

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS.

MADRID, 15 DE FEBRERO DE 1888.

4.ª Serie.

Tomo 6.º

Número 3.º

AÑO XXXVI DE LA PUBLICACIÓN.

SUMARIO.

Estudio de las hipótesis que sirven de base al cálculo de los elementos de los puentes colgados rígidos y de piezas amovibles, por D. Luis Gaztelu y D. A. Fernández de Navarrete, Ingenieros de Caminos.—*Puerto de Barcelona*: Pruebas practicadas con los carriles y contracarriles destinados al montaje de sus vías férreas, por D. Julio Valdés, Ingeniero de Caminos.—Dictamen presentado á la Comisión encargada de estudiar la crisis agrícola y pecuaria, por el ponente D. Amós Salvador, Ingeniero de Caminos.—Láminas 70 y 71, correspondientes al número 1.º de esta REVISTA.

ESTUDIO DE LAS HIPÓTESIS

QUE SIRVEN DE BASE AL CÁLCULO DE LOS ELEMENTOS DE LOS PUENTES COLGADOS RÍGIDOS Y DE PIEZAS AMOVIBLES.

(Continuación)

IV.—Viga-barandilla.

Pasemos ya al estudio de la viga-barandilla, que es el más importante y el que mayores dificultades ofrece. El problema consiste en determinar las cargas que actúan sobre la viga, ó sea la repartición de los totales entre la viga y la suspensión.

Este problema es esencialmente indeterminado, dependiendo la distribución real de multitud de circunstancias, que no pueden someterse al cálculo por estar sujetas á continuas variaciones, como son la temperatura, el grado de atirantamiento de las diversas piezas, la perfección de los ajustes, etc., etc. Se deduce de aquí que no puede resolverse el problema sino por medio de hipótesis ó reglas prácticas, habiéndose formulado varias que examinaré sucintamente.

La mas antigua y que ha servido para el cálculo de los puentes americanos es la regla de Rankine, en la que se ha fundado una teoría del Ingeniero americano William H. Burr. Esta teoría se ha expuesto por M. Cardart en *Los Annales des Ponts et Chaussées* con algunas modificaciones y adiciones. En Inglaterra estudió también este problema el Ingeniero Sir Peter W. Barlow, y encontró experimentalmente, según M. Renaudet, que una viga sostenida en ciertos puntos de su longitud aumenta su rigidez en la relación de 1 á 25. En las condiciones de este experimento la

viga puede considerarse como una viga-barandilla. Barlow trató de explicar teóricamente los resultados de sus experimentos, pero sus deducciones son oscuras, por lo que nos limitaremos á indicar su conclusión principal, que puede enunciarse así: «Pueden salvarse luces superiores á 250 metros con un puente colgado, economizando los $\frac{1}{3}$ del peso que exigiría otra construcción metálica.» Levy ha examinado detenidamente la regla de Rankine, deduciendo la necesidad de reformarla.

Rankine admite que si una viga unida en varios puntos á un cable, recibe una sobrecarga de P kilogramos, las fuerzas elásticas que se desarrollan en ella son las mismas que se desarrollarían en la viga separada del cable, bajo la acción de las cargas siguientes: 1.º De la sobrecarga P . 2.º De una carga ficticia ascendente igual á P kilogramos y repartida uniformemente en toda la longitud de la viga, de suerte que siendo l esta longitud, la carga ascendente será $\frac{P}{l}$ por metro lineal.

Mr. Lévy desecha esta regla, fundándose en que no es aplicable á una carga no simétrica, puesto que no podría ser equilibrado un peso aislado por una carga uniforme ascendente sin hacer intervenir las reacciones de los apoyos, y en tal caso la carga ascendente es completamente arbitraria. Además, no da ninguna indicación sobre los efectos de la temperatura de los que conviene, según Lévy, poder darse cuenta.

Por otra parte, Mr. Arnodín cita una razón de carácter práctico, y es que, tanto la regla de Rankine como las teorías que se fundan en ella, conducen á dimensiones exageradas para los puentes europeos, en los que la viga de rigidez no es otra cosa que la barandilla convenientemente dispuesta.

Mr. Lévy crea una nueva teoría, fundada en la hipótesis siguiente. Si se considera un hilo elástico de sección constante ó variable suspendido en sus extremidades y en equilibrio bajo la influencia de cargas verticales, y éstas se modifican en una relación constante, la curva quedará en equilibrio; pero la tensión en cada uno de sus puntos se aumentará en la misma relación que las fuerzas, aumentando algo la longitud del hilo á causa de su elasticidad. La nueva forma diferirá muy poco de la primitiva.

Si las cargas se modifican en una relación, que sin ser rigurosamente constante, varía muy poco de un punto á otro, la nueva curva de equilibrio diferirá también muy poco de la primitiva.

