

# Consideraciones sobre la eficacia de los arcos inclinados tipo Nielsen

(Recibido: 30/03/2015; Aceptado: 18/05/2015)

Juan Manuel García Guerrero, Emilio Segado García, Juan José Jorquera Lucerga  
Departamento de Ingeniería Civil

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas  
Paseo Alfonso XIII, Nº 52, 30203 Cartagena (España)

Teléfono: 868 07 12 77

Email: gguerrero2@hotmail.com, segado.garcia@gmail.com, juanjo.jorquera@upct.es

**Resumen.** En la ingeniería estructural moderna, cada vez cobra más importancia la estética de las estructuras, especialmente en entornos urbanos, donde, además de cubrir necesidades funcionales, se pretende establecer hitos arquitectónicos. Como consecuencia de los requerimientos estéticos, se han construido puentes arco donde el plano del arco no se mantiene vertical, sino que se inclina, y se traslada del centro al borde del tablero. El presente estudio analiza si una configuración de péndolas tipo Nielsen, que tan ventajosa resulta en arcos verticales, es igualmente eficaz en un arco inclinado, el cual presenta un comportamiento espacial al no trabajar sólo en su plano.

**Palabras clave.** Arco inclinado; Nielsen; Puente arco; Puente arco espacial.

**Abstract.** In modern structural engineering, the aesthetical value of structures becomes more and more prevalent, mainly at urban environments. Structures must fulfill not only functional requirements, but also be architectural milestones. As a result of these aesthetic considerations, some arch bridges have been built with inclined arches attached to the edge of the decks. This study analyzes whether the Nielsen hangers arrangement, which is so advantageous for vertical arches, is equally efficient in inclined arches. In this way, they have an out-of-plane response and, therefore, spatial behavior.

**Keywords.** Inclined arch; Nielsen; Arch bridge; Spatial arch bridge.

## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

En el año 1926, Octavius Nielsen patentó una variante del sistema convencional de péndolas verticales para tableros de arcos atirantados, tipo bow-string, mediante 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 esto 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.

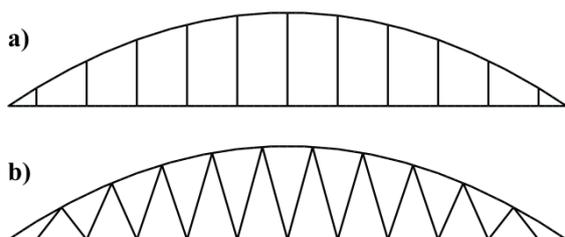


Fig. 1. a) Arco clásico con disposición de péndolas verticales.  
b) Arco con vinculación de péndolas tipo Nielsen.

El principal problema del arco tipo Nielsen se deriva de la posibilidad de entrada en compresión, y por tanto de inestabilidad, de una o varias péndolas (Fig. 2). 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.

Por otra parte, cada vez más frecuentemente, la estética es uno de los aspectos a tener en cuenta a la hora de diseñar estructuras, sobre todo en ambientes urbanos, donde los habitantes demandan estructuras que se integren en el espacio urbano, y se conviertan en puntos icónicos de la ciudad, siendo un claro ejemplo el de los puentes arco inclinados, donde el plano del arco que contiene las péndolas pierde su verticalidad (Fig. 3).

El desarrollo de materiales, métodos de cálculo y medios de ejecución cada vez más potentes, ha posibilitado el diseño de estructuras en las que prima

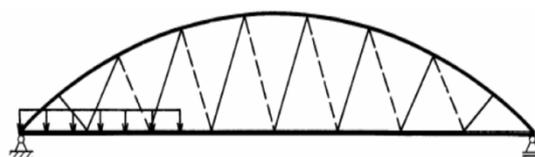


Fig. 2. Puente Nielsen con carga en una parte de la luz, lo que provoca péndolas comprimidas (discontinuas en el dibujo).  
Fuente: [6].



Fig. 3. Pasarela de La Devesa (Ripoll). Fuente: [7]

la estética, y donde la componente estructural pasa a un segundo plano.

La inclinación del plano del arco produce en general, un empeoramiento del comportamiento del conjunto arco-tablero [3]. A la problemática de la inclinación del arco se añade también, la posibilidad de que el arco no se encuentre centrado en el tablero, sino además sujeto a un borde del mismo.

Este artículo analiza, si la pérdida de eficacia que se va produciendo en las distintas posiciones mostradas en la Fig. 4 para los arcos clásicos de péndolas verticales, se produce también para los arcos con péndolas tipo Nielsen.

