

Influencia de las péndolas rígidas en el comportamiento estructural de puentes arco de tipo bow-string

Effect of stiffened hangers on the structural response of bow-string bridges

Juan Manuel GARCÍA GUERRERO^a, Juan José JORQUERA LUCERGA^{*, b}

^a Dr. ICCP. Departamento de Ingeniería Minera y Civil. Universidad Politécnica de Cartagena. gguerrero2@hotmail.com

^b Prof. Dr. ICCP. Departamento de Ingeniería Minera y Civil. Universidad Politécnica de Cartagena. juanjo.jorquera@upct.es

RESUMEN

En puentes arco atirantados, la forma de vincular el arco y el tablero resulta crucial. El tablero se suspende del arco normalmente con cables de acero articulados que resisten tracciones únicamente. Sin embargo, se puede asegurar una respuesta estructural adecuada empotrando y rigidizando las péndolas, con el fin de resistir, adicionalmente, esfuerzos cortantes y momentos flectores. Así, esta ponencia estudia el efecto de diferentes configuraciones de péndolas rígidas y articuladas en el comportamiento estructural de los puentes arco atirantados o tipo bow-string, con la intención de ofrecer a los diseñadores herramientas de diseño útiles en las primeras fases del diseño.

ABSTRACT

In tied-arch bridges, the way the arch and the deck are connected may become crucial. The deck is usually suspended from hangers made out of steel pinned cables capable of resisting axial forces only. However, a proper structural response may be ensured by fixing and stiffening the hangers in order to resist, additionally, shear forces and bending moments. Thus, this paper studies the effect of different pinned and stiffened hanger arrangements on the structural behavior of the bow-string bridges, with the intention of providing designers with useful tools at the early steps of design.

PALABRAS CLAVE: Puente arco, péndola rígida, articulación, diseño preliminar, diseño conceptual.

KEYWORDS: Arch bridge, stiffened hanger, hinge, preliminary design, conceptual design.

1. Introducción

En puentes arco, la conexión entre el arco y el tablero es crucial. Esta vinculación define, por ejemplo, cómo se distribuyen los esfuerzos entre el arco y el tablero, o cuán efectivo es el puente respecto a la reducción de flechas en el tablero para cargas de servicio. Cuando el tablero se cuelga del arco, las péndolas están compuestas generalmente por cables de acero (véase EC-3 [1]), ya que son relativamente baratas y fáciles de

construir (véase la figura 1). En términos prácticos, los cables tienen una rigidez a flexión despreciable, con lo que se puede asumir que solo resisten tracciones.

La disposición de cables en el plano del arco puede ser modificada, por ejemplo, para reducir la flexión en el puente. Con este fin, las péndolas verticales pueden sustituirse por péndolas inclinadas, como ocurre por ejemplo

en la vinculación tipo Nielsen-Löhse, usada de forma pionera en puentes como el de Castelmoron sobre el río Lot, Francia (figura 2). Debe mencionarse que, en esta tipología, debido a la inclinación, los cables están sujetos a grandes variaciones de tensión, hasta el punto de que para una combinación de cargas y un ángulo de inclinación, se pueden producir daños estructurales debido a la fatiga.



Figura 1. Ejemplo de péndolas articuladas. Puente del cañuelo, España. Fuente: Juan José Jorquera Lucerga.



Figura 2. Puente de Castelmoron sobre el río Lot, Francia. Fuente: Mossott, Wikimedia commons.

Una reducción aún mayor de los momentos flectores en el arco y el tablero se puede conseguir con la vinculación tipo Network, una evolución del tipo Nielsen-Löhse, donde las péndolas se cruzan entre sí al menos dos veces, produciendo soluciones muy esbeltas. Puede que el ejemplo más conocido de esta tipología sea el puente de Fehrmandsund (figura 3).

Sin embargo, en algunos casos, el proyectista puede decidir, con el fin de asegurar un comportamiento estructural adecuado, que las péndolas resistan, además de tracciones, esfuerzos cortantes y momentos flectores. En consecuencia, las péndolas deben tener secciones rígidas a flexión, como secciones doble T, cajón o tubos. Es decir, las péndolas deben ser rigidizadas (véase García-Guerrero [2]).



Figura 3. Puente de Fehrmandsund. Fuente: S. Möller, Wikimedia commons.

