

CAPÍTULO XIV

BOVEDAS ARTICULADAS

§ I. — Disposiciones y reseña histórica.

Disposición general. — Tipos de articulación. — Reseña histórica.

§ II. — Articulaciones con plomo.

Puente de Gradefes (España). — Puente de Garching (Alemania).

§ III. — Articulaciones de rodadura.

Puentes de Gohren e Illerbeuren (Alemania).

§ IV. — Articulaciones giratorias.

Puente de Neckarhausen (Alemania).

§ V. — Bóvedas semiarticuladas.

Puente de Morbegno (Italia).

§ VI. — Conclusiones.

No se han generalizado. — Sus ventajas. — Sus inconvenientes. —
¿Cuándo deben emplearse?

§ I. — Disposiciones y reseña histórica

Disposición general. — En una bóveda rígida, inarticulada (figura 308), el menor movimiento de los estribos E_1 , E_2 provocaría grietas, inversión de esfuerzos y hasta el derrumbamiento del arco

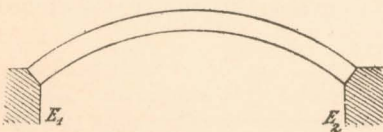


Fig. 308.

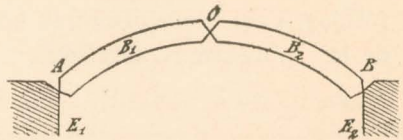


Fig. 309.

La determinación de los esfuerzos en este tipo de bóvedas exige la aplicación de la teoría elástica, que, además de ser muy laboriosa, ofrece siempre la inseguridad de sus hipótesis.

Si articulamos la bóveda en tres puntos, A , O y B (fig. 309), aquellos peligros y esta indeterminación desaparecen.

Como todas las curvas de presión pasan forzosamente por las rótulas A , O y B , se determinan los esfuerzos con la simple *Estática*; el cálculo es más fácil y seguro.

Si la bóveda se asienta, o los estribos E_1 y E_2 reculan o se hundén, las dos semibóvedas giran, sin agrietarse, alrededor de sus articulaciones.

Tipos de articulación (fig. 310). — Se pueden articular las bóvedas:



Fig. 310. Tipos de articulación.

a) Con *hojas de plomo*, intercaladas en la parte central de la bóveda, en sus dos arranques y en la clave.

b) Por *rodadura*, cortando la bóveda en claves y arranques, con juntas cuyos paramentos en contacto sean cóncavos y convexos, para que puedan rodar uno sobre otro. Los bloques de juntas pueden ser: de piedra dura, de acero, de hormigón armado o sin armar.

c) Por *giro*. Las dos semibóvedas B_1 , B_2 giran alrededor de un eje E de hierro fundido o de acero.

d) Por *giro y rodadura*. Es la articulación de *rodilla*, en la que la rótula convexa R_1 gira y rueda dentro del bloque cóncavo R_2 .

e) Con *semiarticulación*, es decir, articulando temporalmente las bóvedas durante la construcción, y enclavando después las rótulas, para transformar la bóveda en inarticulada, a los efectos de las sobrecargas móviles.

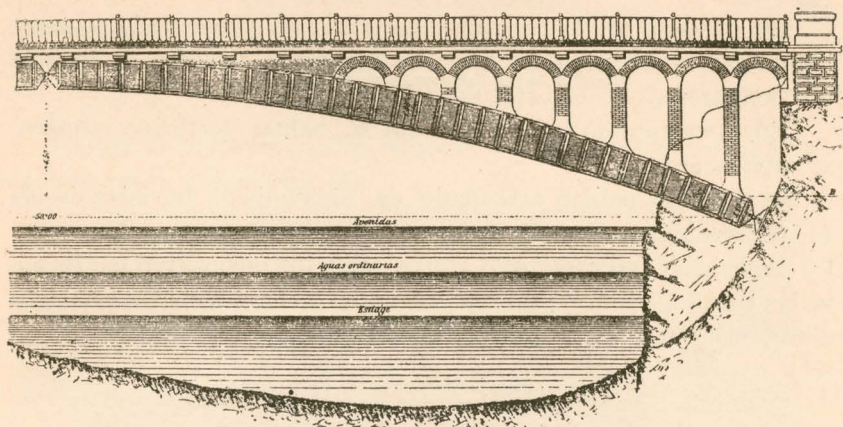


Fig. 311. Proyecto del puente de Las Segadas.

