

# CARACTERIZACIÓN DE LA PASARELA BICONTENTIO.

*Characterization of the Bicontentio Footbridge.*

Mario Guisasola Ron

Ingeniero de Caminos. ANTA Ingeniería Civil, SLP

## RESUMEN

La pasarela Bicontentio es un puente metálico parametrizado cuyas principales características estructurales son su canto variable basado en los esfuerzos de sollicitación, y el empotramiento en ambos estribos. Su uso se considera adecuado para topografías simétricas con taludes en ambas márgenes; luces situadas en un rango de 20 a 66 metros; y anchuras entre 1.75 y 4.5 metros. Se compara el comportamiento estructural de la pasarela Bicontentio con otras tipologías de viga metálica.

## ABSTRACT

The Bicontentio footbridge is a parameterized steel bridge whose main structural characteristics are its shape based on the bending moment diagram, and the restraining abutments. Its use is considered suitable for symmetric topographies with slopes on both margins; spans in a range of 20 to 66 meters; and widths between 1.75 and 4.5 meters. The structural behavior of the Bicontentio footbridge is compared with other steel beam typologies.

**PALABRAS CLAVE:** empotramiento, canto variable, parametrización, pasarela, estética.

**KEYWORDS:** restraining, variable depth, parameterization, bridge, footbridge, aesthetic.

## 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 de la pasarela, 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 [1]. Sin embargo, sí es posible establecer unas reglas básicas que permitan un adecuado encaje geométrico del puente en el lugar.

Habitualmente, el diseño y proyecto de pasarelas presenta dos modalidades

diferenciadas. La primera corresponde a puentes emblemáticos, y la segunda a pasarelas repetitivas. En el proyecto de los puentes emblemáticos prima la singularidad, la preocupación por el entorno, y el cuidado por el detalle. En muchas ocasiones, la principal preocupación de los puentes corrientes es la economía de la obra a corto plazo, y la productividad del equipo de diseño [2].

Es posible adoptar una vía intermedia mediante la utilización de prototipos prediseñados de puentes parametrizados. Su uso no puede asegurar la creación de un puente emblemático, pero sí un correcto encaje geométrico del puente, y una elevada productividad en la fase de proyecto.

Mario Guisasaola ha diseñado una serie de prototipos de puentes de un único vano, cuyo uso depende de la geometría del emplazamiento. A continuación se describen las características de uno de los prototipos: la pasarela Bicontentio [2].

## 2. Filosofía de diseño.

La filosofía de diseño de los prototipos prediseñados se basa en cinco fundamentos básicos:

- Integración en la geometría del entorno.
- Búsqueda continua de la sencillez.
- Diseño basado en una geometría que emana del comportamiento estructural.
- Formas unitarias y rotundas.
- Detalles perdurables que imprimen carácter a la obra.

La geometría del lugar delimita el puente, y lo enmarca. Un muro vertical es un límite abrupto que se convierte estructuralmente en un apoyo simple. Un talud inclinado enmarca suavemente al puente, y la estructura puede fundirse con el terreno mediante un empotramiento en un estribo que queda oculto; así la estructura parece surgir directamente del terreno. Una simetría del terreno se convierte en una simetría de la estructura, una asimetría del

lugar en una asimetría del puente. La topografía de la ubicación establece las condiciones de contorno que configuran el carácter de la estructura.

La actuación se basa en preservar los usos actuales del lugar, y fundirse con el mismo analizando detalladamente su geometría, y los puntos de conexión con el puente (estribos). En algunas ocasiones estos elementos sirven para sellar la estructura al terreno realizando ambos; en otras la propia estructura parece surgir directamente del terreno quedando los elementos de conexión totalmente ocultos.

El proceso de diseño se basa en una permanente búsqueda de la sencillez, eliminando paso a paso todo elemento superfluo. Este proceso de búsqueda de la sencillez es complejo pues deben analizarse de manera holística todos los elementos desde un punto de vista funcional, constructivo, estético, estructural y económico, para posteriormente estilizarlos, integrarlos y en algún caso ocultarlos. Si algo puede ser sencillo, ¿por qué hacerlo difícil? Si una elección de diseño da lugar a un elemento complejo de definición o construcción, se adopta una nueva visión que lo evite. El proceso de diseño puede llegar a ser complejo, pero nunca debe serlo su resultado.

