

# Acciones de diseño de péndolas en los puentes tipo Nielsen

(Recibido: 07/05/2016; Aceptado: 26/06/2016)

García Guerrero, J. M.<sup>1</sup>; Segado García, E.<sup>2</sup>; Jorquera Lucerga, J. J.<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Departamento de Ingeniería Civil, E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Paseo Alfonso XIII, Nº 52, 30203, Cartagena (España)

<sup>2</sup> Estudiante de doctorado, Escuela Internacional de Doctorado, UPCT

Teléfono: 968 177 715

Email: jm.guerrero@upct.es

**Resumen.** En la ingeniería de puentes, la tipología de arco de tablero inferior es muy usada en la construcción de pasarelas peatonales. Debido a sus posibilidades formales, se han construido muchos puentes arco en entornos urbanos, donde además de cubrir necesidades funcionales, establecen hitos arquitectónicos. En el presente estudio, se distinguen distintas vinculaciones entre el arco y el tablero, atendiendo a la disposición de las péndolas, y se analiza si las cargas que determinan el diseño de las péndolas, son iguales para péndolas verticales y para péndolas inclinadas como la de los puentes tipo Nielsen.

**Palabras clave.** Acciones; Diseño de péndolas; Nielsen; Puente arco

**Abstract.** In bridge engineering, the typology known as arch bridge with inferior deck is very common in construction of pedestrian bridges. Due to its aesthetics possibilities, many arch bridges have been built in urban environments, where structures must fulfill not only functional requirements, but also become architectural milestones. The present paper studies different vinculacions for arch and deck that depend on the hangers' arrangement, and analyzes if the loads that determine the hangers design are the same as those for both vertical and Nielsen types.

**Keywords.** Loads; Hangers design; Nielsen; Arch Bridge

## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

Una variante del sistema convencional de péndolas verticales para tableros de arcos atirantados, tipo bow-string, fue patentado en el año 1926 por Octavius Nielsen. El sistema consistía en sustituir los cables verticales, por unas barras de acero inclinadas con una configuración en V (Fig. 1). Esta configuración en V transformaba el esquema resistente tipo arco en otro tipo viga o celosía, donde las péndolas inclinadas en V recogían las fuerzas cortantes derivadas de distribuciones de cargas y sobrecargas alejadas de la funicularidad, permitiendo reducir drásticamente el nivel de flexiones en arco y tablero, los cuales pasaban a trabajar fundamentalmente a compresión/tracción cuasi-centradas, y por tanto con la máxima eficiencia resistente.

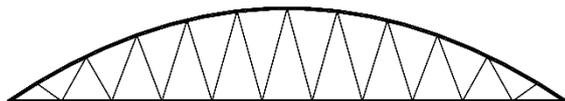


Fig. 1. Arco con vinculación de péndolas tipo Nielsen.

El problema principal del arco tipo Nielsen viene motivado por la posibilidad de entrada en compresión, y por tanto de inestabilidad, de una o varias péndolas. Cuando esto ocurre la relación entre sobrecargas y cargas permanentes es alta, como por ejemplo en puentes de ferrocarril, pasarelas o estructuras ligeras con sobrecargas elevadas.

Dado que son estructuras con grandes posibilidades estéticas, en los últimos años se han construido un gran número de puentes arco, sobre todo pasarelas peatonales en ambientes urbanos donde los habitantes demandan estructuras que se conviertan en hitos visuales de la ciudad.

La mayoría de las pasarelas construidas tienen una disposición de péndolas verticales, si bien algunas de ellas se han construido con péndolas inclinadas tipo Nielsen (Fig. 2).



Fig. 2. Pasarela de Gorostiza (Barakaldo). En este caso la pasarela se compone de dos arcos tangentes en la clave, vinculados ambos al tablero con péndolas inclinadas tipo Nielsen. Fuente: [8].

Un aspecto a tener en cuenta a la hora de diseñar pasarelas en arco es la tensión máxima que van a soportar las péndolas, la carrera de tensiones, que es la diferencia entre la tensión máxima y mínima [1], y por último, la posibilidad de entrada en compresión de las mismas (Fig. 3), lo que se traduce en una

inestabilidad, pues un cable solo puede trabajar a tracción.

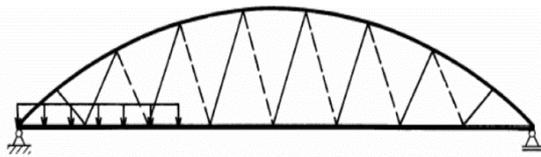


Fig. 3. Puente Nielsen con carga en una parte de la luz, lo que provoca péndolas comprimidas (discontinuas en el dibujo). Fuente: [7].