Reseña histórica (1). — Ya el gran Dupuit, en 1870 preconizaba las articulaciones de las bóvedas en sus clave y arranques, y en 1878 el Ingeniero Brosselin lo propuso también; pero como ha ocurrido con muchas ideas francesas,

fueron los alemanes los que las acogieron con más interés.

Seducido por las ventajas teóricas antes indicadas, el autor, en 1900, había proyectado, con articulaciones de giro (figuras 311 y 312), una bóveda de hormigón en masa de 50 m. de luz, sobre el río Nalón, en Las Segadas, para la carretera de tercer orden de Oviedo a Pola de Lena, cuyo proyecto fué aprobado por la Dirección de Obras públicas (2).

Las únicas bóvedas de fábrica con articulaciones que se han construido en España son las del puente de Gradefes (León), que describimos a continuación.

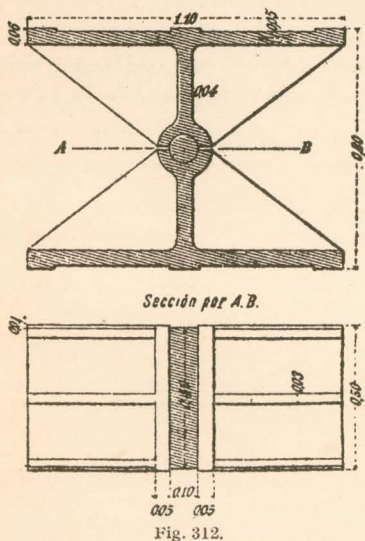


Fig. 312.

(1) Este epígrafe, como todo el resto de este capítulo, es un extracto del tomo IV de libro de Sejourné *Grandes voûtes*, en el que nuestro ilustre colega ha reunido copiosos datos sobre los grandes puentes con bóvedas articuladas construidos hasta 1916.

(2) En la *Revista de O. P.* de 18 y 25 de abril de 1901 publicamos la descripción y cálculo

En cambio, los Ingenieros españoles han proyectado y construído varios arcos articulados de hormigón armado, de los que nos ocuparemos en el capítulo XX.

En el extranjero mientras tanto se habían realizado numerosas aplicaciones.

En 1916 se habían articulado en Alemania 35 bóvedas de las 41 construídas en aquel país con más de 40 m. de luz, pero los Ingenieros franceses sólo emplearon este dispositivo en 12 bóvedas de 25 a 30 m. de luz; los suizos, en 6 bóvedas; los austriacos e italianos, en 3 bóvedas en cada país, y los americanos, en un solo arco de 28 m.

Describiremos los ejemplos más característicos de cada uno de los tipos de articulaciones: con plomo, de rodadura, giratorias y semiarticuladas, para deducir de su examen comparativo las conclusiones que a nuestro juicio se deriven.

los de este proyecto; pero este puente fué adjudicado en subasta a un contratista timorato, que, ante el supuesto peligro de las articulaciones, consiguió sustituirlo por un horrible tramo metálico en celosía.

Aquellos artículos fueron reproducidos en gran parte por varios autores, que consideraron el puente como construído, entre ellos el interesante libro *El empleo del hormigón en la construcción de puentes*, por D. Francisco Mardones, Profesor de la Universidad de Chile (Santiago de Chile, 1906).

§ II. — Articulaciones con plomo

Puente de Gradefes (León), sobre el río Esla, carretera de Puente de Villarente a Almansa (1).

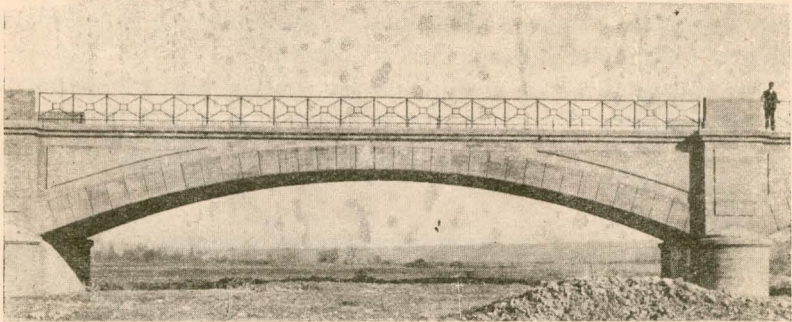


Fig. 313. Puente de Gradefes.

