

MADRID 15 DE ENERO DE 1867.

TOMO XV.

NÚM. 2.º

MEMORIA

relativa á los arcos de hormigon hidráulico construidos en la carretera de primer orden de Soria á Logroño.

CONSIDERACIONES QUE HAN MOTIVADO EL EMPLEO DEL HORMIGON EN LOS ARCOS.

En el año de 1862 faltaban en la carretera de primer orden de Soria á Logroño, en la parte comprendida en esta última provincia, todas las obras de fábrica necesarias para salvar varios rios y barrancos y unir los trozos de explanacion concluidos hace algunos años.

El Ingeniero D. Adolfo de Ibarreta en el año de 1860 proyectó las obras que faltaban, adoptando el ladrillo, como material más económico para las bóvedas, timpanos y pretilos de la mayor parte de las obras, habiendo aprobado la Superioridad, en 10 de abril de 1861, los proyectos, y mandado llevarlos á efecto por administracion, en noviembre de 1862. La eleccion de materiales, hecha por el Sr. Ibarreta, era acertadísima, bajo todos conceptos, así como los precios asignados á la fábrica de ladrillo, deducidos teniendo en cuenta el coste de la misma en el resto de la provincia; pero atendidas las circunstancias de la localidad, en que llueve muchísimo y en que sólo unos dos meses del año se puede hacer este material, unidas á estar por aquella época construyéndose el ferro-carril de Tudela á Bilbao en esta provincia, tropecé con el obstáculo de no encontrar quien quisiese hacer el ladrillo á un precio arreglado, pidiendo el que ménos á 30 reales el 100, siendo de cuenta de la Administracion la construccion de los hornos, la provision de leña y agua y la responsabilidad de los que se perdiesen por las lluvias ó por mal cocidos y moldeados. Segun mi cuenta, con estas condiciones costaria el metro cúbico de obra de ladrillo á 24 escudos, suponiendo que las pérdidas en 250.000 ladri-

llos que necesitaba fuesen sólo de 5.000, que era mucho suponer, así como el que pudiesen hacerse en una sola campaña. No habiendo tampoco en la localidad canteras de rajuela, ni aun de mamposteria én bancos, y si sólo una de piedra arenisca en masas, á 21 kilómetros de las obras, en que la extraccion del metro cúbico de silleria nos costaba 30 escudos y algunos hasta 100, y dudando que pudiese dar piedra siquiera para los aristones y albardillas de las obras, propuse á la Superioridad construir todas las bóvedas de hormigon hidráulico con los aristones de silleria. En los puentes sobre el rio Iregua, se han hecho tambien de silleria los estribos y pilas hasta los arranques, para que resistan á los choques de los cantos rodados que este rio torrencial arrastra durante las avenidas.

Las circunstancias mencionadas y la de encontrarse en la localidad un cemento regular, que aunque caro en fábrica, estaba cerca de las obras, me sugirieron la idea de los arcos de hormigon hidráulico, objeto de este artículo, que ni tiene nada de nuevo y ménos de instructivo para los lectores de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS; pero que consigna un hecho sobre el que desearia fijasen su atencion, y es que se han construido bóvedas de hormigon hidráulico de una sólo pieza, sin más precauciones para el hormigon que las que se usan en el de fundaciones. Este sistema de construccion creo puede llegar á ser sumamente expedito y económico, cuando experimentos repetidos, hechos por personas ilustradas, fijen, ayudados de la teoria, los espesores mínimos para esta clase de bóvedas.

BÓVEDAS QUE SE HAN CONSTRUIDO DE HORMIGON HIDRÁULICO.

En una seccion de 25 kilómetros de la carretera citada, he tenido arcos de todas luces y formas que construir de hormigon. Hoy hay ya terminadas:

Siete tajeas de medio punto de un metro de luz.

Una alcantarilla de 1,^m50 de luz y 0,^m20 de flecha.

Tres alcantarillas de medio punto, de 2 metros de luz, y cinco de 3 metros.

Un ponton de 4 metros de luz, y dos de 6 metros, todos de medio punto.

Dos arcos de un puente de tres, en que el central es carpanel de 12 metros de luz y 3,^m72 de flecha, construido de sillería, y los laterales de medio punto de 7,^m44 de luz hechos de hormigon.

