

## **OPTIMIZATION IN THE STRUCTURAL AREA: APPLICATION TO BOARD OF HIGHWAY BRIDGES MADE BY PREFABRICATED CONCRETE ELEMENTS.**

González González-Gento, Ignacio  
Universidad Europea de Madrid

An application/database is proposed where having classified a large number of case studies of highway bridges which board is constituted by prefabricated concrete double T and trough beams. These bridges are calculated and developed following some necessary variables to define the construction: board wide, main span, skew, location, characteristics of materials, environment.

The main objective of this tool is get the structure's cost and optimize the time of the structure design and the viability of it from the initial stage of the project (draft). In this way it can be allowed a better approach of this solution in an easy and fast way.

As additional objectives, it is considered to generate different scenarios changing the values of different variables for reaching from the program structural calculations, drawings and measurements for the realization of the basic project.

This tool can be very useful for engineering's or consultant's offices or consultancies. It can save much time and money in the realization of stages which are necessary to writing structural projects.

**Keywords:** bridges; prefabricated concrete beams; time optimization; concrete structures

## **OPTIMIZACIÓN EN EL ÁREA ESTRUCTURAS: APLICACIÓN A LOS TABLEROS DE PUENTES DE CARRETERA CONSTITUIDOS POR ELEMENTOS PREFABRICADOS DE HORMIGÓN.**

Se propone una aplicación/base de datos donde tener albergados un gran número de casos de estudio de puentes de carretera cuyo tablero esté constituido por vigas prefabricadas en doble T y artesa. Estos puentes están calculados y desarrollados según una serie de variables necesarias para la definición de la obra: ancho de tablero, luz principal del vano, esviaje, situación, características de los materiales, ambiente.

El objetivo principal de esta herramienta es obtener el coste y la optimización del plazo de redacción del proyecto de estructura así como la viabilidad de la misma (predimensionamiento) la etapa inicial del proyecto. De esta forma se permitiría una mejor valoración de la alternativa de una forma rápida y sencilla.

Los objetivos secundarios de esta aplicación consisten en poder variar las variables definidas según los casos de cada proyecto para que el programa nos reporte los cálculos de la estructura, planos y mediciones para la realización de un anteproyecto.

Esta herramienta puede ser de gran utilidad para oficinas de ingeniería o consultorías, con el correspondiente ahorro en tiempo y coste en la realización de las etapas necesarias para redacción de proyectos de estructuras.

**Palabras clave:** puentes; vigas prefabricadas; optimización del tiempo; hormigón estructural

## 1. Introducción

“La necesidad es la madre de la invención”. Este dicho introducido por Platón y, mucho más tarde, recordado por Einstein, es la razón fundamental, en nuestro caso, para la construcción de puentes. Como escriben Denison y Stewart (2014), desde edades tempranas en las que el ser humano simplemente necesitaba cruzar un arroyo para alcanzar nuevos campos, hasta nuestros días, en los que la comunicación y el comercio mundiales dependen de salvar accidentes geográficos o barreras humanas, la necesidad de construir nuevos puentes ha sido una constante de innovación.

Fernández (2000:237) observa que el hombre “Al dar continuidad a su red vial se encuentra en conflicto con la red fluvial y es preciso asegurar la coexistencia de ambos. La naturaleza trabaja para borrar la huella que le impone el camino, y los puntos vulnerables son los pasos de cauces. Por eso los puentes son siempre puestos de avanzada en el duelo permanente entre el hombre y el mundo físico”.

Desde el comienzo de la construcción de puentes hasta nuestras fechas, diferentes materiales han servido para el levantamiento de estas estructuras de conexión. Muchos autores como Manterola (2006) o Denison y Stewart (2014), coinciden en este aspecto en destacar cuatro materiales: madera, piedra, hierro-acero y hormigón. Bien es cierto, que de estos materiales, en la actualidad, la gran mayoría de los puentes construidos están constituidos por los dos últimos, es decir, la combinación de hormigón y acero formando el hormigón armado.

Este último material combina las propiedades del hormigón con las del acero, dando lugar a un material muy resistente pero que presenta problemas de fisuración y de deformación cuando la luz es grande. Por esta razón, para luces que superaban los 20 o 25 metros, se debía abandonar esta solución y acudir a otra tipología. (Manterola, 2006).

Es en 1930 cuando, Freyssinet, revoluciona la construcción introduciendo el pretensado. Este nuevo material combina el hormigón con el acero pretensado, es decir, a las barras de acero (cables) que forman parte de la pieza se les dota de una tensión inicial para que mejoren el comportamiento estructural. Esto es el germen del hormigón pretensado prefabricado. Billington (2004) proporciona un conocimiento más profundo del desarrollo del hormigón pretensado a lo largo de la historia.

