"El puente sobre el río Guadalhorce, en Pizarra, Málaga"

César Villalba Granda

Revista de Obras Públicas vol.84, nº2.693, mayo de 1936, pp. 185-190; vol.84, nº2.694, junio de 1936, pp. 207-211; vol.84, nº2.695, julio de 1936, pp. 225-229

Año LXXXIV. - Núm. 2 693 • Revista de Obras Públicas • 15 de mayo de 1936



Fot. 1.ª — Vista general.

El puente sobre el río Guadalhorce, en Pizarra, Málaga

En el pasado mes de octubre ha sido recibido definitivamente el puente que vamos a describir, y que presenta, entre otras particularidades, el interés de que empleamos el método de Freyssinet para el descimbramiento y corrección mediante la actuación de gatos hidráulicos en el arco.

Adjudicada en agosto de 1926 a una Sociedad metalúrgica la construcción de un tramo metálico sobre el río Guadalhorce, en el trozo tercero de la sección tercera de la carretera de la de Cádiz a Málaga a la de Málaga a Alora, y rescindida la contrata en marzo de 1929, fué redactado por el que fué nuestro compañero Francisco Martín Gil, el nuevo proyecto de puente. Comenzada la construcción bajo su dirección, fué seguida, a la muerte de este malogrado ingeniero, por el Sr. Alvarez Valdés, y terminada por el que suscribe. Por lo que se refiere a las operaciones de descimbramiento y corrección, parte la más interesante de la construcción, también fueron realizadas bajo mi dirección, por encargo expreso de la Superioridad.

Dividiremos este trabajo en tres partes. La primera, destinada a la descripción general de la obra. La segunda, al cálculo definitivo del descimbramiento y corrección, y la tercera, a la construcción, y en particular, a la aplicación del método citado.

I. — Descripción general.

Está situado el puente en el pintoresco pueblo de Pizarra, a 30 km. de Málaga y sesenta metros, aguas abajo, del puente del ferrocarril de Córdoba a Málaga, desde el cual fácilmente puede verse en toda su magnitud. (Fotografías números 1 y 2.)

La obra construída tiene dos partes esencialmente distintas: una, para completar la zona perteneciente a los trabajos anteriores de la contrata rescindida, y otra, el tramo en arco central.

Consistió la primera en completar las pilastras que terminaban los muros de acompañamiento y prolongar en diez metros el estribo de la margen izquierda, constituyendo una pilastra de 3,00 m. análoga a la construída anteriormente, para formar entre ambas un estribo aligerado desde el nivel del trasdós del arco principal, mediante tabiques de 0,50 m. de espesor, separados 2,00 m. entre paramentos contiguos. Estos tabiques sostienen una losa armada de 0,20 m. de



Fot. 2.ª — Otra vista del puente.



Fot. 3.ª — Detalle del estribo.



Fot. 4.ª — Construcción del estribo.



Fot. 5.ª — Detalle de los tabiques del estribo.

grueso, cuyos frentes quedan cubiertos por arcos escarzanos de sillería que ornamentan la pilastra. Los tabiques, de hormigón de 300 kg., van armados con barras verticales en número de siete barras de 8 mm. en cada plano y horizontales de igual diámetro, cada 0,50 m. Transversalmente tienen estos tabiques 2,00 metros, enlazándose con el correlativo del otro paramento en la parte superior mediante arcos de medio punto. El hormigón de las pilastras es de 150 kg. con paramentos de mampostería careada y zócalos e impostas de sillería. (Fotografías números 3, 4 y 5.)

El terreno de cimentación lo constituye un conglomerado eoceno, encontrándose este terreno firme, a la vista, en la ladera de la margen derecha, y a tres m. bajo el estiaje en la zona correspondiente a la pilastra de la otra margen, cubiertos por acarreos y arcillas del terciario, en las cuales están cimentados los muros de acompañamiento que ya estaban construídos. La cimentación en esta zona se ha efectuado mediante agotamientos en recintos entibados; en la margen derecha ya estaba ejecutada la cimentación, habiéndolo sido por apertura directa de la zanja.

Las zonas construídas durante la contrata rescindida, antes de la redacción del nuevo proyecto, que antes mencionamos, consistían en los muros de acceso en ambas márgenes, presentando el de la margen izquierda una obra de desagüe para una acequia, y en el de la derecha un paso infe-

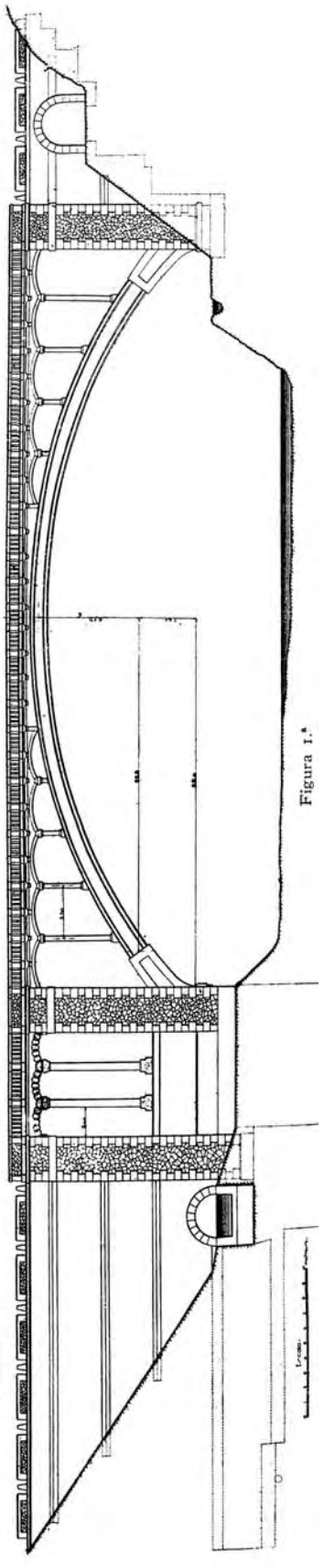


Figura 1.ª

rior. Estos muros son de mampostería, interrumpida por hiladas de sillería.

Pasando ya a la descripción de la otra parte de la obra (figura número 1), que es la esencial, el vano principal, de 50 m., se salva mediante dos salmeres que vuelan 2,50 m. por cada lado y el arco propiamente dicho, de 45 m. de luz y 6,75 m. de flecha. El arranque del arco está a la misma altura en los estribos. Constituyen el arco dos bóvedas gemelas de hormigón en masa, de 1,50 m. de ancho constante cada una.

Los salmeres, para cada extremo de una bóveda gemela, tienen 1,70 m. de ancho y van armados longitudinalmente con diez barras de 14 mm. contorneando el salmer y empotrándose en el cuerpo de la pilastra, y transversalmente con diez cercos de 10 mm.

El arranque del salmer en la pilastra se efectúa mediante una losa que, como el mismo salmer, es de hormigón de 300 kg.

Las bóvedas gemelas que constituyen el arco central tienen un espesor en la clave de 1,25 m., aumentando hacia arranques según la ley de proyección constante sobre la vertical de clave, alcanzando 1,51 metros en arranques. La separación entre paramentos interiores de bóvedas es de 2,00 m. y la fibra media



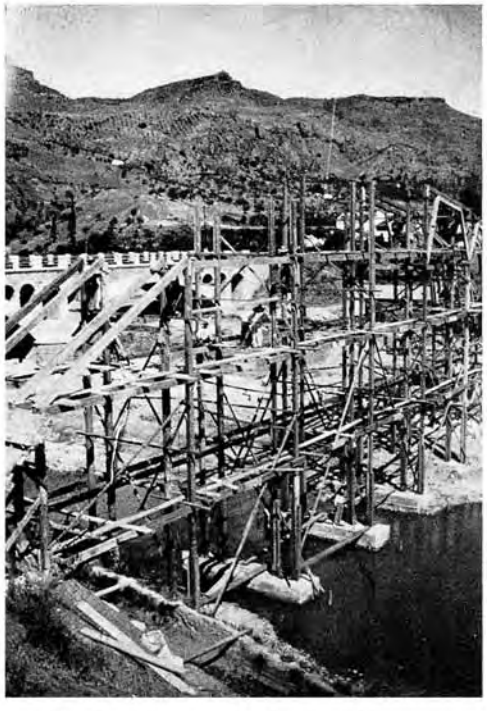
Fot. 7.ª — Vista general de la cimbra.

es la parábola de cuarto grado que resulta de adoptar en la ecuación general

$$Y = \frac{8f}{p+5}[(p+e)\,X - 3\,p\,X^2 + 4\,(p-1)\,X^3 - 2\,(p-1)\,X^4]$$

el parámetro $p = 2$, o sea

$$Y = \frac{16f}{7}\,(2\,X - 3\,X^2 + 2\,X^3 - X^4)$$



Fot. 6.ª — Construcción de la cimbra.



