
ANALES

DEL

INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

PUENTES DE CONCRETO CON BÓVEDAS

A TRIPLE ARTICULACION

PROYECTADOS PARA EL FERROCARRIL EN CONSTRUCCION DE ALCONES A PICHILEMU

Seccion: paradero del "Cardonal" a túnel del "Arbol."

POR

JERARDO ATEAGA A.

Ingeniero Civil

I

Diversas razones, que a continuacion espondremos, nos han hecho creer en la conveniencia de dar al Instituto de Ingenieros de Chile una reseña de los proyectos de puentes que hemos confeccionado para esta línea en estudio i construccion.

Empezaremos por advertir que, aunque terminados en 1901, hasta la fecha en que escribimos estas líneas no han sido sometidos a la aprobacion del Consejo de Obras Públicas, por no estar terminada aun la memoria de los demas trabajos de la seccion

Las bóvedas de estos puentes son de un sistema relativamente nuevo—no aplicado hasta ahora en Chile—que traduce un gran adelanto como aplicacion de la Estabilidad a las bóvedas de albañilería, a la vez que aumenta su radio económico de aplicacion: *en igualdad de circunstancias, las bóvedas del nuevo tipo resultan de dimensiones menores que las comunes i pueden salvar, como caso corriente, luces triples que las alcanzadas por estas últimas.*

Al introducirlas en Chile, traerian otras ventajas económicas por los materiales de construccion que entran en ellas: piedra en bloques o chancada de cantera i cascajo partido de río o estero, que reemplazarian en mayor proporcion de casos que actualmente al fierro importado de las vigas metálicas, con tanta largueza empleadas hasta la fecha en el país.

Todavía otra ventaja, i es la gran duracion—diríamos ilimitada—de la bóveda, a poca costa, en oposicion a la limitada de las vigas metálicas, que continuamente requieren cuidados i renovacion de algunos elementos, hechos a veces tarde, mal i nunca.

Al presentar los proyectos creemos ofrecer un ejemplo práctico corroborando lo dicho, pues estimamos que estas bóvedas, por sus luces moderadas i pequeños rebajos—dentro del sistema—constituyen casos de los mas desfavorables a su aplicacion económica; i apesar de ello, *son una tercera parte, por lo ménos, mas económicas* que los tramos metálicos correspondientes.

Aprovecharemos tambien la ocasion para explicar el procedimiento detallado de cálculo que hemos seguido, que nos resultó sencillo i práctico, creyendo contribuir con ello a evitar las molestias i pérdidas de tiempo que experimentamos en los comienzos del estudio; pues los libros i revistas que hemos podido consultar dan una marcha jeneral de cálculo conveniente para las bóvedas de mucha luz i a gran rebajo, pero inadecuada para las luces i rebajos pequeños o medianos (limitados a 30 m. i a $\frac{1}{4}$ en nuestro caso), por la preponderancia que toman las cargas no uniformemente repartidas.

La importancia de la cuestion que hemos delineado parece ser acreedora a la atencion i discusion del Instituto; i estamos seguros que, ademas de reconocerse sus ventajas económicas de aplicacion, se obtendria como resultado inmediato una justa apreciacion de sus atrayentes cualidades de ejecucion i de estabilidad definitiva, desconocidas desgraciadamente por muchos de los compañeros, talvez por falta de oportunidad para estudiarlas.

Advertiremos a este respecto, que las hemos visto tratadas en los últimos cursos de Resistencia de Materiales de la Universidad del Estado, en forma de proyectos de clase, i que el distinguido profesor del ramo señor Köning, las consideró en nuestro caso, segun lo oimos personalmente, como las mas apropiadas.

Finalmente, hemos visto con desesperacion de nuestra parte, que este estudio nos resultase mas estenso de lo que creíamos i deseábamos, apesar de la concision con que se han tratado las cuestiones no relacionadas primordialmente con la triple articulacion. Que nos sirva de disculpa i justificacion el íntimo convencimiento que tenemos de la bondad de este sistema de bóvedas, i de que la vulgarizacion de su teoría entre los compañeros beneficiará a muchos puentes futuros del pais.

II.—DATOS RELACIONADOS CON LA UBICACION

Antes de entrar de lleno al estudio de las bóvedas, daremos los datos preliminares relativos a los puentes.

Los proyectos son tres:

1.º Puente ferroviario, trocha ancha, sobre el estero San Miguel (k. 6 a partir de Alcones).

2.º Puente ferroviario, trocha ancha, sobre el estero Chivato (k. 5 a partir de Alcones.)

3.º Paso superior (tipo), para carretas i piños de animales. Habrá tres en la seccion.