En conclusión, los dos materiales básicos más comúnmente utilizados en el diseño y construcción de puentes son el acero y el hormigón, los cuales representan una gama variada de características y posibilidad de combinaciones.

Los tipos de puentes se pueden clasificar en tres familias según su tipología estructural, de acuerdo con Manterola (2006), se tiene:

- Puentes rectos o puentes viga.
- Puentes arco.
- Puentes atirantados y colgados.

A su vez, los puentes están diseñados para una gran variedad de usos, algunos de los cuales han cambiado con el paso de los años y otros han sido creados debido a los avances tecnológicos como el coche o el ferrocarril. Por tanto, según Denison y Stewart (2014), tenemos los siguientes usos para un puente: peatonal, agua, vehículos, ferrocarril y/o militar. Dichos usos pueden ser exclusivos o combinados en la superficie del tablero.

El desarrollo del futuro de los puentes se ha de lograr a través de un continuo avance mediante la investigación y el desarrollo técnico, apostando por la innovación y la creatividad

tanto en el proyecto como en la construcción. La construcción se ha tendido a la optimización de los elementos estructurales de hormigón lo cual ha evolucionado hacia la idea de la construcción industrializada (Hue, 2007).

El principio innato del hombre es hacer las cosas en el menor tiempo posible, o lo que es lo mismo, tratar de optimizar, ya sea en sus propias tareas cotidianas o en el trabajo que desempeñe. Esta observación tiene una estrecha relación con la obra civil, ya que toda ingeniería y constructora quiere ahorrar en gastos y tiempos, tanto de producción como de diseño y cálculo de un proyecto. Como dicen Hernández et al. (2010), hoy en día, la búsqueda de la optimización se ha convertido en una práctica habitual en las ciencias y, en especial, en las ingenierías y los negocios.

En las últimas décadas se ha producido un gran progreso tecnológico en la construcción de puentes gracias al profundo conocimiento de los materiales y a los avances producidos en el análisis estructural y los medios de cálculo y de diseño asistido por ordenador (Pulido, Sobrino & Romo, 2000). Las técnicas de programación matemática para la optimización han tenido un auge a partir de los años setenta, es entonces cuando estas técnicas empiezan a ser empleadas de forma más habitual en resoluciones de tipo ingenieril (Caballero & Grossman, 2007).

Pero, como indican Hernández et al. (2010), existe un vacío en la investigación que se ocupe de la optimización y el diseño completo de los puentes. Ya que, por el momento, sólo se han desarrollado softwares para el cálculo y diseño de la estructura.

## **2. Hipótesis y objetivos**

### **2.1. Hipótesis**

La necesidad ingenieril de proyectar estructuras de hormigón prefabricado determina el contexto en el que se plantea este proyecto. El objetivo fundamental de este artículo es el desarrollo de una aplicación que consiste en la optimización del proceso necesario para la realización de ofertas económicas en el anteproyecto – estudiando su viabilidad – y la también optimización en el proceso de redacción del proyecto estructural final. Las hipótesis de partida en las que nos basamos son:

- Es posible mejorar el diseño de las estructuras de hormigón gracias a la posibilidad de parametrizar muchas de las variables que influyen en el cálculo estructural.
- Existen criterios de optimización en la construcción industrializada, tanto en el diseño y cálculo del proyecto como en la ejecución de la obra.
- Es posible reducir los tiempos de trabajo en una oficina de ingeniería, sobre todo a la hora de la negociación con el cliente y el predimensionamiento de la estructura.

### **2.2. Objetivos**

1. Realizar un estudio acerca de los conocimientos previos en materia de optimización en el diseño de estructuras prefabricadas de hormigón, en concreto, de puentes.
2. Identificar las variables más importantes que tengan influencia en el diseño, dimensionado, y coste asociado al cálculo y ejecución en proyectos de tableros de vigas prefabricadas para puentes de carretera.
3. Creación de la base de datos y desarrollo de la aplicación para insertar nuestra propuesta. Posteriormente, comparar el uso de la herramienta obtenida frente al procedimiento habitual en la redacción de proyectos, y analizar si conseguimos la optimización buscada.

4. Divulgar el conocimiento conseguido para que los proyectistas puedan utilizar esta herramienta en la redacción de proyectos, de tal forma que puedan alcanzar mejoras respecto a los tiempos de trabajo que conlleva el desarrollo habitual de un proyecto de diseño de puentes.