Se adoptan esquemas estructurales básicos, cuyo funcionamiento sea evidente, y se trata de dotar al puente del menor número de elementos posibles. Muchos de estos elementos cumplen varias funciones para minimizar así su número. La existencia de pocos elementos permite fijar mejor la atención en los que permanecen [3].

Las condiciones de contorno geométricas impuestas por el lugar establecen el esquema estructural del puente. Conocido el esquema estructural básico, los esfuerzos que solicitan a la estructura sirven de inspiración. Las gráficas de momentos, cortantes o axiles son una expresión visual de la estructura que ayudan a interpretarla. Adoptar estas gráficas como forma de la



**Figura 1. Empotramiento. Pasarela Mikel Laboa en San Sebastián. 2009. Diseño: ANTA. Fotografía: Idoia Unzurrunzaga.**

estructura, incrementa su eficiencia, pues la forma sigue a la función; evidencia su esquema estructural; y genera formas con un aspecto fluido de fácil encaje en la naturaleza.

La geometría de los prototipos es rotunda, de fácil lectura, y presenta un carácter unitario. No debe ser la concatenación de múltiples elementos sin una jerarquía clara. Es necesario evitar la cacofonía. El mensaje que transmita el puente sobre sí mismo debe ser claro y preciso. Los elementos que componen el puente deben jerarquizarse (estructura longitudinal, transversal, estribos, pavimento, barandilla, drenaje, iluminación, ...) para apoyarse unos en otros sin disputa, y transmitir la idea de una forma única y fundamental.

Para invitar a su uso, la forma del puente es percibida por el peatón: el recorrido peatonal atraviesa la forma del puente, de modo que los detalles pueden ser percibidos por el usuario. La calidad de los detalles logra imprimir carácter a una obra: uniones de miembros estructurales, conexión dintel - estribo, fijación de barandilla a estructura, acceso a elementos ocultos como el cableado eléctrico, integración del drenaje, prolongación del recorrido en el terreno, iluminación, replanteo del pavimento, ... El buen encaje tectónico de estos elementos da una idea

al usuario de que la obra ha sido pensada para poder ser construida, y para durar. Los buenos detalles son simples, ingeniosos, ejecutables, robustos y perdurables.

### **3. Geometría básica del terreno.**

La topografía del emplazamiento de pasarelas 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.
- Taludes tendidos en ambas márgenes. [2].

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 (figura 1).



**Figura 2. Apoyo simple. Pasarela río Oria en Ordizia. 2010. Diseño: ANTA. Fotografía: Idoia Unzurrunzaga.**

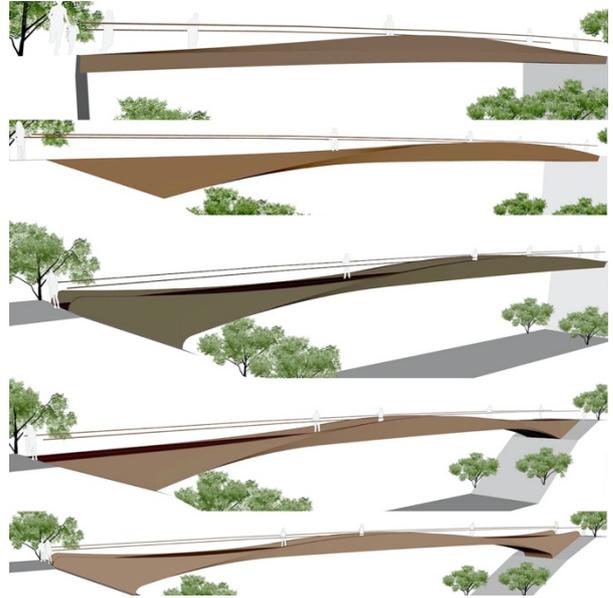
En el caso de existir un muro vertical, la conexión del dintel con el terreno es mucho más abrupta, y la disposición de un vano de empotramiento no resulta geoméricamente sencilla. Un apoyo simple se estima más adecuado para una topografía vertical en el desembarco (figura 2).

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 pasarelas (figura 3).