Proyectado por D. Bienvenido Oliver en 1904. Las obras fueron inspeccionadas por D. Francisco Cabrera.

Como el río Esla, en aquel sitio, está dividido en dos brazos, el puente tiene dos grupos de ocho y tres arcos para cada uno de los brazos.

Todos ellos son de 20 metros de luz e iguales a las figuras 313 a 315.

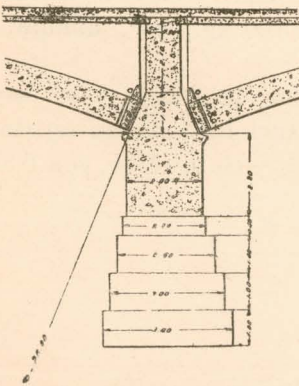


Fig. 314. Sección longitudinal.

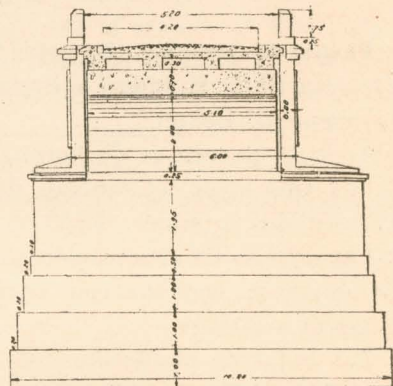


Fig. 315. Sección por la clave y planta.

(1) Más detalles en la *Revista de O. F.* de 15 de marzo de 1924.

Las articulaciones en arranques y clave se consiguieron con chapas de plomo de 22 mm. de grueso y con un ancho de la tercera parte de la junta. El plomo resiste a 300 kg./cm.²

Sobre los arcos van tabiques longitudinales de hormigón y sobre éstos un forjado de hormigón armado. Estos tabiques están separados en los arranques del cuerpo de la pila y estribos, para consentir los movimientos del arco.

Para que el firme no entrara por las juntas, se las cubrió primeramente con unas losas de hormigón armado con tejido metálico, y posteriormente se las sustituyó por un pequeño voladizo del forjado.

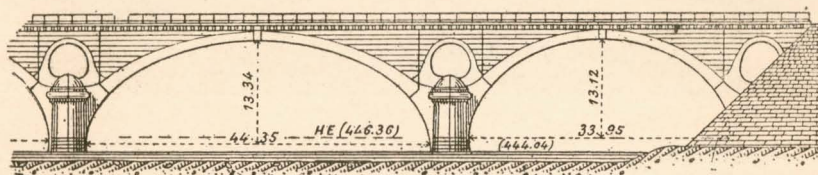


Fig. 316. Puente de Garching.

Puente de Garching (Baviera) (1). — Construido en 1908, para el ferrocarril de Muldhof a Freilassing.

Ingeniero: Beutel.

Todo el puente es de hormigón en masa.

Son tres arcos: el central, de 44,35 m. de luz (figuras 316 y 317); los dos laterales, de 33,95 m.

Las dovelas de articulación en los riñones y clave se moldearon con hormigón, con una resistencia de 400 kg./cm.², aunque solo trabajará a 80 kg.

Las hojas de plomo eran de 15 mm. de grueso, y su disposición: en los riñones, con 0,83 m. de anchura para un espesor de bóveda de 1,75 m., o sea casi la mitad, y en la clave, con 0,38 de

(1) Detalles en *Grandes voûtes*, tomo IV, página 95.

anchura para un espesor de bóveda de 1,10 m., o sea la tercera parte.

Son las mayores bóvedas articuladas con plomo de mayor luz que se han construido hasta la fecha.

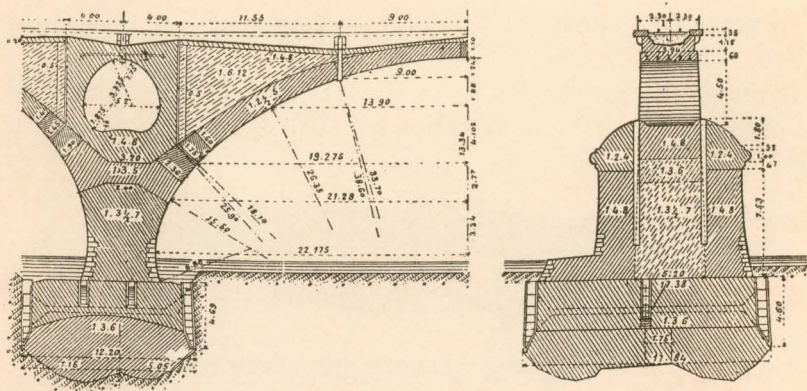


Fig. 317. Puente de Garching.