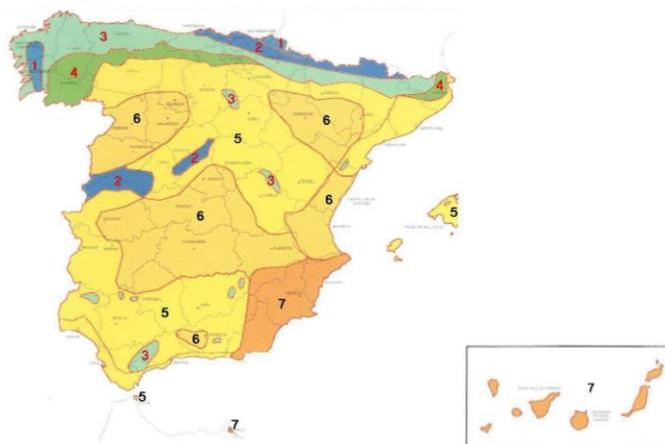
### 3. Alcance

Dentro de los diferentes tipos de puente, el escogido en el proyecto es el puente viga, es decir, aquel que permite la construcción mediante vigas prefabricadas de hormigón. Esta tipología permite la industrialización del proceso y las consiguientes ventajas que produce: ahorro en coste, reducción de plazos y mejora de la calidad del producto (Rollón, 2011).

El estudio se sitúa en España. Ya que el país español tiene una gran infraestructura viaria y además la orografía del terreno obliga a la construcción de puentes, de los que, una gran mayoría pueden ser diseñados mediante elementos prefabricados de hormigón, el estudio realizado se aplicará para el sector carreteras. Es decir, el uso principal del tablero será para el paso de vehículos.

Observando la figura 1, vemos que la mayor parte de la geografía española tiene una precipitación media anual inferior a 600 mm (zonas 5 a 7), por tanto, la clase de exposición será IIb. Esta información es obtenida del Ministerio de Fomento.

**Figura 1: Clases de exposición.**



Para obtener esta aplicación, será necesario fijar unas variables de entrada. Las variables que definen el encaje de un tablero de vigas prefabricadas son:

- Ancho de tablero.
- Luz del vano.
- Aceras (barreras de protección).
- Espesor de pavimento.
- Esviaje.
- Recubrimientos (clase de exposición).
- Definición del pretensado, enfundados y armadura pasiva.
- Resistencia característica del hormigón y del acero.
- Espesor de la losa del tablero.

- Geometría de la viga.
- Separación entre vigas (entre-eje) y número de vigas.
- Sobrecargas (según la IAP-98).

El estudio se enfocará en los puentes de carretera cuyo tablero esté formado por elementos prefabricados de hormigón y estén localizados en la península ibérica, dentro de la clase de exposición IIb. La luz del vano estará comprendida entre 10 y 40 m, siguiendo las indicaciones de Martí et al. (2014) y Martí et al. (2013). La tipología englobará tanto vigas doble T como vigas artesa.

## 4. Metodología

### 4.1. Revisión de la documentación

Previa a toda investigación es necesario realizar una revisión de la documentación publicada que tenga relación con el tema a tratar. Para tener un conocimiento previo del ámbito en el que se engloba este proyecto se han consultado libros, artículos de revistas científicas y tesis doctorales, encontradas en bibliotecas, la base de datos de Science Direct o la del Web of Knowledge.

### 4.2. Alcance

Las variables definidas serán variables discretas, lo que facilita la construcción efectiva de la estructura real optimizada. Para la elección e identificación de las variables geométricas de la pieza prefabricada nos centramos en la información que toda empresa dedicada al suministro de vigas prefabricadas facilita en sus catálogos además de la consulta de planos de obras ya construidas. Así mismo, debemos definir la posición de los cables de pretensado en la sección. Respecto a las variables de los materiales atenderemos a la resistencia característica del hormigón, tanto pretensado como armado, y al límite elástico del acero. Este aspecto es indispensable para cualquier cálculo que se precie. La identificación correspondiente a las variables de coste ha sido facilitada por la empresa A.T.P. Ingeniería S.L.

### 4.3. Bases del cálculo

El análisis estructural y dimensionamiento de los tableros, se realiza de acuerdo con las siguientes bases de cálculo relativas a materiales, coeficientes de seguridad y cargas consideradas. Se utilizó el siguiente programa y normativas para la resolución de los cálculos necesarios:

- CCAD-VIGAS: Programa que analiza el comportamiento de un tablero de vigas siguiendo las directrices que marcan las normas EHE y la IAP. Desarrollado por Civilcad Consultores S.L.
- Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-98). Se escoge esta norma siguiendo el estudio de Martí et al. (2014).
- Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón estructural (EHE-08).
- Norma de construcción sismorresistente (NCSP-07).

