

PUENTES DE HORMIGÓN PARA FERROCARRIL

POR JOSÉ LUIS MÚZQUIZ, INGENIERO DE CAMINOS

Termina con este artículo el presente trabajo, y por segunda vez tenemos la satisfacción de haberlo visto citado por prestigiosos técnicos. Nos referimos a la conferencia de nuestro compañero Sr. Villalba en Lisboa, cuya reseña aparece en este mismo número, y en la que al tratar de puentes de hormigón para ferrocarril, proyecta gráficos y recoge datos comparativos de este importante y documentado estudio.

IX. - PUENTES EN ARCO

CUARTA PARTE.

Con el estudio comparativo de los tímpanos macizos y aligerados en puentes en arco, terminaremos esta serie de artículos sobre puentes de hormigón armado para ferrocarril.

Esperamos que los datos aportados (todos ellos de puentes proyectados o construídos por el Servicio de Estudios de Vías y Obras de la Red Nacional de Ferrocarriles) faciliten la labor de los Ingenieros constructores y proyectistas. Y al mismo tiempo les rogamos que nos ayuden a completar los cuadros y gráficos publicados, comunicándonos los resultados que obtengan en sus obras.

VIII. Estudio comparativo de los arcos con tímpanos macizos y aligerados.

Para este estudio consideraremos las cantidades de hormigón y de acero y las superficies de encofrado necesarias en una y otra solución, así como la influencia de la clase de tímpanos en la masa total del puente, en la cimentación, en el desagüe y en la facilidad de construcción.

Primeramente trataremos de los volúmenes de hormigón.

a) Volumen de hormigón.

Tanto por ciento correspondiente a la bóveda del volumen total de la superestructura. — Para hallar la influencia de la clase de tímpanos en el volumen total de hormigón consideraremos primeramente, en una serie de arcos con tímpanos aligerados y en otra con tímpanos macizos, el tanto por ciento correspondiente a la bóveda del volumen total de la superestructura.

Obtenemos así, para los puentes con tímpanos aligerados, el siguiente cuadro:

Arcos con tímpanos aligerados	Luz	Flecha	Tanto por ciento correspondiente a la bóveda, del volumen de hormigón de la superestructura.	
			Vía única	Vía doble
Arco central del viaducto del Villufre	32,4	19,5	47,5 %	49,5 %
Arco lateral, lado Coruña, del viaducto del Villufre. . .	25,3	19,0	48,5 %	50,5 %
Arco lateral, lado Madrid, del viaducto del Villufre. . .	25,3	19,0	52,0 %	54,0 %
Arco central del puente de Lor. . .	43,0	22,0	46,5 %	49,0 %
Arco del puente del Eresma.	17,5	5,0	51,5 %	54,0 %
Arco del puente del Querol.	30,0	10,0	53,5 %	55,0 %

No obstante la desigualdad de luces y de flechas, observamos una gran regularidad en los tantos por ciento.

En cuanto a los arcos con tímpanos macizos, los valores obtenidos son menores en los puentes de vía única, y sensiblemente iguales a los de tímpanos aligerados en los de vía doble, como podemos apreciar en el cuadro siguiente:

Arcos con tímpanos macizos	Luz	Flecha	Tanto por ciento correspondiente a la bóveda, del volumen de hormigón de la superestructura.	
			Vía única	Vía doble
Castejón.	42,0	10,5	39 %	55 %
Marcilla.	36,0	9,0	38 %	53 %
La Garoneta.	30,0	12,0	37,5 %	51 %
Tulivana núm. 1. . .	30,0	12,0	33 %	49 %
Congosto.	18,9	5,9	32 %	48 %
Somahoz (central).	17,3	3,1	37 %	52 %
Somahoz (lateral).	14,7	3,15	35 %	50 %

TANTO POR CIENTO CORRESPONDIENTE A LA BÓVEDA DEL VOLUMEN DE HORMIGÓN DE LA SUPERESTRUCTURA.