- Pasarela Von Mises: estructura biapoyada de canto variable, cuyas condiciones de contorno ideales corresponden a sendos muros verticales.
- Pasarela Monocontentio: estructura empotrada - apoyada, ideada para ubicar en un terreno asimétrico con talud en un lado, y muro vertical en el opuesto.
- Pasarela 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.
- Pasarela Bicontentio: este prototipo resulta adecuado cuando existen taludes tendidos en ambas márgenes.

- Pasarela 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 3. Prototipos Von Mises, Monocontentio, Monocontentio Sinus, Bicontentio, y Bicontentio Sinus.**

### 3. Geometría básica del terreno.

La pasarela Bicontentio es una estructura empotrada en ambas márgenes, mediante sendos vanos laterales de pequeña dimensión, que dan lugar a una viga continua de tres vanos. La viga continua presenta unos esfuerzos de flexión, y una deformación vertical muy inferiores a los de una viga simplemente apoyada. La ley de momentos de la viga continua bajo cargas uniformemente repartidas (figura 4), genera la silueta del puente Bicontentio. La forma del puente proviene directamente de su trabajo estructural como viga continua flectada.

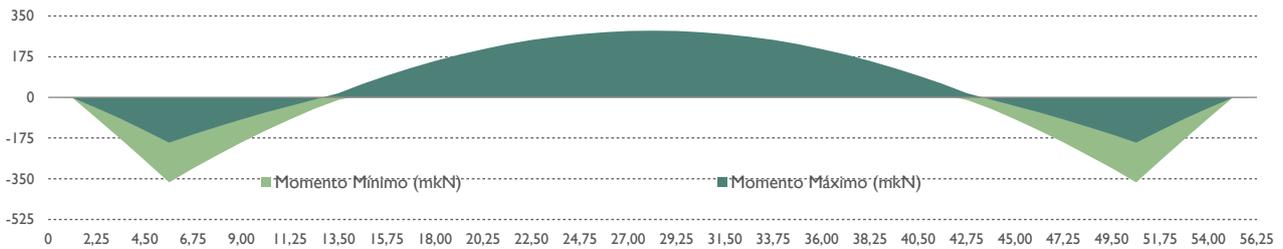


Figura 4. Envolvente de momentos de Pasarela Bicontentio de 45 metros de luz, y tres metros de anchura.

La variación formal sinuosa del prototipo Bicontentio es la pasarela Bicontentio Sinus.

El puente está constituido por dos vigas cajón laterales solidarizadas transversalmente por unas viguetas metálicas sobre las que se hormigona una losa de hormigón armado que sirve de soporte al pavimento (figura 5).

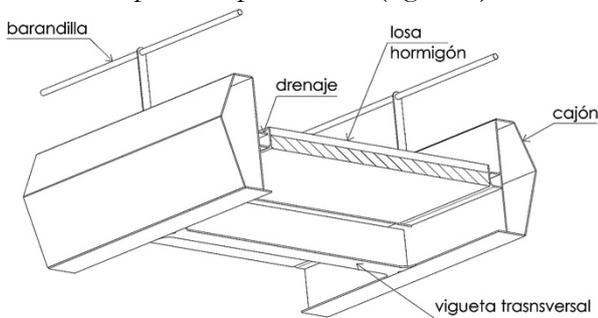


Figura 5. Sección transversal tipo.

La sección resistente de las vigas cajón longitudinales es un polígono de cinco lados. Cada uno de los cinco vértices de la sección coincide con una curva longitudinal que genera la geometría del puente. Se originan así cinco superficies que representan la ley de momentos del puente. La superficie que genera el alma interior del cajón es vertical. Las dos superficies contiguas a ésta constituyen las alas del cajón y son superficies cilíndricas. Las otras dos superficies son alabeadas y constituyen alternativamente el alma o el ala del cajón. La chapa exterior superior es el alma del cajón en la zona de empotramiento, y el ala superior del mismo en centro de vano; mientras que la chapa exterior inferior es el ala inferior del cajón en el empotramiento, y una de las almas del cajón en centro de vano. La arista de intersección de estas dos superficies es una fibra que describe la ley de momentos, y que por tanto tanto siempre se encuentra comprimida (figura 6).



Figura 6. La intersección de las chapas exteriores genera una línea curva comprimida. Pasarela Martutene. 2016. Diseño: ANTA. Fotografía: Gorka Mirasolain.

