

CAPITULO IX

BOVEDAS DE PIEDRA O LADRILLO

(hasta 40 metros de luz)

§ I. — Disposiciones

Definiciones. — Fibra media de una bóveda. — Clasificación de las curvas de intradós. — Bóvedas de medio punto. — Bóvedas escarzanas. — Bóvedas carpaneles. — Bóvedas elípticas. — Comparación entre bóvedas escarzanas o elípticas. — Bóvedas ojivales. — Otras curvas de intradós. Parábolas. — Catenarias. — Elipses deformadas.

§ II. — Dimensiones

Espesores de las bóvedas. — Espesores en la clave. — Espesores en los riñones. — Trazado del trasdós.

§ III. — Materiales, aparejos y desagües

Materiales que se emplean. — Aparejo de las bóvedas. — Aparejo en boquillas. — Capialzados. — Morteros. — Fábricas mixtas. — Contrarrosas y desagües.

§ I. — DISPOSICIONES

Definiciones. — De acuerdo con M. Sejourné, las bóvedas cuya luz excede de 40 metros de luz y que se han generalizado únicamente desde fines del siglo pasado, las clasificamos como *grandes bóvedas*; merecen un estudio especial, al que dedicaremos el capítulo XII.

En este capítulo nos referiremos principalmente a las bóvedas de luces inferiores a 40 metros.

Los *puentes de fábrica* son aquellos exclusivamente constituídos por piedras aparejadas — sillería, sillarejo, mampostería, ladrillos — o por hormigón en masa, moldeado en obra o en taller.

Sólo deben resistir a esfuerzos de compresión, a cuyo efecto la curva de presiones no debe salir en ningún caso del núcleo central.

Reservamos el nombre de *puentes de hormigón armado* a aquellos en que los elementos resistentes de la obra contienen armaduras de acero para que resistan a las tensiones. Ya no hay, pues, la sujeción de que la curva de presiones pase dentro del núcleo central: los espesores pueden reducirse sensiblemente.

Los puentes de fábrica tienen tres partes:

1.º Los *estribos y pilas*, que hemos estudiado en los capítulos anteriores.

2.º Las *bóvedas*, que constituyen su elemento resistente.

3.º Los *típanos*, que sirven de intermedio entre la bóveda y la *plataforma* o *tablero* del puente, y sólo tendrán que resistir a los empujes del terraplén de relleno. Los estudiaremos en el capítulo XI.

La bóveda está limitada por dos superficies curvas: la inferior, llamada *intradós*, y la superior, que se designa con el nombre de *trasdós*, y por los dos planos de paramentos, llamados *boquillas*.

El intradós es una superficie cilíndrica, empalmada con los

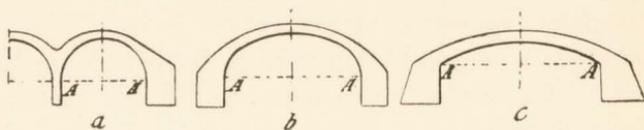


Fig. 142.

paramentos de apoyo, cuando la curva de intradós es completa (figura 142 a y b), o cortándolos, cuando es incompleta (fig. 142 c).

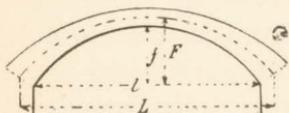


Fig. 143.

Las líneas *AA* de empalme de intradós y apoyos se llaman *arranques*.

La distancia real entre los dos arranques de una bóveda es su *luz real*, *l* (fig. 143).

El eje vertical de la curva de intradós es la *flecha*, f .

La relación entre la flecha y la luz es el *rebajamiento* de la

$$\text{bóveda: } r = \frac{f}{l}.$$

Hasta hace pocos años, las luces y flechas de una bóveda se medían en su curva de intradós.

Pero también pueden referirse a la curva de su *fibra media*.

Entonces se debe decir que las luces y flechas L y F (fig. 143) son las *luces* y *flechas teóricas* (1).

Fibra media de una bóveda. — Es el lugar geométrico de los centros de sus secciones transversales.

Sería en la figura 144 el lugar de los medios c de las rectas ab que corten al intradós y trasdós con ángulos interiores α iguales entre sí.

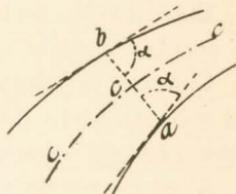


Fig. 144.

Sabemos, por *Resistencia de Materiales*, que la *curva de presiones* de una bóveda es una *curva funicular* de las cargas aplicadas a la bóveda, y

que el momento flector en una sección transversal es proporcional a la distancia entre la curva de presiones y la fibra media.

Para reducir los espesores de las bóvedas, convendría, pues, que su fibra media fuera la curva funicular de las cargas, ya que en puentes de fábrica, de considerable peso muerto, las sobrecargas influyen poco con relación a las cargas.

Pero mientras las bóvedas no exceden de 20 metros de luz, no suelen afinarse tanto sus espesores. Se determina la forma de su intradós por consideraciones de aspecto y de desagüe; se fijan sus espesores por fórmulas y reglas empíricas.

Entre 20 y 30 metros de luz, basta con la comprobación estática de su estabilidad, mediante las fórmulas de momentos y a lo sumo algún procedimiento gráfico y aproximado, para asegurarse que la curva de presiones no sale del núcleo central en las dos hipótesis de puente cargado y descargado. Pero ya en las bóvedas de 30 metros de luz en adelante conviene comprobar su resistencia por el método elástico, no porque sea rigurosamente exacto, sino

(1) Así lo hemos hecho para los Modelos oficiales de puentes en arcos de hormigón armado.

porque, como dijimos ya, es el que hasta ahora se aproxima más a la realidad (1).

Sólo para estas últimas bóvedas convendrá aproximar sus fibras medias a las curvas funiculares de cargas y sobrecargas; se consigue empleando parábolas, catenarias u otras curvas para el intradós o, mejor aún, para la fibra media. Las describiremos más adelante.

Para las bóvedas corrientes de fábrica, que estudiamos ahora, se emplean para su intradós, y casi exclusivamente, las curvas circulares y elípticas.

Clasificación de las curvas de intradós. — La más frecuentemente empleada es la circular.

Cuando la rasante permite el medio círculo completo, o sea un rebajamiento de $1/2$, el intradós se llama de *medio punto* (figura 142 a).

Si es necesario rebajar las bóvedas, se da al intradós la forma de un arco de círculo; las bóvedas se llaman entonces *escarzanas* (figura 142 c), oscilando sus rebajamientos entre $1/3$ y $1/15$, que es el máximo a que se ha llegado.

Pero también se emplean para estos arcos rebajados las curvas *carpaneles* y *elípticas*, que tienen, como los medios puntos, sus tangentes verticales en los arranques y son, como aquéllos, *curvas completas* (fig. 142 b).

Por último, en algunos casos se recurre a la bóveda ojival. Estudiaremos estas formas.

Bóvedas de medio punto. — Es la curva de intradós más sencilla. Su empuje sobre los apoyos se aproxima bastante a la vertical; por tanto, exige menores espesores en estribos y pilas.

Los Romanos la emplearon casi exclusivamente en sus puentes y acueductos (fig. 145), y durante la Edad Media fué también la curva de intradós más aplicada (fig. 146).

Hoy día continúa empleándose el medio punto cuando la altura de rasante de los puentes lo permite y la inclinación de las laderas lo aconseja (fig. 147).

(1) En el tomo IV de este libro daremos ejemplos de estos procedimientos de cálculo.

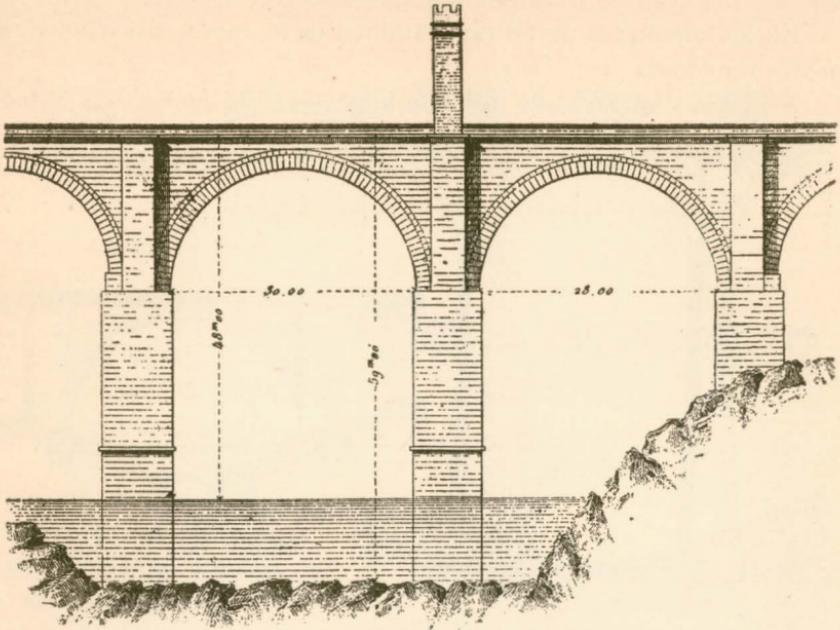


Fig. 145. Puente de Alcántara sobre el Tajo (Cáceres).

