

El ferrocarril de Alicante a Alcoy y los grandes viaductos de hormigón armado

Antecedentes

Comprendido en el plan urgente de ferrocarriles elaborado por el actual ministro de Fomento, excelentísimo señor conde de Guadalhorce, el ferrocarril de Alicante a Alcoy ha sido el primero de todos ellos que ha iniciado la construcción.

Fué adjudicada la contrata en 27 de noviembre de 1926, y las obras se empezaron en 8 de marzo de 1928, debiendo terminarse en el 8 de septiembre de 1931. La contrata comprende la explanación general, obras de fábrica y túneles, siendo el contratista D. Ildefonso G. Fierro, oficialmente representado por nuestro compañero D. José María Serra. Primitivamente, el trazado partía del mismo Alicante y se desarrollaba paralelamente y casi pegado al ferrocarril Alicante-Madrid de la Compañía M. Z. A. en el trozo comprendido desde Alicante hasta el apeadero de Agost de este último; pero considerando la Superioridad que se podría ahorrar la construcción de este trozo de ferrocarril, se dictó una Real orden con fecha de 5 de mayo de 1926, en la que se ordenaba acertadamente que el nuevo ferrocarril empalmara en el apeadero de Agost con la red de M. Z. A., con lo cual se consiguió un ahorro en la construcción de 15,300 km. De este modo la longitud del trazado, que era de 81,500 km, quedó reducido a 66,200 kilómetros, siendo el presupuesto de contrata de 28 233 209,21 pesetas.

Descripción geográfica y geológica del terreno

Entre Alicante y Alcoy, que en línea recta hay, aproximadamente, una distancia de 40 km, existe una barrera que, por su proximidad al mar, resulta poco menos que infranqueable para cualquier vía de comunicación, pues a muy corta distancia de la costa hay que ganar altitudes considerables. Esta barrera está formada por la sierra llamada La Carrasqueta, la cual, por el lado de Levante, se une con las ramificaciones de la sierra Aitana, y por la parte de Poniente, con las estribaciones del monte Maimó. Las alturas que se registran en estas sierras oscilan alrededor de 1 200 m.

Atravesar La Carrasqueta por su punto más bajo, que está a unos 800 m de altura, hubiera dado lugar a un túnel de algunos kilómetros de longitud, aparte de que su proximidad a la costa no permitía obtener el suficiente desarrollo para salvarla. En cambio, en el Maimó se presenta un collado llamado del Hort, de 600 m de altura, que permite llevar por ese sitio el trazado, habiendo sido suficiente la construcción de un túnel de 360 metros.

En líneas generales, y empezando por el lado de Alcoy, el trazado parte de las agujas de salida de la estación del Norte del ferrocarril Játiba-Alcoy, sigue por la falda de la sierra de San Cristóbal, cortando una serie de barrancadas profundas; remonta después el valle del río Polop y por su margen izquierda cruza este río, que, aunque de poco caudal, y no permanente, constituye una depresión enorme, que se salva con el viaducto del mismo nombre; pasa después el trazado a la margen derecha del Polop y,

subiendo constantemente, se llega al barranco llamado de la Batalla, que es muy sinuoso y de márgenes muy quebradas. El trazado va por la margen izquierda del barranco, y la dificultad que ofrece el terreno se salva con dos grandes túneles de 900 y 1 020 m, respectivamente, habiendo entre ambos un barranco secundario, denominado de Las Siete Lunas, donde se proyecta otro viaducto. A la salida del túnel más largo, o sea en el origen del barranco de la Batalla, se encuentra un terreno relativamente llano; pero el trazado sigue subiendo para ganar el collado del Mal Añ, que es el punto más alto de la línea. Como las alturas respectivas del Mal Añ y del origen del ferrocarril son de 854,40 y 562,40 m, resulta que en ese trozo, que tiene 16 km de longitud, se han subido 292 m.