Nos permitimos, sin embargo, criticar el aligeramiento sobre la pila, pues hubiéramos preferido, para la *estática* y aun para la *estética*, aligerar los riñones, que innecesariamente se han rellenado con hormigón pobre; la reducción del peso sobre la bóveda hubiera disminuido sus espesores y empujes; la reducción de peso sobre la pila, al disminuir su componente vertical, lleva consigo, en cambio, un aumento de su espesor y del de su cimiento.

§ III. — Articulaciones de rodadura

Citaremos un ejemplo de cada tipo.
Las hay con piedra y con acero.

Puente de Gohren (Sajonia) (1). — Terminado en 1904. Ingenieros: Liebold y Cía. (figuras 318 y 319).

Aunque la bóveda (de 60 m. de luz) aparenta ser de sillería, se construyó de hormigón, menos las hiladas de arranques y claves, que son de granito y constituyen las *articulaciones pétreas*.

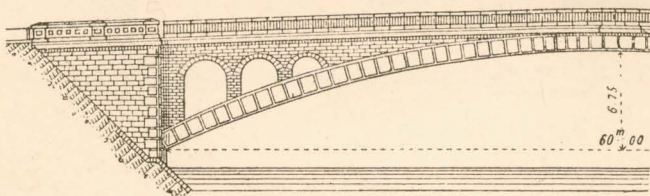


Fig. 318. Puente de Gohren.

Las juntas de contacto de estas dovelas están labradas con radios convexos y cóncavos de 20 y 10 m., respectivamente, habiéndose pulimentado su zona central.

Para las dilataciones se han cortado los tímpanos por una junta vertical *ijk* de 5 mm. (fig. 319), tapada en los paramentos por los muros en vuelta.

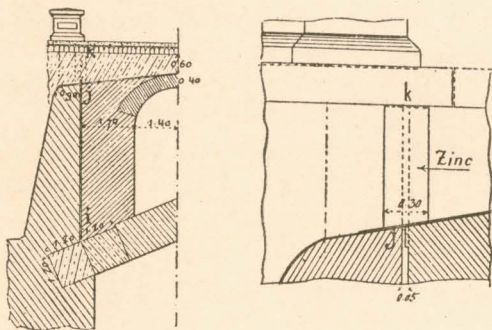


Fig. 319. Puente de Gohren.

La parte alta de la junta *jk* está cerrada por una hoja de cinc de 300×2 mm., que se levanta por el paramento interior del tímpano.

Esta disposición es sencilla y el tipo de articulación impecable,

(1) *Grandes voûtes*, tomo IV, página 139.

pues que no corre peligro de oxidación y permite reducir los espesores de la bóveda a 1,20, 1,50 y 1,10 m. en arranques, centro del arco y clave, respectivamente.

Verdad es que se trata de un puente de carretera.

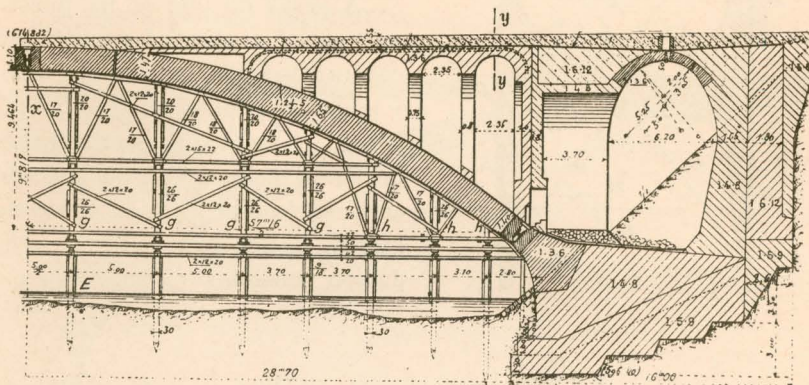


Fig. 320. Puente de Illerbeuren.

Puente de Illerbeuren (Baviera) (1), para el ferrocarril de Legan a Memmingen.

Terminado en 1904. Ingeniero: Mr. Beatel (figuras 320 y 320 bis).

