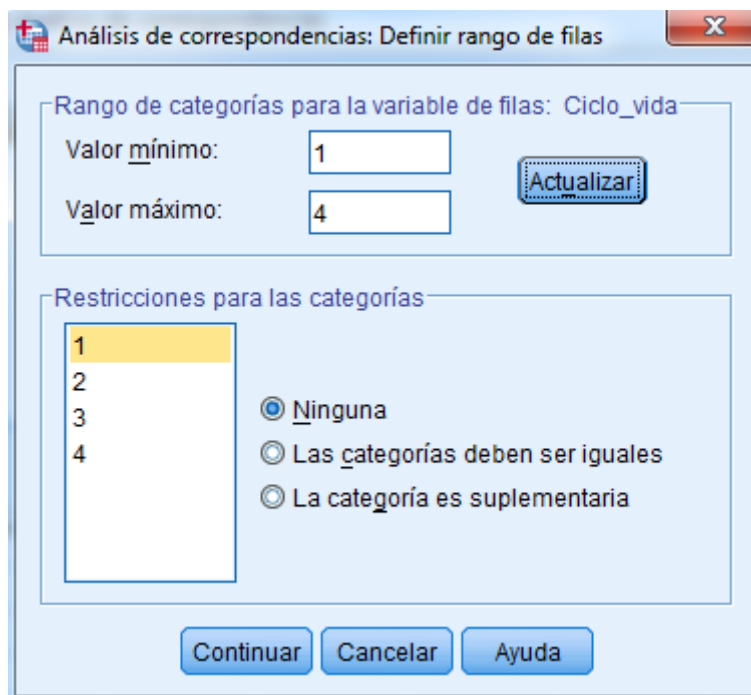


Figura 35. Definición de rangos

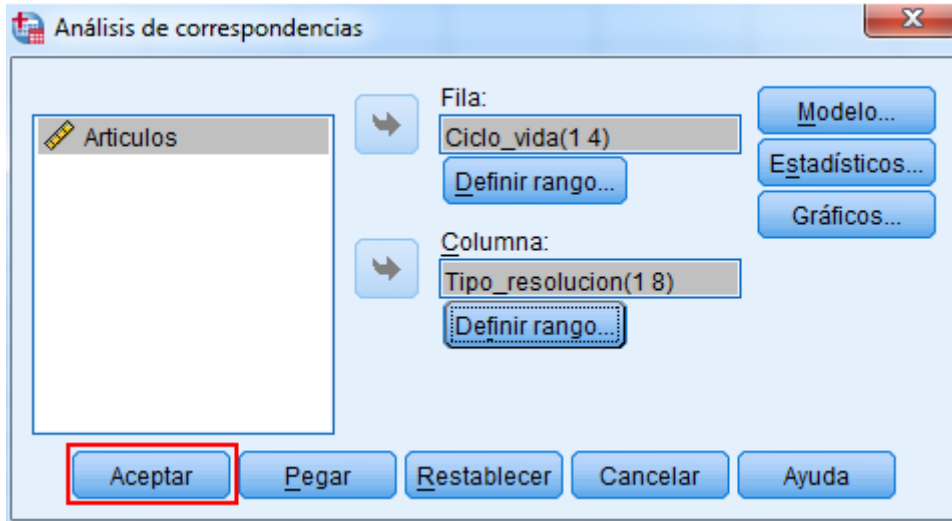


Figura 36. Ejecutamos el análisis de correspondencias

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

Los resultados del análisis de correspondencias nos dan una visión amplia de las variables que dominan los artículos que se ha estudiado y los métodos para llevarlos a cabo. Nos permite también conocer que aspectos han sido menos analizados y relacionados entre sí, dando información de campos interesantes por explorar.

Así pues, el presente capítulo pretende mostrar los resultados de los análisis de correspondencias y discutir los resultados de manera que podamos extraer conclusiones interesantes y coherentes. La estructura para mostrar los resultados es sencilla y se presenta como un único apartado en el que se presentan unas tablas con los resultados acompañadas de las lecturas que se pueden extraer de ellas para establecer conclusiones específicas de las parejas de variables cualitativas que se analizan, definidas en descritas en el apartado 3.4.2 del capítulo 3.

4.2. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para los diferentes análisis de correspondencias, se analizan los resultados, estableciendo así las bases del capítulo 5 (Conclusiones), donde se establecen unas conclusiones para el global de trabajo y del análisis de correspondencias. De esta manera, para pareja de variables se mostrarán las siguientes tablas y gráficos:

- Tabla de correspondencias
- Tabla de perfiles de fila
- Tabla de perfiles de columna
- Tabla resumen
- Tabla de examen de los puntos de fila

- Tabla de examen de los puntos de columna
- Diagrama de dispersión bi-espacial (gráfico de correspondencias)

Las tres primeras tablas (correspondencias, perfiles de fila y perfiles de columna) aportan información de la entrada de datos al SPSS, del cálculo de las masas de las categorías que forman las columnas y de las que forman las filas respectivamente.

A continuación, de la tabla resumen se extraen tres datos importantes:

- **El grado de significación (Sig.) de la prueba Chi-cuadrado**, lo cual indica el grado de dependencia entre las variables. Así pues, si la $Sig < 0,05$ existe dependencia entre las variables y tiene sentido continuar con el análisis de correspondencias.
- **La inercia total**, indicando una mayor dependencia entre las variables cuanto mayor sea el valor de esta, de tal manera que, más sentido tendrá identificar qué o cuáles categorías son las que participan con mayor protagonismo en esa dependencia
- **La proporción de inercia explicada**, la cual muestra la porción de inercia que queda explicada por cada una de las dimensiones principales.

Lo siguiente es averiguar las coordenadas de los puntos fila y los puntos columna, que finalmente nos permitirán representar el gráfico de correspondencias. Para ello debemos analizar las tablas de examen de los puntos fila y columna. Intervienen fundamentalmente tres conceptos aspectos.

- Por un lado **el concepto de masa**, que es el resultado de una ponderación en función de su frecuencia, la cual indica las categorías que tienen más frecuencia, las cuales tendrán más protagonismo en el gráfico.
- Por otra parte, **las similitudes entre categorías** a partir de las puntuaciones en la dimensión.
- Y finalmente, **la proporción de la inercia de cada uno de los ejes atribuible a cada una de las categorías** de las respectivas variables. La puntuación de cada categoría en cada dimensión permite representar el gráfico de correspondencias, viendo que la contribución de una categoría de una variable a la varianza explicada por un eje factorial se debe al grado en que esa categoría ha influido en la formación del eje factorial en cuestión.

Por último, ya representado el gráfico de correspondencias, en este observaremos que categorías de las variables están próximas entre sí, tanto de variables diferentes como de la misma variable. Si están próximas indica que tienen dependencia entre sí. Además, los puntos situados cerca del origen implican que tienen una distribución de valores muy próxima a la media, en cambio, cuanto mayor sea la distancia respecto al origen, mayor será la tendencia de la categoría en cuestión a concentrar su frecuencia en determinada celda y, en consecuencia, muy poco con el resto.

En lo que sigue se muestran los resultados y las discusiones de estos según parejas de variables a estudiar.

1. Métodos de optimización – Tipología de puentes

Tabla de correspondencias

Tipología_puentes	Metodo_optimización				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática	Margen activo
Puente Arco	0	4	0	1	5
Puente Atirantado	0	2	3	3	8
Puente de vigas	2	6	30	28	66
Puente lanzado	0	0	0	2	2
Varios puentes	0	0	8	1	9
Sin especificar	0	0	2	1	3
Margen activo	2	12	43	36	93

Perfiles de fila

Tipología_puentes	Metodo_optimización				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática	Margen activo
Puente Arco	,000	,800	,000	,200	1,000
Puente Atirantado	,000	,250	,375	,375	1,000
Puente de vigas	,030	,091	,455	,424	1,000
Puente lanzado	,000	,000	,000	1,000	1,000
Varios puentes	,000	,000	,889	,111	1,000
Sin especificar	,000	,000	,667	,333	1,000
Masa	,022	,129	,462	,387	

Perfiles de columna

Tipología_puentes	Metodo_optimización				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática	Masa
Puente Arco	,000	,333	,000	,028	,054
Puente Atirantado	,000	,167	,070	,083	,086
Puente de vigas	1,000	,500	,698	,778	,710
Puente lanzado	,000	,000	,000	,056	,022
Varios puentes	,000	,000	,186	,028	,097
Sin especificar	,000	,000	,047	,028	,032
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación 2
1	,519	,270			,752	,752	,116	,274
2	,287	,082			,230	,982	,072	
3	,080	,006			,018	1,000		
Total		,358	33,334	,004 ^a	1,000	1,000		

a. 15 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,04, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 0,358 y queda explicada en un 75,2% por la primera dimensión y un 23% por la segunda, de manera que las dos primeras dimensiones explican el 98,2%.

Examen de los puntos de fila^a

Tipología_puentes	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Puente Arco	,054	-2,773	,497	,218	,796	,046	,983	,017	1,000
Puente Atirantado	,086	-,510	,068	,013	,043	,001	,889	,009	,898
Puente de vigas	,710	,135	-,159	,013	,025	,062	,510	,390	,900
Puente lanzado	,022	,112	-2,255	,034	,001	,381	,004	,922	,926
Varios puentes	,097	,775	1,213	,072	,112	,496	,421	,570	,991
Sin especificar	,032	,609	,346	,008	,023	,013	,776	,139	,915
Total activo	1,000			,358	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Del examen de los puntos de fila vemos que la tipología de puentes más predominante es la de puente de vigas (masa 0,71), y que el puente arco es la tipología que más influye a la primera dimensión y el conjunto de varios tipos de puentes en la segunda.

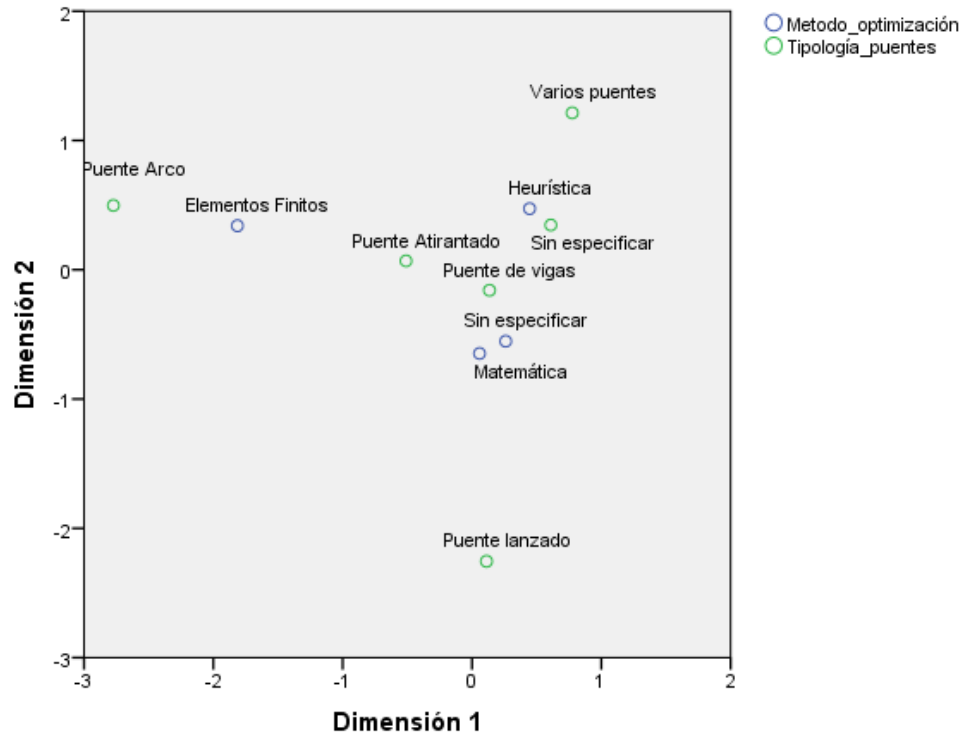
Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que el método de optimización más predominante es el heurístico (masa 0,462), y que los elementos finitos es el método que más influye a la primera dimensión y la optimización matemática en la segunda.

Examen de los puntos columna^a

Metodo_optimización	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Sin especificar	,022	,260	-,553	,009	,003	,023	,086	,215	,300
Elementos Finitos	,129	-1,814	,340	,225	,818	,052	,981	,019	1,000
Heurística	,462	,445	,473	,077	,177	,360	,616	,384	1,000
Matemática	,387	,058	-,647	,048	,003	,565	,014	,980	,994
Total activo	1,000			,358	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Puntos de columna y de fila
Simétrica Normalización



Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- Los puentes arco están cerca de los elementos finitos, lo cual puede estar relacionado con la complejidad de la tipología de puentes.
- La optimización mediante heurísticas se encuentra cerca de puentes en los que no se especifica la tipología, lo cual indica que los artículos que optimizan elementos del

puente diferentes a los tableros, se resuelven con heurísticas pero sin identificar la tipología de puentes.

- Los puentes de vigas se encuentran cerca de los métodos matemáticos y heurísticos, mostrando que son los más optimizados, en una primera etapa de manera más sencilla y con el desarrollo de la tecnología con métodos más complejos
- Los puentes lanzados están completamente aislados, dando muestra de que se analizan poco y de manera puntual.
- La optimización varias tipologías de puentes en un mismo artículo, generalmente en el ciclo de vida del mantenimiento, no queda claro que tenga dependencia con ningún tipo de resolución en concreto.
- Los puentes de vigas tienen una distribución de valores muy próxima a la media, ya que se encuentran cerca del origen.

2. Ciclo de vida – Tipo de hormigón

Tabla de correspondencias

Tipo_resolucion	Ciclo_vida			
	Construcción	Diseño	Mantenimiento	Margen activo
HA	1	13	11	25
HP	3	35	3	41
HP ALTA PREST	0	1	0	1
HRC	0	3	0	3
MIXTO	1	16	10	27
Margen activo	5	68	24	97

Perfiles de fila

Tipo_resolucion	Ciclo_vida			
	Construcción	Diseño	Mantenimiento	Margen activo
HA	,040	,520	,440	1,000
HP	,073	,854	,073	1,000
HP ALTA PREST	,000	1,000	,000	1,000
HRC	,000	1,000	,000	1,000
MIXTO	,037	,593	,370	1,000
Masa	,052	,701	,247	

Perfiles de columna

Tipo_resolucion	Ciclo_vida			
	Construcción	Diseño	Mantenimiento	Masa
HA	,200	,191	,458	,258
HP	,600	,515	,125	,423
HP ALTA PREST	,000	,015	,000	,010
HRC	,000	,044	,000	,031
MIXTO	,200	,235	,417	,278
Margen activo	1,000	1,000	1,000	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,396	,156			,969	,969	,080	,052
2	,071	,005			,031	1,000	,043	
Total		,161	15,665	,047 ^a	1,000	1,000		

a. 8 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,047, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 0,161 y queda explicada en un 96,9 % por la primera dimensión y un 3,1% por la segunda, de manera que las dos primeras dimensiones explican el 100 %.

Examen de los puntos de fila^a

Tipo_resolucion	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
		HA	,258		-,709	-,045	,051	,328	,007
HP	,423	,643	-,151	,070	,442	,135	,990	,010	1,000
HP ALTA PREST	,010	,907	1,193	,004	,021	,206	,763	,237	1,000
HRC	,031	,907	1,193	,013	,064	,618	,763	,237	1,000
MIXTO	,278	-,453	,094	,023	,145	,034	,992	,008	1,000
Total activo	1,000			,161	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Del examen de los puntos de fila vemos que el tipo de hormigón más predominante es el hormigón pretensado (masa 0,43), y que es el hormigón armado y pretensado el que más influye a la primera dimensión y los hormigones de altas prestaciones y reforzado con fibras en la segunda.

Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que el ciclo de vida más predominante es la fase de diseño (masa 0,701), y que el mantenimiento es el ciclo de vida que más influye a la primera dimensión y la construcción en la segunda.

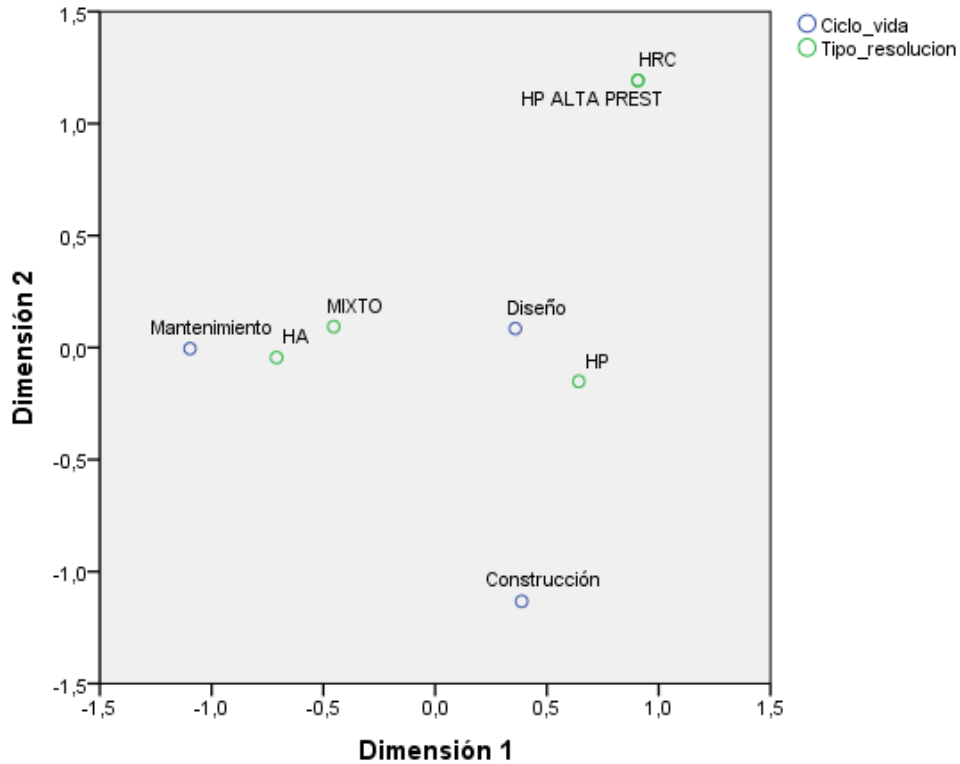
Examen de los puntos columna^a

Ciclo_vida	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		Total
					1	2	1	2	
Construcción	,052	,387	-1,133	,008	,020	,929	,393	,607	1,000
Diseño	,701	,359	,085	,036	,228	,071	,990	,010	1,000
Mantenimiento	,247	-1,097	-,005	,118	,753	,000	1,000	,000	1,000
Total activo	1,000			,161	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Puntos de columna y de fila

Simétrica Normalización



Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- Los hormigones especiales (hormigón pretensado de altas resistencias y el pretensado reforzado de fibras) están cerca entre ellos pero tienen una distribución de valores muy lejana a la media (se encuentran lejos del origen).
- La fase de construcción también está aislada y alejada del origen, lo que indica que se ha estudiado de manera puntual.
- El hormigón pretensado (HP) y la fase de diseño están cercanas entre sí, dando muestra de que la mayor parte de los artículos publicados en la fase de diseño optimizan puentes de HP.
- En la línea de la anterior conclusión, la fase de mantenimiento está más asociada a hormigón armado o a puentes mixtos de acero-hormigón, ya que se observa cercanía entre los puntos.

