

distancia $\frac{D_m}{2}$ del origen, se traza la paralela $O' m_1$ á M_1 ; el punto m tomado sobre la ordenada de M á distancia $O m_1$ del eje de los tiempos será el punto de la curva

$$I_{m_1} = \frac{ds_{m-1}}{dt} \frac{D_m}{2}$$

correspondiente á la hora de la ordenada $M m$. Del mismo modo se construirán los demás puntos que se deseen y simultáneamente por debajo de $O t$ los de la curva I_{m_2} , prolongando la construcción, hasta la hora que la pleá ó baja mar se produzcan en la sección considerada.

En lo que se refiere á la curva (8) bastará notar que ordenada es la suma algebraica de las ordenadas de las cuatro curvas siguientes:

$$I_{n_1} = \frac{ds_{n-1}}{dt} \frac{D_n}{2} \frac{t - t_{n-1}}{t_n - t_{n-1}}; I_{n_2} = \sigma_{n-1} \frac{D_n}{2} \frac{1}{t_n - t_{n-1}}$$

$$I_{n_3} = \frac{ds_n}{dt} \frac{D_n}{2} \frac{t_n - t}{t_n - t_{n-1}}; I_{n_4} = \sigma_n \frac{D_n}{2} \frac{1}{t_n - t_{n-1}}$$

(Se continuará.)

FERNANDO G. ARENAL.

REVISTA EXTRANJERA

Puentes de fábrica articulados (1).

Capítulo I.—Comparación de los puentes de triple articulación con los empotrados en los arranques.

2. *Métodos de cálculo.*—Cuando los ingenieros consideran necesario comprobar la estabilidad de los puentes que proyectan, emplean preferentemente, aun en la actualidad, el método de Méry, fundado en el trazado de curvas de presiones enteramente hipotéticas. Consiste, como es sabido, en admitir arbitrariamente las dimensiones de la bóveda, y en suponer que la curva de presiones pasa por dos puntos dados, uno en la clave, situado á una distancia del trasdós igual al tercio de aquella junta y otro en la junta de rotura, á una distancia del intradós igual al tercio del espesor de esta última junta. Las intensidades del empuje y de las presiones soportadas por la bóveda en sus diferentes regiones se deducen del trazado de la curva de presiones y de la repartición del peso según la cuerda del arco. Estas intensidades no pueden menos de ser, según esto, puramente hipotéticas también, lo mismo que los datos de los cuales han sido deducidas. Sea de ello lo que quiera, la conocida ley del trapecio obliga á duplicar los esfuerzos medios de compresión hallados por este método, puesto que las fuerzas que los originan se aproximan á la arista de la sección hasta una distancia igual al tercio de su espesor. Esta circunstancia, unida á la incertidumbre del procedimiento de cálculo, conduce á dimensiones exageradas, y sin embargo, insuficientes en ciertos casos, por razones sobre las cuales insistiremos más adelante.

De todos modos, la experiencia ha demostrado la existencia de defectos en bóvedas reconocidas como estables por el método de Méry. Este método, ya anticuado, debe, por lo tanto, ser considerado como insuficiente para lograr el objeto que se persigue al calcular una bóveda.

Lo mismo puede decirse del método de A. Durand-Claye y de

todos los demás que han sido propuestos para mejorar los procedimientos de Méry, porque en todos ellos subsiste la misma indeterminación respecto á la intensidad y al punto de aplicación del empuje.