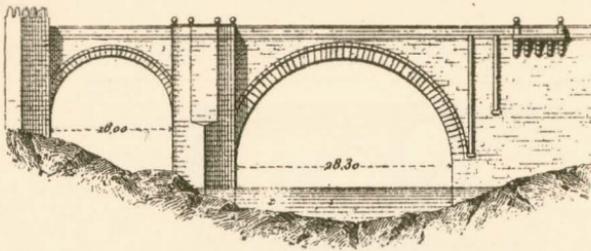


Fig. 146. Puente de Alcántara sobre el Tajo (Toledo).

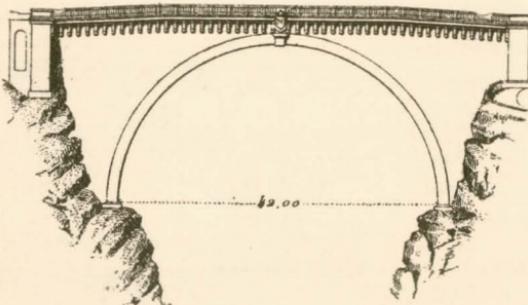


Fig. 147. Puente de Saint Sauveur (Francia).

En los viaductos de fábrica también es la curva casi exclusivamente empleada (fig. 148).

Asimismo los arcos de desagüe laterales, que suelen acompañar

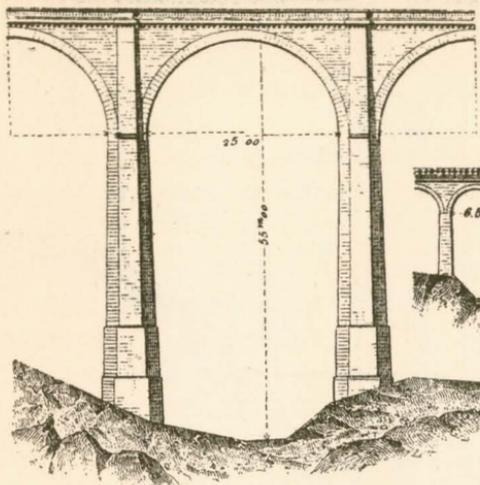


Fig. 148. Viaducto de Pompadour.

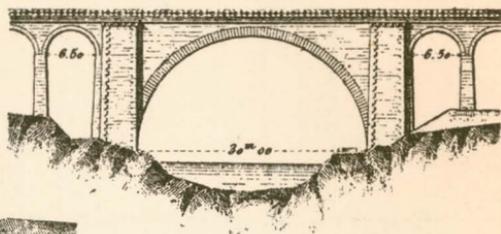


Fig. 149. Viaducto de la Baisse.

a los puentes, se construyen casi siempre de medio punto (fig. 149).

Bóvedas escarzanas. — Los constructores romanos y de la Edad

Media iniciaron ya pequeños rebajamientos cuando la altura de rasante no les permitía adoptar el medio círculo completo (figuras 150 y 151).

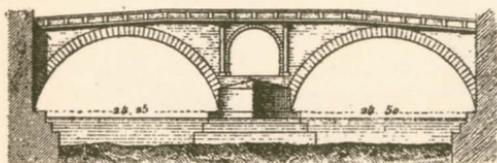


Fig. 150. Puente de Fabricio (Roma).

En el siglo XVIII, en España el puente de Serranos, en Valencia (figura 152), y en Francia Perronnet, en su clásico puente de La Concordia, de París (figura 153), aumentaron más los rebajamientos.

En el siglo XIX, las bóvedas escarzanas fueron las más fre-

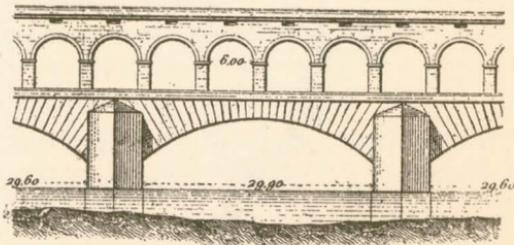


Fig. 151.—Puente de Florencia (siglo XIV).

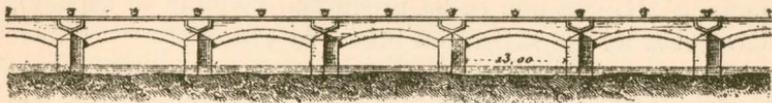


Fig. 152. Puente de Serranos (Valencia).

cuentemente empleadas.

En puentes largos, de varios arcos, es el tipo de bóveda que ofrece mayor desagüe.

En ríos o trincheras con laderas muy inclinadas, se traza el arco escarzano normal a los taludes del terreno, lo que permite suprimir casi los estribos (fig. 154).

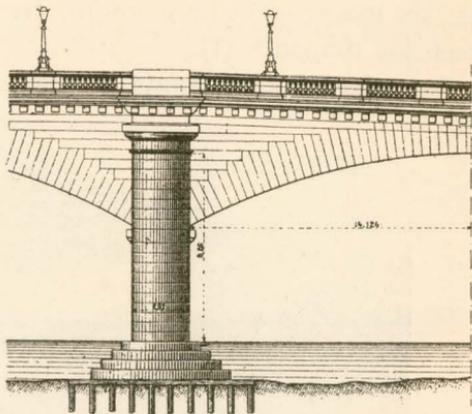


Fig. 153. Puente de La Concordia (París).

En cada caso hay que estudiar los rebajamientos más convenientes, teniendo en cuenta que a medida que las flechas disminuyen, la oblicuidad de los empujes y, por tanto, los espesores en pilas y, sobre todo, en estribos, aumenta.

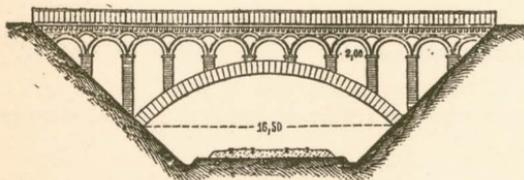


Fig. 154.

Estéticamente, el rebajamiento de $1/3$ del puente de Burdeos (figura 155) da pesadez a la obra, a pesar de sus cuernos de vaca

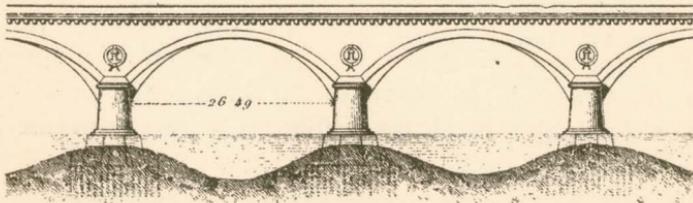


Fig. 155. Puente de Burdeos.

rebajados a $1/4$, con que se ha procurado mejorar su aspecto; los rebajamientos de $1/8$ satisfacen más a la vista.

Estáticamente, los rebajamientos de $1/4$ y $1/5$ son los que exigen menores volúmenes de bóveda.

Pero en España se emplean con mayor frecuencia los de $1/10$, que, sin exageración de empujes, permiten mayor desagüe y reducen los tímpanos (1).

Por exigencias de rasante, en nuestro puente de María Cristina,



Fig. 156. Puente de María Cristina, en San Sebastián.

en San Sebastián, el rebajamiento alcanzó $1/11,5$ para luces de 30 metros (fig. 156).

En el de Nemours, terminado en 1805, se llegó a $1/15,4$, que es ya excesivo (fig. 157).

Conviene trazar estos arcos sobre pilas de alguna altura. La

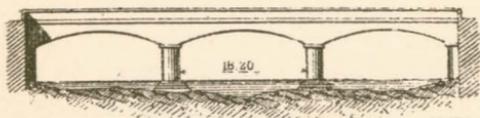


Fig. 157. Puente de Nemours.

proporción recomendada por M. Sejourné, que nos parece acertada, es de dar a la altura h de la pila sobre las aguas medias un valor aproximado

a $0,55 H$, siendo H la altura de la clave sobre aquel nivel de aguas; es decir, que la altura visible de la pila conviene sea un poco mayor que la flecha del arco.

(1) Por estas razones hemos adoptado $1/10$ como máximo rebajamiento para los Modelos oficiales.

Bóvedas carpaneles.—Se traza el intradós de estas bóvedas por medio de arcos de círculo tangentes entre sí y cuyos radios van aumentando desde los arranques a la clave.

La primera aplicación fué en el puente de Verona (año 1334), sobre el Adigio (fig. 158). Es un arco carpanel rebajado al $\frac{1}{3}$ en tres centros.

Para atenuar los garrotes, que a la vista pueden observarse,

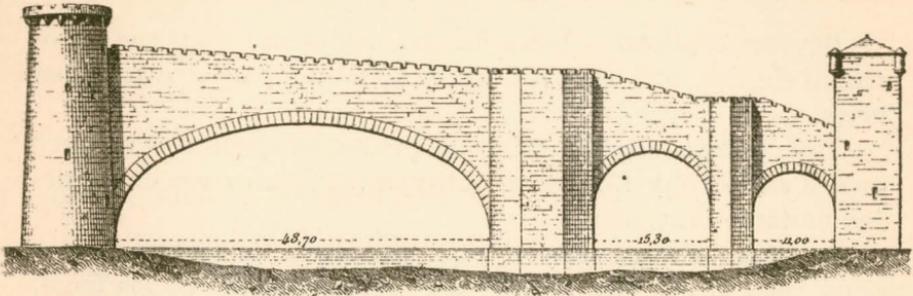


Fig. 158. Puente de Verona sobre el Adigio. Año 1334.

por los cambios bruscos de curvatura de los diferentes arcos de círculo, hay que aumentar el número de centros.

