

Parametrización de tres prototipos de puente vial

Parameterization of three road bridge prototypes

Lore Mutiloa Albizuri^a, Mario Guisasola Ron^b

^aIngeniera de Caminos, Canales y Puertos. ANTA IC. Ingeniera de Proyectos. lma@anta-ic.com

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ANTA IC. Director. mgr@anta-ic.com

RESUMEN

El diseño de puentes paramétricos responde de manera metódica a las condiciones del entorno, generando soluciones innovadoras basadas en principios técnicos y funcionales. Los tres prototipos analizados son puentes bijnávena metálicos parametrizados para calzadas de 4 a 15 metros y luces de 20 a 66 metros. El puente Von Mises sigue la teoría de vigas biapoyadas, el Monocontentio refleja la ley de momentos de vigas empotradas-apoyadas, y el Bicontentio la de vigas biempotradas. Se incluyen ejemplos contruidos de los prototipos Monocontentio y Bicontentio para uso vial.

ABSTRACT

The design of parametric bridges methodically responds to environmental conditions, generating innovative solutions based on technical and functional principles. The three analyzed prototypes are twin-girder metal bridges, parameterized for roadways between 4 and 15 meters wide and spans from 20 to 66 meters. The Von Mises bridge follows the theory of simply supported beams, the Monocontentio reflects the bending moment law of embedded-supported beams, and the Bicontentio represents the bending moment law of beams fixed at both ends. Built examples of the Monocontentio and Bicontentio prototypes for road use are included.

PALABRAS CLAVE: empotramiento, canto variable, puente bijnávena, parametrización, estética.

KEYWORDS: embedding, variable depth, twin-girder bridge, parameterization, aesthetics.

1. Introducción

El encaje de un puente en un lugar depende de múltiples factores. La esencia del lugar viene dada por los elementos que la componen, su geometría, y el uso que le dan los seres vivos. Algunos lugares son tan únicos y especiales que una mínima actuación puede acabar con ellos. Otros pueden reforzar su carácter con una actuación afortunada. Otros lugares son totalmente anodinos, y una exitosa actuación puede convertirlos en algo especial. Por último,

existen lugares que han sido perjudicados por actuaciones previas, y deben ser recompuestos.

El diseño del puente, y el modo de abordar su encaje en una ubicación originan en algunas ocasiones puentes emblemáticos. Conseguir captar la esencia del lugar, y crear un buen puente es una tarea compleja, y subjetiva. Sin embargo, sí es posible establecer unas reglas básicas que permitan un adecuado encaje geométrico del puente en el lugar.



Figura 1. Paisaje, simplicidad y forma estructural.

Los prototipos de puentes aquí presentados resultan novedosos y realmente útiles porque aúnan en un diseño único sistematización, parametrización, eficiencia estructural y elegancia. La sistematización supone ahorrar tiempo y costes de ingeniería; la parametrización permite determinar la geometría a partir de unas pocas variables; la eficiencia se logra adoptando los esfuerzos de sollicitación como silueta de la estructura y la elegancia se persigue con formas básicas que responden íntegramente a los retos del puente.

2. Fundamentos de diseño

El diseño de los prototipos objeto de este trabajo se basa en tres fundamentos básicos: integración en el paisaje, búsqueda continua de la simplicidad y empleo de formas unitarias que emanan del comportamiento estructural.

El paisaje se interpreta como una geometría a respetar, completar o transformar. La obra es una forma geométrica que se combina con el paisaje; por eso se presta especial atención a los puntos de conexión de ambos elementos. El entorno no es únicamente un pedestal, sino el protagonista que determina la forma del puente.

La búsqueda continua de la sencillez se logra eliminando paso a paso todo elemento superfluo hasta lograr una solución que da respuesta a todos los requisitos de una manera integral. Los elementos que permanecen son esenciales y el encaje entre ellos determina los detalles que imprimen carácter a la obra y

transmiten que esta ha sido diseñada para el usuario y construida para durar.

La conexión del puente con el terreno define su esquema estructural y los gráficos de esfuerzos inspiran siluetas eficientes que se incorporan muy bien al entorno natural, pues se basan en conceptos resistentes simples y fundamentales.