#### Hormigones

- En losa de tablero: Hormigón Armado HA-35/B/20/IIb con  $f_{ck} > 35 \text{ N/mm}^2$
- En vigas: Hormigón Pretensado HP-50/B/20/IIb con  $f_{ck} > 50 \text{ N/mm}^2$

- Coeficiente de minoración de resistencia  $\gamma_c=1,50$

Acero pasivo corrugado

- En todos los casos se adopta B-500-S Con  $f_{yk} > 500 \text{ N/mm}^2$
- Coeficiente de minoración de resistencia  $\gamma_s=1,15$

Acero activo para pretensar en cordones

- En todos los casos se adoptan cordones Y-1860-S7. Con  $f_{p,máx,k} > 1860 \text{ N/mm}^2$
- Límite elástico  $f_{pk}= 1637 \text{ N/mm}^2$
- Coeficiente de minoración de resistencia  $\gamma_s= 1,15$

Recubrimientos

**Tabla 1: Clase de exposición y recubrimiento (según normativa).**

	Ambiente	Recubrimiento	Margen de recubrimiento	Recubrimiento nominal
Losa de tablero	IIb	30	5	35
Elementos prefabricados	IIb	25	0	25

Acciones Permanentes Consideradas

- Peso propio: evaluado mediante el área teórica de las secciones multiplicada por el peso específico del hormigón  $\gamma_h = 2,50 \text{ T/m}^3$ .
- Pavimento: se han considerado dos situaciones de cálculo, en la primera se ha considerado un espesor de 6 cm y en un segundo cálculo se ha considerado un incremento sobre el valor teórico de un 50%, empleándose en ambos casos un peso específico de  $2,30 \text{ T/m}^3$ .
- Conjunto acera-barrera: 0,40 m con 1,00 T/m cada una.

Acciones Variables Consideradas

- Sobrecarga de uso sobre el tablero:  $400 \text{ kp/m}^2$ .
- Carro: al ser la calzada inferior a 12,00 metros se ha considerado un único carro de 60 T con la geometría definida en la I.A.P.
- Frenado.
- Viento.
- Incremento / decremento térmico.

Acciones Variables de valor no constante

- Fluencia
- Retracción

Acciones Accidentales

- Siguiendo la norma NSCE-07 no se ha considerado la acción sísmica al ser la aceleración básica  $a_b$  inferior a 0,04 g.

Se han combinado las acciones siguiendo los criterios marcados en la I.A.P. en el artículo 4. Se realiza una combinación para estados límites últimos y para estados límites de servicio.

#### 4.4. Desarrollo de la aplicación

El desarrollo de la aplicación consiste en introducir los resultados del cálculo en una base de datos. Posteriormente se programa la interfaz de entrada de datos o variables de diseño, atendiendo a los criterios de ancho de tablero, luz de las vigas y tipología. La aplicación realiza una minería de datos dentro de dicha base para reportar la solución más económica, atendiendo al criterio de que para cada ancho definido sólo es posible una luz de cálculo y un número mínimo de vigas para cada tipo de viga.

#### 4.5. Análisis de la aplicación

El análisis de la aplicación se realiza para observar la optimización que se puede alcanzar utilizando esta herramienta en base al coste producido por la horas de trabajo en las diferentes etapas que rigen el procedimiento de una ingeniería consultora. Es decir, se compara un caso real de trabajo con el uso de la herramienta. Además, se le somete a una validación por parte de una oficina técnica dónde se valida el grado de optimización respecto al uso de la herramienta.

### 5. Estado del Arte

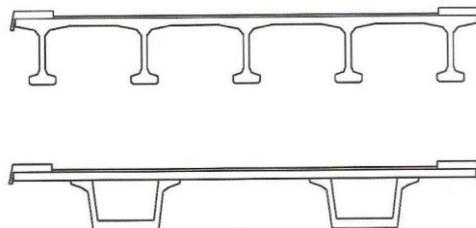
Adentrándonos en el artículo de Hernández et al. (2010), ya en los siglos XVIII y XIX, con los estudios de Lagrange o Euler se implantaron muchos de los conceptos básicos de la optimización, y más tarde en los años 40, con Kantorovich y Dantzing se desarrolla la Programación Matemática. De todos modos, no es hasta la revolución informática de los años 70, cuando se descubre el poder de cálculo de los ordenadores, y la programación matemática empieza a ser una herramienta utilizada en variedad de trabajos.

En la construcción con hormigón, esta optimización llegó de la mano de la construcción industrializada, también conocida como prefabricación. Según Escrig (2010), este sistema constructivo se basa en el diseño de producción mecanizado de componentes elaborados en serie, que tras una fase de montaje, conforman todo o una parte de una construcción.

El uso del hormigón prefabricado en la construcción tiene grandes ventajas económicas, ya que permite ahorros en material y mano de obra, se consigue una elevada calidad del producto y un rápido montaje. Además de esto, el hormigón prefabricado tiene un valor añadido debido a beneficios sociales y medioambientales. (Martí et al., 2014). En la construcción industrializada de vigas prefabricadas se disponen de dos tipos de viga, según el perfil de la misma: tipo doble "T" y tipo artesa. A su vez, estas pueden tener ligeras variaciones según el fabricante y las dimensiones de la misma.