Así llegó Perronnet a emplear 11 centros para el trazado de su famoso puente de Neuilly, terminado en 1774 (fig. 159), y cuya curva obtuvo por tanteos.

Se justificaba la preferencia por estos carpaneles por su fácil trazado gráfico, y no han faltado Ingenieros del siglo XIX que, alucinados por esa tradicional *superstición del compás*, imaginaron procedimientos complicados para mejorar los arcos carpaneles (1).

Otra ventaja que se les atribuía era la de que se facilitaba el despiezo y labra de los sillares, pues

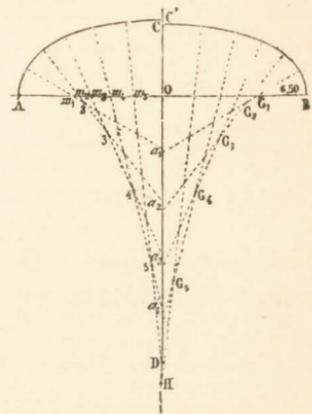


Fig. 159 Puente de Neuilly.

(1) En todos los tratados antiguos de puentes, y aun en algunos modernos, se detallan multitud de procedimientos y de tablas para el trazado de estos carpaneles. No los reproducimos, ya que no se emplean hoy, en los puentes, por lo menos.

en cada trozo de arco de círculo las juntas de la bóveda seguían la dirección de los radios correspondientes y el número de tipos de sillares era sólo el del número de centros del carpanel.

Pero hoy día, en que las bóvedas se construyen con sillarejo u hormigón, esta ventaja desaparece y en cambio subsisten las variaciones bruscas de curvatura, que se reflejan también en la curva de presiones.

Bóvedas elípticas.— Estos inconvenientes se evitan con el intradós elíptico, que ha sustituido en absoluto a las curvas carpaneles.

Para su buen aspecto, conviene que los rebajamientos del arco oscilen entre $1/3$ y $1/5$. Así se obtienen también curvas de presiones bastante centradas.

La elipse se traza sobre el papel por medio de un hilo de longitud igual al eje mayor y cuyos extremos se fijan en los focos; estirando el hilo con un lápiz se dibuja la elipse de una manera continua.

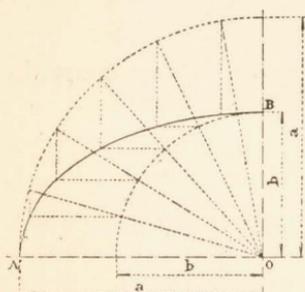


Fig. 160.

Se puede trazar por puntos por medio de la construcción indicada en la figura 160, cuyo examen basta para su explicación.

Por último (y será siempre el mejor procedimiento), se puede trazar la elipse por abscisas y ordenadas por medio de su ecuación.

Tomaremos los ejes de la elipse por ejes de coordenadas (1); sea a el semieje mayor, y b el semieje menor (fig. 161); la ecuación será:

$$y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2}$$

La inclinación de la tangente sobre el eje Ox será:

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{b}{a} \frac{x}{\sqrt{a^2 - x^2}}$$

(1) Extractamos estos datos del libro: *Ponts en maçonnerie*, por C. Gay, que contiene muchos detalles sobre las curvas empleadas ordinariamente en Francia.

3.º Por la curva envolvente en las normales de la elipse. La envolvente de la elipse, referida a los mismos ejes, tiene por ecuación:

$$(aX)^{2/3} + (bY)^{2/3} = (a^2 - b^2)^{2/3}$$

Es la curva $C_1C_NC_0$ de la figura anterior, que es el lugar de los centros de curvatura. AC_1 y BC_0 son, pues, los radios de curvatura de la elipse en A y B . Se obtienen los puntos C_1 y C_0 trazando del vértice F del rectángulo $AOBF$ la recta FC_1C_0 , perpendicular a la diagonal AB .

Habiendo construído la envolvente, se obtiene la normal en M trazando MC_N , tangente a esta curva.

Comparación entre bóvedas escarzanas o elípticas.— Se presenta frecuentemente la duda entre dos tipos de bóvedas para iguales luces y alturas de rasante.

Ya dijimos que para el buen aspecto y el desagüe los arcos escarzaños debían apoyarse sobre pilas de altura un poco mayores que las flechas. En cambio, los arcos elípticos pueden y deben tener sus arranques casi al nivel de las aguas medias, pues así se reducen los empujes y su oblicuidad.

Comparemos un arco escarzano rebajado a $1/8$ con una elipse a $1/4$ (fig. 162) que dejen igual altura libre bajo la clave.

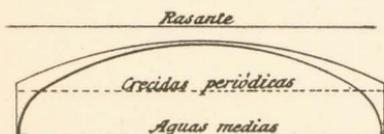


Fig. 162.

El escarzano ofrece más desagüe y necesitará menores tímpanos, pero producirá mayores y más oblicuos empujes. Si los cimientos han de ser profundos, necesitarán grandes volúmenes, sobre todo para los estribos.

Este último inconveniente será más sensible en puentes de arco único, en que los dos apoyos son estribos, pero desaparece si las márgenes son inclinadas y resistentes, porque entonces los estribos pueden suprimirse.

El arco escarzano ofrece también la ventaja de su menor desarrollo de bóveda y de su fácil despiezo.

Cuando se ejecutan con sillería en boquillas y se traza el tras-

dós paralelo al intradós (como es costumbre para arcos inferiores a 30 metros de luz), todos los sillares pueden ser iguales. Asimismo el despiece de pilas, y sobre todo en sus tajamares, es más fácil con bóvedas escarzanas, como vimos en el capítulo anterior.

Por todas estas razones, en España no empleamos las bóvedas elípticas sino en poblaciones y cuando los cimientos son profundos, pues entonces se reducen los volúmenes de apoyos; obsérvese, en efecto (fig. 163), que se puede sustituir el escarzano AB por un arco $ABMD$, con disminución sensible del estribo y de su cimiento.

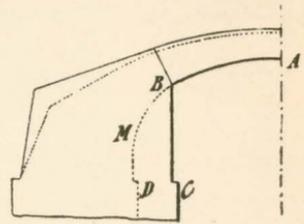


Fig. 163.

Bóvedas ojivales. — Se emplearon corrientemente en la Edad Media, en Persia y en Europa (figuras 164 y 165).

Pero, mecánicamente considerada, no es la ojiva forma racio-

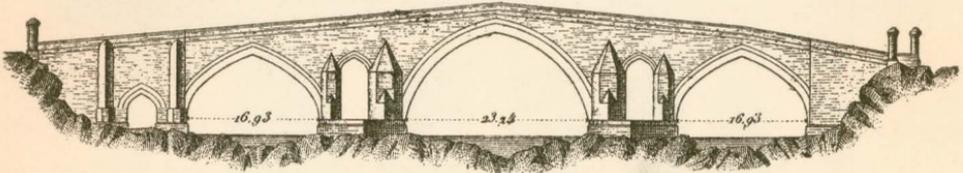


Fig. 164. Puente de la Joven (Persia).

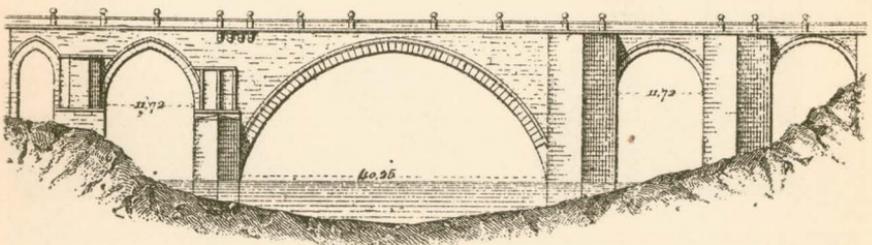


Fig. 165. Puente de San Martín (Toledo).

nal de bóveda para los casos ordinarios de pesadas sobrecargas móviles, pues éstas, al actuar sobre uno de los costados del arco, tienden a abrirlo por la clave.

Sin embargo, hay algunas modernas aplicaciones que están justificadas.

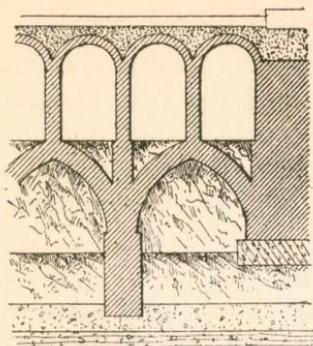


Fig. 166. Viaducto de Point du Jour (París).

metros de altura por medio de una bóveda ojival de 30 m. de luz (1).

En el viaducto de Point du Jour, en París (fig. 166), se utilizó la bóveda ojival para reducir a la mitad los cimientos de sus pilas.

En España se construyó con bóvedas inferiores ojivales el puente sobre el Barranco de San Antonio, en la carretera de Játiba a Alicante (figura 167).