Llegado ya al punto alto del Mal Añ, el trazado empieza a bajar constantemente, dirigiéndose hacia los pueblos de Ibi, Castalla y Tibi, en los cuales se proyectan estaciones. En todo este trozo el terreno es bueno, pero la ejecución es muy engorrosa, por el gran número de caminos, acequias y regueras que se cruzan, pues se trata de un valle muy fértil y cultivado de un modo exquisito. Pasado el término de Ibi, el trazado empieza a encontrarse con las estribaciones del monte Maimó con una serie inacabable de barrancos, hasta llegar al Collado del Hort, que se cruza con una cota de 600 m, como decimos antes. En este collado tiene origen el barranco del mismo nombre, en el cual parece que se hayan dado cita toda suerte de dificultades, tanto de orden técnico para el estudio y replanteo, como de orden práctico y constructivo. El trazado sigue por la margen derecha del barranco, y aunque baja constantemente, como la altura es todavía de 600 m y el mar está ya muy próximo, con el fin de ganar desarrollo se tiene que verificar un gran rodeo dentro del término de Agost para llegar a empalmar con el ferrocarril de M. Z. A. en el apeadero de Agost, cuya cota es de 218,30 m. En todo este gran rodeo, los principales accidentes que se encuentran son los barrancos del Fontanar y Forn del Vidre, en los cuales se proyectan grandes viaductos.

Desde el punto de vista geológico, el terreno comprendido entre Alcoy y Castalla pertenece al mioceno, estando constituida su base por arcillas y margas descompuestas en la superficie y compactas en el interior; el piso superior está formado por rocas calizas algo blandas y cuarteadas, que suministran buenos materiales para mampostería ordinaria y hormigón, pero muy malas para mampostería careada y sillería. Desde Castalla hasta el collado del Hort domina el terreno triásico, con capas alternadas de arcilla y arenisca floja; se presentan algunas manchas del cretáceo con calizas de buena calidad; pero están distantes del trazado, no pudiéndose aprovechar más que las que se encuentran en algunas bolsadas de acarreo. En el collado del Hort y barranco del mismo nombre, el terreno, en 5 ó 6 km de longitud, es puramente triásico con afloramientos de yeso cristalizado alternando con margas sumamente des-

compuestas, deleznable y movedizas; y como al mismo tiempo hay algo de humedad, resulta de todo ello la acumulación de dificultades a que antes aludimos. Pasado este último trozo, lo restante hasta Agost, el terreno que atraviesa el trazado vuelve a ser el mioceno, alternando con grandes bolsadas de acarreo.

Hecha a grandes rasgos la descripción topográfica y geológica del terreno que atraviesa el trazado del ferrocarril de Alicante a Alcoy, volvamos a ocuparnos de la parte más interesante que tiene el ferrocarril, que es el trozo comprendido entre la estación del Norte y el origen del barranco de la Batalla, de 11 km de longitud. Como decimos antes, el terreno corresponde al mioceno y está constituido por margas descompuestas en su base y calizas blandas por encima. La característica de este terreno es que apenas iniciados los barrancos, se convierten éstos en depresiones profundas y anchas que no se pueden salvar con obras pequeñas de fábrica, sino que hay necesidad de construir grandes viaductos. Así ocurre con los barrancos del Zinc, Uxola y Siete Lunas, y con mayor razón con los ríos Barchell y Polop. Aparte de esto, en la margen derecha del Polop y en 3 km de longitud, el terreno se vuelve movedizo por el deslizamiento de una capa de algunos metros de espesor, de margas descompuestas sobre otra capa impermeable, sobre la cual discurre una especie de jaboncillo que se forma a expensas de la humedad constante y propia del terreno. Este corrimiento del terreno, que forzosamente habrá que sujetar, plantea un problema curiosísimo (aunque no nuevo en ferrocarriles), que se ha resuelto satisfactoriamente empleando procedimientos ingeniosos que por sí solos merecen dedicarles un artículo completo.

También es digno de anotar que en el túnel del barranco de la Batalla, que tiene 1 020 metros de longitud, al practicar la galería de avance apareció una cueva de 30 m de larga por 10 m de alta y 4 m de ancha, habiendo sido atravesada en el sentido de su longitud. Las paredes de la cueva eran extremadamente débiles y formadas por calizas cuarteadas, con la agravante de que dos metros por encima del techo de la misma pasa la carretera de Alcoy a Alicante, y, por tanto, al practicarse el ensanche de la galería de avance se corrió el inminente peligro de que se derrumbaran las paredes, con el consiguiente hundimiento de la carretera e interrupción del tráfico, pues lo quebrado del terreno no permitía hacer un desvío provisional de la misma. Esta grave dificultad se salvó satisfactoriamente con derroche de ingenio y valor, sin tener nada que lamentar y con un coste insignificante. Otros problemas no menos interesantes se han presentado al abrir la trinchera del Mal Añ y al atravesar el collado del Hort; pero de todo ello no voy a ocuparme, por no alargar excesivamente este artículo, pues cada uno de esos problemas merece ser descrito detalladamente.