Cuando se usan secciones doble T, la orientación de la sección determina la dirección donde la rigidez a flexión es más elevada, como en el puente de La Devesa o el Merchants Bridge en Manchester. La orientación de las secciones doble T permite disponer de una mayor rigidez longitudinal, resistiendo la flexión en el plano, o una mayor rigidez transversal para resistir esfuerzos torsores en el tablero o esfuerzos fuera del plano del arco. Cuando se usan secciones cajón en las péndolas, estas están empotradas generalmente en ambos extremos, lo que permite disponer simultáneamente de una mayor rigidez longitudinal y transversal, como ocurre por ejemplo en el puente de La Alameda (figura 4) en Valencia (España).



Figura 4. Ejemplo de péndolas empotradas. Puente de La Alameda, Valencia. Fuente: Juan José Jorquera Lucerga.

La manera de conectar el arco y el tablero también resulta importante cuando se comprueba el pandeo del arco. Generalmente, las péndolas rígidas son más eficientes que los cables a la hora de prevenir el pandeo del arco, con lo que la rigidez de las péndolas pasa a tener una mayor importancia, como se muestra por

ejemplo en Palkowski [3]. En consecuencia, la rigidización de las péndolas es una opción de la que el proyectista dispone en las primeras fases del proyecto, ya que la carga crítica del arco aumenta sólo con rigidizar las péndolas, es decir, sin modificar la sección transversal del arco.

Los cables y las péndolas rígidas raramente se combinan a la vez en un puente, y si lo hacen corresponde a una decisión que está basada más en criterios estéticos que estructurales. Un ejemplo conocido es el puente de Ondarroa, en el norte de España, diseñado por Santiago Calatrava (véase Tzonis [4]).

Los cables pueden ser usados también en configuraciones tridimensionales. El puente sobre el río Galindo (véase Manterola et al. [5]), en Bilbao, es un arco superior cuya planta sigue la directriz curva del tablero, lo que da lugar a una geometría alabeada, es decir, no contenida en un plano (figura 5). El tablero se vincula al arco mediante dos familias de cables. La primera está compuesta de péndolas verticales que tienen la misma función que en arcos planos, transferir cargas verticales del arco al tablero. La segunda está compuesta de cables pseudo-horizontales anclados al arco y a elementos en voladizo colocados en el borde interior del tablero. Estos cables introducen fuerzas en el arco para lograr una configuración antifunicular contenida en la geometría del arco (véase Jorquera-Lucerga [6]).



Figura 5. Puente sobre el río Galindo, España.

Fuente: Juan Manuel García Guerrero.

Son de destacar algunas alternativas, no construidas, del puente sobre el río Galindo. La figura 6 muestra dos de estas soluciones (véase Manterola et al. [5]). En la primera (figura 6-a), las fuerzas horizontales que aparecen en el arco debido a su planta curva son resistidas

incrementando la rigidez transversal del arco, transformando su sección transversal en una celosía horizontal y duplicando las péndolas, una solución que les da cierta inclinación transversal, y, por lo tanto, cierta capacidad para resistir fuerzas radiales. Para esta investigación, la segunda solución (figura 6-b) es más relevante: la compleja vinculación espacial de cables de la solución construida se sustituye por un conjunto de péndolas rígidas transversales (en este caso radiales).

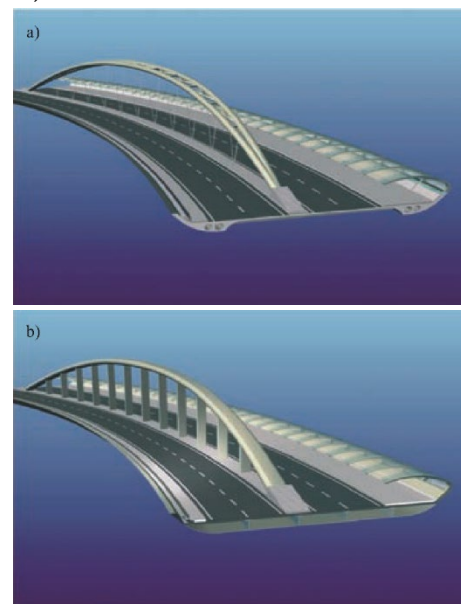


Figura 6. Puente sobre el río Galindo, soluciones no construidas. a) Arco en celosía, b) péndolas rígidas transversales.

El objetivo de esta ponencia es analizar las posibilidades estructurales de las péndolas rígidas, para ofrecer a los diseñadores más recursos en las etapas iniciales del proyecto de un puente arco, analizándose para ello el efecto de colocar articulaciones en las péndolas, en sentido longitudinal y trasversal.

2. El puente de referencia

Todos los puentes mostrados en esta ponencia están basados en el llamado puente de referencia (figura 7). Está compuesto de un tablero recto suspendido de un arco plano vertical. Los arranques del arco están unidos por el tablero, lo que se corresponde con la tipología de arco

atirantado o bow-string. El arco y el tablero están unidos por un juego de péndolas verticales ancladas al eje del tablero. En esta configuración de referencia las péndolas son cables, con lo que están articuladas en ambos extremos.