Asimismo el ilustre Sejourné, en su viaducto de Fontpedrouse (figura 168), suprimió una pila de 65 metros

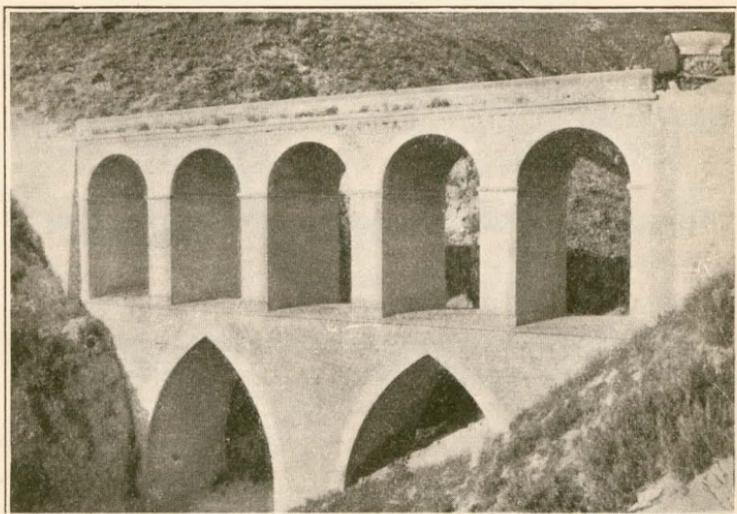


Fig. 167. Puente sobre el Barranco de San Antonio (Alicante).

También el autor proyectó un puente con arcos ojivales para Elche, sobre el río Crevillente (fig. 169), creyendo que en medio de aquella villa y paisaje se adaptaría mejor una obra de estilo árabe. Para contrarrestar los defectos mecánicos de la ojiva, ha-

(1) Ferrocarril de Villefranche a Bourg-Madame. Daremos detalles en el capítulo XXII.

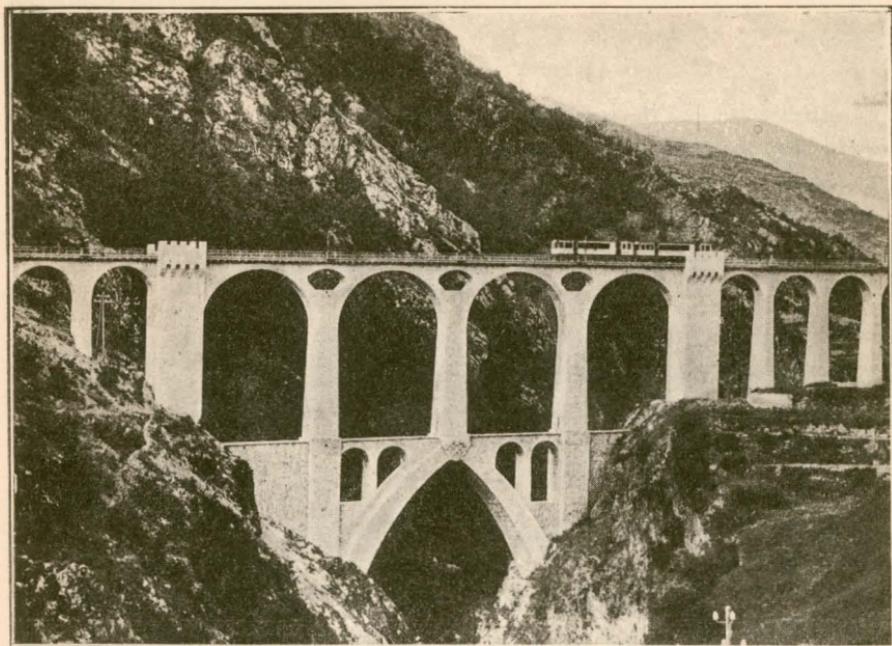


Fig. 168. Viaducto de Fontpedrouse.

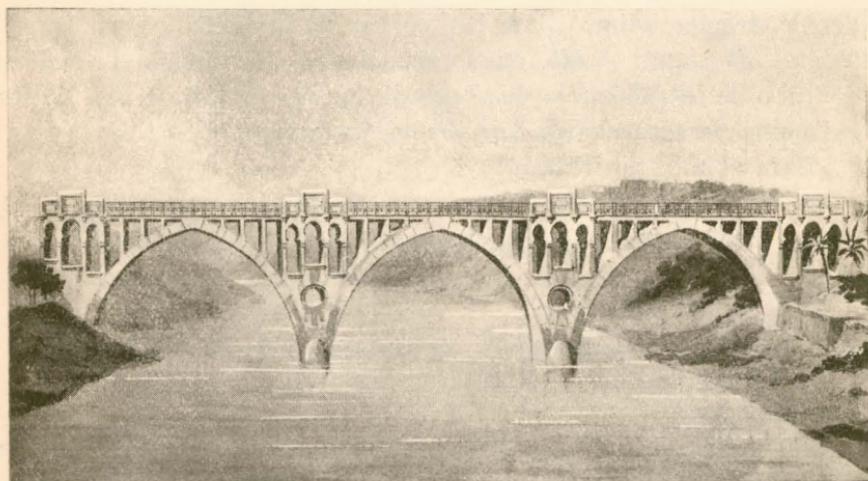


Fig. 169. Proyecto de un puente en Elche (Alicante).

bíamos proyectado armar el hormigón de los arcos con robustas cerchas de acero (1).

Otras curvas de intradós.—Ya dijimos al principio de este capítulo que cuando las luces exceden de 30 metros, que es cuando empieza a convenir la reducción de los espesores de bóvedas, debe procurarse que su fibra media se aproxime lo más posible a la funicular de cargas y sobrecargas.

Parábolas.—Cuando la línea de carga de un puente pueda suponerse paralela a la curva de una bóveda de espesor constante, pero muy reducido, la curva funicular es una *parábola*: $y^2 = 2px$.

Como esto ocurre con alguna aproximación en los puentes en arco de hormigón armado, en los que el peso de los tímpanos es muy pequeño con relación al de las bóvedas, tablero y *sobrecargas uniformemente* repartidas, el autor ha trazado todas las directrices en los modelos oficiales de este tipo de puentes, con parábolas de segundo grado (2),

Si los tímpanos son macizos, la parábola para los pesos muertos es de un orden superior al de segundo grado.

Así que en el puente sobre el Andarax (Almería), con bóvedas de 20 m. de hormigón en masa (3), el Ingeniero D. José López Rodríguez adoptó para las curvas de intradós y trasdós *parábolas de cuarto grado*, cuyas ecuaciones, referidas a la cuerda del arco de intradós (eje de abscisas) y a la vertical de uno de los extremos de esta cuerda (eje de ordenadas) son:

Para el arco de intradós:

$$y = 18x(1 - x) [1 - x(1 - x)]$$

llamando x a la relación $\frac{z}{20}$ de la abscisa z a la luz.

(1) La Dirección de Obras públicas no compartió esta fantasía morisca, prefiriendo un puente más modernista.

(2) Lo justificaremos en el capítulo XVII. Modelos oficiales de puentes en arco para carreteras y ferrocarriles.

(3) Descrito en la *Revista de Obras Públicas*, de 1.º diciembre 1925.

Para el arco de trasdós:

$$y = 1,1875 + 15x(1 - x) [1 - x(1 - x)]$$

El Ingeniero constructor M. Freyssinet, en un proyecto de puente con arco de hormigón de 165 m. de luz, recurrió a su vez a *parábolas de octavo grado*, de la forma:

$$y = A + Bx^2 + Cx^4 + Dx^6 + Ex^8 \quad (1)$$

Catenarias.—Otros Ingenieros han admitido la hipótesis de una bóveda infinitamente delgada, soportando una carga continua, limitada superiormente por una horizontal, condición que se expresa diciendo que la *hincas de carga es una horizontal*, y que se realiza en parte en algunos puentes.

En este caso, la funicular de las cargas es una proyección de *catenaria*; es la curva cuyas ordenadas se obtienen multiplicando las de la catenaria por un coeficiente constante a .

En Francia se ha aplicado esta curva a las directrices de varios puentes, entre otros, el de Orleans, que describiremos en el capítulo XII.

La fórmula de esta curva es muy complicada, por lo que no se presta a cálculos sencillos; así, que M. Sejourné propone el sustituirla por la curva:

$$y = \frac{b(n^2 - a^2)}{a^2} \times \frac{x^2}{n^2 - x^2}$$

en la que a es la semiluz de la directriz, b la flecha y n un coeficiente determinado, ya sea dándose un punto de la curva, ya el radio de curvatura en la clave (2).

Elipses deformadas.—Asimismo, M. Sejourné considera conveniente, deformar los arcos elípticos, ya sea para mejorar su aspecto, ya para aproximar las directrices a la curva de presiones.

Se obtienen estas curvas interiores o exteriores a la elipse por

(1) Gay: *Ponts en maçonnerie*, pág. 106.

(2) *Grandes voûtes*, tomo III, pág. 337.

varios procedimientos sencillos (1) que permiten mantener el aspecto de la forma elíptica para las bóvedas.

A pesar de estos perfeccionamientos teóricos de las curvas directrices, continúan proyectándose grandes bóvedas con las curvas elementales antes descritas.