1.—Puente sobre el estero San Miguel

Ubicacion.—Está impuesta por el trazado definitivo de la línea, cuya rasante es horizontal i recta, i forma con el eje del cauce un ángulo de 45° . Tal oblicuidad, junto con la facilidad de acomodo de las márgenes, impone como mui económica la rectificacion del estero, canalizándolo en direccion normal al trazado i aprovechando sus taludes para la defensa de los estribos. La seccion canalizada, en aguas máximas, será de 25 m. (ancho medio) $\times$ 1.50 m., con pendiente uniforme de 2/1000; lo que da $\Omega = 37.5 \text{ m.}^2$, $U = 1.75 \text{ m.}$, $Q = 65 \text{ m.}^3$

Aunque no hai aforo de las mayores creces (año 1900, pues en el invierno de 1901, que esperábamos medirlas, no se presentaron), dedujimos el caudal máximo, indirectamente, por dos consideraciones distintas:

a) por las señales que dejaron las creces de 1900 en un trecho mas o ménos regular del estero hácia aguas-arriba de la ubicacion, que está encausado entre dos filas de álamos tapiadas con zarzamora;

b) Por el hecho comprobado que las creces no arrastran un banco de cascajo suelto situado inmediatamente aguas-abajo del puente, lo que supone una velocidad media no mayor de 0.80 m., i por la seccion mojada de aguas vivas (el cauce mayor es mui irregular) deducida gracias a un estacon colocado para indicar la mayor altura que alcanzaron en esta parte las creces de 1900.

De estas dos maneras se obtuvo 47 m.³ i 44 m.³ respectivamente. Luego los 65 m.³ de la seccion canalizada dejarán márgen suficiente a las eventualidades.

Por lo demas, las creces son debidas únicamente a las grandes lluvias chubascosas i repercuten i desaparecen con relativa prontitud, por la impermeabilidad i configuracion escarpada de la hoya.

La mayor parte del año el estero es un hilo de agua.

Desembocadura.—Como se ha dicho, es de 25 m. útiles.

Luz.—Para salvar esa desembocadura se necesita una luz de 30 m. (sea que se trate de una bóveda o de una viga recta), en atencion a la forma de los estribos i a la inclinacion de su paramento interior.

Altura i largo.—La rasante pasa a 14.60 m. encima del estiaje. Los terraplenes sobre las márgenes oriente i poniente tienen respectivamente 10.80 m. i 12.80 m. de altura media.

La longitud total del puente resulta de 67.50 m.

Rebajo.—En el caso de adoptar bóveda de albañilería conviene aproximarse lo mas posible al *medio punto*, dada la gran altura i luz, para favorecer principalmente a las fundaciones.

El rebajo de $\frac{1}{3}$ (flecha de 10 m.) deja mui bajos los arranques i dificulta la rectificacion del estero; el de $\frac{1}{4}$ (7.50 m. de flecha) los coloca un poco altos i hace aumentar el empuje, lo que no conviene por estar mui bajo el plano de fundacion.

El rebajo intermedio de $\frac{1}{3.75}$ (flecha de 8 m.) es el mas adecuado en atencion a ambas consideraciones.

Fundacion.—Un pozo de reconocimiento abierto en el sitio de ubicacion del estribo oriente dió, respecto al nivel de estiaje, 4.50 m. de cascajo grueso en poca agua, i a partir de esta profundidad tosca de regular dureza. Se dejó solo empezado el pozo del estribo poniente, porque la pequeña bomba de que disponíamos no bastó al agotamiento: por configuracion del estero el agua se carga a esta márjen. Pero se puede decir, dada la forma del valle i la poca distancia entre los estribos, que la superficie de la tosca será próximamente horizontal, i que las aguas filtradas se escurren sobre esta capa impermeable. Haciendo descansar las fundaciones a 1 m. de profundidad en ella, se tendrá un buen asiento.

2. — Puente sobre el estero Chivato

Ubicacion.—Impuesta tambien por el trazado de la línea. Su oblicuidad con el estero es de 86° , la que se llevará a 90° para el trozo canalizado. La seccion mojada máxima de esta rectificacion será de 10 m. (ancho medio) $\times$ 1.50 m. con pendiente uniforme de 1/1000, obteniéndose: $\Omega = 15 \text{ m}^2$, $U = 1,00 \text{ m.}$, $Q = 15 \text{ m}^3$.

El aforo deducido se basó en una velocidad media máxima de 0.60 m. i una seccion mojada activa de 20 m^2 que es la mayor seccion total en el trecho de ubicacion.