3. Tipo de resolución de la optimización – Tipología de puentes

Tabla de correspondencias

Tipo_resolucion	Tipologia_puentes							
	Puente Arco	Puente Atirantado	Puente de Vigas	Puente de vigas lanzado	Varios Puentes	Puente Suspendido	Sin especificar	Margen activo
AL	0	0	5	0	0	0	0	5
AND	0	0	1	0	0	0	0	1
AP	2	0	1	0	0	0	0	3
CC	0	1	7	0	0	0	1	9
CP	2	2	11	1	1	0	0	17
EVOP	1	0	2	0	0	0	0	3
HH	0	0	5	0	0	1	1	7
HS	0	3	24	0	7	0	2	36
MM	0	0	3	1	0	0	0	4
NLP	0	0	1	0	0	0	0	1
NLPQL	0	0	1	0	0	0	0	1
S	0	2	7	0	0	0	0	9
Margen activo	5	8	68	2	8	1	4	96

Perfiles de fila

Tipo_resolucion	Tipologia_puentes							
	Puente Arco	Puente Atirantado	Puente de Vigas	Puente de vigas lanzado	Varios Puentes	Puente Suspendido	Sin especificar	Margen activo
AL	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	1,000
AND	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	1,000
AP	,667	,000	,333	,000	,000	,000	,000	1,000
CC	,000	,111	,778	,000	,000	,000	,111	1,000
CP	,118	,118	,647	,059	,059	,000	,000	1,000
EVOP	,333	,000	,667	,000	,000	,000	,000	1,000
HH	,000	,000	,714	,000	,000	,143	,143	1,000
HS	,000	,083	,667	,000	,194	,000	,056	1,000
MM	,000	,000	,750	,250	,000	,000	,000	1,000
NLP	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	1,000
NLPQL	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	1,000
S	,000	,222	,778	,000	,000	,000	,000	1,000
Masa	,052	,083	,708	,021	,083	,010	,042	

Perfiles de columna

Tipo_resolucion	Tipologia_puentes							
	Puente Arco	Puente Atirantado	Puente de Vigas	Puente de vigas lanzado	Varios Puentes	Puente Suspendido	Sin especificar	Masa
AL	,000	,000	,074	,000	,000	,000	,000	,052
AND	,000	,000	,015	,000	,000	,000	,000	,010
AP	,400	,000	,015	,000	,000	,000	,000	,031
CC	,000	,125	,103	,000	,000	,000	,250	,094
CP	,400	,250	,162	,500	,125	,000	,000	,177
EVOP	,200	,000	,029	,000	,000	,000	,000	,031
HH	,000	,000	,074	,000	,000	1,000	,250	,073
HS	,000	,375	,353	,000	,875	,000	,500	,375
MM	,000	,000	,044	,500	,000	,000	,000	,042
NLP	,000	,000	,015	,000	,000	,000	,000	,010
NLPQL	,000	,000	,015	,000	,000	,000	,000	,010
S	,000	,250	,103	,000	,000	,000	,000	,094
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Resumen

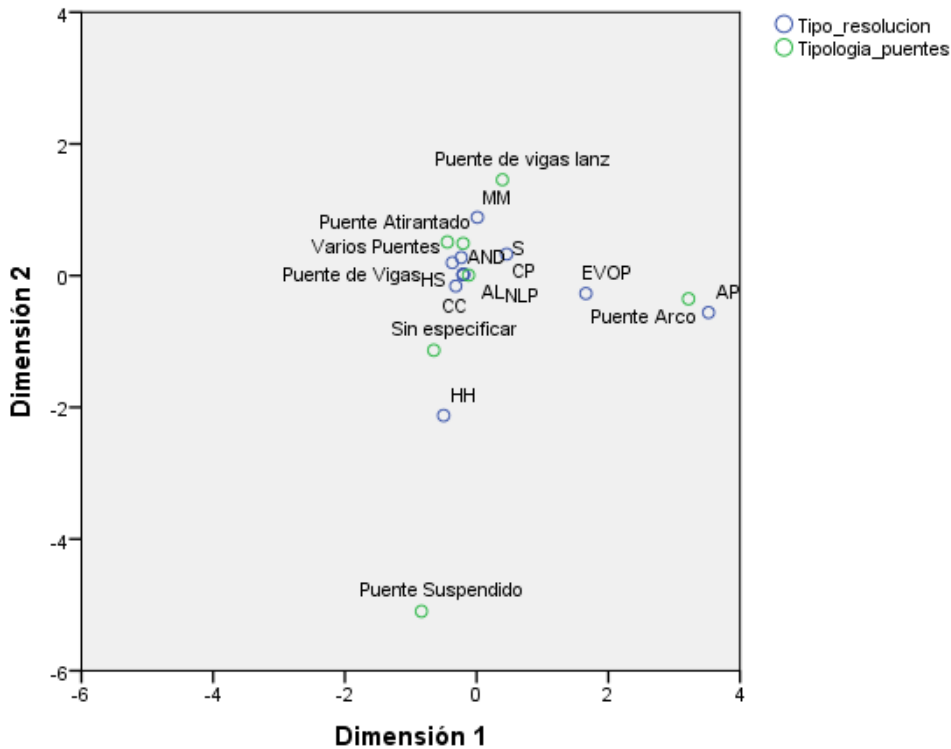
Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación 2
1	,598	,357			,444	,444	,144	,061
2	,417	,174			,216	,660	,130	
3	,386	,149			,186	,846		
4	,273	,074			,092	,938		
5	,181	,033			,041	,979		
6	,130	,017			,021	1,000		
Total		,804	77,222	,163 ^a	1,000	1,000		

a. 66 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,163, superior a 0,05, con lo que no tiene sentido seguir con en análisis, ya que no existe dependencia entre las variables.

A modo de justificación, el gráfico de correspondencias muestra una nube de puntos cercanos al origen y que no muestra nada significativo, únicamente muestra que para los puentes arco se han utilizado algoritmos propios y que los puentes suspendidos han sido estudiados de manera muy aislada.

Puntos de columna y de fila
Simétrica Normalización



4. Tipo de heurística – Tipología de puentes

Tabla de correspondencias

Heurística	Tipología_puentes					
	Puente Atirantado	Puente de vigas	Puente Suspendido	Varios Peuntes	Sin especificar	Margen activo
ACO	0	4	0	0	0	4
CS	0	1	0	0	0	1
HS	0	2	0	0	0	2
PSO	0	1	1	0	0	2
GA	3	17	1	7	2	30
ME	0	2	0	0	0	2
RW	0	2	0	0	1	3
SA	0	6	0	1	2	9
LS	0	1	0	0	1	2
TA	0	6	0	0	0	6
GSO	0	1	0	0	0	1
Margen activo	3	43	2	8	6	62

Perfiles de fila

Heurística	Tipología_puentes					
	Puente Atirantado	Puente de vigas	Puente Suspendido	Varios Peuntes	Sin especificar	Margen activo
ACO	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
CS	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
HS	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
PSO	,000	,500	,500	,000	,000	1,000
GA	,100	,567	,033	,233	,067	1,000
ME	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
RW	,000	,667	,000	,000	,333	1,000
SA	,000	,667	,000	,111	,222	1,000
LS	,000	,500	,000	,000	,500	1,000
TA	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
GSO	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
Masa	,048	,694	,032	,129	,097	

Perfiles de columna

Heurística	Tipología_puentes					
	Puente Atirantado	Puente de vigas	Puente Suspendido	Varios Peuntes	Sin especificar	Masa
ACO	,000	,093	,000	,000	,000	,065
CS	,000	,023	,000	,000	,000	,016
HS	,000	,047	,000	,000	,000	,032
PSO	,000	,023	,500	,000	,000	,032
GA	1,000	,395	,500	,875	,333	,484
ME	,000	,047	,000	,000	,000	,032
RW	,000	,047	,000	,000	,167	,048
SA	,000	,140	,000	,125	,333	,145
LS	,000	,023	,000	,000	,167	,032
TA	,000	,140	,000	,000	,000	,097
GSO	,000	,023	,000	,000	,000	,016
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

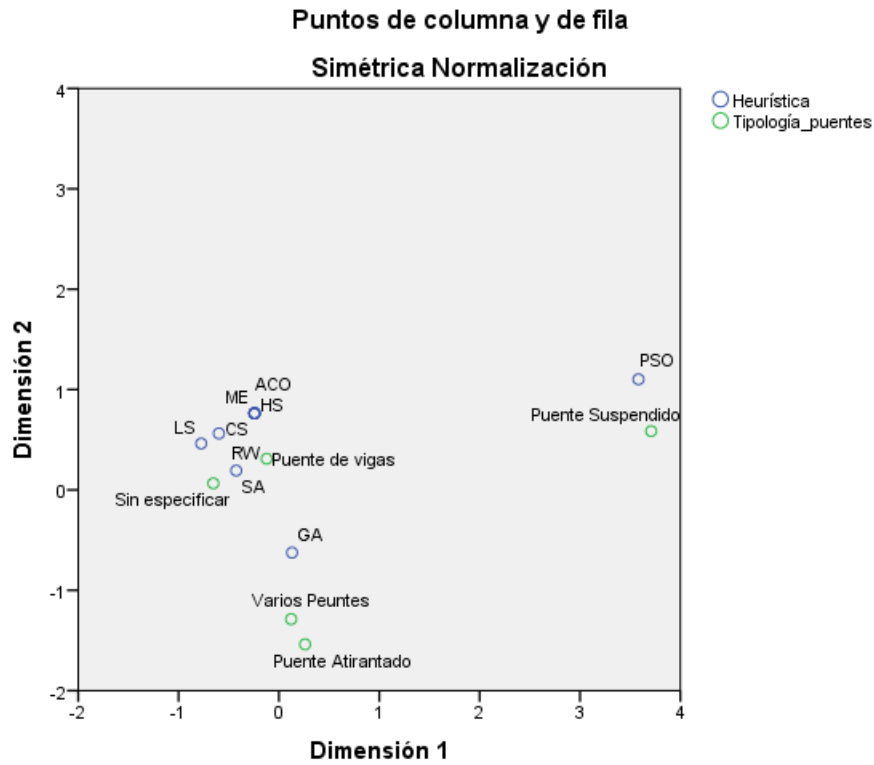
Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,501	,251			,445	,445	,262	,228
2	,407	,165			,293	,738	,079	
3	,380	,144			,256	,995		
4	,055	,003			,005	1,000		
Total		,563	34,926	,698 ^a	1,000	1,000		

a. 40 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,698, superior a 0,05, con lo que no tiene sentido seguir con en análisis, ya que no existe dependencia entre las variables.

A modo de lectura de los datos extraídos, el gráfico de correspondencias muestra hechos obvios que podemos extraer de la tabla de datos, como por ejemplo, que los puentes suspendidos son analizados un vez con la heurística PSO, que los análisis en los puentes atirantados y en la optimización de varios puentes y redes de puentes, se llevan a cabo con algoritmos genéticos y finalmente que para puentes de vigas se utiliza una diversidad de heurísticas amplia.



5. Tipo de resolución de la optimización – Tipología de tablero

Tabla de correspondencias

Tipo_resolucion	Tipología_tablero												
	AR	I	T	C	LH	RH	PI	VT	VL	V	DC	S	Margen activo
AL	0	3	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	6
AND	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
AP	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3
CC	0	5	1	2	0	0	1	0	0	0	0	1	10
CP	0	8	3	4	0	0	0	1	0	2	0	0	18
EVOP	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3
HH	3	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	7
HS	3	10	1	5	0	2	0	3	1	4	0	7	36
MM	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	4
NLP	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
NLPQL	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
S	0	2	1	0	0	0	0	0	2	3	1	0	9
Margen activo	6	34	7	18	1	2	1	4	5	10	1	10	99

Perfiles de fila

Tipo_resolucion	Tipología_tablero												
	AR	I	T	C	LH	RH	PI	VT	VL	V	DC	S	Margen activo
AL	,000	,500	,000	,333	,167	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000
AND	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000
AP	,000	,667	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,333	,000	,000	,000	1,000
CC	,000	,500	,100	,200	,000	,000	,100	,000	,000	,000	,000	,100	1,000
CP	,000	,444	,167	,222	,000	,000	,000	,056	,000	,111	,000	,000	1,000
EVOP	,000	,667	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,333	,000	,000	,000	1,000
HH	,429	,000	,000	,286	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,286	1,000
HS	,083	,278	,028	,139	,000	,056	,000	,083	,028	,111	,000	,194	1,000
MM	,000	,250	,000	,500	,000	,000	,000	,000	,000	,250	,000	,000	1,000
NLP	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000
NLPQL	,000	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000
S	,000	,222	,111	,000	,000	,000	,000	,000	,222	,333	,111	,000	1,000
Masa	,061	,343	,071	,182	,010	,020	,010	,040	,051	,101	,010	,101	

Perfiles de columna

Tipo_resolucion	Tipología_tablero												
	AR	I	T	C	LH	RH	PI	VT	VL	V	DC	S	Masa
AL	,000	,088	,000	,111	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,061
AND	,000	,029	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,010
AP	,000	,059	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,200	,000	,000	,000	,030
CC	,000	,147	,143	,111	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,100	,101
CP	,000	,235	,429	,222	,000	,000	,000	,250	,000	,200	,000	,000	,182
EVOP	,000	,059	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,200	,000	,000	,000	,030
HH	,500	,000	,000	,111	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,200	,071
HS	,500	,294	,143	,278	,000	1,000	,000	,750	,200	,400	,000	,700	,364
MM	,000	,029	,000	,111	,000	,000	,000	,000	,000	,100	,000	,000	,040
NLP	,000	,000	,143	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,010
NLPQL	,000	,000	,000	,056	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,010
S	,000	,059	,143	,000	,000	,000	,000	,000	,400	,300	1,000	,000	,091
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

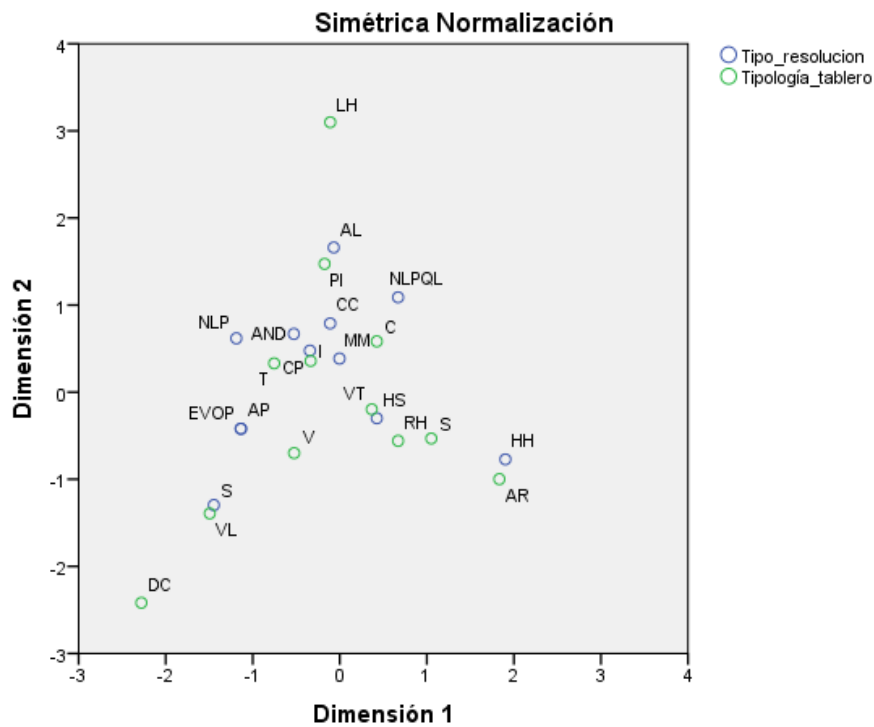
Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,635	,403			,296	,296	,058	,412
2	,536	,287			,211	,508	,068	
3	,454	,206			,152	,659		
4	,386	,149			,110	,769		
5	,341	,116			,086	,855		
6	,310	,096			,071	,925		
7	,262	,069			,051	,976		
8	,161	,026			,019	,995		
9	,067	,004			,003	,999		
10	,044	,002			,001	1,000		
Total		1,359	134,546	,189 ^a	1,000	1,000		

a. 121 grados de libertad

De la misma manera que en los dos casos anteriores, la prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,189 superior a 0,05, con lo que no tiene sentido seguir con en análisis, ya que no existe dependencia entre las variables.

Puntos de columna y de fila



También como se ha mostrado anteriormente, se muestra el gráfico de correspondencias para evidenciar las conclusiones que se pueden extraer observando la tabla de datos de entrada. Vemos que se algunos algoritmos o métodos de resolución se utilizan únicamente para un tipo de tablero, por otra parte se observa que las heurísticas híbridas se utilizan sobre todo en tableros de vigas en artesa y que para los tableros de vigas utilizados históricamente (en forma de I, T y cajón) se utilizan diversos tipos de resolución, siendo los más utilizados las heurísticas simples y los programas propios. Ya anteriormente se vio que los métodos más utilizados eran los heurísticos y los matemáticos y que la tipología más utilizada era la de vigas.

6. Tipología de puentes – Ciclo de vida

Tabla de correspondencias

Tipología_puentes	Ciclo_vida			
	Construccion	Diseño	Mantenimiento	Margen activo
Arco	0	5	0	5
Atirantado	0	8	0	8
De vigas	3	50	13	66
Lanzado	1	1	0	2
Varios puentes	0	0	8	8
Sin especificar	0	1	2	3
Suspendido	1	1	0	2
Margen activo	5	66	23	94

Perfiles de fila

Tipología_puentes	Ciclo_vida			
	Construccion	Diseño	Mantenimiento	Margen activo
Arco	,000	1,000	,000	1,000
Atirantado	,000	1,000	,000	1,000
De vigas	,045	,758	,197	1,000
Lanzado	,500	,500	,000	1,000
Varios puentes	,000	,000	1,000	1,000
Sin especificar	,000	,333	,667	1,000
Suspendido	,500	,500	,000	1,000
Masa	,053	,702	,245	

Perfiles de columna

Tipología_puentes	Ciclo_vida			
	Construccion	Diseño	Mantenimiento	Masa
Arco	,000	,076	,000	,053
Atirantado	,000	,121	,000	,085
De vigas	,600	,758	,565	,702
Lanzado	,200	,015	,000	,021
Varios puentes	,000	,000	,348	,085
Sin especificar	,000	,015	,087	,032
Suspendido	,200	,015	,000	,021
Margen activo	1,000	1,000	1,000	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,603	,363			,678	,678	,073	,103
2	,415	,172			,322	1,000	,198	
Total		,535	50,336	,000 ^a	1,000	1,000		

a. 12 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,00, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 0,535 y queda explicada en un 67,8 % por la primera dimensión y un 23% por la segunda, de manera que las dos primeras dimensiones explican el 32,2 %.

Del examen de los puntos de fila vemos que la tipología de puentes más predominante es, igual que en otro análisis, la de vigas (masa 0,702), y que la optimización de varios puentes es la tipología que más influye a la primera dimensión y los suspendidos y atirantados en la segunda.

Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que, igual que análisis anteriores, el ciclo de vida más predominante es el diseño (masa 0,702), y que el mantenimiento es el ciclo que más influye a la primera dimensión y la construcción en la segunda.

Examen de los puntos de fila^a

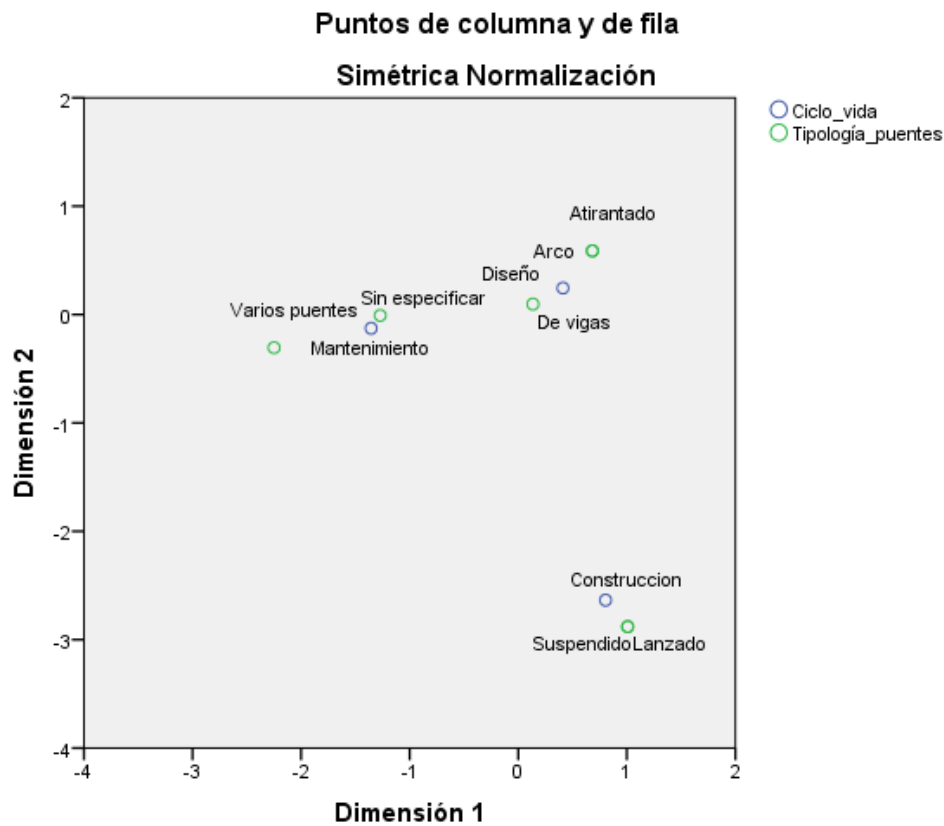
Tipología_puentes	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		Total
					1	2	1	2	
Arco	,053	,683	,588	,023	,041	,044	,662	,338	1,000
Atirantado	,085	,683	,588	,036	,066	,071	,662	,338	1,000
De vigas	,702	,135	,096	,010	,021	,016	,740	,260	1,000
Lanzado	,021	1,008	-2,880	,086	,036	,425	,151	,849	1,000
Varios puentes	,085	-2,249	-,306	,263	,714	,019	,987	,013	1,000
Sin especificar	,032	-1,272	-,008	,031	,086	,000	1,000	,000	1,000
Suspendido	,021	1,008	-2,880	,086	,036	,425	,151	,849	1,000
Total activo	1,000			,535	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Examen de los puntos columna^a

Ciclo_vida	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		Total
					1	2	1	2	
Construccion	,053	,803	-2,635	,174	,057	,890	,119	,881	1,000
Diseño	,702	,411	,244	,089	,197	,101	,805	,195	1,000
Mantenimiento	,245	-1,355	-,127	,272	,746	,010	,994	,006	1,000
Total activo	1,000			,535	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica



Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- La tipología de puentes suspendido y lanzado están cercanas entre sí y muy cercanas al ciclo de construcción, por lo que podemos concluir que en dichos estudios se ha analizado la fase constructiva en términos de optimización.
- La fase de mantenimiento está cercana a la optimización de varias tipologías de puentes y otros sin especificar, lo que indica que el mantenimiento se aplica a puentes en general.
- Por otro lado, se observa que la tipología de vigas y la fase de diseño están muy cercanas entre sí, mostrando que a lo largo de los años lo más estudiado en cuanto a optimización de puentes de hormigón ha sido el diseño óptimo de puentes viga.
- Además se observa que la tipología de arco y atirantado se acercan al diseño también, pero no tan cerca del origen, lo que da muestras de que para dichas tipologías se busca el óptimo diseño pero en estudios más aislados.

