

Calibración de herramientas heurística para la optimización del proceso de tesado de puentes atirantados

Calibration of heuristic tool parameters for the optimization of tensioning process of cable-stayed bridges

Carlos Gisbert Domenech^{*, a}, José A. Lozano-Galant^b, Ignacio Payá-Zaforteza^c y José Turmo Coderque^d

^a Prof. Asociado, Universidad Politécnica de Valencia, cargisdo@mes.upv.es

^b Prof. Contratado Doctor, Universidad de Castilla-La Mancha, joseantonio.lozano@uclm.es

^c Catedrático de Universidad, Universidad Politécnica de Valencia ICITECH, igpaza@upvnet.upv.es

^d Prof. Titular, Universidad Politécnica de Catalunya, BarcelonaTECH, jose.turmo@upc.edu

RESUMEN

El diseño y la materialización del proceso constructivo es uno de los aspectos más complicados en proyecto de los puentes atirantados. En la mayoría de las estructuras este proceso se define en base únicamente a la experiencia del proyectista sin optimizar el comportamiento estructural de ningún elemento del puente. En este artículo se propone la optimización del proceso de tesado de puentes atirantados mediante la utilización de algoritmos heurísticos. Uno de los principales inconvenientes de este tipo de herramientas es el hecho de que la solución depende, en mayor o menor medida, de los parámetros del algoritmo. Para determinar estos parámetros, tradicionalmente se realizan numerosas combinaciones aleatorias de estos parámetros. Sin embargo, y pese a su elevado coste computacional, este procedimiento no permite garantizar que se haya encontrado la combinación óptima de estos parámetros. Para solucionar este problema, el presente artículo propone la aplicación de las técnicas de diseño de experimentos para calibrar los parámetros de las herramientas de optimización heurística con un reducido coste computacional. La metodología propuesta se valida mediante la optimización del proceso de tesado de un puente atirantado.

ABSTRACT

The design of the construction process is one of the most complicated aspects of the cable-stayed bridge projects. In most structures, this process is defined based on the designer's experience without optimizing the structural behavior of any element of the bridge. To fill this gap, this paper proposes the use of heuristic tools for the optimization of the tensioning process of cable-stayed bridges. One of the main drawbacks of this kind of tools is the fact that the solution depends, to a greater or lesser extent, on the parameters of the algorithm. To determine these parameters, many random combinations are traditionally studied. However, despite its computational cost, this procedure does not guarantee that the parameters that statistically optimize the performance of the algorithm are found. To solve this problem, this paper proposes the use of the Taguchi's orthogonal arrays to calibrate the parameters of the heuristic optimization tools. The proposed methodology is validated by optimizing the tensioning process of a cable-stayed bridge.

PALABRAS CLAVE: Algoritmos heurísticos, Optimización, Matrices Ortogonales, Calibración.

KEYWORDS: Heuristic Algorithms, Optimization, Orthogonal arrays, Calibration.

1. Introducción

La optimización estructural a partir de herramientas heurísticas permite la resolución de problemas complejos de una forma eficiente. Sin embargo, a diferencia de la modelización matemática, esta técnica no permite garantizar en términos estadísticos que se ha alcanzado una solución la solución mejor solución óptima. Otro problema de estas técnicas es que la solución depende, en mayor o menor medida, de la calibración de los parámetros de la herramienta. Para definir los valores de estos parámetros tradicionalmente se realizan numerosas combinaciones aleatorias [1]. Desafortunadamente, este enfoque tiene dos problemas: (a) puede requerir un alto esfuerzo computacional, y (b) no se puede garantizar en términos estadísticos que se haya analizado la combinación óptima de los parámetros.

En este artículo se propone la utilización de las matrices ortogonales de Taguchi (orthogonal Arrays) [2] para calibrar los parámetros de una herramienta de optimización heurística (Descent Local Search, DLS), optimizando así su funcionamiento. Para validar la eficacia de este procedimiento se ha analizado la optimización del proceso de tensado de puentes atirantados construidos sobre apoyos provisionales. La metodología propuesta se caracteriza por su generalidad ya que se puede aplicar a cualquier herramienta heurística y a cualquier problema de optimización.

2. Modelización del proceso de tesado de puentes atirantados

Los puentes atirantados son una de las tipologías estructurales más complejas. De hecho, todos los mecanismos resistentes de estas estructuras están vinculados directamente con tracciones en los tirantes. Uno de los mayores retos en el

proyecto de este tipo de estructuras consiste en la materialización de un proceso constructivo que garantice la consecución de un estado de deformaciones y esfuerzos objetivo in servicio. Este estado se conoce como el Objective Service Stage, OSS [3].

