

Eficacia del atirantamiento tipo Nielsen en puentes arco no convencionales

Effectiveness of the Nielsen-type hanger arrangement in non-conventional arch bridges

Mirian Cánovas González^a, Juan Manuel García Guerrero^b y Juan José Jorquera Lucerga^c

^aIngeniera de Caminos, Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, S.L. Ingeniera de proyectos. mcanovas@cfcsl.com

^bDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cartagena. Prof. Asociado. jm.guerrero@upct.es

^cDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cartagena. Prof. Titular. juanjo.jorquera@upct.es

RESUMEN

En los arcos tipo bowstring convencionales, el atirantamiento tipo Nielsen presenta grandes ventajas en la reducción de flechas y flexiones con respecto a un atirantamiento clásico de péndolas verticales. En la actualidad, los proyectistas se han alejado de las soluciones convencionales de puentes arco, tendiendo a tipologías asimétricas o de carácter espacial, donde se desconoce si las ventajas del atirantamiento tipo Nielsen se conservan inalteradas. Esta comunicación recoge una serie de estudios paramétricos con péndolas verticales y tipo Nielsen, concluyendo que el atirantamiento tipo Nielsen sigue siendo más efectivo salvo para esfuerzos fuera del plano del arco y del tablero.

ABSTRACT

In conventional bowstring arches, Nielsen-type hanger arrangement has great advantages in the reduction of deflections and bending moments with respect to a classical vertical hanger arrangement. Nowadays, designers have moved away from conventional arch bridge solutions, tending towards asymmetric or spatial typologies, where it is not known whether the advantages of the Nielsen-type hanger arrangement remain unchanged. This paper presents a series of parametric studies with vertical and Nielsen-type hanger arrangement, concluding that the Nielsen-type hanger arrangement is still more effective except for out-of-plane forces in the arch and the deck.

PALABRAS CLAVE: Nielsen, puente arco espacial, bowstring, arco inclinado, arco excéntrico.

KEYWORDS: Nielsen, spatial arch bridge, bowstring, inclined arch, eccentric arch.

1. Introducción

Tradicionalmente, el puente arco construido más frecuentemente, hasta el punto de que puede denominarse «puente arco clásico», es el puente compuesto por un tablero recto cuya línea central es coplanaria a un arco vertical, unido a su eje por un conjunto de péndolas verticales (Figura 1(a)). Alternativamente, un número

considerablemente menor de puentes arco atirantados por el tablero (o bowstring) se construyen con péndolas inclinadas en forma de V, una disposición de cables conocida como tipo Nielsen (Figura 1(b)). Esta configuración se propuso por primera vez por Octavius F. Nielsen, que la inventó y patentó en 1926.

Nielsen construyó varios puentes con este sistema, siendo el de Castelmoron, en Francia, uno de los ejemplos más famosos (Figura 2).

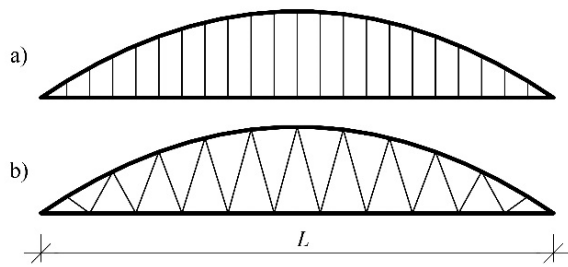


Figura 1. (a) péndolas verticales, (b) péndolas Nielsen.



Figura 2. Puente de Castelmoron, Castelmoron-sur-Lot (Francia). Mossot, Wikimedia Commons.

La principal ventaja de las péndolas tipo Nielsen es que las deformaciones y los momentos flectores se reducen drásticamente, ya que las péndolas inclinadas soportan los esfuerzos cortantes debidos a distribuciones de carga alejadas de la funicularidad [1,2], hasta el punto en que el arco y el tablero se encuentran bajo compresión y tracción prácticamente centradas y, por tanto, cerca de su máxima eficiencia. Todos los estudios que comparan la disposición de cables tipo Nielsen con cables verticales o incluso con una disposición de cables tipo Network, una evolución del tipo Nielsen introducida por Per Tveit en 1959 [3,4], confirman la eficacia de la disposición de cables tipo Nielsen.

Con el paso de los años los proyectistas han tendido a soluciones formales alejadas del puente arco centrado sobre un tablero recto,

obteniendo estructuras asimétricas o espaciales, los llamados puentes arco espaciales [1], que pueden definirse como aquellos en los que las cargas verticales introducen esfuerzos fuera del plano del arco. En los puentes arco espaciales pueden aplicarse tanto la configuración tipo Nielsen como la de péndolas verticales. Este es el caso del Butterfly Bridge (Figura 3), con sendos arcos inclinados y péndolas verticales. (En esta comunicación hemos denominado péndolas “verticales” a las que quedarían verticales si el plano que contiene al arco fuera vertical).



Figura 3. Butterfly Bridge, Bedford (UK)
www.structurae.de.

En los puentes arco espaciales, sin embargo, el número de realizaciones con péndolas tipo Nielsen es considerablemente inferior al de ejemplos con péndolas verticales. Este hecho lleva a preguntarse si el atirantamiento tipo Nielsen sigue conservando su eficacia en los puentes arco espaciales. En esta comunicación se presentan, resumidamente, estudios realizados por los autores, que abordan esta cuestión [5,6].

