

PUNTES DE HORMIGÓN PARA FERROCARRIL

POR JOSÉ LUIS MÚZQUIZ, INGENIERO DE CAMINOS

Como ampliación de los precedentes artículos, dedica el autor el presente a estudiar importantes particularidades de los puentes en arco, siguiendo el mismo criterio, muy acertado, de basarse en cifras y datos concretos de obras construídas, que le permite llegar a interesantes conclusiones.

VI. - PUNTES EN ARCO

I. Influencia del rebajamiento.

Estudiados en los artículos precedentes los factores que influyen en la elección del tipo de puente, vamos a tratar a continuación de algunas características y problemas constructivos de los puentes en arco que merecen ser detallados especialmente a causa de su importancia.

En primer lugar estudiaremos la influencia del rebajamiento.

El rebajamiento es la inversa de la relación entre la flecha y la luz del arco; es decir, que un arco será tanto más rebajado cuanto menor sea este cociente. Algunas veces el rebajamiento viene fijado por las condiciones del cauce y altura de la rasante, pero otras, en cambio, puede variarse aumentando o dismi-

ESPEORES EN CLAVE EN ARCOS DE HORMIGÓN ARMADO.

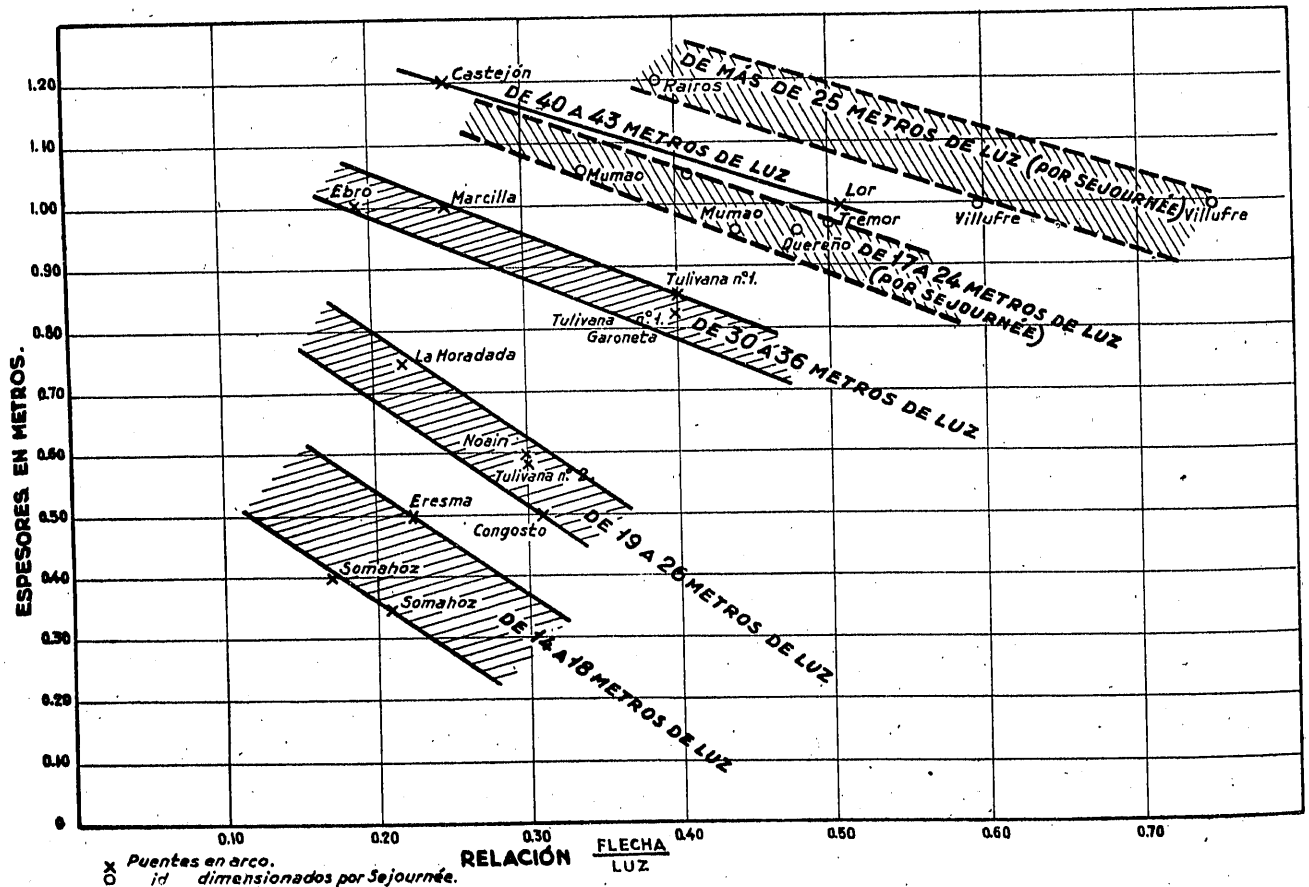


Figura 1.ª

ESPEORES EN ARRANQUES EN ARCOS DE HORMIGÓN ARMADO.