Nos vamos a ocupar sólo de lo que consideramos más instructivo, o sea de los grandes viaductos que se han proyectado para salvar los barrancos Forn del Vidre, Fontanar, Siete Lunas, ríos Polop y Barchell y barrancos Uxola y Zinc.

Descripción de los viaductos

Se han proyectado todos de hormigón armado, excepto el situado sobre el barranco de la Uxola, que es de hormigón en masa. Adjunto insertamos un cro-

quis del conjunto de los viaductos, para que así se forme mejor idea de su composición.

El viaducto sobre el río Polop es el más grande de todos los proyectados. Tiene 230 m de longitud y la altura máxima sobre el fondo del cauce es de 46 m. Consta de cinco arcos de medio punto de hormigón armado, de 30 m de luz, y tres arcos laterales de avenida, también de medio punto, de hormigón en masa, de 12 m de luz. Dadas las extraordinarias dimensiones que tiene este viaducto y lo excepcional de la obra, pues sin exageración alguna se puede asegurar que en su género es único en España y quizá el mayor de Europa, pensamos dedicarle un capítulo completo, para describir los múltiples detalles interesantes de su construcción.

El viaducto sobre el barranco del Fontanar es el que sigue en importancia al de Polop, pues tiene 190 m de longitud y altura máxima de 30 m. La forma suave de la ladera derecha del barranco no permitió el empleo de grandes arcos, y por eso se proyectó un solo arco de medio punto de hormigón armado, de 30 m de luz, acompañado de cinco arcos laterales de hormigón en masa, de 12 m de luz. Completan el conjunto tres tramos rectos de hormigón armado, de 17 m de luz. Todo el terreno sobre el cual se ha cimentado es de acarreo y constituido por capas alternadas de arena y grava, encontrando un piso aceptable a una profundidad media de 7 m.

Siguiendo el orden establecido, viene ahora en importancia el viaducto sobre el barranco del Forn del Vidre, que tiene una longitud de 167 m y altura máxima de 40 m. Está constituido por dos arcos centrales de medio punto de hormigón armado, de 30 m de luz, y cuatro arcos de avenida de medio punto, de hormigón en masa, de 12 m de luz. El terreno de cimentación es magnífico, pues está constituido por rocas calizas compactas, por lo cual las profundidades no pasan de 2 m, y sólo por excepción se llega a 3 m en la pila central, motivado por el buzanamiento hacia el barranco de las capas de caliza.

El viaducto sobre el río Barchell tiene 150 m de longitud y 30 m de altura máxima. Está constituido por dos arcos centrales de medio punto de hormigón armado, de 30 m de luz, y tres tramos rectos, también de hormigón armado, de 17 m de luz. Las laderas del río las forman margas descompuestas en la superficie, que se van endureciendo a medida que se profundiza. En el fondo del río aflora la marga dura, para cuya excavación se ha necesitado el empleo de explosivos. La profundidad media de cimentación ha sido de 4 m, excepto en la pila central, que está emplazada sobre el fondo del barranco, en la cual, por la razón anterior, se ha profundizado sólo 2 metros, o sea lo suficiente para que el cemento quedara bien empotrado en el terreno.