El nuevo método, debido al Ingeniero Jefe Sr. Résal, salva esta indeterminación, es cierto; dada una bóveda con la distribución de los pesos que obran sobre ella, permite este procedimiento trazar la curva de las presiones efectivas y calcular con exactitud el trabajo de las fábricas en todos los puntos de la obra; así, es perfecto, al menos teóricamente. Sin embargo, no se puede negar que este método exige largos cálculos con figuras de difícil ejecución, y que los principios en que se funda no son tan sencillos que puedan ser considerados como accesibles para todos los constructores. Tiene, además, como todos los demás procedimientos, el inconveniente de no poderse aplicar más que á la comprobación de la estabilidad de una bóveda trazada arbitrariamente, cuyas dimensiones todas se suponen conocidas de antemano. Resulta de todo esto que, cuando se trata de un proyecto nuevo y de disposiciones acerca de las cuales no se poseen resultados prácticos, es indispensable proceder por tanteos enojosos, á causa de lo largo de los cálculos que cada uno de ellos requiere. En estas condiciones, el calculador se ve obligado á contentarse con la primera combinación admisible, descuidando la investigación de las disposiciones más perfectas y más económicas; porque el problema es indeterminado, y si bien admite gran número de soluciones, una solamente de ellas responde al costo mínimo.

En fin, como se demostrará en el párrafo siguiente, las hipótesis adoptadas por J. Résal para la aplicación de su método no siempre se realizan en la práctica, y los cálculos, á pesar de su rigor teórico, no responden siempre á la realidad.

Todos estos inconvenientes ó imperfecciones desaparecen con el sistema de la triple articulación.

En todas las hipótesis de la distribución de las cargas permanentes ó móviles, la intensidad y el punto de aplicación del empuje son conocidos, las curvas de presiones correspondientes, que pasan siempre por las tres articulaciones, pueden ser representadas inmediatamente por ecuaciones, y todas las partes del problema que se trata de resolver se encuentran determinadas (1).

En el caso de la carga uniformemente repartida según la horizontal á lo largo de todo el arco, la curva es una parábola de eje vertical, cuyo parámetro se puede calcular fácilmente. Dividiendo el peso uniformemente repartido por el doble de este parámetro, se obtiene la intensidad del empuje, que es constante, y determina la de la resultante, puesto que ésta se halla aplicada tangencialmente á la curva de presiones y el empuje es su proyección horizontal. Se poseen, pues, los elementos del cálculo de las diversas secciones de la bóveda y de su representación gráfica. La operación es sencillísima, y sólo exige algunos minutos.

Lo mismo sucede cuando la sobrecarga está repartida uniformemente en la mitad de la bóveda. Se puede, como en el caso anterior, trazar la recta y la parábola de eje vertical que representan la curva de presiones correspondientes á esta repartición, y calcular el empuje y las resultantes en magnitud y dirección para todos los puntos de esta curva.

Aunque algo más largo, el cálculo no es más difícil en el caso

(1) Véase el número anterior.

(1) El autor se refiere en los siguientes párrafos á una de las notas que acompañan á esta memoria.

de las cargas no repartidas uniformemente, compuestas de pesos colocados simétricamente, tales como los de los tímpanos ó enjutas y los aislados, fijos ó móviles. Las curvas de presiones, representadas en este caso por rectas que pasen por las articulaciones, se pueden trazar también inmediatamente y suministrar todos los elementos del cálculo.

Siendo tan sencillos, los cálculos pueden ser efectuados con suma facilidad y rapidez por cualquier empleado. No sólo evitan la comprobación de la estabilidad de una bóveda elegida arbitrariamente, sino que permiten obtener mediante algunos tanteos, entre todas las soluciones admisibles, la mejor, la más económica y la que asegura en todas las secciones un trabajo de compresión sensiblemente constante é igual á una cifra prefijada.

No se puede pretender llegar á semejante resultado con las bóvedas empotradas, ni aun á costa de los cálculos más laboriosos. Las ventajas del sistema de tres articulaciones quedan, pues, evidenciadas desde el punto de vista de los cálculos.

3. *Discordancias entre las previsiones teóricas y los resultados de la experiencia.*—A pesar de la perfección del método debido al Sr. Résal, no es posible esperar que sus deducciones se hallen enteramente conformes con la realidad. Lo mismo puede decirse, y con mayor razón, de los demás métodos usuales.