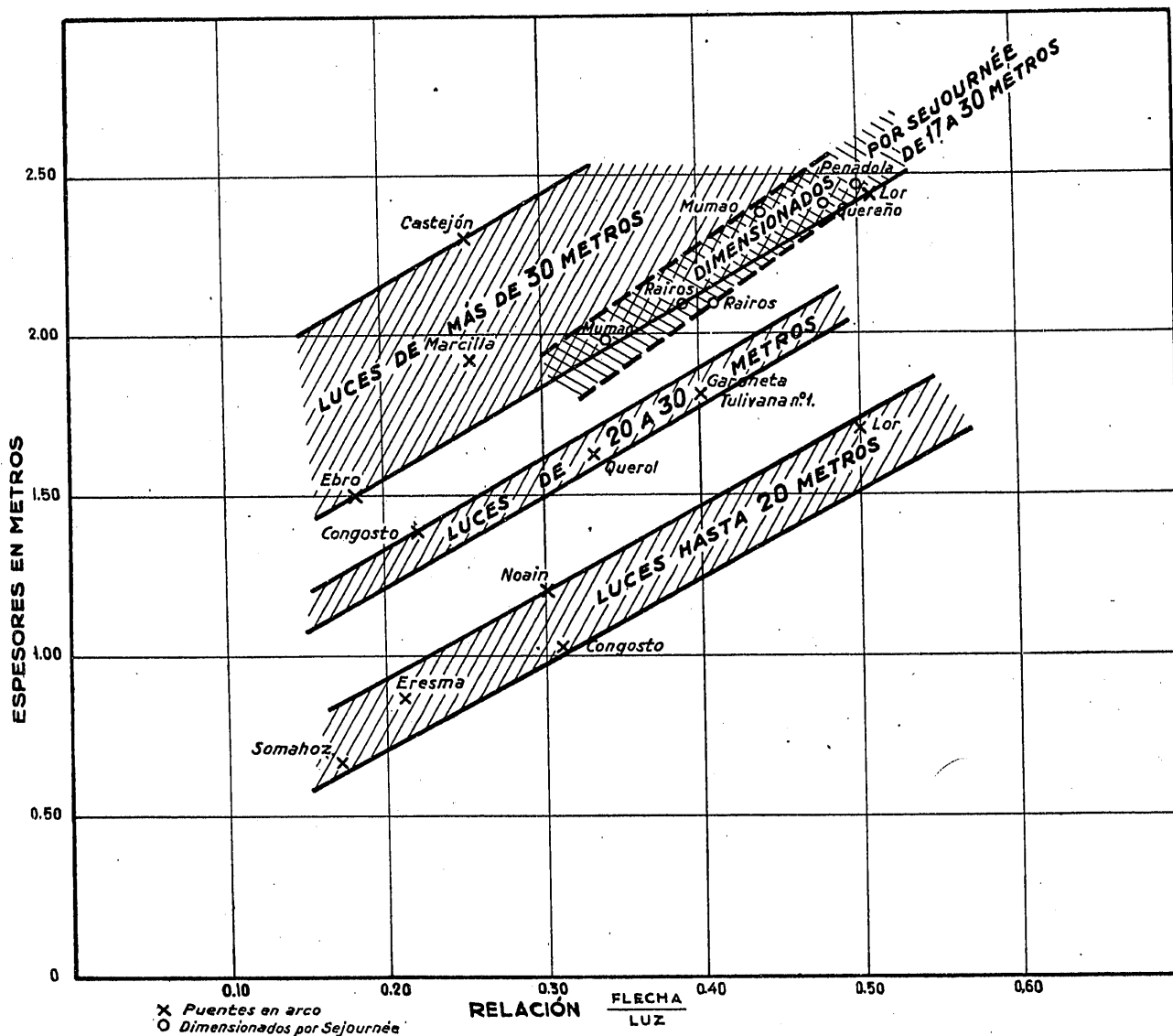


Figura 2.ª

nuyendo el número total de arcos del puente. Por eso es necesario, para fijar convenientemente la distribución de luces, estudiar la influencia del rebajamiento en la cantidad de materiales, cimentación, desagüe, etc.

Veamos algunos de estos factores.

a) *Espesores de la bóveda.*

Para arcos del mismo rebajamiento y características aumenta con la luz el espesor de la bóveda, tanto en clave como en arranques. Así tenemos para los

puentes con tímpanos macizos de Castejón y de Marcilla, de 0,25 de rebajamiento y luces de 42 y 36 metros respectivamente, los siguientes espesores:

Puente	Luz	Espesor en clave	Espesor en arranques
Marcilla.	36	1,00	1,93
Castejón	42	1,20	2,32

Y para los de Samahoz y Ebro, de tímpanos ali-

gerados, rebajamiento de 0,17 y 0,19 y luces de 17,30 y 35 metros:

Puente	Luz	Espesor en clave	Espesor en arranques
Somahoz	17,30	0,40	0,67
Ebro.	35,00	1,00	1,50

Veamos ahora, para igualdad de luces, la influencia del rebajamiento en los espesores de clave y arranque. Al aumentar la relación entre la flecha y la luz del arco, disminuye el espesor de la clave y aumenta en arranques, como podemos apreciar en los gráficos de las figuras 1.ª y 2.ª. En el primero se indican los

espesores en clave correspondientes a arcos de 14 a 18 m. de luz, entre 19 y 26 m., entre 30 y 36 y de 40 a 43 metros, calculados por los métodos de Strassner, Melan, Magnel y Müller-Breslau, y de arcos dimensionados por las fórmulas de Sejournee, de 17 a 24 metros de luz y de más de 25 metros.

Los espesores fijados con arreglo a estas fórmulas resultan bastante mayores que los restantes por haber sido calculadas para arcos de fábrica o de hormigón en masa. Por esta razón no creemos deban utilizarse para arcos de hormigón armado, a no ser en una primera aproximación.

En la figura 2.ª, en la que se señalan los espesores en arranques, vemos también que los dimensionados por Sejournee resultan, para igualdad de luces, con espesores mayores que los demás arcos.

