

SIFÓN DEL GUADALETE

II

Bajo este mismo título, describimos en el artículo anterior (1) la obra de referencia, añadiendo algunos antecedentes y detalles que venían a justificar las disposiciones adoptadas. En el presente, hemos de fijar principalmente la atención en las condiciones de resistencia de los arcos y en los principios teóricos que sirvieron de base para determinar su forma.

Tratábase, como ya dijimos, de aprovechar para el sostenimiento del tubo la resistencia a la compresión de su sección transversal, resistencia que, de otro modo, no había de ser utilizada, pues la presión interior del agua no daría lugar en un tubo recto más que a fuerzas dirigidas en el mismo plano de la sección, tensiones o esfuerzos cortantes.

El más completo aprovechamiento de esa resistencia exigía que la compresión se repartiera uniformemente y que se mantuviera la misma de una a otra sección, pues de este modo se alcanzaría el objeto, dentro de los límites admitidos, con un mínimo de materia. Pero es claro que estas condiciones sólo podrían ser estrictamente satisfechas cuando las circunstancias en que se encontrara la obra fueran completamente invariables.

Nunca ocurre así en las obras del ingeniero: aparte de que no siempre actúan los esfuerzos que normalmente están llamadas a resistir, pueden en ocasiones ejercerse sobre ellas otros esfuerzos accidentales que, aun siendo excepcionales, deberán ser también tenidos en cuenta. La forma más adecuada para un sistema de fuerzas actuantes no será ya la que mejor responda a otro determinado sistema, y no cabrá, en definitiva, otra solución sino acomodarla a las circunstancias más frecuentes o más peligrosas, a reserva de comprobar la resistencia que ofrece en los demás casos, introduciendo los refuerzos precisos o tomando las necesarias precauciones, cuando la comprobación no condujera a resultados favorables.

Veamos, pues, cuáles son las fuerzas a que los arcos pueden encontrarse sometidos. Hay que contar, en primer lugar, con su propio peso, única fuerza de carácter permanente. Viene después la acción del agua, que habrá que considerar como casi permanente, pues darle paso es el servicio a que se destina la obra. Esta acción puede ser estática y dinámica: la acción estática puede, a su vez, descomponerse en dos: la una es el peso propio del agua; la otra es la resultante de las presiones que se ejercen sobre las secciones límites y que vienen a equilibrar parcialmente dicho peso. La acción dinámica depende de la velocidad del agua y es la fuerza que equilibra las resistencias al movimiento opuestas por las paredes del tubo.

Como fuerzas accidentales, hay que considerar las que proceden de las variaciones del medio exterior; las más importantes son las que derivan de la acción del viento y de los cambios de temperatura.

Veamos cómo se pueden calcular los esfuerzos que de estas acciones resultan en un arco $A B C$ (figu-

ra 1.^a) que se supone resistir por compresión simple y uniforme a las cargas estáticas debidas al peso propio y al del agua. Un tal arco deberá ser evidentemente simétrico con relación a la vertical $B D$ que pasa por la clave.

Llamemos:

S_0 a la superficie, expresada en centímetros cuadrados, de la sección resistente en la clave,

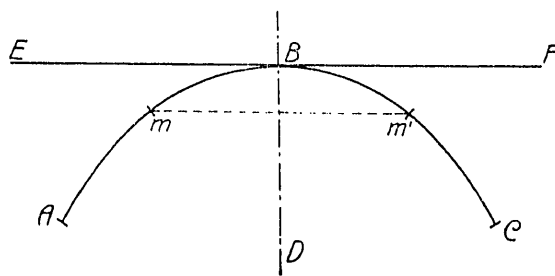


Fig. 1.ª

S a la sección en un punto cualquiera m , que será igual a la que corresponda al punto m' ,

x e y a las coordenadas del punto m referidas a los ejes $B E$ y $B D$,

s a la longitud de arco contada a lo largo de la curva eje desde la clave hasta el punto m ,

p_0 al peso del agua por metro de arco,

p_1 al peso de un cilindro de hormigón de 1 cm² de base por 1 m de altura,

l al peso total del tubo y del agua entre la clave y el punto m .

Determinemos, en primer lugar, la forma del arco. Para ello se podrá escoger arbitrariamente la compresión unitaria, que representaremos por α y supondremos expresada en kilogramos por centímetro cuadrado. Si, además, se da la sección en la clave, se tendrá la compresión total en este punto, lo que bastará ya para que la curva quede completamente determinada.