Fot. 8.ª — Montantes y arriostramientos de la cimbra.



Fot. 9.ª — Construcción de arcos y montantes.

con lo cual se consigue obtener una fibra media que presenta variaciones máximas menores de 5 cm. de la funicular de cargas. (Fotografías números 6, 7 y 8.)

El hormigón del arco corresponde a 300 kg. de cemento.

En las bóvedas gemelas insisten los tabiques sustentadores del tablero, separados longitudinalmente 3,50 m. entre ejes. Dichos tabiques, de espesores variables, según su altura: 0,30 m., los dos más inmediatos a la clave, 0,35 m. el siguiente y 0,40 m. el más alto, que tiene 4,57 m. de altura. La longitud es, en todos ellos, de 1,00 m., ensanchándose en el apoyo en el arco y en el encuentro con el tablero. Van armados con 12 barras de 10 mm. en cada frente y cercos de 5 mm. cada 0,20 m. En los dos tabiques más altos, las armaduras longitudinales presentan una inflexión a 1/3 de la altura, a contar desde la base. (Fotografías números 9 y 10.)

El tablero está constituído por dos largueros de 1,43 m. de ancho y altura variable para constituir la silueta en arcos escarzanos de 3 m. de cuerda y 0,40 metros de flecha. Van armados con doce barras de 16 mm. y su altura mínima es de 0,50 metros, incluso forjado. (Fotografía número 11.) Este, en la parte entre tabiques, tiene 0,18 m. de espesor y 2 m. de luz libre, armado con diez barras de 12 mm. por metro. (Figura número 2.)

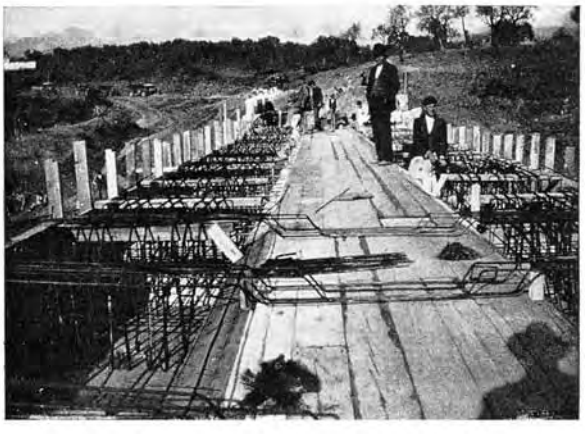
El presupuesto de la obra asciende a 156 409,92 pesetas el de ejecución material, y a 184 011,67 pesetas el de contrata, resultando una obra sumamente económica merced al empleo de una bóveda de hormigón en masa con dimensiones análogas a una armada, a causa del método de descimbramiento y corrección aplicado.

Descrita la obra en su conjunto, vamos a detallar lo referente al arco y la aplicación al mismo del método de Freyssinet, que es lo más interesante de esta obra, como dijimos al principio.

Las variaciones longitudinales adquieren gran importancia en las bóvedas de hormigón; la época de construcción de la bóveda suele ser en verano, es decir, a mayor temperatura que la media; de aquí un esfuerzo que debe ser tenido en cuenta, pero sobre todo el considerable de la retracción por el fraguado con grandes esfuerzos que no existían en las antiguas bóvedas con mortero poco o nada hidráulico y existe, pero aminorado, en los arcos de sillería, sillarejo o mampostería, por el pequeño volumen de mortero, por la lentitud de la construcción y aun con ello, sistemáticamente se adopta ya en estas fábricas un sistema de clavados múltiples o juntas retacadas, que produciendo sensibles presiones suplementarias, corrigen en parte aquel efecto. Pero en las bóvedas de hormigón esto no basta, pues siendo las presiones creadas por el recatado de las juntas de 10 a 15 kg./cm.², y la retracción de 0,0004 para dosificaciones de 300 a 350 kg. de cemento, se comprende que no es posible



Fot. 10. — Detalle del arco con los montantes.



Fot. 11. — Construcción del tablero: armaduras del forjado y los largueros.

anular el efecto de retracción ni en parte importante, y esto obliga a pensar en otros medios. Articular las bóvedas es un procedimiento radical, bien empleando articulaciones permanentes o provisionales.

Las primeras, frecuentemente empleadas en Alemania, tienen las ventajas e inconvenientes bien conocidos que Sejourné cita en su obra clásica de *Grandes bóvedas*.

Más racional es el articular las bóvedas temporalmente para cargas escogidas de antemano, descentrando las articulaciones en clave y arranques la cantidad precisa para que la retracción subsiguiente o cargas restantes centren la línea de presiones de modo perfecto para condiciones medias de temperatura y sobrecargas; cerradas las articulaciones en época oportuna, se tiene así una bóveda empotrada, en la que la línea de presiones se desvía de la fibra media solamente por efecto de las cargas móviles y de la temperatura, la cual no cuenta más que por su oscilación respecto a la media anual. Así, descentrando las articulaciones, se han construído, entre otros, los puentes de Warrington y Pandy (Inglaterra), Annet y Trilbardou (Francia), etc.

Aminorados los inconvenientes del otro género de articulaciones, son, desde luego, una complicación en la construcción, por exigir una cuidadosa colocación y no ser posible rectificación alguna después de colocadas.

Resuelve el problema el método de Freyssinet, creando una reacción suplementaria que compense todos aquellos efectos parásitos, mediante la formación de una junta real en la clave durante la construcción, en cuya junta actúan los gatos hidráulicos que abren el arco, despegándole de la cimbra e introduciendo en la junta una placa de material y espesor adecuados y volviendo a cerrar la bóveda sobre la placa.

No vamos a describir aquí con detalle este procedimiento de Freyssinet, sobradamente conocido, remitiéndonos, por otra parte y de modo especial, a los artículos que el propio autor del sistema ha publicado en *Le Genie Civil*, con motivo de la construcción del puente de Villeneuve-Sur-Lot (Lot y Garona), titulados "Progresos en la construcción de las grandes bóvedas" (Loc. cit. vol. LXXLX, números 5, 6, 7, segundo semestre; 30 de julio de 1921, 6 de agosto de 1921 y 13 de agosto de 1921), pero sí daremos algunas explicaciones complementarias para su aplicación al caso de este puente.

Las ventajas del sistema Freyssinet son importantes; la línea de presiones pasa en la clave por un punto previamente elegido, determinado por el centro de gravedad de las fuerzas que actúan sobre los aparatos, y en los arranques se modifica arbitrariamente también la línea de presiones, según la mayor o menor intensidad con que los gatos trabajen; para colocarlos podemos disponer libremente de su punto de aplicación y de la intensidad aplicable y, por lo tanto, podemos fijarla en clave y arranque, donde más convenga. Estos puntos serán los que hagan que las cargas parásitas posteriores los desvíen hasta que queden perfectamente centrados. Así que, calculados los efectos de estas cargas, se sabrán los puntos por donde debe pasar la línea de presiones.

Tal estudio, aplicado al proyecto presente, lo indicamos en la segunda parte de este trabajo.