Hay que recordar que las funiculares de presiones varían sensiblemente de posición bajo las cargas móviles, sobre todo cuando éstas son grandes en proporción al peso muerto de los puentes.

Por tanto, a lo único que se puede aspirar es a trazar una directriz que se aproxime a la funicular de las sobrecargas uniformemente repartidas; en grandes bóvedas se obtienen así reducciones en sus espesores, muy sensibles; en pequeños arcos, las ventajas son inapreciables.

§ II. — DIMENSIONES

Espesores de las bóvedas. — Teóricamente, debían calcularse los espesores de las bóvedas aumentándolos en proporción a los esfuerzos crecientes que actúan en cada una de sus secciones, de modo a que la presión media por centímetro cuadrado fuera igual en todas las fábricas.

Pero esto conduciría a espesores enormes para las grandes bóvedas, lo que lleva consigo el aumento proporcional de su peso muerto, exacerbándose la dificultad.

Es preferible entonces, según veremos en el capítulo especial que dedicamos a las grandes bóvedas, ejecutar éstas con piedras escogidas y morteros enérgicos, susceptibles de resistir mayores presiones. Así se procede también en los monumentos y edificios de grandes alturas y cargas, en los que una cuidadosa mano de obra y la selección de sus materiales compensa las mayores cargas que deben soportar.

Lo que interesa en los puentes es realizar cada obra con los elementos propios a su importancia y con el menor gasto posible.

Pero ahora sólo nos ocupamos de las bóvedas de uso corriente, que con frecuencia hay que ejecutar; hay miles de ejemplos demos-

(1) *Grandes voûtes*, tomo III, pág. 330.

trativos de que con espesores moderados resisten las sobrecargas máximas a que pueden someterse.

Utilicemos, pues, la experiencia.

Espesores en la clave.— Para las bóvedas de luces medias se utilizan, desde Perronnet acá, fórmulas empíricas en función de la luz:

$$e = \frac{1}{15} l \text{ (siglo XVIII)}$$

$$\text{y } e = 0,325 + 0,035l \text{ (Perronnet);}$$

$$e = \frac{1}{25} l \text{ (Gauthey) para luces comprendidas entre 16 y 32 m.,}$$

$$e = 0,33 + 0,033l \text{ (Leveillé),}$$

$$e = 0,20\sqrt{l} \text{ (Dupuit),}$$

$$e = 0,15 + 0,15\sqrt{l} \text{ (Croizette-Desnoyers).}$$

Los resultados así obtenidos eran algún tanto diferentes.

Don Elzeario Boix propuso una fórmula nueva, en que el espesor es proporcional a la raíz cúbica de la luz (1).

$$e = \frac{1}{3}\sqrt[3]{l}$$

Mi distinguido antecesor en esta Cátedra, D. Luis Gaztelu, Marqués de Echandía, mejoró esta fórmula por el estudio de los espesores de multitud de puentes españoles y extranjeros:

$$e = 1,35 + 0,75\sqrt{l} - 1,40\sqrt[3]{l}$$

Pero M. Sejourné, más recientemente, y por la comparación de 3.300 bóvedas, ha obtenido y propone una fórmula más sencilla:

$$e_0 = \alpha (1 + \sqrt{l}) \mu \quad (2)$$

(1) En su libro: *Estabilidad de las construcciones de mampostería*.

(2) *Grandes voûtes*, tomo III, pág. 343.

Deben tomarse como valores de α los siguientes:

- 0,15 para puentes de carretera;
- 0,17 para puentes de ferrocarril de vía estrecha;
- 0,19 para puentes de ferrocarril de vía ancha.

El coeficiente μ es función del rebajamiento del arco σ :

Para los arcos de medio punto: $\mu = 1$.

Para las elipses rebajadas y los arcos: $\mu = \frac{4}{3 + 2\sigma}$

Para los arcos escarzanos: $\mu = \frac{4}{3} (1 - \sigma + \sigma^2)$.

A continuación damos el Cuadro de los valores de μ en función de σ .

Cuadro de los valores de μ para las bóvedas elípticas y escarzanas.

(Grandes vouûtes, t. VI, pág. 176.)

REBAJAMIENTO σ	COEFICIENTE μ		REBA- JAMIENTO σ	COEFICIENTE μ	
	Elipses	Arcos		Elipses	Arcos
	$\mu = \frac{4}{3+2\sigma}$	$\mu = \frac{4}{3}(1-\sigma+\sigma^2)$		$\mu = \frac{4}{2+2\sigma}$	$\mu = \frac{4}{3}(1-\sigma+\sigma^2)$
$0,50 = \frac{1}{2}$	1	1	0,24	1,1494	1,0901
0,49	1,0050	1,0001	0,23	1,1560	1,0972
0,48	1,0101	1,0005	0,22	1,1627	1,1045
0,47	1,0152	1,0012	0,21	1,1695	1,1121
0,46	1,0204	1,0021	$0,20 = \frac{1}{5}$	1,1764	1,1200
0,45	1,0256	1,0033	0,19	1,1834	1,1281
0,44	1,0309	1,0046	0,18	1,1904	1,1365
0,43	1,0362	1,0065	0,17	1,1976	1,1452
0,42	1,0416	1,0085	$0,166 = \frac{1}{6}$	1,2000	1,1460
0,41	1,0471	1,0108	0,16	1,2048	1,1543
$0,40 = \frac{1}{2,5}$	1,0526	1,0133	0,15	1,2121	1,1633
0,39	1,0582	1,0161	$0,1428 = \frac{1}{7}$	1,2170	1,1701
0,38	1,0638	1,0192	0,14	1,2195	1,1728
0,37	1,0695	1,0225	$0,1333 = \frac{1}{7,5}$	1,2244	1,1791
0,36	1,0748	1,0261	0,13	1,2269	1,1825
0,35	1,0810	1,0300	$0,125 = \frac{1}{8}$	1,2307	1,1874
0,34	1,0869	1,0348	0,12		1,1925
$0,3333 = \frac{1}{3}$	1,0909	1,0372	$0,1111 = \frac{1}{9}$		1,2014
0,33	1,0928	1,0385	0,11		1,2028
0,32	1,0989	1,0432	$0,10 = \frac{1}{10}$		1,2133
0,31	1,1049	1,0481	$0,091 = \frac{1}{11}$		1,2229
0,30	1,1111	1,0533	0,09		1,2241
0,29	1,1173	1,0588	$0,0833 = \frac{1}{12}$		1,2314
$0,2887 = \frac{1}{2\sqrt{3}}$	1,1181	1,0593			
0,28	1,1235	1,0645			
0,27	1,1299	1,0703			
0,26	1,1363	1,0768			
$0,25 = \frac{1}{4}$	1,1428	1,0833			

Espesores en los riñones (1). — Asimismo, la fórmula más autorizada y reciente es la de M. Sejourné (*Grandes voûtes*, tomo III, página 344).

Sea e_1 el espesor en los riñones; e_0 el espesor en la clave, y λ un coeficiente:

$$e_1 = \lambda e_0$$

En las bóvedas de medio punto, en que los riñones coinciden con el radio del intradós, abierto 60° sobre la vertical: $\lambda = 2$.

Para las elipses se admite que la junta de rotura se encuentra, como en las bóvedas de medio punto, en los puntos del intradós correspondientes a la ordenada de la semiflecha.

Entonces: $\lambda = 1 + 2\sigma$ (siendo σ el rebajamiento): $\frac{\text{Flecha}}{\text{Luz}}$

En el medio punto: $\lambda = 2$.

Para las bóvedas escarzanas, cuando la junta de arranques tiene con la vertical un ángulo mayor de 60° , se toma como junta de rotura la que se encuentra a 60° de la vertical.

Este caso corresponde, pues, a un rebajamiento $\sigma > \frac{1}{2\sqrt{3}}$

Cuando el arco es bastante o muy rebajado $\left(\sigma < \frac{1}{2\sqrt{3}}\right)$,

la junta de rotura se confunde con la de arranques, y se establece:

$$\lambda = 1 + 12\sigma^2.$$

Trazado del trasdós. — Una vez determinados los espesores e_0 y e_1 en la clave y riñones, se traza el trasdós mediante una curva tangente a la horizontal en la clave y que pase por el extremo de la junta de rotura.

En bóvedas circulares o escarzanas, y aun en las elípticas, se

(1) Designase con el nombre de *riñones* de una bóveda las partes medias de ambos lados que coinciden aproximadamente con las juntas de rotura probables.

unen los puntos B_1 , B_0 y B'_1 por un arco de círculo completamente definido (fig. 170).

En grandes bóvedas, o cuando el intradós no tenga curva circular, deberá el trasdós trazarse con curvas semejantes a las del intradós, o, según una ley parabólica en función del desarrollo del arco de intradós, desde la clave (fig. 171).

Sea $AB = L$ la longitud del arco de intradós entre A y B , desarrollado sobre una línea recta; $AA' = e_0$, $BB' = e_1$ los espesores de la bóveda en A y B , calculados como se ha dicho anteriormente.



Fig. 171.

El espesor $ex = MM'$ correspondiente a la distancia l será:

$$e_x = e_0 + (e_1 - e_0) \left(\frac{l}{L} \right)^2 \quad (1).$$

A partir de los riñones y hacia los estribos el trasdós se traza generalmente con una recta tangente en los riñones a la curva antes definida.