Las divergencias entre las previsiones teóricas y los resultados de la práctica fueron ya señaladas por M. Darcel, en su memoria ya citada. Ya no hay duda actualmente acerca de su realidad, después de las observaciones efectuadas por el Inspector general Sr. Dupuy respecto á la distribución de los esfuerzos en los dos puentes metálicos que ha construído sobre el Erdre y en Pont-aux-Moines. Estas observaciones han probado el desacuerdo completo entre el cálculo y la experiencia; los esfuerzos medidos en ciertos puntos excedieron del doble de los valores calculados; se vió que los resultados de las fórmulas empleadas no guardaban ninguna relación con el trabajo efectivo, y que el arco funcionaba sensiblemente como una viga recta sostenida por dos tornapuntas.

Estos graves fracasos deben ser atribuídos, como lo ha demostrado M. Darcel, á las diversas circunstancias que la teoría no puede tener en cuenta, tales como las irregularidades de la fabricación y del montaje de las diversas partes del arco, las deformaciones variables de las cimbras, las separaciones y asientos, frecuentemente desiguales, de los estribos, y final y principalmente, al acuñado defectuoso y siempre incierto en los arranques. Las mismas causas son de temer en los puentes ordinarios de fábrica. Aún se encuentran agravadas en ellos por el peso de las bóvedas, por la falta de uniformidad en la calidad de los materiales ó en la ejecución de las fábricas, y sobre todo por el acuñado de las juntas de la clave, de los arranques, y á veces también de los riñones. Estos acuñados, efectuados sin guía y á cualquier temperatura, no pueden menos de ejercer una influencia perjudicial sobre la homogeneidad de la bóveda y la repartición de los presiones en las fábricas. A todas estas causas hay que añadir los riesgos de irregularidad en el descimbramiento, mucho mayores que en los arcos metálicos.

Compréndense, después de lo dicho, las discordancias entre la teoría y la realidad, así como los movimientos eventuales de la curva de presiones, suficientes para provocar deformaciones capaces hasta de producir la rotura de las juntas. Estas roturas no son raras antes y después del descimbramiento, y son graves

especialmente en las bóvedas ejecutadas con mortero de cemento. Es cierto que estos contratiempos no tienen ordinariamente suficiente importancia para comprometer la estabilidad de la obra; pero denotan su imperfección, y prueban los defectos del cálculo y de los medios de ejecución.

Todos estos fracasos pueden ser evitados, casi por completo, empleando la triple articulación, que da por resultado mantener la invariabilidad absoluta, puede decirse, de las curvas de presiones en las bóvedas. Estas curvas quedan, en efecto, obligadas á pasar siempre por las articulaciones, cuyas posiciones no pueden variar más que en una cantidad insignificante, á consecuencia de los asientos ó separaciones de los estribos, cuando estas causas no exceden de los límites ordinarios. No hay, pues, que temer las consecuencias de estos movimientos, tan peligrosos en las bóvedas empotradas en los arranques.

Por otra parte, como se evita el acuñado de las juntas en la clave y en los arranques, las articulaciones hacen desaparecer todos aquellos inconvenientes, conservándose, no obstante, gracias al juego de las articulaciones, la ventaja que procede de la apertura de estas juntas durante la construcción de la bóveda para remediar los efectos de los asientos de la cimbra.

En cuanto á los peligros de estos asientos, se atenúan en proporción considerable, porque las articulaciones permiten aligerar mucho el peso de la bóveda, reduciendo sus dimensiones, como se demostrará más adelante. Se demostrará también que el espesor puede reducirse lo suficiente para que sea posible constituir la bóveda con dovelas de una sola pieza, aun con luces excepcionales (1). Gracias á esta reducción, es fácil colocar sobre cuñas todas las dovelas y guarnecer después las juntas con una lechada de cemento puro. Con estas disposiciones, la homogeneidad que se consigue es superior á la que se puede obtener con cualquier otro sistema de construcción, y los asientos de las cimbras no ofrecen inconvenientes graves. En fin, al descimbrar, todas las partes de la bóveda se ponen en presión de una manera lenta y gradual, según lo requieren las curvas de presiones y con arreglo á las exigencias de la teoría, sin necesidad de acuñar las juntas, operación imperfecta y perjudicial para la estabilidad de la obra. La operación del descimbramiento, convenientemente llevada, equivale al más metódico y eficaz acuñado de las juntas.