3. Forma

La génesis de la forma conlleva necesariamente la comprensión del fenómeno resistente de modo que pueda ser sintetizado y concretado en una silueta que resuelva la necesidad de cruce con el mínimo posible de recursos. Existen cuatro maneras de lograr la eficiencia deseada: minimizar los esfuerzos de flexión obteniendo un estructura que trabaje por forma, descomponer la estructura en elementos comprimidos y traccionados, suprimir el material en zonas poco solicitadas y, por último, acompañar la forma del puente a los esfuerzos de sollicitación.

Se han construido diversos puentes viga que adoptan los esfuerzos de sollicitación de la estructura como silueta. Conociendo el esquema estructural básico, las fuerzas que actúan sobre la estructura se convierten en fuente de inspiración. Los diagramas de esfuerzos son expresiones visuales de la estructura. La adopción de estos gráficos como silueta estructural aumenta su eficiencia, muestra su esquema resistente y

genera formas fluidas y orgánicas que presentan una buena integración en la naturaleza.

4. Geometría

La geometría del paisaje establece las condiciones de apoyo que definen el esquema estructural.

La topografía del emplazamiento de puentes de un único vano puede encuadrarse en cinco geometrías básicas:

- Talud tendido en ambas márgenes.
- Muro vertical en ambos lados.
- Talud tendido a un lado, y muro vertical en el lado opuesto.
- Talud quebrado en ambas márgenes.
- Talud quebrado en un lado, y muro en el opuesto.

Cuando existe un talud, el puente se funde suavemente con el terreno, el canto del puente disminuye paulatinamente, y el empotramiento surge de manera natural disponiendo un vano auxiliar de canto variable en el extremo.

En el caso de existir un muro vertical, la conexión del dintel con el terreno es mucho más abrupta, y la disposición de un vano de empotramiento no resulta geométricamente sencilla. Un apoyo simple se estima más adecuado para una topografía vertical en el desembarco.

Un talud que corona un muro vertical genera igualmente la posibilidad de un empotramiento, y la existencia de un muro vertical supone una singularidad que puede ser reforzada por la geometría de la propia estructura.

De la combinación de tres posibles conexiones de la estructura con el terreno (muro vertical, talud tendido, talud quebrado), y si existe simetría o no, surgen cinco prototipos de puentes.

- **Puente Von Mises:** estructura biapoyada de canto variable, cuyas

condiciones de contorno ideales corresponden a sendos muros verticales.

- **Puente Monocontentio:** estructura empotrada - apoyada, ideada para ubicar en un terreno asimétrico con talud en un lado, y muro vertical en el opuesto.
- **Puente Monocontentio Sinus:** es una variante de la anterior, en la que el empotramiento se resalta con unos acuerdos circulares. El acuerdo interior se combina muy bien con la existencia de un muro vertical inferior.
- **Puente Bicontentio:** este prototipo resulta adecuado cuando existen taludes tendidos en ambas márgenes.
- **Puente Bicontentio Sinus:** es una variación del anterior, y se adapta muy bien a geometrías simétricas que corresponden a muro vertical inferior, y talud superior.



Figura 2. Prototipos de puentes prediseñados.

5. Estructura

La tipología adoptada para los tres prototipos analizados corresponde a la de un puente bijácena metálico constituido por dos vigas cajón principales, solidarizadas por viguetas transversales, sobre las que se hormigona una losa de tablero que sirve de apoyo al pavimento. Las vigas principales pueden apoyarse en dos, tres, o cuatro ejes de apoyo según el puente sea isostático o se empotre en uno, o en ambos estribos.

El empotramiento se establece disponiendo dos ejes de apoyo en cada estribo: uno en compresión y otro en tracción.