HORMIGÓN EN BÓVEDA EN ARCOS DE HORMIGÓN ARMADO EN FUNCIÓN DEL REBAJAMIENTO PARA DIVERSAS FLECHAS —VIA ÚNICA —

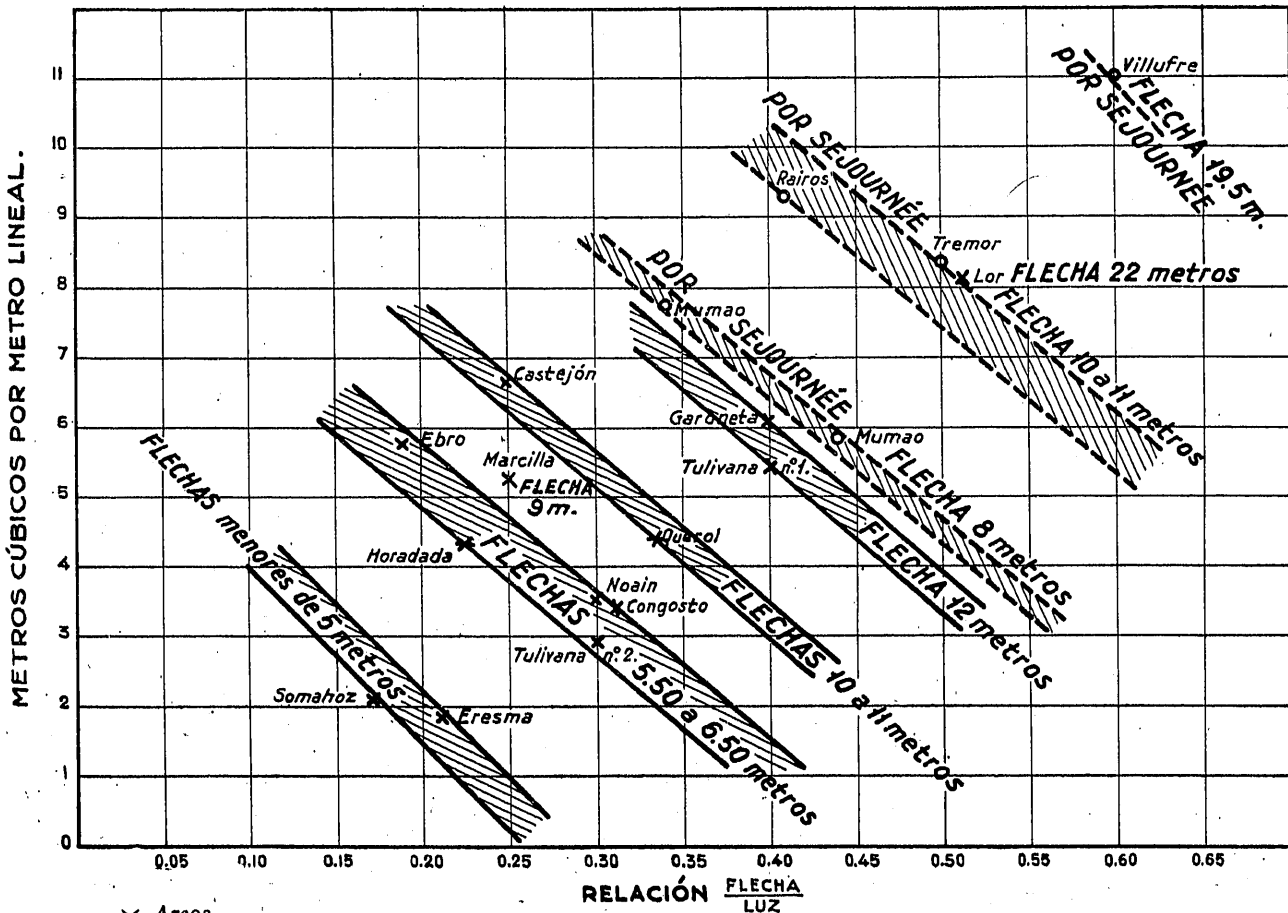


Figura 4.ª

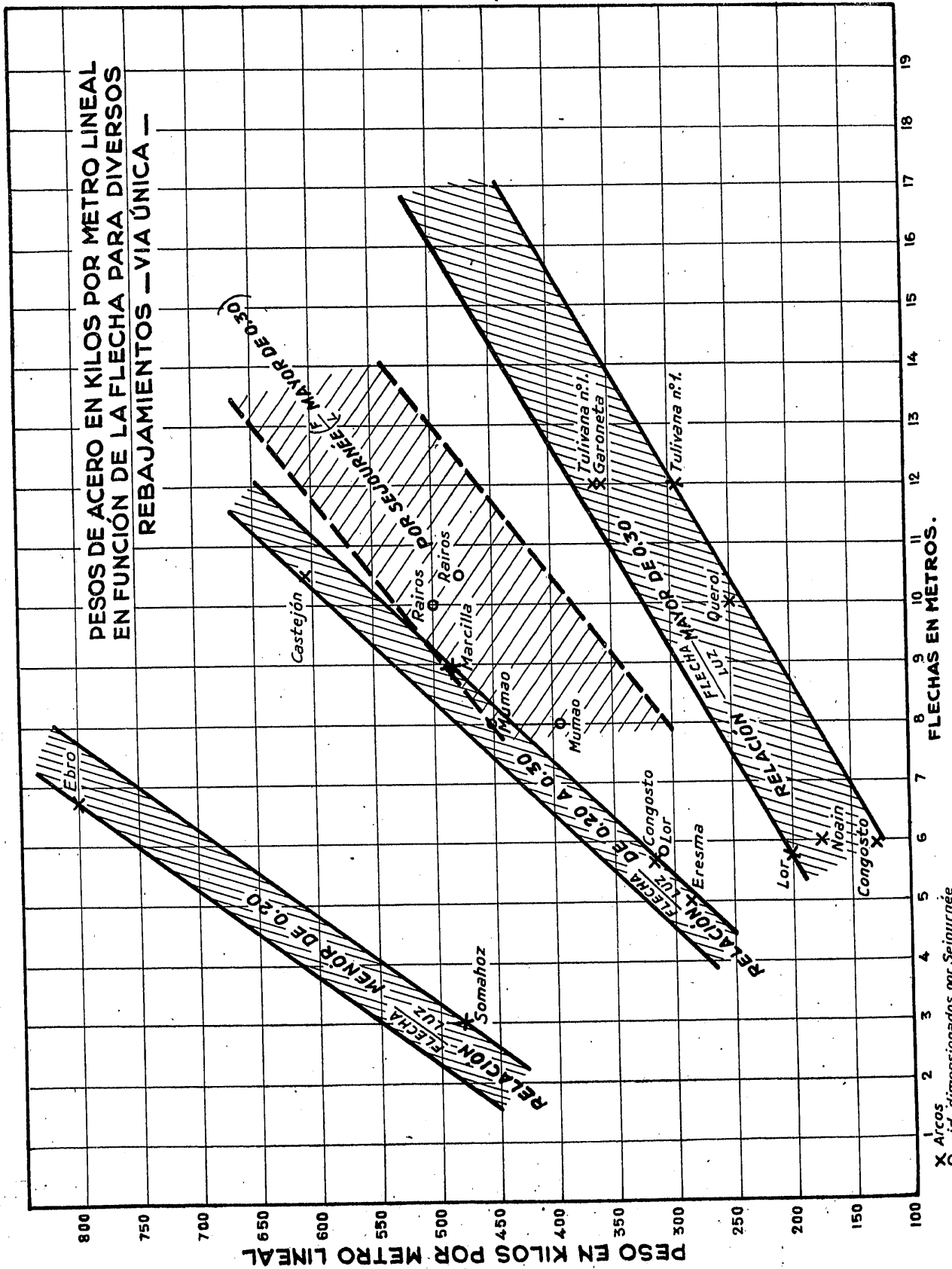


Figura 5.

b) Volumen de hormigón de la bóveda.

En gráficos anteriores hemos visto que mientras que el espesor en clave aumentaba con el rebajamiento, el espesor en arranques disminuía. Hemos de comparar, por lo tanto, los volúmenes de hormigón para ver qué solución es más económica.

Desde luego, para el mismo rebajamiento aumenta el volumen con la flecha del arco, y, por consiguiente, con la luz, como podemos apreciar en el gráfico de la figura 3.^a, en el que se indican los volúmenes de hormigón en arco de distintos rebajamientos en fun-

ción de la flecha. Más interesante es determinar para una misma altura de puente qué solución requiere menos cantidad de hormigón, y para ello construimos el gráfico de la figura 4.^a, en el que se expresan los volúmenes por metro lineal de arcos de diversas flechas en función del rebajamiento.

En dicho gráfico vemos, claramente, que para la misma altura de rasante requieren menos volumen de hormigón los arcos poco rebajados que los muy rebajados, por lo que será conveniente, desde este punto de vista, aumentar el número de arcos del puente, a fin de que su rebajamiento sea menor.

ARCOS DE HORMIGÓN ARMADO —
PESOS DE ACERO DE LA BOVEDA. (VIA ÚNICA)