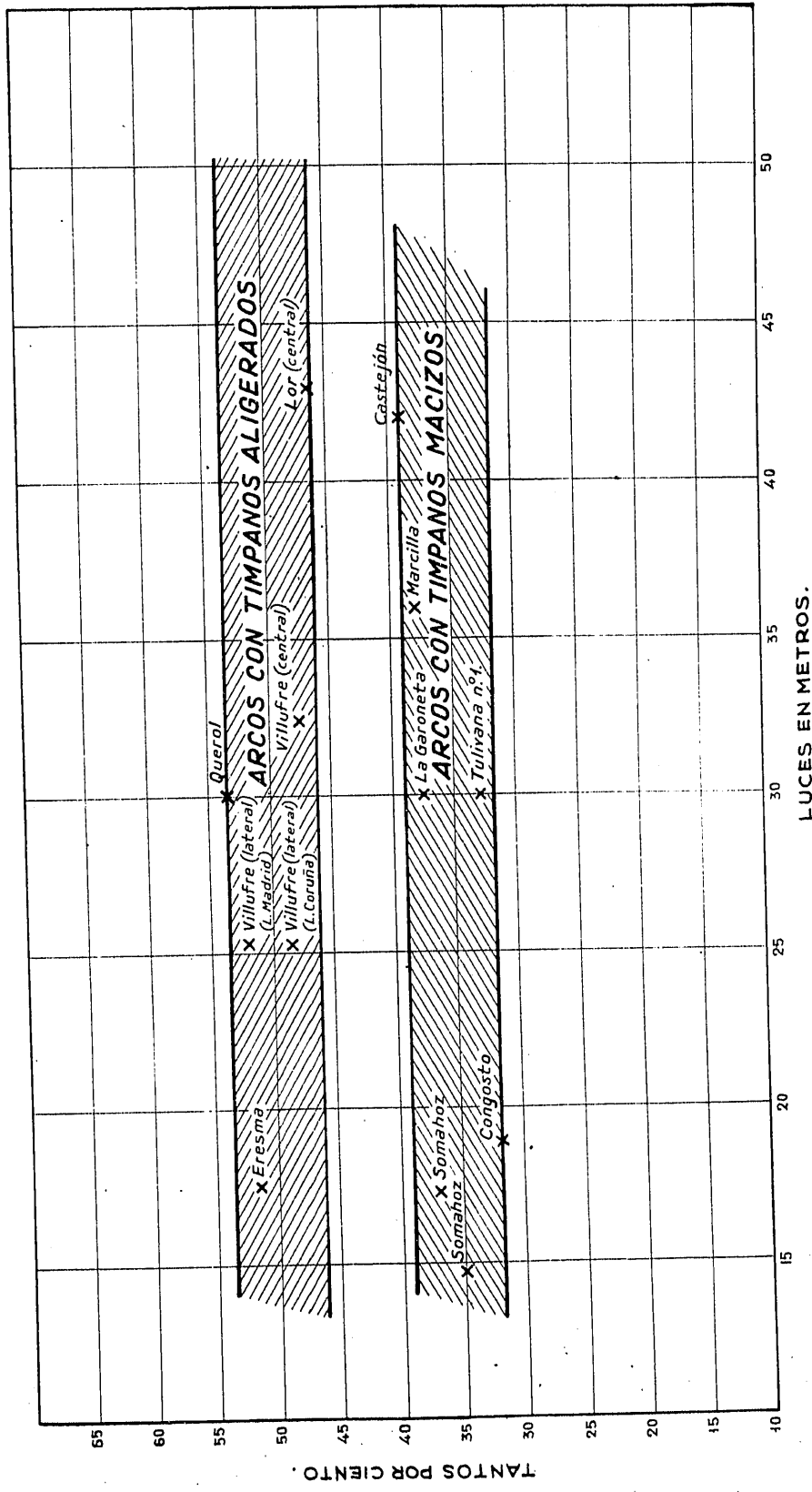


Fig. 1.ª — Cantidades de hormigón en puentes de vía única.

Esta diferencia en los tantos por ciento es debida a que los muretes de los tímpanos macizos son próximamente iguales en los puentes de vía única y de vía doble, mientras que los volúmenes de hormigón de los tímpanos aligerados son casi proporcionales a la anchura del puente. Por consiguiente, para puentes de vía única será ventajoso, desde este punto de vista, el empleo de tímpanos aligerados, mientras que en los puentes de vía doble no se obtiene más economía que la del relleno de piedra colocado entre los muretes de los tímpanos macizos.

En el gráfico núm. 1 representamos los valores de los citados tantos por ciento correspondientes a puentes de vía única. Para puentes de vía doble no hemos considerado necesaria hacer esta representación, dada la igualdad de valores obtenidos con uno y otro tipo de tímpanos, máxime cuando en el gráfico núm. 3 estudiamos y comparamos desde otro punto de vista los volúmenes de hormigón en puentes de vía doble.

b) Volumen por unidad de luz y de flecha.

Si ahora consideramos, en puentes de vía única, el volumen de hormigón por unidad de luz y de flecha correspondiente a tímpanos y voladizos, obtenemos el gráfico núm. 2. En él vemos claramente que los arcos con tímpanos macizos requieren más volumen de hormigón que los aligerados.

En cambio, si se trata de puentes de vía doble, dichos valores son próximamente iguales, según vemos en el gráfico núm. 3, en el que no puede trazarse una línea que limite claramente los arcos con tímpanos macizos y con tímpanos aligerados.

El relleno entre los tímpanos macizos puede hacerse también con hormigón pobre. Sin embargo, esta solución aumenta el coste y el gasto de cemento y no ofrece ninguna ventaja respecto a la de piedra en seco. En este último caso conviene no olvidar la colocación de mechinales para desagüe, a fin de que no

VOLUMEN DE HORMIGON EN TÍMPANOS Y VOLADIZOS POR UNIDAD DE LUZ Y DE FLECHA. (VIA ÚNICA)