Se prolonga esta tangente hasta su encuentro con el paramento interior del estribo (fig. 172).

Sobre las pilas se empalman las dos curvas de trasdós entre riñones por una curva cóncava (fig. 172 bis).

La fijación de las dimensiones según las fórmulas y reglas antes indicadas será suficiente, como hemos dicho, para los puentes inferiores a 25 metros de luz. Para los de mayor luz, aun inferiores a 40 metros, sobre todo si tienen sus tímpanos aligeramientos o dispo-

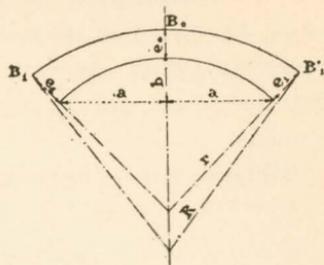


Fig. 170.

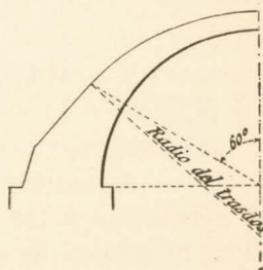


Fig. 172.

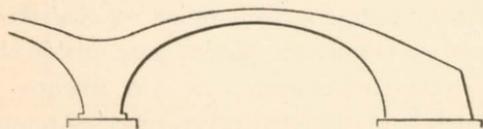


Fig. 172 bis.

(1) *Ponts en maçonnerie*, por Ferrieu y Norton, tomo II, pág. 60.

siones especiales en sus bóvedas, deberán comprobarse estática o elásticamente las dimensiones, para asegurarse de que la curva de presiones no salga del núcleo central, ni de que las presiones máximas excedan de las que pueden admitirse para los materiales que hayan de emplearse en la construcción de las bóvedas.

Téngase para ello en cuenta que esta comprobación sólo nece-

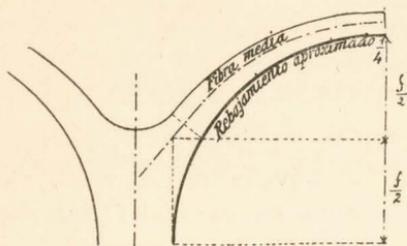


Fig. 173.

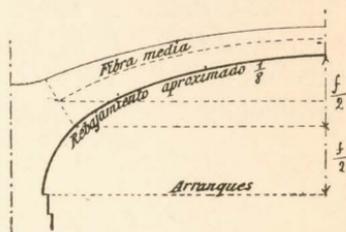


Fig. 174.

sita aplicarse a la zona de bóveda comprendida entre las juntas de rotura (figuras 173 y 174).

El resto de las bóvedas puede considerarse como formando parte de los estribos y pilas.

§ III. — MATERIALES, APAREJOS Y DESAGÜES

Materiales que se emplean. — La tradición atávica en las grandes obras de reducir el número de juntas condujo al empleo de enormes sillares. En el puente de Neuilly se llegó a 1,80 m. de tizón, 1,62 de ancho y 0,46 de espesor; cada piedra cubicaba 1,340 metros cúbicos, y pesaba 3.200 kilogramos.

Su manejo y asiento exigieron maniobras y cimbras costosas.

Hoy no se emplean estas dimensiones.

Si en las proximidades del puente, o, aún mejor, en los desmontes de la línea inmediatos, se encuentra piedra susceptible de una labra económica, ya sea mecánicamente, ya con buenos y abundantes canteros en la localidad, pueden proyectarse los puentes de sillería.

Todas las piedras son buenas para las bóvedas, con tal de no

ser heladizas y que su resistencia a la compresión sea de $1/4$, por lo menos, a la presión máxima que pueda sufrir.

En casi todo el centro de Francia existen numerosas canteras en bancos de piedra, que pueden serrarse como la madera, mientras contenga agua de cantera; hasta las casas de las aldeas están edificadas con esta sillería.

En España tenemos los granitos gallegos, de muy fácil labra, y las calizas alicantinas, que se cortan con sierra.

Pero aun las piedras más duras pueden labrarse mecánicamente, si el volumen de la obra permite hacerlo económicamente y... si las Sociedades obreras lo consienten.

Cuando no concurren estas favorables circunstancias, el empleo de la sillería se reserva hoy día para los paramentos vistos de los puentes de población.

Pero aun para las grandes bóvedas se ha extendido el empleo casi exclusivo del sillarejo, más fácil de manejar y más barato de labra.

El sillarejo tiene de 0,15 a 0,30 m. de grueso y de 0,30 a 0,70 de largo y tizón; sus volúmenes son de 0,02 a 0,06 m.³, con pesos de 50 a 150 kilos; son, pues, fáciles de manejo, y sólo exigen andamios y cimbras ligeras.

Resulta aún más económico de labra si las canteras dan bancos de aquellos gruesos.

Para el relleno de las bóvedas debe emplearse, a lo sumo, el sillarejo; pero más frecuente es la mampostería concertada o *rajuela* (1), que aún pueden tener menores dimensiones.

El mortero hidráulico lo permite sin inconveniente.

También puede emplearse el ladrillo, si es de muy buena calidad, y con este material se han construido en Inglaterra grandes bóvedas, y en España e Italia, muchos puentes.

Pero cuando el empleo de la piedra o ladrillo resulte caro, es preferible a todas luces construir las bóvedas con hormigón, cuyo empleo se va generalizando de día en día, y al que dedicamos el capítulo siguiente.

Aparejo de las bóvedas. — Llámase *aparejo* a la disposición de

(1) Llámase *rajuela* en algunas provincias del Norte de España, en Asturias por lo menos, a los mampuestos alechados procedentes de canteras en bancos delgados.

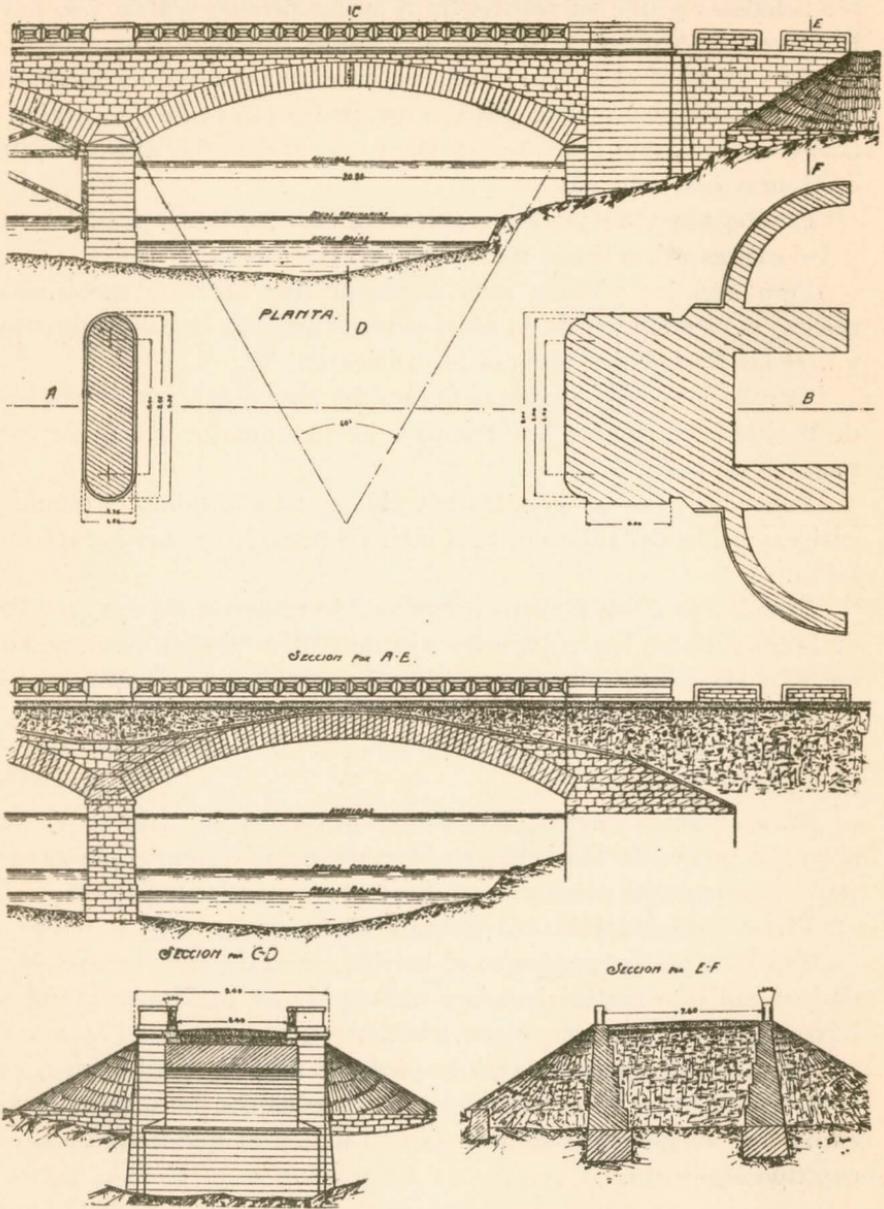


Fig. 175. Puente de Arriondas (Oviedo).

las piedras, sea en el interior, pero sobre todo en los paramentos vistos de las fábricas.