La construcción por medio de apoyos provisionales es la técnica constructiva más económica para la realización de puentes atirantados. En esta técnica, primero se realiza el tablero sobre los apoyos provisionales por medio de procedimientos constructivos convencionales. Tras ello, se van tesando sucesivamente los tirantes de acuerdo a la secuencia de tesado. A lo largo de este proceso, la carga de los apoyos provisionales se transmite progresivamente a los tirantes mediante el levantamiento de los mismos. Finalmente, una vez introducidas las cargas muertas se alcanza el OSS.

En la literatura se han presentado diferentes enfoques para modelizar el proceso de tesado de puentes atirantados construidos sobre apoyos provisionales. Entre estos estudios destaca la modelización utilizando el principio de superposición de etapas “hacia atrás” [4] y “hacia delante” [5], así como la modelización “directa” [6]. En este artículo se ha utilizado este último enfoque para optimizar el tiempo de cálculo. A continuación, se presentan las principales hipótesis de este algoritmo.

2.1 Algoritmo de simulación directo

La principal característica del algoritmo de simulación directo, Direct Algorithm, DA [6] es que permite analizar cada etapa del proceso constructivo mediante un Modelo de Elementos Finito (MEF) independiente (esto es sin recurrir al principio de superposición). En estos modelos

se introduce el pretensado en los tirantes mediante deformaciones impuestas $\{\epsilon\}$.

La información de entrada del algoritmo es: (1) Geometría del puente atirantado incluyendo materiales y apoyos provisionales. (2) Descripción del OSS que se desea alcanzar en servicio. (3) Estrategia de tesado en las primeras N etapas (en términos de fuerzas o en deformaciones en los tirantes).

2.1.1. Simulación del levantamiento de apoyos

Durante el proceso de tesado de los tirantes las fuerzas se van transmitiendo de los apoyos provisionales a los tirantes. Este hecho hace que los apoyos provisionales acaben levantándose. La simulación de este fenómeno no es sencilla ya que debido al grado de hiperestaticidad de la estructura no se sabe cuándo se levantarán estos elementos. El DA modeliza el levantamiento de los apoyos mediante un Proceso Iterativo Local, en el que se modifica sucesivamente el esquema estructural del MEF de la etapa.

2.1.2. Consecución del OSS

Para asegurar la consecución del OSS al final del proceso de tesado utiliza las deformaciones en los tirantes en el OSS $\{\epsilon_{OSS}\}$ obtenidas a partir del siguiente sistema:

$$\{\epsilon_{OSS}\} = [MI]^{-1} \cdot (\{N_{OSS}\} - \{N_P\}) \quad (1)$$

donde $[MI]^{-1}$ representa la inversa de la matriz de influencia $[MI]$ que incluye las fuerzas en los tirantes producidas por deformaciones unitarias en cada uno de estos elementos, $\{N_{OSS}\}$ agrupa las fuerzas en los tirantes en el OSS, y $\{N_P\}$ las fuerzas pasivas en los tirantes cuando se introducen las cargas en la superestructura consideradas en el OSS.

De esta forma, las deformaciones introducidas en los tirantes de los MEFs de etapas anteriores se van substituyendo sucesivamente por el correspondiente valor del $\{\epsilon_{OSS}\}$.

3. Optimización del proceso de tesado

Para realizar la optimización del proceso de tesado se ha utilizado el algoritmo Descent Local Search, DLS. Este algoritmo se ha usado previamente en la literatura para el diseño de estructuras de hormigón armado [7] y de pasarelas mixtas [8].

Como cualquier otro algoritmo de optimización, el DLS tiene como objetivo definir los valores de las variables de diseño que minimizan una función objetivo para algunos parámetros fijos bajo ciertas restricciones. En este trabajo, se ha considerado el momento flector en la conexión entre el tablero y el pilono como la función objetivo a minimizar.

La variable de diseño que se actualiza sucesivamente a lo largo del proceso de optimización se refiere a la matriz de tesado, Tensioning Matrix [TM]. Esta matriz incluye el orden de tensión y las deformaciones que debe introducir el gato en obra en los tirantes. Estas deformaciones se representan como porcentajes del ϵ_{00} . El algoritmo de optimización debe obtener la de tesado que [TM] que minimiza la función objetivo.