Se justifica esta menor velocidad, por las irregularidades del cauce, que actuando sobre un caudal mas débil que el del otro estero se hacen sentir mas tambien, lo que está de acuerdo con las informaciones suministradas por los ribeños. Así se llega a un caudal de 12 m^3 , inferior al de la seccion mojada canalizada.

La hoya es análoga i contigua a la del estero San Miguel, e idéntico en ámbos el régimen de las creces.

Desembocadura.—Es, entónces, de 10 m.

Luz.—De 15 m., por parecidas consideraciones a las del otro puente.

Altura i largo.—La rasante, que es tambien horizontal i recta, pasa a 11.50 m sobre el estiaje, i la altura del terraplen en las márgenes es, término aproximado, de 9.50 m.

La longitud total: 44,50 m.

Rebajo.—Discutiendo el punto como en el caso anterior, se llega al de $\frac{1}{3}$ (flecha de 5 m.) por mas conveniente.

Fundacion.—Un pozo de reconocimiento abierto en la ubicacion del estribo oriente dió, bajo el nivel del estiaje, 2 m. de cascajo apretado, i a continuacion roca bastante dura. La profundizacion se llevó hasta 1.50 m. en este manto. Apareció mas agua filtrada que en el otro estero, seguramente por ser mas sentado i estar próximo a la falda oriente de la hoya. Dada la proximidad entre los estribos es de suponer que aparecerá el mismo terreno en ámbos, por lo que juzgamos inútil reconocer el segundo.

Llevados los estribos hasta 1 m. bajo la superficie de la roca se tendrá excelente apoyo para ellos.

3.—*Paso superior* (tipo)

Desembocadura.—*Luz.*—*Rebajo.*—Siendo el tipo mas conveniente de paso superior la bóveda *a estribos perdidos* en los chaflanes del corte, por dejar ancha i despejada vista al maquinista, hemos fijado las siguientes dimensiones, partiendo del ancho normal (7.65 m.) de formacion del corte con chaflanes a 45°:

Luz o desembocadura = 18 m.

$$\text{Rebajo} = \frac{1}{6} \dots \dots (\text{flecha de 3 m.})$$

Altura i largo.—El intradós de la bóveda queda a 6.50 m. de la rasante, i el piso a 7.65 m.

La longitud total es de 23.95 m.

Fundacion.—Los pozos de reconocimiento abiertos en los cortes que serán salvados por los pasos superiores, han dejado ver un terreno apretado de maicillo i greda, en seco, que dará una buena base.

III.—ELECCION DEL SISTEMA DE PUENTES

De los datos anteriores se deduce que ambos puentes se encuentran en condiciones análogas de establecimiento, esceptuando la luz.

Por las referencias de ubicacion—luz, desembocadura, altura disponible, suelo de fundacion,—pueden aplicarse dos sistemas de puentes de carácter definitivo: *bóveda de albañilería* o la *viga recta metálica*. Dentro del primer sistema, una bóveda *empotrada* con luz de 30 m. (San Miguel) pasa el máximo de las luces adoptadas comunmente. La bóveda de 15 m. del Chivato es corriente.

Una bóveda empotrada de 30 m. aunque pudiera competir económicamente con el tramo metálico, i a pesar de las excelentes cualidades de la albañilería, no es de elegir aunque existan otras mayores, pues su adopcion será siempre calificada de *atrevida*, tanto por las incertidumbres de orden técnico como por las dificultades de construccion e imprevistos de su funcionamiento *bajo carga*, i será preciso que se presentaran razones mui poderosas de otro orden, que no existen en nuestro caso, para aceptar esta solucion.

Respecto a la bóveda de 15 m., que estaria en mejores condiciones jenerales de competencia, la eleccion puede quedar sometida al caso anterior, por razones de unidad del conjunto.

Eliminada la bóveda empotrada, queda por comparar, dentro de una eleccion razonada, el tramo metálico con la bóveda de albañilería *a tres articulaciones*, que le han sido apropiadas del arco metálico de este sistema.

Como problema de equilibrio *estático*, el arco a triple articulacion es un caso simple, cual la viga recta sobre dos apoyos, que la Resistencia de Materiales lo resuelve en toda su jeneralidad con las solas *seis ecuaciones universales* de la Mecánica, sin necesidad de

recurrir a las ecuaciones adicionales de la *deformacion*, cuyo fundamento teórico es hipotético.