Un puente de tres arcos escarzanos de 10 metros de luz y 2,^m34 de flecha: y otro puente de tres arcos carpaneles de 10,^m216 de luz y 3,^m92 de flecha.

Todas estas obras, cuyas luces y formas son diferentes, y que están situadas en puntos donde llueve, nieva y hiela durante nueve meses del año, han resistido perfectamente, habiendo algunas que están concluidas hace ya cuatro años.

Como todos los arcos se han hecho del mismo modo, presento aquí únicamente los detalles de dos puentes: el construido sobre el rio Lavalé, por contrata, de tres arcos escarzanos, y el de Lumbreras, por administracion, de tres arcos carpaneles.

LIGERA DESCRIPCION DE LOS ARCOS DE AMBOS PUENTES.

Por los dibujos que acompaño, aunque en escala pequeña, puede formarse idea exacta del conjunto y detalles de los dos puentes, y como para el objeto en que me ocupo lo que importa son las formas y dimensiones de los arcos, creo inútil describir el resto de las obras.

El puente sobre el rio Lavalé, cuyos tres arcos escarzanos tienen 10 metros de luz y 2,^m34 de flecha, mide entre paramentos 7,^m40 de anchura. El espesor dado á la bóveda en la clave es de 0,^m90, que aumenta hácia los riñones segun la direccion de la curva de tras los. Los aristones son de sillería arenisca, procedente de la provincia de Soria, y forman una faja de 0,^m70, concéntrica con el intrados, teniendo hácia el cañon los sillares que la componen diferente entrada, que varia entre 0,^m80 y 0,^m65, y forman dientes que unen esta faja con la parte de bóveda construida de hormigon, que es toda la comprendida entre los aristones. Los timpanos son de mampostería de canto rodado, careado y de 0,^m50 de espesor uniforme. Los macizos de contra-empuje de mampostería ordinaria.

El puente de Lumbreras, sobre el rio Iregua, consta de tres arcos carpaneles de tres centros

y arcos de 60°, que tienen 10,^m216 de luz y 3,^m92 de flecha, midiendo entre paramentos el ancho de 6,^m42. El espesor en la clave es de 0,^m90, que varia hácia los riñones segun la curva de trasdos. Los aristones son de sillería, formando una faja de 0,^m70, concéntrica con el intrados, y formando las dovelas dientes iguales á los del puente de Lavalé. Los timpanos y macizos se han construido lo mismo que en el puente mencionado.

OBSERVACIONES GENERALES SOBRE EL CÁLCULO DE LOS ARCOS DE HORMIGON.

Sabido es de cuantos se dedican á construcción, que el elemento en funcion del que están todas las dimensiones de un puente es el espesor del arco en la clave; dimension que hasta la fecha no puede determinarse por un procedimiento de cálculo riguroso, sirviéndose para el establecimiento de los arcos todos los constructores de fórmulas empíricas deducidas, ó de experimentos hechos directamente, ó de la traduccion algebraica de los ejemplos más perfectos que ofrecen las construcciones antiguas. Eminentes Ingenieros se han ocupado de este problema, llegando á fórmulas más ó menos exactas, cuyos resultados comprueba la experiencia, pero fundándose siempre en hipótesis, y dejando el problema indeterminado. Perronet, Leveillé, Saint-Guilhem, Dejardin, han dado fórmulas prácticas sumamente útiles, que son el resultado de la experiencia, ayudada del razonamiento, pero que solo son aplicables entre ciertos limites. En la hipótesis de calcular el espesor en la clave con la condicion de resistir el empuje ó la presion que ella sufre, se llega á una desigualdad en que el espesor en la clave debe ser menor, á medida que aumenta el radio del intrados, lo cual es un absurdo.

Si se calcula con la sola condicion de que la bóveda no pueda ser invertida, aparece en seguida la indeterminacion que resulta de la intensidad y punto de aplicacion del empuje, pues que el peso de la semi-bóveda, supuesta rígida, se descompone en dos presiones que actúan en el plano de la clave y en el de los arranques; la primera que tiende á aplastar una semi-bóveda con la otra, y la segunda que la mantiene contra los arranques; pero como esta descomposicion, en una bóveda rígida, puede hacerse de infinitas maneras, dando para cada una diferente direccion, intensidad y punto de aplicacion para las presiones, el problema queda indeterminado. Lahire en el año 1695,