2. Puente de referencia

Todos los puentes de esta comunicación son enteramente metálicos y están basados en el puente de referencia de la Figura 4. Para la comparación de los diferentes modelos, y aunque las sobrecargas puntuales de los carros

podieran ser determinantes, se han considerado cinco sobrecargas verticales uniformes de 5 kN/m^2 , correspondiente al modelo LM-4 definido en el EC-1-2 [7], que ilustran suficientemente su comportamiento (Figura 5).

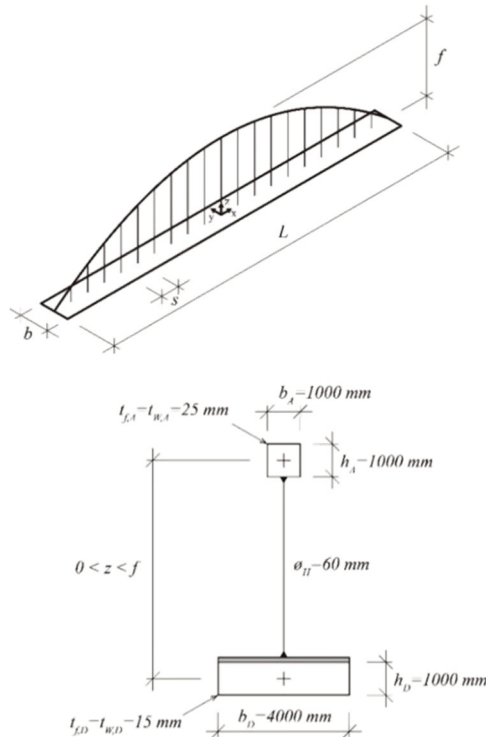


Figura 4. Perspectiva y dimensiones del puente arco de referencia.

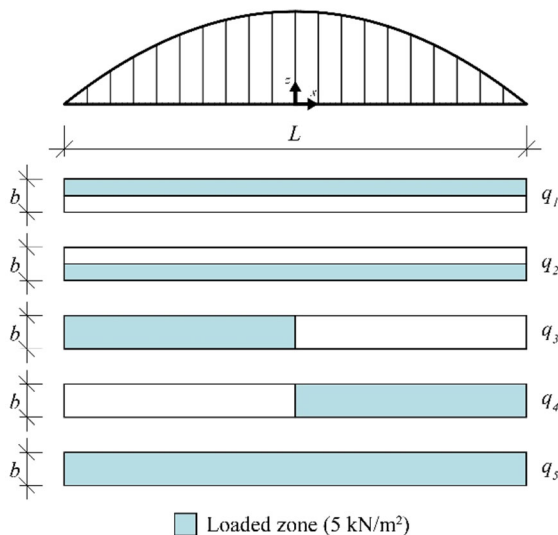


Figura 5. Hipótesis de carga consideradas (LM-4 de EC-1-2).

El diámetro de las péndolas, de 60 mm, se ha determinado mediante un análisis de sensibilidad, cuando se considera que la ratio entre la flecha del arco y del tablero en la misma

vertical sea lo bastante cercana a la unidad.

Los estudios se han llevado a cabo para cuatro puentes arco espaciales diferentes, para ambos tipos de atirantamiento, vertical y tipo Nielsen. Cada puente ha sido obtenido como una modificación del puente de referencia de la Figura 4. El pre y postproceso se ha realizado con códigos propios de modelización paramétrica desarrollado por los autores sobre software comercial de elementos finitos. Los cuatro puentes con péndolas verticales se enumeran con las letras A, B, C y D, mientras que los casos con atirantamiento tipo Nielsen se denotan como A', B', C' y D'. La descripción de los cuatro casos (Figura 6) es la siguiente:

- A-A': modelo de referencia sin modificar Arco vertical centrado sobre un tablero recto.
- B-B': arco inclinado centrado sobre un tablero recto. El arco se inclina entre 0° y 30° .
- C-C': arco vertical vinculado al borde de un tablero recto.
- D-D': arco inclinado vinculado al borde del tablero recto. El arco se inclina de 0° a 30° .

3. Análisis de resultados.

3.1 Arco vertical centrado sobre el tablero (A-A')

En este caso, la eficiencia del puente arco con péndolas Nielsen es bien conocida: para el puente de referencia, la reducción de flechas para una sobrecarga sobre la mitad del tablero (q_3 ó q_4 , Figura 5), es de un 73% para las flechas máximas y en torno al 75% para los flectores máximos en el plano del arco y del tablero. Los resultados coinciden con los del caso B-B' para una inclinación de 0° .

3.2 Arco inclinado centrado sobre un tablero recto (B-B').

Con la inclinación del arco, las flechas en el arco

y en tablero se incrementan, si bien siempre son mayores para las péndolas verticales (Figura 7). La eficacia de los puentes Nielsen estudiados

decrece significativamente para inclinaciones mayores de 15° .