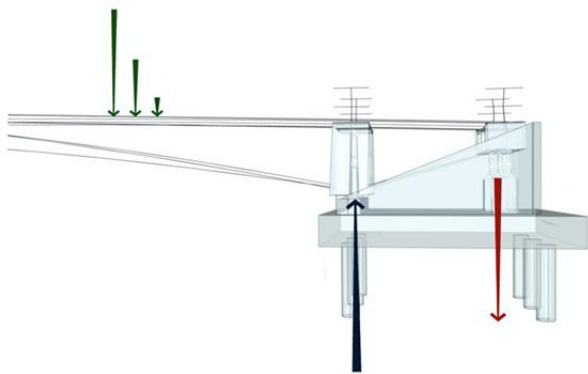


Figura 3. Empotramiento en estribos.

El apoyo en tracción corresponde a una articulación de doble bulón, que impide los movimientos verticales, y permite los horizontales. Estos elementos se ubican en el interior de unos estribos, de geometría muy básica, diseñados para quedar ocultos en el terreno.



Figura 4. Articulación de doble bulón.

Los componentes estructurales básicos de los prototipos son los siguientes:

- Dos vigas cajón longitudinales.

- Unas viguetas transversales que solidarizan las vigas longitudinales, separadas una distancia entre dos y tres metros.
- Los rigidizadores transversales de las vigas cajón se encuentran alineados con las viguetas transversales, constituyendo con estas unos marcos equidistantes que impiden la distorsión angular y el pandeo lateral de las vigas longitudinales. La geometría trapezoidal de los rigidizadores es el patrón interior que genera la forma de los cajones longitudinales.
- Unas placas de anclaje con doble bulón en los extremos de las vigas aseguran su empotramiento, soportando unas reacciones verticales de sentido ascendente. La disposición de un doble bulón permite los movimientos longitudinales sin coacción alguna.
- La losa de hormigón armado del tablero se apoya en las viguetas transversales y asegura la estabilidad lateral del puente.

6. Dimensiones de los prototipos formulados y optimizados

Con el objetivo de parametrizar las principales dimensiones de los prototipos óptimos desde los puntos de vista estructural y funcional, se ha llevado a cabo un proceso de formulación. Para definir un problema de optimización, es necesario considerar los siguientes elementos:

- Las **variables de diseño**, o elementos cuyo valor es susceptible de ser modificado a lo largo del proceso de optimización. Los diferentes valores que pueden adoptar las variables de diseño para unos parámetros dados, definen un conjunto denominado espacio de soluciones.

- Unos **parámetros** o elementos de valor constante y que, por tanto, no varían a lo largo del proceso de optimización.
- Unas **restricciones** cuyo cumplimiento es imprescindible para que una solución del problema pueda considerarse realmente como tal porque:
 - a. cumple las condiciones de seguridad, nivel de servicio y durabilidad que establece la normativa vigente.
 - b. tiene un sentido físico o geométrico. Las soluciones que cumplen las restricciones reciben el nombre de soluciones factibles y las que no las cumplen son conocidas como no factibles.

- Una o varias **funciones objetivo** que son las funciones a optimizar.

En el caso de los puentes Von Mises, Monocontentio y Bicontentio:

- Los espesores de las chapas y los cantos de las vigas son las **variables de diseño**.
- La luz (L) y el ancho del puente (b) son los **parámetros**.
- Los Estados Límites Últimos y de Servicio a verificar constituyen las **restricciones**.
- El peso del acero del puente o las emisiones de CO2 asociadas a la construcción del puente ha sido la **función objetivo**.

6.1 Variables de diseño

Las variables de diseño son diferentes para cada prototipo a optimizar en función de sus características intrínsecas. Se reflejan seguidamente las variables consideradas para cada puente.

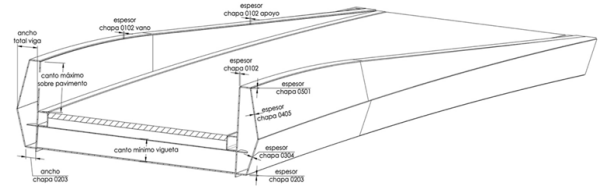


Figura 5. Prototipo Von Mises.