y De Prony hacia el 1790, investigaron la ley que debía seguir el espesor de una bóveda, que estuviese en equilibrio matemático, para lo que la consideraban como un compuesto de cuñas juxtapuestas y sin rozamiento, manteniéndose unas contra otras por la presión, fundándose su teoría en el sencillo principio de que «cuando las juntas de una bóveda son normales á la curva de presiones, el peso de la misma debe crecer, desde el vértice al arranque, como la tangente del ángulo que forma con la vertical la junta que se considere.» Mr. Mery ha dado otra teoría fundada, en que cuando una bóveda está en equilibrio, cada junta sostiene una serie de presiones, que puede reducirse á una resultante aplicada en un punto dado de la longitud de esta junta, y esta resultante cambiada de signo, debe hacer equilibrio á todas las acciones que trasmite á la junta considerada la parte de bóveda comprendida entre ella y el vértice: unidos todos los puntos de aplicación de la resultante en todas las juntas resulta lo que se llama *curva de presiones*. Coulomb, por su teoría, determina los empujes máximo y mínimo, entre los que debe estar comprendido el de la bóveda, cuya estabilidad se trata de comprobar. Por último, el Ingeniero Jefe de primera clase del Cuerpo de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, D. Eduardo Saavedra, en su traducción de la Instrucción sobre la estabilidad de las construcciones escrita por Mr. Michon y en la nota 6.^a de las que ha añadido á la indicada traducción, introduce para el cálculo la condición de elasticidad del material de la bóveda, á fin de hacer desaparecer la indeterminación del punto de aplicación de las presiones en las juntas respectivas, y tener un conocimiento exacto del estado de equilibrio de la bóveda, de una manera absoluta, independiente de coeficientes arbitrarios. Para sus cálculos supone el arco como un solo cuerpo elástico, al que aplica las fórmulas de la resistencia de materiales, relativas á la flexión de piezas curvas, debiendo desechar, como no estables, todos aquellos á que aplicado el cálculo, en este supuesto, den por resultado que alguna junta no está comprimida en toda su longitud. Por la teoría del Sr. Saavedra se determina, por medio de tanteos, dando á la clave diferentes espesores, la distancia del punto de aplicación del empuje al medio de la junta de la clave, llegando á fijar éste por tanteos, de tal modo que el punto de aplicación se aproxime lo más posible á dicho punto medio.

He hecho la sucinta relación anterior para que puedan abrazarse de un sólo golpe de vista las suposiciones en que se fundan las diferentes teorías sobre el cálculo de la estabilidad de las bóvedas, y si son aplicables á las monolíticas construidas de hormigón. En todas las teorías se suponen la existencia de presiones debidas á la división ó despiece de las bóvedas; ahora bien, en un arco monolítico de hormigón:

1.º ¿Hay presiones cuya intensidad, dirección y puntos de aplicación siguen la misma ley que en una bóveda compuesta de dovelas?

2.º Caso de que supusiésemos rota la bóveda, ¿aparecerían las roturas normales al intrados?

3.º ¿Pueden compararse los arcos monolíticos de hormigón á una pieza elástica de su misma forma y dimensiones, empotrada en sus extremos?

Hé aquí una serie de preguntas á que yo no me atrevo á contestar de una manera absoluta; pero sí me parece que en estos arcos no debe haber presiones, mientras son de una sola pieza, y que si una carga accidental, colocada en la clave, es apreciable relativamente á la masa de la bóveda, ésta destruirá su efecto, casi en su totalidad, por la cohesión de la masa, dando lugar á un estado particular de equilibrio que conviene estudiar, y del que dependerá el espesor que haya de darse á la bóveda en sus diferentes partes. Ejemplos semejantes á los arcos monolíticos de hormigón son las bóvedas tabicadas de ladrillo y yeso, que resisten cargas considerables con un espesor insignificante, que no se aproxima siquiera al que darían las fórmulas y teorías hoy en uso para las demás clases de bóvedas. En ellas se ve palpablemente la carencia de empujes, pues, como todos saben, se sostienen con carga aun antes de concluir de cerrar el arco. Que los empujes disminuyen á medida que aumenta la unión entre los diferentes elementos de una bóveda, lo prueban también los numerosos experimentos hechos en Francia, entre ellos los verificados por el Ingeniero Claudel y el constructor Laroque, que les ha permitido emitir la idea de que el espesor de las bóvedas en la clave puede reducirse á 0,75 del dado por las fórmulas de Dejardin, cuando se construyen con buen mortero hidráulico, y aun se atreven á asegurar que en este caso pueden reducirse hasta un 0,25 ó 0,30 del dado por las mismas fórmulas. Ejemplo de la anulación del empuje en las bóvedas moncli-