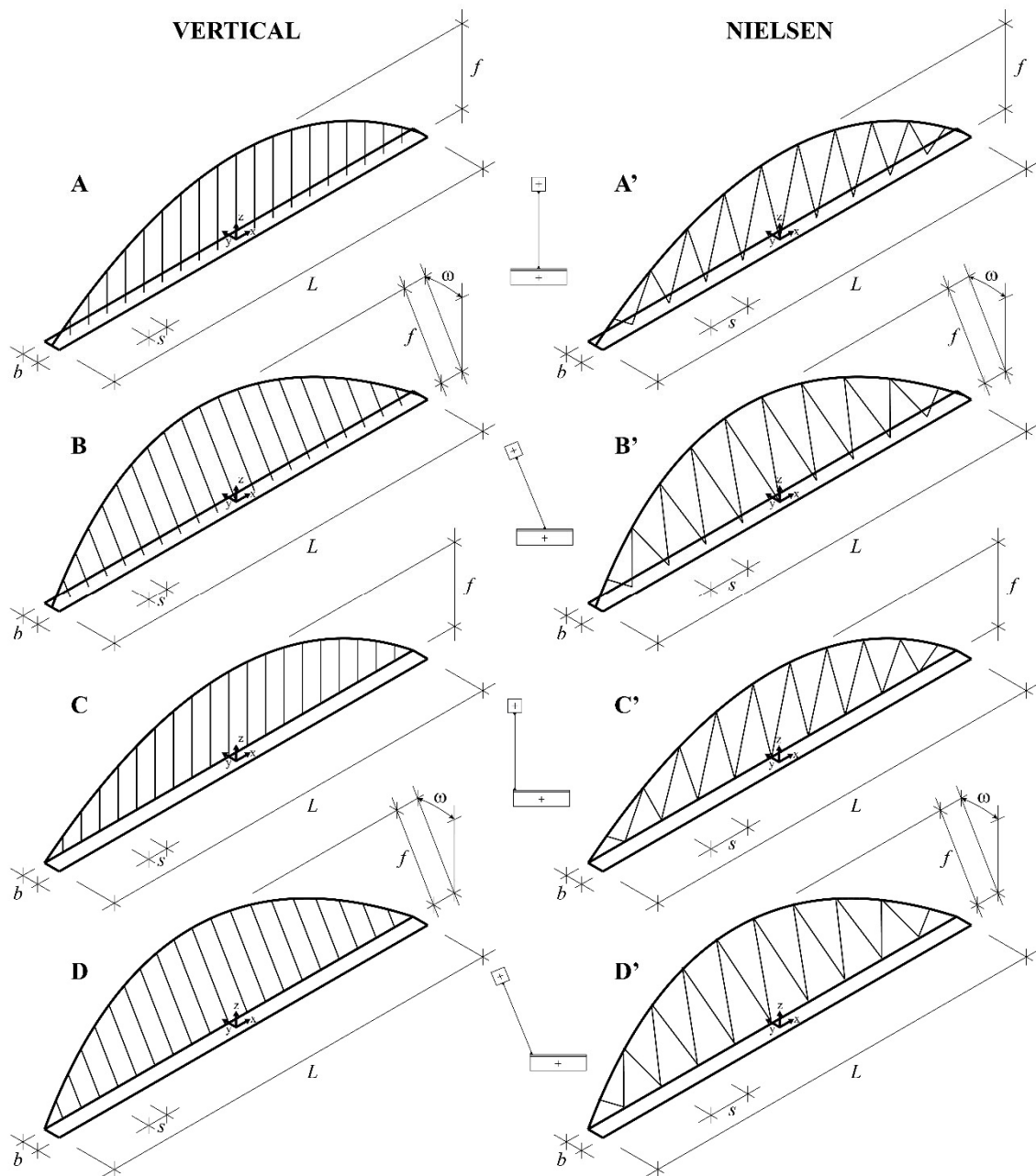


Figura 6. Puentes considerados en el estudio.

El efecto de la inclinación sobre la flexión en el plano del arco y en el plano (de eje horizontal) del tablero es que la contribución del arco a la rigidez conjunta arco-tablero [8] disminuye, por lo que se produce un leve incremento en el tablero y una disminución en el arco (en torno al 15% para una inclinación de 30° en los puentes estudiados). Sin embargo, al inclinarse el arco, las componentes horizontales de los axiles de las péndolas generan un fuerte

momento flector (Figura 8) fuera del plano del tablero (de eje vertical), ya que trabaja como una viga biapoyada en el plano horizontal [9]. Esta flexión es prácticamente independiente del tipo de atirantamiento del arco.

En el arco también aparece flexión fuera del plano, pero es mucho menor y producto del hecho de que el arco está empotrado al tablero. Ambas flexiones son máximas para todo el tablero cargado (q_5 , Figura 8).