La pasarela se encuentra empotrada en ambos estribos. El empotramiento se establece disponiendo dos ejes de apoyo en cada estribo: uno en compresión y otro en tracción (figura 7).

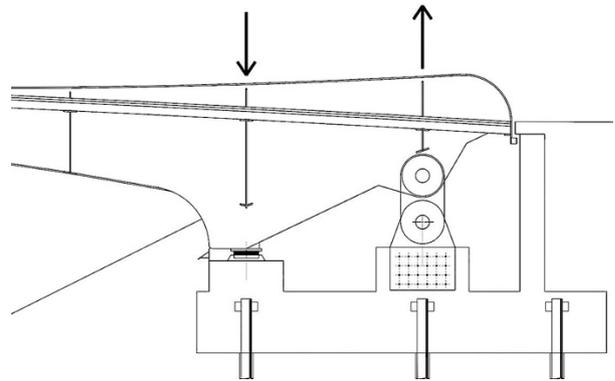


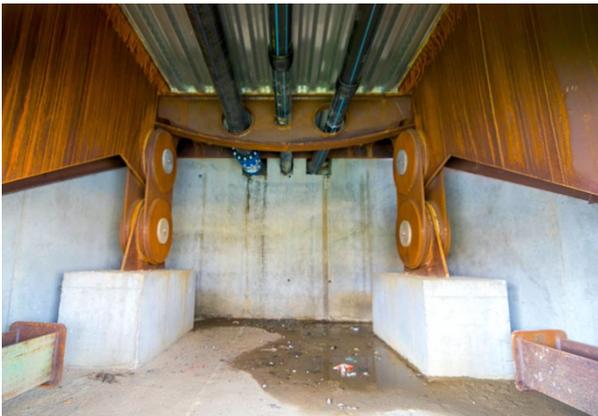
Figura 7. Esquema básico de par de fuerzas de empotramiento en estribo.

El apoyo en tracción corresponde a una articulación de doble bulón (figura 8), 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 9) [4].

Los componentes estructurales básicos de la pasarela Bicontentio 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 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.



#### 4. Comportamiento estructural.

La tipología de la pasarela Bicontentio corresponde a un puente metálico de vigas cajón laterales biempotradas de canto variable. El empotramiento de las vigas principales se logra mediante la disposición de sendos vanos extremos auxiliares. De este modo se genera una viga continua de tres vanos muy descompensados, sobre cuatro ejes de apoyo. Los apoyos interiores generan reacciones de compresión, mientras que las reacciones exteriores son de tracción. Se crea de este modo un par de fuerzas que genera un momento negativo sobre los apoyos intermedios, disminuyendo drásticamente el momento positivo en centro de vano, y consecuentemente la deformación vertical.

$$M = \frac{qL^2}{24}$$

$$M = \frac{qL^2}{8}$$

á

La flecha es proporcional a la ley de curvaturas, e inversamente proporcional a la ley de inercias. La inercia es a su vez proporcional al canto de la sección transversal. Adoptando una variación de canto que imita la ley de momentos, se obtiene una ley de inercias proporcional a la ley de flectores, muy eficiente para reducir las deformaciones, pues a diferencia de una viga de inercia constante permite reducir drásticamente