ticas son las de ensayo construidas por Brunel, con cemento hidráulico inglés y ladrillos, cuya descripción se encuentra en los *Anales de puentes y calzadas* del año de 1835. De comprobar la experiencia la carencia absoluta de empuje en las bóvedas monolíticas de hormigón, si la masa de esta clase de obra tiene además la cohesión conveniente, se comprende pueda llegarse en ellas á espesores sumamente pequeños, como sucede hoy con las construidas de ladrillo y yeso.

Respecto al modo de romperse estas bóvedas nada puedo decir; pero parece natural se verifique la rotura según una normal al intrados, por ser esta dirección en la que la bóveda presenta siempre ménos espesor, en cualquier punto de ella. Sin embargo, sólo repetidos experimentos sobre arcos perfectamente construidos pueden aclarar y fijar definitivamente este punto.

Por último, la comparación de estas bóvedas con piezas elásticas empotradas en sus extremos, creo ha de dar la solución del problema, que no dudo resuelvan mis aventajados compañeros, haciendo, si las circunstancias se lo permiten, experimentos que comprueben ó inutilicen los resultados de la teoría.

Parece que nadie mejor que yo se ha encontrado en condiciones de hacer experimentos sobre la estabilidad de los arcos monolíticos de hormigón, aplicándoles las diferentes teorías, y probando si la práctica correspondía á sus resultados; pero es preciso tener en cuenta que no he sido autorizado para hacer arcos de prueba, sino obras definitivas que habian de darse en seguida al tránsito público, y que no podía detenerse su construcción hasta que los experimentos en una de ellas justificasen los resultados del cálculo: además, no me atreví á cargar con la inmensa responsabilidad, que se me hubiera exigido, en el caso de un accidente, mucho más cuando el cemento de que disponía era poco probado, hecho en una fábrica provisional, y sin la absoluta seguridad de que el proveniente de diferentes hornadas y aun de la misma fuese de igual clase. Estas circunstancias me hicieron examinar el modo de cálculo usado para puentes de mampostería con cemento de Vassy, de los que hay hasta 22 ejemplos notables en Francia, y cuyas dimensiones han sido sancionadas por la experiencia de algunos años, resuelto á adoptarlo mientras el problema no se resuelve de un modo riguroso.

He visto que, á pesar de lo manifestado por

Claudel y Laroque, se ha construido en París por los Sres. Gariel y Garnier, bajo la dirección de Lagalliserie, Ingeniero Jefe de puentes y calzadas, el Pont-aux-doubles, de mampostería, con el probado cemento de Vassy, y siendo de arco de círculo de 31 metros de luz y 3,^m10 de flecha, se le ha dado de espesor en la clave 1,^m35, que es lo que resulta de las fórmulas de Dejardin. Al puente elíptico de Alma, que tiene un arco de 43 metros de luz y 8,^m60 de flecha, y dos de 38,^m50 de luz con 7,^m70 de flecha, se le ha dado 1,^m50 de espesor en la clave, conforme también con las fórmulas de Dejardin. Hasta el Ingeniero civil Francisco Coignet, á pesar de las especiales condiciones de resistencia que atribuye á sus hormigones aglomerados, cita en la memoria sobre estos hormigones, dirigida al Emperador Napoleón III, un arco de 15 metros de luz y 1,^m50 de flecha construido por su sistema, al que dá 0,^m80 de espesor en la clave, dimensión que se diferencia en un centímetro de lo que dan las fórmulas de Dejardin aplicadas á este caso. De las fórmulas de Dejardin y las de otros Ingenieros, de cuyos resultados he tomado un término medio, me he servido para el cálculo de los arcos de que me ocupo, aumentando en algunos centímetros sus resultados para atender á la desconfianza que me ofrece el cemento empleado respecto á la igualdad de clase.

CÁLCULOS DE LOS ARCOS DEL PUENTE SOBRE EL
RIO LAVALÉ.

Los datos para el cálculo de este puente son:
Luz = 10 metros = a , Flecha = 2,^m34 = f .