7. Elemento optimizado – Método de optimización

Tabla de correspondencias

Elemento_optimizado	Método_optimizacion				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Huerística	Matemática	Margen activo
Anclaje postesado	0	1	0	1	2
Cable/Tirante	0	2	0	3	5
Cojinete apoyo	0	1	0	0	1
Estribos	0	0	1	0	1
Paneles Prefabricados	0	1	0	0	1
Pilas	0	0	5	0	5
Puente general	0	3	15	6	24
Soportes	0	1	0	0	1
Superestructura	0	0	2	3	5
Tablero	0	3	14	13	30
Vigas	2	0	6	10	18
Margen activo	2	12	43	36	93

Perfiles de fila

Elemento_optimizado	Método_optimizacion				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Huerística	Matemática	Margen activo
Anclaje postesado	,000	,500	,000	,500	1,000
Cable/Tirante	,000	,400	,000	,600	1,000
Cojinete apoyo	,000	1,000	,000	,000	1,000
Estribos	,000	,000	1,000	,000	1,000
Paneles Prefabricados	,000	1,000	,000	,000	1,000
Pilas	,000	,000	1,000	,000	1,000
Puente general	,000	,125	,625	,250	1,000
Soportes	,000	1,000	,000	,000	1,000
Superestructura	,000	,000	,400	,600	1,000
Tablero	,000	,100	,467	,433	1,000
Vigas	,111	,000	,333	,556	1,000
Masa	,022	,129	,462	,387	

Perfiles de columna

Elemento_optimizado	Método_optimizacion				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Huerística	Matemática	Masa
Anclaje postesado	,000	,083	,000	,028	,022
Cable/Tirante	,000	,167	,000	,083	,054
Cojinete apoyo	,000	,083	,000	,000	,011
Estribos	,000	,000	,023	,000	,011
Paneles Prefabricados	,000	,083	,000	,000	,011
Pilas	,000	,000	,116	,000	,054
Puente general	,000	,250	,349	,167	,258
Soportes	,000	,083	,000	,000	,011
Superestructura	,000	,000	,047	,083	,054
Tablero	,000	,250	,326	,361	,323
Vigas	1,000	,000	,140	,278	,194
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,582	,339			,598	,598	,097	-,076
2	,423	,179			,315	,914	,080	
3	,221	,049			,086	1,000		
Total		,567	52,700	,006 ^a	1,000	1,000		

a. 30 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,006, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 0,567 y queda explicada en un 59,8 % por la primera dimensión y un 31,5 % por la segunda, de manera que las dos primeras dimensiones explican el 91,4 %.

Del examen de los puntos de fila vemos que el elemento optimizado más predominante es el tablero (masa 0,323), y que los soportes, los paneles prefabricados y el cojinete de apoyo son los elementos que más influye a la primera dimensión y vigas en la segunda.

Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que el método de optimización más predominante es el heurístico (masa 0,462), y que los elementos finitos son el método que más influye a la primera dimensión y la resolución matemática en la segunda.

Examen de los puntos de fila^a

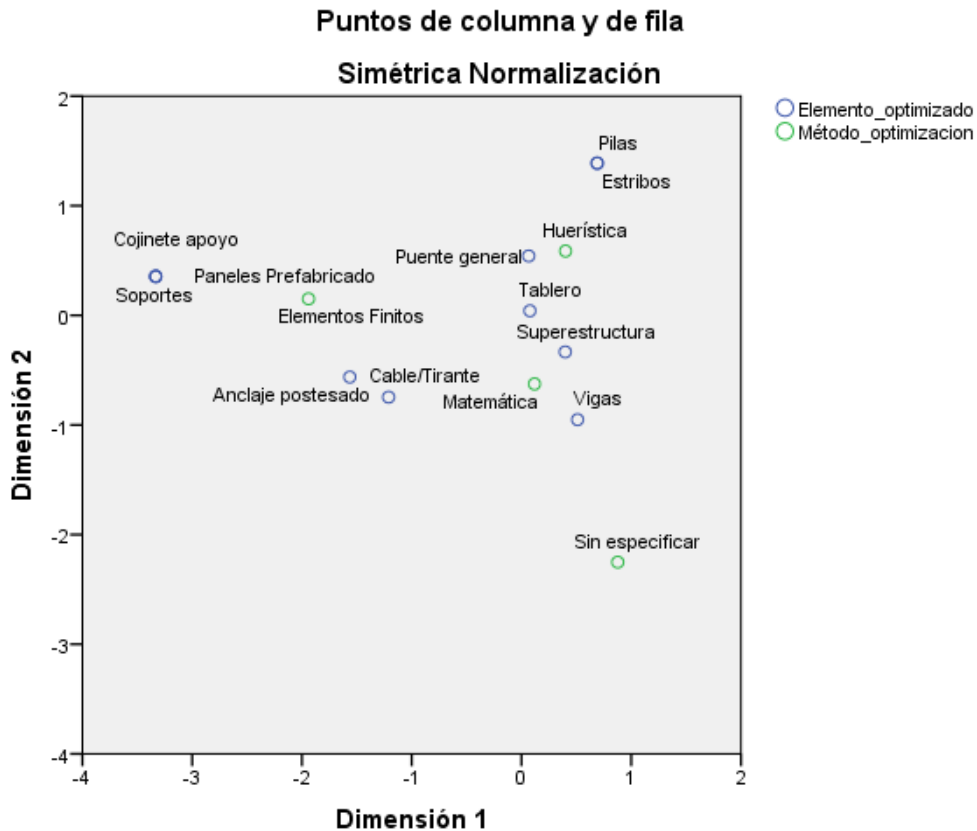
Elemento_optimizado	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Anclaje postesado	,022	-1,564	-,563	,034	,090	,016	,900	,084	,984
Cable/Tirante	,054	-1,211	-,746	,063	,135	,071	,729	,201	,930
Cojinete apoyo	,011	-3,333	,355	,073	,205	,003	,958	,008	,966
Estribos	,011	,689	1,388	,013	,009	,049	,238	,700	,938
Paneles Prefabricados	,011	-3,333	,355	,073	,205	,003	,958	,008	,966
Pilas	,054	,689	1,388	,063	,044	,245	,238	,700	,938
Puente general	,258	,065	,542	,033	,002	,179	,019	,974	,994
Soportes	,011	-3,333	,355	,073	,205	,003	,958	,008	,966
Superestructura	,054	,398	-,333	,015	,015	,014	,334	,170	,504
Tablero	,323	,077	,042	,011	,003	,001	,102	,022	,124
Vigas	,194	,510	-,952	,118	,087	,415	,248	,626	,874
Total activo	1,000			,567	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Examen de los puntos columna^a

Método_optimizacion	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Sin especificar	,022	,877	-2,251	,090	,028	,258	,107	,514	,622
Elementos Finitos	,129	-1,940	,150	,286	,834	,007	,991	,004	,995
Huerística	,462	,401	,587	,112	,128	,377	,386	,599	,985
Matemática	,387	,119	-,626	,079	,009	,359	,040	,809	,849
Total activo	1,000			,567	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica



Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- Los tableros y el puente en general están cerca entre sí y cercanos al origen, esto indica que los elementos más optimizados son dichas categorías.
- Los puentes en general están muy cercanos a los métodos heurísticos, lo que indica el uso continuo de estas técnicas en la resolución de dicha tipología.
- Los tableros están cercanos y prácticamente a la misma distancia de los métodos heurísticos y matemáticos. Esto evidencia un número de casos similar en el uso cada una de los métodos.
- Las pilas y los estribos están alejados del origen, prácticamente juntas y ligeramente cercanas al método heurístico. Esto indica que se estudian de manera aislada pero siempre con técnicas heurísticas.
- Las vigas y los métodos matemáticos están cercanos entre sí. Esto indica que mayoritariamente la optimización de las vigas se realiza con dichos métodos.
- Los elementos finitos están ligeramente alejados del origen y sin acercarse de manera clara a ningún elemento, lo que indica que se utiliza de manera aislada y en casos concretos.

- Los cojinetes de apoyo y los soportes están juntos entre sí, lejanos al origen y a la izquierda de los elementos finitos, lo que evidencia que se estudian de manera aislada y con elementos finitos.
- Finalmente los cables y los anclajes postesados, están en el mismo caso que los elementos del punto anterior, pero en este caso se encuentran entre los elementos finitos y los métodos matemáticos.

8. Tipología del tablero – Método de optimización

Tabla de correspondencias

Tipología_tablero	Método_optimizacion				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Heurística	Matemática	Margen activo
AR	0	0	6	0	6
I	1	5	10	16	32
T	1	0	1	5	7
C	0	3	9	6	18
LH	0	0	0	1	1
LHA	0	0	0	1	1
RH	0	0	2	0	2
PI	0	1	0	0	1
VT	0	0	3	1	4
VL	0	1	1	2	4
V	1	2	3	4	10
DC	0	0	0	1	1
S	0	0	8	1	9
Margen activo	3	12	43	38	96

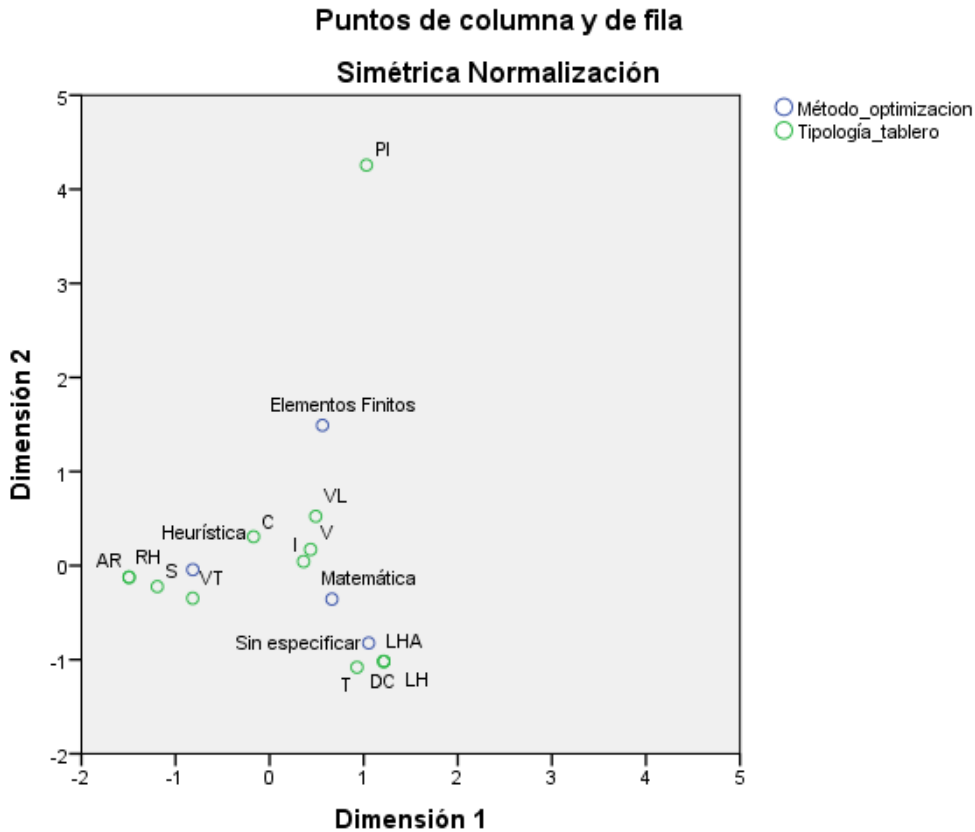
Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
1	,546	,298			,647	,647	,067	,109
2	,350	,123			,266	,913	,091	
3	,200	,040			,087	1,000		
Total		,461	44,236	,163 ^a	1,000	1,000		

a. 36 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,163, superior a 0,05, con lo que no tiene sentido seguir con en análisis, ya que no existe dependencia entre las variables.

De la misma manera que en casos anteriores, se muestra el gráfico de correspondencias para evidenciar algunas de las conclusiones que se pueden extraer observando la tabla de datos de entrada. La tipología de tablero más utilizada es de vigas y más concretamente de vigas en I y en cajón, utilizando métodos heurísticos y matemáticos. Esto, una vez más, parece indicar la evolución en los métodos de resolución. Además hay casos muy aislados de estudios, y otros que se estudian pocas veces pero siempre con métodos heurísticos.



9. Función objetivo - Elemento optimizado

Tabla de correspondencias

Función_objetivo	Elemento_optimizado											
	AN	C/T	COJ	E	PP	P	PG	S	SUP	T	V	M. activo
Anclaje	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Calidad	0	0	0	0	0	0	2	0	1	2	0	5
Ciclo de vida	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2
Coste	0	1	0	1	0	5	18	0	5	24	14	68
Deflexiones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	2
Desplazamiento	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2
Emisiones CO2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	3
Estética	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Otros	1	0	1	0	1	1	5	0	0	2	1	12
Peso	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	3
Rendimiento	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Seguridad	0	0	0	0	0	0	2	0	0	3	0	5
Separación vigas	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2
Sostenibilidad	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	2
Tensiones	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	3
Tensiones cable	0	4	0	0	0	0	0	0	0	1	0	5
Tensiones tesado	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2
Margen activo	2	5	2	1	1	7	33	1	8	39	20	119

Perfiles de fila

Función_objetivo	Elemento_optimizado											
	AN	C/T	COJ	E	PP	P	PG	S	SUP	T	V	M. activo
Anclaje	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000
Calidad	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,400	,000	,200	,400	,000	1,000
Ciclo de vida	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,000	,500	,000	,000	1,000
Coste	,000	,015	,000	,015	,000	,074	,265	,000	,074	,353	,206	1,000
Deflexiones	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,00	,000	1,000
Desplazamiento	,000	,000	,500	,000	,000	,000	,500	,000	,000	,000	,000	1,000
Emisiones CO2	,000	,000	,000	,000	,000	,333	,000	,000	,000	,333	,333	1,000
Estética	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,00	,000	,000	,000	,000	1,000
Otros	,083	,000	,083	,000	,083	,083	,417	,000	,000	,167	,083	1,000
Peso	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,333	,000	,333	,333	1,000
Rendimiento	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,00	,000	,000	,000	,000	1,000
Seguridad	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,400	,000	,000	,600	,000	1,000
Separación vigas	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,000	,500	1,000
Sostenibilidad	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,000	,000	,500	,000	1,000
Tensiones	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,333	,000	,000	,667	,000	1,000

Tensiones cable	,000	,800	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,200	,000	1,000
Tensiones tesado	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,00	1,000
Masa	,017	,042	,017	,008	,008	,059	,277	,008	,067	,328	,168		

Perfiles de columna

Función_objetivo	Elemento_optimizado												
	AN	C/T	COJ	E	PP	P	PG	S	SUP	T	V	Masa	
Anclaje	,500	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,008
Calidad	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,061	,000	,125	,051	,000	,042	
Ciclo de vida	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,030	,000	,125	,000	,000	,017	
Coste	,000	,200	,000	1,00	,000	,714	,545	,000	,625	,615	,700	,571	
Deflexiones	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,051	,000	,017	
Desplazamiento	,000	,000	,500	,000	,000	,000	,030	,000	,000	,000	,000	,017	
Emisiones CO2	,000	,000	,000	,000	,000	,143	,000	,000	,000	,026	,050	,025	
Estética	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,030	,000	,000	,000	,000	,008	
Otros	,500	,000	,500	,000	1,00	,143	,152	,000	,000	,051	,050	,101	
Peso	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,00	,000	,026	,050	,025	
Rendimiento	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,030	,000	,000	,000	,000	,008	
Seguridad	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,061	,000	,000	,077	,000	,042	
Separación vigas	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,125	,000	,050	,017	
Sostenibilidad	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,030	,000	,000	,026	,000	,017	
Tensiones	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,030	,000	,000	,051	,000	,025	
Tensiones cable	,000	,800	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,026	,000	,042	
Tensiones tesado	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,100	,017	
Margen activo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,00, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 2,307, no obstante se necesitan 6 dimensiones para que esta quede explicada en más de un 90 %. Las dos primeras dimensiones solo explican un 51,3 %.

Del examen de los puntos de fila vemos que la función objetivo más predominante es el coste (masa 0,571), y que la tensión del cable es la función objetivo que más influye a la primera dimensión y la optimización del anclaje en la segunda.

Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que el elemento obtimizado más predominante es el tablero (masa 0,328), y que el cable o tirante es el elemento que más influye a la primera dimensión y el anclaje del postesado en la segunda.

Resumen

Dimens.	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
1	,797	,635			,275	,275	,132	,071
2	,741	,550			,238	,513	,171	
3	,599	,359			,156	,669		
4	,550	,302			,131	,800		
5	,409	,167			,072	,872		
6	,364	,133			,057	,930		
7	,282	,080			,034	,964		
8	,216	,047			,020	,985		
9	,179	,032			,014	,998		
10	,062	,004			,002	1,000		
Total		2,307	274,575	,000 ^a	1,000	1,000		

a. 160 grados de libertad

Examen de los puntos de fila^a

Función objetivo	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Anclaje	,008	-1,597	8,384	,492	,027	,797	,035	,891	,926
Calidad	,042	-,189	-,215	,028	,002	,003	,043	,052	,095
Ciclo de vida	,017	-,278	-,246	,061	,002	,001	,017	,012	,029
Coste	,571	-,108	-,224	,050	,008	,039	,105	,420	,525
Deflexiones	,017	-,039	-,274	,034	,000	,002	,001	,027	,028
Desplazamiento	,017	-,536	,661	,248	,006	,010	,015	,022	,037
Emisiones CO2	,025	-,179	-,272	,048	,001	,003	,013	,029	,042
Estética	,008	-,310	-,036	,022	,001	,000	,029	,000	,030
Otros	,101	-,430	,832	,154	,023	,094	,097	,337	,434
Peso	,025	-,195	-,567	,333	,001	,011	,002	,018	,020
Rendimiento	,008	-,310	-,036	,022	,001	,000	,029	,000	,030
Seguridad	,042	-,148	-,179	,028	,001	,002	,026	,035	,061
Separación vigas	,017	-,242	-,426	,071	,001	,004	,011	,032	,043
Sostenibilidad	,017	-,175	-,155	,011	,001	,001	,037	,027	,063
Tensiones	,025	-,130	-,195	,019	,001	,001	,018	,037	,055
Tensiones cable	,042	4,183	,729	,603	,923	,030	,971	,027	,998
Tensiones tesado	,017	-,239	-,396	,083	,001	,004	,009	,024	,033
Total activo	1,000			2,307	1,000	1,000			

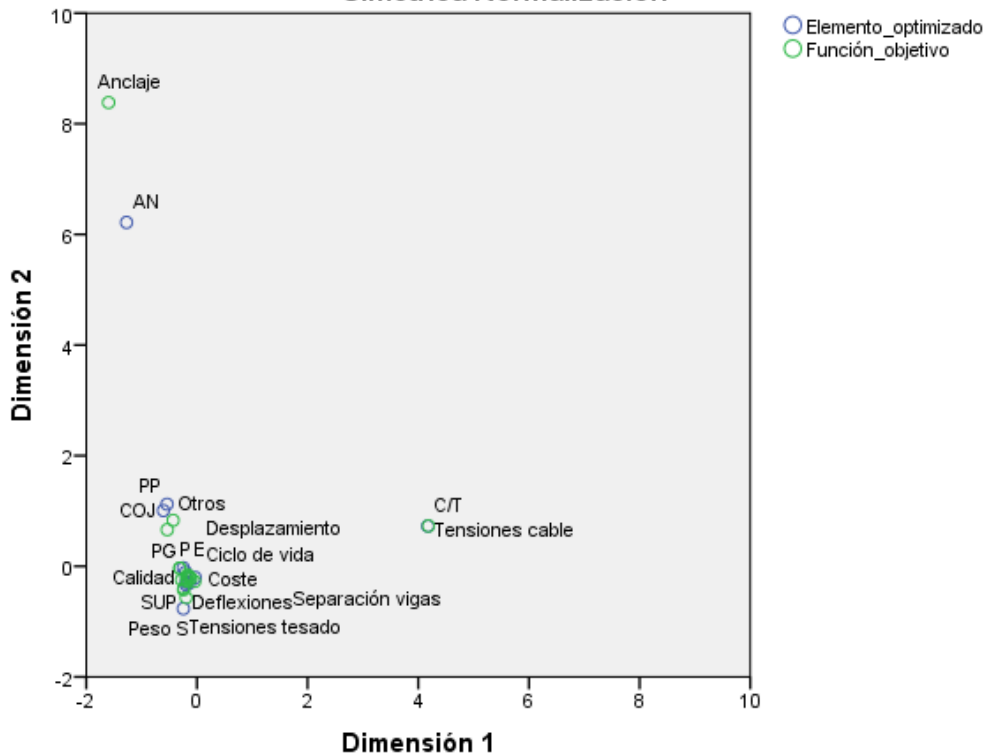
a. Normalización Simétrica

Examen de los puntos columna^a

Elemento_optimizado	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		Total
					1	2	1	2	
AN	,017	-1,273	6,216	,525	,034	,876	,041	,917	,959
C/T	,042	4,173	,726	,601	,918	,030	,970	,027	,997
COJ	,017	-,606	1,007	,275	,008	,023	,018	,046	,064
E	,008	-,135	-,302	,006	,000	,001	,019	,090	,109
PP	,008	-,540	1,123	,075	,003	,014	,026	,105	,131
P	,059	-,206	-,107	,053	,003	,001	,037	,009	,047
PG	,277	-,247	-,027	,095	,021	,000	,142	,002	,144
S	,008	-,245	-,765	,325	,001	,007	,001	,011	,012
SUP	,067	-,196	-,338	,129	,003	,010	,016	,044	,060
T	,328	-,031	-,203	,085	,000	,018	,003	,118	,120
V	,168	-,190	-,294	,139	,008	,020	,035	,078	,113
Total activo	1,000			2,307	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

**Puntos de columna y de fila
Simétrica Normalización**



Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- La función objetivo tensiones del cable se aplica a los cables de manera aislada (lejos del origen) e igual pasa con el anclaje de postesado y la función de optimización del anclaje.
- El coste es la función objetivo por excelencia, es la que más se aplica en los artículos publicados, sobretodo en tableros, vigas y puentes en general. Se observa una gran nube de puntos verdes en el origen.
- La calidad del puente, el ciclo de vida y las tensiones también se encuentran cerca del origen.
- Los pilares y la superestructura también optimizan en su mayoría el coste.
- Hay otras funciones objetivo que se analizan de manera más aislada para problemas concretos, esto se observa en que hay algunos puntos azules cercanos al origen rodeándolo.