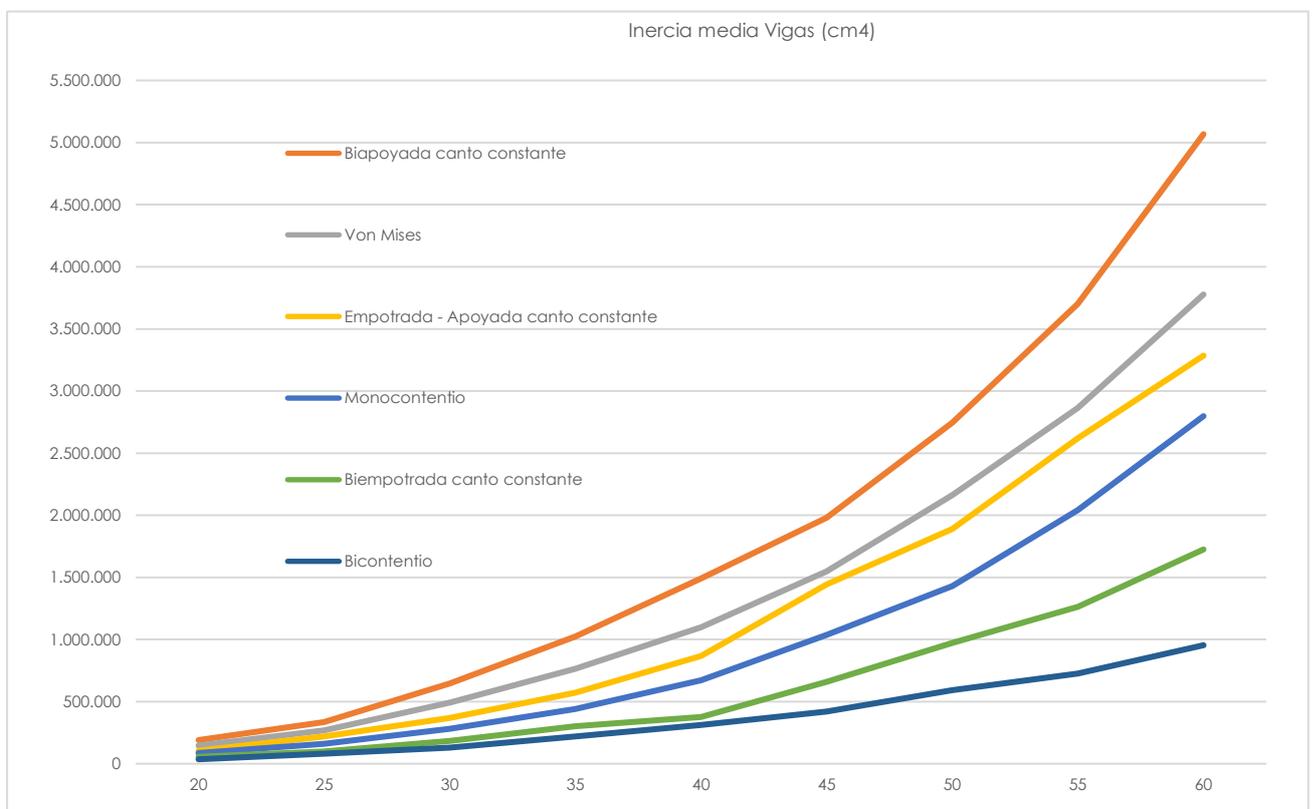
la curvatura únicamente donde es necesario, no en las zonas en las que el esfuerzo flector es pequeño, y una inercia elevada resulta irrelevante.

La inercia es la magnitud básica que permite acotar las deformaciones, mediante la limitación de las curvaturas. Se constata que una inercia variable con una ley proporcional a la ley de momentos es más eficiente que una inercia constante a lo largo del puente, pues aunque en los puntos de momento más elevado los valores de la inercia son mayores, el valor medio es inferior. En la figura 10 se reflejan los valores medios de inercia obtenidos para seis tipologías de pasarelas estudiadas para luces comprendidas entre 20 y 60 metros, y una anchura de tres metros:

- Pasarela biapoyada de canto constante.
- Pasarela Von Mises.
- Pasarela empotrada - apoyada de canto constante.
- Pasarela Monocontentio.

- Pasarela biempotrada de canto constante.
- Pasarela Bicontentio.

La inercia media necesaria crece parabólicamente con la luz para todas las tipologías, pues es proporcional a la ley de momentos de carácter parabólico a su vez. Se aprecia que el recurso de empotramiento en estribos es muy eficiente para reducir la inercia necesaria: las tipologías empotradas necesitan una quinta parte de la inercia necesaria de las biapoyadas. Por otra parte, dentro de las dos tipologías biempotradas estudiadas resulta más eficiente adoptar un canto variable adaptado a la ley de momentos, que un canto constante. Se constata que las tipologías biempotradas son más eficientes estructuralmente.



**Figura 10. Inercia media necesaria de vigas principales para diferentes tipologías de pasarela de 3 metros de anchura en función de la luz. Abscisas: luz (m) / Ordenadas: Inercia (cm4).**



Figura 11. Pasarela sobre el río Cidacos en Calahorra. 2007. Diseño: ANTA. Fotografía: José Manuel Cutillas.