Recíprocamente, si las cargas que obran en un hilo en equilibrio se modifican en una proporción muy notable, pero de tal modo que la nueva forma de equilibrio difiera muy poco de la primitiva, puede afirmarse que todas las cargas han debido variar en una relación sensiblemente constante, asimilándose este caso á un cuchillo de puente rígido.

Esta hipótesis sirve de base á la teoría de Lévy, que no podemos exponer aquí ni aun en resumen, remitiendo al lector que desee conocerla á la Memoria original (*Annales des Ponts et chaussées*, Agosto de 1886). Nos contentaremos con reunir sus conclusiones principales.

1.º La regla de Rankine queda modificada en la forma siguiente: Si una viga apoyada en sus extremos, no dotada de vientos, y de luz l (1) sometida á una carga de P kilogramos, cuya abscisa es α (contada desde el apoyo izquierdo) está ligada á un cable, se la puede considerar desligada de él, á condición de introducir una carga ficticia ascendente, uniformemente repartida en toda la longitud de la viga á razón de q kilogramos por metro lineal, siendo el valor de q

$$q = 5 \frac{P}{l} \cdot \frac{\alpha}{l} \left(1 - \frac{\alpha}{l}\right) \left[1 + \frac{\alpha}{l} \left(1 - \frac{\alpha}{l}\right)\right].$$

Si la carga está en el punto medio, será $\alpha = \frac{l}{2}$ y se tendrá

$$q = \frac{25}{16} \cdot \frac{P}{l},$$

en vez de $q = \frac{P}{l}$,

que da la regla de Rankine.

2.º Cuanto más se acerca una carga á la repartición uniforme, menos trabaja la viga y más trabaja la suspensión, y viceversa. Es preciso, pues, determinar la viga de un modo que resista á las mayores cargas aisladas, y la suspensión de modo que resista á las mayores cargas uniformes.

3.º Conviene dar á la viga un momento de inercia próximamente igual al tercio del que le correspondería si no estuviese enlazada con el cable.

Si l es la luz, P el peso y M el momento máximo de flexión, se tendría: $M = \frac{Pl}{4}$ para la viga aislada; y deberá tomarse para la viga unida al cable

$$M = \frac{Pl}{12},$$

y por lo tanto, siendo h la altura de la viga

$$I = \frac{Mh}{2R} = \frac{Plh}{24R}.$$

Es de advertir que en la práctica puede adoptarse una sección unifor-

(1) Es claro que si existen vientos la luz de la viga será la distancia entre los puntos que sostienen los tirantes que más se alejan de los apoyos, pudiéndose considerar la viga empotrada en dichos puntos.

me, pues la economía que resulta de proporcionar las diversas secciones á los momentos de flexión en cada punto es en general pequeña, según se desprende de la teoría de Lévy.

Como se ve, el método de cálculo de la viga á que conduce esta teoría es sumamente sencillo.

Sin embargo, como luego veremos, conviene por muchas razones adoptar para la viga-barandilla el sistema articulado, á cuyo cálculo no se presta tan bien el método de Lévy como el empleado por Mr. Arnodin en el proyecto del puente de Lamothe, que es igualmente de una sencillez elemental, y vamos á exponer detalladamente.

Según este Ingeniero, la viga-barandilla debe establecerse con arreglo á los principios siguientes:

1.º La viga de rigidez, como su nombre lo indica, no debe resistir su propio peso; éste, el peso del tablero, y en general el de todas las cargas uniformemente repartidas, están sostenidas por los cables parabólicos ú oblicuos que tienen esta misión. Su papel no se confunde pues con el de la suspensión, y no da lugar á ninguna duda acerca de la repartición de los esfuerzos (1). No debe tener otro objeto que el de combatir las deformaciones que pueden ocasionar las cargas aisladas, repartiendo la presión en mayor longitud. Resulta que la potencia de la viga debe depender de la carga móvil y ser independiente de su luz.

2.º Debe estar dotada de cierta flexibilidad general para poder prestarse, sin fatigar sus órganos ni los de la suspensión, á los movimientos provocados por la dilatación ó contracción de esta última.

3.º Debe poder resistir en iguales condiciones á las cargas propiamente dichas, y á las sub-presiones ó esfuerzos dirigidos de abajo á arriba.

4.º Debe atenuar las vibraciones ú ondulaciones que pueden producir el trote de un caballo ó el viento.

5.º Debe ser metálica, lo que le asegura mayor duración que siendo de madera, más ligereza á resistencia igual, y cuyos ensamblajes conservan mejor las formas que deben tener.

6.º Las piezas que la componen deben trabajar siempre en el mismo sentido y bajo esfuerzos definidos, sin alternativas de tracciones y compresiones, que alteran la estructura molecular del metal y los ensamblajes.

7.º Debe acercarse al peso mínimo para una resistencia dada, de suerte que no recargue sensiblemente la suspensión, y para esto deben estar sometidas á compresión las piezas cortas y á tensión las largas.