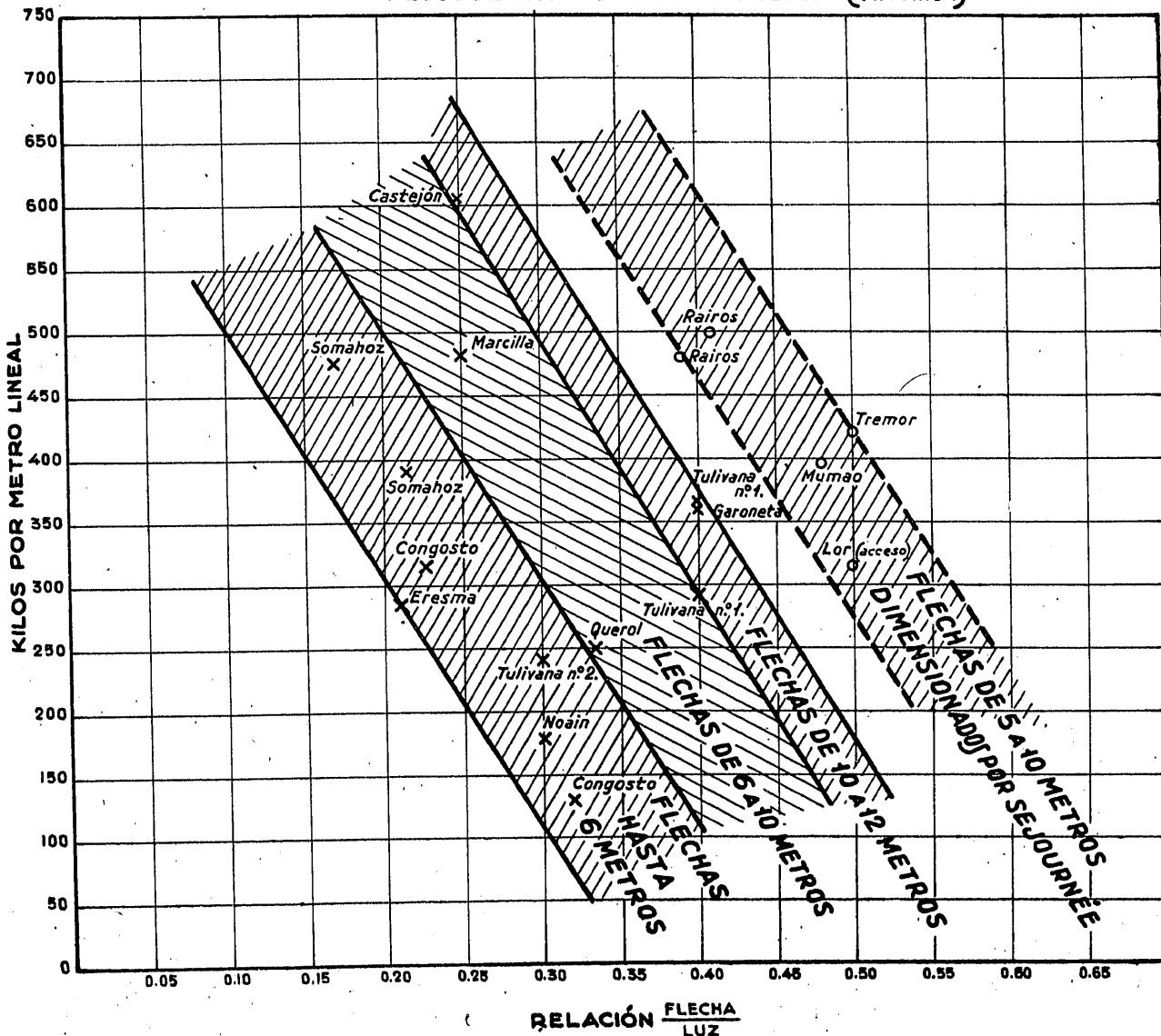


Fig. 6.^a — Pesos de acero por metro lineal en función de la relación flecha-luz para diversas flechas.

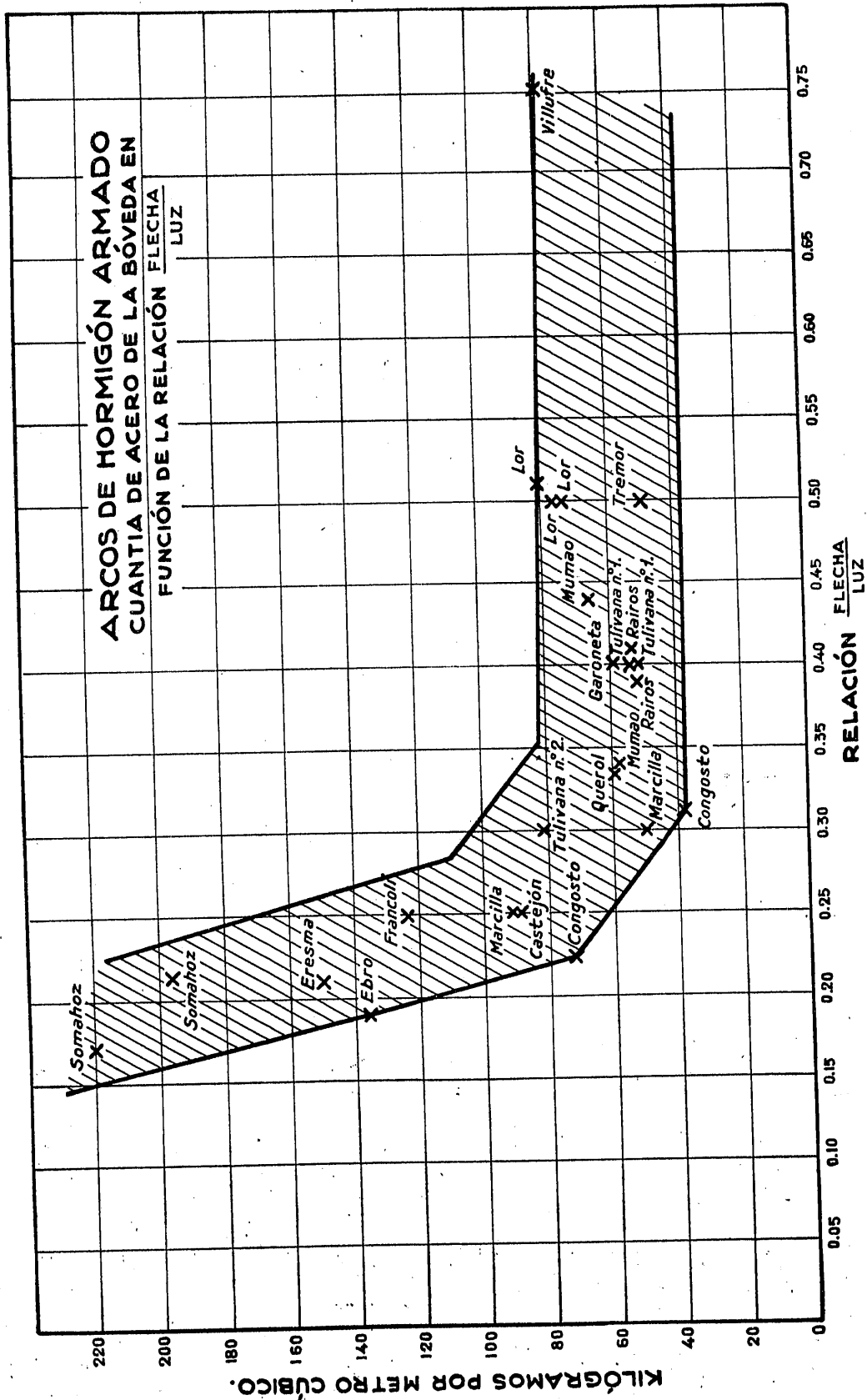


Figura 7.º

En cuanto a los arcos dimensionados por las fórmulas de Sejourné, requieren mucho mayor volumen de hormigón que los calculados por los otros procedimientos. En el gráfico de la figura 3.^a vemos que las rectas representativas de las cantidades de hormigón de arcos dimensionados por dichas fórmulas caen dentro de las zonas correspondientes a arcos en los que la relación entre la flecha y la luz es mucho menor.

También en el gráfico de la figura 4.^a puede verse que los arcos dimensionados de Sejourné, de ocho metros de flecha, están por encima de los de 12 m., y que el puente de Lor, de 22 metros de flecha, viene a tener próximamente igual cantidad de hormigón que los de Sejourné, de 10 a 11 metros de flecha. El puente de Villufre, de 19,5 metros de flecha, está, desde luego, muy por encima del citado puente de Lor.

c) Acero necesario.