Hasta hace pocos años, el tablero constituido por vigas prefabricadas cubría desde luces muy pequeñas, del orden de 5 ó 10 metros, hasta los 40 ó 45 m de luz en una única unidad. "La viga era concebida como una unidad que salta entre dos soportes", nos dice Manterola (2006:98). Martí et al. (2013), en su proyecto aplica luces entre apoyos de entre 10 y 40 m.

**Figura 2: Tablero de vigas doble T y vigas artesa.**



El avance de las técnicas informáticas en los últimos tiempos ha provocado un aumento de la capacidad de cálculo de los ordenadores. El desarrollo continuado del hardware y del software permite en la actualidad el análisis de estructuras de gran tamaño y complejidad. (Montrull et al., 1996). Debido a estos avances en programación informática se han podido desarrollar una serie de softwares específicos para el cálculo del tablero de puentes, así como de sus diferentes elementos de infraestructura como son las pilas y los estribos. Los softwares específicos para este tipo de cálculo son, entre otros: SAP2000, Civilcad2000, CivilFem for ANSYS, Staad.PRO o Robot Millenium (M. Varela, comunicación personal, 5 de abril de 2016).

Disponer de estos programas es una gran ventaja para la redacción de proyectos, ya que ofrecen la posibilidad de obtener cálculos y documentos gráficos de la estructura – planos – en un espacio corto de tiempo. Además, gracias a softwares destinados a la medición de las unidades de obra, como son el Microsoft Excel o el Presto, se puede obtener la medición y el presupuesto de la obra.

A pesar de estos avances informáticos, aún queda mucho por desarrollar en el campo de la optimización, ya que la elaboración de cálculos y mediciones mediante el procedimiento habitual no alcanza el grado de optimización deseado. Esto se debe a que la realización de la medición se hace sobre plano y es dónde se pierde gran cantidad de tiempo y pueden existir grandes diferencias (A. Retuerta, comunicación personal, 4 de abril de 2016). Por este motivo se trata de buscar la solución que englobe en un mismo paso el proceder habitual, es decir, cálculos, planos y, sobretodo, mediciones. Pero esto parece una quimera.

El artículo de Martí et al. (2014) refleja de manera directa lo comentado en el párrafo anterior: se realiza un estudio dónde se busca la forma de diseñar tableros de puentes de vigas artenas pretensadas prefabricadas reduciendo al mínimo el coste de una manera automática. En este caso los puentes propuestos estarán formados por 2 vigas isostáticas con luces entre apoyos de entre 20 y 40 metros y una losa de 12 metros de ancho. Para llevar a cabo la optimización se basan en el cálculo del coste de todas las soluciones evaluadas, en función de las variables geométricas, los materiales y la armadura de acero necesaria. Seguidamente implantan un módulo para valorar los cálculos estructurales del tablero para, finalmente, mediante la aplicación de un algoritmo memético híbrido, encontrar las soluciones optimizadas respecto al coste.

En el análisis del resultado de la solución alcanzada por el algoritmo se comparó dicha solución con una estructura realmente construida y calculada por procedimientos habituales. Se comprobaron ahorros significativos cercanos al 7-8%, aunque en algún caso aislado el ahorro se estimó en un 50%. El ahorro alcanzado se debió a las diferencias existentes en la medición de las unidades de obra en materiales.

A parte del ahorro en coste que se consigue, también es importante el ahorro en el tiempo. Pues como dice Morán (1983), si un proyecto se entrega antes de la fecha pactada, antes podrá comenzar su ejecución en obra, y el empresario que lo recibe se sentirá motivado a gratificar con una cantidad por día de adelanto sobre la fecha de entrega prevista.

Por tanto, se ve claro un vacío en el desarrollo que consista en una aplicación la cual, al introducir las características geométricas del tablero, nos arroje la solución más rentable desde el punto de vista económico estructural. Además de conseguir la optimización a la hora del análisis de viabilidad económica, estaríamos ahorrando un tiempo muy importante en el pre-dimensionamiento y, como no, en el cálculo definitivo del tablero, pues en la misma aplicación vamos a tener desarrollados la solución estructural final.