10. Función objetivo – Tipo de resolución de la optimización

Tabla de correspondencias

Función_objetivo	Tipo_resolución												
	AL	AND	AP	CC	CP	EVOP	HH	HS	MM	NLP	SO	S	Margen activo
Anclaje	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Calidad	0	0	0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	5
Ciclo de vida	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	2
Coste	4	1	2	5	11	3	6	29	3	1	1	4	70
Deflexiones	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Desplazamiento	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	2
Emisiones CO2	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	4
Estética	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Otros	1	0	0	1	2	0	1	6	0	0	0	2	13
Peso	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	3
Rendimiento	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
Seguridad	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0	0	5
Separación vigas	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Sostenibilidad	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
Tensiones	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	3
Tensiones cable	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	2	5
Tensiones tesado	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	3
Margen activo	7	1	4	12	18	3	12	50	6	1	1	9	124

Resumen

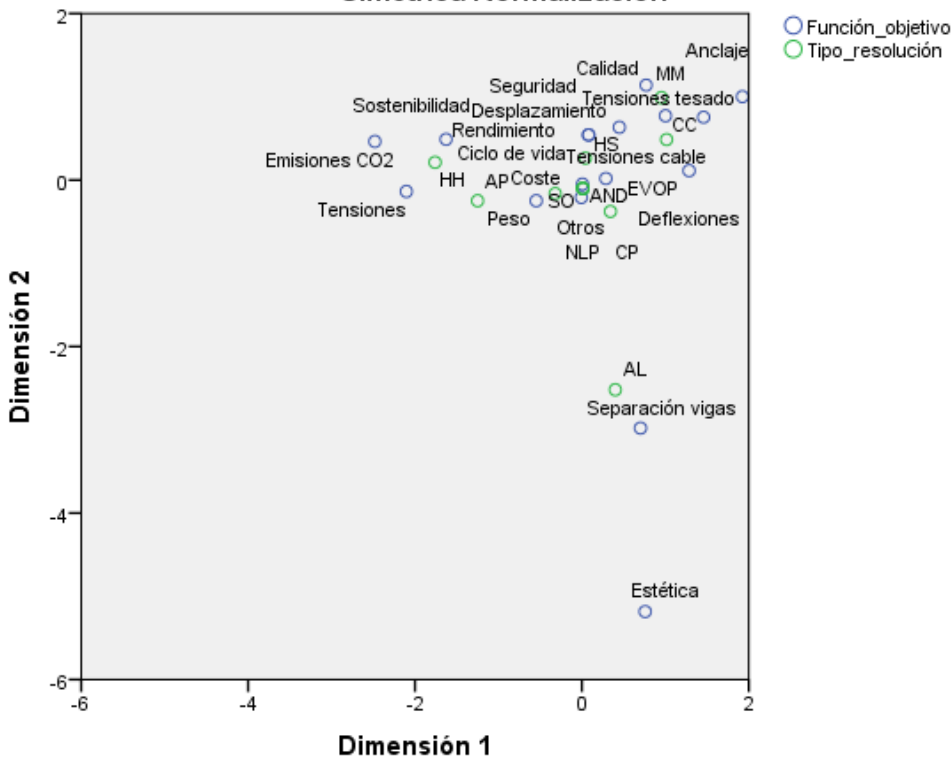
Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,528	,278			,232	,232	,082	,070
2	,486	,236			,197	,429	,119	
3	,450	,202			,169	,598		
4	,402	,162			,135	,733		
5	,367	,135			,113	,846		
6	,304	,093			,077	,923		
7	,253	,064			,053	,976		
8	,168	,028			,024	1,000		
Total		1,199	148,645	,934 ^a	1,000	1,000		

a. 176 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,934, superior a 0,05, con lo que no tiene sentido seguir con en análisis, ya que no existe dependencia entre las variables. El gráfico de correspondencias da muestra de ello generando una nube de puntos muy generalizada alrededor del origen. Se observan algunos casos aislados donde el método de resolución es desarrollado únicamente para dicho estudio, en el que además se analiza una función objetivo muy concreta.

Puntos de columna y de fila

Simétrica Normalización



11. Función objetivo – Método de optimización

Tabla de correspondencias

Función_objetivo	Método_optimización				
	Sin especificar	Elementos	Heurística	Matemática	Margen activo
Anclaje	0	0	0	1	1
Calidad	0	0	3	2	5
Ciclo de vida	0	0	2	0	2
Coste	2	3	37	26	68
Deflexiones	0	2	0	0	2
Desplazamientos	0	2	0	0	2
Emisiones CO2	0	0	3	0	3
Estética	0	0	0	1	1
Otros	0	4	5	3	12
Peso	0	1	1	1	3
Rendimiento	0	0	1	0	1
Seguridad	0	0	4	1	5
Separación vigas	0	0	0	2	2
Sostenibilidad	0	0	2	0	2
Tensiones	0	0	1	1	2
Tensiones cable	0	2	0	3	5
Tensiones tesado	0	0	0	2	2
Margen activo	2	14	59	43	118

Perfiles de fila

Función_objetivo	Método_optimización				
	Sin especificar	Elementos	Heurística	Matemática	Margen activo
Anclaje	,000	,000	,000	1,000	1,000
Calidad	,000	,000	,600	,400	1,000
Ciclo de vida	,000	,000	1,000	,000	1,000
Coste	,029	,044	,544	,382	1,000
Deflexiones	,000	1,000	,000	,000	1,000
Desplazamientos	,000	1,000	,000	,000	1,000
Emisiones CO2	,000	,000	1,000	,000	1,000
Estética	,000	,000	,000	1,000	1,000
Otros	,000	,333	,417	,250	1,000
Peso	,000	,333	,333	,333	1,000
Rendimiento	,000	,000	1,000	,000	1,000
Seguridad	,000	,000	,800	,200	1,000
Separación vigas	,000	,000	,000	1,000	1,000
Sostenibilidad	,000	,000	1,000	,000	1,000
Tensiones	,000	,000	,500	,500	1,000

Tensiones cable	,000	,400	,000	,600	1,000
Tensiones tesado	,000	,000	,000	1,000	1,000
Masa	,017	,119	,500	,364	

Perfiles de columna

Función_objetivo	Método_optimización				
	Sin especificar	Elementos	Heurística	Matemática	Masa
Anclaje	,000	,000	,000	,023	,008
Calidad	,000	,000	,051	,047	,042
Ciclo de vida	,000	,000	,034	,000	,017
Coste	1,000	,214	,627	,605	,576
Deflexiones	,000	,143	,000	,000	,017
Desplazamientos	,000	,143	,000	,000	,017
Emisiones CO2	,000	,000	,051	,000	,025
Estética	,000	,000	,000	,023	,008
Otros	,000	,286	,085	,070	,102
Peso	,000	,071	,017	,023	,025
Rendimiento	,000	,000	,017	,000	,008
Seguridad	,000	,000	,068	,023	,042
Separación vigas	,000	,000	,000	,047	,017
Sostenibilidad	,000	,000	,034	,000	,017
Tensiones	,000	,000	,017	,023	,017
Tensiones cable	,000	,143	,000	,070	,042
Tensiones tesado	,000	,000	,000	,047	,017
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,637	,406			,694	,694	,081	-,027
2	,410	,169			,288	,982	,054	
3	,102	,010			,018	1,000		
Total		,584	68,963	,025 ^a	1,000	1,000		

a. 48 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,025, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 0,584 y queda explicada en un 69,4 % por la primera dimensión y un 28,8 % por la segunda, de manera que las dos primeras dimensiones explican el 98,2%.

Del examen de los puntos de fila vemos que la función objetivo más predominante es el coste (masa 0,576), y que las deflexiones y los desplazamientos son la función objetivo que más influye a la primera dimensión y la separación entre vigas y la tensión de tesado en la segunda.

Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que el método de optimización más predominante es el heurístico (masa 0,50), y que los elementos finitos son el método que más influye a la primera dimensión y las técnicas matemáticas en la segunda.

Examen de los puntos de fila^a

Función_objetivo	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Anclaje	,008	,220	2,027	,015	,001	,085	,018	,967	,985
Calidad	,042	,458	,009	,007	,014	,000	,840	,000	,840
Ciclo de vida	,017	,617	-1,336	,017	,010	,074	,242	,733	,975
Coste	,576	,292	,025	,035	,077	,001	,893	,004	,897
Deflexiones	,017	-3,378	-618	,126	,304	,016	,978	,021	,999
Desplazamientos	,017	-3,378	-618	,126	,304	,016	,978	,021	,999
Emisiones CO2	,025	,617	-1,336	,025	,015	,111	,242	,733	,975
Estética	,008	,220	2,027	,015	,001	,085	,018	,967	,985
Otros	,102	-,814	-,256	,046	,106	,016	,927	,059	,986
Peso	,025	-,847	,024	,012	,029	,000	,985	,001	,986
Rendimiento	,008	,617	-1,336	,008	,005	,037	,242	,733	,975
Seguridad	,042	,537	-,663	,017	,019	,045	,472	,463	,935
Separación vigas	,017	,220	2,027	,030	,001	,170	,018	,967	,985
Sostenibilidad	,017	,617	-1,336	,017	,010	,074	,242	,733	,975
Tensiones	,017	,418	,346	,003	,005	,005	,599	,264	,863
Tensiones cable	,042	-1,219	,969	,057	,099	,097	,708	,288	,997
Tensiones tesado	,017	,220	2,027	,030	,001	,170	,018	,967	,985
Total activo	1,000			,584	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Examen de los puntos columna^a

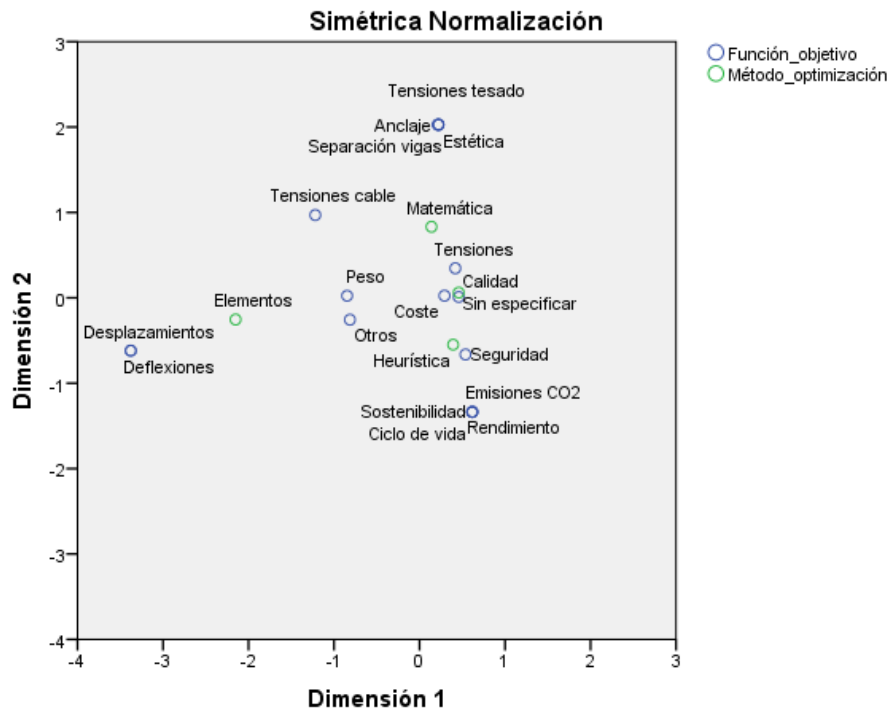
Método_optimización	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Sin especificar	,017	,458	,062	,012	,006	,000	,182	,002	,184
Elementos Finitos	,119	-2,151	-,254	,353	,862	,019	,991	,009	1,000
Heurística	,500	,393	-,548	,111	,121	,366	,443	,556	,999
Matemática	,364	,140	,832	,108	,011	,615	,042	,957	,999
Total activo	1,000			,584	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- Los desplazamientos y las deflexiones están cerca entre sí y alejados del origen y a la izquierda de los elementos finitos.
- Igualmente, pero arriba de los métodos matemáticos están las tensiones de cable y tesado, el anclaje, estética y separación entre vigas. Además los métodos matemáticos están más cercanos al origen, lo que demuestran su mayor uso.
- Las heurísticas, también están cercanas al origen y cercanas a la seguridad, a las emisiones de CO2, sostenibilidad, ciclo de vida y rendimiento.
- El peso y otros tipos de funciones objetivo más específicos están cercanas entre sí, y a medio camino entre los elementos finitos y las heurísticas. Esto indica que para casos muy concretos se utilizan métodos más potentes, donde seguramente los matemáticos no puedan llegar.
- Las funciones objetivo coste, calidad y tensiones, como ya se ha observado en otros análisis son las que más cerca del origen y entre sí se encuentran. Vemos también que se encuentran a medio camino entre las técnicas matemáticas y heurísticas. Para el coste estos hechos evidencian que es la función objetivo más utilizado, para el resto que se resuelven generalmente con la misma metodología que para el coste.

Puntos de columna y de fila



12. Función objetivo – Tipología de tablero

Tabla de correspondencias

Función_objetivo	Tipología_tablero													
	AR	I	T	C	LH	LA	RH	PI	VT	VL	V	DC	S	M. act
Anclaje	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Calidad	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	1	0	1	5
Ciclo de vida	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Coste	5	20	6	16	1	1	2	0	4	0	9	0	7	71
Deflexiones	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Desplazamientos	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2
Emisiones CO2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3
Estética	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Otros	0	8	0	2	0	0	0	0	1	0	0	0	2	13
Peso	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3
Rendimiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Seguridad	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	5
Separación vigas	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2
Sostenibilidad	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2
Tensiones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2
Tensiones cable	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	6
Tensiones tesado	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
Margen activo	8	40	7	23	1	1	3	1	6	4	12	1	15	122

Perfiles de fila

Funciónobjetivo	Tipología_tablero													
	AR	I	T	C	LH	LA	RH	PI	VT	VL	V	DC	S	M. acti
Anclaje	,00	1,00	,00	,000	,00	,00	,00	,00	,00	,000	,00	,00	,00	1,000
Calidad	,00	,000	,20	,400	,00	,00	,00	,00	,00	,000	,20	,00	,20	1,000
Ciclo de vida	,00	1,00	,00	,000	,00	,00	,00	,00	,00	,000	,00	,00	,00	1,000
Coste	,07	,282	,085	,225	,014	,014	,028	,000	,056	,000	,127	,000	,099	1,000
Deflexiones	,000	,500	,000	,500	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000
Desplazamientos	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,000	,000	,500	,000	,000	1,000
Emisiones CO2	,333	,000	,000	,333	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,333	1,000
Estética	,000	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000
Otros	,000	,615	,000	,154	,000	,000	,000	,000	,077	,000	,000	,000	,154	1,000
Peso	,333	,333	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,333	,000	,000	,000	1,000
Rendimiento	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
Seguridad	,000	,200	,000	,000	,000	,000	,200	,000	,000	,000	,000	,000	,600	1,000
Separación vigas	,000	,500	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,000	,000	1,000
Sostenibilidad	,500	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,000	,000	,000	,000	1,000
Tensiones	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,500	1,000
Tensiones cable	,000	,667	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,333	,000	,000	,000	1,000
Tens. tesado	,000	1,00	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000
Masa	,066	,328	,057	,189	,008	,008	,025	,008	,049	,033	,098	,008	,123	

Perfiles de columna

Función_objetivo	Tipología_tablero													
	AR	I	T	C	LH	LA	RH	PI	VT	VL	V	DC	S	Mas a
Anclaje	,000	,025	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,008
Calidad	,000	,000	,143	,087	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,083	,000	,067	,041
Ciclo de vida	,000	,025	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,008
Coste	,625	,500	,857	,696	1,00	1,00	,667	,000	,667	,000	,750	,000	,467	,582
Deflexiones	,000	,025	,000	,043	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,016
Desplaz.	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,00	,000	,000	,083	,000	,000	,016
Emision. CO2	,125	,000	,000	,043	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,067	,025
Estética	,000	,000	,000	,043	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,008
Otros	,000	,200	,000	,087	,000	,000	,000	,000	,167	,000	,000	,000	,133	,107
Peso	,125	,025	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,250	,000	,000	,000	,025
Rendimiento	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,250	,000	,000	,000	,008
Seguridad	,000	,025	,000	,000	,000	,000	,333	,000	,000	,000	,000	,000	,200	,041
Sep. vigas	,000	,025	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,083	,000	,000	,016
Sostenibilidad	,125	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,167	,000	,000	,000	,000	,016
Tensiones	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,00	,067	,016

Tens. cable	,000	,100	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,000	,000	,000	,049
Tens. tesado	,000	,050	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,016
Margen activo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,743	,552			,246	,246	,112	,418
2	,739	,547			,244	,490	,141	
3	,703	,494			,220	,710		
4	,454	,206			,092	,802		
5	,407	,165			,074	,876		
6	,383	,147			,066	,941		
7	,251	,063			,028	,970		
8	,193	,037			,017	,986		
9	,123	,015			,007	,993		
10	,115	,013			,006	,999		
11	,052	,003			,001	1,000		
Total		2,242	273,551	,000 ^a	1,000	1,000		

a. 192 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,00, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 2,242 y se necesitan 6 dimensiones para que quede explicada en más de 90 %, ya que queda explicada en un 24,6 % por la primera dimensión y un 24,4 % por la segunda, de manera que las dos primeras dimensiones explican el 49 %.

Del examen de los puntos de fila vemos que la función objetivo más predominante es el coste (masa 0,582), y que los desplazamientos son la función objetivo que más influye a la primera dimensión y las tensiones en la segunda

Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que el tipo de tablero más predominante es el de vigas en forma de I (masa 0,328), y que las vigas en forma de PI es el tipo de tablero que más influye a la primera dimensión y el de vigas de doble cubierta en la segunda.

Examen de los puntos de fila^a

Función_objetivo	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		Total
					1	2	1	2	
Anclaje	,008	-,397	,154	,017	,002	,000	,057	,009	,066
Calidad	,041	,332	-,089	,052	,006	,000	,064	,005	,069
Ciclo de vida	,008	-,397	,154	,017	,002	,000	,057	,009	,066
Coste	,582	,067	,013	,058	,004	,000	,034	,001	,035
Deflexiones	,016	-,143	,064	,018	,000	,000	,014	,003	,017
Desplazamientos	,016	5,027	3,230	,525	,558	,231	,586	,241	,826
Emisiones CO2	,025	,050	-,289	,054	,000	,003	,001	,028	,029
Estética	,008	,110	-,025	,035	,000	,000	,002	,000	,002
Otros	,107	-,181	-,053	,063	,005	,000	,041	,003	,044
Peso	,025	-1,432	,604	,109	,068	,012	,344	,061	,406
Rendimiento	,008	-3,630	1,557	,242	,145	,027	,332	,061	,393
Seguridad	,041	,139	-,605	,151	,001	,020	,004	,074	,077
Separación vigas	,016	,273	,353	,038	,002	,003	,024	,040	,064
Sostenibilidad	,016	-,143	,060	,129	,000	,000	,002	,000	,002
Tensiones	,016	1,648	-5,521	,517	,060	,676	,064	,715	,779
Tensiones cable	,049	-1,474	,622	,184	,144	,026	,431	,076	,508
Tensiones tesado	,016	-,397	,154	,034	,003	,001	,057	,009	,066
Total activo	1,000			2,242	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Examen de los puntos columna^a

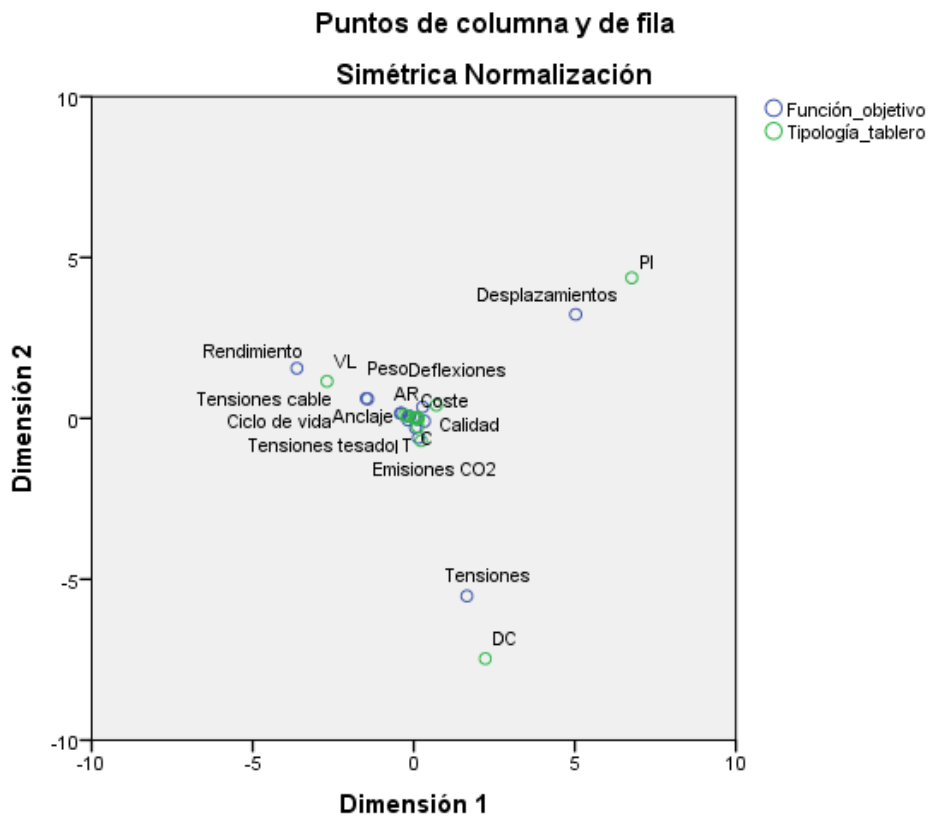
Tipología_tablero	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		Total
					1	2	1	2	
AR	,066	-,200	,075	,124	,004	,000	,016	,002	,018
I	,328	-,295	,114	,141	,038	,006	,150	,022	,172
T	,057	,141	-,002	,044	,002	,000	,020	,000	,020
C	,189	,082	-,019	,096	,002	,000	,010	,001	,010
LH	,008	,090	,018	,006	,000	,000	,008	,000	,009
LA	,008	,090	,018	,006	,000	,000	,008	,000	,009
RH	,025	,123	-,261	,061	,000	,002	,005	,020	,025

PI	,008	6,767	4,368	,492	,505	,212	,567	,235	,802
VT	,049	-,012	,014	,085	,000	,000	,000	,000	,000
VL	,033	-2,696	1,151	,467	,321	,059	,379	,069	,448
V	,098	,700	,407	,097	,065	,022	,370	,125	,495
DC	,008	2,219	-7,468	,492	,054	,618	,061	,687	,748
S	,123	,229	-,697	,132	,009	,081	,036	,333	,369
Total activo	1,000			2,242	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- Los tablero de vigas tipo PI se estudian de manera aislada y se optimizan los desplazamientos, ya que están alejados del origen y la función objetivo cercana son los desplazamientos. Lo mismo ocurre con los tableros de vigas de doble cubierta y las tensiones como función objetivo.
- Para tipología de tablero viga-losa (VL) es el rendimiento y el peso lo que se estudia, pero también de manera más aislada.
- Se observa una nube de puntos verdes y azules muy cercanos al origen. Es el coste la función objetivo que reúne a la mayor parte de los tipos de tableros hacia el origen.