Estudiemos ahora la influencia del rebajamiento en la cantidad de acero necesaria.

En el gráfico de la figura 5.^a apreciamos que, para arcos de igual rebajamiento, el peso de acero por metro lineal de puente aumenta, como es lógico, con la flecha, y, por consiguiente, con la luz del puente.

Veamos qué ocurre en arcos de la misma luz o de la misma flecha al variar el rebajamiento.

Comparando las secciones en clave y arranques de los puentes de Somahoz y Eresma, de la misma luz aproximadamente, obtenemos el cuadro siguiente:

Puente	Luz	Flecha	Rebajamiento	SECCIÓN ARMADURAS	
				Clave	Arranques
Somahoz . .	17,30	3,10	0,17	8 ϕ 30	38 ϕ 30 mm.
Eresma . . .	17,50	5,00	0,208	6 ϕ 25	23 ϕ 25 mm.

Y en los del Ebro y Marcilla, armados con armadura rígida y también próximamente de la misma luz, los angulares empleados fueron:

Puente	Luz	Flecha	Rebajamiento	SECCIÓN ARMADURAS	
				Clave	Arranques
Ebro . . .	35	6,75	0,19	12 L $\frac{100 \times 100}{10}$	12 L $\frac{100 \times 100}{10}$ + 10 ϕ 30 mm.
Marcilla.	36	9,00	0,25	8 L $\frac{100 \times 100}{10}$	8 L $\frac{100 \times 100}{10}$

Estudiemos ahora la variación del peso de acero por unidad de longitud para arcos de distintas flechas en función de la relación flecha-luz.

De la simple inspección del gráfico de la figura 6.^a, deducimos que las cantidades de acero necesarias para puentes de la misma flecha disminuyen con la relación flecha-luz, y, por tanto, aumentan con el rebajamiento. Este aumento tiene lugar a pesar de que la longitud del arco es tanto menor cuanto más rebajado sea, y es debido al desplazamiento de la línea de presiones, la cual se separa mucho de la directriz de la bóveda y exige el aumento de la sección de armaduras a fin de evitar la producción de tracciones en el hormigón.

En los arcos dimensionados por Sejourné también se ha empleado más cantidad de acero que en los restantes de la misma flecha, según puede verse fácilmente en los gráficos de las figuras 5.^a y 6.^a.

d) Cuantía.

Hemos visto en los apartados anteriores que tanto las cantidades de hormigón como las de acero aumentaban con el rebajamiento. Por eso creemos conveniente determinar las cuantías de las bóvedas y ver si también el rebajamiento hace variar los valores de las mismas.

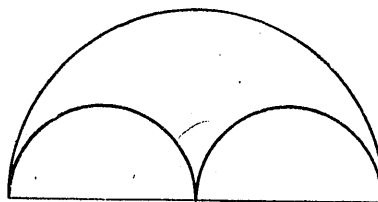


Fig. 8.^a — Comparación de arcos circulares.

En el gráfico de la figura 7.^a representamos las cuantías en kilogramos de acero por metro cúbico de hormigón en función de la relación flecha-luz para arcos de diversos tipos y luces, y calculados por diversos procedimientos. Según vemos en dicho gráfico, para arcos poco rebajados (relación flecha-luz superior a 0,35), la cuantía es prácticamente invariable. En cambio, para relaciones flecha-luz inferiores a 0,25, la cuantía crece rápidamente al aumentar el rebajamiento. Esto nos indica que, en general, no convendrá emplear arcos muy rebajados, especialmente en esta época de restricción del hierro. Como límite podemos to-

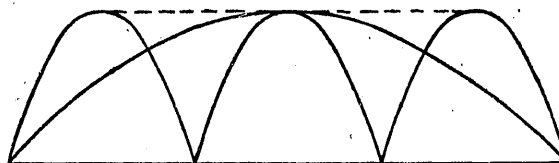


Fig. 9.^a — Comparación de arcos de la misma flecha.