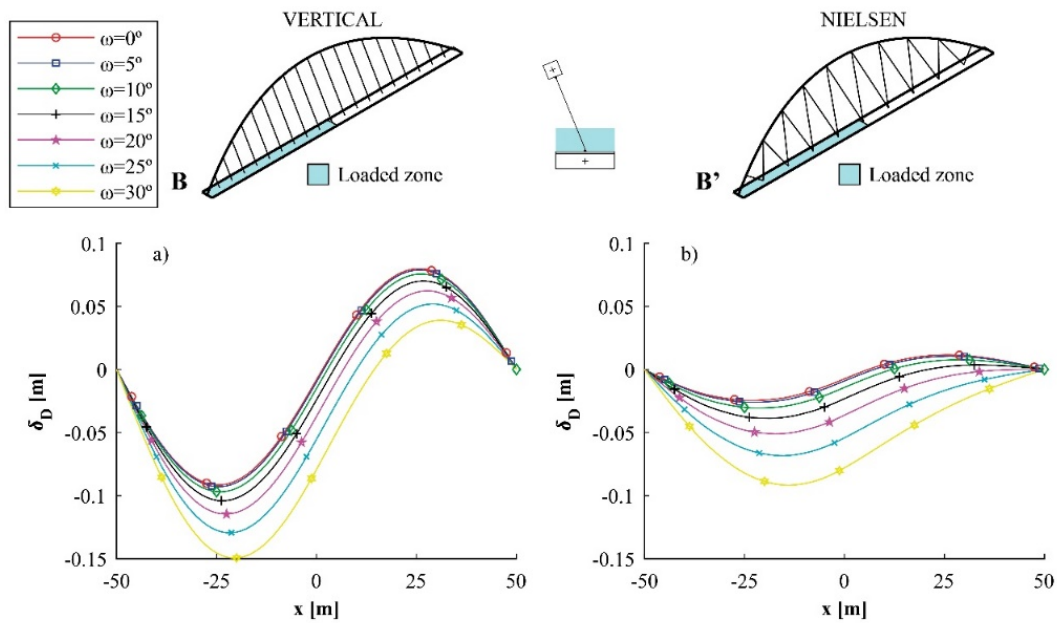


Figura 7. Casos B y B'. Flechas en tablero para carga q_3 .

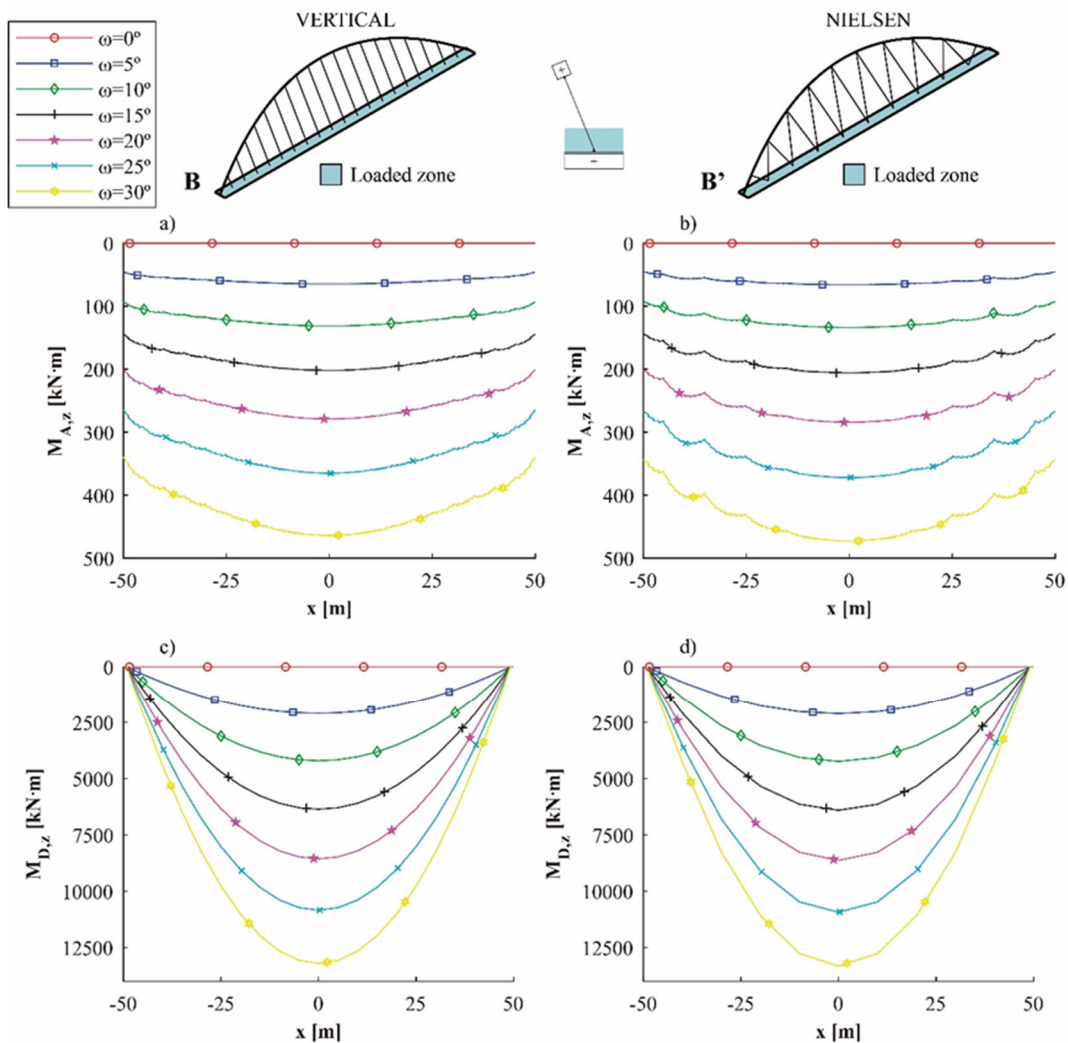


Figura 8. Casos B y B'. Flexión fuera del plano del arco y de eje vertical en el tablero para q_3 .