Los parámetros que permanecen constantes a lo largo de la optimización están divididos en dos grupos. El primero de estos grupos se refiere a las siguientes características de los modelos de elementos finitos: geometría, propiedades de los elementos, cargas, y las condiciones de contorno. El segundo grupo de parámetros se refiere a las siguientes características del proceso de tesado: (1) Número máximo de variaciones aleatorias en el orden de resado, N_{max} : número máximo de veces que se modifica el orden de tesado de la [TM] en cada iteración del algoritmo de optimización. (2) Número máximo de operaciones de pretensado, PO_{max} ; número máximo de veces que operaciones de tesado se modifican en cada iteración, (3) Distancia máxima entre tirantes cuando se tensan sucesivamente, d_{max} , (4) Rango máximo de variación deformaciones de tesado, $\Delta\epsilon_{max}$:

porcentaje de tesado del ϵ_{oss} . Por ejemplo, si un cable se tensa al 70% de deformación en el OSS, la variación máxima permitida se fija en el 10%, la deformación del tirante del cable en la siguiente iteración sería cualquier número aleatorio entre 70% y 80%, (5) Número máximo de iteraciones a lo largo del proceso de optimización, i_{max} : se ha fijado en 10000.

Las restricciones que deben cumplirse durante todo el proceso de optimización se dividen en dos grupos. El primer grupo se refiere a la respuesta estructural del puente a lo largo del proceso de tesado. Las fuerzas internas generadas en los diferentes elementos estructurales no deben exceder la resistencia última de los materiales (Estado Límite Último, ELU). Además, los desplazamientos nodales no deben exceder los valores admisibles del Estado Límite de Servicio, ELS. El segundo grupo de restricciones se refiere a la definición de la estrategia de tesado. Esta estrategia debe cumplir las siguientes condiciones: (1) Instalación del cable: cada cable de sujeción debe tensarse al menos una vez. (2) Tensiones de tensión: la última operación de tensión de cada cable de suspensión debe corresponder con su ϵ_{oss} . (3) Secuencia de pretensado: no se puede tensar el mismo cable en dos operaciones de tensado consecutivas.

4. Diseño de experimentos para la calibración de los parámetros de la heurística

En cualquier algoritmo heurístico (como el DLS), la solución depende, en mayor o menor medida, de los parámetros de la herramienta. El número de posibles combinaciones de estos parámetros aumenta exponencialmente con el número de niveles analizados, lo que podría conducir a un abrumador número de posibilidades.

Esto es especialmente problemático cuando, como en el caso de los algoritmos heurísticos, se requieren muchas iteraciones para optimizar la solución de cada uno de estos procesos. Para resolver este problema, Gisbert et al. [9] ha propuesto recientemente un procedimiento sistemático para definir el nivel de los parámetros del algoritmo heurístico DLS basado en la teoría del diseño de experimentos (Design of Experiments, DOE).

La idea principal de esta metodología se refiere a la ortogonalidad entre los efectos de las variables (o factores) estudiados. De esta manera, se selecciona un subconjunto de experimentos para explotar la información sobre las características más importantes del problema estudiado, minimizando el número de análisis requeridos. Las características del subconjunto de experimentos están definidas por los arreglos ortogonales, que definen el nivel de cada parámetro a considerar en cada experimento. Estas matrices se han utilizado en este documento para calibrar los valores de los siguientes parámetros del algoritmo de optimización (N_{max} , PO_{max} , d_{max} y $\Delta\epsilon_{max}$).

5. Ejemplo de aplicación

En esta sección se ha optimizado el proceso de tesado del puente atirantado de Wuxi (China). Tras describir la estructura, se presentan los resultados de la optimización con y sin aplicar la metodología propuesta para la calibración de los parámetros del algoritmo de optimización.

5.1 Descripción de la estructura

El modelo del puente atirantado analizado en esta sección incluye un pilono de hormigón de 55 m de altura, y un tablero de hormigón de 180 m de longitud. La estructura incluye 19 tirantes anclados en abanico tal y como se muestra en la Figura 2. La separación de los anclajes de los tirantes en el tablero es de 9 m. El modelo de

elementos finitos está formado con elementos tipo barra (88 en el tablero, 40 en el pilono y 18 en los tirantes).

El puente se construye sobre 18 apoyos provisionales (situados debajo de cada uno de los tirantes en su conexión con el tablero).

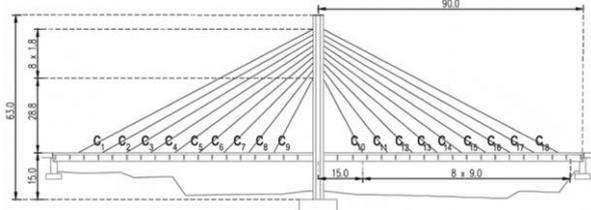


Figura 1: Geometría del puente (cotas en m).

El área, A , módulo de elasticidad, E , y la inercia, I , de los diferentes elementos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la estructura.