Sea, en efecto (fig. 2.^a),

$$OP = \alpha S_0$$

el empuje horizontal en la clave, y hagamos

$$PQ = l.$$

La presión total sobre la sección S , correspondiente al punto m , vendrá representada por OQ y, como la compresión unitaria debe ser en todas las secciones la misma, se tendrá

$$OQ = \alpha S.$$

Si suponemos otra sección infinitamente próxima, a ella corresponderá una compresión total OQ' que tendrá análogamente por expresión

$$OQ' = \alpha(S + dS)$$

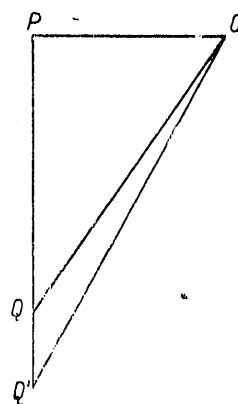


Fig. 2.ª

(1) Véase el núm. 2 393, pág. 231.

y el incremento de peso, representado por $Q Q'$, será directamente

$$QQ' = (p_0 + p_1 S) ds.$$

Pero resulta de la figura 2.^a

$$OQ^2 = OP^2 + PQ^2 \quad \overline{OQ'}^2 = \overline{OP}^2 + PQ'^2,$$

o bien

$$a^2 S^2 = a^2 S_0^2 + f^2 \quad a^2 (S + dS)^2 = a^2 S_0^2 + (f + (p_0 + p_1 S) ds)^2.$$

Esta última expresión se convierte, después de desarrollar los cálculos y de desprestigiar los infinitamente pequeños de segundo orden, en

$$a^2 (S^2 - S_0^2) + 2a^2 S dS = f^2 + 2(p_0 + p_1 S) f ds$$

y, si entre ella y la primera se elimina f y se despeja ds , se tendrá

$$ds = \frac{a S dS}{(p_0 + p_1 S) \sqrt{S^2 - S_0^2}}.$$

Como la tangente a la curva en el punto m ha de ser por definición paralela a OQ , se deducirá inme-

$$y = \frac{a}{p_1} \log \left(\frac{p_0 + p_1 S}{x p_0 + p_1 S_0} \right)$$

$$x = \frac{a S_0}{\sqrt{p_0^2 - p_1^2 S_0^2}} \log \left(\frac{p_0 + p_1 (S - \sqrt{S^2 - S_0^2}) + \sqrt{p_0^2 - p_1^2 S_0^2}}{p_0 + p_1 (S - \sqrt{S^2 - S_0^2}) - \sqrt{p_0^2 - p_1^2 S_0^2}} \cdot \frac{p_0 + p_1 S_0 - \sqrt{p_0^2 - p_1^2 S_0^2}}{p_0 + p_1 S_0 + \sqrt{p_0^2 - p_1^2 S_0^2}} \right)$$

Estas fórmulas en las que los logaritmos son neperianos, permiten calcular, en función del parámetro variable S , cuantos puntos de la curva se deseen, una vez que sean conocidas todas las constantes. La curva que de este modo resulta queda comprendida entre dos asíntotas verticales AB y CD (fig. 3.^a), pues x , que crece constantemente con S , tiende, cuando S aumenta indefinidamente hacia el límite

$$X = \frac{a S_0}{\sqrt{p_0^2 - p_1^2 S_0^2}} \log \frac{\sqrt{p_0 + p_1 S_0} + \sqrt{p_0 - p_1 S_0}}{\sqrt{p_0 + p_1 S_0} - \sqrt{p_0 - p_1 S_0}}.$$

Todas estas fórmulas se simplifican en el caso particular en que

$$S_0 = p_1 S_0$$

Se tiene entonces

$$y = \frac{a}{p_1} \log \frac{S + S_0}{2 S_0} \quad ; \quad x = \frac{a}{p_1} \sqrt{\frac{S - S_0}{S + S_0}} \\ X = \frac{a}{p_1}$$

y, si se toma como unidad de longitud el valor de X y se elimina S entre las dos expresiones de x y de y , se llega a la ecuación

$$(1 - x^2) e^y = 1$$

Esta ecuación es independiente de S_0 . Si, pues, se supusiera en el interior del arco y desprendido del resto, aunque cargando sobre él, un tubo de hormi-

$$\frac{ds}{OQ} = \frac{dx}{OP} = \frac{dy}{\sqrt{OQ^2 - OP^2}}$$

o bien

$$\frac{ds}{S} = \frac{dx}{S_0} = \frac{dy}{\sqrt{S^2 - S_0^2}}$$

y, en definitiva,

$$dx = \frac{S_0 ds}{S} = \frac{a S_0 ds}{(p_0 + p_1 S) \sqrt{S^2 - S_0^2}}$$

$$dy = \frac{\sqrt{S^2 - S_0^2}}{S} ds = \frac{a dS}{p_0 + p_1 S}$$

Ambas diferenciales son fácilmente integrables, la última directamente, la primera haciendo uso de la conocida sustitución

$$u = S - \sqrt{S^2 - S_0^2}$$

que viene a reducirla a una diferencial racional.