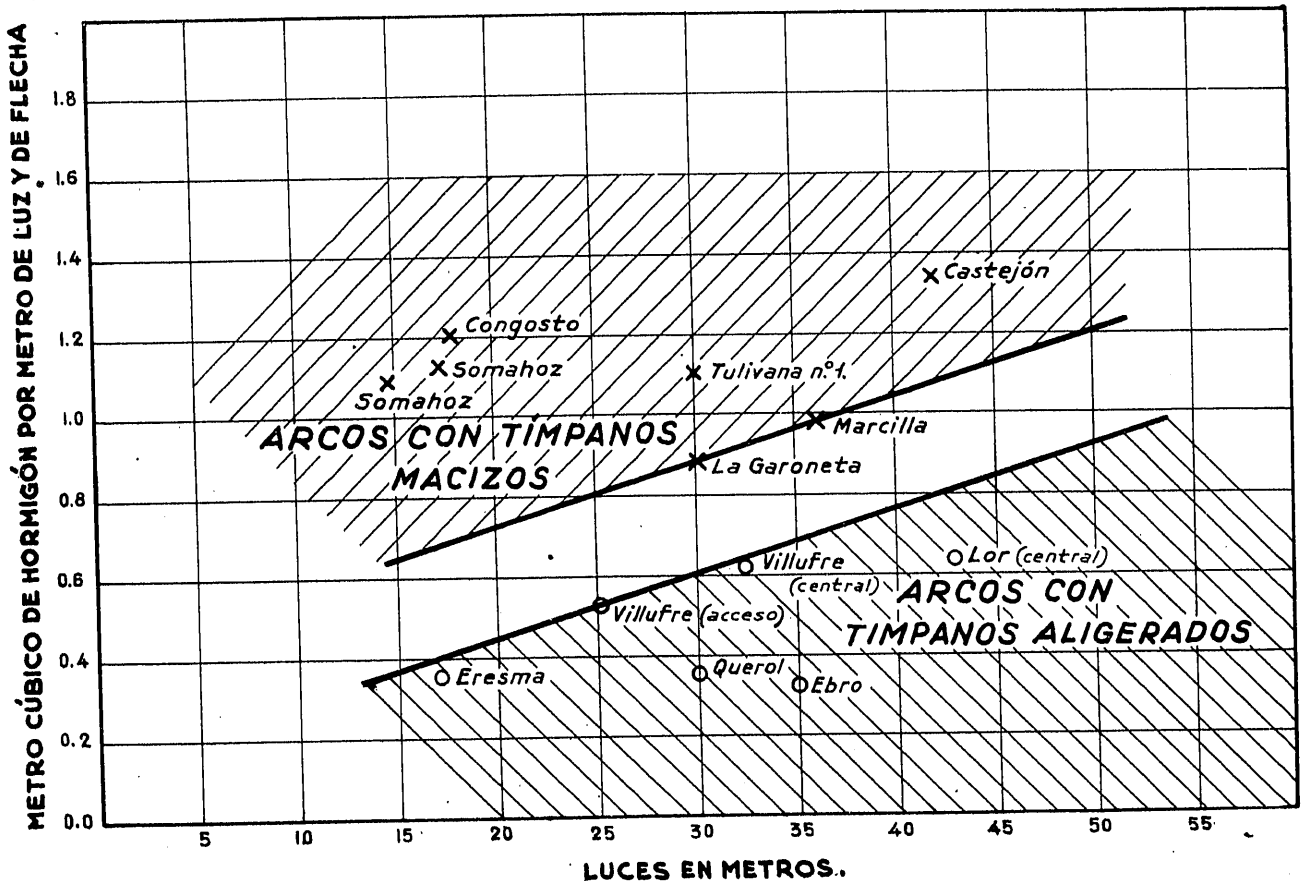


Figura 2.ª

resulten excesivos los empujes sobre los muretes de los tímpanos. En cuanto al relleno de tierra, no debe emplearse porque produce mayores empujes que el de piedra partida, debido a ser de difícil saneamiento.

c) Cantidad de acero.

Tanto por ciento correspondiente a tímpanos y voladizos, del peso de acero de la bóveda. — Para comparar las cantidades de acero que se necesitan en los dos tipos de soluciones que estudiamos, primeramente consideraremos el peso de acero correspondiente a tímpanos y voladizos, en tanto por ciento del peso de acero de la bóveda. En el gráfico número 4, en el que representamos los valores obtenidos para puentes de vía única, vemos que mientras que para los arcos de tímpanos macizos los tantos por ciento están comprendidos entre el 7 y el 15 por 100, en los arcos con tímpanos aligerados siempre exceden del 30 por 100 del peso de acero de la bóveda.

La razón de esta diferencia estriba en que en los arcos con tímpanos macizos no hace falta colocar armaduras en los tímpanos, y sólo es preciso tener en cuenta el armado de los voladizos. En cambio, cualquiera que sea el tipo de los aligeramientos, siempre es necesario proyectar la colocación de algunas armaduras, por lo menos en las palizadas de sostenimiento de los arquillos o tableros. Estas palizadas trabajan a flexión compuesta, ya que mediante ellas se transmiten a la bóveda del arco principal no sólo los efectos del peso propio y sobrecargas, sino también los esfuerzos de frenado en la plataforma del puente.

En las figuras 5.^a y 6.^a representamos las armaduras de los arcos de aligeramiento de los puentes del Lor y Querol. Como en este último no fué necesario armar los arquillos, se obtuvo un peso de acero menor que en el del Lor, como se aprecia en el citado gráfico número 4.

En dicho gráfico vemos también que el puente so-

bre el Eresma (fig. 7.^a) requiere mucha mayor cantidad de acero que los demás que hemos considerado. Este aumento es debido a que el tablero del puente va colocado directamente sobre las palizadas, sin intermedio de arquillos. Y aun cuando de esta forma se obtiene alguna economía de hormigón, no creemos deba emplearse este tipo de aligeramientos para puentes de ferrocarril, ya que además del citado aumento de acero ofrece poca masa relativa para el paso de las potentes sobrecargas móviles a que han de estar sometidos.