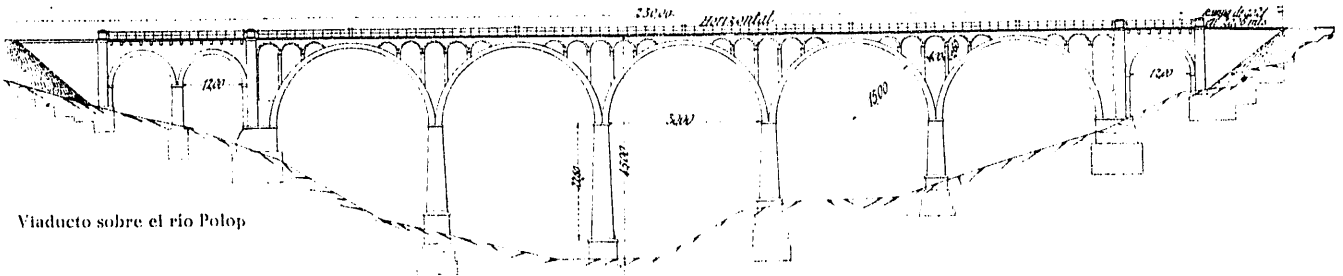
Viene a continuación el viaducto sobre el barranco de las Siete Lunas. Este nombre tan poético proviene de que sobre este barranco hay construido un puente en la carretera de Alcoy a Alicante, que está formado por siete arcos, que en la localidad se les llama lunas. Tiene el viaducto 69 m de longitud y 20 m de altura, estando emplazado 20 m aguas arriba del puente de la carretera y 8 m más alto que ésta, por lo que presenta un aspecto muy pintoresco visto desde la carretera. El viaducto está constituido por un gran arco rebajado de hormigón armado, de 44 m de luz y 8,80 m de flecha, con lo que el rebajamiento es de $\frac{1}{5}$. Las laderas, lo mismo que el fondo del barran-

co, están formadas por roca caliza de buena calidad, y como, además, son aquéllas muy escarpadas, estaba indicado que se salvara toda la barrancada con un solo arco. La bóveda ha resultado de 44 m de luz y es del tipo de estribos perdidos, ya que nunca se podrían construir éstos tan robustos como los que nos ofrece la naturaleza rocosa del terreno.

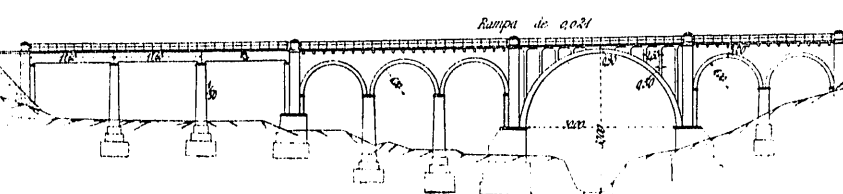
El viaducto sobre el barranco Uxola tiene 77 m de longitud y 25 m de altura. Está constituido por cua-

muy duro, que ha permitido proyectar un gran arco rebajado al $\frac{1}{5}$, de 40 m de luz y 8 m de flecha. La bóveda es también del tipo de estribos perdidos.

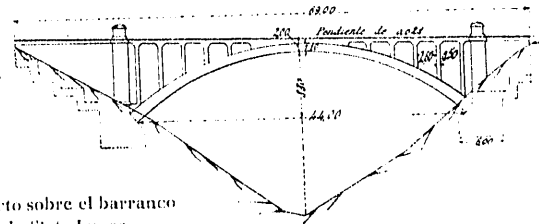
Hecha a grandes rasgos la descripción de los viaductos, vamos a detenemos un poco en el más importante de todos ellos, que es el emplazado sobre el río Polop. Las laderas de este río están constituidas por margas muy descompuestas, que vienen acompañadas con bastante abundancia de manantiales



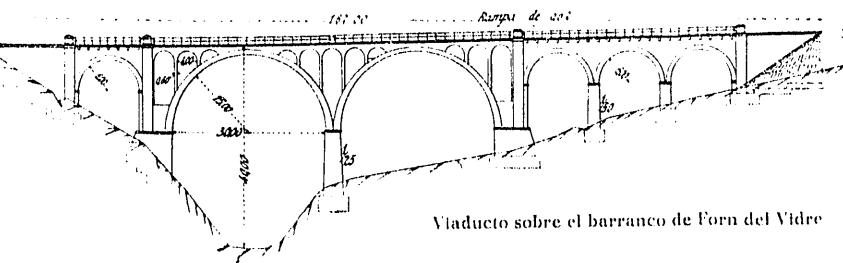
Viaducto sobre el río Polop



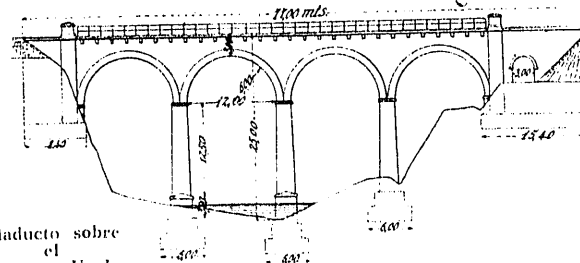
Viaducto sobre el barranco de Fontanar



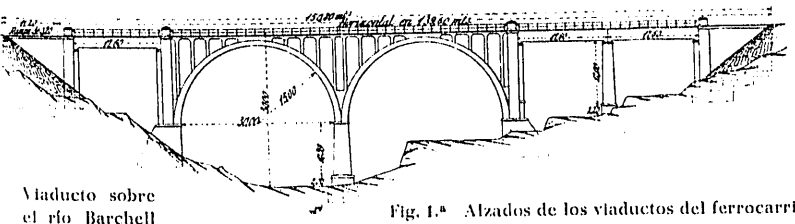
Viaducto sobre el barranco de Siete Lunas