En contra de lo que podría parecer intuitivamente, las hipótesis de carga que determinan el diseño de una péndola concreta, no son independientes ni de la inclinación de las péndolas ni de la disposición de las mismas.

Este artículo analiza si las cargas que son críticas en el diseño de puentes arco con péndolas verticales (Fig. 4) coinciden con las cargas críticas para los puentes tipo Nielsen, y en el caso de que no lo sean, establecer las cargas que deben tenerse en cuenta para realizar un correcto diseño de las péndolas.



Fig. 4. Puente Manuel Giménez Abad (Zaragoza). Fuente: [9].

## 2. Estudios realizados

### 2.1. Descripción de los modelos usados

Para estudiar la carga más desfavorable en el diseño de péndolas, se han realizado tres modelos (Fig. 5) de un puente con arco superior de 75 m de luz ( $L$ ), y una flecha ( $f$ ) de 12.5 m, que es 1/6 de la luz del puente.

El ancho del tablero ( $b$ ), se ha considerado de 4 m.

De los tres modelos realizados, uno de ellos tiene una disposición de péndolas verticales (Fig. 5-a, en adelante modelo V) y los otros dos una disposición tipo Nielsen, siendo en todos los casos las péndolas de sección maciza y circular con un diámetro  $\phi 50$  mm.

La diferencia entre los dos modelos con péndolas Nielsen radica en la posición de la primera péndola, la cual condiciona la posición de las siguientes. Así, el modelo de la Fig. 5-b (en adelante modelo N-A) empieza con una péndola cuyo primer nodo está en el arco, y el segundo nodo en el tablero, mientras que el modelo de la Fig. 5-c (en adelante modelo N-B)

empieza con una péndola cuyo primer nodo está en el tablero, y el segundo nodo en el arco.

La distribución de luces entre péndolas ( $s$ ) es para el modelo de péndolas verticales  $3.75 + 20 \times 3.375 + 3.75$  m. Para el arco Nielsen modelo N-A, la distribución es  $7.125 + 9 \times 6.75 + 7.125$  m, y para el modelo Nielsen N-B es  $3.75 + 10 \times 6.75 + 3.75$  m.

El arco tiene una sección rectangular de  $900 \times 900 \times 25$  mm. El tablero se compone de un tubo rectangular de las mismas dimensiones que el arco, pero sobre el que se coloca una losa de hormigón de ancho  $b=4000$  mm y 150 mm de espesor. Como inercia longitudinal del tablero se considera la inercia conjunta del tubo y la losa, mientras que la inercia transversal es solo la de la losa de hormigón, no considerándose la inercia del tubo y de las costillas del tablero.

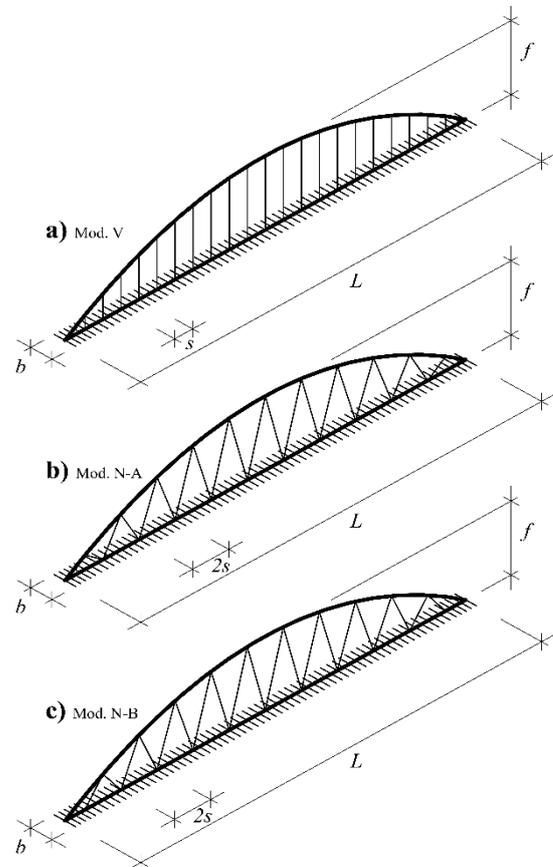


Fig. 5. Parámetros geométricos para el estudio de la carga más desfavorable en el diseño de péndolas. a) Arco recto con vinculación clásica de péndolas verticales (modelo V). b) Arco recto con vinculación tipo Nielsen y péndola inicial inclinada hacia el centro del tablero (modelo N-A). c) Arco con vinculación tipo Nielsen y péndola inicial inclinada hacia el extremo del tablero (modelo N-B).