VOLUMEN DE HORMIGÓN EN TÍMPANOS Y VOLADIZOS POR UNIDAD DE LUZ Y DE FLECHA. VIA DOBLE

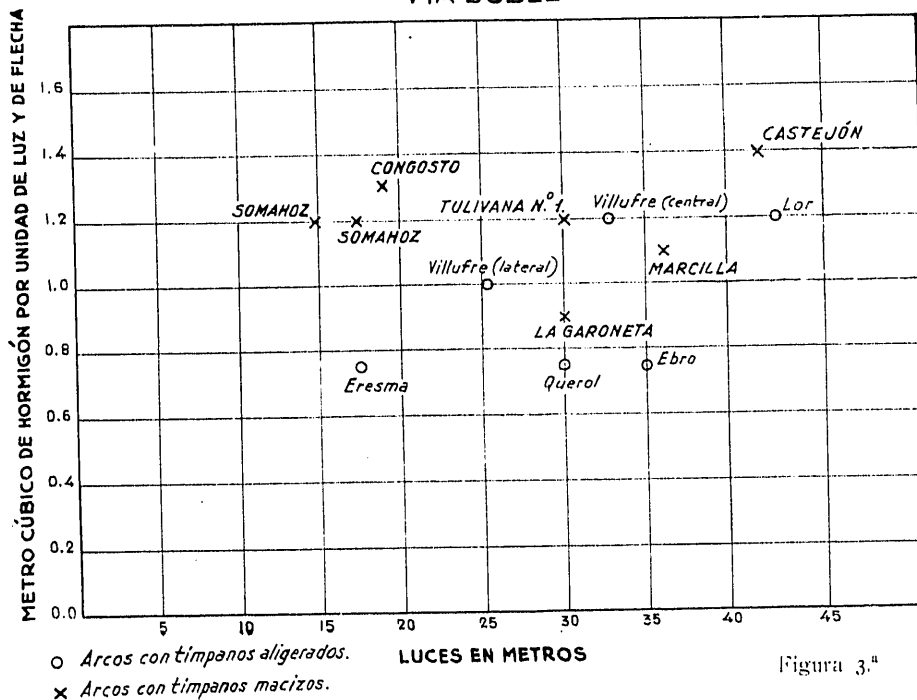


Figura 3.º

Si se tratase de puentes de vía doble, la diferencia entre los dos tipos de tímpanos es todavía mayor, ya que en los arcos con tímpanos aligerados los valores de los tantos por ciento serían casi iguales a los obtenidos para vía única, y en cambio, en los arcos con tímpanos macizos se reducirían a la mitad, al no tener que considerar las armaduras de los tímpanos.

En el siguiente cuadro indicamos los valores hallados para los puentes de vía única representados en el gráfico 4, y los obtenidos al considerar dichos puentes de vía doble:

PESO DE ACERO CORRESPONDIENTE A TÍMPANOS Y VOLADIZOS EN TANTO POR CIENTO DEL PESO DE ACERO DE LA BÓVEDA
(VIA ÚNICA)