3.3 Arco vertical anclado en el borde del tablero (C-C')

En los modelos estudiados, las máximas flechas y flectores se producen para las sobrecargas q_3 o q_4 , asimétricas longitudinalmente. Se aprecia (Figura 9), que la configuración tipo Nielsen sigue siendo muy eficaz en la reducción de flechas (alrededor del 66%) con respecto a la

configuración con péndolas verticales. Sin embargo, ahora, la máxima flecha δ_E se produce en el borde del tablero opuesto al arco, y se obtiene al añadir el efecto del giro torsional. Este efecto disminuye, lógicamente, con la rigidez torsional del tablero.

La configuración tipo Nielsen mantiene su eficacia y consigue una reducción de flexión en el plano cercana al 70% en el arco y en el tablero.

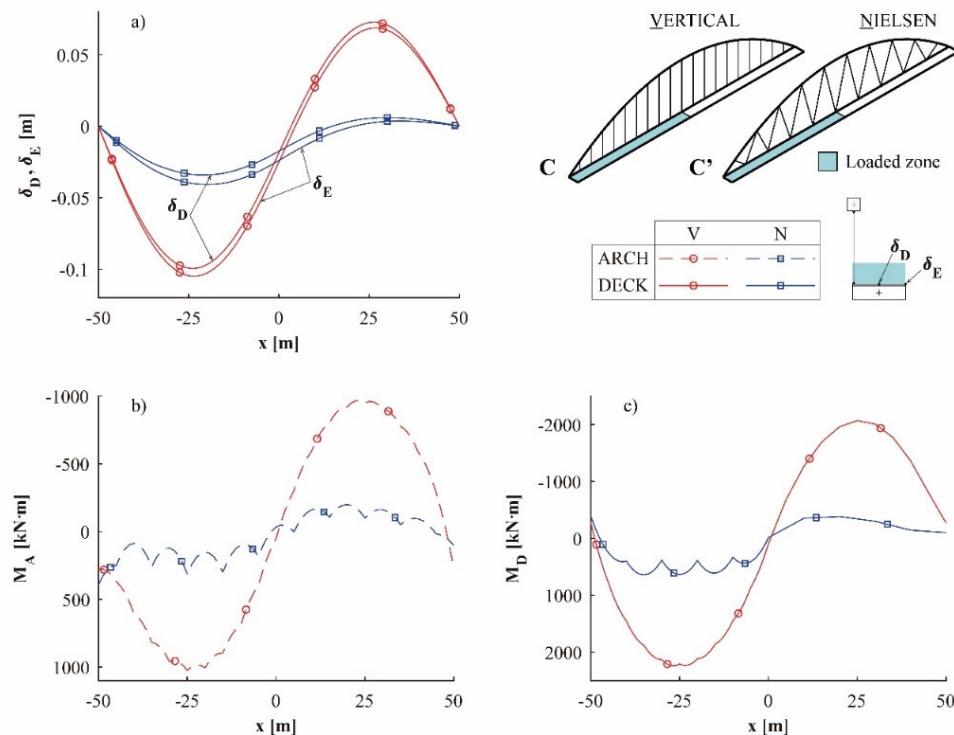


Figura 9. Casos C y C'. Flechas (a) en el eje de tablero δ_D y en el borde δ_E , y diagramas de momentos flectores para el arco (b) y el tablero (c) para una carga q_3 .

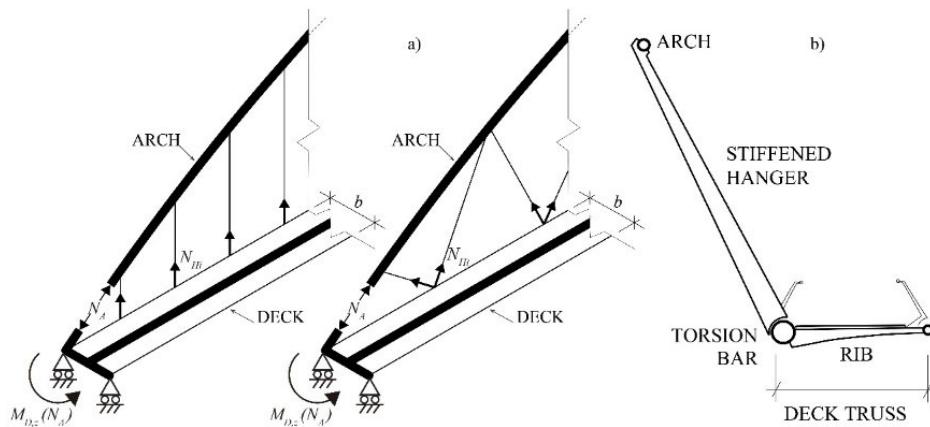


Figura 10. (a) Flexión de eje vertical debida a la excentricidad del arco. (b) Sección transversal de la Pasarela de La Devesa, Ripoll (Redibuja de [7]).