## 2. Estudios realizados

### 2.1. Descripción de los modelos usados

Para estudiar las consecuencias de la inclinación, 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.

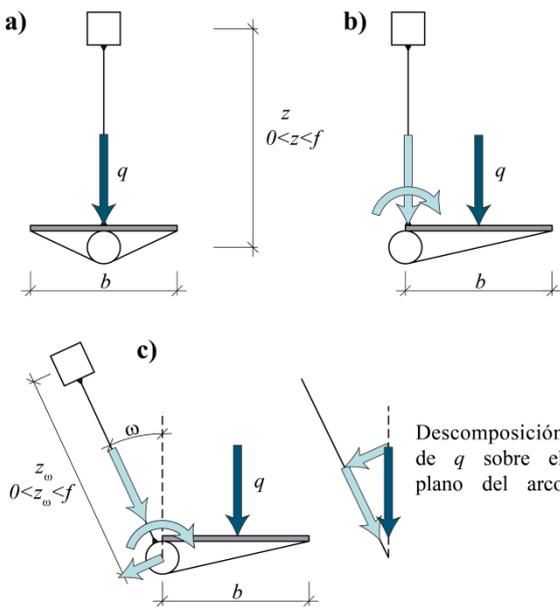


Fig. 4. Posiciones del arco estudiadas, con una carga  $q$  en el centro de tablero. a) Arco recto situado en el centro de tablero. b) Arco recto situado en el centro de tablero. c) Plano de arco inclinado  $\omega$  grados y situado en el borde de tablero.

El ancho del tablero ( $b$ ), se ha considerado de 4 m. La disposición de las péndolas es tipo Nielsen, siendo macizas y de sección circular con un diámetro  $\phi 100$  mm.

El arco tiene una sección rectangular de 900x900x25 mm, mientras que en el tablero se ha considerado un tubo  $\phi 1400 \times 40$ , despreciándose la contribución a la inercia de las costillas y del tablero que apoya sobre el tubo. Se ha determinado un espaciamiento entre las péndolas sobre el tablero ( $s$ ), de 6.75 m. El modelo de la Fig. 5-c tiene, además, el plano del arco girado  $20^\circ$ .

Paralelamente a los tres modelos tipo Nielsen, cuyos parámetros se pueden ver en la Fig. 5-b-c, se han realizado tres modelos iguales pero con péndolas verticales, modelos que usan las mismas secciones y distancias (Fig. 5-a).

Las solicitaciones a tener en cuenta (Fig. 6) son el peso propio, la carga  $q_1$  (superficie de la mitad del tablero más cercana al arco), la carga  $q_2$ , (superficie de la mitad del tablero más alejada del arco), y la carga  $q_3$  (superficie de la mitad de la luz del tablero). Estas cargas se han obtenido multiplicando las superficies correspondientes, por un valor de 5 kN/m<sup>2</sup> (según IAP-11 [1]).

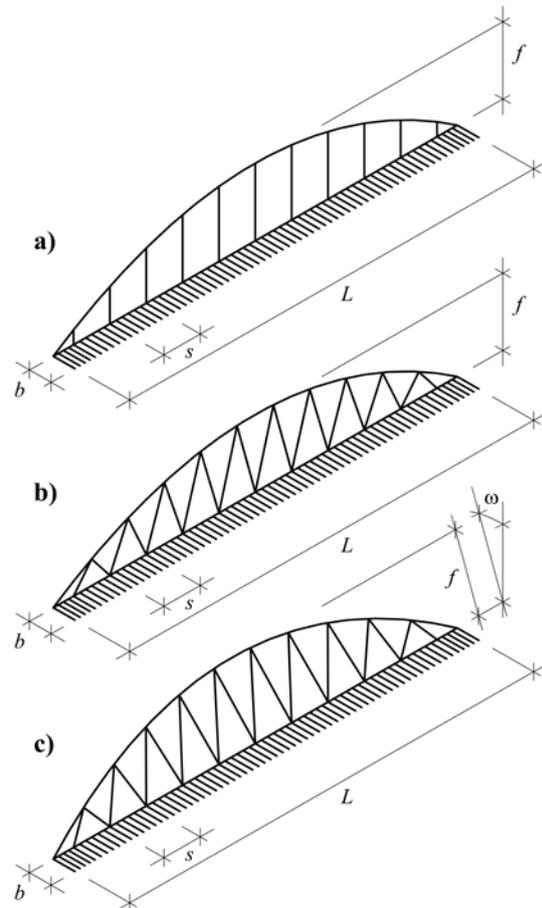


Fig. 5. Parámetros geométricos para el estudio de la eficacia de las péndolas Nielsen en arcos inclinados. a) Arco recto con vinculación clásica de péndolas verticales. b) Arco recto con vinculación tipo Nielsen. c) Arco con vinculación tipo Nielsen atado al borde e inclinado  $20^\circ$ .