El puente de referencia tiene 100 m de luz (L , figura 7). La clave del arco (f) es de 20 m. El ancho cargado del tablero, b , es de 8 m. El espaciamiento entre péndolas es de 5 m. Estas dimensiones están inspiradas en puentes arco reales y son comunes.

Las secciones de los elementos estructurales del puente se muestran en la tabla 1.

Considerando el objetivo de esta comunicación, no es necesario considerar todas las posibles sobrecargas que puedan aparecer,

con lo que se han tenido en cuenta solo cargas peatonales, ya que ilustran con suficiente precisión el efecto de las péndolas rígidas en el comportamiento estructural. Así, se han considerado cinco distribuciones de carga (q_1 a q_5), mostradas en la figura 8, donde el área sombreada se carga con una carga vertical descendente uniformemente distribuida q_i de 5 kN/m², que corresponde con el modelo de carga peatonal LM-4 definido en el EC-1 [7] o en la IAP-11 [8]. En esta comunicación, todos los esfuerzos han sido obtenidos con modelos de elementos finitos analizados en SAP2000 y postprocesados en Matlab.

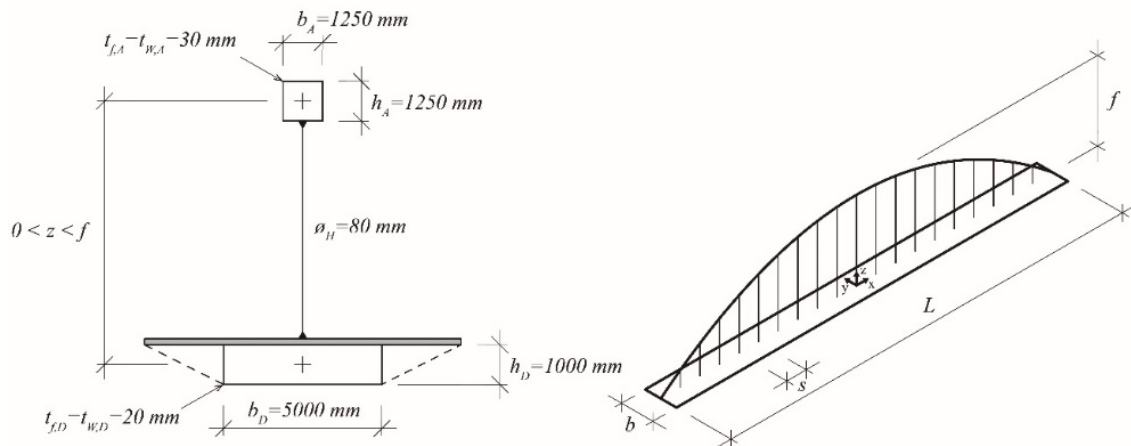


Tabla 1. Secciones transversales del puente de referencia.

Elemento	Sección transversal	Dimensiones	Módulo de Young E (N/mm ²)
ARCO	Sección cajón	1250 x 1250 mm, $t_{f,A} = t_{w,A} = 30$ mm	2.1×10^5
PÉNDOLAS	Sección circular	ø 80 mm	1.6×10^5
TABLERO	Sección cajón	5000 x 1000 mm, $t_{f,D} = t_{w,D} = 20$ mm	2.1×10^5

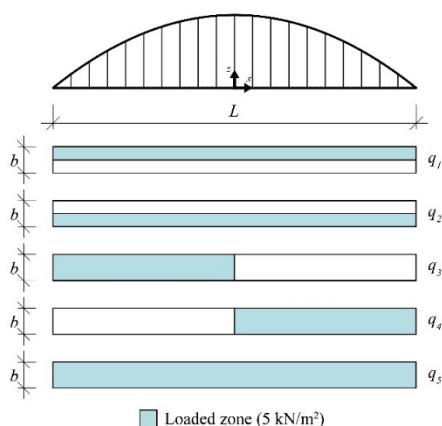


Figura 8. Casos de carga considerados, EC-1 [7].

3. Comportamiento en el plano: péndolas rígidas y articuladas longitudinalmente

Las péndolas rígidas pueden reducir los esfuerzos en el puente completo. Para ilustrar la eficacia de las péndolas rígidas con respecto a los cables, la figura 9 compara los flectores dentro del plano del arco para configuraciones de cables y de péndolas rígidas con secciones cajón de 400x400x20mm y 800x800x20mm empotradas en ambos extremos, para los casos de carga q_3 y q_5 (figura 8) en el puente de referencia.