#### 4. Ejemplos construidos.

Se han construido tres pasarelas Bicontentio, todas ellas se ubican en España. El primer puente fue construido el año 2007 en Calahorra sobre el río Cidacos [6]. La estructura presenta una anchura de 3.15 metros, una luz de 44 metros, y una longitud total de 50 metros (figura 11).

En el año 2010 se construyó la pasarela de Lebario sobre la carretera N634., de 3.15 metros de anchura, 22 metros de luz, y 26 metros de longitud total (figura 12).

La pasarela de Martutene fue construida en el año 2016 sobre el río Urumea en San Sebastián. La luz del puente es 62.568 metros, su longitud 71.1 metros, y su anchura 2.5 metros (figura 13) [7].

La sección resistente de las pasarelas de Calahorra y Lebario corresponde a un cajón único abierto superiormente, de anchura

superior constante, y fondo inferior variable. Por contra, la estructura de la pasarela de Martutene corresponde a dos vigas cajón laterales.

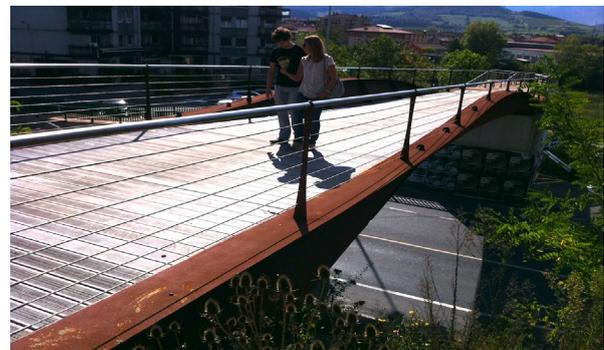


Figura 122. Pasarela Lebario sobre N-634. 2010. Diseño: ANTA. Fotografía: Mario Guisasola.

#### 5. Resumen y conclusiones.

La pasarela Bicontentio es un puente metálico parametrizado cuyas principales características estructurales son su canto variable basado en los esfuerzos de solicitación, y el empotramiento en



**Figura 13. Pasarela Martutene. 2016. Diseño: ANTA. Fotografía: Gorka Mirasolain.**

ambos estribos. Su uso se considera adecuado para topografías simétricas con taludes en ambas márgenes; luces situadas en un rango de 20 a 66 metros; y anchuras entre 1.75 y 4.5 metros.

Su diseño se basa en cinco puntos básicos: integración en la geometría del lugar; búsqueda continua de la sencillez; diseño basado en una geometría que emana del comportamiento estructural; formas unitarias y rotundas; y detalles perdurables.

Se ha comparado el comportamiento estructural de la pasarela Bicontentio, con dos

tipologías viga metálica de canto constante: puente biapoyado, y puente biempotrado. Se constata que las tipologías biempotradas necesitan aproximadamente la quinta parte de la inercia necesaria para las biapoyadas.

Las pasarelas Bicontentio están fundamentadas en dos recursos básicos (el empotramiento en estribos, y la adopción de una variación de canto adaptada a la ley de momentos) con los que se logran formas eficientes, elegantes, y bien adaptadas a las condiciones de contorno.

### ***Agradecimientos***

Haritz Iriondo, y Esther Azcona intervinieron en el Proyecto de las pasarelas de Calahorra, Lebario y Martutene.

### ***Referencias***

- [1] The Tower And the Bridge. David P. Billington. Princeton University Press. Princeton, 1985.
- [2] Pre-designed Bridges. Mario Guisasola. 37th IABSE Symposium Madrid 2014 “Engineering for Progress, Nature and People”
- [3] The Laws of Simplicity. John Maeda. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 2006.

- [4] Bending Moment Diagram as Shape: Bicontentio Bridge in San Sebastián (Spain). Mario Guisasola. 19th Congress of IABSE Stockholm, 2016.
- [5] Razón y Ser de los Tipos Estructurales. Eduardo Torroja. Centro Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”. 7ª edición. Madrid, 1991.
- [6] Variable Depth Footbridges. Mario Guisasola. 4th International Conference Footbridge. Wroclaw, 2011.
- [7] Bicontentio Sinus Footbridge in Martutene (San Sebastián). Mario Guisasola. 6th International Conference Footbridge. Berlin, 2017.