En estas condiciones, hay motivo de creer que las previsiones del cálculo resultarán sensiblemente conformes á la realidad, y que también bajo este aspecto, el sistema de triple articulación presentará ventajas muy atendibles.

4. *Influencia de las variaciones de temperatura.*—Se prescinde siempre, en el cálculo de las bóvedas de fábrica, de tener en cuenta la influencia de la temperatura. En realidad, no es posible tenerla en cuenta, puesto que sería necesario conocer el coeficiente de elasticidad de las fábricas, acerca del cual no se poseen datos suficientes. Esta influencia es considerada como despreciable por la escasa conductibilidad de las fábricas para el calor, de donde resulta que la masa interior de las bóvedas queda sustraída á la acción de las variaciones de la temperatura, no sólo de las diurnas, sino de las que se realizan del invierno al verano. Sin embargo, la acción del calor sobre las bóvedas está evidenciada por hechos perfectamente comprobados. En cuanto á su efecto, conviene para darse cuenta de él,

(1) Una bóveda articulada de 100 metros de luz y rebajada al décimo no exige más que un metro de espesor en un puente para carretera.

compararlo con el correspondiente en los arcos metálicos; los coeficientes de dilatación del hierro y del cemento puro son sensiblemente iguales; luego, para una misma variación de temperatura, que produce una tensión ó una compresión determinadas, el esfuerzo es próximamente diez veces menor en el cemento puro que en el metal, á causa de la relación de sus respectivos coeficientes de elasticidad, que es próximamente de $\frac{1}{10}$. Mas el trabajo correspondiente de la materia será más peligroso en el cemento puro, cuya resistencia es por lo menos veinte veces menor que la del hierro. Lo mismo sucede, y con mayor razón, tratándose de las fábricas ordinarias.

Aunque una bóveda de fábrica es menos sensible á las variaciones de temperatura que un arco metálico, puede sin embargo resultar tan fatigada ó más que el arco metálico á consecuencia del trabajo que aquéllas ocasionan. Y así lo prueba muy claramente la experiencia. Muchas bóvedas se agrietan con sus tímpanos ó enjutas por efecto de las variaciones de temperatura; las juntas se abren ó se cierran, según las estaciones, en los arranques y en la clave, y la periodicidad y regularidad de estos movimientos no dejan lugar á duda respecto á su causa. Además, aunque no llegue á provocar la rotura de las juntas, la influencia de la temperatura sobre las bóvedas de fábrica está demostrada por la oscilación vertical de la clave según las estaciones. Si se examinan las numerosas observaciones de este fenómeno, especialmente las que se hicieron en el arco de ensayo de Souppes (1), y se comparan con los movimientos debidos á las sobrecargas móviles, se comprenderá la importante influencia de la acción de la temperatura sobre el trabajo de una bóveda de fábrica.

El resultado es un incremento del empuje, es decir, la elevación de la curva de presiones en los arranques y su descenso en la clave, cuando aumenta la temperatura; el efecto es inverso cuando la temperatura disminuye. El trabajo que impone á la fábrica está lejos de ser despreciable, puesto que puede ocasionar la rotura de las juntas; existe, pues, un interés muy grande en eliminar esta causa, sobre todo en las bóvedas de pequeño espesor con enjutas aligeradas por medio de arcadas.