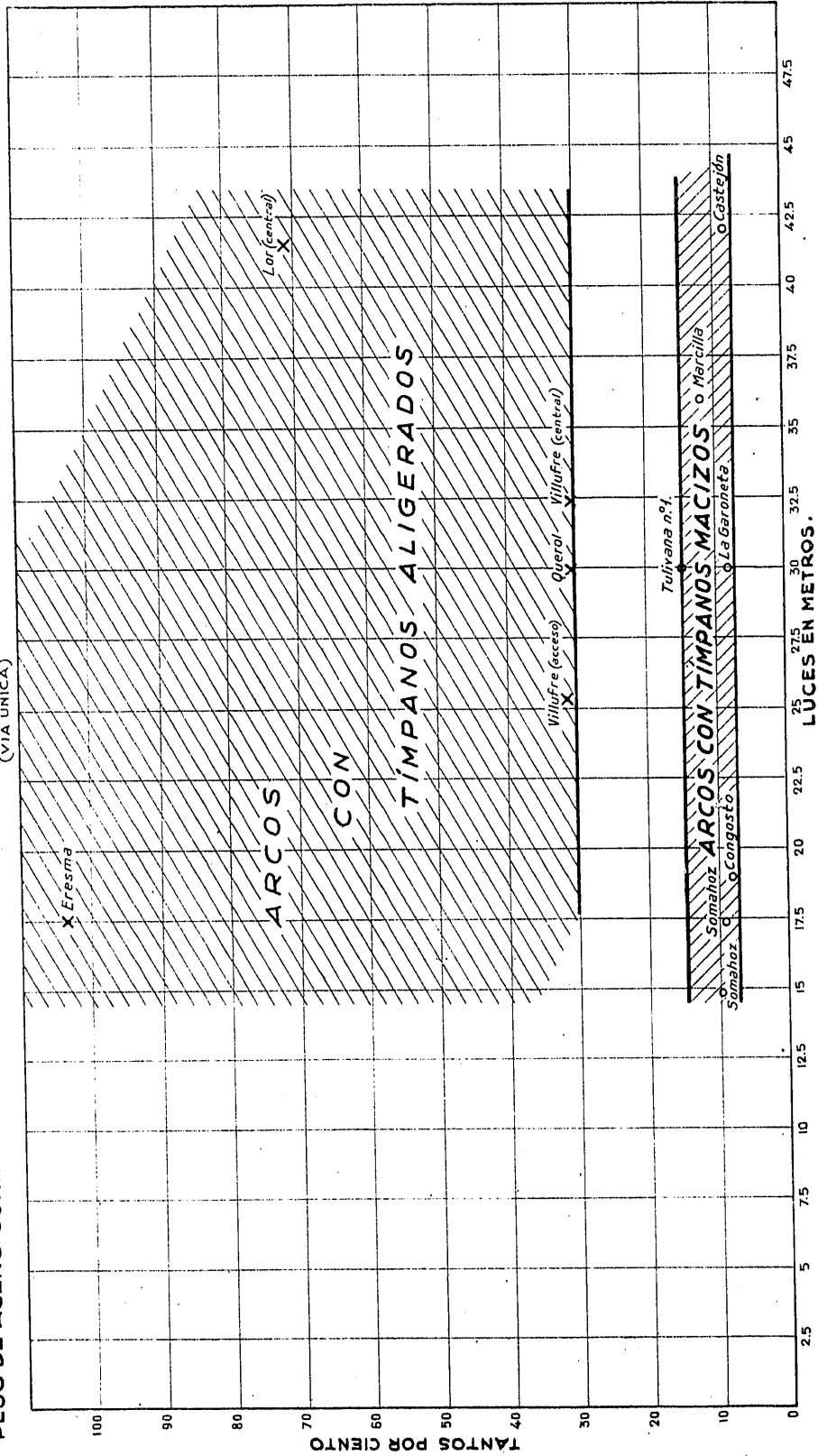


Figura 4ª

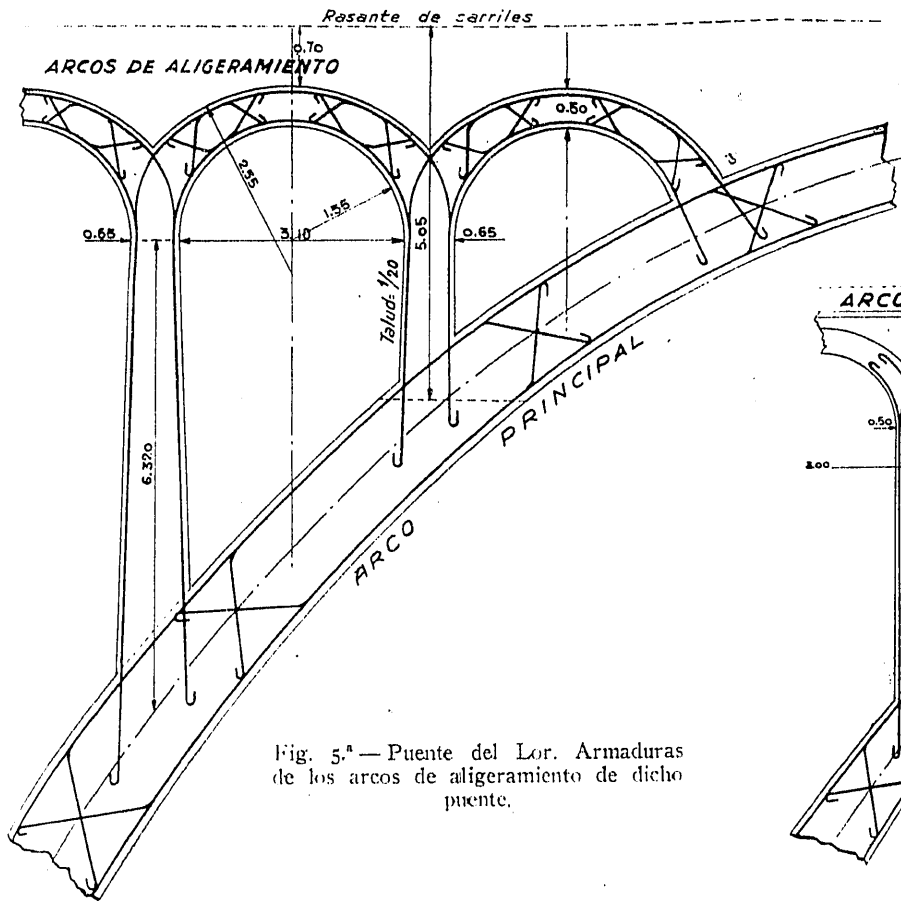


Fig. 5.ª — Puentes de Lor. Armaduras de los arcos de aligeramiento de dicho puente.

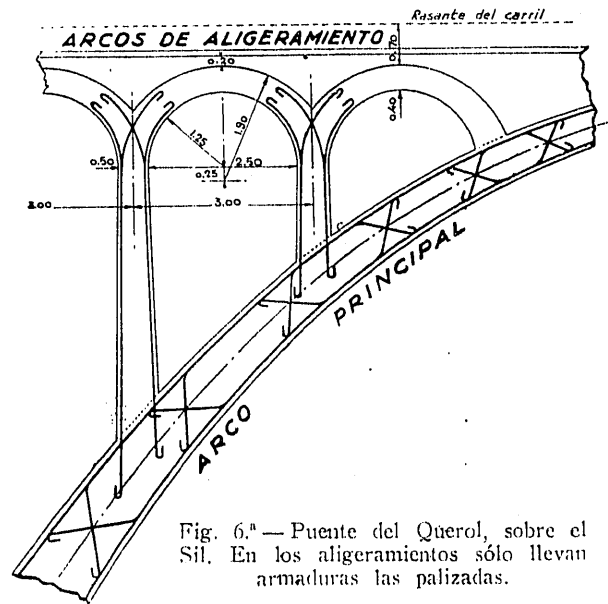


Fig. 6.ª — Puentes de Querol, sobre el Sil. En los aligeramientos sólo llevan armaduras las palizadas.