Elemento	E (GPa)	A (m ²)	I (m ⁴)
Tablero	206	1,72	4,2
Pilono	33,5	8,54	14,4
Tirantes	195	0,0072	0,0

Las deformaciones en los tirantes en el OSS se presentan en la Figura 2.

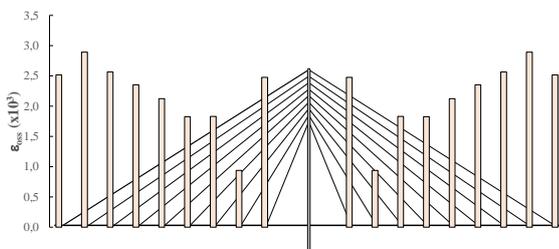


Figura 2: Deformaciones en los tirantes en el OSS.

5.2 Optimización del proceso de tesado

Para calibrar los niveles óptimos de los parámetros restantes en la estrategia de tesado, se estudiaron 3 niveles (N_{\max} [1, 3, 6], PO_{\max} [1, 2, 3], d_{\max} [1, 2, 3] y $\Delta\varepsilon_{\max}$ [10%, 50%, 80%]).

Un análisis factorial completo de estos parámetros requeriría 162 pruebas. Sin embargo, este número puede reducirse a 18 cuando se

considera la matriz L18 (que permite el análisis de 1 factor con 2 niveles y 7 factores con 3 niveles). Esta matriz se adaptó para tratar solo con los cuatro parámetros estudiados (A: N_{\max} , B: PO_{\max} , C: d_{\max} y D: $\Delta\varepsilon_{\max}$). El resto de los parámetros en la matriz (E, F, G y H) se consideran nulos para aumentar los grados de libertad de los residuos, para mejorar la robustez de los resultados estadísticos. Las características de los 18 experimentos realizados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Análisis realizados para la calibración de los parámetros (Tabla L18 adaptada).

Experimento	A	B	C	D
1	1	1	1	10
2	1	2	2	50
3	1	3	3	80
4	3	1	1	50
5	3	2	2	80
6	3	3	3	10
7	6	1	2	10
8	6	2	3	50
9	6	3	1	80
10	1	1	3	80
11	1	2	1	10
12	1	3	2	50
13	3	1	2	80
14	3	2	3	10
15	3	3	1	50
16	6	1	3	50
17	6	2	1	60
18	6	3	2	10

Para evaluar los efectos de los diferentes niveles de parámetros se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) con el programa Statgraphics. Los resultados de este análisis se detallan en la Tabla 3.

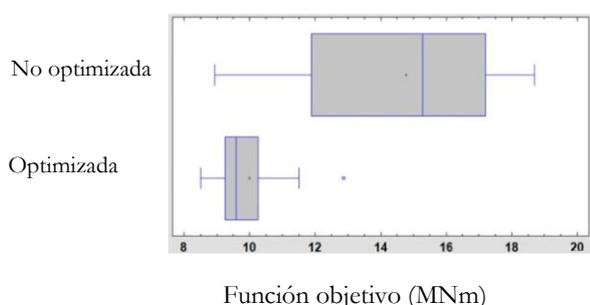
Tabla 3. Análisis de los niveles del proceso de tesado.

Parámetro	Niveles	P value	Mejor nivel
A: N_{max}	[1, 3, 6]	0,6367	Aleatorio
B: PO_{max}	[1, 2, 3]	0,0168	2
C: d_{max}	[1, 2, 3]	0,6487	Aleatorio
D: $\Delta\varepsilon_{max}$	[10%, 50%, 80%]	0,0024	10%

Tal y como se indica en Box et al. [10], el valor p permite determinar qué parámetros son estadísticamente significativos (aquellos con valor $p < 0,05$). Esta tabla muestra que solo dos parámetros (B: PO_{max} , con un valor p de 0,0168 y D: $\Delta\varepsilon_{max}$, con un valor p de 0,0024) son estadísticamente significativos. Del análisis de los efectos de estos parámetros se puede concluir que sus niveles óptimos son B: $PO_{max} = 2$ y D: $\Delta\varepsilon_{max} = 10\%$. El resto de los parámetros A: N_{max} y C: N_{max} no son estadísticamente significativos y, por lo tanto, al no tener un nivel óptimo se ha definido de forma aleatoria.

Tanto la secuencia de tesado como las fuerzas introducidas por los gatos en obra se calculan mediante el DSL para minimizar la deformación del pilono en la conexión con del tablero según dos operaciones estrategias: (1) Sin calibrar los parámetros de la herramienta heurística y (2) Optimizando estos parámetros (según los niveles definidos en la Tabla 3). Los diagramas de caja y bigotes de 10 simulaciones de cada una de estas estrategias se presentan en la Figura 3.