En los modelos estudiados aparece una flexión de eje vertical en el tablero por la excentricidad del arco respecto de la directriz del tablero (Figura 10(a)). Para evitarla, en algunos puentes, como la pasarela de La Devesa, en Ripoll [9,10], formados por un tablero recto sostenido por un arco inclinado excéntrico (estudiados en el siguiente apartado), la sección transversal está formada por una barra de torsión, que une los arranques del arco, de la que salen costillas transversales del ancho del tablero (Figura 10(b)). La máxima torsión se produce con todo el tablero cargado y es prácticamente

independiente de la configuración de atirantamiento.

3.4. Arco inclinado anclado en el borde del tablero (D-D')

Los resultados detallados del caso D-D' pueden consultarse en las referencias [5] y [6]. Como se puede suponer, el caso D-D' combina los efectos de la inclinación del arco del caso B-B' con los de la excentricidad del arco del caso C-C'. En la Figura 11 se muestran las flechas. Si se comparan con las de la Figura 7 se puede apreciar el efecto del desplazamiento del arco al borde.

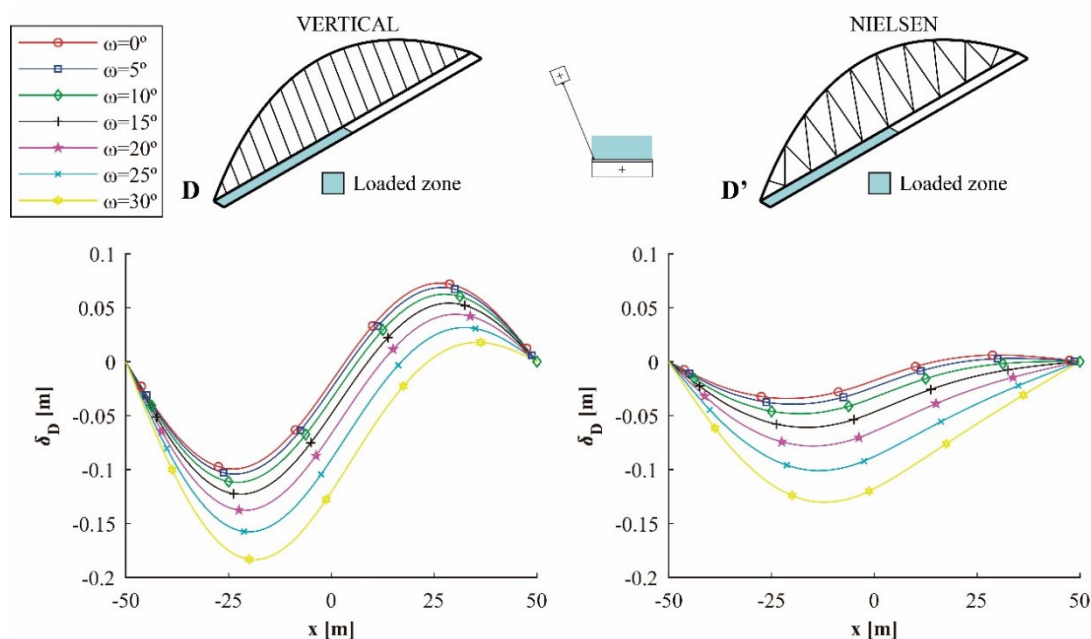


Figura 11. Casos D y D'. Flechas en el eje de tablero para una carga q_3 .

4. Acciones más desfavorables.

Las flechas máximas y los esfuerzos pésimos no siempre se obtienen para las mismas hipótesis de carga para los diferentes casos estudiados. Por ejemplo, en el modelo de referencia (caso A-A'), es la hipótesis q_3 la que produce la máxima flecha a cuartos de la luz. Sin embargo, en el caso C-C', con el arco excéntrico al borde, puede ocurrir que la máxima flecha se produzca para la

hipótesis q_5 , es decir, para el tablero completamente cargado, y además en el borde, por el efecto añadido del giro torsional. Este efecto ya ha sido parcialmente estudiado [9], pero no había sido señalado antes para configuraciones con péndolas inclinadas.

Así, se comparan a continuación las deformaciones del tablero bajo diferentes hipótesis de carga en los modelos que aportan conclusiones más interesantes, los B-B' y D-D'. Se han considerado dos cargas longitudinales

simétricas (q_2 y q_5) y una carga asimétrica (q_3). Para las cargas simétricas, las flechas se obtienen en un punto de control situado a la mitad del vano ($x = 0$), mientras que, para la carga asimétrica, el punto de control es el cuarto del vano ($x = \pm L/4$). En el caso D-D' también se ha obtenido la flecha en el borde del tablero.