Esta nueva ventaja la realiza también la triple articulación, permitiendo la libre dilatación de la obra. Su única consecuencia es hacer variar la altura de la articulación de la clave en una pequeña cantidad que no altera sensiblemente la posición relativa de las curvas de presiones y de las fábricas de la bóveda, y que, por lo tanto, no ejerce influencia apreciable sobre la intensidad y la repartición de las presiones que soportan.

La combinación que preconizamos merece, pues, por todos conceptos, la preferencia.

(Se continuará.)

Obras del puerto de Amberes.

M. Dumas publicó en el mes de Agosto del año próximo pasado, en el *Genie civil*, un importante artículo, en el cual des-

(1) Arco de ensayo de las canteras de Souppes. (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1868.)

El autor de la nota, M. de Lagrené, dice: «En lo tocante á la dilatación debida al calor, ó á las ondulaciones debidas al paso de una carga, ó á las vibraciones ocasionadas por un choque, la bóveda se condujo exactamente como un arco metálico.»

cribe las obras realizadas sucesivamente desde el siglo XIII hasta la época actual en el puerto de Amberes y fija las condiciones que reúne hoy día este puerto.

Comprende, en la actualidad, el puerto de Amberes, ocho dársenas de flotación, que ocupan una extensión total de 64 hectáreas. Los muelles tienen un desarrollo de 10.760 metros, y los almacenes cubiertos y tinglados establecidos en las inmediaciones de estos muelles cubren una superficie de 126.500 metros cuadrados. Para el servicio del puerto se han construído más de 47 kilómetros de vías férreas, y los muelles están dotados de gran número de grúas, en las que se emplea casi exclusivamente como fuerza motriz el agua comprimida á la presión de 50 atmósferas, suministrada por una fábrica que dispone de tres máquinas de vapor de 150 caballos cada una.

Al Sur de la ciudad, existen tres dársenas destinadas especialmente al servicio de la navegación interior.

A las obras enumeradas hay que agregar los muelles construídos en las márgenes del Escalda, desde 1877 á 1884, cuyo desarrollo es de unos 3 kilómetros y medio, y cuyo calado mínimo, al pié de los muros, es de 8 metros en marea baja.

Desde 1886 se ha duplicado el tráfico, sin que se hayan ampliado proporcionalmente las obras, y el público se ha quejado de esta situación, dando lugar á que se proyectaran nuevas obras, que fueron adjudicadas en 1897 á la casa Hersent, y deberán hallarse terminadas en Septiembre del año 1900.

El presupuesto de estas obras asciende á la cantidad de francos 11.000.000 próximamente.

El nuevo proyecto comprende las obras siguientes, que se están ejecutando en la actualidad:

- 1.º La construcción de un muelle de 2.000 metros de desarrollo total en la margen derecha del Escalda, al Sur, y en prolongación de los muelles existentes;
- 2.º La regularización de una de las márgenes del río en una extensión de un kilómetro próximamente, con el objeto de conseguir un régimen regular y definitivo de las corrientes;
- 3.º Dragados en el lecho del Escalda al pie de los muros en construcción, para obtener un calado mínimo de 8 metros en marea baja, y la construcción de un terraplén ó relleno detrás de los muelles, en una zona de 100 metros de ancho;

Y finalmente,

- 4.º Obras accesorias diversas.

El procedimiento adoptado para la construcción de los muelles es el mismo que se empleó en los antiguos del puerto de Amberes y en el puerto de Burdeos; consiste en el empleo de cajones hincados por medio del aire comprimido con alzas desmontables encima de la cámara de trabajo y ataguías móviles de palastro, á cuyo abrigo se puede construir á cielo abierto toda la parte de la obra situada por encima del techo de dicha cámara hasta la cota de un metro por debajo del nivel de la] bajamar. Los cajones tienen una longitud de 30 metros, y se colocan dejando entre cada dos contiguos un intervalo de 40 centímetros, que luego se rellena con hormigón de cemento sumergido al abrigo de las alzas móviles.