El radio del intrados se ha determinado por la fórmula

$$r = \frac{a^2}{8f} + \frac{f}{2},$$

en la que poniendo en vez de a y f sus valores para este caso, resulta $r = 6,^m51$.

La amplitud del arco se ha deducido también, en función de la luz y la flecha, por la relación

$$\text{Sen. } \alpha = \frac{a}{2r},$$

en la que α es la semi-amplitud, que en este caso es de 50° 48' y, por consiguiente,

$$2\alpha = 101^\circ 36'.$$

Para determinar el espesor en la clave me he servido de las fórmulas siguientes; en las que x es el espesor buscado y r el radio del intrados.

$x = 0,30 + 0,10 r$ De Dejardin para arcos de medio punto.

$x = \frac{1}{3} (0,20 r + 1)$ De Saint-Guilhem

para toda clase de bóvedas.

La primera dá $x = 0,951$.

La segunda $x = 0,767$.

El término medio de estos valores es

$$x = 0,859.$$

Por las consideraciones indicadas anteriormente he dado á los tres arcos $0,90$ de espesor en la clave.

La curva de trasdos es un arco de círculo trazado con la condicion de pasar á $0,90$ del intrados en la clave, y por otros dos puntos simétricos respecto á la vertical del medio de la clave, en la junta que forma un ángulo de 30° con ellas. Estos dos puntos del trasdos se han determinado por la fórmula

$$x' = \frac{f}{\cos. \alpha} = \frac{0,90}{0,8571673} = 1,049.$$

El radio del arco que forma la curva de trasdos pasando por esos puntos es de $9,07$.

Para el dibujo se ha usado este arco de círculo como trasdos del arco; en la ejecucion se trazó por puntos sobre el interior de los timpanos.

Para los macizos de contra-empuje situados sobre los arranques en los estribos, suponiendo que los arcos tengan empuje como los contruidos de dovelas, me he servido de las fórmulas

$$(1) M v + \frac{1}{2} M' v' < b R; (2) \frac{M v + M' v'}{Q} > \text{tang. } \varphi,$$

que establecen la (1) la condicion para que la mampostería del estribo resista al aplastamiento, sufriendo el peso del macizo y de la semi-bóveda; y la (2) la de que el deslizamiento del arco sea imposible.

En estas fórmulas v es el volúmen de la semi-bóveda; y v' el del macizo de contra-empuje por metro lineal de cañon.

Despejando v' en ámbas fórmulas y poniendo en vez del empuje Q su valor

$$\frac{M}{2} (2 c r + c^2), \text{ resulta } v' < \frac{b R - M v}{M'}; \text{ y}$$

$$v' > \frac{\frac{M}{2} \text{ tang. } \varphi (2 c r + c^2) - M v}{M'}$$

En el caso actual tenemos:

b =Espesor uniforme del macizo de contra-empuje. 2,50 metros.

R =Resistencia al aplastamiento de la mampostería, por metro cuadrado. 20000 kilogramos.

Tang. φ =Coeficiente de rozamiento. 1,75

c =Espesor en la clave. . . 0,90 metros.

r =Radio del intrados. . . 6,51 metros.

M =Peso del metro cúbico de hormigon. 1840 kilogramos.

M' =Peso del metro cúbico de mampostería. . . . 2200 kilogramos.

v =Volúmen de la semi-bóveda, por metro lineal. 6,50 mets. cúbs.

v' =Volúmen del macizo que se busca por metro lineal.

Con estos datos $v' < 17,29$ metros cúbicos y $v' > 3,73$ metros cúbicos.

El volúmen que tienen los macizos contruidos es de 5,20 metros cúbicos por metro lineal, superior á lo necesario, pues bastaba con 4 metros cúbicos; pero estaban ya hechos en la idea de voltear arcos de ladrillo de la misma luz y $1,34$ de flecha, yhubo, por consiguiente, que aprovecharlos.

El espesor de los timpanos es de $0,50$ uniforme, pues la altura máxima de estos muros, es sobre las pilas de $1,80$, á partir del hormigon, y segun la fórmula para muros de sostenimiento de paramentos verticales, $x = 0,258. h$, siendo h la altura, igual á $1,80$ en este caso, y resulta para x un valor de $0,46$, inferior en cuatro centímetros al adoptado.

RICARDO BELLSOLÁ.

(Se concluirá.)