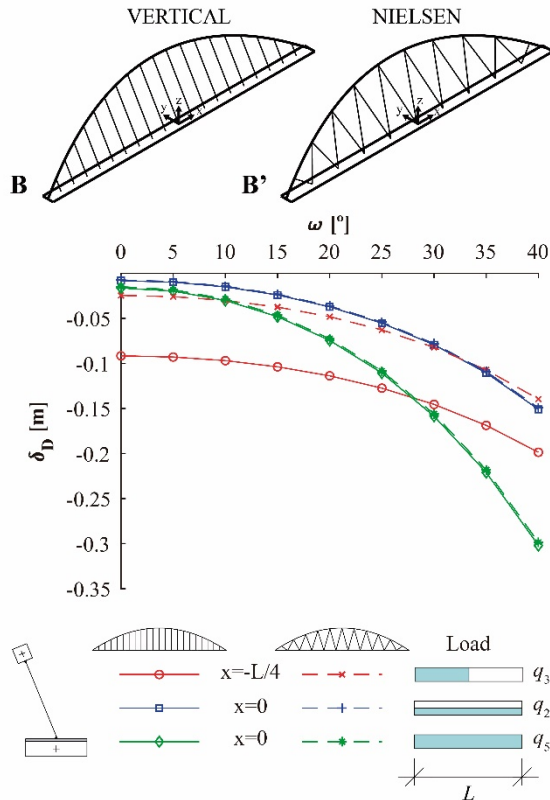


Figura 12. Modelos B y B'. Flechas en el tablero para cargas simétricas (q_2 y q_5) y asimétricas (q_3) en los puntos de control para diferentes inclinaciones.

Los resultados para el caso B-B' se muestran en la Figura 12. Para arcos verticales o inclinaciones bajas, la hipótesis de carga más desfavorable es la asimétrica q_3 , hasta 27° en el caso de las péndolas verticales y sólo hasta 10° para péndolas tipo Nielsen, lo que explica por qué los valores de las flechas para cargas asimétricas son menores para esta configuración de atirantamiento. Para inclinaciones mayores, la carga q_5 , sobre todo el tablero, es más desfavorable.

Los resultados para los casos de carga simétrica q_2 y q_5 son prácticamente los mismos para ambos tipos de atirantamiento.

Los resultados del caso D-D', donde el arco del caso B-B' es ahora excéntrico, se muestran en la Figura 13, tanto para la flecha del eje del tablero, δ_D , como del borde, δ_E . Para péndolas verticales, para δ_D , se repite la tendencia del caso B-B': para arcos verticales o poco inclinados, la hipótesis asimétrica q_3 es la más desfavorable, en este caso hasta 20°. Sin embargo, en la tipo Nielsen, la carga q_5 sobre todo el tablero es la más desfavorable, incluso para arcos verticales.

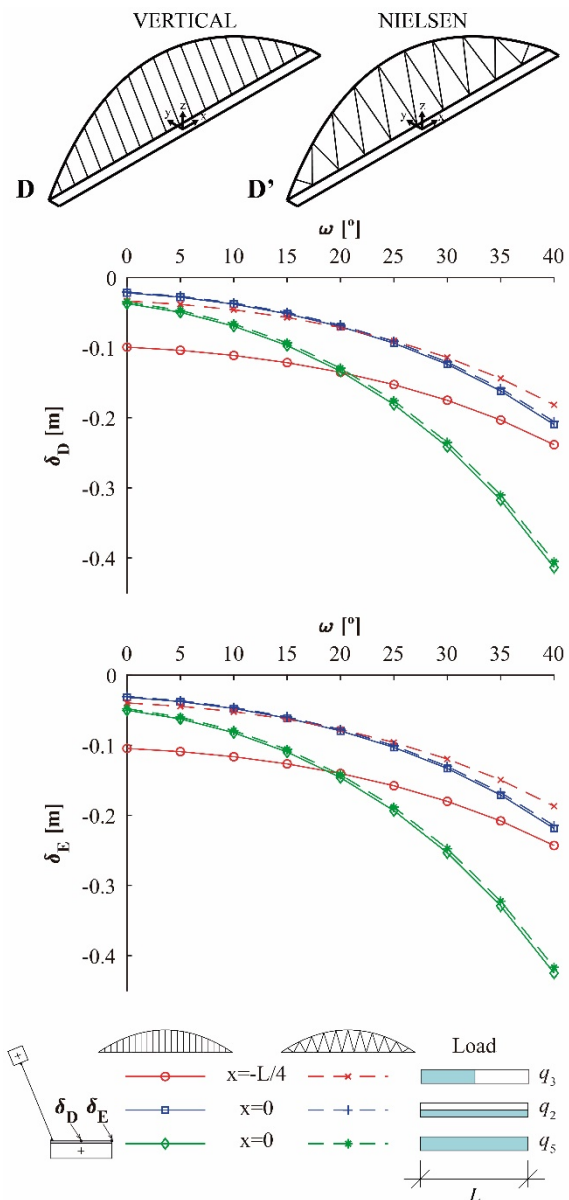


Figura 8. Caso D y D'. Flechas en el eje, δ_D , y borde, δ_E , de tablero para cargas simétricas (q_2 y q_5) y asimétricas (q_3) en los puntos de control para diferentes inclinaciones del arco.

Para los resultados en el borde, δ_E , las flechas son ligeramente superiores por el efecto adicional del giro torsional. Sin embargo, desde el punto de vista cualitativo, los resultados muestran una tendencia extremadamente similar.

Tanto para δ_D como δ_E , y como ocurre con el caso B-B', los resultados para los casos de carga simétrica q_2 y q_5 son prácticamente iguales tanto para las péndolas tipo Nielsen como para las verticales.

Obviamente, los resultados numéricos obtenidos sólo son válidos para los modelos estudiados. En la práctica, dependen de demasiadas variables (por ejemplo, la geometría del puente y las propiedades mecánicas de sus secciones transversales) como para formular aquí conclusiones generales. Pero, a nuestro juicio, lo relevante es que los resultados ilustran cómo la espacialidad del puente (en este caso conseguida mediante la rotación del arco) tiene efecto sobre qué combinación de acciones resultan más desfavorables en las situaciones de proyecto.