Se puede observar como para ambos casos de carga, cuanto mayor es la rigidez de las péndolas, menores son los momentos flectores. Los mayores momentos se obtienen en los riñones del arco ($x = \pm L/4$) para la carga que actúa en la mitad del tablero, q_3 , la cual es la carga más adversa, como es usual en puentes arco (véase Menn [9]).

3.1 Estudio de la posición de la articulación

Para estudiar el efecto de considerar una articulación en la péndola, se ha añadido una articulación longitudinal a todas las péndolas en un modelo de referencia con péndolas rígidas (800x800x20mm). La posición relativa de la péndola es $\alpha \cdot b$, donde b se corresponde con la longitud de cada péndola y α varía entre 0 en el extremo superior (en el arco) y 1 en el extremo inferior (en el tablero). En este estudio se ha considerado que la posición relativa de la articulación, $\alpha \cdot b$, es la misma para todas las péndolas, sin embargo, en un diseño real, las péndolas formadas por cables o rígidas, con o sin articulaciones, pueden ser distribuidas libremente.

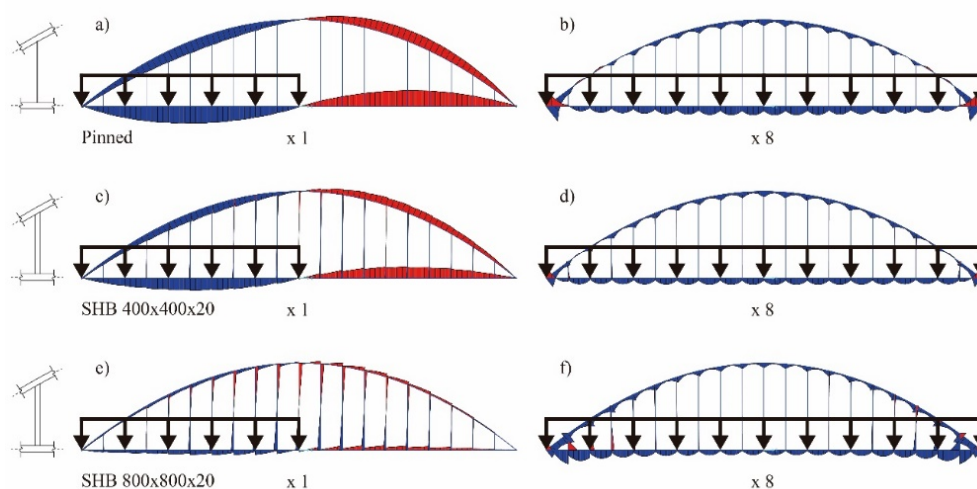


Figura 9. Diagrama de momentos flectores para el modelo de referencia (a, b), con péndolas empotradas de 400x400x20mm (c, d), con péndolas empotradas de 800x800x20mm (e, f), para q_3 (a, c, e) y q_5 (b, d, f).

La figura 10 muestra la distribución de momentos flectores en el arco (a) y en el tablero (b) para las diferentes posiciones de las articulaciones. Además, la figura 10 también muestra los valores para el puente de referencia, tanto para péndolas formadas por cables ($\phi_H=80$ mm, P) como para péndolas rígidas sin articulaciones (800x800x20mm, F). En la figura 10-d, los valores de los momentos en el arco, M_A , y en el tablero, M_D , se muestran en riñones ($x=-L/4$), que corresponde con la localización de los esfuerzos máximos. Es de destacar que los momentos máximos siempre corresponden a péndolas formadas por cables, mientras que los

momentos mínimos siempre corresponden a péndolas rígidas empotradas. Resulta muy interesante confirmar que, en lo que se refiere a la reducción de momentos flectores (véase la figura 10-d), las péndolas articuladas son tan efectivas como las péndolas rígidas empotradas cuando tienen sus articulaciones en $\alpha=0.5$. Esto ocurre tanto para el arco como para el tablero. Además las posiciones relativas de las péndolas (aproximadamente $\alpha=0.5$) donde se alcanza la mayor eficiencia de las mismas no parecen depender ni de la rigidez relativa de las secciones transversales del arco o del tablero ni de sus valores absolutos.