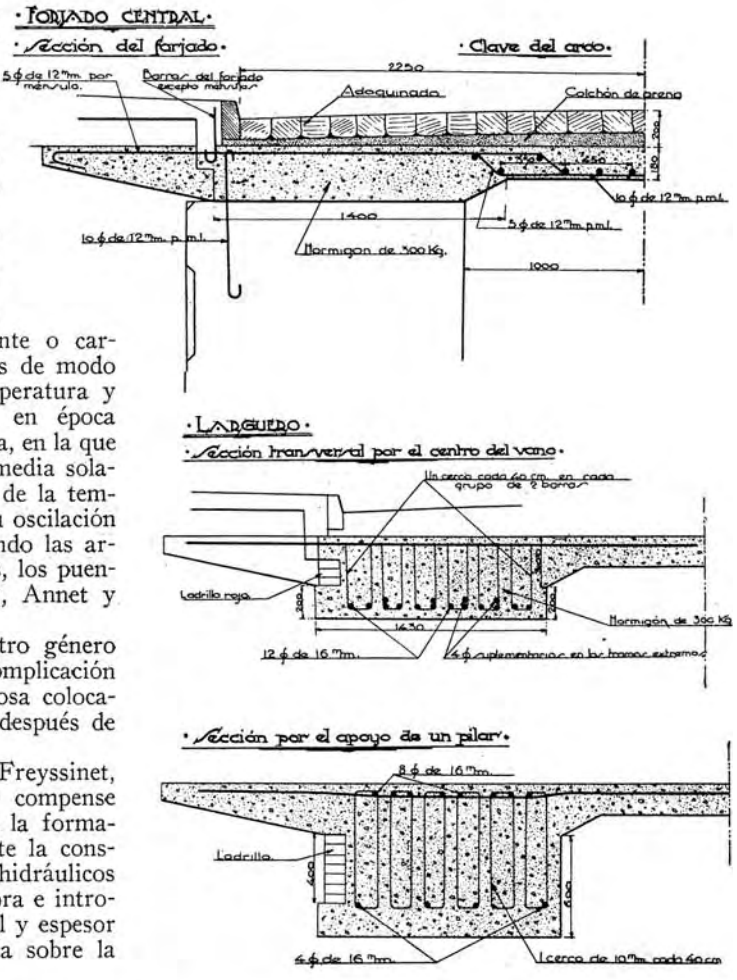


Figura 2.ª

La otra ventaja inmensa es que se descimbra suavemente, sin trepidaciones ni choques de la cimbra, de modo igual, con la lentitud o rapidez deseada, manejando solamente con uno o dos operadores las bombas de mano en virtud de las órdenes que procedan, según las indicaciones de los aparatos instalados para vigilar la operación, admitiendo las correcciones que convengan y pudiendo volver al estado primitivo, en definitiva, dando una libertad de actuación y una sencillez incomparablemente mayor que en todos los demás procedimientos.

Presenta además las ventajas de la posibilidad de corregir o iniciar, según se desee, un pandeo, rehaciendo o rectificando la operación cuando convenga; ventajas considerables ambas en los arcos estrechos de hormigón, aceptables porque se ahorra fábrica y peso sobre la cimbra, logrando mayor rapidez en la construcción del elemento más delicado, que es el arco. Pero esto lleva consigo, si se extrema la reducción de ancho, que el arco peligre por pandeo, bien por causa del viento o por defectos inevitables de construcción; el viento no produce efecto apreciable, pero un asiento en la cimbra, falta de homogeneidad en la construcción por alguna circunstancia imprevista, hará que antes de ponerse en carga, o durante ésta, la fibra media del arco no esté rigurosamente en

el plano vertical que pasa por los centros de los salmeres, produciéndose con ello el peligro citado. Este procedimiento, al poder aplicar mayor presión a los gatos de un lado que a los opuestos, puede originar una fuerza que se oponga al pandeo y hacer que el arco cierre sobre una placa de espesores desiguales en la razón que convenga. Así se aplicó en el arco de 96 m. de luz del puente de Villeneuve, antes citado.

Reconocida la importancia de la retracción del fraguado, aunque se hagan ensayos previos, nunca se obtiene el verdadero valor que alcanza en el arco, entre otras razones, porque las condiciones del ensayo en lo que a condiciones térmicas, higroscópicas, tamaño, construcción, etc., nunca pueden ser idénticas a las propias del arco, por lo cual, al efectuar la corrección con un valor inexacto, pueden producirse grietas al cabo de uno o más años, que advierten lo incierto de la corrección; puede ser también, en vez de la retracción del fraguado, o coexistiendo con ella, un asiento en los estribos el que origine el defecto de estabilidad, lo cual se corregirá abriendo nuevamente la clave del arco y cerrándolo sobre una placa de espesor adecuado, según se ha efectuado en el puente del Veurdre con un arco de hormigón armado de 72 m. de luz, rebajado a 1/14, a lo que obligó una retracción del fraguado mayor de la prevista.

Con este procedimiento se ha construído también otro puente igual al de Veudre, al de Villeneuve, con arco de 96 m. de luz,; el de Saint Pierre de Vauvray, de 130 m. de luz, en la época de la iniciación del método, y recientemente en el arco de 161 m. sobre el Sena en La Roche Guyon, el de Castelmoron, de 143 metros, etc.

Merced al centrado, prácticamente perfecto, de la línea de presiones, las correcciones fáciles y posibles y la suavidad de descimbramiento y de poner en carga, asegura Freyssinet la posibilidad de construir bóvedas de hormigón en masa de 350 m. de luz, y de hormigón armado de más de 700. Ejemplo patente y en gran escala de aplicación de este método ha de ser para nosotros su empleo al arco de 205 m. de luz del viaducto sobre el Esla.

Indicadas las ventajas del método, expondremos en la segunda parte la obtención de los valores numéricos que para su aplicación realizamos en este caso concreto, en virtud de los datos proporcionados por la experiencia, ya que en cada caso deben obtenerse directamente los datos precisos de retracción y elasticidad con los materiales peculiares de cada obra, durante la construcción de ésta, y con ellos efectuar el cálculo.

César VILLALBA GRANDA,
Ingeniero de Caminos.

El puente sobre el río Guadalhorce, en Pizarra, Málaga[1]

II. — CÁLCULO DEL DESCIMBRAMIENTO Y CORRECCIÓN.

Calculado el arco por cualquiera de los métodos usuales, en este caso lo fué por medio de las líneas de influencia y fórmulas derivadas del trabajo elástico, para el efecto del peso propio, cargas permanentes y sobrecargas, estudiamos las variaciones longitudinales.

Resultó de los ensayos verificados con el material empleado en el arco, un coeficiente de elasticidad próximamente de 2×10^9 kg./m.^{2}, esto es, algo más elevado del preconizado por Zafra, pero de acuerdo con el tenido en cuenta en los grandes puentes modernos de hormigón, sin llegar a las cifras, tal vez exageradas, dadas por Gay. Y para retracción del fraguado, dada la época en que se verificó el descimbramiento, y teniendo en cuenta la curva de retracción deducida también experimentalmente, se adoptaron los 3/4 de la retracción total, 0,0003, es decir, 0,00025.

Por último, si bien estos valores aun obtenidos directamente en ensayos verificados sobre muestras de hormigón tomadas en obra, siempre diferirán de los efectivos, según hemos dicho, el cálculo que vamos a exponer no es, por consiguiente, más que una norma a seguir, modificable según los resultados de las pruebas en obra, en el instante del descimbramiento, ya que el procedimiento de construcción facilita estas correcciones, para lo cual se dispone de los aparatos para ello precisos, según más adelante diremos.

En esta forma, los momentos flectores y esfuerzos normales debidos a la retracción del fraguado, son:

Secciones.	Momentos flectores. — *Tnm.*	Esfuerzos normales. — *Tn.*
0,0 (arranques)	— 140,84	— 25,10
0,1	— 60,23	— 27,20
0,2	— 2,74	— 28,75
0,3	35,59	— 29,72
0,4	37,49	— 30,18
0,5 (clave)	64,49	— 30,42

En la época en que se verificó el descimbramiento, la temperatura era de unos 10° sobre la media, y así se supuso, y la oscilación de temperatura se supuso también de 10°; cada uno de cuyos efectos supone una variación longitudinal de 0,00012; mitad muy próximamente de los anteriores.