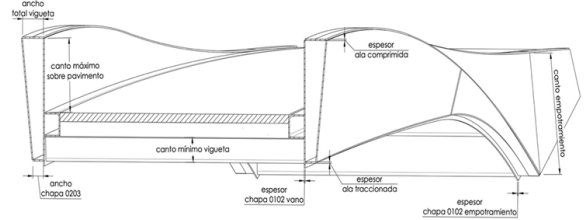


Figura 6. Prototipos Monocontentio y Bicontentio.

6.2 Formulación

A continuación, se refleja la formulación obtenida para las variables más representativas de los distintos prototipos.

6.2.1. Canto de las viguetas transversales

- Prototipo Von Mises:

$$h_{vig}(x, y) = 650 \left(\frac{L-12}{36} \right)^{0.7} + 100 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.8} + 250$$

- Prototipo Monocontentio:

$$h_{vig}(x, y) = 550 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{1.5} + 50 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 150 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{1.5} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 250$$

- Prototipo Bicontentio:

$$h_{vig}(x, y) = 650 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{1.1} + 50 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 50 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{1.1} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 250$$

6.2.2. Altura máxima sobre pavimento

- Prototipo Von Mises:

$$h_{m\acute{a}x}(x, y) = 400 \left(\frac{L-12}{36} \right)^2 + 400 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} - 350 \left(\frac{L-12}{36} \right)^2 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 900$$

- Prototipo Monocontentio:

$$h_{m\acute{a}x}(x, y) = 700 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{0.3} + 250 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} - 200 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{0.3} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 550$$

- Prototipo Bicontentio:

$$h_{m\acute{a}x}(x, y) = 150 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.5} + 350 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} - 100 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.5} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 550$$

6.2.3. Canto empotramiento

- Prototipo Monocontentio:

$$h_0(x, y) = 1300 \left(\frac{L-22}{44} \right)^1 + 900 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.6} + 200 \left(\frac{L-22}{44} \right)^1 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.6} + 2300$$

- Prototipo Bicontentio:

$$h_o(x, y) = 1800 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.5} + 200 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.8} + 900 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.5} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.8} + 1100$$

6.2.4. Espesor de alma en centro de vano

- Prototipo Von Mises:

$$t_{wcv}(x, y) = 2 \left(\frac{L-12}{36} \right)^6 + 18 \left(\frac{L-12}{36} \right)^6 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.8} + 10$$

- Prototipo Monocontentio:

$$t_{wcv}(x, y) = 6 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{1.3} + 6 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{1.3} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{1.5} + 10$$

- Prototipo Bicontentio:

$$t_{wcv}(x, y) = 4 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.5} + 4 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} - 2 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.5} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 10$$

6.2.5. Espesor de alma empotramiento

- Prototipo Monocontentio:

$$t_e(x, y) = 12 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{1.2} + 12 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.6} + 18 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{1.2} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.6} + 28$$

- Prototipo Bicontentio:

$$t_e(x, y) = 14 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.5} + 8 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.8} + 2 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.5} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.8} + 10$$

6.2.6. Espesor de alas

- Prototipo Von Mises:

$$t_a(x, y) = 12 \left(\frac{L-12}{36} \right)^2 + 14 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.7} + 22 \left(\frac{L-12}{36} \right)^2 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.7} + 20$$

- Prototipo Moncontentio:

$$t_a(x, y) = 10 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{0.3} + 14 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 14 \left(\frac{L-22}{44} \right)^{0.3} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.5} + 36$$

- Prototipo Bicontentio:

$$t_a(x, y) = 6 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.6} + 12 \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.4} + 2 \left(\frac{L-20}{46} \right)^{0.6} \left(\frac{b-4}{11} \right)^{0.4} + 26$$

7. Realizaciones

El **punto Bicontentio en Martutene** presenta unos parámetros de diseño basados en la simplicidad y expresividad de la estructura. El puente presenta una luz de 51.5 metros y una longitud total de 64.4 metros. La anchura del tablero mide 15.8 metros correspondientes a una calzada de 7 metros, un carril bici de 2.5 metros, y dos aceras de 2.5 y 3.5 metros.



Figura 7. Puente bicontentio Martutene.