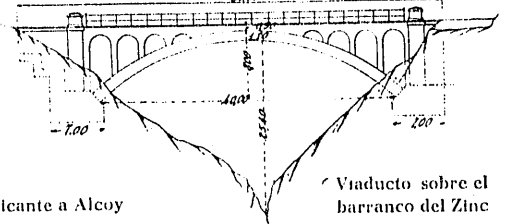
Viaducto sobre el barranco de Forn del Vidre



Viaducto sobre el barranco Uxola



Viaducto sobre el río Barchell



Viaducto sobre el barranco del Zinc

Fig. 1.ª Alzados de los viaductos del ferrocarril de Alicante a Alcoy

tro arcos de medio punto, de hormigón en masa, de 12 m de luz. Todo el terreno es de acarreo consolidado y se ha tenido que profundizar hasta encontrar un piso satisfactorio. Lo interesante en este viaducto ha sido la cimentación de la pila central, que está emplazada sobre el fondo mismo del barranco. A los 5 m de profundidad se encontró un cauce antiguo del barranco, que cruzaba diagonalmente al actual y, por tanto, a la pila, acompañado, además, de un potente manantial que socavaba el terreno, con grave peligro de las cimentaciones vecinas que estaban ya construídas. Se tuvo que captar y desviar el manantial para poder profundizar un metro más la excavación, y además ello permitió construir un muro de sostenimiento del terreno socavable, apoyándolo contra el macizo de fundación.

Y por último, el viaducto sobre el barranco del Zinc tiene 56 m de longitud y 25 m de altura. Análogamente al Siete Lunas, las laderas son muy escarpadas y constituidas por un conglomerado calizo

que les obliga a tomar un talud muy tendido, siendo este el motivo de la enorme depresión que forma el río, a pesar del poco caudal que por él discurre.

Hemos dicho antes que el viaducto se compone de cinco arcos empotrados de hormigón armado, de medio punto, de 30 m de luz. Las bóvedas tienen todas 3,60 m de anchura, 0,90 m de espesor en la clave y 1,40 m de espesor en los arranques. Sobre las bóvedas insisten los montantes, que están separados a 4 m, siendo su sección de 0,60 x 0,30 m. Los montantes más largos van arriostrados con una vigueta, y además, la unión de aquéllos con la bóveda se hace por medio de chaflanes de 1 m de altura por 0,50 m de base. Sobre los montantes van los largueros, que tienen una altura de 1,10 m, que para la luz que salvan; de 4 m, es algo exagerada; pero se ha hecho así por cuestión de estética. El espesor de los mismos es de 0,30 m, igual que el de los montantes. En los demás viaductos los largueros tienen 0,50 m de altura; siendo la luz que salvan de 2,50 m. V, por úl-

timo, sobre los largueros, y formando parte integrante de los mismos, va el forjado o tablero, que está constituido por una losa plana de 5 m de anchura

vez de varillas para el armado de las bóvedas tiene la inmensa ventaja de suprimir esos verdaderos bosques de madera que se necesitan para andamios y cimbras, lo cual representa una partida importantísima del presupuesto. Esta ventaja es la que se ha querido aprovechar en el viaducto del río Polop, cuya altura es de 46 m, y por analogía se ha extendido también a los restantes viaductos, ya que sus alturas oscilan entre 25 y 40 m.

Sin embargo, por razones prácticas de montaje de armaduras y encofrados, se han utilizado para cada bóveda tres cimbras ligerísimas en arco de celosía de 2 m de altura, estando constituidas las cabezas por dos tablonces de 0,20 x 0,08 m y el alma por cruce de tablas de 0,20 x 0,04 m. Sobre las tres cerchas se apoya el entablonado, con vuelos bastante salientes para apoyar sobre ellos el resto de los encofrados.