Efectuando todos los cálculos, que después de lo dicho no será preciso detallar, y teniendo en cuenta que x e y se anulan para $S = S_0$, se llega finalmente a

gón de sección constante e igual a $\frac{S_0}{2}$, la curva a que se llegara aplicando el método explicado sería

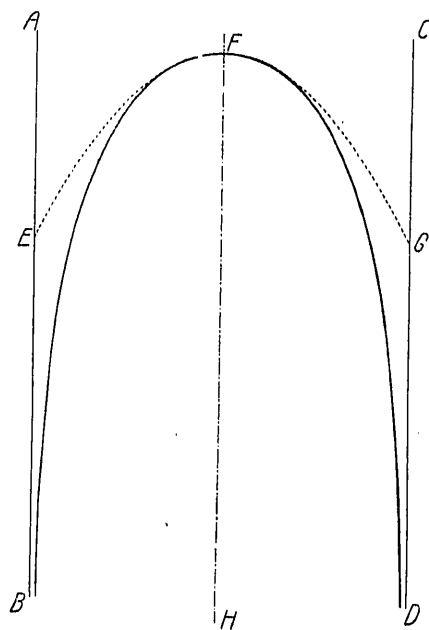


Fig. 3.^a

exactamente la misma. Los espesores de hormigón serían, sin embargo, distintos: en el primitivo cálculo, la sección es

$$S = S_0 (2e^{\frac{p_1 y}{a}} - 1)$$

en el nuevo, la sección necesaria sería

$$\Sigma_1 = \frac{S_0}{2} (2e^{\frac{p_1 y}{\alpha}} - 1),$$

y, si a ella se añadiera la sección constante de la su-
puesta carga, se tendría para sección total

$$\Sigma = \Sigma_1 + \frac{S_0}{2} = S_0 e^{\frac{p_1 y}{\alpha}} = S - S_0 (e^{-\frac{p_1 y}{\alpha}} - 1)$$

La diferencia entre Σ y S es tanto más pequeña
cuanto menor sea y , y se anula rigurosamente en la
clave; como, además, y crece al principio muy lenta-
mente, resultará que, en una gran porción del arco,
 Σ y S coincidirán sensiblemente, sobre todo si la
relación $\frac{p_1}{\alpha}$ es suficientemente pequeña.

Si se considera ahora incorporado al arco, para los
efectos de la resistencia, el tubo que considerábamos
desprendido, como los centros de las secciones no
habrán variado, sólo se tendrá una disminución de
la carga unitaria que, en la clave, quedará reducida
exactamente a la mitad. Ahora bien: ésto será lo
que ocurra cuando el sifón quede vacío, y por eso es
de elegir esta solución particular que, satisfaciendo
plenamente en el caso de tubo lleno a las condicio-
nes impuestas, las cumple también muy aproxima-
damente cuando llega a vaciarse.

En el cuadro que sigue, se dan los valores de y que
corresponden en este caso a los distintos valores de
 x de centésima en centésima, tomando como unidad
para unos y otros el cociente $\frac{\alpha}{p_1}$. Es también para

este caso para el que se ha trazado la curva de la figu-
ra 3.^a. Examinando las cifras del cuadro, se observa
que, para valores pequeños de x , y varía aproxima-
damente como el cuadrado de x , y la curva se con-
funde con una parábola que se indica de puntos en la
figura. Fácil hubiera sido deducir esta consecuencia
de la fórmula

$$(1 - x^2)e^y = 1,$$

pues, para valores pequeños de y , se podrá escribir

$$e^y = 1 + y$$

o, sustituyendo,

$$y = x^2(1 + y);$$

y como, en esta hipótesis, han de ser pequeños x e y ,
el término preponderante será el primero, y se ten-
drá sensiblemente

$$y = x^2$$

La coincidencia, como se ve en la figura, es bas-
tante aproximada, mientras la flecha del arco no
exceda mucho del quinto de la luz.