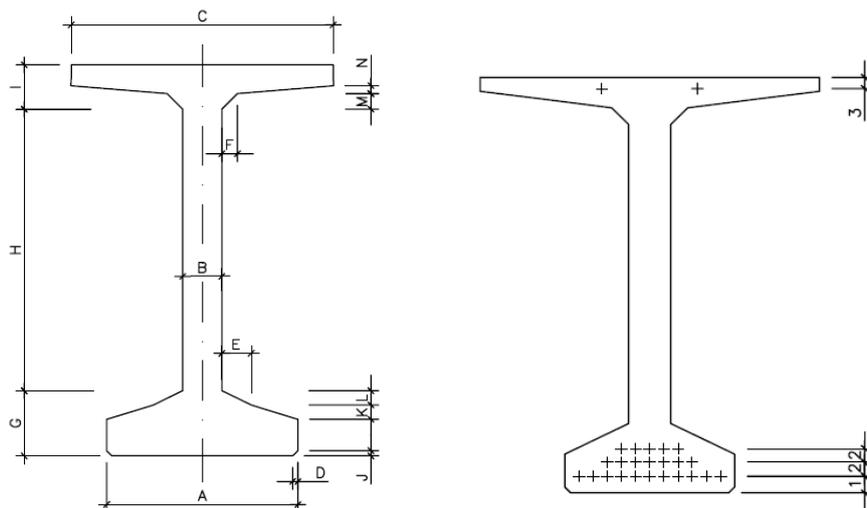
## 6. Resultados

### 6.1. Variables

#### Variables geométricas del tablero

En las tablas 2 y 3, y en las figuras 3 y 4 se definen las variables geométricas tanto para vigas doble T como vigas artesa.

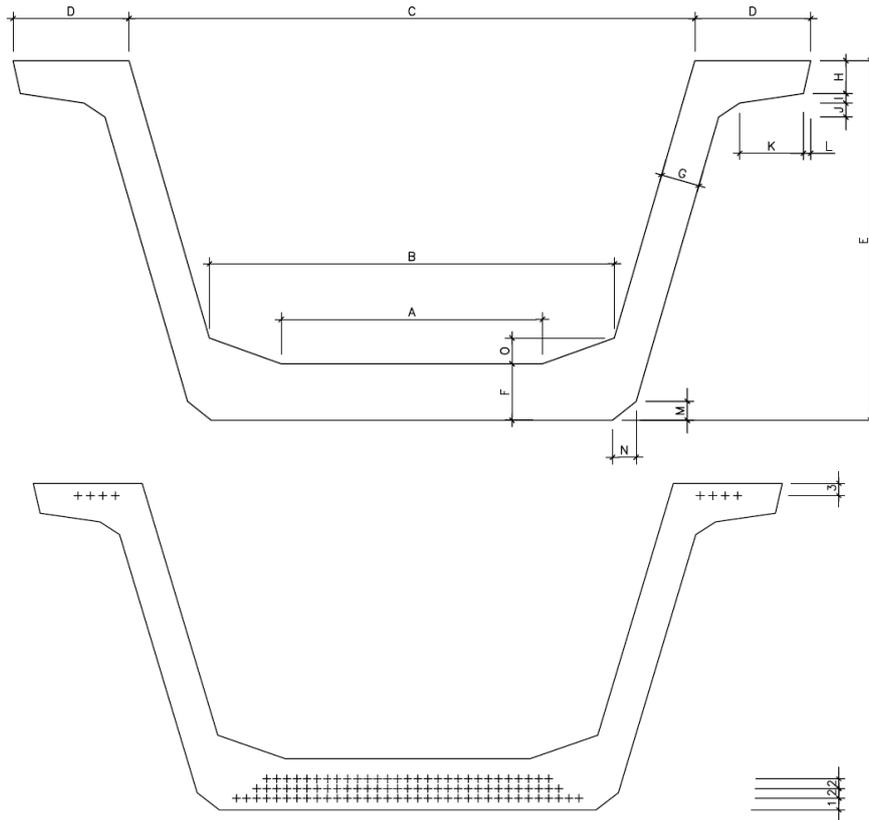
**Figura 3: Variables geométricas viga doble T.**



**Tabla 2: Valor de las variables viga doble T en cm.**

Tipo viga	H-70	H-90	H-100	H-120	H-150	H-180	H-200
A	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00	60,00
B	15,00	14,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
C	80,00	90,00	100,00	120,00	120,00	140,00	140,00
D	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
E	11,25	0,00	11,25	11,25	0,00	11,25	11,25
F	14,50	6,00	10,50	6,50	6,00	7,50	7,50
G	19,00	21,00	19,00	28,00	25,00	41,00	41,00
H	35,00	49,30	66,00	75,00	108,00	117,00	137,00
I	16,00	19,70	15,00	17,00	17,00	22,00	22,00
J	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
K	3,50	8,00	3,50	7,00	11,00	7,00	7,00
L	3,50	0,00	3,50	7,00	0,00	7,00	7,00
M	8,00	4,00	4,00	6,00	6,00	9,00	9,00
N	4,00	6,70	7,00	6,00	6,00	7,00	7,00