Dejando para mas adelante las razones que justifican en todo i por todo la apropiacion de la teoría del arco simple a triple articulacion a las bóvedas del mismo sistema, encerrando las curvas de presiones en el núcleo central, diremos que para la aplicacion de ellas se cuenta con una experiencia de veinte años, mediante la cual han llegado a tal grado de perfeccionamiento, que por la confeccion de sus proyectos, el modo de comportarse en la construccion i en el descimbramiento, i despues de sometida a las cargas, variaciones de temperatura i movilidad de los estribos, realizan el acuerdo entre su teoría i el funcionamiento efectivo, dentro por supuesto, del concepto de la Estabilidad, que se basa en fuertes coeficientes de seguridad. Tal confianza explica que se hayan construido en los últimos años, en Europa, bóvedas de 50 m. de luz, rebajadas a $\frac{1}{10}$, con espesores inconcebibles para las empotradas i tasas de trabajo que han hecho bajar de 50 a 10 el coeficiente de seguridad. Al final de esta memoria, como un anexo, se hará una rápida reseña de las que han sido construidas.

Este progreso realizado en las bóvedas de albañilería les permite competir con los tramos metálicos de grandes luces.

De un estudio publicado (1) por el ingeniero jefe de puentes i calzadas Mr. H. Tavernier, estractamos el siguiente cuadro que da una aproximacion del costo de ambas clases de puentes, para luz de 50 m. i bajo via férrea.

$$\text{Luz} = 50 \text{ m.} - \text{Rebajo} = \frac{6}{50}$$

BÓVEDA DE ALBAÑILERÍA ARTICULADA			Bov. de alb. sin articulaciones	Puente metálico
Con juntas metálicas	Con juntas de cem. líquido	Con juntas comunes		
COEFICIENTE DE GASTO				
1	1.33	1.38	1.64	1.39
GASTO POR METRO CUADRADO				
169fr	224fr	232fr	276fr	234fr

Advertiremos nuevamente, que las condiciones de luz i rebajo en que se basa este cuadro son las mas favorables a la triple articulacion.

(1) *Annales des Ponts et Chaussées*, tercer trim. 1899.

Como en los puentes que estudiamos, dichos elementos son menores, el cuadro pier- de de hecho su valor de comparacion. Sin embargo, se puede decir fundadamente, que las bóvedas estan mas favorecidas en Chile que en Europa, por el aumento del precio del fierro, que resulta fuera de proporcion con lo que se recarga la bóveda por el cemento importado.

Estimando en 0.40 fr. el kilógramo de fierro colocado para Europa (dato medio que corrientemente hemos visto en las crónicas de las obras construidas), i en \$ 0.40 de 18 d. para Chile, por lo ménos para los puentes de esta línea, se llega al coeficiente de recargo 0.9.

El cemento, que jeneralmente viene como lastre de los buques pagando flete insigni- ficante, i que, ademas, representa la mitad aproximada del precio de un m³ de albañile- ría, no creemos que tenga un coeficiente de recargo mayor de 0.4. Luego, se puede decir, pecando de prudentes i atendiendo al mayor precio i menor habilidad en la obra de mano, que el dato correspondiente *al m³ de albañilería* no pasará de 0.5 lo que dejaria a favor de esta última una diferencia de recargo de 0.4. Apuntamos este número sin ninguna pretension, i solo como una apreciacion global del juicio que nos merece el cuadro ante- rior aplicado a Chile.

A falta de datos precisos, hemos hecho el estudio comparativo, calculando definiti- vamente las bóvedas i deduciendo los tramos metálicos por la fórmula de *De-Leber*, úni- ca, en su objeto, que da el peso del tramo en funcion de la sobrecarga móvil; i nos ha hecho fuerza esta razon, porque el *tren tipo chileno* es mas pesado que los europeos a los cuales se refieren las demas.

Dicha fórmula es:

$$p = 0,01q \left[\frac{40}{3} \sqrt{1 + \frac{3}{8}l} - 1 \right]$$

en la cual *p*, es el peso del m. l. de puente.

q, la sobrecarga » » »

l, la luz aparente.

Para el tramo de 30 m. la sobrecarga móvil uniformemente repartida por m. l. vale como se verá despues, 7,000 kg. (incluyendo 15 por ciento para tomar en cuenta los efec- tos dinámicos, segun recomienda el Congreso de Ferrocarriles de 1900, Paris) con un ancho de 4,60 m. entre barandas. El peso total será, por consiguiente.

$$P = 30 p = 30 \times 30197 \text{ kg.} = 95910 \text{ kg.}$$

El kilógramo de fierro colocado puede estimarse para
estos puentes en \$ 0.40, lo que da para la viga sobre
el estero San Miguel..... \$ 39.364

La bóveda de concreto, con articulaciones, tímpanos, parapetos i demas detalles
vale:

Concreto de bóveda	m ³ . 336,300 a \$ 35.....	\$	11.770
» de tímpanos, etc. »	240 a » 16.....		3.840
Chapa, estuco, relleno.....			1.000
Articulaciones (fundicion, acero, plomo).....			8.890
Suma.....		\$	25.410
Resulta a favor de la bóveda una economía de.....		\$	13.954

Los resultados para el puente de 15 m. son:

Viga metálica, $P=39.600$ kg. a \$ 0.40.....	\$	15.840
Concreto de bóveda m ³ . 102,69 a \$ 35.....	\$	3.594
Tímpanos, parapetos, etc. » 95 a » 16.....		1.520
Estuco, chapa, relleno.....		500
Articulaciones.....		3.150
Suma.....	\$	8.764
Diferencia a favor de la bóveda.....	\$	7.076

Se ve que en uno i otro caso la economía que resulta de adoptar la bóveda es considerable respecto al tramo metálico, conformándose a nuestra opinion sobre el cuadro de Tavernier.

Como las condiciones de ubicacion son favorables al empleo de bóvedas, i como estas tienen ventajas positivas sobre el puente metálico respecto a conservacion i duracion, se concluye que, bajo todo punto de vista, conviene su aplicacion a los puentes de esta línea.

En cuanto a los estribos, que representan el mayor gasto parcial, son mas económicos tambien para la bóveda, a igualdad de presiones i de centracion de estas. Basta mirar la disposicion que hemos adoptado i hacer un croquis de la correspondiente al tramo, en las mismas condiciones, para que resalte la diferencia.

En consecuencia final, hemos adoptado puentes con bóveda a triple articulacion.

IV. BÓVEDAS A TRIPLE ARTICULACION

1.—Consideraciones jenerales sobre las bóvedas

El método de Mery comunmente seguido para calcular las bóvedas empotradas, es un procedimiento gráfico de *verificacion* de la estabilidad, pues sus dimensiones se deducen de antemano por medio de fórmulas empíricas. Consiste dicho método, como es mui sabido, en trazar en el cuerpo de la bóveda la curva de presiones de la solicitacion mas desfavorable i deducir de ella las tasas de trabajo por las fórmulas de la flexion compuesta. El procedimiento en sí es mui sencillo, pero se basa en la hipótesis: que una vez des-cimbrada la bóveda, esto es, trabajando como tal i en equilibrio estático, la resultante

en las secciones de clave i juntas de ruptura pasa a *un tercio* del trasdos e intrados respectivamente, lo que equivale a suponer en ellas la *lei del triángulo*.

Esa doble condicion *a fortiori*, es puramente convencional, i aunque se la admita como tal, conviene precisar el alcance de sus deducciones. Desde luego, a la operacion de descimbrar la bóveda se le puede dar todo el cuidado necesario para considerarla, en sí misma, sin influencia perturbatriz apreciable. Su efecto es ponerla gradualmente en presion hasta que se produzcan las reacciones que el equilibrio estático determina. Antes del descimbramiento estas reacciones son nulas, porque las de la cimbra equilibran la pesantez, pero en cuanto empieza el descenso las segundas van debilitándose al par que nacen i se desarrollan gradualmente las de la bóveda, i cuando la sustitucion de unas por otras es completa, la cimbra está de hecho separada.

Durante ese tiempo la bóveda descende tambien, i la magnitud de este descenso depende de los materiales, modo i cuidado de construccion, i en parte no ménos principal de la oportunidad del descimbramiento i del grado de invariabilidad de los estribos. I como es imposible apreciar—mucho ménos prefijar—la influencia relativa de tan desligadas circunstancias, el descenso dará siempre un resultado complejo.

Ahora, es sabido que durante este movimiento los centros de presion en la clave i juntas de ruptura se separan del eje neutro de la bóveda hácia el trasdos e intrados respectivamente, hasta tanto se constituya en el interior la curba de equilibrio *estable* correspondiente al estado de sollicitacion. El juego combinado de aquellas circunstancias producirá en cada caso particular una mayor o menor separacion de esos centros i su magnitud escapará a toda observacion. Se puede decir entónces, que los resultados *visibles* del descimbramiento, a los cuales se suele dar corrientemente carácter de juicio sobre el grado permanente de estabilidad de la construccion, no envuelven, en principio, enseñanza precisa; pero sí son mui útiles para cerrar la monografía de la bóveda i formarse respecto a ella—por comparacion, apelando a la estensa crónica de estas obras,—una *impresion de confianza* o algo mas, pero que nunca será una evidencia.

El procedimiento en cuestion ha dado en la práctica, jeneralmente, bóvedas estables, i se cree que las dimensiones resultan un poco exajeradas, dejando márgen al imprevisto.

(Continuará)