Valores de y en función de x tomando para unidad $\frac{\alpha}{p_1}$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,0	0,0000	0,0001	0,0004	0,0009	0,0016	0,0025	0,0036	0,0049	0,0064	0,0081
1	0,0100	0,0122	0,0145	0,0170	0,0198	0,0228	0,0259	0,0293	0,0329	0,0368
2	0,0408	0,0451	0,0496	0,0543	0,0593	0,0645	0,0700	0,0757	0,0816	0,0878
3	0,0943	0,0987	0,1080	0,1153	0,1229	0,1307	0,1388	0,1472	0,1559	0,1650
4	0,1744	0,1841	0,1941	0,2045	0,2152	0,2263	0,2377	0,2496	0,2619	0,2746
5	0,2877	0,3012	0,3152	0,3297	0,3447	0,3603	0,3764	0,3940	0,4102	0,4279
6	0,4463	0,4654	0,4852	0,5057	0,5269	0,5490	0,5720	0,5959	0,6207	0,6465
7	0,6733	0,7012	0,7303	0,7608	0,7928	0,8267	0,8618	0,8987	0,9375	0,9783
8	1,0217	1,0674	1,1160	1,1676	1,2228	1,2819	1,3455	1,4143	1,4890	1,5707
9	1,6607	1,7608	1,8734	2,0027	2,1507	2,3269	2,5459	2,8285	3,2289	3,9170

Examinemos ahora el efecto de las fuerzas que no
hemos tomado en cuenta al determinar la curva. La
primera es la presión interior del líquido. Si supone-
mos un trozo de arco terminado por dos secciones
simétricas normales y el agua en reposo, los esfuer-
zos que se desarrollarán en estas secciones pasarán
exactamente por su centro y serán tangentes a la
curva eje; no tendrán, pues, otro efecto que reducir
la compresión del hormigón, la cual variará liger-
amente de la clave a los arranques, aunque mante-
niéndose en cada sección uniformemente repartida.
Si llamamos h_0 a la carga de agua en la clave, la
cuantía absoluta de la reducción será

$$p_0(h_0 + y),$$

y por centímetro cuadrado

$$\frac{p_0(h_0 + y)}{S}$$

En nuestro caso, la disminución de la presión uni-
taria en la clave es próximamente de $\frac{1}{10}$ de la calcu-
lada cuando no se toma en cuenta este efecto.

Con el agua en movimiento, el nivel piezométrico
es menor y, por consiguiente, también la reducción;
pero, además, ésta es disimétrica, si bien se trata de
una disimetría mínima que apenas si altera la posi-
ción de la curva de presiones.

Más importante es la disimetría del sistema de
fuerzas, al llenarse el sifón; pero, aun en ese caso, la
curva de presiones puede mantenerse dentro del nú-
cleo central, sin dar, por lo tanto, origen a tensiones.

Tampoco la acción del viento, aun para las máxi-
mas velocidades registradas en la localidad, exigirá
en nuestro caso el empleo de armaduras. Dos distin-
tos efectos pueden considerarse en esta acción: tien-
de el primero a volcar el arco entero, arrancándolo
de los estribos y haciéndolo girar alrededor de un
eje horizontal, mientras que el segundo pugna por
romperle en dos, haciendo girar cada parte alrededor

de ejes verticales que pasaran por los arranques. En el primer caso, el arco habría de resistir como una ménsula; en el segundo, como una viga; en los dos, se originarían pares que tendrían sus máximos respectivamente en los arranques, y en la clave. Si estos pares obraran aisladamente, darían lugar en las secciones correspondientes a compresiones y a tensiones; pero éstas son siempre inferiores a la compresión general a que el arco está sometido, por razón de su peso propio. No ocurriría siempre así; si se tratara ya de un sifón más pequeño, en que la superficie tuviera más importancia en relación con el volumen, el predominio de la compresión podría no tener lugar y, por eso, es un punto que convendrá comprobar en cada caso.

Los únicos esfuerzos que aconsejan el empleo de armaduras longitudinales son los procedentes de los cambios de temperatura. De no usarlas, la contracción de la obra durante el invierno acarrearía tensiones que no serían resistidas por el hormigón y originarían grietas que, dada la forma de los arcos,

nunca podrían ser causa de ruina, porque, al presentarse la grieta, cesaría la tensión y, mediante una deformación ligera, el arco, dividido en dovelas, tomaría en seguida una nueva forma de equilibrio. Pero si la ruina no sería de temer, las grietas podrían ser causa de fugas, sobre todo si llegaba a concentrarse en algunas pocas el total espesor de la contracción.