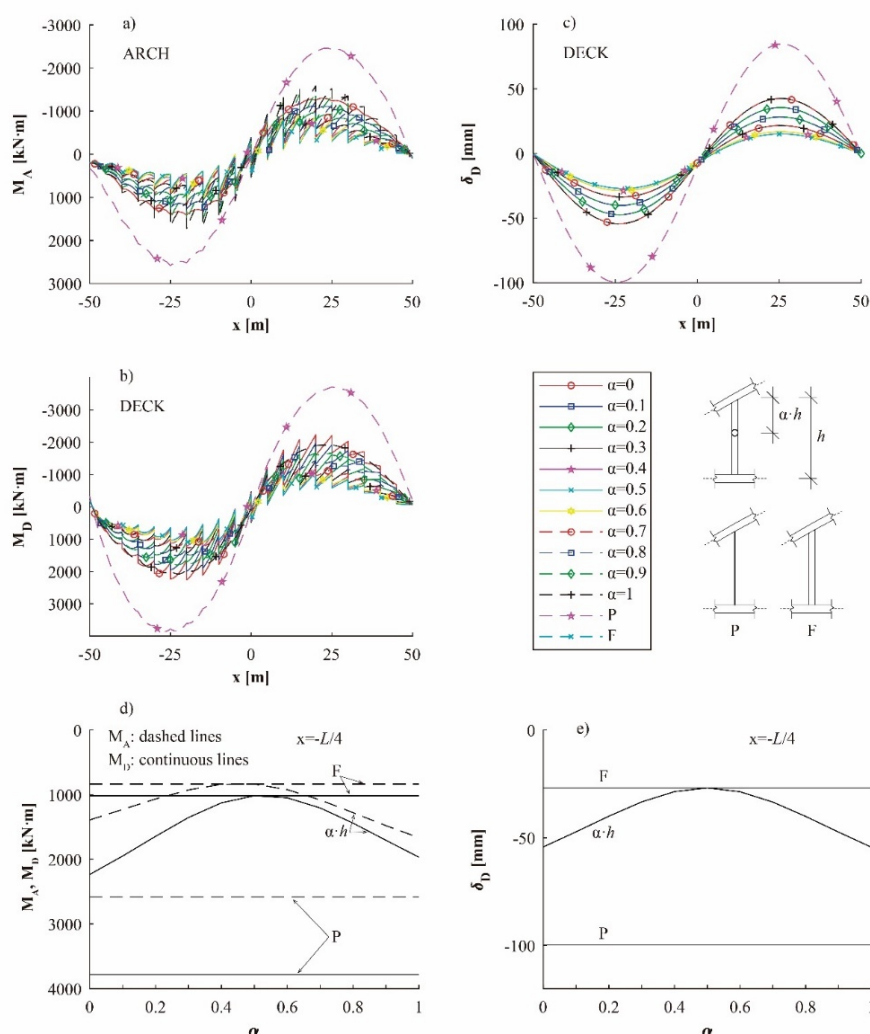


Figura 10. Diagramas longitudinales de momentos flectores en a) arco y b) tablero vs. rigidez de péndolas y localización de las articulaciones. c) deformación vertical del tablero. d) detalle de momentos flectores en la sección de riñones. e) detalle de flechas en la sección de riñones.

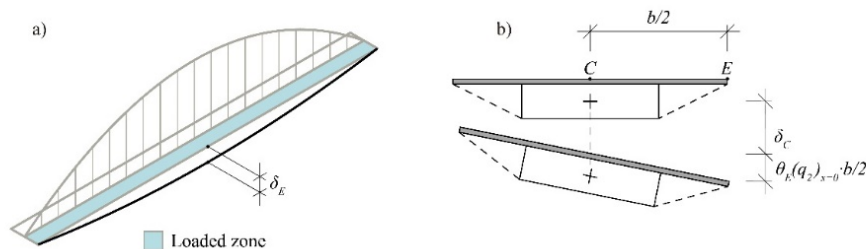


Figura 11. a) deformada del puente para q_2 . b) deformada de la sección transversal del tablero.

4. Comportamiento fuera del plano: péndolas rigidizadas transversalmente

En esta sección se estudia el efecto de rigidizar las péndolas sobre la respuesta fuera del plano del arco. Los efectos de las articulaciones transversales y sus posiciones se analizan en un estudio similar al de la sección anterior. Sin embargo, en esta sección, la respuesta de la estructura será analizada para las cargas q_1 ó q_2 (véase la figura 8), es decir, cargas uniformemente distribuidas longitudinalmente sobre el vano completo y sobre su semiancho. De esta manera aparecen momentos torsores en el tablero, como muestra la figura 11, y las deformaciones verticales son diferentes entre el eje y el borde (puntos C y E, figura 11-b) de su sección transversal. La deformación vertical δ_E en el borde del tablero puede evaluarse como:

$$\delta_E = \delta_C + \theta_C \cdot \frac{b}{2} \quad (1)$$

donde θ_C es el giro longitudinal debido a la torsión en el centro del tablero

4.1 Efecto de la posición de las articulaciones

Para estudiar el efecto de la posición de las articulaciones, se ha añadido una articulación transversal a todas las péndolas de un puente de referencia con péndolas empotradas