13. Tipo de resolución de la optimización – Tipo de hormigón

Tabla de correspondencias

Tipo_resolucion	Tipología_hormigón					
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A	Margen activo
AL	0	5	0	0	0	5
AND	0	1	0	0	0	1
AP	1	0	0	0	2	3
CC	2	7	0	0	0	9
CP	5	7	0	0	5	17
EVOP	1	2	0	0	0	3
HH	2	4	0	0	1	7
HS	12	11	0	3	13	39
MM	1	3	0	0	0	4
NLP	0	0	1	0	0	1
NLPQL	1	0	0	0	0	1
S	1	3	0	0	5	9
Margen activo	26	43	1	3	26	99

Perfiles de fila

Tipo_resolucion	Tipología_hormigón					
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A	Margen activo
AL	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
AND	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
AP	,333	,000	,000	,000	,667	1,000
CC	,222	,778	,000	,000	,000	1,000
CP	,294	,412	,000	,000	,294	1,000
EVOP	,333	,667	,000	,000	,000	1,000
HH	,286	,571	,000	,000	,143	1,000
HS	,308	,282	,000	,077	,333	1,000
MM	,250	,750	,000	,000	,000	1,000
NLP	,000	,000	1,000	,000	,000	1,000
NLPQL	1,000	,000	,000	,000	,000	1,000
S	,111	,333	,000	,000	,556	1,000
Masa	,263	,434	,010	,030	,263	

Perfiles de columna

Tipo_resolucion	Tipología_hormigón					
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A	Masa
AL	,000	,116	,000	,000	,000	,051
AND	,000	,023	,000	,000	,000	,010
AP	,038	,000	,000	,000	,077	,030
CC	,077	,163	,000	,000	,000	,091
CP	,192	,163	,000	,000	,192	,172
EVOP	,038	,047	,000	,000	,000	,030
HH	,077	,093	,000	,000	,038	,071
HS	,462	,256	,000	1,000	,500	,394
MM	,038	,070	,000	,000	,000	,040
NLP	,000	,000	1,000	,000	,000	,010
NLPQL	,038	,000	,000	,000	,000	,010
S	,038	,070	,000	,000	,192	,091
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	1,000	1,000			,744	,744	,000	,000
2	,495	,245			,182	,926	,067	
3	,259	,067			,050	,976		
4	,180	,032			,024	1,000		
Total		1,344	133,104	,000 ^a	1,000	1,000		

a. 44 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,000, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 0,358 y queda explicada en un 74,4 % por la primera dimensión y un 18,2 % por la segunda, de manera que las dos primeras dimensiones explican el 92,6 %.

Del examen de los puntos de fila vemos que la tipología de resolución de la optimización más predominante es la heurística simple (masa 0,394), y que el algoritmo NLP es el tipo de resolución que más influye a la primera dimensión y cálculo-comparación en la segunda.

Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que el tipo de hormigón más predominante es el hormigón pretensado (HP) (masa 0,434), y que el hormigón pretensado de altas resistencias (HPHR) es el tipo que más influye a la primera dimensión y el HP en la segunda.

Examen de los puntos de fila^a

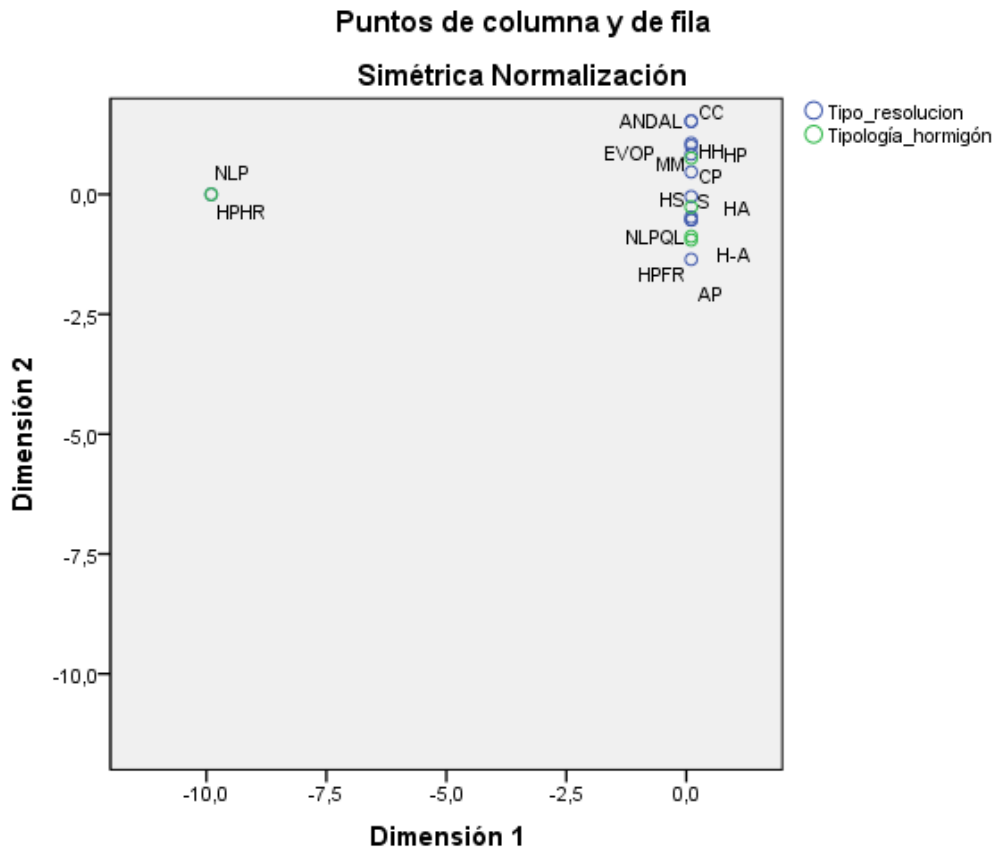
Tipo_resolucion	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
AL	,051	,101	1,526	,066	,001	,237	,008	,885	,893
AND	,010	,101	1,526	,013	,000	,047	,008	,885	,893
AP	,030	,101	-1,357	,034	,000	,113	,009	,818	,827
CC	,091	,101	1,068	,053	,001	,209	,018	,973	,991
CP	,172	,101	-,049	,008	,002	,001	,208	,024	,232
EVOP	,030	,101	,840	,014	,000	,043	,023	,782	,805
HH	,071	,101	,467	,010	,001	,031	,073	,769	,842
HS	,394	,101	-,471	,064	,004	,176	,063	,678	,741
MM	,040	,101	1,011	,022	,000	,083	,019	,950	,969
NLP	,010	-9,899	,000	,990	,990	,000	1,000	,000	1,000
NLPQL	,010	,101	-,533	,028	,000	,006	,004	,050	,054
S	,091	,101	-,533	,043	,001	,052	,021	,295	,316
Total activo	1,000			1,344	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Examen de los puntos columna^a

Tipología_hormigón	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
HA	,263	,101	-,264	,053	,003	,037	,051	,171	,221
HP	,434	,101	,756	,131	,004	,501	,034	,939	,973
HPHR	,010	-9,899	,000	,990	,990	,000	1,000	,000	1,000
HPFR	,030	,101	-,951	,047	,000	,055	,007	,291	,298
H-A	,263	,101	-,876	,124	,003	,407	,022	,804	,825
Total activo	1,000			1,344	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica



Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- El algoritmo NLP y el HPHR están prácticamente en el mismo punto y alejados del origen, lo que indica que se han realizado análisis muy aislados para dicho par de categorías y siempre unidas una con la otra.
- Las heurísticas simples están en el origen, mostrando su mayor uso frente a los demás tipos de resolución. Los tipos de hormigón HP, HA y H-A están cerca de las heurísticas simples evidenciando el uso de esta técnica de resolución para estos tipos de hormigón. Se observa que HA y H-A están más que HP, esto se debe a que en estos dos tipos de hormigón la tipología de resolución mayoritaria es la heurística. Para el HP también lo es pero además se este tipo de hormigón se utiliza en más ocasiones para otros tipos de resolución (HP está más rodeado por técnicas de resolución que HA y H-A)
- El hormigón pretensado reforzado con fibras está en la vertical del HP pero alejado del origen. Este hecho muestra que este tipo de hormigón se ha estudiado poco y siempre para hormigones pretensados.

14. Tipo de hormigón – Método de optimización

Tabla de correspondencias

Tipo_hormigón	Métodos_optimización				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Hurística	Matamática	Margen activo
HA	0	2	14	9	25
HP	2	3	17	19	41
HPHR	0	0	0	1	1
HPFR	0	1	2	0	3
H-A	0	6	13	7	26
Margen activo	2	12	46	36	96

Perfiles de fila

Tipo_hormigón	Métodos_optimización				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Hurística	Matamática	Margen activo
HA	,000	,080	,560	,360	1,000
HP	,049	,073	,415	,463	1,000
HPHR	,000	,000	,000	1,000	1,000
HPFR	,000	,333	,667	,000	1,000
H-A	,000	,231	,500	,269	1,000
Masa	,021	,125	,479	,375	

Perfiles de columna

Tipo_hormigón	Métodos_optimización				
	Sin especificar	Elementos Finitos	Hurística	Matamática	Masa
HA	,000	,167	,304	,250	,260
HP	1,000	,250	,370	,528	,427
HPHR	,000	,000	,000	,028	,010
HPFR	,000	,083	,043	,000	,031
H-A	,000	,500	,283	,194	,271
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,392, superior a 0,05, con lo que no tiene sentido seguir con en análisis, ya que no existe dependencia entre las variables.

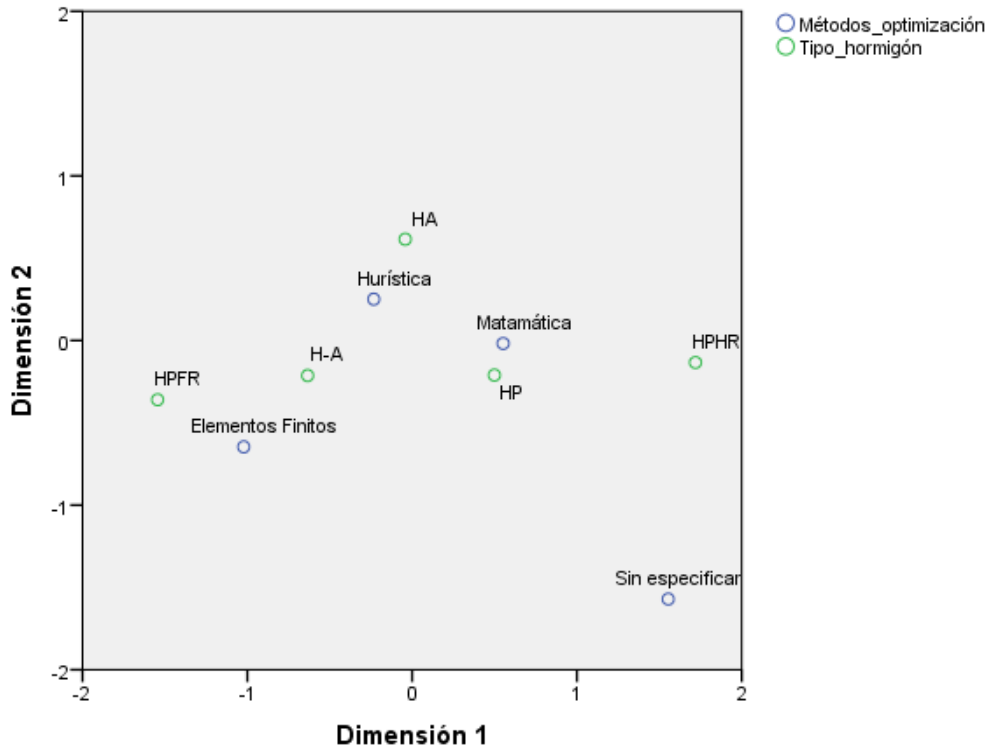
Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación 2
1	,321	,103			,780	,780	,085	,238
2	,134	,018			,136	,915	,076	
3	,106	,011			,085	1,000		
Total		,132	12,695	,392 ^a	1,000	1,000		

a. 12 grados de libertad

Puntos de columna y de fila

Simétrica Normalización



El gráfico de correspondencias muestra puntos muy dispersos sin evidenciar relaciones de cercanía importantes y puntos aislados que muestran casos de estudios muy poco frecuentes. Sí que es interesante resaltar que los puntos más cercanos al origen son los métodos y los tipos de hormigón más utilizados en los artículos.

15. Tipo de hormigón – Tipología de puente

Tabla de correspondencias

Tipo_hormigón	Tipología_puente							
	Arco	Atirantado	De vigas	Lanzado	Suspendido	Varios puentes	Sin especificar	Margen activo
HA	3	0	15	0	0	4	3	25
HP	0	2	36	2	0	1	0	41
HPHR	0	0	1	0	0	0	0	1
HPFR	0	1	2	0	0	0	0	3
H-A	2	6	13	0	1	4	0	26
Margen activo	5	9	67	2	1	9	3	96

Perfiles de fila

Tipo_hormigón	Tipología_puente							
	Arco	Atirantado	De vigas	Lanzado	Suspendido	Varios puentes	Sin especificar	Margen activo
HA	,120	,000	,600	,000	,000	,160	,120	1,000
HP	,000	,049	,878	,049	,000	,024	,000	1,000
HPHR	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	1,000
HPFR	,000	,333	,667	,000	,000	,000	,000	1,000
H-A	,077	,231	,500	,000	,038	,154	,000	1,000
Masa	,052	,094	,698	,021	,010	,094	,031	

Perfiles de columna

Tipo_hormigón	Tipología_puente							
	Arco	Atirantado	De vigas	Lanzado	Suspendido	Varios puentes	Sin especificar	Masa
HA	,600	,000	,224	,000	,000	,444	1,000	,260
HP	,000	,222	,537	1,000	,000	,111	,000	,427
HPHR	,000	,000	,015	,000	,000	,000	,000	,010
HPFR	,000	,111	,030	,000	,000	,000	,000	,031
H-A	,400	,667	,194	,000	1,000	,444	,000	,271
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,450	,203			,518	,518	,066	,242
2	,419	,176			,449	,967	,076	
3	,107	,011			,029	,996		
4	,039	,002			,004	1,000		
Total		,392	37,621	,038 ^a	1,000	1,000		

a. 24 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,038, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 0,379 y queda explicada en un 51,8 % por la primera dimensión y un 44,9 % por la segunda, de manera que las dos primeras dimensiones explican el 96,7 %.

Del examen de los puntos de fila vemos que el tipo de hormigón más predominante es el hormigón pretensado (masa 0,427), siendo también este el tipo que más influye a la primera dimensión y la unión hormigón-acero (H-A) en la segunda.

Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que la tipología de puente más predominante es la de vigas (masa 0,698), y que los puentes arco es la tipología que más influye a la primera dimensión y los atirantados en la segunda

Examen de los puntos de fila^a

Tipo_hormigón	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
HA	,260	-,803	,748	,137	,373	,347	,553	,446	,998
HP	,427	,723	,187	,107	,495	,036	,939	,059	,998
HPHR	,010	,715	,377	,005	,012	,004	,531	,137	,669
HPFR	,031	,326	-1,036	,026	,007	,080	,058	,548	,606
H-A	,271	-,432	-,909	,118	,112	,534	,194	,798	,992
Total activo	1,000			,392	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

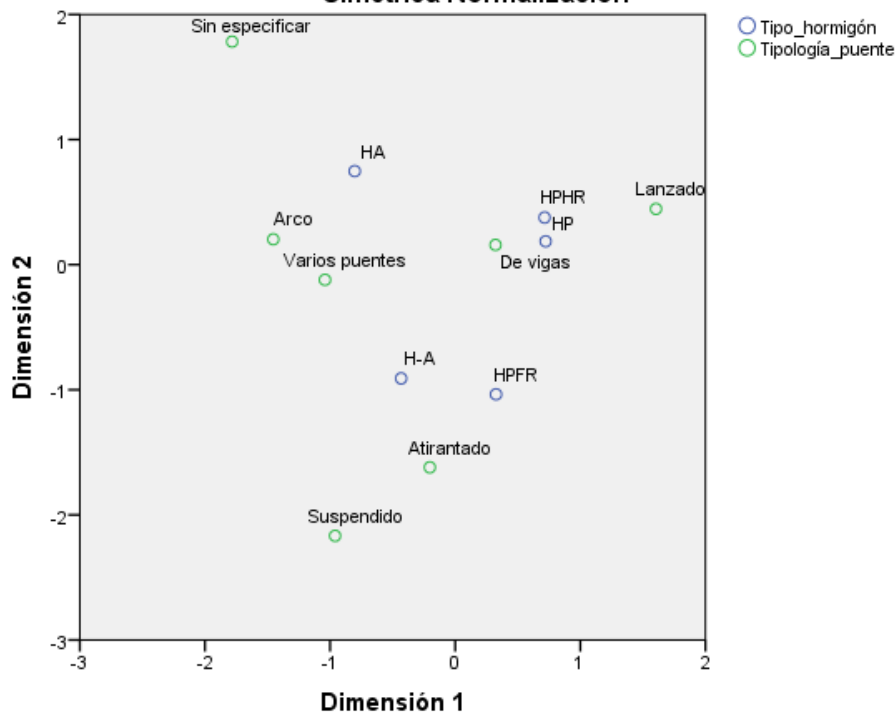
Examen de los puntos columna^a

Tipología_puente	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
Arco	,052	-1,454	,203	,051	,244	,005	,979	,018	,996
Atirantado	,094	-,203	-1,620	,108	,009	,587	,016	,956	,972
De vigas	,698	,322	,158	,040	,161	,042	,814	,182	,996
Lanzado	,021	1,604	,446	,028	,119	,010	,865	,062	,927
Suspendido	,010	-,960	-2,167	,028	,021	,117	,154	,732	,886
Varios puentes	,094	-1,041	-,121	,048	,226	,003	,945	,012	,957
Sin especificar	,031	-1,783	1,783	,089	,221	,237	,504	,470	,974
Total activo	1,000			,392	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Puntos de columna y de fila

Simétrica Normalización



Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- La tipología de puentes de vigas muestra el punto más cercano al origen, dando muestras de su mayor estudio. Además está cerca del hormigón pretensado, evidenciando la relación entre ambos a la hora de optimizar puentes de hormigón.
- Los puentes atirantados presentan un punto alejado del origen y levemente aislado. No obstante tiene una pequeña dependencia con la tipología de hormigón mixto con acero, ya que se encuentra por debajo de este y no a gran distancia.
- Los puentes suspendidos están muy aislados, al igual que los lanzados, estando cada uno en una especie de “cuadrante” del H-A y HP respectivamente. Esto muestra que se analizan de manera muy aislada y con una tipología de hormigón muy concreta.