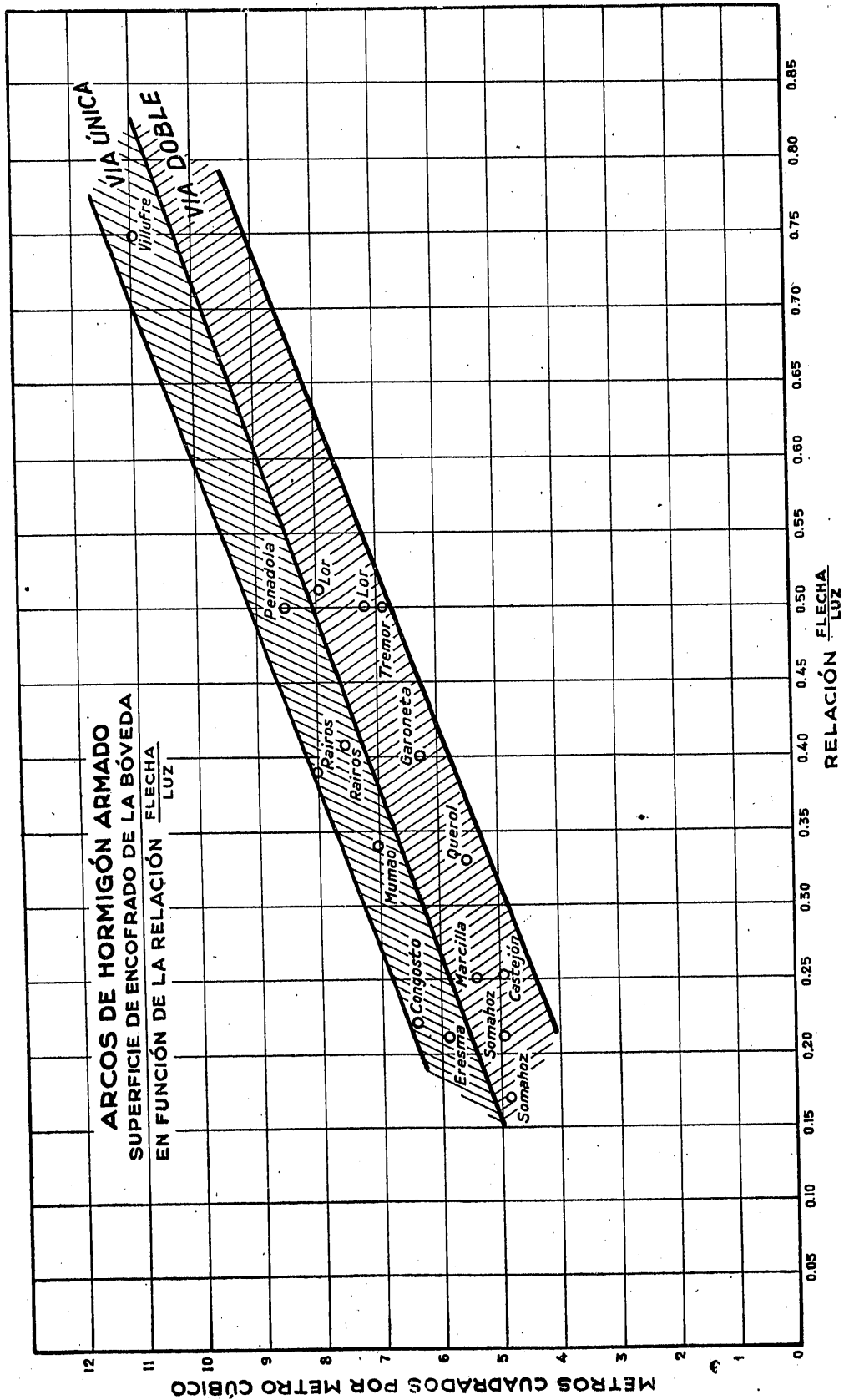


Figura 10.

mar el citado valor 0,25, es decir, un rebajamiento igual a $\frac{1}{4}$.

Dado el aumento de la cantidad de acero con el rebajamiento, no creemos deban emplearse arcos de hormigón en masa para relaciones flecha-luz inferiores a 0,40. De otro modo se llegaría a espesores excesivos y desproporcionados en las bóvedas, particularmente en clave, o se producirían grietas en el hormigón.

Los arcos sin armar tienen, desde luego, la gran ventaja de la supresión de hierro, con la consiguiente economía en la construcción. Sin embargo, en luces grandes rara vez se han empleado, entre otras razones, porque hacen preciso el empleo de cimbras, con la serie de dificultades de construcción que llevan anejas y de las que trataremos en el artículo siguiente, al hablar de las armaduras rígidas.

En cambio, en obras pequeñas, especialmente en pontones y alcantarillas, es muy ventajoso el empleo de arcos de hormigón en masa, siempre que haya altura de rasante y desagüe suficientes para construir las semicirculares o con gran flecha relativa.

Respecto a los puentes de sillería, mampostería, ladrillo, mampuestos de piedra artificial, etc., no creemos deban emplearse para puentes de grandes luces, y únicamente son aconsejables en los casos indicados para puentes de hormigón en masa. Tampoco tiene ventaja el empleo de bloques de hormigón contruídos fuera de la obra, ya que, dados los actuales medios auxiliares de colocación del hormigón y el empleo de armaduras rígidas, puede lograrse gran rapidez de construcción efectuando el hormigonado en las obras. La colocación de bloques en varias capas tenía además la ventaja de que la primera podía resistir el peso de las demás y, en caso de avenidas que se