Puentes de tímpanos macizos.

Puente	Luz	Tanto por ciento correspondiente a tímpanos y voladizos, del peso de acero de la bóveda.	
		Vía única	Vía doble
Somahoz.	14,70	9,8	4,9
Somahoz.	17,30	9,4	4,7
Congosto.	18,90	8,0	4,0
Tulivana núm. 1.	30	14,8	7,4
La Garoneta.	30	8,2	4,1
Marcilla.	36	12,0	6,0
Castejón.	42	8,5	4,2

Puentes de tímpanos aligerados.

Puente	Luz	Tanto por ciento correspondiente a tímpanos y voladizos, del peso de acero de la bóveda.	
		Vía única	Vía doble
Eresma.	17,50	104	97
Villufre (acceso).	25,30	32	27
Querol.	30	30	25
Villufre (central).	32,40	30	26
Lor (central).	43	71,5	64

Como hemos dicho anteriormente, en los puentes con tímpanos macizos no se han considerado armaduras en los tímpanos. Algunos compañeros nuestros estiman conveniente la colocación de algunos redondos de pequeño diámetro, a fin de evitar las grietas en el hormigón.

Sin embargo, como desde el punto de vista de resistencia no son necesarios, creemos deben únicamente proyectarse en puentes situados en poblaciones o sitios muy visibles. Y aun en este caso, puede colocarse un revestimiento de ladrillo o piedra que evite la aparición de grietas al exterior, sin necesidad de colocar armaduras.

d) Peso por unidad de luz y de flecha.

Si ahora consideramos el peso de acero correspondiente a tímpanos y voladizos por unidad de luz y de flecha, obtenemos el gráfico de la figura 8.ª para puentes de vía única.

Del mismo modo que en el gráfico anterior, los puntos representativos de los puentes con tímpanos aligerados se encuentran por encima de los de tímpanos

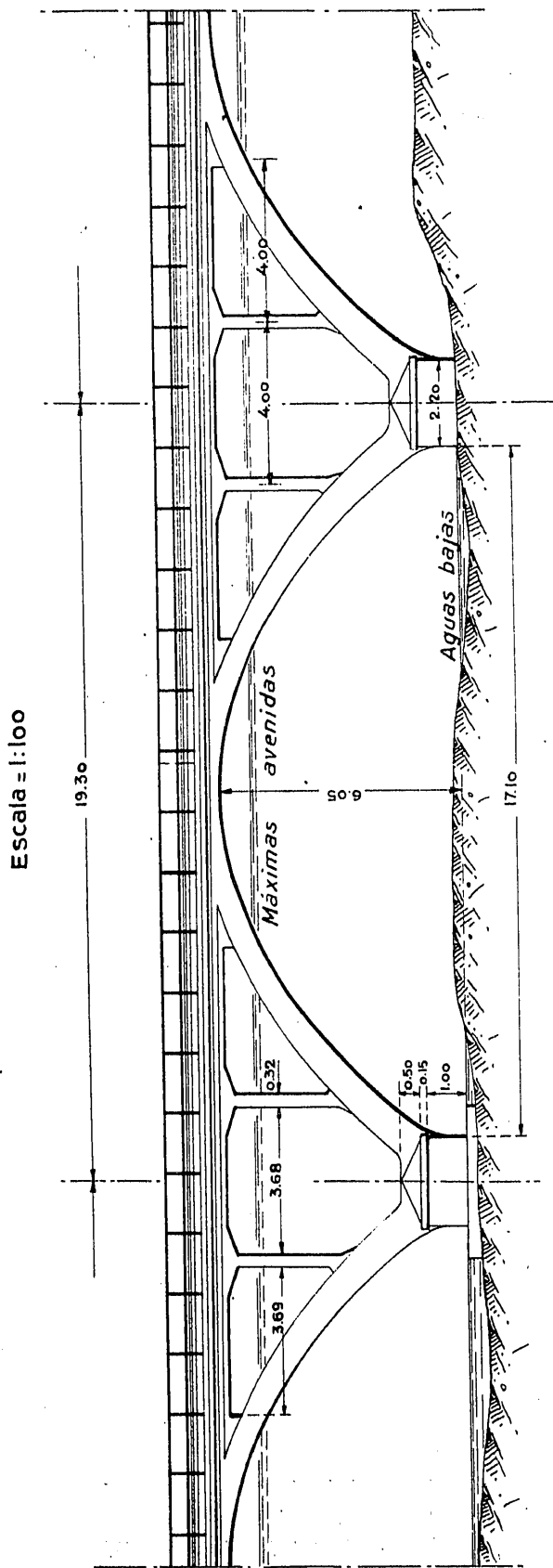


Fig. 7. — Puenle sobre el río Eresma, en la línea de Segovia. Solución de arcos en tímpanos aligerados.

macizos, observándose, además, una gran irregularidad en los valores obtenidos para los arcos con tímpanos aligerados. Y así, mientras que para el puente de Querol el peso de acero es ligeramente superior al de los arcos con tímpanos macizos, en el del Eresma se obtiene un peso de 113 Kg. por metro de luz y de flecha; es decir: un valor cerca de quince veces más elevado que el mayor obtenido para arcos con tímpanos macizos.