(800x800x20mm). La posición relativa de la articulación es $\alpha \cdot b$, donde b corresponde a la longitud de cada péndola y α varía desde 0 en el extremo superior en el arco y 1 en el extremo inferior en el tablero. En este estudio se ha considerado que la posición relativa de la péndola, $\alpha \cdot b$, es la misma para todas aunque, obviamente, en un diseño real, se pueden combinar péndolas de diferentes tipos, con o sin articulaciones. En el estudio se han analizado los momentos fuera del plano del arco y los momentos de eje vertical del tablero para la carga q_2 (véase la figura 12), así como los momentos torsionales tanto para el arco como para el tablero (véase la figura 13). Para la misma carga, se han obtenido las deformaciones verticales en el borde del tablero, así como las deformaciones transversales en la clave del arco (véase la figura 14).

Como se muestra en la figura 14-c, la deformación transversal en la clave desciende con α , mientras que la deformación vertical en el eje del tablero aumenta. Esto es coherente con el diagrama de torsores que se muestra en la figura 13-b: a medida que α crece, el momento torsional del tablero decrece, porque la torsión está recogida parcialmente por el sistema estructural arco-péndola, reduciendo el giro del tablero y la deformación vertical de su eje. La mínima deformación se obtiene para $\alpha = 0$ (articulaciones en el arco), y este valor permanece prácticamente inalterable para

péndolas fijas, por lo que el efecto de empotrar o no las péndolas en el arco es prácticamente irrelevante.

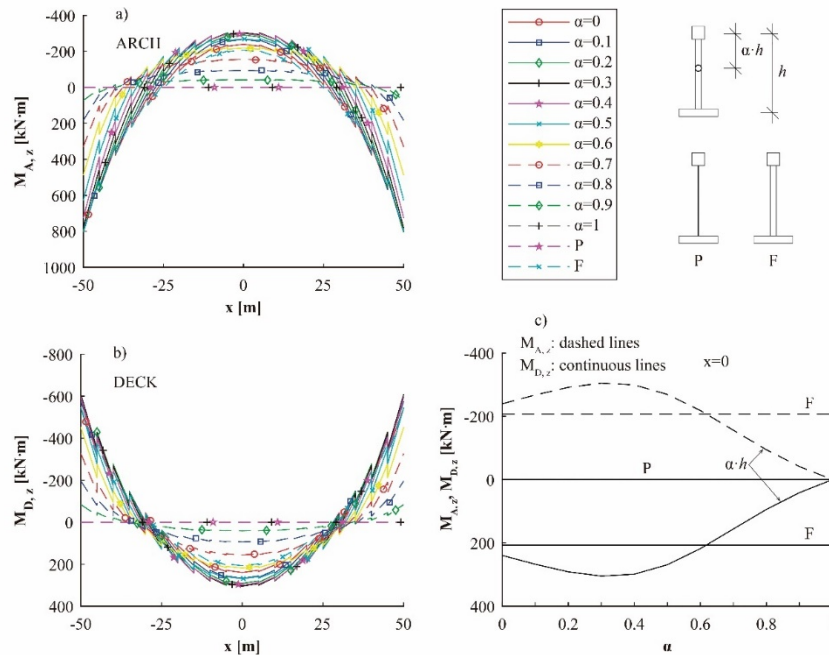


Figura 12. Momento transversal del arco (a) y del tablero (b) para una carga q_2 en función de la altura de la articulación.