(1) Se observará que, contrariamente á lo que hemos expuesto al principio de este artículo, Mr. Arnodin supone que no hay indeterminación en la distribución de las cargas entre la viga y la suspensión. En realidad, esta indeterminación existe necesariamente por las razones que hemos expuesto, y la afirmación de Mr. Arnodin debe más bien considerarse como la hipótesis en que se funda el método de cálculo que propone.

8.º En fin, debe ofrecer la menor superficie posible á la acción de los vientos.

Inspirándose en estos datos, se ha establecido la viga-barandilla del puente de Lamothe destinada á combatir las deformaciones producidas por un carruaje de 11 toneladas sobre dos ruedas. Esta barandilla se compone (figuras 5 y 6);

1.º De dos hierros de ángulo de 30×70 separados, 0,08 metros uno de otro, que forman la cabeza inferior.

2.º De otros dos iguales á los anteriores y colocados á igual distancia. Estos, que forman la cabeza superior, están coronados por un hierro zorcés, que sirve de pasa-mano.

3.º De montantes de fundición de 1.600 milímetros cuadrados de sección mínima sometidos á compresión, y destinados á mantener invariable la separación entre las cabezas. Los montantes se ensamblan á horquilla en los pernos que forman las articulaciones, con el objeto de que nunca puedan trabajar por tensión.

4.º Tirantes de sección circular de 23 milímetros de diámetro, según las diagonales de las mallas.

Los tirantes se ensamblan á la articulación inferior por medio de un ojo que abraza al perno, y en la superior están fileteados, y pasan á juego libre por un orificio que atraviesa al perno, sujetándose al lado opuesto por medio de una tuerca que sirve de templador.

Como se ve, esta ingeniosa disposición satisface á todas las condiciones que el autor se ha impuesto, reduciéndose á una viga articulada de grandes mallas, único sistema aplicable á las exigencias de las condiciones 2.ª, 6.ª, 7.ª y 8.ª

Son por lo tanto evidentes las ventajas de esta disposición, limitándonos á llamar la atención sobre la importancia de la condición 8.ª, la cual no puede realizarse más que en las vigas articuladas, únicas en que los esfuerzos se reparten con uniformidad entre todos sus puntos, lo que no sucede con los sistemas rígidos, en que la presión por unidad de superficie es función de la distancia del eje neutro. Esta sola condición bastaría para motivar la elección del sistema articulado en casos como el que nos ocupa, en que la reducción del peso muerto se impone ineludiblemente.

Partiendo de estos principios, y adoptando como peso que obra en una articulación la mitad de la carga móvil de prueba, el cálculo de las tensiones y compresiones que obran sobre las diversas piezas, se reduce á lo siguiente:

Sea P dicho peso (fig. 7); α el ángulo de las diagonales con las horizontales; C_h , C_v las compresiones de las cabezas y de los montantes, t las tensiones de los tirantes.

El peso P , á consecuencia de las disposiciones de las uniones, se descompone según los dos tirantes, y producen cada uno de ellos la tensión

$$t = \frac{P}{2 \operatorname{sen.} \alpha} ; \quad (1).$$

Esta tensión se trasmite al punto C , produciendo en la cabeza una compresión

$$C_h = \frac{P}{2} \cot \alpha; \quad (2)$$

y en el montante CN , otra compresión

$$C_v = \frac{P}{2} \quad (3).$$

Esta compresión de CN y la igual que se produce en BM , se transmiten á los tirantes inmediatos, y al obrar en el punto A ejercen sobre A_p una compresión

$$C_v = \frac{P}{2}.$$

Tenemos, pues, todos los esfuerzos que obran sobre las diversas piezas, y por lo tanto, sus secciones se determinarán fácilmente una vez fijado el coeficiente de resistencia.

En el caso en que $\alpha = 45^\circ$, muy frecuente en la práctica, las fórmulas se reducen á

$$t = 0,707 P \quad (1')$$

$$C_h = \frac{P}{2} ; \quad (2')$$

$$C_v = \frac{P}{2} . \quad (3')$$

Según resulta de la condición 1.ª, todas las mallas han de ser iguales, lo cual suministra dos ventajas prácticas, que son: la facilidad de fabricación y la de poder atender á las reparaciones con un corto número de piezas de recambio; y por otra parte, hemos indicado que resulta de la teoría de Lévy la escasa importancia de la economía de material que se puede obtener haciendo la viga-barandilla de sección variable.

Estos son, en resumen, los procedimientos que se han ideado para el cálculo de la viga-barandilla. Nos fijaremos principalmente en este último, por la razón ya indicada de que se presta mejor al cálculo de una viga articulada, como debe ser la viga-barandilla.

(Se continuará.)

LUIS GAZTELU.—A. FERNANDEZ NAVARRETE.