Las solicitaciones a tener en cuenta son el peso propio, y las cargas variables sobre el tablero. Estas cargas variables (Fig. 6) se corresponden con la superficie comprendida entre las péndolas verticales del modelo V, superficie que resulta de multiplicar el ancho del tablero  $b$ , por la distancia entre péndolas  $s$ . Posteriormente esa superficie se multiplica por un valor de  $5 \text{ kN/m}^2$  (según IAP-11 [2]).

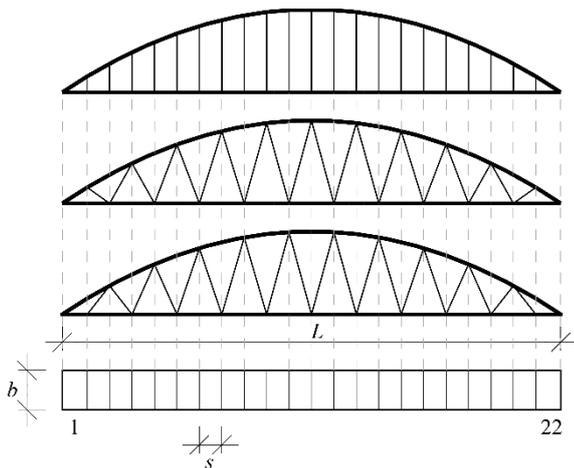


Fig. 6. Vista en alzado de los tres modelos, y vista en planta del tablero, con las superficies correspondientes a las 22 cargas variables.

Al considerar las cargas variables como trozos del tablero con un ancho  $b$  y un largo  $s$ , se obtienen un total de 22 cargas variables, siendo la carga crítica para el diseño de las péndolas una combinación de cargas a partir de esas 22.

**2.2. Medios usados**

Para llevar a cabo el análisis estructural, se ha usado el programa comercial SAP2000. Para el postproceso de resultados se han utilizados los programas comerciales Excel y Matlab.

**2.3. Análisis y resultados**

A partir de los modelos descritos en el punto 2.1., se han realizado los análisis para los tres modelos de arco.

El análisis para cada modelo consiste en obtener el valor del esfuerzo axil en cada una de las péndolas, para cada posible combinación de sobrecargas del tablero. Los valores del axil para cada péndola se filtran, obteniéndose el mayor y el menor valor de axil, que es la envolvente del axil. En esa envolvente del axil, si se resta al mayor valor el menor, se obtiene la carrera de axil a la que está sometida la péndola, cuestión que hay que tener en cuenta para diseñar la péndola a fatiga. En la determinación de la carrera del axil no influye el peso propio, por lo que este estudio no considera su efecto.

Una vez se han filtrado los datos, obteniéndose la envolvente de axiles para cada péndola, hay que establecer para qué combinación de cargas se ha producido el valor máximo y mínimo. Al ser los modelos simétricos, al igual que la distribución de cargas, los resultados de las envolventes son también simétricas respecto a un eje vertical que pasa por la clave del arco.

Los resultados de los valores máximos y mínimos para cada péndola se han ordenado en la Fig. 7.

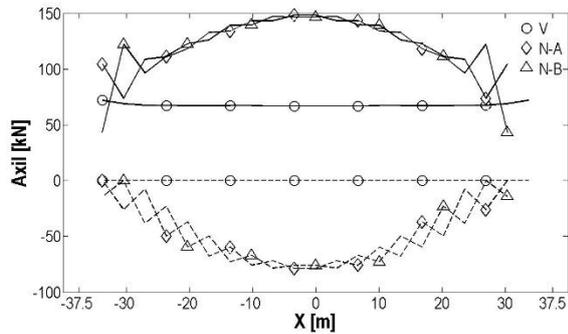


Fig. 7. Valores máximos y mínimos del axil en las péndolas (Tracción + y Compresión -). En el gráfico se muestra el valor del axil en la coordenada  $x$  del tablero donde está anclada la péndola. En línea continua están los valores máximos, mientras que en línea discontinua están los valores mínimos del axil. Los diferentes marcadores hacen referencia a los distintos modelos.

En el modelo V, la carga variable que produce una mayor tracción en los cables es el tablero completamente cargado (Fig. 8-a), mientras que la que produce menores valores es el tablero completamente descargado (Fig. 8-b).