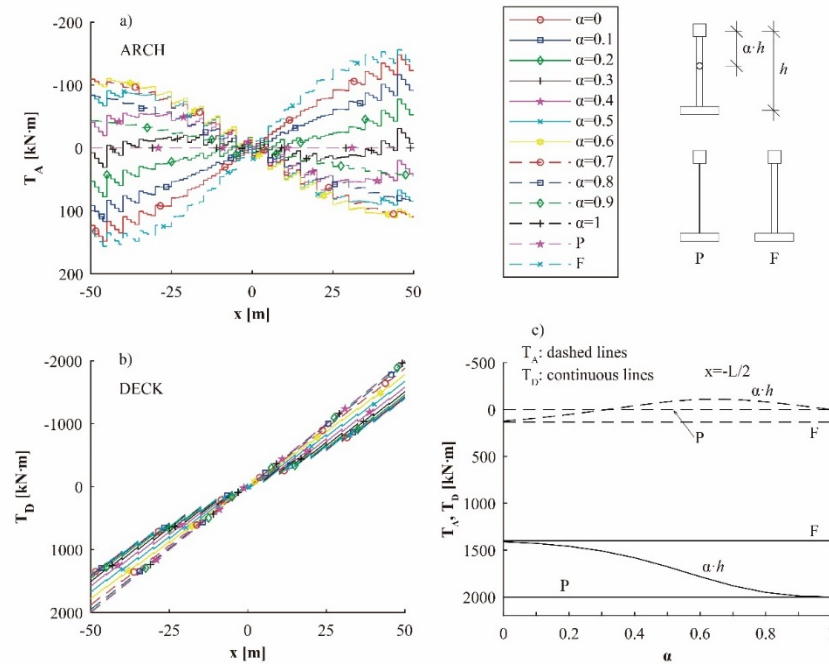


Figura 13. Torsión para q_2 en el arco (a) y el tablero (b) vs. posición de la articulación. c) detalle de resultados en arranques y estribos.

4.1 Pandeo fuera del plano

La rigidización transversal de péndolas también puede ser utilizada para reducir la sensibilidad al

pandeo transversal del arco. Para el puente de referencia se ha obtenido una carga crítica de pandeo para la combinación simplificada de cargas $1.35 \cdot (PP + CM) + 0.6 \cdot 1.5 \cdot VTO + \lambda \cdot q_5$, donde PP se corresponde con el peso propio,

CM con la carga muerta, VTO con una carga de viento transversal de 2 kN/m^2 , y el coeficiente λ se incrementa gradualmente hasta que $\lambda = \lambda_u$, situación que correspondería al colapso (véase la figura 15). Como puede verse, lo que se corresponde con la intuición, las péndolas empotradas son las más eficaces a la hora de impedir el pandeo del arco.

Si se comparan los resultados para $\alpha=0$ y $\alpha=1$, λ_u es mayor para $\alpha=1$, con lo que queda claro que empotrar las péndolas en el tablero es más eficiente que hacerlo en el arco. Sin

embargo, eso no significa que empotrar las péndolas en el tablero sea siempre la forma más efectiva de incrementar λ_u : si la sección transversal del arco y el tablero se intercambian, los coeficientes son $\lambda_u=43$ y 40 para $\alpha=1.0$ y $\alpha=0.0$ respectivamente.

Estos coeficientes son mucho más altos, ya que la sección transversal del arco es la sección anterior del tablero, que es mucho más rígida. Pero el hecho importante, en este caso, es que λ_u para $\alpha=1.0$ es mayor que para $\alpha=0$ cuando el arco es más rígido que el tablero.

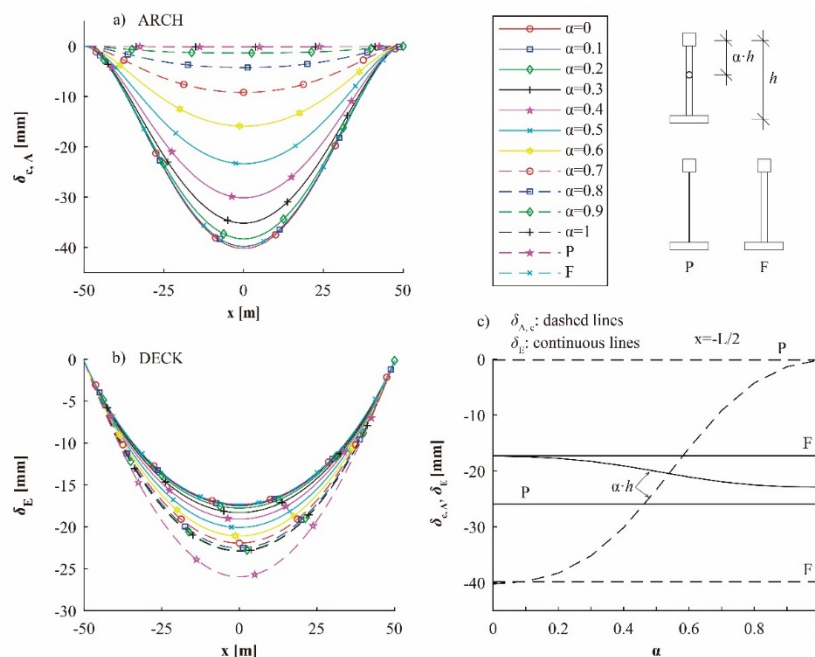


Figura 14. a) Deformación transversal en la clave para q_2 . b) Deformación vertical en el borde del tablero para q_2 . c) Detalle de resultados en el centro de la luz.