En el gráfico no hemos indicado el punto correspondiente a dicho puente del Eresma, dado su elevado valor, próximamente cuatro veces mayor que el del último representado.

Si se tratara de puentes de vía doble, la diferencia entre los arcos con tímpanos macizos y aligerados sería todavía mayor, ya que, en los primeros, los valores son casi independientes de la anchura del puente, y en cambio, en los de tímpanos aligerados, son próximamente el doble de los de vía única.

e) *Cuantía.*

Finalmente, si comparamos las cuantías correspondientes a arcos con tímpanos aligerados y macizos, obtenemos el gráfico de la figura 9.^a

La diferencia entre un tipo y otro de arcos se acusa más que en el gráfico anterior, y también, como en el caso anterior, se obtiene un valor muy grande para el puente del Eresma (187 Kg. de acero por metro cúbico de hormigón), por lo que hemos prescindido de representarlo en el dibujo. En los demás valores, tanto de tímpanos macizos como aligerados, se observa, en cambio, bastante uniformidad.

En los puentes de vía doble, la diferencia de cuantías entre uno y otro tipo de tímpanos es también mayor que para los puentes de vía única. Pero, en este caso, son los valores correspondientes a los arcos con tímpanos aligerados los que se mantienen próximamente constantes, mientras que los de los arcos con tímpanos macizos se reducen casi a la mitad.

f) *Superficie de encofrado.*

La superficie de encofrado correspondiente a tímpanos y voladizos, es mayor en los arcos con tímpanos macizos que en los de tímpanos aligerados, como vemos en el gráfico de la figura 10.

Sin embargo, la complicación del encofrado es mucho mayor en este último caso, y como, además, pueden aprovecharse las tablas viejas para la super-

PESO DE ACERO EN TÍMPANOS Y VOLADIZOS POR UNIDAD DE LUZ Y DE FLECHA

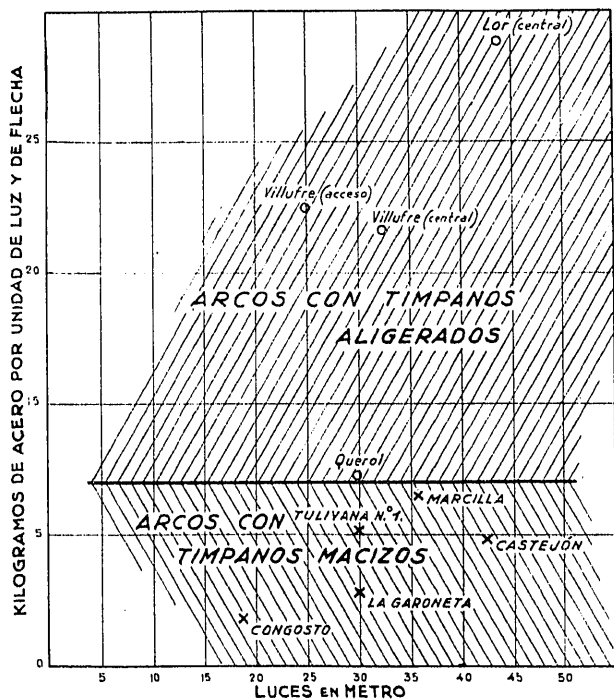


Figura 8.ª

dirse del cálculo de los esfuerzos de frenado y considerar que se transmiten a los estribos por intermedio de los tímpanos. Estos esfuerzos de frenado tienen, relativamente, poca importancia, comparados con los demás que se originan en el arco. Pero, en cambio, no puede despreciarse su influencia en el proyecto de los macizos de cimentación de las pilas intermedias, ya que el momento flector producido por el esfuerzo horizontal de frenado llega a alcanzar valores considerables en la base inferior de los cajones cimentados a gran profundidad.

h) Cimentación.

Ya hemos citado la posibilidad de supresión de los esfuerzos de frenado en los arcos con tímpanos macizos. Además de esta ventaja, hay que considerar que los esfuerzos en arranques se aproximan mucho más a la vertical en los arcos con tímpanos macizos, con lo que se logra una disminución en la cimentación. En efecto: ya vimos en el artículo anterior, al hablar de la forma de la directriz, que la relación $\frac{g_a}{g_c}$ entre

los pesos en arranques y clave, es mucho mayor para arcos con tímpanos macizos que para arcos con tímpanos aligerados, y, por tanto, el antifunicular de las cargas se separa de la parábola y se aproxima mucho

ficie interior de los muretes de los tímpanos, no resulta realmente ninguna ventaja, desde este punto de vista, a favor de los arcos con tímpanos aligerados.

Si se trata de puentes para vía doble, es, desde luego, conveniente el empleo de tímpanos macizos, ya que la superficie de encofrado resulta, próximamente, igual en un caso que en otro, y en cambio, la complicación es mucho mayor si los tímpanos son aligerados.

g) Masa total del puente.

La influencia de la clase de tímpanos en la masa total del puente es evidente, y dada la necesidad de que los puentes de ferrocarril tengan mucha masa, se ha de preferir el empleo de arcos con tímpanos macizos. Sin embargo, en arcos de gran altura de rasante puede llegarse a volúmenes tan grandes de hormigón que no compensen el aumento de masa. Y además, hay que tener en cuenta que desde el punto de vista estético, es conveniente proyectar aligeramientos en puentes de mucha altura, como vemos en la figura 11, correspondiente al puente del Lor, de 22 m. de flecha y 43 de luz.