**Figura 4: Variables geométricas vigas artesa.**



**Tabla 3: Valor de las variables viga artesa en m.**

Tipo viga	Base 170 cm				Base 200 cm			
	U-100	U-120	U-140	U-160	U-100	U-120	U-140	U-160
A	1,015	1,015	1,015	1,015	1,320	1,315	1,315	1,315
B	1,575	1,573	1,573	1,573	1,870	1,873	1,873	1,873
C	1,970	2,083	2,199	2,315	2,270	2,383	2,499	2,615
D	0,325	0,450	0,450	0,450	0,325	0,450	0,450	0,450
E	1,000	1,200	1,400	1,600	1,000	1,200	1,400	1,600
F	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220	0,220
G	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
H	0,080	0,128	0,128	0,128	0,080	0,128	0,128	0,128
I	0,050	0,092	0,092	0,092	0,050	0,092	0,092	0,092
J	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
K	0,190	0,329	0,329	0,329	0,190	0,329	0,329	0,329
L	0,020	0,028	0,028	0,028	0,020	0,028	0,028	0,028
M	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
O	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100

Tanto si tenemos vigas en doble T como artesa el ancho del tablero tendrá la posibilidad de tomar 6 diferentes valores, los cuales son: 8; 9; 10; 11,50; 13; y 14,50 m. El espesor de la losa será de 25 cm en todos los casos y el espesor de aglomerado de 6 cm.

Otro aspecto geométrico a mencionar es el entre-eje, es decir, la longitud existente entre los ejes de las vigas. De este parámetro y del ancho del ala superior de la viga va a depender la longitud de encofrado perdido, pues se obtiene de la diferencia del entre-eje y el ala superior, y sumando 5 cm a cada lado para el apoyo del encofrado, para vigas doble T. En cambio, para las vigas artesa el procedimiento es más complejo y es expresado en m<sup>2</sup>/m. Se debe de restar al ancho del tablero el producto de la resta del número de vigas menos uno y la resta del ala superior menos 10 cm, estas dos diferencias multiplicadas por dos. Así mismo, el esviaje no se tiene en cuenta para el cálculo del coste del tablero pues se comprueba que apenas representa variación alguna en el total.

#### Variables de los materiales

Las variables que definen la resistencia característica de los hormigones toma, para la losa, el valor de 30 MPa (HA-30) y de 50 MPa (HP-50) para las vigas pretensadas. La armadura posee un límite elástico de 500 MPa (B-500S), tanto para la armadura activa como para la pasiva. La armadura activa de pretensado se define por la posición que toma esta en la sección de la pieza. Tenemos 4 variables: (1) el número de cordones en el ala inferior o cabeza traccionada; (2) el número de cordones dispuestos en la segunda, tercera fila y cuarta fila en la cabeza inferior; (3) el número de cordones dispuestos en el ala superior o cabeza comprimida y (4) la longitud de los enfundados de los cordones hasta un máximo de ¼ de la luz. En las figuras 3 y 4 se representan estas variables. La disposición de la armadura pasiva se representa por las cotas en la sección transversal de la viga, cumpliendo la distancia máxima y mínima exigida en la EHE-08.

#### Variables de coste

La valoración económica de la obra está basada en precios sobre camión en obra, con una distancia de fábrica a obra menos a 250 km. El precio por viga en €/m variará según el tipo de viga (ver tabla 4 y 5), y el precio del encofrado perdido se fija en 28 €/m<sup>2</sup>, para viga doble T, y en 44 €/m<sup>2</sup>, para vigas artesa. Con estos precios obtenemos la valoración en € de las diferentes alternativas para, posteriormente elegir la solución más rentable económicamente hablando. Los precios utilizados son facilitados por A.T.P. Ingeniería en su experiencia laboral en este tipo de trabajos.

**Tabla 4: Precio en €/m según tipo de viga doble T.**

Doble T	Tipo viga	H-70	H-90	H-100	H-120	H-150	H-180	H-200
	Precio	205	220	242	275	345	374	418

**Tabla 5: Precio en €/m según tipo de viga doble artesa.**

Artesa	Tipo viga	U-100-170	U-120-170	U-140-170	U-160-170	U-100-200	U-120-200	U-140-200	U-160-200
	Precio	625	725	775	890	750	870	930	1068

Además de esto, para posteriormente realizar el análisis de optimización, se deben de definir las etapas necesarias que una ingeniería realiza para entregar el proyecto constructivo al cliente. A cada uno de estas actividades se le asigna un valor estimado en horas de tiempo de trabajo (ver Tabla 6). Nótese que en algunos procedimientos las horas son multiplicadas por un coeficiente, esto quiere decir que están transformadas a horas de

ingeniero superior, siendo la equivalencia así: Ingeniero superior = 1; Ingeniero técnico = 0,66; Delineante = 0,33.