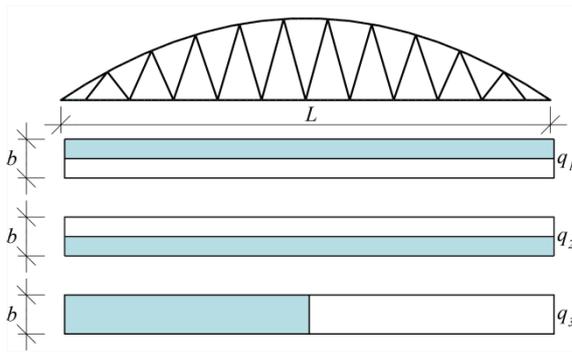


Fig. 6. Zonas del tablero cargadas con  $5\text{kN/m}^2$  (zonas sombreadas).

La diferencia de comportamiento para las distintas tipologías puede entenderse analizando los esfuerzos generados en cada caso por una carga  $q$  uniformemente repartida centrada en el tablero. En la disposición de la Fig. 4-a, se produce solo una flexión longitudinal. En el caso de la disposición de la Fig. 4-b, produce una flexión longitudinal, más una torsión igual a  $q \cdot b/2$ . En el caso de la Fig. 4-c, la carga produce una flexión longitudinal y una torsión igual a  $q \cdot b/2$ , además de una flexión transversal que se puede intuir al observar la descomposición de  $q$  sobre el plano del arco inclinado.

### 2.2. Medios usados

Para llevar a cabo el análisis estructural, se ha usado el programa comercial SAP2000, a la vez que se ha utilizado también el programa comercial Excel para el postproceso de los resultados de SAP2000.

### 2.3. Análisis y resultados

Partiendo de los modelos descritos en el punto 2.1., se han realizado los análisis para las tres posiciones del arco, tanto para la configuración Nielsen, como para la clásica de péndolas verticales. El primer análisis es para un arco cuyo plano se mantiene recto, y se sitúa en el centro del tablero (Fig. 4-a). El segundo análisis mantiene el plano del arco recto, pero se desplaza al borde del tablero (Fig. 4-b). El tercer análisis, sitúa el plano del arco en el borde del tablero, pero inclina el arco 20 grados (Fig. 4-c). En la tabla 1 se muestra el resumen de resultados obtenidos, que consiste en la evaluación de la flecha ( $\delta$ ) del tablero para la carga  $q_1$  en el centro de la luz ( $L/2$ ).

Tabla 1. Resumen de resultados.

	Clásico	Nielsen	%
	$\delta_{Clas}$ [mm]	$\delta_{Nie}$ [mm]	$\delta_{Nie} / \delta_{Clas}$
Arco recto al centro	5.6	4.6	82
Arco recto al borde	5.6	4.6	82
Arco inclinado al borde	54.4	53.7	99

## 3. Conclusiones

Tras observar los resultados mostrados en la Tabla 1, se puede ver como una configuración de péndolas tipo Nielsen resulta ventajosa cuando el plano del arco se mantiene recto y situado al centro, representando la flecha para el caso Nielsen un 82 % de la flecha obtenida con una configuración clásica.

Cuando el plano del arco se inclina 20 grados, la flecha para ambas configuraciones de péndolas es prácticamente la misma, ya que la flecha para el caso Nielsen representa un 99 % de la flecha del caso clásico de péndolas verticales.

Se puede afirmar así que, de modo general, la ventaja de la configuración tipo Nielsen no se mantiene cuando el plano del arco se inclina, perdiendo la eficacia que demostraba frente a la configuración de péndolas verticales cuando el plano del arco estaba recto.

## Agradecimientos

El trabajo del primer autor se ha desarrollado mediante la financiación del programa de Becas de Iniciación en la Actividad Investigadora de la UPCT.

## Referencias

- [1] 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.
- [2] Jorquera Lucerga, J. J. (2007). *Estudio del comportamiento resistente de los puentes arco espaciales*. Tesis doctoral. UPM.
- [3] 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.
- [4] Siegrist Fernández, C. *Curso de doctorado de puentes arco de hormigón*. Publicaciones de la ETSICCP. Madrid.
- [5] Schanack, Frank. (2008). *Puentes en arco tipo network*. Tesis doctoral. UC.
- [6] 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.
- [7] www.puentemania.com. Foto de Daniel Giner. (acceso en marzo de 2015).