Tenemos por consiguiente:

Variación por retracción.	0,00025
" por exceso de temperatura . .	0,00012
SUMA	0,00037

Contracción total:

$$2 \times 0{,}00037 \times 23750 = 18{,}00 \text{ mm.}$$

Evaluadas las cargas móviles, en definitiva, los máximos momentos totales y esfuerzos normales correspondientes obtenidos, son:

[1] Véase el número anterior, página 185.

Máximos momentos positivos totales y esfuerzos normales correspondientes.

		Cargas fijas.	Contracción o dilatación.	Exceso de temperatura.	Retracción.	Cargas móviles.	Totales.
Arranques.	M	— 8,26	70,4	— 70,4	— 140,8	72,0	— 77,1
	N	442,00	12,5	— 12,5	— 25,1	52,8	470,7
0,1.	M	— 31,93	30,1	— 30,1	— 60,2	17,9	— 74,2
	N	402,00	13,6	— 13,6	— 27,2	32,7	407,5
0,2.	M	— 31,06	1,3	— 1,3	— 2,7	34,4	0,6
	N	388,60	14,3	— 14,3	— 28,7	15,8	375,7
0,3.	M	— 6,36	17,7	— 17,7	35,6	44,6	109,2
	N	377,50	— 14,8	— 14,8	— 29,7	24,6	342,7
0,4.	M	30,10	28,7	28,7	37,5	39,2	184,3
	N	367,20	— 15,0	— 15,0	— 30,2	37,0	342,0
Clave.	M	32,86	32,2	32,2	64,5	30,3	191,10
	N	366,50	— 15,2	— 15,2	— 30,4	38,9	344,6

M, en tonelámetros. N, en toneladas.

Máximos esfuerzos negativos y totales y esfuerzos normales correspondientes.

		Cargas fijas.	Contracción o dilatación.	Exceso de temperatura.	Retracción.	Cargas móviles.	Totales.
Arranques.	M	— 8,26	—70,4	—70,4	—140,8	— 67,8	— 357,7
	N	442,00	— 12,5	— 12,5	— 25,0	32,3	424,3
0,1.	M	31,93	— 30,1	— 30,1	— 60,2	— 15,4	— 167,7
	N	402,00	— 13,6	— 13,6	— 27,2	59,7	407,9
0,2.	M	31,06	— 1,3	— 1,3	— 2,7	— 36,6	— 72,9
	N	388,60	— 14,3	— 14,3	— 28,7	66,0	397,4
0,3.	M	— 6,36	— 17,7	17,7	35,6	— 40,8	11,6
	N	377,50	14,8	— 14,8	— 29,7	44,9	392,8
0,4.	M	30,10	— 28,7	28,7	57,5	— 24,2	63,4
	N	367,20	15,0	— 15,0	— 30,2	44,2	361,4
Clave.	M	32,86	— 32,2	32,2	64,5	— 17,3	80,1
	N	366,50	15,2	— 15,2	— 30,4	30,9	367,0

M, en tonelámetros. N, en toneladas.

Vemos en estos cuadros los enormes descentramientos de las líneas de presiones que originan esfuerzos inadmisibles, especialmente en los arranques y sección a 0,1 de la luz, por lo cual no hay más recurso que corregir estos defectos, en lo posible.

Siendo los datos de las secciones los siguientes:

Secciones.	Juntas. *m.*	Areas. *m.²*	Momento de inercia. *m.⁴*
Arranques.	1,51	2,26	0,421
0,1	1,40	2,10	0,342
0,2	1,32	1,98	0,300
0,3	1,28	1,92	0,262
0,4	1,26	1,89	0,250
Clave.	1,25	1,87	0,244

Mediante los elementos consignados, y acudiendo a las fórmulas de carga descentrada, puede formarse el resumen que a continuación se inserta, análogo al dado por Freyssinet *(Genie Civil,* 13 agosto 1921), que pone de manifiesto las cargas resultantes. En él agrupamos las cargas fijas, que son: el peso propio, el acortamiento elástico, la retracción por fraguado y el exceso de temperatura al cerrar el arco, sobre la media. Sumadas las cargas de trabajo se obtienen, no solamente cargas de compresión elevadas, sino cargas de tensión verdaderamente importantes, siendo las variaciones longitudinales las que producen tan perjudiciales efectos.

En cuanto al efecto de las sobrecargas, es de secundaria importancia.

FATIGAS POR LAS CARGAS

	ARRANQUES		CLAVE	
	Intradós.	Trasdós.	Intradós	Trasdós.
PESO PROPIO:	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*
Presión normal. . .	19,6	19,6	19,5	19,5
Flexión residual . .	1,5	— 1,5	— 8,1	8,1
Acortamiento elástico				
Retracción del fraguado.				
Exceso de temperatura.	8,1	— 8,9	— 6,1	5,1
Suman las cargas fijas.	23,5	—25,8	— 17,7	14,5
	11,7	—12,9	— 8,8	7,2
CARGAS MÓVILES:				
Momentos positivos.	—9,5	15,4	— 5,6	9,8
Momentos negativos.	13,4	—10,6	6,0	—2,8
TEMPERATURA:				
Dilatación en arranques	—11,7	12,9	— 8,8	7,2
Dilatación en clave.	11,7	—12,9	8,8	—7,2
Sumas de cargas variables. . . .	—21,2	28,0	— 14,4	17,0
	25,1	—23,5	14,8	— 10,0
Compresiones totales.	43,6	— 0,9	—35,6	71,4
	89,9	52,4	— 6,4	44,4

Demuestran estas cifras las malas condiciones en que estaría una bóveda de hormigón armado, las potentes armaduras precisas y la imposibilidad de aceptar un arco de hormigón en masa, de no adoptar un medio de centrar las presiones.

Siendo las causas perturbadoras acortamientos en la fibra media, si después de cerrado el arco se suplementa en cantidad análoga a la que ha de acortarse, se destruyen sus efectos; en otras palabras, la causa que hay que anular es igual a una fuerza horizontal que pasa por el centro elástico del arco y en el sentido de una disminución del empuje. Luego si allí mismo se añade una fuerza suplementaria de igual y opuesto sentido, se habrán evitado aquellos efectos perturbadores.

Fácilmente se calcula el acortamiento unitario y el total producido por las causas que queremos anular, no teniendo más que abrir el arco y suplementarle con una placa de las dimensiones calculadas.

Así tendremos:

Corrección al descimbramiento. — 1.ª parte.

Acortamiento elástico, $\frac{19,5}{200\,000}$	= 0,000096
Retracción por fraguado.	= 0,000250
Exceso de temperatura	= 0,000124
	0,000470

Acortamiento elástico absoluto,

$$0,00047 \times 47,5 = 0,022 \text{ m.}$$

Comparando con el efecto de retracción del fraguado, que anteriormente se indicó, el de una fuerza que compensara esa retracción, sería:

	ARRANQUES		CLAVE	
	Intradós.	Trasdós.	Intradós.	Trasdós.
	Kg./cm.²	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*
Primer efecto de corrección. . .	— 44,2	48,5	33,3	— 27,3

y las cargas antes fijadas, se convierten en las siguientes:

	ARRANQUES		CLAVE	
	Intradós	Trasdós.	Intradós.	Trasdós.
	Kg./cm.²	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*
Cargas fijas, móviles y efecto corrector . . .	— 0,6	47,6	— 2,3	44,1
	45,7	— 3,9	27,9	17,1

obteniéndose ya cargas que son perfectamente admisibles por la disminución de las fatigas de compresión y la pequeñez de las tensiones resultantes.

Pero no hay más que forzar un poco la corrección, como vamos a ver, y reducimos aún más las cargas de tensión.