## 6.2. Análisis

El uso de la herramienta de trabajo desarrollada en este proyecto en comparación con el proceder habitual de una ingeniería técnica y trabajando sobre proyecto real ejecutado se han obtenido los siguientes tiempos medios de trabajo, tanto por el procedimiento habitual como con la ayuda de la herramienta diseñada:

**Tabla 6: Comparación en horas de trabajo.**

Etapas	Procedimiento habitual	Uso Aplicación
Toma de datos	2 x 0,66	2 x 0,66
Encaje geométrico (predimensionamiento)	5	1
Presupuesto provisional para el cliente	5	1
Encaje definitivo	2	1,5
Cálculo del tablero	5	1
Acciones horizontales y verticales	3	3
Cálculo infraestructura: pilas y estribos	16	16
Delineación de planos	32 x 0,33	32 x 0,33
Mediciones	8 x 0,66	8 x 0,66
TOTAL	52,2	40,66

A la vista de estos resultados se observa que el tiempo de trabajo siguiendo el procedimiento habitual sin la ayuda de una herramienta como la propuesta es mayor que el tiempo requerido para hacer lo mismo si se hubiera tenido en consideración el uso de la aplicación. Por tanto, la optimización se ve reflejada en un ahorro del 23,57% en el tiempo de trabajo.

## 7. Conclusiones

El trabajo presenta una aplicación fundamentada en una base de datos, dónde se recogen una serie de cálculos de tableros de puente, que mediante una búsqueda categorizada nos muestre la solución más rentable económicamente en base a los criterios establecidos. Del estudio realizado para luces de cálculo de hasta 40 m, se han considerado hormigones con una resistencia característica de 50 MPa para las vigas y de 30 MPa para la losa. De la misma manera, el límite elástico del acero pasivo será de 500 MPa, de 1637 MPa para los cables del pretensado.

Gracias al análisis realizado es evidente que el uso de esta aplicación en los trabajos de redacción de proyectos conlleva un ahorro importante en el tiempo de trabajo, alcanzando un porcentaje en torno al 23% reflejado, sobretodo, en las etapas correspondientes al predimensionamiento y cálculo del tablero, y en el presupuesto provisional para el cliente. Por tanto, se ha cumplido el objetivo de la optimización buscada en esta investigación. Como sugerencias para la continuación de este proyecto (futuras líneas de investigación), se propone el desarrollo de la una aplicación que permita obtener los planos de la estructura

introduciendo en los datos de entrada las variables que definen el tablero de vigas prefabricadas de hormigón.

## Referencias

- Billington, D.P. (2004). Historical perspective on prestressed concrete. *PCI journal*, 49 (1), 14-31.
- Caballero, J.A., & Grossman, I.E. (2007). Una revisión del estado del arte en optimización. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 4, 5-23.
- Denison, E., & Stewart, I. (2014). *Cómo leer puentes. Un apasionante recorrido a lo largo de la historia*. Madrid, España: Ediciones Akal, S.A.
- Escrig Pérez, C. (2010). *Evolución de los sistemas de construcción industrializados a base de elementos prefabricados de hormigón*. Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras a la Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Fernández Troyano, L. (2000). Aproximaciones a los puentes actuales. (pp. 235-273). En Grupo español de IABSE, *Tendencias en el Diseño de Puentes*
- G.Pulido, M.D., Sobrino, J.A., & Romo, J. (2000). *Tendencias en el Diseño de Puentes*. Grupo Español de IABSE.
- Hernández, S., Fontán, A.N., Díaz, J., & Marcos, D. (2010). VTOP. An improved software for design optimization of prestressed concrete beams. *Advances in Engineering Software*, 41(3), 415-421.
- Hue, F. (2007). Elementos prefabricados de hormigón en puentes. *Fabricación Investigación y Aplicaciones del Cemento y del Hormigón*, 79(908), 8.
- Manterola, J. (2006). *Puentes. Apuntes para su diseño, cálculo y construcción*. Madrid, España: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Martí, J.V., Gonzalez-Vidosa, F., Yepes, V., & Alcalá, J. (2013). Design of prestressed concrete precast road bridges with hybrid simulated annealing. *Engineering Structures*, 48, 342-352.
- Martí, J.V., Yepes, V., González-Vidosa, F., & Luz, A. (2014). Diseño automático de tableros óptimos de puentes de carretera de vigas artesa prefabricadas mediante algoritmos meméticos híbridos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(3), 145-154.
- Montrull, P.M., Olivares, G.S., Castejón, P.M. & Gómez, C.D. (2007). Análisis de estructuras: texto guía para prácticas. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Morán, D.P. (1983). Cálculo de tiempo óptimo de finalización de un proyecto de obras: Construcción de buques; implantación de sistemas de telecomunicación. *Revista de economía política*, 93, 195.
- Ministerio de Fomento (1998). *Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carreteras IAP-98*. Madrid, España: Fomento.
- Ministerio de Fomento (2008). *Norma de Construcción Sismorresistente: Puentes (NCSP-07)*. Madrid, España.
- Ministerio de Fomento (2008). *Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08*. Madrid, España: Fomento.
- Rollón de la Mata, J. (2011). *Influencia del grado de industrialización en la planificación de una obra*. Trabajo fin de máster, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.