16. Elemento optimizado - Tipo de hormigón

Tabla de correspondencias

Elemento_optimizado	Tipo_hormigón					
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A	Margen activo
AN	0	1	0	1	0	2
C/T	0	1	0	0	4	5
COJ	0	1	0	0	0	1
E	1	0	0	0	0	1
PP	0	0	0	0	1	1
P	5	1	0	0	0	6
PG	7	9	0	1	9	26
S	1	0	0	0	0	1
SUP	1	3	0	0	1	5
T	5	15	0	1	9	30
V	5	10	1	0	2	18
Margen activo	25	41	1	3	26	96

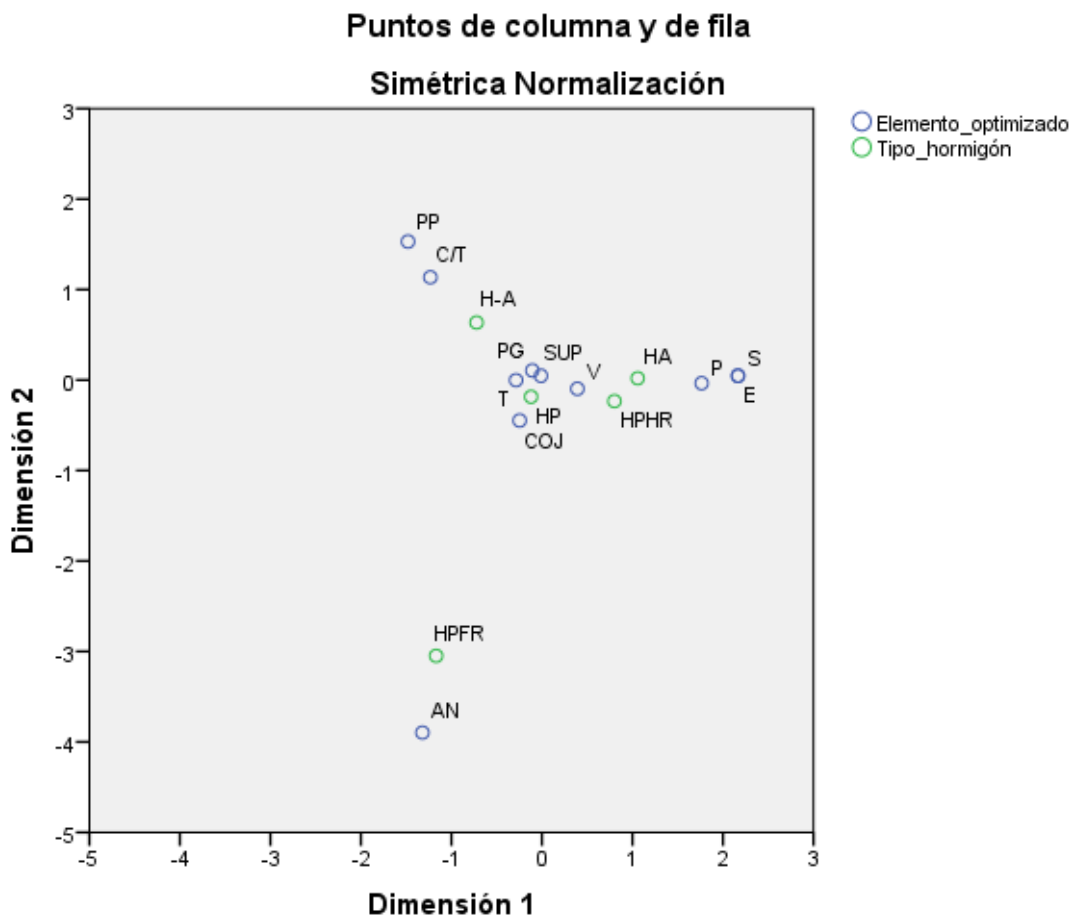
Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,488	,239			,433	,433	,071	,285
2	,415	,172			,313	,746	,198	
3	,337	,114			,207	,953		
4	,161	,026			,047	1,000		
Total		,550	52,837	,084 ^a	1,000	1,000		

a. 40 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,084, ligeramente superior a 0,05, con lo que no tiene sentido seguir con en análisis, ya que no existe dependencia entre las variables.

El gráfico de correspondencias evidencia de manera visual algunas de las conclusiones que se pueden extraer observando la tabla de datos de entrada, como que hay varios elementos que se optimizan en pocos trabajos o de manera aislada y que el HPFR se utiliza cuando se optimiza la zona de anclaje del postesado. También da constancia de que el HP, el HA y H-A son los tipos de hormigón más utilizados (están cerca del origen) y por el otro lado las vigas, los tableros y los puentes en general. Finalmente, vemos como los pilares están cerca de HA, ya que las pilas optimizadas se ejecutan con dicho material, y como los elementos que en su gran mayoría se optimizan para hormigón-acero mixto están por encima del punto H-A.



17. Tipo de tablero - Tipo de hormigón

Tabla de correspondencias

Tipología_tablero	Tipo_hormigón					
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A	Margen activo
AR	0	4	0	1	1	6
I	2	18	0	1	11	32
T	4	1	1	0	1	7
C	5	12	0	0	2	19
LH	0	1	0	0	0	1
LHA	1	0	0	0	0	1
RH	1	1	0	0	0	2
PI	0	1	0	0	0	1
VT	2	1	0	0	2	5
VL	1	0	0	1	3	5
V	3	5	0	0	2	10
DC	0	0	0	0	1	1
S	6	0	0	0	3	9
Margen activo	25	44	1	3	26	99

Perfiles de fila

Tipología_tablero	Tipo_hormigón					
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A	Margen activo
AR	,000	,667	,000	,167	,167	1,000
I	,063	,563	,000	,031	,344	1,000
T	,571	,143	,143	,000	,143	1,000
C	,263	,632	,000	,000	,105	1,000
LH	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
LHA	1,000	,000	,000	,000	,000	1,000
RH	,500	,500	,000	,000	,000	1,000
PI	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
VT	,400	,200	,000	,000	,400	1,000
VL	,200	,000	,000	,200	,600	1,000
V	,300	,500	,000	,000	,200	1,000
DC	,000	,000	,000	,000	1,000	1,000
S	,667	,000	,000	,000	,333	1,000
Masa	,253	,444	,010	,030	,263	

Perfiles de columna

Tipología_tablero	Tipo_hormigón					
	HA	HP	HPHR	HPFR	H-A	Masa
AR	,000	,091	,000	,333	,038	,061
I	,080	,409	,000	,333	,423	,323
T	,160	,023	1,000	,000	,038	,071
C	,200	,273	,000	,000	,077	,192
LH	,000	,023	,000	,000	,000	,010
LHA	,040	,000	,000	,000	,000	,010
RH	,040	,023	,000	,000	,000	,020
PI	,000	,023	,000	,000	,000	,010
VT	,080	,023	,000	,000	,077	,051
VL	,040	,000	,000	,333	,115	,051
V	,120	,114	,000	,000	,077	,101
DC	,000	,000	,000	,000	,038	,010
S	,240	,000	,000	,000	,115	,091
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,572	,327			,494	,494	,074	-,049
2	,423	,179			,270	,764	,081	
3	,318	,101			,152	,916		
4	,236	,056			,084	1,000		
Total		,663	65,607	,046 ^a	1,000	1,000		

a. 48 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,046, inferior a 0,05, con lo que tiene sentido seguir con en análisis.

En cuanto a la inercia total es 0,663 y queda explicada en un 49,4 % por la primera dimensión y un 27 % por la segunda, de manera que las dos primeras dimensiones explican el 76,4 %, faltando la tercera dimensión para alcanzar el 91,6 %.

Del examen de los puntos de fila vemos que la tipología de tablero más predominante es la de vigas en forma de I (masa 0,323), y que las vigas en forma de T es el tipo de tablero que más influye a la primera dimensión y los mixtos viga-losa en la segunda.

Por otra parte, del examen de los puntos de columna vemos que el tipo de hormigón más predominante es HP (masa 0,444), y que el hormigón armado (HA) es el tipo que más influye a la primera dimensión y el mixto Hormigón-acero (H-A) en la segunda.

Examen de los puntos de fila^a

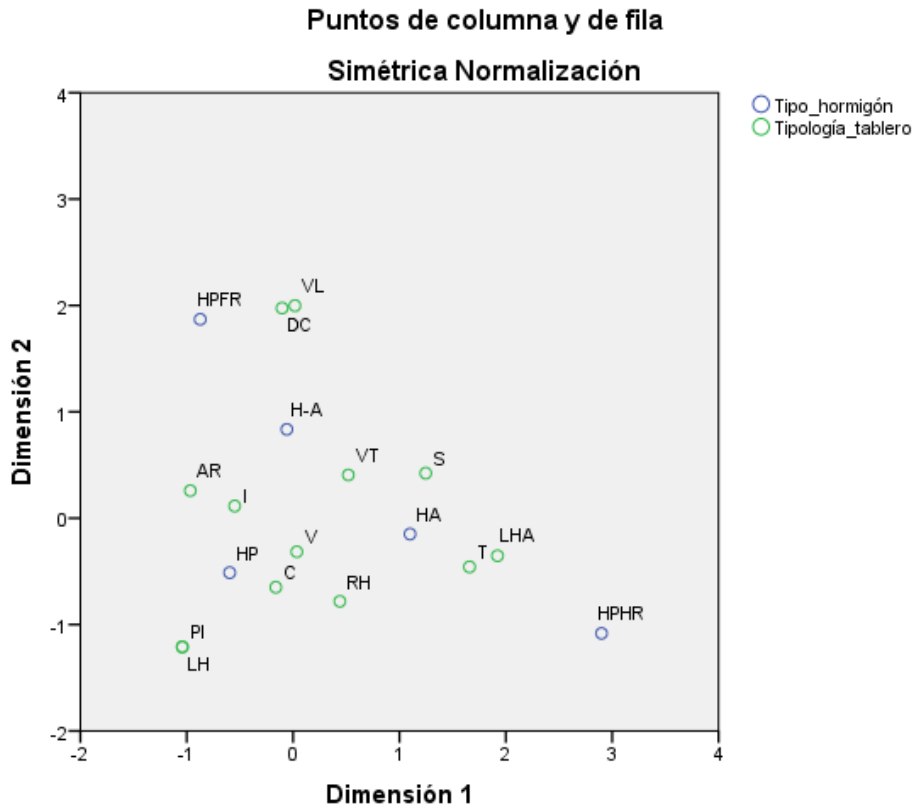
Tipología_tablero	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
AR	,061	-,966	,259	,062	,099	,010	,522	,028	,550
I	,323	-,549	,114	,068	,170	,010	,824	,026	,850
T	,071	1,659	-,458	,172	,340	,035	,646	,036	,682
C	,192	-,163	-,649	,041	,009	,191	,071	,833	,904
LH	,010	-1,042	-1,210	,013	,019	,035	,497	,495	,992
LHA	,010	1,922	-,353	,030	,065	,003	,714	,018	,732
RH	,020	,440	-,781	,011	,007	,029	,200	,467	,668
PI	,010	-1,042	-1,210	,013	,019	,035	,497	,495	,992
VT	,051	,519	,407	,017	,024	,020	,463	,210	,673
VL	,051	,017	1,998	,093	,000	,477	,000	,913	,914
V	,101	,035	-,316	,007	,000	,024	,010	,592	,602
DC	,010	-,103	1,975	,028	,000	,093	,002	,587	,590
S	,091	1,247	,423	,108	,247	,039	,752	,064	,816
Total activo	1,000			,663	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica

Examen de los puntos columna^a

Tipo_hormigón	Masa	Puntuación en la dimensión		Inercia	Contribución				
		1	2		De los puntos a la inercia de la dimensión		De la dimensión a la inercia del punto		
					1	2	1	2	Total
HA	,253	1,099	-,149	,193	,534	,013	,907	,012	,919
HP	,444	-,596	-,512	,140	,276	,275	,645	,352	,997
HPHR	,010	2,900	-1,082	,133	,148	,028	,366	,038	,404
HPFR	,030	-,873	1,870	,102	,040	,250	,129	,438	,567
H-A	,263	-,059	,835	,095	,002	,433	,006	,815	,820
Total activo	1,000			,663	1,000	1,000			

a. Normalización Simétrica



Finalmente, en el gráfico de correspondencias (diagrama de dispersión bi-espacial) se observan las siguientes características y conclusiones:

- El hormigón pretensado de altas resistencias (HPHR) se utiliza de manera muy aislada.
- Los tableros de vigas de doble cubierta (DC) y mixto viga-losa (VL) están muy cerca entre sí, y a su vez cerca del hormigón pretensado reforzado con fibras (HPRF). Este hecho indica que gran parte de los estudios para DC y VL se utiliza HPRF.
- Cerca de HA se encuentran las losas de HA, las vigas en T, los que están sin especificar.
- El tipo de hormigón pretensado se encuentra cerca del origen y rodeado por varios tipos de tablero, algunos más cercanos y otros un poco menos. Los que están cercanos evidencian el elevado uso de HP para este tipo de tableros, en cambio para los menos hay dos explicaciones, los que están por debajo del punto HP indican análisis aislados y los que están por encima o hacia la derecha indican que mayoritariamente el uso es de HP pero también de otro tipo de hormigón, como por ejemplo las vigas en artesa se optimizan con HP pero en algunas ocasiones con HPFR, o los tablero de vigas en forma de I que también se utilizan para tipos de hormigón H-A.

18. Tipo de resolución de la optimización - Elemento optimizado

Tabla de correspondencias

Tipo_resolucion	Elemento_optimizado											
	AN	C/T	COJ	E	PP	P	PG	S	SUP	T	V	Margen activo
AL	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	1	5
AND	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
AP	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	3
CC	1	1	0	0	0	0	2	0	0	2	3	9
CP	0	1	0	0	0	0	4	0	2	4	6	17
EVOP	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	3
HH	0	0	0	1	0	1	1	0	0	3	1	7
HS	1	1	1	0	0	5	13	0	2	10	3	36
MM	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	4
NLP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
NLPQL	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
S	0	2	0	0	1	0	1	0	0	2	3	9
Margen activo	2	5	1	1	1	6	24	1	6	30	19	96

Perfiles de fila

Tipo_resolucion	Elemento_optimizado											
	AN	C/T	COJ	E	PP	P	PG	S	SUP	T	V	Margen activo
AL	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,200	,000	,200	,400	,200	1,000
AND	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000	,000	1,000
AP	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,333	,000	,667	,000	1,000
CC	,111	,111	,000	,000	,000	,000	,222	,000	,000	,222	,333	1,000
CP	,000	,059	,000	,000	,000	,000	,235	,000	,118	,235	,353	1,000
EVOP	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,333	,667	,000	1,000
HH	,000	,000	,000	,143	,000	,143	,143	,000	,000	,429	,143	1,000
HS	,028	,028	,028	,000	,000	,139	,361	,000	,056	,278	,083	1,000
MM	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,250	,000	,000	,500	,250	1,000
NLP	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000	1,000
NLPQL	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	,000	1,000
S	,000	,222	,000	,000	,111	,000	,111	,000	,000	,222	,333	1,000
Masa	,021	,052	,010	,010	,010	,063	,250	,010	,063	,313	,198	

Perfiles de columna

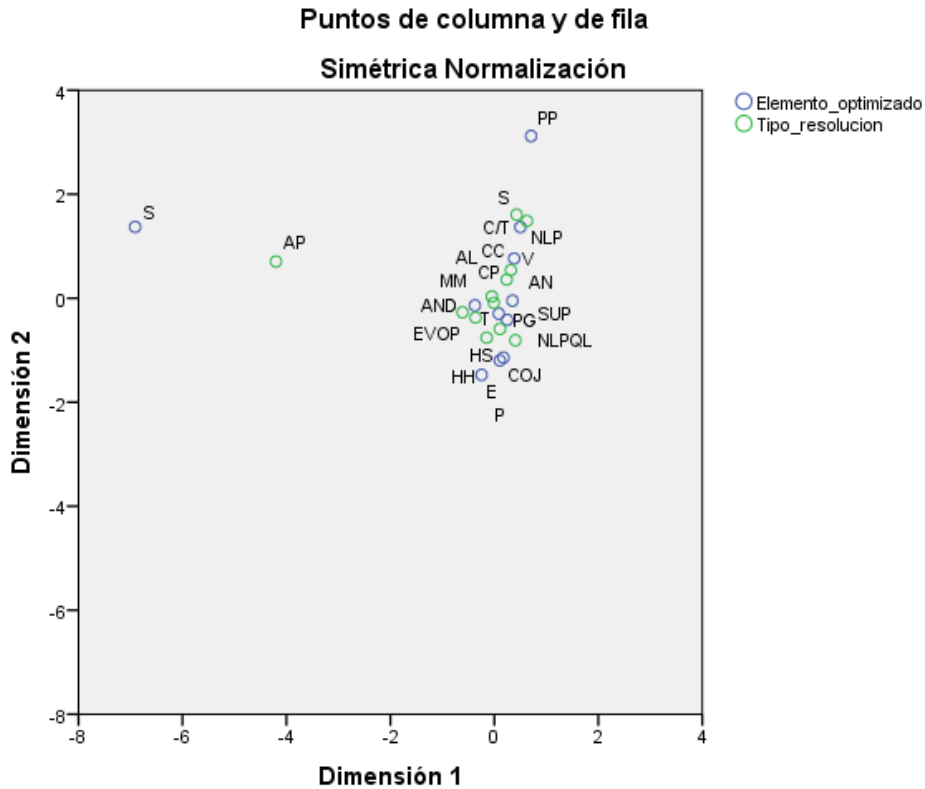
Tipo_resolucion n	Elemento_optimizado											
	AN	C/T	COJ	E	PP	P	PG	S	SUP	T	V	Mas a
AL	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,042	,000	,167	,067	,053	,052
AND	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,033	,000	,010
AP	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,00 0	,000	,067	,000	,031
CC	,500	,200	,000	,000	,000	,000	,083	,000	,000	,067	,158	,094
CP	,000	,200	,000	,000	,000	,000	,167	,000	,333	,133	,316	,177
EVOP	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,167	,067	,000	,031
HH	,000	,000	,000	1,00 0	,000	,167	,042	,000	,000	,100	,053	,073
HS	,500	,200	1,00 0	,000	,000	,833	,542	,000	,333	,333	,158	,375
MM	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,042	,000	,000	,067	,053	,042
NLP	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,053	,010
NLPQL	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,042	,000	,000	,000	,000	,010
S	,000	,400	,000	,000	1,00 0	,000	,042	,000	,000	,067	,158	,094
Margen activo	1,00 0	1,00 0	1,00 0	1,00 0	1,00 0	1,00 0	1,00 0	1,00 0	1,00 0	1,00 0	1,00 0	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación
								2
1	,608	,369			,331	,331	,183	,146
2	,515	,266			,238	,569	,081	
3	,396	,157			,140	,709		
4	,370	,137			,123	,832		
5	,303	,092			,082	,914		
6	,216	,046			,042	,956		
7	,159	,025			,023	,978		
8	,149	,022			,020	,998		
9	,045	,002			,002	1,000		
Total		1,116	107,121	,560 ^a	1,000	1,000		

a. 110 grados de libertad

Igualmente como en casos anteriores, se muestra el gráfico de correspondencias para evidenciar una nube de puntos sin dependencia entre las variables. Sí que se observa que las vigas los tableros, y los puentes en general se encuentran en el origen, siendo los elementos más optimizados, estando los dos últimos cercanos a las heurísticas simples (HS). También se observan casos aislados.