2.ª parte de la corrección.

Corrección suplementaria para disminuir la tensión máxima: deberá ser una fuerza tal, que produzca las cargas siguientes:

	ARRANQUES		CLAVE	
	Intradós.	Trasdós.	Intradós.	Trasdós.
	Kg./cm.²	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*
Corrección suplementaria. .	— 1,8	1,9	1,3	— 1,1

que corresponde a un alargamiento unitario de 0,000007.

De este modo se obtendrán las cargas definitivas siguientes:

	ARRANQUES		CLAVE	
	Intradós.	Trasdós.	Intradós.	Trasdós.
	Kg./cm.²	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*
Efectos totales. .	— 2,4	49,5	— 0,3	44,1
	43,9	— 2,0	29,2	16,0

El efecto de la corrección es notable; las máximas cargas de compresión, que por el procedimiento ordinario serían de 70 y 90 kg./cm.², se reducen a 45 y 50, y los grandes esfuerzos de tensión, prácticamente se anulan mediante este procedimiento, más lógico que el de poner armaduras que resistan las tensiones, ya que no sólo se evitan estas armaduras, sino que se disminuye la carga del hormigón a la mitad, próximamente.

El esfuerzo total de corrección, será:

	ARRANQUES		CLAVE	
	Intradós.	Trasdós.	Intradós.	Trasdós.
	Kg./cm.²	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*
Primera parte. .	— 42,2	48,5	33,3	— 27,3
Segunda parte. .	— 1,8	1,9	1,3	— 1,1
	— 44,0	30,4	34,6	— 28,4

o sea, una fuerza cuyo valor es:

$$\frac{1}{2}(34,6 - 28,4) \times 18\,750 = 58\,120 \text{ kg.}$$

situada bajo la clave, a una distancia

$$\frac{1}{2}(34,6 + 28,4) \times \frac{0,244}{0,625} \times 10^4 = 2,12 \text{ m.}$$

que, como debe resultar, es la ordenada del centro elástico del arco, bajo la clave.

Descimbramiento.

Al verificarse el descimbramiento, estaba construído todo el puente, a excepción del pavimento. Actúan como cargas: el peso propio y su acortamiento elástico, la retracción del fraguado, verificada ya en su 75 por 100, según los ensayos; cargas móviles no existían.

En estas condiciones se estableció el siguiente cuadro, en el que se tuvo en cuenta que el peso del tablero era, sin el pavimento, de 1 125 kg. m. l.

Peso del pavimento		1 125 kg./m./l.
Relaciones en el arranque	V.	23,5 tn.
	H.	37,9 tn.
	M.	45,0 tnm.
En la clave	M.	73,6 tnm.
Esfuerzos normales N.	Arranques. . .	45,6 tn.
	Clave	37,9 tn.

Con lo cual, restando de la primera columna del cuadro de los máximos momentos negativos totales

y esfuerzos normales correspondientes, antes inserto, se tiene:

ARRANQUES:	CLAVE:
M. . . . — 53,6 tnm.	M. . . . 40,5 tnm.
N. . . . 396,4 tn.	N. . . . 328,6 tn.

y las cargas al descimbrar:

	ARRANQUES		CLAVE	
	Intradós.	Trasdós.	Intradós.	Trasdós.
PESO PROPIO:	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*	*Kg./cm.²*
Presión normal .	17,5	17,5	17,5	17,5
Flexión residual.	9,4	— 9,4	10,2	— 10,2
Acortamiento elástico	7,3	— 8,0	— 5,5	4,6
Retracción por fraguado . . .	17,6	— 19,3	— 14,3	10,9
Exceso de temperatura. . . .	11,7	— 12,9	— 8,8	7,2
Corrección de descimbramiento.	— 44,0	50,4	34,6	— 24,4
	19,5	18,3	33,7	1,6

Por consiguiente, el arco queda en muy buenas condiciones al descimbrar, obteniéndose cargas moderadas y con mayor coeficiente de seguridad que después de puesta en servicio la obra.

En el momento de descimbrar, se tiene:

	Intradós.	Trasdós.
	Kg./cm.²	*Kg./cm.²*
Cargas en la clave	33,7	1,6

que corresponden a una fuerza de

$$\frac{L}{2}(33{,}7 - 1{,}6)\ 18750 = 300{,}9 \text{ tn.}$$

actuando inferiormente a la clave, a una distancia de

$$\frac{\frac{1}{2}(33{,}7 + 1{,}6)\frac{0{,}244}{0{,}625}\ 10^4}{300\,900} = 0{,}21 \text{ m.}$$

Por consiguiente, los gatos debían dar 300,9 tn. al descimbramiento y ser capaces de desarrollar hasta 600 tn. para tener suficiente margen de garantía.

Al realizar los gatos su empuje, cada semiarco girará alrededor del antipolo de la fuerza suplementaria en la elipse elástica de cada medio anillo; como tal fuerza es horizontal y pasa por el centro elástico del arco, este movimiento es una traslación, puesto que el antipolo está en el infinito; ahora, la elipse elástica de cada semiarco está dispuesta de modo que ninguno de sus ejes es horizontal, y por lo tanto, el diámetro conjugado de la fuerza actuante no es vertical y la clave se desplaza según una dirección inclinada.

La elevación que sufre la clave al descimbrar, será:

Acortamiento elástico de las cargas fijas existentes	0,000086
75 por 100 de retracción por fraguado. .	0,000187
Exceso de temperatura.	0,000124
SUMA	0,000397
Primer sumando de la corrección . . .	0,000470
Segundo sumando	0,000007
SUMA	0,000477
Alargamiento resultante . . .	0,00018

y mediante la fórmula de Rèsal,

$$= \delta\ b = 1{,}8\ r\ \alpha\ t$$

en la cual, r es el radio, cuyo valor, muy aproximado al funicular y a la fibra media adoptada, es de 75,00 metros, y $\alpha\ t$ es el valor calculado 0,00018, con lo cual la elevación será

$$\delta \cdot b = 1{,}8 \times 75\,000 \times 0{,}00018 = 24{,}3 \text{ m.}$$

que asegura el descimbramiento.

Gatos hidráulicos.

La potencia de cada gato será 600 : 4 = 150 tn.

Sección de un gato de 20 cm. de diámetro, 314,00 cm.², con lo cual tendremos:

Presión necesaria. $\frac{150\,000}{214} = 477$ atmósferas.

Presión de trabajo. $\frac{300\,900}{4 \times 314} = 238$ "

Resulta, en definitiva, que mediante la corrección se trata de corregir lo siguiente:

1.° Abrir la clave 23 mm.

2.° Ejercer una fuerza suplementaria de 58 120 kilogramos y total de los gatos de 300,9 tn. que actúe a 0,21 m. bajo el centro de la clave.

3.° Producir en el trasdós de arranques una carga suplementaria de 50,4 kg./cm.².

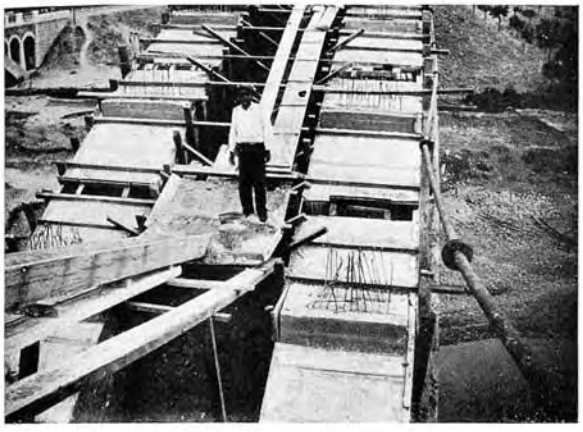
Todo ello se consigue abriendo con los gatos la clave y dejando cerrar el arco sobre placas del espesor calculado, en virtud de los datos experimentales, por el procedimiento que acabamos de exponer.

César VILLALBA GRANDA,
ingeniero de Caminos.