En el caso de tímpanos macizos, puede prescin-

CUANTIAS CORRESPONDIENTES A TÍMPANOS Y VOLADIZOS DE ARCOS DE HORMIGÓN ARMADO.

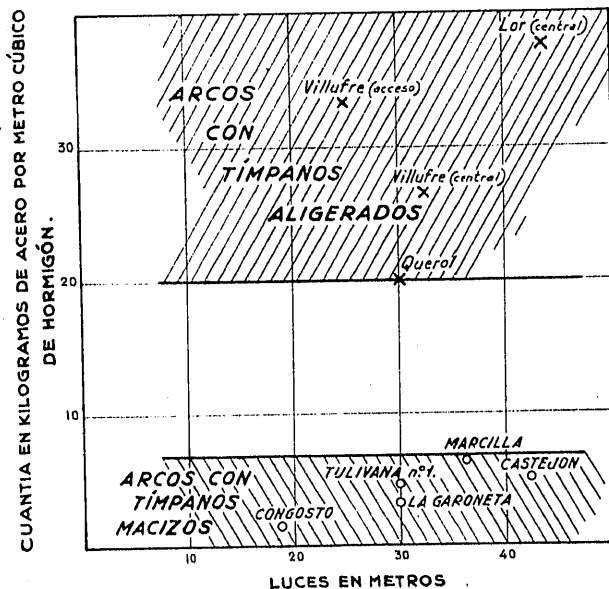


Figura 9.ª

SUPERFICIE DE ENCOFRADO EN TÍMPANOS Y VOLADIZOS POR UNIDAD DE LUZ Y DE FLECHA. (VIA ÚNICA)

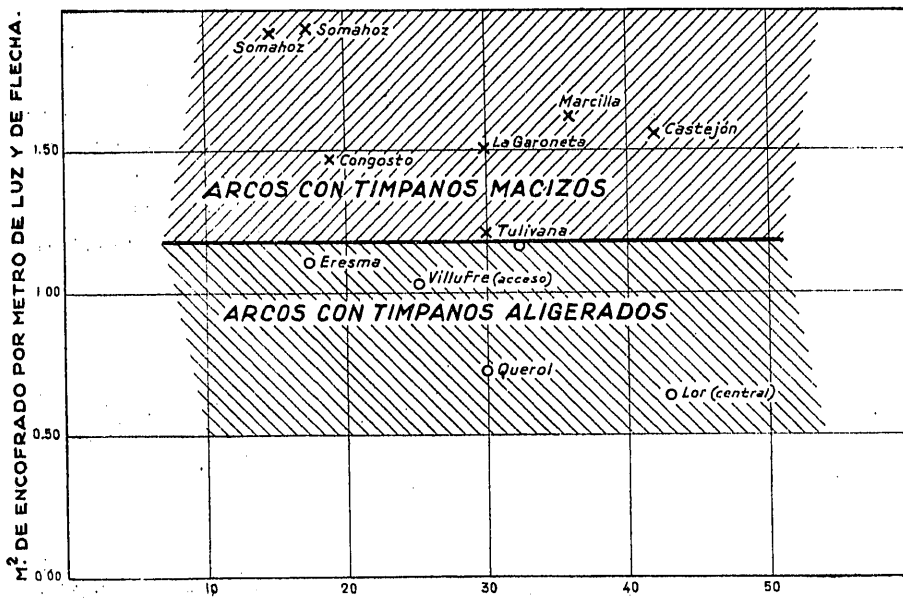


Figura 10.

más a la vertical en el primer caso que en el segundo.

Para valores de la relación $\frac{g_a}{g_c}$ superiores a 10, la variación de la forma de la directriz es muy pequeña y, por ello, en puentes de gran altura de rasante no se obtiene tampoco, desde el punto de vista de la cimentación, gran ventaja al proyectar los tímpanos macizos.

i) Desagüe.

En cuanto al desagüe, es, desde luego, mayor el de los arcos con tímpanos aligerados. Pero para que pueda contarse con la superficie de los aligeramientos, y aun así, siempre con ciertas limitaciones, creemos deben emplearse soluciones especiales, como la proyectada por nuestros compañeros Sres. Juan Aracil y Reig (1), ya que, de otro modo, los espacios que quedan libres entre las palizadas, si éstas están muy próximas, son fácilmente obstruibles con los arrastres flotantes del río. La solución proyectada para el puente del Eresma (fig. 7.^a), ofrece más capacidad de desagüe, pero en cambio presenta los inconvenientes citados anteriormente, a causa de su poca masa.

(1) Ver el artículo IV de esta serie, publicado en el número de mayo de 1943, de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS.

Fig. 11. — Arco central y arcos de aligeramiento del puente de Lor, de 22 metros de altura. →

j) Facilidad de construcción.

Como dijimos al tratar de la superficie de encofrado, los arcos con tímpanos macizos requieren un encofrado más sencillo. Además, en los arcos con tímpanos aligerados no solamente el peso del acero es mayor, sino que la colocación de los redondos en las palizadas y arquillos y el hormigonado de estas zonas exige una ejecución esmerada que complica notablemente la obra. Por esto, creemos que de no tratarse de arcos con gran altura de rasante, o de puentes de desagüe muy difícil, o de obras situadas en puntos en los que tenga mucha importancia la cuestión estética, son siempre preferibles los arcos con tímpanos macizos.