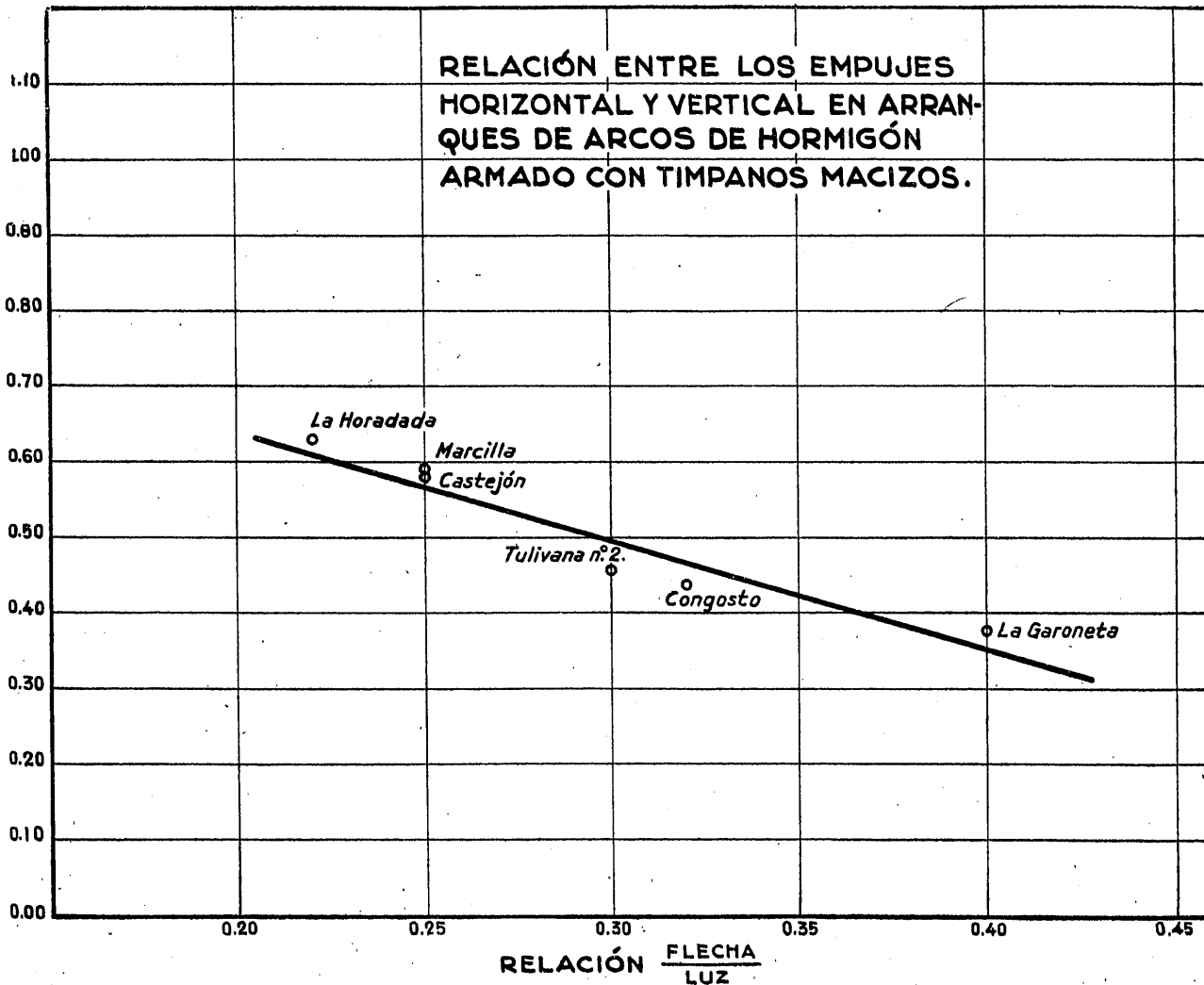


Fig. 11. — Empujes horizontal y vertical debidos al peso propio.

llevaran las cimbras, no quedaba destruido el puente. Pero también este peligro se evita, desde el comienzo de la construcción del puente, utilizando armaduras rígidas.

Por otra parte, como dijimos anteriormente, los puentes sin armaduras no son aptos para grandes rebajamientos, y siempre las juntas son puntos débiles que disminuyen la trabazón y solidez total de la estructura.

e) *Encofrado.*

Para arcos del mismo rebajamiento la superficie de encofrado es prácticamente la misma. Esto lo vemos claramente al comparar la superficie del intradós en un arco circular con la de otros dos de luz mitad (figura 8.^a). La superficie por metro lineal es, en ambos casos, $\frac{\pi \times a}{2}$, siendo a la anchura de la bóveda.

En cambio, si la flecha se mantiene constante y varía el rebajamiento (fig. 9.^a), la superficie de encofrado crece con la relación flecha-luz, como vemos en el gráfico de la figura 10. En él también apreciamos que en los puentes de vía doble la superficie por unidad de luz y de vía es menor que en los de vía única, cosa lógica al contarse una sola vez el paramento lateral de la bóveda.

La superficie de encofrado por metro cúbico de hormigón crece con la relación flecha-luz, ya que no sólo aumenta la superficie de encofrado con dicha relación, sino que también disminuye el volumen de hormigón (ver gráfico núm. 4).

f) *Desagüe.*

En puentes de la misma flecha la capacidad de desagüe aumenta con el rebajamiento debido a la disminución del número de pilas (ver figura 9.^a), ya que éstas son siempre un obstáculo para el paso de la corriente. Si el número y distribución de los apoyos no puede variarse, convendrá elevar la rasante y aumentar la flecha de los arcos.

g) *Cimentación.*

Los arcos muy rebajados dan mayores empujes horizontales que los poco rebajados, y, por consiguiente, el empuje sobre los apoyos tendrá mayor in-

clinación en aquéllos que en éstos. Debido a esta circunstancia, la cimentación habrá de ser más sólida en los arcos muy rebajados, y en el caso de que el terreno firme esté a bastante profundidad, serán precisos grandes macizos o cajones de cimentación cuyo valor puede influir notable y decisivamente en el coste total de la obra.

En el caso de sustitución de puentes metálicos por arcos de hormigón, aprovechando las pilas antiguas, impera mucho que el rebajamiento de los arcos no exceda de ciertos límites, ya que de otro modo no podrían resistir aquéllas los empujes inclinados de los arcos.

Si hay suficiente desagüe y altura de rasante, convendrá dividir el número de vanos, como ha ocurrido en los puentes de Mumao, Penadola y Rairós, citados en los artículos anteriores.

En el gráfico de la figura 11 representamos, en función del rebajamiento, la relación entre los empujes horizontal y vertical, debidos al peso propio, para arcos con tímpanos macizos, de las mismas características, y calculados por el método de Strassner.

El cociente $\frac{H}{V}$ sigue próximamente una ley lineal, disminuyendo con la relación flecha-luz, y, por tanto, aumentando con el rebajamiento de los arcos.

h) *Resumen.*

En resumen: los arcos poco rebajados exigen menos espesor de bóveda, menos cantidad de acero y de hormigón y menores macizos de cimentación que los más rebajados. Además no conviene que el rebajamiento exceda de $\frac{1}{4}$, por crecer rápidamente la cuantía a partir de dicho valor.

Sin embargo, en algunos casos especiales, habrá que construir arcos más rebajados, bien por circunstancias de desagüe en sitios donde no haya posibilidad de elevar la rasante (puentes del Ebro, Somahoz y Eresma), o por la necesidad de salvar con un solo vano toda la luz del puente. Este último caso puede presentarse si hay grandes dificultades de cimentación en el centro del río y en cambio las laderas son suficientemente fuertes para resistir los empujes de arcos muy rebajados.