19. Tipo de heurística - Elemento optimizado

Tabla de correspondencias

Tipo_heurística	Elemento_optimizado											
	AN	C/T	COJ	E	P	PG	SUP	T	V	10	11	M. acti.
ACO	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	4
CS	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
LS	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	2
GA	0	1	1	0	3	15	2	6	2	0	0	30
HS	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2
ME	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2
PSO	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
RW	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	3
SA	0	0	0	1	2	0	0	4	1	0	0	8
TA	0	0	0	1	1	0	0	1	3	0	0	6
GSO	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Margen activo	1	1	1	2	11	16	2	18	9	0	0	61

Perfiles de fila

Tipo_heurística	Elemento_optimizado											
	AN	C/T	COJ	E	P	PG	SUP	T	V	10	11	Margen activo
ACO	,000	,000	,000	,000	,750	,000	,000	,250	,000	,000	,000	1,000
CS	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
LS	,000	,000	,000	,000	,500	,000	,000	,000	,500	,000	,000	1,000
GA	,000	,033	,033	,000	,100	,500	,067	,200	,067	,000	,000	1,000
HS	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,500	,000	,000	1,000
ME	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
PSO	,000	,000	,000	,000	,000	,500	,000	,500	,000	,000	,000	1,000
RW	,333	,000	,000	,000	,333	,000	,000	,000	,333	,000	,000	1,000
SA	,000	,000	,000	,125	,250	,000	,000	,500	,125	,000	,000	1,000
TA	,000	,000	,000	,167	,167	,000	,000	,167	,500	,000	,000	1,000
GSO	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	1,000	,000	,000	,000	1,000
Masa	,016	,016	,016	,033	,180	,262	,033	,295	,148	,000	,000	

Perfiles de columna

Tipo_heurística	Elemento_optimizado											
	AN	C/T	COJ	E	P	PG	SUP	T	V	10	11	Masa
ACO	,000	,000	,000	,000	,273	,000	,000	,056	,000	,000	,000	,066
CS	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,056	,000	,000	,000	,016
LS	,000	,000	,000	,000	,091	,000	,000	,000	,111	,000	,000	,033
GA	,000	1,000	1,000	,000	,273	,938	1,000	,333	,222	,000	,000	,492
HS	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,056	,111	,000	,000	,033
ME	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,111	,000	,000	,000	,033
PSO	,000	,000	,000	,000	,000	,063	,000	,056	,000	,000	,000	,033
RW	1,000	,000	,000	,000	,091	,000	,000	,000	,111	,000	,000	,049
SA	,000	,000	,000	,500	,182	,000	,000	,222	,111	,000	,000	,131
TA	,000	,000	,000	,500	,091	,000	,000	,056	,333	,000	,000	,098
GSO	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,056	,000	,000	,000	,016
Margen activo	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	,000	,000	

Resumen

Dimensión	Valor propio	Inercia	Chi-cuadrado	Sig.	Proporción de inercia		Confianza para el Valor propio	
					Explicada	Acumulada	Desviación típica	Correlación 2
1	,719	,517			,397	,397	,068	,432
2	,586	,344			,264	,660	,113	
3	,452	,205			,157	,817		
4	,428	,184			,141	,958		
5	,219	,048			,037	,995		
6	,079	,006			,005	1,000		
Total		1,303	79,477	,935 ^a	1,000	1,000		

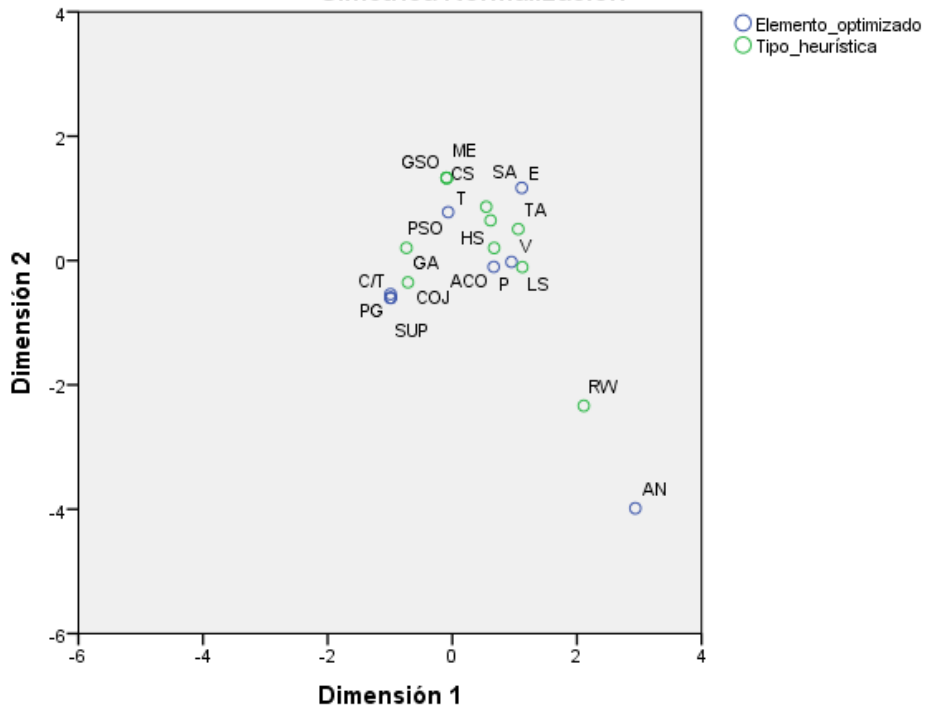
a. 100 grados de libertad

La prueba Chi-cuadrado muestra un grado de significación de 0,935, superior a 0,05, con lo que no tiene sentido seguir con en análisis, ya que no existe dependencia entre las variables.

En el gráfico de correspondencias se observa una nube de puntos alrededor del origen, lo que indica que no hay dependencia entre tipos de heurísticas y elementos optimizados. No obstante, de los datos de entrada queda claro que para puentes en general los algoritmos genéticos abarcan casi todos los casos, y que, por otra parte, en las pilas, vigas y tableros se prueban diversos tipos de heurísticas simples, y en algunos casos híbridas. Parece claro que, salvo en el caso PG-GA no hay una relación de dependencia clara.

Puntos de columna y de fila

Simétrica Normalización



CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

El trabajo presenta un análisis cualitativo y los resultados de un estudio bibliográfico y de diversos análisis de correspondencias entre parejas de variables extraídas de los artículos publicados en revistas de primer nivel internacional que tratan la optimización de puentes de hormigón. De esta manera, se establecen las siguientes conclusiones:

1. La optimización de puentes de hormigón se inicia en los años 60 evolucionando de menos a más a lo largo de las décadas y hasta la actualidad, en número de investigaciones y de grupos de investigación, de artículos publicados, de variables del problema, en tipos de puentes y elementos optimizados y en dificultad de resolución.
2. La tipología de puentes de hormigón más estudiada y optimizada es la de vigas, siendo esta analizada en su gran mayoría por métodos matemáticos y heurísticos, resolviéndose en una primera etapa de manera más sencilla y con el desarrollo de la tecnología con métodos más complejos.
3. El mantenimiento de los puentes de hormigón y de los puentes mixtos hormigón-acero toman gran importancia a partir de la de los años 90, fundamentalmente en EEUU y plasmándose en forma de artículos a partir de la segunda mitad de dicha década, debido a la gran red de puentes envejecidos y a unos presupuestos limitados en el ámbito de mantenimiento de puentes.
4. EEUU es el país que más publicaciones desarrolla en el área de la optimización de puentes de hormigón, siendo aproximadamente la mitad de ellos, para la optimización en fase de mantenimiento. Le sigue España, sobre todo por el grupo de Valencia, pero centrándose en la fase de diseño (en la actualidad están iniciando con el mantenimiento).
5. A partir del año 2009-2010 se produce un salto cuantitativo enorme en publicaciones de artículos en cuanto a la optimización de puentes de hormigón, pero sobre todo en la fase de diseño, ya que la fase de mantenimiento sigue con un crecimiento constante, similar al que tenía desde finales de los años 90.

6. La optimización de la fase constructiva de puentes apenas se ha estudiado y en un caso muy concreto, la optimización de puentes empujado o lanzados.
7. Los hormigones pretensados son los más utilizados en la optimización de puentes de hormigón a lo largo de la historia, en general para la fase de diseño de tableros, vigas y puentes en general. Los hormigones armados, además de los elementos anteriores (en menos ocasiones), también optimizan otros elementos del puente como son pilas, soportes, estribos, superestructuras y losas. Finalmente las secciones mixtas hormigón-acero aparecen en la optimización del mantenimiento de puentes y redes de puentes.
8. Los hormigones especiales no tienen apenas representación en la optimización de puentes. Se estudian de manera aislada unas vigas con hormigones de alta resistencia a finales de los 90 y más recientemente se han añadido las fibras en los hormigones pretensados.
9. Los puentes atirantados, generalmente presentan tableros mixtos de hormigón y acero, optimizándose los tirantes.
10. Las pilas de puentes que se optimizan generalmente se lleva a cabo con técnicas heurísticas y para hormigón armado.
11. Los algoritmos genéticos son la heurística más comúnmente utilizada, tanto en la optimización del mantenimiento de los puentes de hormigón y mixtos, como en la fase de diseño, a lo largo de los años. No obstante, en esta última fase, a partir de aproximadamente 2008 se presentan trabajos con otros tipos de heurísticas.
12. El desarrollo de los métodos de resolución (nuevas heurísticas, elementos finitos, etc) han permitido que en los último 5-6 años se hayan desarrollado investigaciones de tipologías de puentes diferentes a las de vigas, como son puentes arco, puentes atirantados (estudiados de manera aislada en la década de los 90), puentes empujados o puentes suspendidos.
13. Para casos muy específicos y con una gran dificultad de modelización en fórmulas, los elementos finitos ganan importancia. Por ejemplo para optimizar zonas de anclajes postesados, cojinetes de apoyo entre tablero y pilas, cables de puentes atirantados y soportes en forma de láminas en puentes arco.
14. En la última década y más concretamente los últimos 6-7 años muestran un gran aumento de investigaciones en cuanto a la optimización de puentes de hormigón se refiere. Desde 1966 hasta el año 2010 se publican el 50 % de los artículos y desde 2010 a la actualidad el resto.
15. La tipología de tablero que más ha crecido en los últimos 5 años, sin contar los históricamente estudiados de vigas en I y en cajón, ha sido el de vigas en artesa.
16. Entre el 80-90 % de las optimizaciones de puentes de hormigón publicadas en revistas son para puentes de carretera, analizándose en pequeñas ocasiones puentes peatonales y para vías de tren.
17. El coste es la función objetivo más utilizada históricamente, tanto en fase de diseño como de mantenimiento, y está presente como tal en el 55 % de las publicaciones, además de en otras tantas de manera indirecta mediante el peso, el volumen de hormigón, separación de vigas, etc.

18. En la última década han aumentado las publicaciones que presentan optimizaciones multiobjetivo y nuevos objetivos como, por ejemplo, emisiones de CO₂, la sostenibilidad, tensiones, desplazamientos, deflexiones, etc.
19. Las funciones objetivo que dependen de variables de difícil medición y en las que intervienen numerosos parámetros (emisiones CO₂, sostenibilidad, tensiones en tableros, seguridad, deflexiones, desplazamientos) guardan relación con el desarrollo de los métodos de resolución, como son las heurísticas y los elementos finitos. En cambio, para funciones más sencillas de medir o más conocidas (anclaje, estética, tensiones del cable de atirantado, tensiones de tesado) se utilizan los métodos matemáticos.
20. En los últimos años, se están introduciendo nuevas acciones que afectan al puente como son terremotos, tsunamis, oleaje, socavaciones, cargas de transporte, etc, tanto para la fase de diseño como para la de mantenimiento.

5.2. FUTUROS CAMPOS DE INVESTIGACIÓN

Los futuros campos de investigación, en relación a los análisis que se han llevado a cabo en la presente tesina y sobre todo en el análisis de correspondencias, podrían ser los siguientes:

1. Estudio de optimización de puentes con hormigones especiales.
2. Optimización de la fase constructiva de puentes de hormigón.
3. Analizar puentes de hormigón para usos diferentes al de carretera.
4. Optimizar tipologías de puentes diferentes a los de vigas o tipologías de tableros diferentes a los de vigas en I o en cajón, como por ejemplo ha realizado el grupo de Valencia con las vigas en artesa o recientemente puentes arco en Italia.
5. Optimización de puentes atirantados con tableros y pilas de hormigón.
6. Como algunos grupos ya han iniciado, optimizar la sostenibilidad del puente en el tiempo, en emisiones, en energía, etc.
7. Introducir cada vez más, acciones y fenómenos más inesperadas en las restricciones del problema de optimización.
8. Continuar con la búsqueda de métodos de resolución del problema de optimización más potentes que permitan mínimo coste computacional y de tiempo.

REFERENCIAS

- [1] G. G. B. Torres, J. F. Brotchie, and C. A. Cornell, "A Program for the Optimum Design of Prestressed Concrete Highway Bridges," *PCI J.*, vol. 10, no. June, pp. 63–71, 1966.
- [2] J. V. Martí Albiñana, "Diseño óptimo de tableros isostáticos de vigas artesas prefabricadas pretensadas," in *Tesis Doctoral*, 2010, p. 284.
- [3] V. Yepes Piqueras, "Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW," in *Tesis Doctoral*, 2002, p. 352.
- [4] V. Yepes, T. García-Segura, and J. M. Moreno-Jiménez, "A cognitive approach for the multi-objective optimization of RC structural problems," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 15, pp. 1024–1036, 2015.
- [5] C. Torres-Machi, V. Yepes, A. Chamorro, and E. Pellicer, "Current models and practices of economic and environmental evaluation for sustainable network-level pavement management," *Rev. la Constr.*, vol. 13, no. 2, pp. 49–56, 2014.
- [6] C. Torres-Machi, A. Chamorro, C. Videla, E. Pellicer, and V. Yepes, "An Iterative Approach for the Optimization of Pavement Maintenance Management at the Network Level - ProQuest," *Hindawi Publ. Corp. Sci. World J. Artic.*, vol. Volume 201, p. 11, 2014.
- [7] E. Pellicer, C. L. Correa, V. Yepes, and L. F. Alarcón, "Organizational Improvement Through Standardization of the Innovation Process in Construction Firms.," *Eng. Manag. J.*, vol. 24, no. 2, pp. 40–53, 2012.
- [8] T. García-Segura, V. Yepes, and J. Alcalá, "Life cycle greenhouse gas emissions of blended cement concrete including carbonation and durability," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 19, no. 1, pp. 3–12, 2014.
- [9] Galileo Galilei, *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a due nuove scienze attenenti alla meccanica i movimenti locali*. 1638.

- [10] C. Maxwell 1869, *Scientific Papers*, vol. 2. New York: Dover Publications, 1952, pp. 175–177.
- [11] M. . Levy, *La statique graphique et sus applications aux constructions*, Gauthier-V. Paris, 1874.
- [12] A. G. M. Mitchell, “The limits of Economy of Material in France Structures,” *Philos. Mag.*, vol. 47, no. 6, pp. 589–597, 1904.
- [13] F. N. Martínez, “Una metodología general para optimización estructural en diseño asistido por ordenador,” in *Tesis Doctoral*, 1987.
- [14] B. Klein, “Direct use of extremal principles in solving certain optimization problems involving inequalities,” *J. Oper. Res. Soc. Am.*, vol. 3, pp. 168–175, 1955.
- [15] L. A. Schmidt, “Structural design by systematic synthesis,” in *2nd Conference on Electronic Computation, ASCE*, 2012, pp. 105–132, New York (EEUU).
- [16] W. Karush, “Minima of Functions of Several Variables with inequalities as Side Constrains.” Dept. of Mathematics, Univ. of Colorado, Chicago, Illinois, 1939.
- [17] H. W. Kuhn and A. W. Tucker, “Nonlinear Programming,” in *Proceedings of 2nd Berkeley Symposium*, 1951.
- [18] K. C. Sarma and H. Adeli, “COST OPTIMIZATION OF CONCRETE STRUCTURES,” *J. Struct. Eng.*, vol. 124, no. 5, pp. 570–578, 1998.
- [19] J. Moragues, “Diseño óptimo de estructuras aperticadas de hormigón aramado,” *Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Valencia, 1980.
- [20] V. Yepes, J. Alcala, C. Perea, and F. González-Vidosa, “A parametric study of optimum earth-retaining walls by simulated annealing,” *Eng. Struct.*, vol. 30, pp. 821–830, 2008.
- [21] M. Saxena, S. P. Sharma, and C. Mohan, “Cost Optimization of Intze Tanks on Shafts Using Nonlinear Programming,” *Eng. Optim.*, vol. 10, no. 4, pp. 279–288, 1987.
- [22] G. H. Tan, V. Thevendran, N. C. Das Gupta, and D. P. Thambiratnam, “Design of reinforced concrete cylindrical water tanks for minimum material cost,” *Comput. Struct.*, vol. 48, no. 5, pp. 803–810, 1993.
- [23] A. Carbonell, V. Yepes, and F. González-Vidosa, “Heuristic optimization of reinforced concrete road vault underpasses,” in *Proceeding Sixth International Conference on Engineering Computational Technology*, 2008, pp. 2–5, Athens (Greece).
- [24] a. Carbonell, V. Yepes, and F. González-Vidosa, “Búsqueda exhaustiva por entornos aplicada al diseño económico de bóvedas de hormigón armado,” *Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing.*, vol. 27, no. 3, pp. 227–235, 2011.
- [25] A. Surahman and K. B. Rojiani, “Reliability Based Optimum Design of Concrete Frames,” *J. Struct. Eng.*, vol. 109, no. 3, pp. 741–757, 1983.
- [26] R. J. Balling and X. Yao, “Optimization of Reinforced Concrete Frames,” *J. Struct. Eng.*, vol. 123, no. February, pp. 193–202, 1997.

- [27] I. Payá, V. Yepes, J. J. Clemente, and F. González-Vidosa, "Optimización heurística de pórticos de edificación de hormigón armado," *Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing.*, vol. 22, no. 3, pp. 241–259, 2006.
- [28] I. Paya, V. Yepes, F. González-Vidosa, and A. Hospitaler, "Multiobjective optimization of concrete frames by simulated annealing," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 23, pp. 596–610, 2008.
- [29] I. Paya-Zaforteza, V. Yepes, A. Hospitaler, and F. González-Vidosa, "CO₂-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing," *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 7, pp. 1501–1508, 2009.
- [30] I. Paya-Zaforteza, V. Yepes, F. González-Vidosa, and A. Hospitaler, "On the Weibull cost estimation of building frames designed by simulated annealing," *Meccanica*, vol. 45, no. 5, pp. 693–704, 2010.
- [31] C. a. Coello Coello, a. D. Christiansen, and F. S. Hernández, "A simple genetic algorithm for the design of reinforced concrete beams," *Eng. Comput.*, vol. 13, pp. 185–196, 1997.
- [32] T. García-Segura, V. Yepes, J. V. Martí, and J. Alcalá, "Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm," *Lat. Am. J. Solids Struct.*, vol. 11, pp. 1190–1205, 2014.
- [33] P. Mendis, S. Nicholls, and C. Duffield, "Optimum Use of High Performance Concrete in Prestressed Concrete Super-T Bridge Beams," *PCI J.*, vol. 44, no. May-June, pp. 56–65, 2000.
- [34] J. J. Arenas and L. Villegas, "Análisis en teoría de segundo orden de las pilas del viaducto de Cruzul," *Hormigón y Acero I*, vol. 171, pp. 35–55, 1989.
- [35] H. Paul, N. C. Das Gupta, and C. H. Yu, "A Geometric Programming Method for Cost-Optimal Design of a Modular Floor System," *Eng. Optim.*, vol. 16, no. 3, pp. 205–220, 1990.
- [36] M. S. Gasch, "Optimización de estructuras de forjados reticulares," in *Tesis Doctoral*, 1991.
- [37] A. L. Ivars, "Diseño óptimo de estribos abiertos de hormigón armado en puentes de carretera mediante optimización huerística," in *Tesis Doctoral*, 2015, p. 336.
- [38] F. Erbatur, R. A. Zaid, and N. a. Dahman, "Optimization and sensitivity of prestressed concrete beams," *Comput. Struct.*, vol. 45, no. 5–6, pp. 881–886, 1992.
- [39] M. Z. Cohn and Z. Lounis, "Optimum Limit Design of Continuous Prestressed Concrete Beams," *J. Struct. Eng.*, vol. 119, no. 12, pp. 3551–3570, 1993.
- [40] A. S. Al-Gahtani, S. S. Al-Saadoun, and E. A. Abul-Feilat, "Design Optimization of Continuous Partially Prestressed Concrete Beams," *Comput. Struct.*, vol. 55, no. 2, pp. 365–370, 1995.
- [41] O. J. Koskisto and B. R. Ellingwood, "Reliability-based optimization of plant precast concrete structures," *J. Struct. Eng.*, vol. 123, no. 3, pp. 298–304, 1997.

- [42] A. Templeman, "Optimum design of concrete cellular spine beam bridge decks," *Inst. Civ. Eng. PART 2. Res. theory*, vol. 67, no. June, pp. 389–409, 1979.
- [43] B. G. Rabbat and H. G. Russell, "Optimized Sections for Precast Prestressed Bridge Girders," *PCI J.*, vol. 26, no. July-August, pp. 88–104, 1982.
- [44] H. L. Jones, "Minimum Cost Prestressed Concrete Beam Design," *J. Struct. Eng.*, vol. 111, no. 11, pp. 2464–2478, 1985.
- [45] C. H. YU, N. C. DAS GUPTA, and H. PAUL, "Optimization of Prestressed Concrete Bridge Girders," *Eng. Optim.*, vol. 10, no. 1, pp. 13–24, 1986.
- [46] B. S. Dhillon, Fellow, ASCE, and C.-H. Kuo, "Optimum Design of Composite Hybrid Plate Girders," *J. Struct. Eng.*, vol. 117, no. July, pp. 2088–2098, 1991.
- [47] W. M. Jenkins, "Plane Frame Optimum Design Environment Based on Genetic Algorithm," *J. Struct. Eng.*, vol. 118, no. November, pp. 3103–3112, 1992.
- [48] Z. Lounis and M. Z. Cohn, "Optimization of Precast Prestressed Concrete Bridge Girder Systems," *PCI J.*, vol. 37, no. July-August, pp. 61–78, 1993.
- [49] Z. Lounis and M. Z. Cohn, "Multiobjective Optimization of Prestressed Concrete Structures," *J. Struct. Eng.*, vol. 119, no. 3, pp. 794–808, 1993.
- [50] J. Koski, "Multiobjective optimization is structural design," in *New directions in optimum structural design*, Atrek et al., eds, J. Wiley and Sons, 1984, pp. 483–503, New York (EEUU).
- [51] H. Eschenauer, J. Koski, and A. Osyczka, *Multicriteria design optimization*. Berlin, Germany, 1990.
- [52] K. L. Geren and M. K. Tadros, "The NU Precast Prestressed Concrete Bridge I-Girder Series," *PCI J.*, vol. 38, no. May-June, pp. 26–39, 1994.
- [53] S. Fereig, "Economic preliminary design of bridges with prestressed I-girders," *J. Bridg. Eng.*, vol. 1, no. February, pp. 18–25, 1996.
- [54] M. Z. Cohn and Z. Lounis, "Optimal Design of Structural Concrete Bridge Systems," *J. Struct. Eng.*, vol. 120, no. September, pp. 2653–2674, 1994.
- [55] Z. Lounis and C. M.Z., "Computer-Aided Design of prestressed Concrete Cellular Bridge Decks," *Microcomput. Civ. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–11, 1995.
- [56] a. Kasuga, H. Arai, J. E. Breen, and K. Furukawa, "Optimum Cable-Force Adjustments in Concrete Cable-Stayed Bridges," *J. Struct. Eng.*, vol. 121, no. April, p. 685, 1995.
- [57] Z. Lounis, M. S. Mirza, and M. Z. Cohn, "Segmental and Conventional Precast Prestressed Concrete I-Bridge Girders," *J. Struct. Eng.*, vol. 2, no. August, pp. 73–82, 1997.
- [58] S. Ohkubo, P. B. R. Dissanayake, and K. Taniwaki, "An approach to multicriteria fuzzy optimization of a prestressed concrete bridge system considering cost and aesthetic feeling," *Struct. Optim.*, vol. 15, pp. 132–140, 1998.