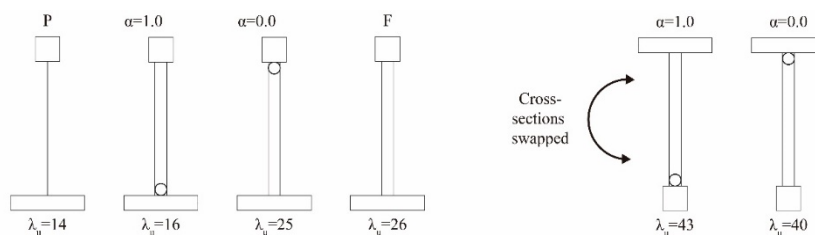


Figura 15. Puente de referencia: coeficiente λ_u para diferentes configuraciones de péndolas, para el caso de carga $1.35 \cdot (PP+CM)+0.6 \cdot 1.5 \cdot VTO+\lambda_u \cdot q_5$.

5. Conclusiones

En puentes arco, la forma en la que el tablero y el arco se conectan puede resultar crucial. Si la tipología de la conexión arco tablero es

adecuada, los momentos y las deformaciones se reducen sensiblemente. De esta forma, la disposición de péndolas se convierte en una herramienta a disposición del diseñador, principalmente en las fases iniciales del diseño conceptual.

Dado que, debido a la simetría longitudinal de la estructura, las respuestas en el plano y fuera de este están desacopladas, el efecto de las péndolas puede ser considerado independientemente para ambos planos. Por ejemplo, la orientación de las péndolas en doble T puede ser definida para proporcionar rigidez longitudinal, para soportar flexión en el plano, o alternativamente, rigidez transversal, para resistir esfuerzos torsores en el tablero o esfuerzos fuera del plano en el arco.

La eficacia de las péndolas no solo depende de su rigidez, sino de la rigidez del arco y del tablero. Por ejemplo, la reducción de la deformación en el borde del tablero viene gobernada por la rigidez transversal arco-péndola.

Los estudios realizados muestran que, en términos prácticos, los extremos de las péndolas son las únicas posiciones posibles para las articulaciones que no llevan a una pérdida significativa de eficacia resistente.

Si la péndola está articulada en uno de sus extremos, la péndola conserva una gran parte de la eficacia de las péndolas empotradas. La pérdida de eficacia es menor si la péndola está empotrada en el elemento más rígido, bien sea el arco o el tablero. Dado que la conexión en el extremo articulado no necesita capacidad ni a cortante ni a flexión, la péndola articulada es más fácil de construir y supone un ahorro en términos generales.

En general, con respecto al comportamiento en el plano, se recomienda el uso de péndolas formadas por cables. Alternativamente, y con el mismo propósito, se pueden usar péndolas rígidas empotradas en ambos extremos en sentido longitudinal.

En lo referente al comportamiento fuera del plano, cuando se usan péndolas rigidizadas en sentido transversal, la configuración más eficiente es la que tiene ambos extremos empotrados, si bien tienen un desempeño parecido las péndolas articuladas en el elemento más flexible (normalmente el arco).

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Universidad Politécnica de Cartagena la financiación recibida mediante el proyecto de investigación 2017_2420, dirigido por el segundo autor. Además, los autores quieren agradecer a la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la CARM, la financiación recibida por el primer autor mediante un contrato FPI.

Referencias

- [1] Eurocode 3, Design of steel structures. Part 1-11: Design of structures with tension components, European Committee for Standardization, Bruselas, Bélgica, 2006.
- [2] J. M. García-Guerrero, J. J. Jorquera-Lucerga, Influence of stiffened hangers on the structural behavior of all-steel tied-arch bridges, *Steel and Composite Structures*. 32, N°4 (2019) 479-495.
- [3] S. Palkowski, Buckling of parabolic arches with hangers and tie, *Engineering Structures*. 44 (2012) 128–132.
- [4] A. Tzonis, Santiago Calatrava: Complete Works, Rizzoli, New York, EEUU, 2007.
- [5] J. Manterola-Armisen, M. A. Gil, J. Muñoz-Rojas, Spatial Arch Bridges Over the Galindo and Bidasoa Rivers, *Structural Engineering International*. 21 (2011) 114–121.
- [6] J. J. Jorquera-Lucerga, Estudio del comportamiento resistente de los puentes arco espaciales, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- [7] Eurocode 1, Actions on structures. Part 2: Traffic loads on bridges, European Committee for Standardization, Bruselas, Bélgica, 2003.
- [8] IAP-11, Ministerio de Fomento, Madrid, 2011.
- [9] C. Menn, Prestressed Concrete Bridges, Birkhäuser Verlag, Viena, Austria, 1989.