Así como en los grandes muros la verticalidad de las presiones aconseja el trazado horizontal de las hiladas, las bóvedas deben aparejarse por hiladas y juntas normales a la resultante de las reacciones que sobre ella se ejercen; es decir, que su inclinación debiera variar teóricamente con la de la curva de presiones.

Pero ésta varía algún tanto con las sobrecargas móviles y hasta con la temperatura, que en las grandes bóvedas ejerce efectos sensibles.

Hay, pues, que adoptar inclinaciones medias. En la práctica las juntas se disponen normalmente al intradós.

Durante casi todo el siglo pasado el tipo corriente de puente para carreteras era el representado por la figura 175 (1).

Toda la bóveda de sillería, así como los tajamares, ángulos de estribos e impostas, rellenos de mampostería, con mortero hidráulico en estribos y pilas, y con mezcla común en muros en vuelta y tímpanos.

El aparejo de las bóvedas era sencillo; con arcos de círculo rebajados al 1/10, y trasdosados paralelamente, las juntas eran los radios del arco.

Respecto al despiezo a lo largo de la hilada, tiene menos importancia, con tal de que las juntas verticales de las hiladas consecutivas se escalonen de 0,15 metros, como mínimo (figura 176).

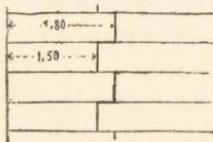


Fig. 176.

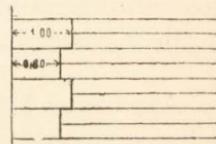


Fig. 177.

Pueden las hiladas subdividirse en el intradós y relleno (fig. 177).

En bóvedas de sillería, cada dovela debe tener todo el tizón correspondiente al espesor total de la bóveda.

Con el sillarejo no se precisa esta condición (fig. 178).

Cuando se emplean mamposterías concertadas o rajuelas, es preciso que sus lechos sean normales al intradós, y procurar también que sus juntas transversales se escalonen con las de las hiladas inmediatas.

(1) Carretera de Torrelavega a Oviedo, en Arriendas. Proyecto del Ingeniero D. José Villanova, inspeccionado por el autor en 1887 a 1889.

Respecto al aparejo de los ladrillos, se imitaban antes las reglas aplicadas al aparejo de las piedras (fig. 179). Pero en bóvedas grandes el grueso creciente de las juntas desde el intradós al trasdós tenía que compensar la igualdad de grueso de los ladrillos, lo que reducía la homogeneidad de la fábrica.

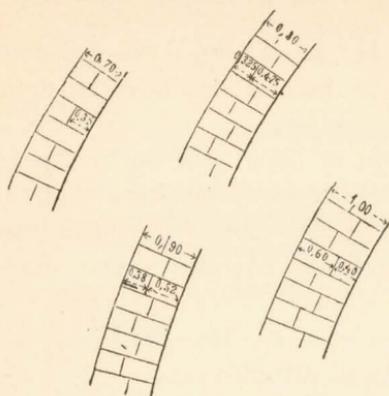


Fig. 178.

Hoy se aparejan por *roscas* (figura 180), lo que permite construir las bóvedas con cimbras más ligeras, pues la primer rosca sirve de cimbra a las sucesivas.

Este procedimiento de construcción por *roscas*, que no ofrece inconveniente merced al empleo de morteros hidráulicos, se ha

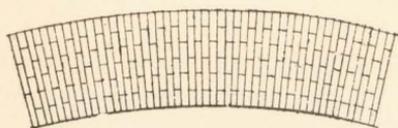


Fig. 179.

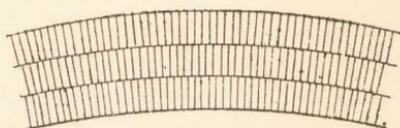


Fig. 180.

generalizado a las grandes bóvedas de sillarejo y de hormigón. según veremos más adelante y detallaremos en el tomo IV.

Aparejo en boquillas. — En las *boquillas*, es decir, en los sillares del paramento de frente, Perronet (que no establecía distinción decorativa entre la bóveda y su tímpano) disponía los sillares de la boquilla en el mismo plano que los de los tímpanos (figuras 153 y 181).

Pero ni se hace así, ni debe hacerse. Es caro, complicado y expuesto a desigualdades de asiento, porque bóveda y tímpanos trabajan muy distintamente.

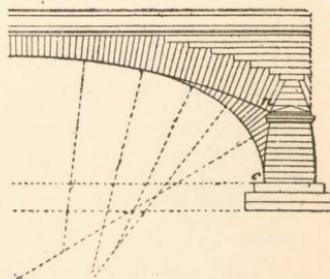


Fig. 181.

La boquilla debe, por el contrario, por ser el elemento resistente

y principal, sobresalir de 3 a 5 cm. sobre el plano del tímpano; debe también construirse con material mejor, y hasta conviene emplear en uno y otro elemento piedras de color diferente.

En arcos de medio punto y circulares, y hasta 30 m. de luz, pueden las boquillas aparejarse con sillares iguales, aparentando un trasdós paralelo del intradós (figuras 175 y 182); en el cuerpo de la bóveda se da a ésta los espesores que necesita. Es una facilidad para la labra; una economía, por tanto.

Cuando las bóvedas son elípticas, y siempre cuando exceden de 30 m., hay que resignarse, para su mejor aspecto, a despiezar las boquillas

con arreglo a sus espesores crecientes (fig. 183), o por lo menos desde los riñones a los arranques.

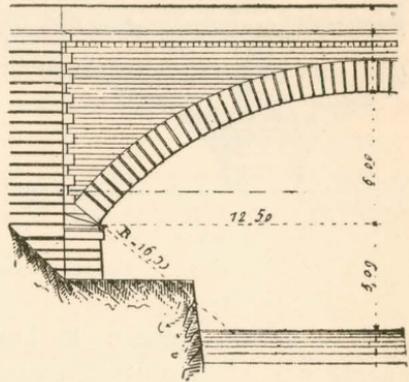


Fig. 182.

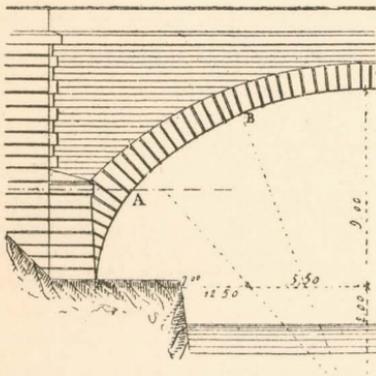


Fig. 183.

Capialzados.—Para mejorar el aspecto de las grandes bóvedas del puente de Neuilly (1), Perronnet imaginó chaflanar sus arranques con unos capialzados, cuya forma en Estereotomía se designa con el nombre de cuerno de vaca (fig. 181).

En el puente del Alma, en París, se imitó este artificio constructivo (figuras 184 y 185).

Resultan en las bocas de los arcos unos chaflanes alabeados, cuyas directrices son: el arco carpanel o elíptico de la sección normal de la bóveda y el arco escarzano trazado en los paramentos de frentes.

(1) Véase su fotografía en el tomo I, pág. 129.

Pero el aparejo y despiezos de estos capialzados tienen que ser complicadísimos; la labra de sus piezas, delicada y cara, así como las cimbras de los frentes.

Pretenden algunos autores que así se reduce la contracción

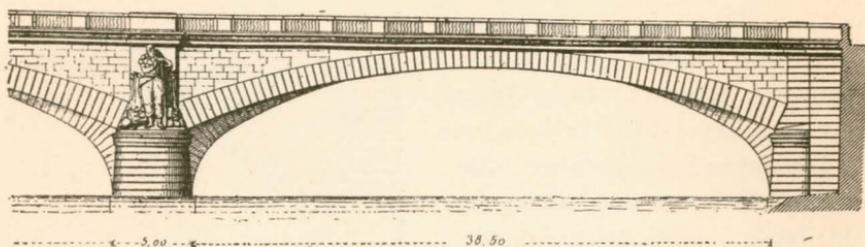


Fig. 184. Puente del Alma (París).

de la corriente, lo que no ha impedido que los tres arcos del citado puente del Alma quedasen casi totalmente anegados por la crecida de 1910.

¿No se hubiera facilitado más el desagüe construyendo este puente con los arcos escarzanos que aparecen en el frente? Así quedaba, además, suprimido el costoso artificio de aquellos capialzados.

Es un prurito de buscarse dificultades inútiles, que hoy día ha caído en desuso, por lo que nos abstenemos de repetir aquí sus detalles (1).

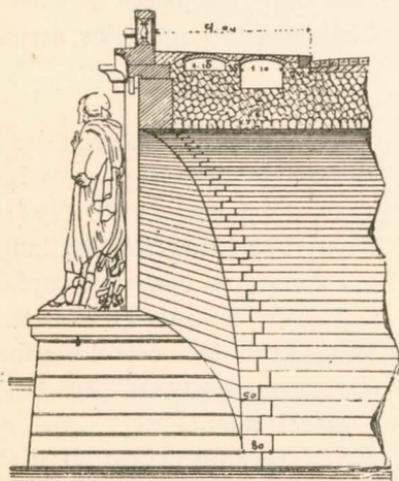


Fig. 185.