- [59] M. A. Hassanain and R. E. Loov, "Design of Prestressed Girder Bridges Using High Performance Concrete - An Optimization Approach," *PCI J.*, vol. 43, no. March-April, pp. 40–55, 1999.
- [60] M. J. Zhongguo, M. A. Saleh, and M. K. Tadros, "Optimized Post-Tensioning Anchorage in Prestressed Concrete I-Beam," *PCI J.*, vol. 33, no. March-April, pp. 56–73, 1999.
- [61] A. Aswad, B. Djazmati, and G. G. Aswad, "Optimal Sizing of Prestressed Bridge Superstructures in Pennsylvania by LRFD," *PCI J.*, vol. 46, no. January-February, pp. 26–37, 2002.
- [62] S.-K. Cho, S.-G. Youn, and Y.-H. Park, "Optimization of Prestressed Concrete Girders for Standard Sections," *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, vol. 24, no. 4A, pp. 853–859, 2004.
- [63] G. F. Sirca and H. Adeli, "Cost Optimization of Prestressed Concrete Bridges," *J. Struct. Eng.*, vol. 131, no. 3, pp. 380–388, 2005.
- [64] K.-W. Kim and M.-H. Park, "Optimum Design of LB-DECK Plate Girder Bridge," *J. Korea Inst. Struct. Maint. Insp.*, vol. 12, no. 1, pp. 135–142, 2008.
- [65] C. Perea, J. Alcalá, V. Yepes, F. González-Vidosa, and A. Hospitaler, "Design of reinforced concrete bridge frames by heuristic optimization," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 39, pp. 676–688, 2008.
- [66] C. Perea, J. Alcalá, and F. González-Vidosa, "Optimización por cristalización simulada de marcos de carretera de hormigón armado," in *III Congreso de ACHE de puentes y estructuras*, 2005, pp. 719–728, Zaragoza (Spain).
- [67] C. P. de Dios, "Optimización heurística de marcos de carretera de hormigón armado," in *Tesis Doctoral*, 2006, p. 107.
- [68] C. P. de Dios, J. Alcalá, V. Yepes, and F. González-Vidosa, "Optimum design of the box frame tunnel of the Underground Line Palma - UIB," in *X International Conference on Project Engineering*, 2006, pp. 12–15, Valencia (Spain).
- [69] V. Yepes, J. Alcalá, C. Perea, and F. González-Vidosa, "A parametric study of optimum earth retaining walls by simulated annealing," *Aceptado Eng. Struct.*, no. Mayo, 2007.
- [70] Carrera, J. Alcalá, V. Yepes, and F. González-Vidosa, "Optimización heurística de pórticos de paso de carretera de hormigón armado," *Hormigón y Acero*, vol. 236, no. abril-junio, pp. 85–95, 2005.
- [71] J. Alcalá, Carrera, F. González-Vidosa, and V. Yepes, "Cristalización simulada aplicada a la optimización económica de muros ménsula de contención de hormigón armado," *Hormigón y Acero*, vol. 236, no. abril-junio, pp. 97–108, 2005.
- [72] A. C. Lombardero, "Optimización heurística de bóvedas de paso de carretera," in *Tesis Doctoral*, 2005, p. 306.
- [73] A. Carbonell, J. Alcalá, F. González-Vidosa, and V. Yepes, "Optimización heurística de bóvedas de hormigón armado para pasos de carretera," *Ing. Civ.*, vol. 145, pp. 79–88, 2007.

- [74] F. J. Martínez, V. Yepes, A. Hospitaler, and F. González-Vidosa, “Ant colony optimization of reinforced concrete bridge piers of rectangular hollow section,” in *Proceeding of the Ninth International Conference on the Application of Artificial Intelligence to Civil, Structural and Environmental Engineering*, 2007, pp. 18–21, St. Julians (Malta).
- [75] M. Marzouk, H. Said, and M. El-said, “Framework for Multiobjective Optimization of Launching Girder Bridges,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 135, no. August, pp. 791–800, 2009.
- [76] C. Liu and A. Hammad, “Maintenance strategy optimization of bridge decks using genetic algorithm,” *J. Transp.*, vol. 123, no. 2, pp. 91–100, 1997.
- [77] D. M. Frangopol, K.-Y. Lin, and Estes A.C., “Life-cycle cost design of deteriorating structures,” *J. Struct. Eng.*, vol. 123, no. 10, pp. 1390–1401, 1997.
- [78] C. Liu and A. Hammad, “Multiobjective Optimization of Bridge Deck Rehabilitation Using Genetic Algorithm,” *Microcomput. Civ. Eng.*, vol. 12, pp. 431–443, 1997.
- [79] H. Morikawa, S. Ohyama, K. Katayama, and A. Miyamoto, “Optimum maintenance of existing concrete bridges based on multi-attribute utility approach,” *Struct. Saf. Reliab.*, pp. 451–458, 1998.
- [80] M. P. Enright and D. M. Frangopol, “Maintenance Planning for Deteriorating Concrete Bridges,” *J. Struct. Eng.*, vol. 125, no. December, pp. 1407–1414, 1999.
- [81] D. M. Frangopol, M. P. Enright, and A. C. Estes, “Integration of Maintenance, Repair, and Replacement Decisions in Bridge Management Based on Reliability, Optimization, and Life-Cycle Cost,” *Present. from 8th Int. Bridg. Manag. Conf. Denver, Colo. 1999*, vol. 498, pp. 1–13, 1999.
- [82] A. Miyamoto, K. Kawamura, and H. Nakamura, “Bridge Management System and Maintenance Optimization for Existing Bridges,” *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 15, pp. 45–55, 2000.
- [83] A. C. Estes and D. M. Frangopol, “Minimum expected cost-oriented optimal maintenance planning for deteriorating structures: Application to concrete bridge decks,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 73, no. 3, pp. 281–291, 2001.
- [84] G. Morcou, Z. Lounis, and M. Mirza, “Identification of environmental categories for Markovian deterioration models of bridge decks,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 8, no. 6, pp. 353–361, 2003.
- [85] M. Liu and D. M. Frangopol, “Optimizing Bridge Network Maintenance Management under Uncertainty with Conflicting Criteria: Life-Cycle Maintenance, Failure, and User Costs,” *J. Struct. Eng.*, vol. 132, no. November, pp. 1835–1845, 2006.
- [86] L. A. C. Neves, D. M. Frangopol, and P. J. S. Cruz, “Probabilistic Lifetime-Oriented Multiobjective Optimization of Bridge Maintenance: Single Maintenance Type,” *J. Struct. Eng.*, vol. 132, no. June, pp. 991–1005, 2006.
- [87] D. M. Frangopol and M. Liu, “Bridge Network Maintenance Optimization Using Stochastic Dynamic Programming,” *J. Struct. Eng.*, vol. 133, no. December, pp. 1772–1782, 2007.

- [88] P. S. Marsh and D. M. Frangopol, "Lifetime Multiobjective Optimization of Cost and Spacing of Corrosion Rate Sensors Embedded in a Deteriorating Reinforced Concrete Bridge Deck," *J. Struct. Eng.*, vol. 133, no. June, pp. 777–787, 2007.
- [89] C.-K. Lee and S.-K. Kim, "GA-based algorithm for selecting optimal repair and rehabilitation methods for reinforced concrete (RC) bridge decks," *Autom. Constr.*, vol. 16, no. 3, pp. 153–164, 2007.
- [90] H.-M. Koh, W. Park, and H.-J. Kim, "Maintenance Planning for Deteriorating Bridge using Preference- based Optimization Method," *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 2A, pp. 223–231, 2008.
- [91] S. Hernandez, a. N. Fontan, J. Diaz, and D. Marcos, "VTOP. An improved software for design optimization of prestressed concrete beams," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 41, no. 3, pp. 415–421, 2010.
- [92] Z. Aydin and Y. Ayvaz, "Optimum topology and shape design of prestressed concrete bridge girders using a genetic algorithm," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 41, pp. 151–162, 2010.
- [93] R. Ahsan, S. Rana, and S. N. Ghani, "Cost Optimum Design of Posttensioned I-Girder Bridge Using Global Optimization Algorithm," *J. Struct. Eng.*, vol. 138, no. 2, pp. 273–284, 2012.
- [94] R. Al-Rousan, R. H. Haddad, and A. A. H. Mutaz, "Optimization of economic practicability of fiber-reinforced polymer (FRP) cable-stayed bridge decks," *Bridg. Struct.*, vol. 10, no. January, pp. 129–143, 2014.
- [95] H. Cai and A. J. Aref, "A genetic algorithm-based multi-objective optimization for hybrid fiber reinforced polymeric deck and cable system of cable-stayed bridges," *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 52, no. May, pp. 583–594, 2015.
- [96] F. J. Martinez, F. Gonzalez-Vidoso, A. Hospitaler, and V. Yepes, "Heuristic optimization of RC bridge piers with rectangular hollow sections," *Comput. Struct.*, vol. 88, pp. 375–386, 2010.
- [97] F. J. Martínez, F. González-Vidoso, A. Hospitaler, and J. Alcalá, "Design of tall bridge piers by ant colony optimization," *Eng. Struct.*, vol. 33, no. May, pp. 2320–2329, 2011.
- [98] F. J. Martinez-Martin, F. Gonzalez-Vidoso, a Hospitaler, and V. Yepes, "Multi-objective optimization design of bridge piers with hybrid heuristic algorithms," *J. Zhejiang Univ. Sci. A*, vol. 13, no. 6, pp. 420–432, 2012.
- [99] F. J. Martínez, F. González-Vidoso, A. Hospitaler, and V. Yepes, "A parametric study of piers for motorway bridge viaducts," *Struct. Eng. Meh.*, vol. 45, no. 6, pp. 723–740, 2013.
- [100] Y.-C. Sung and C.-K. Su, "Fuzzy genetic optimization on performance-based seismic design of reinforced concrete bridge piers with single-column type," *Optim. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 471–496, 2009.
- [101] A. Luz, V. Yepes, F. González-Vidoso, and J. V. Martí, "Diseño de estribos abiertos en puentes de carretera obtenidos mediante optimización híbrida de escalada estocástica," *Inf. la construcción*, vol. 67, no. 540, p. e114, 2015.

- [102] A. Baldomir, S. Hernandez, F. Nieto, and J. a. Jurado, “Cable optimization of a long span cable stayed bridge in la Coruña (Spain),” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 41, no. 7–8, pp. 931–938, 2010.
- [103] M. M. Hassan, “Optimization of stay cables in cable-stayed bridges using finite element, genetic algorithm, and B-spline combined technique,” *Eng. Struct.*, vol. 49, no. January, pp. 643–654, 2013.
- [104] A. M. B. Martins, L. M. C. Simoes, and J. H. J. O. Negrão, “Optimization of cable forces on concrete cable-stayed bridges including geometrical nonlinearities,” *Comput. Struct.*, vol. 155, no. Marh, pp. 18–27, 2015.
- [105] A. M. B. Martins, L. M. C. Simões, and J. H. J. O. Negrão, “Cable stretching force optimization of concrete cable-stayed bridges including construction stages and time-dependent effects,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 51, no. October, pp. 757–772, 2015.
- [106] K. Yail, S. W. Hyun, J. Y. Kang, and J. S. Park, “Anchorage configuration for post-tensioned NSM CFRP upgrading constructed bridge girders,” *Eng. Struct.*, vol. 79, no. September, pp. 256–266, 2014.
- [107] N. Islam, S. Rana, R. Ahsan, and S. N. Ghani, “An Optimized Design of Network Arch Bridge using Global Optimization Algorithm,” *Adv. Struct. Eng. Dyn. Vol. Two*, vol. 17, no. 2, pp. 921–932, 2014.
- [108] T. Zordan, B. Briseghella, and T. Liu, “Finite element model updating of a tied-arch bridge using Douglas-Reid method and Rosenbrock optimization algorithm,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 1, no. 4, pp. 280–292, 2014.
- [109] J. Qiao, H. Wu, and W. Yang, “Optimal design of concrete tied arch bridge,” *Xinan Jiaotong Daxue Xuebao/Journal Southwest Jiaotong Univ.*, vol. 50, no. 2, pp. 300–305, 2015.
- [110] M. Pouraminian and M. Ghaemian, “Shape optimisation of concrete open spandrel and bridges,” *J. Croat. Assoc. Civ. Eng.*, vol. 67, no. 11, pp. 1177–1185, 2015.
- [111] D. Bruno, P. Lonetti, and A. Pascuzzo, “An optimization model for the design of network arch bridges,” *Comput. Struct.*, vol. 170, no. July, pp. 13–25, 2016.
- [112] V. Lute, “Genetic Algorithms-based Optimization of Cable Stayed Bridges,” *J. Softw. Eng. Appl.*, vol. 04, no. October, pp. 571–578, 2011.
- [113] Z. Chen, H. Cao, K. Ye, H. Zhu, and S. Li, “Improved Particle Swarm Optimization-Based Form-Finding Method for Suspension Bridge Installation Analysis,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 29, no. 3, p. 04014047, 2015.
- [114] M. Yuan and D. H. Yan, “Optimization on Closure Scheme of Multi-Span Prestressed Concrete Box-Girder Bridge,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 163–167, no. January, pp. 2369–2375, 2011.
- [115] J. Zhu and B. Liu, “Performance Life Cost-Based Maintenance Strategy Optimization for Reinforced Concrete Girder Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 172–178, 2013.

- [116] X. T. Zhang, X. J. Chen, J. M. Huang, H. M. Zhou, and Q. Wang, "Optimum Design of Bridge Cross Section with Low Clearance Considering Wave Load Effects Based on Numerical Wave-Tank," *J. Coast. Res.*, vol. 73, no. Winter 2015, pp. 232–237, 2015.
- [117] Lu Deng and C. S. Cai, "Bridge Model Updating Using Response Surface Method and Genetic Algorithm," *J. Bridg. Eng.*, vol. 15, no. 5, pp. 553–564, 2010.
- [118] S. Rana, N. Islam, R. Ahsan, and S. N. Ghani, "Application of evolutionary operation to the minimum cost design of continuous prestressed concrete bridge structure," *Eng. Struct.*, vol. 46, no. September, pp. 38–48, 2012.
- [119] Z. Aydin and Y. Ayvaz, "Overall cost optimization of prestressed concrete bridge using genetic algorithm," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 17, pp. 769–776, 2013.
- [120] M. Madhkhan, A. Kianpour, and M. E. Torki Harchegani, "Life-cycle cost optimization of prestressed simple-span concrete bridges with simple and spliced girders," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Civ. Eng.*, vol. 37, no. C1, pp. 53–66, 2013.
- [121] V. Bisadi and J. E. Padgett, "Explicit Time-Dependent Multi-Hazard Cost Analysis Based on Parameterized Demand Models for the Optimum Design of Bridge Structures," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 30, no. December, pp. 541–554, 2015.
- [122] E. Honarvar, S. Sritharan, M. Asce, J. M. Rouse, S. Aaleti, and A. M. Asce, "Bridge Decks with Precast UHPC Waffle Panels : A Field Evaluation and Design Optimization," *J. Bridg. Eng.*, vol. 21, no. 1, p. 04015030, 2015.
- [123] J. Alcalá, "Optimización heurística económica de tableros de puentes losa pretensados," in *Tesis Doctoral*, 2009.
- [124] L. F. Wang and A. P. Tang, "Component-Oriented Decomposition for Collaborative Optimization in Reinforcement Concrete Bridge Design," *Adv. Mater. Res.*, vol. 374–377, no. 10, pp. 2405–2410, 2012.
- [125] T. Guo, T. Liu, and a Q. Li, "Deflection Reliability Analysis of PSC Box-Girder Bridge Under High-Speed Railway Loads," *Adv. Struct. Eng.*, vol. 15, no. 11, pp. 2001–2011, 2012.
- [126] J. V. Martí and F. González-Vidoso, "Design of prestressed concrete precast pedestrian bridges by heuristic optimization," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 41, no. June, pp. 916–922, 2010.
- [127] J. V. Martí, F. Gonzalez-Vidoso, V. Yepes, and J. Alcalá, "Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing," *Eng. Struct.*, vol. 48, pp. 342–352, 2013.
- [128] J. V. Martí, V. Yepes, F. González-Vidoso, and A. Luz, "Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos memáticos híbridos," *Rev. Int. Metod. Numer. para Calc. y Disen. en Ing.*, vol. 30, no. 3, pp. 145–154, 2014.
- [129] J. V. Martí, V. Yepes, and F. González-Vidoso, "Memetic Algorithm Approach to Designing Precast-Prestressed Concrete Road Bridges with Steel Fiber Reinforcement," *J. Struct. Eng.*, vol. 141, no. 2, p. 04014114, 2015.

- [130] V. Yepes, J. V. Martí, and T. García-Segura, “Cost and CO₂ emission optimization of precast-prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm,” *Autom. Constr.*, vol. 49, no. November, pp. 123–134, 2015.
- [131] J. V. Martí, T. García-Segura, and V. Yepes, “Structural design of precast-prestressed concrete U-beam road bridges based on embodied energy,” *J. Clean. Prod.*, vol. 120, pp. 231–240, 2016.
- [132] A. N. Fontán, S. Hernández, and A. Baldomir, “Simultaneous Cross Section and Launching Nose Optimization of Incrementally Launched Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 19, no. 3, p. 04013002, 2014.
- [133] O. Nader and D. M. Frangopol, “Novel Approach for Multicriteria Optimization of Life-Cycle Preventive and Essential Maintenance of Deteriorating Structures,” *J. Struct. Eng.*, vol. 136, no. 8, pp. 1009–1022, 2010.
- [134] B. Zhu and D. M. Frangopol, “Risk-Based Approach for Optimum Maintenance of Bridges under Traffic and Earthquake Loads,” *J. Struct. Eng.*, vol. 139, no. 3, pp. 422–434, 2013.
- [135] G. Barone, D. M. Frangopol, and M. Soliman, “Optimization of Life-Cycle Maintenance of Deteriorating Bridges with Respect to Expected Annual System Failure Rate and Expected Cumulative Cost,” *J. Struct. Eng.*, vol. 140, no. 2, p. 04013043, 2014.
- [136] S. Sabatino, D. Frangopol, and Y. Dong, “Sustainability-informed maintenance optimization of highway bridges considering multi-attribute utility and risk attitude,” *Eng. Struct.*, vol. 102, no. September, pp. 310–321, 2015.
- [137] D. Saydam, M. Asce, D. M. Frangopol, and D. M. Asce, “Risk-Based Maintenance Optimization of Deteriorating Bridges,” *J. Struct. Eng.*, vol. 141, no. 4, p. 04014120, 2015.
- [138] A. D. Orcesi, “A bridge network maintenance framework for Pareto optimization of stakeholders/users costs,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 95, no. June, pp. 1230–1243, 2010.
- [139] G.-H. Lee, S.-B. You, and D.-H. Ha, “Optimal Design for Seismically Isolated Bridges with Frictional Bearing,” *J. Korean Soc. Civ. Eng. A*, vol. 30, no. 5, pp. 399–406, 2010.
- [140] A. N. Fontan, J. M. Diaz, A. Baldomir, and S. Hernandez, “Improved Optimization Formulations for Launching Nose of Incrementally Launched Prestressed Concrete Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 16, no. 3, pp. 461–470, 2011.
- [141] Y. Dong, D. M. Frangopol, and D. Saydam, “Pre-Earthquake Multi-Objective Probabilistic Retrofit Optimization of Bridge Networks Based on Sustainability,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 19, no. 6, p. 04014018, 2014.
- [142] L. Saad, a. Aissani, a. Chateaneuf, and W. Raphael, “Reliability-based optimization of direct and indirect LCC of RC bridge elements under coupled fatigue-corrosion deterioration processes,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 59, pp. 570–587, 2016.
- [143] B. Bruno, L. Fenu, Y. Feng, C. Lan, E. Mazzarolo, and T. Zordan, “Optimization Indexes to Identify the Optimal Design Solution of Shell-Supported Bridges,” *J. Bridg. Eng.*, vol. 21, no. 3, pp. 1–12, 2016.

- [144] B. Bruno, L. Fenu, Y. Feng, and E. Ál, “Topology Optimization of Bridges Supported by a Concrete Shell,” *Struct. Eng. Int.*, vol. 23, no. 3, pp. 285–294, 2013.
- [145] L. M. C. Simões, A. M. B. Martins, and J. H. J. O. Negrão, “Optimum design of concrete cable-stayed bridges,” *Eng. Optim.*, vol. 48, no. 5, pp. 772–791, 2016.
- [146] V. Yepes, C. Torres-Machi, A. Chamorro, and E. Pellicer, “Optimal pavement maintenance programs based on a hybrid Greedy Randomized Adaptive Search Procedure Algorithm,” *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 22, no. 4, pp. 540–550, 2016.
- [147] L. A. Sierra, E. Pellicer, and V. Yepes, “Social Sustainability in the Lifecycle of Chilean Public Infrastructure,” *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 142, no. 5, p. 05015020, 2015.
- [148] J. A. Martínez and A. M. Artola, “Investigación descriptiva: análisis de la información.” *Material Docente, Ficha 14: Análisis de correspondencias. Universitat Oberta de Catalunya, Departament de estadística aplicada, Barcelona*, pp. 74–84.