Para evitarlo, se han empleado armaduras longitudinales, que se han reducido a reforzar el diámetro de los redondos, que son necesarios en todo caso para mantener la separación debida entre las armaduras transversales. La discusión completa de este punto, sobre el que no se ha dicho todavía la última palabra, y el cálculo preciso, que ha servido de base para la determinación del número y diámetro de los hierros, exigiría más espacio del que hoy podemos disponer. Tal vez volvamos sobre él en otro artículo.

Pedro M. GONZÁLEZ QUIJANO
Ex director del pantano de Guadalcacín.

Las comunicaciones ferroviarias de Norte a Sur

Con el título de «Perspectivas ferroviarias de Sur a Norte», ha publicado en esta REVISTA mi querido compañero Sr. Ruiz López, en colaboración con el comandante de Ingenieros militares Sr. La Llave, un artículo que analiza diversas cuestiones relacionadas con los ferrocarriles directos que pueden establecerse entre el extremo occidental de la frontera francesa y Madrid, y cuyo objeto es unir, por el medio más rápido, económico y perfecto, París con Madrid. En él se hacen determinadas consideraciones que suponen un prejuicio para la adopción de soluciones que se desvían al Oeste de la línea recta París-Irún-Madrid, y como aun no teniendo valor alguno los argumentos en el citado artículo expuestos, el hecho de haber pertenecido el Sr. Ruiz López a la Comisión oficial que estudió el directo de Madrid a la frontera francesa puede dar a dichas manifestaciones un determinado valor para aquéllos que no hayan seguido este complejo asunto con la atención requerida por sus múltiples facetas, hemos creído oportuno puntualizar algunos de sus extremos.

Refiriéndose a la conveniencia de cambiar el ancho de vía normal español por el centro europeo, se estima, desde luego, la necesidad de transformar la totalidad de la red española, aunque «si ahora se construyera la primera línea férrea (con ancho francés), tampoco es de creer que se levantará ninguna voz (de protesta)», que entraña una apreciación completamente equivocada. La Comisión burgalesa de Iniciativas ferroviarias sigue el movimiento en actitud expectante y reanudaría su campaña en el momento mismo que seriamente se tratase de ejecutar una línea de interés general de 1,44 m de latitud en España sin que *previamente se procediese a la modificación de las redes férreas de España y Portugal* (1). Conocido el gran movimiento de opinión que

lleva consigo, no está de más recordar el comentario breve, pero muy satisfactorio para dicha Comisión, que la importante revista francesa *Génie Civil* hizo cuando dió cuenta de la reseña de sus publicaciones, y es que representaba el *punto de vista español*, es decir, que defiende los intereses nacionales en contraposición, claro está, con los centroeuropeos y en concordancia con los de Portugal, que no pueden abandonarse, pues sería suicida unirnos más íntimamente con Francia si ello lleva consigo una mayor separación con Portugal. Un comentario de esta naturaleza, hecho por revista de la seriedad de la citada, y precisamente por los nacionales del Estado que para su imperialismo le convendría una *servidumbre de paso* por España, tiene un valor decisivo en las discusiones de familia que se producen en el interior de la Península.

Otro punto de vista de la cuestión es el militar; no descuidó la Comisión de Iniciativas en la defensa de los trazados este extremo, y sabido es que se publicó un estudio del comandante de ingenieros militares Sr. Casado (1), en el que se exponían las razones que en relación con la defensa nacional están a favor de la solución directa Madrid-Burgos-Irún-París. Indudablemente estos estudios no han sido conocidos por el Sr. La Llave, pues nada dice de ellos, si bien es verdad que a la vez plantea otras cuestiones relacionadas con la tercera línea de defensa en relación con la frontera francesa.

La frase de Anatole France de que el arte militar se reduce a cruzar las *cordilleras por los puertos y los ríos por los vados* es una gran verdad cuando, además, se agrega la conclusión de que si la acción guerrera se prepara para una ofensiva, procede facilitar todos estos pasos, y, en cambio, en una acción defensiva es conveniente dificultarlos. Ahora bien: España, ¿debe prepararse para acciones ofensivas

(1) Véase la Memoria de dicha Comisión presentada al Consejo internacional de Ciencias, de Bilbao, titulada *Necesidad de conservar un solo ancho de vía normal en los ferrocarriles de la Península Ibérica*.

(1) *El ferrocarril directo París-Algeciras en relación con la defensa nacional*, por el ingeniero militar D. Juan Casado.