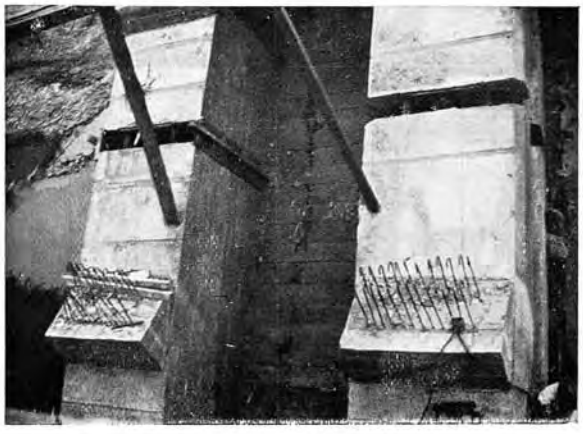
El puente sobre el río Guadalhorce, en Pizarra, Málaga[1]

III. — PROCEDIMIENTOS Y DETALLES DE LA CONSTRUCCIÓN. PRÁCTICA DEL DESCIMBRAMIENTO Y CORRECCIÓN.

Fundaciones. — Hubo que prolongar el estribo izquierdo diez metros, mediante excavaciones en recinto de ataguías ejecutadas con agotamientos. Realizada la obra de cimentación, se procedió a construir el estribo de la citada margen y modificación del otro estribo, elevando luego los andamios para la construcción de los salmeres.



Fot. 12. — Juntas entre dovelas, con sus tres zonas libres.



Fot. 13. — Detalle de una junta.

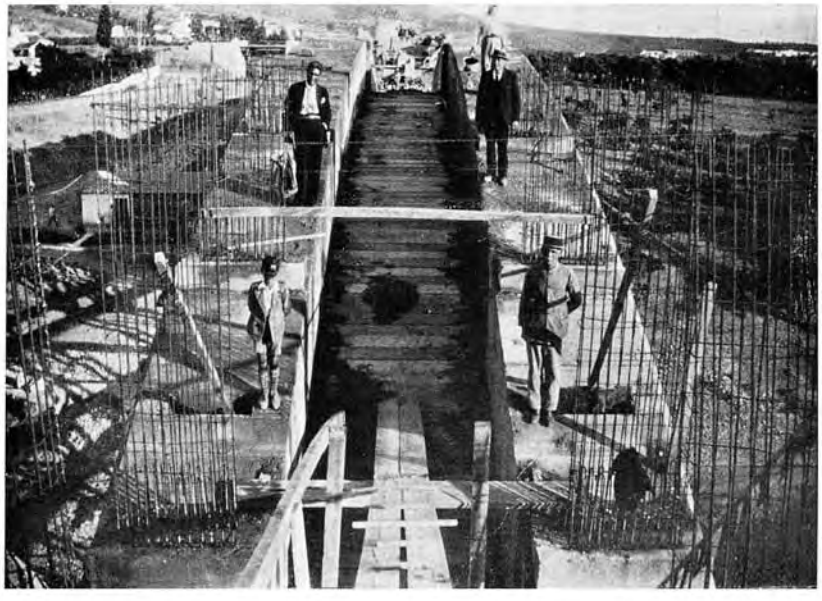
Siendo 49,5 kg./cm.^{2} la máxima carga que el hormigón había de soportar, y adoptando el conocido coeficiente de 0,28, debía disponerse de una mezcla capaz de dar 160 kg./cm.^{2} como carga de rotura, a los tres meses de fabricado, con lo cual a los cuarenta y cinco días se obtienen aproximadamente 130 kilogramos/cm.^{2} y 107 al mes de fabricado.

Tal resultado se consiguió con la escala 1 : 2 : 2, 8, que corresponde a 300 kg. de cemento y 350 litros de arena del tamaño número 14 (tamices americanos).

La construcción del arco se realizó a todo su espesor, pero con juntas radiales que se rellenaron después de construídas todas las dovelas del arco. Éstas se ejecutaron por el orden natural de las mismas desde los arranques a la clave y simultáneamente en los dos anillos, así como simétricamente, mediante cuatro tajos simultáneos. Se situaron las juntas, como más conveniente, correspondiéndose con los pies derechos de la cimbra, disponiendo al efecto hormigoneras capaces de producir 60 m.^{3} diarios y permitiendo así la construcción de los anillos en cuatro días de trabajo, cumpliendo la condición esencial de que cada bloque constituya una sola pieza, sin juntas de hormigonado, no consintiendo ni aun la relativa, ocasionada por descanso del personal. El hormigón se ejecutó poco flúido, enérgicamente apisonado, y se procuró que los bloques fuesen formándose por capas concéntricas al intradós, con grueso uniforme.

Las juntas corrientes entre dovelas se constituyeron mediante tableros formados por tres piezas, una central de 0,80 m. de longitud y dos laterales de 0,35 m. cada una. (Fotografías números 12 y 13.)

Se comenzó el relleno de juntas a los tres días siguientes a la terminación de los arcos, pero solamente las partes laterales (fotografía número 14), comen-



Fot. 14. — Juntas entre dovelas, hormigonadas sus zonas laterales.

[1] Véase el número anterior, página 207.

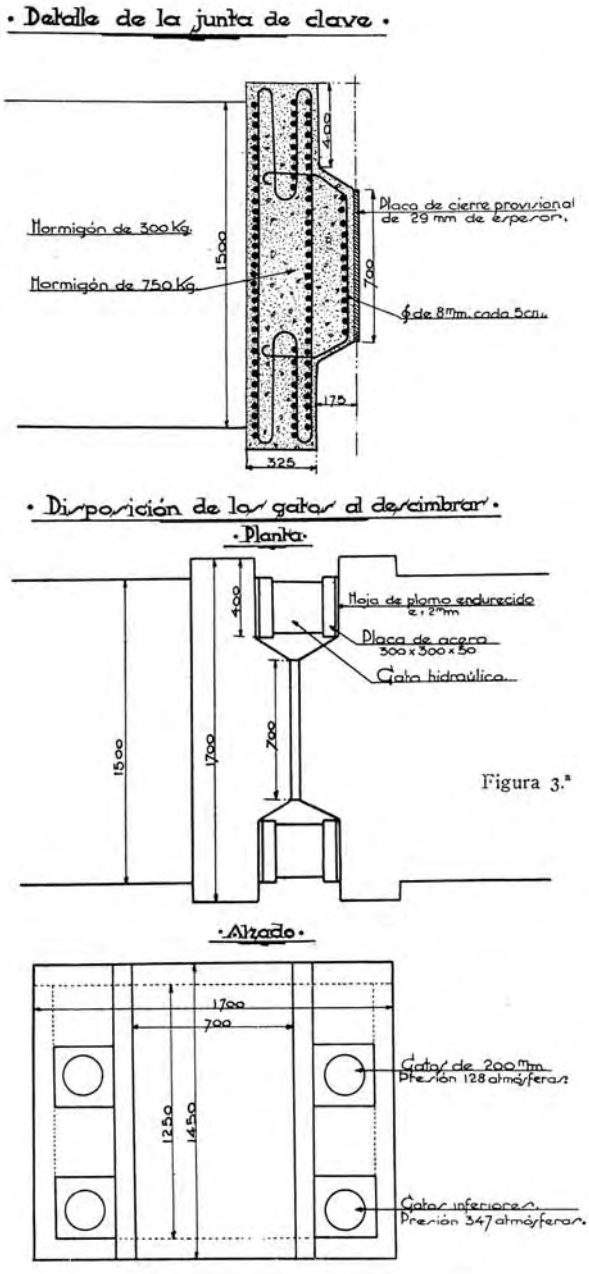
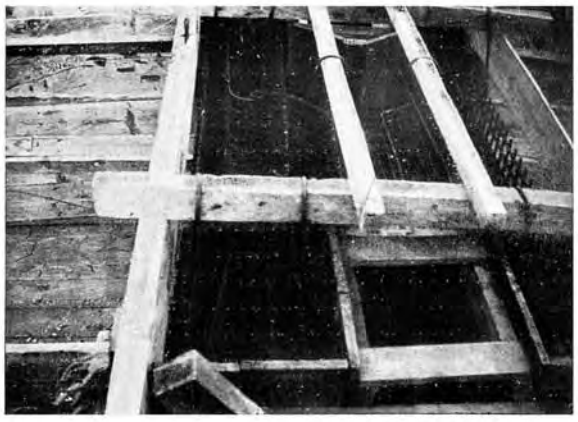


Figura 3.ª



Fot. 15. — Junta de clave y armadura de las dovelas.