Todo de hormigón en masa, con las dosificaciones en volumen de cemento, arena y grava que se indican en la figura 320.

La articulación por rodadura se efectúa por medio de unas *rótulas de acero moldeado*. (Figuras 321 y 321 bis).

Se apoyan éstas sobre unas dovelas de hormigón moldeado, dosificado a $1 \cdot 1\frac{1}{2} \cdot 1\frac{1}{2}$, por medio de hojas de plomo.

Para la dilatación se han separado, por junta vertical, la pila-estribo del último arco del tímpano del estribo propiamente dicho.

Las bovedillas de aligeramiento se han armado con siete carri-

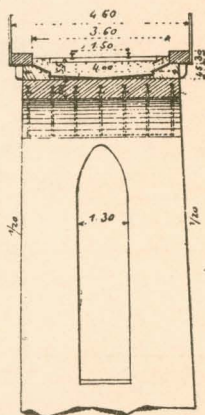


Fig. 320. bis.

(1) *Grandes voûtes*, tomo IV, página 159.

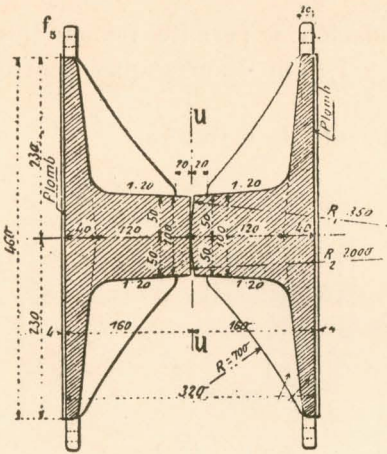


Fig. 321.

les viejos, encorvados y atados en sus extremos con redondos, que absorben el empuje de la última bovedilla.

A pesar de que se ha puesto en todo el ancho del puente una contrarrosca de fieltro asfaltado, y que las rótulas de acero se taparon, el agua que pasa a través de las articulaciones ha trazado en el suelo una línea de óxido de hierro, lo que evidencia su oxidación sensible.

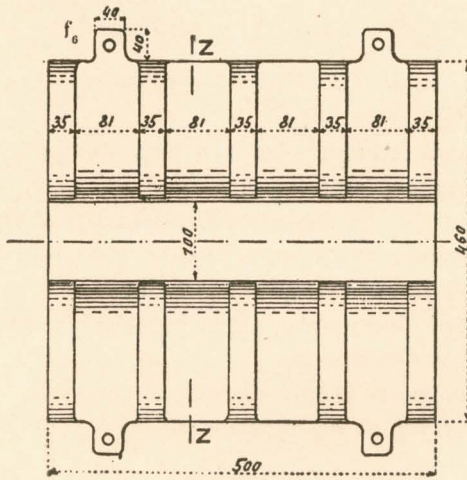


Fig. 321 bis.

§ IV. — Articulaciones giratorias

Antes de la guerra se habían construido en Alemania cuatro puentes con articulaciones giratorias (1).

Citaremos el más importante.

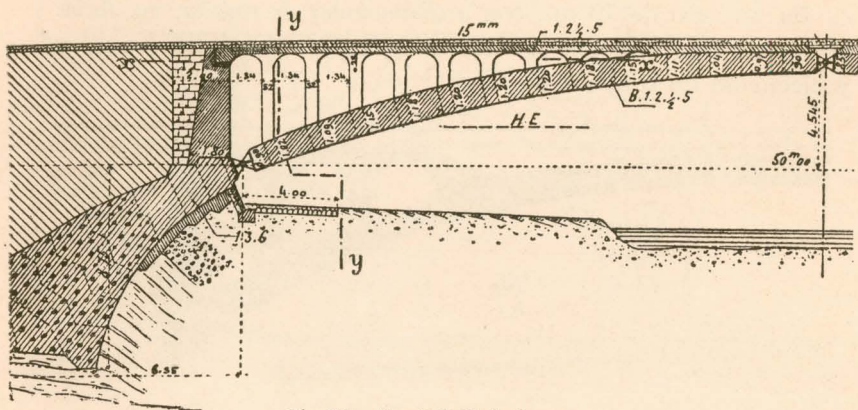


Fig. 322. Puente de Neckarhausen.

Puente de Neckarhausen, construido en 1900 (figura 322).