Para el modelo N-A, la carga variable que produce una mayor tracción en las péndolas es la combinación de las sobrecargas 1 a la 12 (Fig. 8-d), siendo la que provoca una mayor compresión, la combinación de cargas 1 a la 10 (Fig. 8-e).

Por último, para el modelo N-B los valores máximos y mínimos de axil ocurren a la vez cuando se carga la mitad del tablero (Fig. 8-c), dándose los máximos axiles de tracción en el lado donde se aplica la carga variable, y los axiles de compresión en el lado opuesto.

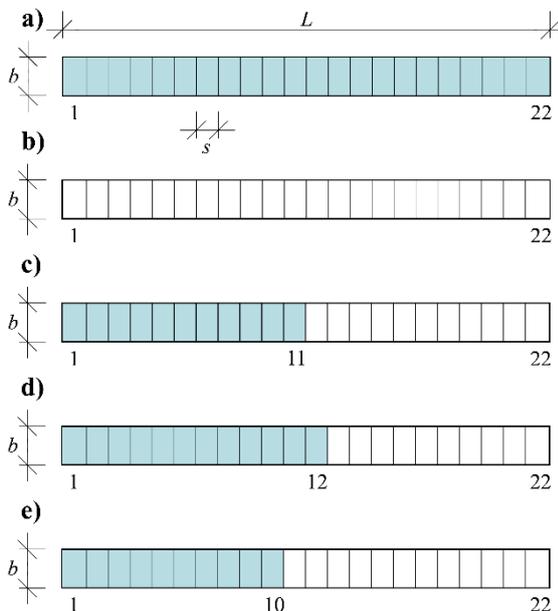


Fig. 8. Combinaciones de carga sobre el tablero para valores máximos y mínimos del axil.

**3. Conclusiones**

Tras observar los resultados de los análisis del punto 2.3., se puede observar como las configuraciones de

péndolas tipo Nielsen tienen una carga crítica para el diseño de péndolas distinta al modelo de péndolas verticales.

Si bien para el arco con péndolas verticales la máxima tracción se alcanza con el tablero completamente cargado, y la mínima con el tablero completamente descargado, en los modelos de péndolas Nielsen la máxima tracción y compresión aparece, dependiendo de cómo sea la inclinación de la primera péndola, aproximadamente con la mitad de tablero cargado.

El hecho de que las péndolas Nielsen empiecen con una inclinación hacia al centro de tablero o hacia el borde, condiciona la carga crítica para el diseño de péndolas. En el caso de que la péndola inicial tenga una inclinación hacia el centro de tablero, los axiles máximos se dan con la mitad de tablero más una distancia  $s$  cargados, y los axiles mínimos con la mitad del tablero menos una distancia  $s$ . Cuando la inclinación de la primera péndola es hacia el borde del tablero, el valor máximo y mínimo del axil se produce en ambos casos para la mitad del tablero cargado.

## Agradecimientos

El trabajo del primer autor se ha desarrollado mediante la financiación de la Consejería de Industria, Turismo, Empresa e Innovación de la CARM a través de la Fundación Séneca, Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia, por medio de una ayuda del Programa Séneca.

## Referencias

- [1] AENOR. Eurocódigo 3, parte 1.11. (2006). Cables de acero de alta resistencia.
- [2] Dirección General de Carreteras. (2011). *Instrucción sobre las acciones a considerar en el Proyecto de puentes de carretera. IAP-11*. Secretaría General Técnica. Ministerio de Fomento. Madrid.
- [3] Jorquera Lucerga, J. J. (2007). *Estudio del comportamiento resistente de los puentes arco espaciales*. Tesis doctoral. UPM.
- [4] Jorquera Lucerga, J. J. (2013). "Understanding Calatrava's bridges: A conceptual approach to the 'La Devesa-type' footbridges". *Engineering Structures*. Vol. 56. p 2083–2097.
- [5] Siegrist Fernández, C. *Curso de doctorado de puentes arco de hormigón*. Publicaciones de la ETSICCP. Madrid.
- [6] Schanack, Frank. (2008). *Puentes en arco tipo network*. Tesis doctoral. UC.
- [7] Valenzuela Saavedra, M. A. (2007). *Evaluación de factibilidad estructural de puentes atirantados tipo Network como alternativa de puentes en Chile*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad de Chile.

- [8] <http://barakaldodigital.blogspot.com.es>. Foto de Ayuntamiento de Barakaldo. (acceso en Abril de 2016).
- [9] <http://www.puentemania.com/>. Foto de Manuel Juliá. (acceso en Abril de 2016).