Fot. 16. — Junta de clave y vista de armaduras de dovelas.

zando por los arranques y concluyendo de modo simétrico en cada arco, empleando al efecto hormigón de mayor riqueza, con gravilla más fina, cuidadosa y enérgicamente apisonada. Transcurrida una semana del cerrado del arco, se completaron las juntas con el relleno del resto de las mismas, siguiendo iguales precauciones; plazo que no conviene acortar para que el hormigón de las juntas tenga ya la consistencia debida.

Se procuró que el hormigón de las juntas fuese de resistencia específica vez y media superior que el de las bóvedas, lo que se consiguió con la graduación 1 : 1,2 : 3, que corresponde a 500 kg. de cemento por 300 litros de arena y 840 litros de gravilla de 37 mm.

Los bordes de las juntas de clave, de hormigón cuidadosamente constituído y apisonado, armado con la fuerte cuantía que indica la ligadura correspondiente, se construyeron así para que la rigidez grande de las piezas armadas repartiese uniformemente la presión concentrada de los gatos sobre toda la masa. Las dimensiones de estas piezas fueron las adoptadas en el puente de Villeneuve (fig. 3.ª).



Fot. 17. — Placas de cierre para la clave.

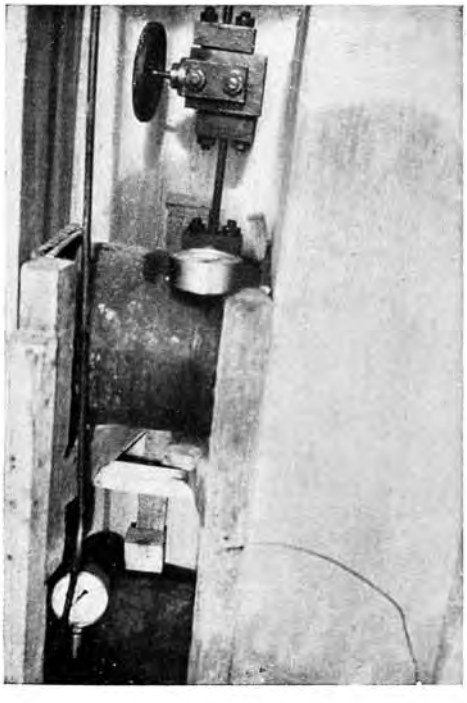
La circunstancia de que la posición de los gastos al descimbramiento deba dejar libre en el centro la mayor zona posible, y al mismo tiempo la colocación de los aparatos convenientes para tratar de obtener comprobaciones, hacen que los gatos tengan que colocarse excesivamente al borde de la placa de apoyo, si ésta se construye de las dimensiones normales. Tal inconveniente lo hemos salvado como se indica en las figuras que acompañan a este artículo, dando un sobreancho en los dos sentidos a las placas de 10 cm., solución que se aprovecha para poner de manifiesto, como en las fotografías se observa, la importante pieza que constituye la clave.



Fot. 18. — El puente preparado para las operaciones de descimbramiento y corrección. En la clave, el andamio para realizarlas.

El hormigón de estas juntas está fuertemente mezclado con capas de redondos dispuestos alternativamente, ya que tenía que ser capaz de resistir presiones unitarias de 200 kg./cm.², aunque si el descimbramiento correspondiese a las condiciones de cálculo, la presión unitaria efectiva no había de alcanzar más que 90 kilogramos/cm.² (Fotografías números 15 y 16.)

Aun con la cuantía de armaduras propuesta, no contando al hormigón zunchado como resistente más que vez y media el del hormigón sin zunchar, y necesitándose hormigón que zunchado resistiese a 400 kilogramos/cm.² y sin armadura a 270 kg./cm.², se empleó hormigón de 750 kg. de cemento por 300 litros de arena y 800 litros de gravilla menor de 15 milímetros.



Fot. 19. — Situación de los gatos hidráulicos en la junta de clave.

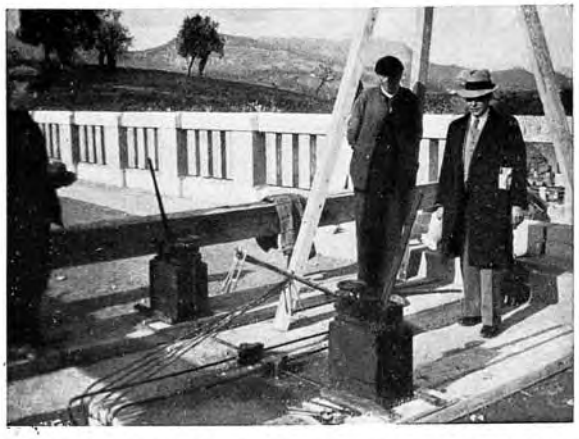
Gatos. — Como antes dijimos, debían ser capaces de proporcionar 300 toneladas, correspondientes al efecto de las cargas en el instante del descimbramiento y al esfuerzo suplementario de corrección. Se emplearon gatos de 0,20 m. de diámetro, capaces de dar un empuje de 600 toneladas, con lo cual quedaba margen para contingencias imprevistas, ya que trabajando en las condiciones que en los cálculos se prevén, vimos lo harían a presión menor de 250 atmósferas.

Cada elemento va provisto de un manómetro y grifo de retención para inmovilizarle a una presión dada. Están unidos por tuberías en comunicación cada grupo con una bomba y unidos por un conducto con grifo de corte. La instalación y cada gato se probaron a 700 atmósferas.

Como, según dijimos, el empuje producido por los gatos había de actuar a 210 mm. más bajo que el centro de la clave, esto se consiguió fácilmente maniobrando los gatos dispuestos éstos como indica una de las figuras adjuntas, pues pudiendo hacerse independientes las presiones de los superiores e inferiores, y siendo desiguales, en la debida escala, se desplaza la resultante en el sentido deseado.

Es evidente que al producir los gatos un empuje de valor y posición iguales a los determinados, la clave abriría una cantidad igual a la prevista, o sea, 23 milímetros y con las caras paralelas, si las condiciones supuestas y las efectivas fuesen coincidentes, lo que da una comprobación de los cálculos o una rectificación respecto a los diversos coeficientes empleados, entre ellos el de elasticidad. Tal es lo que efectuamos, según luego diremos.

La instalación de los gatos fué antes cuidadosamente probada en una zanja abierta al efecto en la ladera de la margen derecha, donde queda al descubierto el conglomerado; de esta manera, al tiempo que se probó la instalación, se obtuvieron datos fidedignos de la resistencia del terreno de fundación.



Fot. 20. — Instalación de descimbramientos y corrección de la clave.