Es una bóveda de hormigón en masa a estribos perdidos; su dosificación en volumen de $1 \cdot 2 \frac{1}{2} \cdot 5$.

La fibra media es la curva de presiones del peso propio; el trabajo máximo del hormigón de 40 kg.

El ancho de la bóveda cerca de la clave (4,80 m) a los arranques (5,60 m.) como las ordenadas de una parábola.

Las rótulas son de hierro fundido (figura 323).

La junta de dilatación está constituida por un apoyo sobre rodillos de la primera bóveda de aligeramiento, y de una junta vertical en la parte superior del estribo.

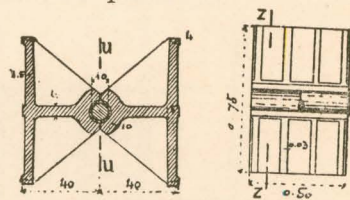


Fig. 323.

Esta misma disposición es la que habíamos proyectado en nuestro puente de las Segadas, que citamos anteriormente.

(1) Véase *Grandes voûtes*, tomo IV, página 225.

§ V. — Bóvedas semiarticuladas

Puente de Morbegno (Valtellina, Italia) (1). Línea férrea de Coliso a Sandrio. Ingenieros: Marzo y Garneri.

Terminado en 1903.

Es un arco de 70 m., con *articulaciones de rodilla*, en clave y arranques (fig. 324), que se enclavaron después del descimbramiento y ejecución de tímpanos.

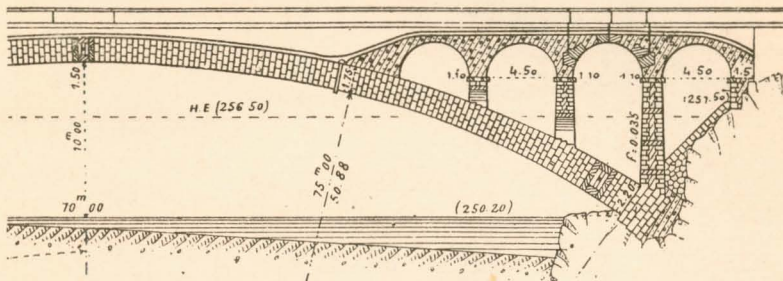


Fig. 324. Puente de Morbegno.

La bóveda principal es de sillería; los tímpanos, de hormigón y mampostería concertada.

Las articulaciones consisten en bloques de acero *a, a*, con superficies cilíndricas de contacto, fijados a unas cajas de palastro (figura 325).

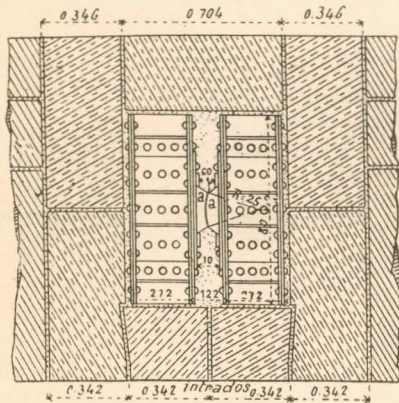


Fig. 325.

Para permitir los movimientos de los tímpanos, en los arcos de aligeramiento que corresponden a los arranques se han dejado tres juntas, *J*. (Fig. 326). En cada una de ellas se han dispuesto dos hileras con dovelas de granito labradas en cilindro, que ruedan una sobre otra, prolongándose las juntas hacia arriba en los tímpanos y pretilos.

(1) Fotografía en el tomo I, página 138 de nuestro libro. Detalles en *Grandes voûtes* tomo IV, página 65.

El autor se permite indicar que podía haberse sustituido la gran bóveda por arcos de menor luz; *el régimen torrencial de un río no es motivo suficiente para suprimir las pilas.*

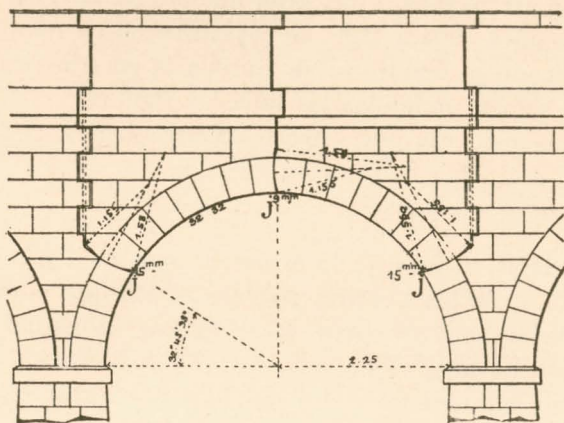


Fig. 326.