Para transformar el **enlace de Allerru** en rotonda elevada sobre la N-I, se proyectan 2 puentes **Monocontentio** que pretenden responder de forma unitaria a las cuestiones previamente planteadas: puentes carreteros de gálibo estricto, mínima afección a la N-I durante las obras, economía, e integración en el entorno. Cada viga principal se encuentra empotrada en el estribo oeste y simplemente apoyada en el este, salva un vano de 38 metros y presenta una longitud total de 44.2 metros.



Figura 8. Rotonda Elevada Allerru sobre la N-I.

Las 2 vigas principales del puente Sur presentan una separación de 11.7 m entre almas interiores de cajón. La plataforma de paso presenta dos carriles de 4 m; sendos arcenes de 1 m; zunchos de 0.55 m para alojar los pretiles de hormigón y sendos sobrecanchos de 0.275 m en los extremos para alojar servicios.

Las 2 vigas principales del puente Norte presentan una separación de 13 m entre almas interiores de cajón. La plataforma de paso corresponde a una acera de 2 m, en el lado norte; 2 carriles de 4 m; arcenes de 1 m en el sur y 0.5 metros en el norte; zunchos de 0.55 m en el sur y 0.625 m en el norte, para alojar un pretil de hormigón y uno metálico, y un sobre ancho de 0.275 m en el sur para servicios.



Figura 9. Puente Norte Rotonda Elevada Allerru sobre la N-I.

8. Conclusiones

El diseño de los prototipos Von Mises, Monocontentio, y Bicontentio se basa en tres fundamentos básicos:

- Integración en la geometría del entorno.
- Búsqueda continua de la sencillez.
- Geometrías que emanan del comportamiento estructural.

La silueta del puente Von Mises se basa en la gráfica del criterio de comparación de Von Mises de una viga biapoyada de inercia constante, solicitada por una carga lineal uniformemente repartida, la del prototipo Monocontentio en la ley de momentos de una viga empotrada-apoyada y la del puente Bicontentio en la gráfica de flectores de una viga biempotrada.

A continuación, se indican las principales características de estos prototipos:

- Canto variable basado en el comportamiento estructural del puente.
- Geometría adaptada al terreno y empotramiento en estribos ocultos.
- Expresividad de la estructura mediante el alabeo de chapas.

Un diseño basado en la topografía del lugar da lugar a puentes bien adaptados a su entorno y un alzado basado en la ley de momentos permite optimizar el acero. Su novedad reside en aunar en un diseño único sistematización, parametrización, eficiencia estructural y elegancia. Ello permite ahorrar

costes de ingeniería y simplificar el proyecto con unos diseños elegantes, reflejo de su comportamiento estructural.

Agradecimientos

A Denis Stalbin, alumno en prácticas en ANTA IC, por su colaboración en la formulación de los prototipos viales, e Ignacio Payá Zaforteza, de la Universitat Politècnica de València, por su contribución en la definición del problema de optimización.

Referencias

- [1] Guisasola Ron, Mario (2021): *Desarrollo de nuevas formas parametrizadas para pasarelas eficientes y elegantes*. Thesis, Universitat Politècnica de València. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil - Departament d'Enginyeria de la Construcció i de Projectes d'Enginyeria Civil, Valencia (Spain).
- [2] Guisasola Ron, Mario (2021). *Design Philosophy Based on the Span's Internal Forces*. Structural Engineering International.
- [3] Guisasola, Mario (2022): *Standardization of Three Efficient Footbridges: Von Mises, Monocontentio and Bicontentio Prototypes*. Presented at: Footbridge 2022: Creating Experience, Madrid, Spain, 07-09 September 2022.
- [4] Guisasola, Mario (2021): *Design Philosophy Based on the Span's Internal Forces*. In: Structural Engineering International, v. 31, n. 4 (October 2021), pp. 1-12.
- [5] Guisasola, Mario (2014): *Pre-Designed Bridges*. Presented at: IABSE Symposium: Engineering for Progress, Nature and People, Madrid, Spain, 3-5 September 2014, pp. 1338-1344.
- [6] Guisasola, Mario (2014): *Pre-designed Footbridges*. Presented at: Footbridge 2014 - Past, Present & Future, London, 16-18 July 2014.