Figura 3: Diagramas de caja y bigotes.



El análisis de la Figura 3 se muestra que los resultados de la función objetivo mejoran significativamente (menores valores del

momento flector en la conexión entre el pilono y el tablero) cuando los parámetros se calibran con la metodología propuesta. De hecho, se obtienen menores medias y diagramas más concentrados.

La envolvente en ELU de los momentos flectores en el tablero en ambas estrategias se presenta en la Figura 4. Tal y como se muestra en esta figura la calibración de los parámetros del algoritmo de optimización permite la obtención de envolventes más simétricas con menores momentos flectores en la conexión del pilono y el tablero.

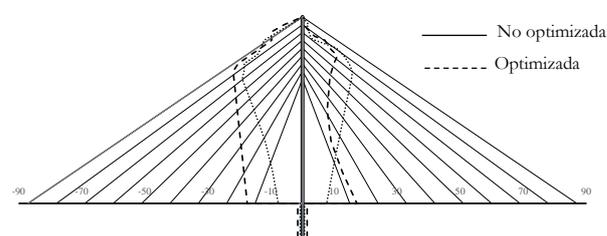


Figura 4: Envolvente de momentos flectores en las estrategias de optimización (MNm).

5. Conclusiones

Tradicionalmente, los parámetros de las herramientas de optimización heurística se seleccionan mediante un proceso de prueba y error. El principal inconveniente de esta metodología es que no puede garantizar la calidad de los resultados de forma estadística. En este artículo, se propone la aplicación de las matrices ortogonales de Taguchi para calibrar los parámetros de una herramienta de optimización heurística (el algoritmo Descent Local Search DLS).

Esta metodología a la optimización del tensado proceso de puentes atirantados construidos sobre apoyos provisionales. Para ilustrar las ventajas de la calibración propuesta se realiza la optimización de una estructura real. La calibración propuesta proporciona valores más robustos en términos estadísticos de la función

objetivo (con menor media y menor desviación estándar) con un reducido coste computacional.

Es importante resaltar la generalidad de la metodología propuesta, ya que puede aplicarse a otros problemas y herramientas de optimización.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo proporcionado por el Ministerio de Economía y competitividad, por los proyectos de investigación BIA2013-47290-R, BIA2017-86811-C2-1-R y BIA2017-86811-C2-2-R financiados con fondos FEDER.

Referencias

- [1] García-Segura, T., Yepes, V., Martí, J., & Alcalá, J. Optimization of concrete I-beams using a new hybrid glowworm swarm algorithm. *Latin American Journal of Solids and Structures*. (2014) 11 1190–1205.
- [2] Taguchi, G., Chowdhury, S., & Taguchi, S. *Robust engineering: Learn how to boost quality while reducing costs & time to market*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [3] Jorquera-Lucerga, J. J., Lozano-Galant, J. A., & Turmo, J. Structural behavior of non-symmetrical steel cable-stayed bridges. *Steel and Composite Structures* (2016) 20(2) 447–468.
- [4] Lozano-Galant, J. A., Payá-Zaforteza, I., Xu, D., & Turmo, J. Analysis of the construction process of cable-stayed bridges built on temporary supports. *Engineering Structures*, (2012) 40 95–106.
- [5] Lozano-Galant, J. A., Payá-Zaforteza, I., Xu, D., & Turmo, J. Forward algorithm for the construction control of cable-stayed bridges built on temporary supports. *Engineering Structures* (2012) 40 119–130.
- [6] Lozano-Galant, J. A., Xu, D., Payá-Zaforteza, I., & Turmo, J. Direct simulation of the tensioning process of cable-stayed bridges. *Computers & Structures* (2013) 121, 64–75.
- [7] Carbonell, A., Gonzalez-Vidoso, F., & Yepes, V. (2011). Design of reinforced concrete road vaults by heuristic optimization. *Advances in Engineering Software*, 42, 151–159.
- [8] Yepes, V., Dasí-Gil, M., Martínez-Muñoz, D., López-Desfilis, V., & Martí, J. Heuristic techniques for the design of steel-concrete composite pedestrian bridges. *Applied Sciences* (2019).
- [9] Gisbert, C., Lozano-Galant, J.A., Payá-Zaforteza, I., Turmo, J. Calibration of the descent local search algorithm parameters using orthogonal arrays. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, (2020), DOI: 10.1111/mice.12545.
- [10] Box G., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. *Statistic for experimenters*, Hoboken, NJ: Wiley, 2005.