El dispositivo de dilatación que se aplica en dos arcos de tímpanos nos parece complicado; tampoco ha evitado dos grietas de 3,5 mm. encima de otro de los arcos de aligeramiento.

Las cajas de palastro, que son un intermediario caro y muy oxidable, entre la rótula y la fábrica, se sustituyen hoy día, con ventaja, por los demás tipos de articulación que hemos examinado.

Por último, el enclavamiento de estas articulaciones las sustrae *en parte* a la oxidación; en cambio, somete toda la junta a las oscilaciones de la curva de presiones bajo los efectos de las sobrecargas y temperatura (1).

(1) El autor piensa sobre esto: «¡Si votos, para qué rejas!»

§ VI. — Conclusiones

No se han generalizado. — A pesar de las ventajas teóricas de las bóvedas articuladas, y del gran número de bóvedas que, sobre todo en los años 1904 a 1908, se construyeron en Alemania, no se ha generalizado su empleo ni en Europa ni en América, y aun en aquel país siguen preferidas las bóvedas rígidas.

Es, pues, evidente que ofrecen inconvenientes, si no peligros, contra los que debemos estar en guardia.

Resumamos sus ventajas e inconvenientes.

Sus ventajas. — Su cálculo es mucho más fácil y bastante más preciso que el de las bóvedas rígidas, en las que para luces que excedan de 40 metros puede ser peligroso no estudiarlas como piezas hiperestáticas.

Soportan, sin agrietarse, los movimientos en la cimbra y las oscilaciones de la curva de presiones por la temperatura y sobrecargas móviles.

Permiten un *asiento* o *corrimiento de los estribos* en terrenos flojos, así como la *deformación elástica de los estribos* cuando éstos son muy altos.

La menor amplitud de oscilaciones en la curva de presiones *permite reducir los espesores* de las bóvedas y, por tanto, sus empujes en los estribos.

Sus inconvenientes. — Son más delicadas de construir; en efecto, la colocación de las articulaciones en la clave y arranques, su fijación durante el asiento de los sillares inmediatos, o el moldeo del hormigón adyacente a las articulaciones, exige precauciones más costosas que la construcción de una bóveda rígida.

La economía en los espesores de bóvedas está también compensada por el coste de las articulaciones, que puede ser considerable.

Las rótulas metálicas son oxidables, puede romperse la parte fundida y *no hay medio práctico de sustituir las*.

La oxidación se evita con las articulaciones de plomo o las de piedra, pero aquéllas sólo se han empleado para luces de 40 m., y las de piedra, aunque se han aplicado a bóvedas de 60 m., están expuestas a la rotura de una rótula por un defecto invisible del sillar.

¿Cuándo deben emplearse? — Confiesa el autor que ha modificado las opiniones que profesó hace treinta años, hasta el punto de no haber proyectado ya ninguna bóveda articulada.

Desde luego, es incuestionable que no deben articularse sino grandes bóvedas; en las inferiores a 40 m. de luz, las ventajas de las articulaciones están compensadas por sus inconvenientes.

Pero aun para luces mayores de 40 m. parécennos preferibles otras soluciones menos... acrobáticas, y permitásenos la calificación.

Claro es que si no hay confianza en la inconvencionalidad del cimentamiento, no deben proyectarse bóvedas rígidas, y que la articulación está indicada.

Pero es aún preferible en estos casos *suprimir la dificultad*, recurriendo a tramos rectos independientes, ya metálicos o mejor aún de hormigón armado, que sólo determinan reacciones verticales; en éstos un asiento de un estribo o pila no repercute en la estabilidad de la obra y puede fácilmente corregirse.

Por último, observemos que la mayor parte de las bóvedas articuladas de gran luz que se han construído podían haberse proyectado con arcos de menor luz y de mayor flecha.

¿A qué ese afán de proyectar arcos de 50 y 60 m. de luz, con rasantes bajas, si caben apoyos intermedios?

Serán, pues, muy excepcionales los casos en que parezca convenir articular las bóvedas.

Y aun en éstos el autor preferirá rehuir de este artificio constructivo, ya que hoy se dispone de otras muchas disposiciones, ofreciendo mayor tranquilidad.