Hasta principios del siglo XIX se utilizaron morteros de cal grasa, que pueden tardar años en endurecer; se contaba con los

Morteros.—Los Romanos no los empleaban en sus puentes y acueductos monumentales. Confiaban la estabilidad al aparejo y a la labra de sus dovelas.

(1) Pueden leerse en el Gay: *Ponts en maçonnerie*, pág. 347.

asientos de las bóvedas, que en el puente de Neuilly, de Perronet, llegaron a ser de 0,77 m.

Hoy sólo se emplean morteros hidráulicos con buenas arenas (1).

Las dosificaciones del cemento portland, que es el aglomerante preferible, varían según las luces y presiones: entre 200 y 500 kilos por metro cúbico de arena.

Sería absurdo emplear morteros más duros que las piedras o ladrillos; debe tenderse a que las resistencias sean iguales; así se obtienen fábricas homogéneas.

Conviene advertir también que el mortero en juntas resiste compresiones de dos a cuatro veces mayores que en los cubos del laboratorio (2).

Fábricas mixtas. — Ya señalamos en el tomo I (pág. 32) los inconvenientes de las fábricas mixtas, por la desigualdad de los asientos.

En bóvedas se exageran más, sobre todo con mortero de cal, pues llegan a despegarse unas fábricas de otras.

En el puente sobre el Manzanares llamado de los Franceses (figura 186), de la línea del Norte, cuyas boquillas son de sillería y el resto de las bóvedas oblicuas, de ladrillo, con mortero de cal, hubo recientemente que sustituir esta fábrica por hormigón hidráulico, con gran entorpecimiento del paso de los trenes, a pesar de ser el puente de doble vía, lo que facilita singularmente la reconstrucción.

Pero con buenos morteros de cemento aquellos inconvenientes desaparecen, pues que

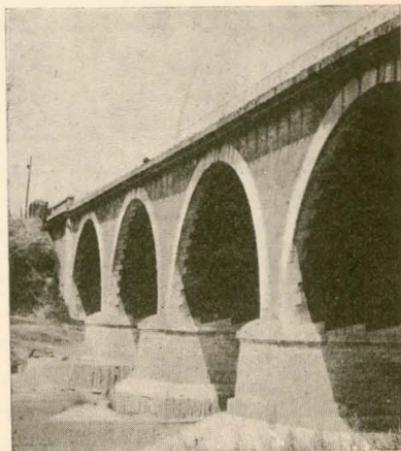


Fig. 186. Puente sobre el Manzanares.

(1) Recuérdese lo que sobre las arenas dijimos en el tomo I, pág. 38. Tratándose de bóvedas, es aún más obligatorio su buena calidad.

(2) Sejourné: *Grandes voûtes*, tomo V, pág. 13.

el fraguado simultáneo de todas las juntas mantiene la homogeneidad del conjunto de fábricas.

Así que es de uso corriente, en Francia sobre todo, constituir las bóvedas de los puentes pequeños con fábricas diferentes, no sólo entre paramentos y dovelaje interior, sino en la sección transversal de las bóvedas.

Las figuras 187 y 188 representan la descomposición de las

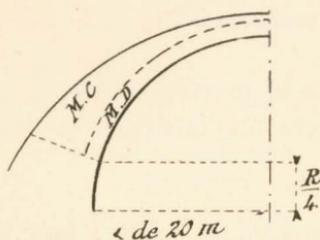


Fig. 187.

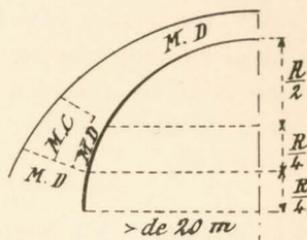


Fig. 188.

fábricas que suelen emplearse para bóvedas de medio punto de luces inferiores o superiores a 20 metros; designamos, respectivamente, en estos croquis con *MO*, *MC* y *MD* las mamposterías ordinarias, careadas y las concertadas en forma de dovela.

Como se ve, a medida que las luces aumentan es preciso mejorar la mano de obra de los mampuestos, preparándolos por lechos paralelos, que se han de colocar normalmente a las presiones; desde 30 m. de luz en adelante, en bóvedas de medio punto, y desde 12 metros de luz, en arcos rebajados o elípticos, debe asegurarse la homogeneidad perfecta de las bóvedas, uniformando sus mampuestos, que deben prepararse todos con lechos paralelos; hasta recomienda Sejourné (1) que se traben con algunas adarajas de sillería (fig. 189) en todo el ancho de la bóveda.

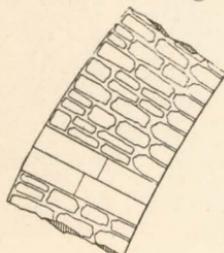


Fig. 189.

En España no solemos extremar tanto la subdivisión de las fábricas; reservamos para las boquillas el material de elección; todo el relleno de bóvedas entre boquillas se ejecuta con igual material, y si la piedra no se presta

(1) *Grandes voûtes*, tomo V, pág. 19.

a ser económicamente preparada en forma de mampostería adovelada, preferimos construirlas con hormigón en masa, según veremos en el capítulo siguiente.

En resumen, en puentes de más de 25 m. de luz es más seguro uniformar las clases de fábrica, y a partir de 40 metros, es indispensable.

Lo que, en cambio, debe hacerse, sin inconveniente alguno, es emplear fábricas más económicas y morteros más pobres en los apoyos y en la zona de las bóvedas inferior a las juntas de rotura, en la que se amplían las secciones normales.

Contrarrosclas y desagües (1). — Como las dovelas (sillares o mampuestos) que constituyen las bóvedas no se labran ni des-



Fig. 190.

bastan sino en las partes próximas al intradós, aparecen en el trasdós con mucha irregularidad de tizones (fig. 190).

Para evitar que las aguas filtradas al través del terraplén se estanquen en aquellos huecos y lleguen a acumularse, es necesario

(1) En el tomo I, pág. 204 expusimos la conveniencia de su supresión en las obras pequeñas.

regularizar el trasdós por medio de una capa impermeable, que se llama *chapa* o *contrarrosca*, sobre la que el agua puede correr hacia unos desagües o mechinales.

Muchos Ingenieros han dado una gran importancia a estas defensas contra las filtraciones, y tenían razón, cuando los morteros eran de cal, pues el agua los disolvía y arrastraba a través de las juntas.

Hoy, con los morteros hidráulicos, no pueden ser éstos arrastrados; los huecos de las juntas se colmatan pronto, y, en último caso, si subsisten algunas goteras a través de la bóveda, en nada se perjudica ésta.

Pero no conviene que las aguas se estanquen y acumulen debajo del terraplén.

Basta, para evitarlo, rellenar los huecos del intradós con hormigón fino de 250 kg. bien apisonado.

El grueso de esta capa sólo debe ser el necesario para obtener la continuidad de pendientes hacia los mechinales de desagüe.

En puentes de un solo arco se dejan correr las aguas hacia el estribo, en cuyo paramento interior se dispone un dren de piedra en seco que desagua por mechinales a través del estribo.

Estos mechinales tendrán de 4 a 6 cm. de ancho por unos 10 centímetros de altura. Para que no se obstruyan, hay que recubrir su entrada con drenes de piedra más gruesas que el orificio.

Cuando los puentes son de varios arcos, los mechinales se dis-

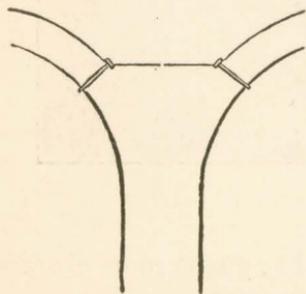


Fig. 191.

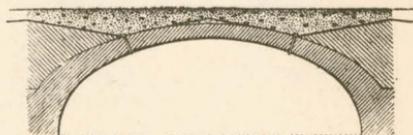


Fig. 192.

ponen en los riñones como en la figura 191, siempre recubiertos con un cono de grava gruesa.

Nos parece cara y excesiva la disposición de la figura 192, empleada algunas veces, rellenando los riñones con hormigón pobre.

Aún es peor la de la figura 193, preconizada por Morandièrè,

pues el mechnal se obstruirá al menor descuido; no ha sido imitada después.

Tampoco, en España al menos, son necesarias las *chapas* de

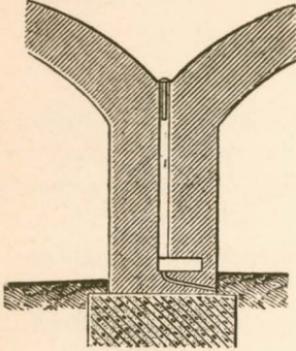


Fig. 193.

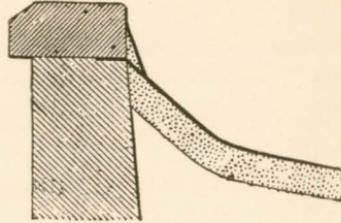


Fig. 194.

asfalto con que en el extranjero suelen recubrirse las contrarrosas de hormigón, y que se enlazan cuidadosamente con los muros de los tímpanos, para que las filtraciones no atraviesen éstos (fig. 194).

Como hemos demostrado, el desagüe del trasdós de las bóvedas es un problema de drenaje, y no de impermeabilidad.