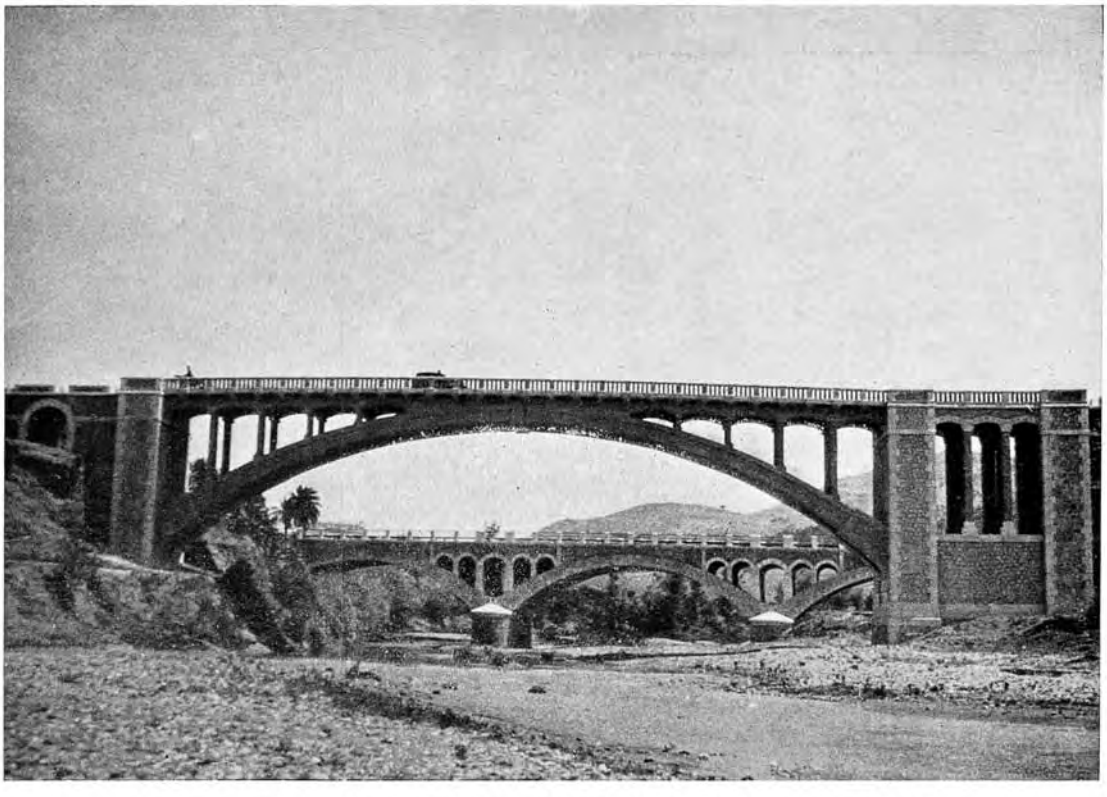
La presión de los gatos se repartía por unas placas de acero de 30 × 30 cm., apoyadas, a su vez, en otras de plomo endurecido, para que su contacto sea eficaz y uniforme en toda la superficie de las placas.

Placas de cierre. — Calculado en 23 mm. el espesor de las placas, se construyeron de hormigón armado, y por las fuertes presiones a que accidentalmente habían de estar sometidas, se fabricaron con gran esmero, y siendo esto difícil de realizar en tan débiles espesores, para eludir esto se cerraron los arcos durante su construcción sobre placas provisionales de 29 milímetros de grueso, cuya misión no era otra que formar una junta inicial de este espesor; estas placas se engrasaron por ambos lados para evitar su adherencia al hormigón de los arcos, y dan por resultado que el grueso de las placas definitivas haya de ser el de las provisionales, aumentando en la magnitud hallada por la corrección, es decir, en total para la junta, 52 mm. Esto se consiguió fácilmente con una placa de 50 mm., enlucida con pasta de cemento por ambos lados.

Para prever el caso de que la fibra media de los arcos no hubiese coincidido exactamente con el plano vertical de centros de salmeres, iniciándose una flexión lateral, conveniente de evitar, y siendo un medio práctico y fácil de realizarlo, poner placas que en sus bordes verticales tengan espesores distintos, se construyeron además placas con 3 mm. de sobregrueso en un extremo respecto al otro, colocando el borde más fino en el lado hacia el cual se inicia el pandeo. No fué preciso el empleo de estas placas, y en previsión de que los coeficientes efectivos difiriesen de los experimentales, a causa especialmente del retraso sufrido hasta poder disponer de los aparatos de descimbramiento, se construyó una placa uniforme de espesor mínimo (fotografía 17).

Todas estas placas fueron confeccionadas con mortero de 1 000 kg. de cemento por metro cúbico de arena escogida, y armadas con dos capas de cabillos de 8 mm., dispuestos a 50 mm. de distancia en los dos sentidos de la placa; su confección, en molde perfecto cuidadosamente apisonadas, y empleando mortero seco, enrasadas y aplanadas de modo preciso.

Ensayos previos. — Como anteriormente hemos dicho, como determinación previa al descimbramiento, se investigaron: El coeficiente de elasticidad de la mezcla adoptada para hormigón de los arcos; el coeficiente de retracción de fraguado de la misma mezcla



Fot. 21. — Vista general de la obra terminada. Al fondo, el puente de los F. C. Andaluces.

y la variación de la retracción según el tiempo (este ensayo se prolongó hasta completar el período de un año); la carga de rotura por compresión. Esto en lo que se refiere a los materiales, para los medios o elementos de la construcción, durante la ejecución de los anillos, se instalaron tres flexímetros registradores, por anillo, uno en la clave, anotando las deformaciones al terminar cada trozo de dovela y junta. Para los gatos, como ya hemos dicho, se probaron independientemente a 700 atmósferas, en taller, y a 500 en la zanja de pruebas.

Descimbramiento. — Debía efectuarse, según se prevía en los cálculos, a los cuarenta y cinco días de cerrado el arco; sin embargo, se retrasó considerablemente a causa de dificultades de índole burocrática relacionadas con la adquisición de los aparatos de descimbramiento; por lo cual, si bien se alcanzaron las presiones previstas en los cálculos, la apertura de la junta de clave fué menor y no se pudo colocar la placa del grueso máximo.

Estaban construídos al verificarse el descimbramiento, como se había supuesto, los tabiques, largueros y piso, excepto el pavimento, y cortado el tablero por sus juntas de dilatación en clave y estribos (fotografía número 18).

Se hicieron con gran cuidado, porque así lo requiere el sistema, las observaciones de las incidencias y movimientos de las distintas partes de la obra durante el descimbramiento y corrección. Para ello se instalaron los aparatos necesarios para acusar los movimientos de la cimbra y de los arcos. Fueron estos aparatos: un Manet en cada una de las pletinas embutidas en el trasdós de los arranques de los anillos; un aparato topográfico en el eje del puente, encima de uno de los estribos; los flexímetros antes indicados, un aparato Manet en cada una de las juntas de clave, para observar las cantidades que abrían los anillos bajo la presión de los gatos, y un flexímetro relacionando cada anillo con la cimbra, para saber cuánto se levantan aquéllos sobre la cimbra. Por último, los manómetros de los gatos y un termómetro para observar la temperatura ambiente.

Para observar el asiento de los apoyos, se instalaron aparatos de medida para determinar, con menor error de 2 mm., el asiento y retroceso que pudieran experimentar los estribos; instalando un aparato bajo cada salmer y anotando sus indicaciones al comienzo, al fin del descimbramiento del arco y cada doce horas después de descimbrados los anillos, durante cuarenta y ocho horas.

Para efectuar el descimbramiento, preparada la instalación de todos los aparatos para éste (fotografías 19 y 20) y para las observaciones, y probado el funcionamiento normal de todos, se colocó sobre la junta una cabria para cada anillo, con objeto de poder presentar en la junta la placa precisa lo más rápidamente posible, y abiertos los arcos por actuación en los acumuladores hidráulicos de cada grupo, guardando siempre entre los del plano superior e inferior la relación de presiones calculadas, se dejó la placa de cierre de espesor mínimo, alcanzada la presión calculada, y se hizo salir lentamente el líquido de los cuerpos de bomba para el cierre sobre las placas.

El despegue de la cimbra se hizo sin dificultad y el resto de la obra fué terminado normalmente (fotografía 21). Ésta ha sido construída, con todo esmero, por el contratista Sr. Pérez Plá, y las provechosas enseñanzas adquiridas especialmente en los trabajos de descimbramiento y corrección, han de sufrir una interesante ampliación y nos serán de utilidad para efectuar aplicación análoga, pero en mayor cuantía para las obras del viaducto sobre el Esla.

César VILLALBA GRANDA,
ingeniero de Caminos.