5. Eficacia del atirantamiento Nielsen.

Los resultados mostrados hasta ahora demuestran que la disposición tipo Nielsen mejora, en términos generales, el comportamiento del puente con respecto a la de péndolas verticales. Sin embargo, se ha comprobado que cuando el arco está inclinado, su eficacia se reduce. Para poder comparar ambas configuraciones se ha definido la eficacia del atirantamiento tipo Nielsen, e_N , como:

$$e_N \equiv \left(1 - \frac{\delta_N}{\delta_V}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

donde δ_V y δ_N son las flechas en el cuarto de luz para el modelo con cables verticales y Nielsen respectivamente, bajo una carga asimétrica q_3 . Si, por ejemplo, $\delta_V=10$ mm y $\delta_N=3$ mm, significa

que $e_N=70\%$. Así, e_N se puede entender como el porcentaje de reducción de la deformación debido al cambio en el atirantamiento.

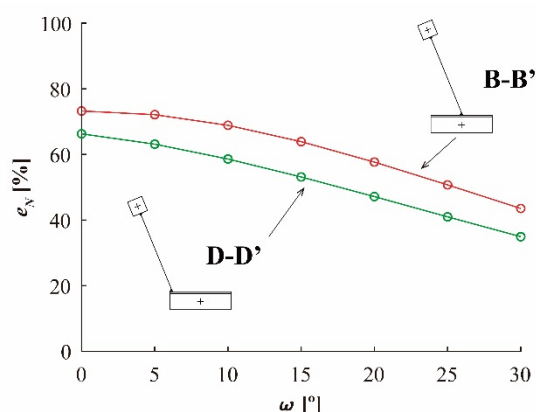


Figura 9. Eficacia del atirantamiento tipo Nielsen respecto al atirantamiento de péndolas verticales. Arco inclinado centrado sobre un tablero recto (B-B') y arco inclinado vinculado al borde de un tablero recto (D-D').

Los modelos con el arco centrado en un tablero recto (B y B') muestran una pérdida de eficacia a medida que aumenta la inclinación del arco (Figura 14). En particular, la eficacia varía del 75% para un arco vertical al 45% aproximadamente para un arco inclinado 30°, lo que es coherente con los resultados mostrados hasta ahora. Una tendencia muy similar se aprecia cuando el arco inclinado se desplaza hasta el borde del tablero recto (modelos D y D'), y la eficacia disminuye del 65 % al 40 % aproximadamente. El hecho de que ambas curvas sean paralelas significa que la pérdida de eficacia afecta en la misma medida a ambas disposiciones de cables.

6. Conclusión

Esta comunicación presenta parcialmente los resultados de estudios, realizados por los autores, que abordan la cuestión de si el atirantamiento tipo Nielsen sigue conservando su eficacia en los puentes arco espaciales.

A partir de los resultados de los estudios realizados, se puede concluir que, a pesar de que su eficacia disminuye si el arco se inclina o se desplaza hasta el borde del tablero, la disposición de cables tipo Nielsen siempre es más eficaz (o, al menos, igual) para las deformaciones verticales y los momentos flectores de eje horizontal en el tablero y en el plano del arco. Sin embargo, la diferencia entre la disposición de cables Nielsen y la vertical no es relevante para los momentos flectores de eje vertical y fuera del plano en el tablero y en el arco, respectivamente, y lo mismo puede decirse de la torsión.

Agradecimientos

Esta investigación se ha realizado en el marco del proyecto PID2021-126405OB-C33, financiado por MCIN/AEI /10.13039/501100011033 y por FEDER, UE

Referencias

- [1] J. Manterola. Situación actual de puentes arco. Informes de la Construcción, 40, nº 398 (1988), 81-89.
- [2] J.M. García-Guerrero, El puente arco espacial como una evolución tipológica, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena, España, 2018.
- [3] P. Tveit, About the Network arch bridge, en https://home.uia.no/pert/index.php/My_Publications. (Acceso 15/12/2024.)
- [4] F. Schanack, Puentes en arco tipo network, Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, España, 2008.
- [5] M. Cánovas-González, J.M. García-Guerrero, J.J. Jorquera-Lucerga, Estudio paramétrico de la validez del atirantamiento tipo Nielsen en puentes arco espaciales, Revista de Obras Públicas. 3609 (2019) 75–82.
- [6] M. Cánovas-González, J.M. García-Guerrero, J.J. Jorquera-Lucerga, Validity of the Nielsen-type hanger arrangement in spatial arch bridges with straight decks, Steel and Composite Structures. 47, 1 (2023) 51–69.
- [7] Eurocódigo 1: Acciones en estructuras Parte 2: Cargas de tráfico en puentes.
- [8] L. Stavidris Structural systems: behaviour and design. Thomas Telford, London, 2010.
- [9] J.J. Jorquera-Lucerga, Understanding Calatrava's bridges: A conceptual approach to the 'La Devesa-type' footbridges, Engineering Structures. 56 (2013) 2083–2097.
- [10] A. Tzonis, Santiago Calatrava: Complete Works, Rizzoli, New York, EEUU, 2007.