La armadura de las bóvedas se compone de cuatro cerchas rígidas de celosía, que están constituidas cada una por cuatro angulares de 120 x 120 x 10 mm y diagonales de 100 x 100 x 10 mm. Estas cerchas son las estrictamente precisas para resistir el peso propio de la bóveda, el peso de los obreros, la trepidación del apisonado, etc.; pero no son suficientes para sostener el peso de la sobrecarga móvil. Por eso se suplementan con varillas redondas de 35 mm de diámetro en el número y posición que indican los croquis adjuntos.

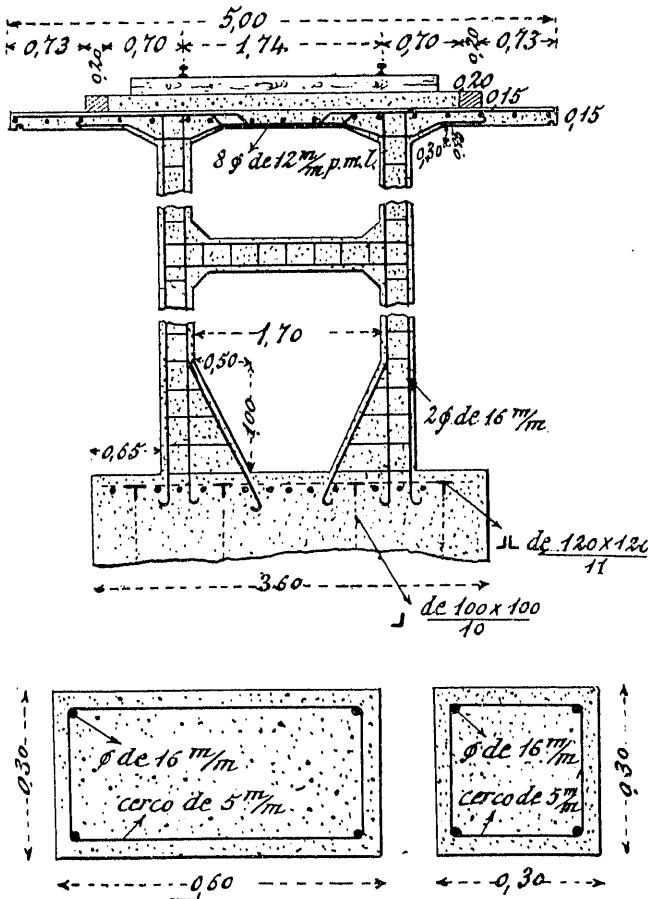


Fig. 2. Corte transversal del tramo; sección de un montante y sección de riostra

por 0,15 m de espesor. Las uniones de todas las piezas entre sí se hacen con chaflanes planos, excepto en las de los largueros con los montantes, que se hacen con arcos de medio punto de 4 m de luz. Un detalle común a los tableros de todos los viaductos es que se ponen dos bordillos de hormigón de 0,15 x 0,20 m, que sirven para contener el balasto e impedir que éste invada las aceras o paseos laterales.

El armado de las bóvedas se ha hecho siguiendo el sistema preconizado por el ilustre profesor de la Escuela de Ingenieros de Caminos D. Eugenio Ribera. Consiste este sistema en el empleo de cerchas rígidas en la cantidad suficiente para sostener la bóveda durante su construcción. Pendiente de las cerchas, y bien sujeto a las cabezas inferiores de las mismas, se establece un entablonado siguiendo la curva de intradós de la bóveda. Complementando este entablonado con unas paredes laterales hasta la altura del trasdós, queda así establecido el encofrado de la bóveda, pudiendo de este modo suprimirse cimbras y andamios. Cuando la altura del viaducto es grande, lo mismo que cuando se trata de salvar un embalse o un río caudaloso, el empleo de cerchas rígidas en

VIADUCTO SOBRE EL RIO POLOP

Cálculo de una bóveda empotrada en medio punto, de hormigón armado, de 30 metros de luz

La bóveda que tratamos de calcular es de medio punto, de 30 m de luz entre el intradós de los arranques y 3,60 m de anchura. Sobre ella van los montantes de los tímpanos, que transmiten directamente el peso del resto del tramo, el peso de la superestructura, comprendiendo en ella balasto, traviesas, carriles, etc., etc., y la sobrecarga móvil.

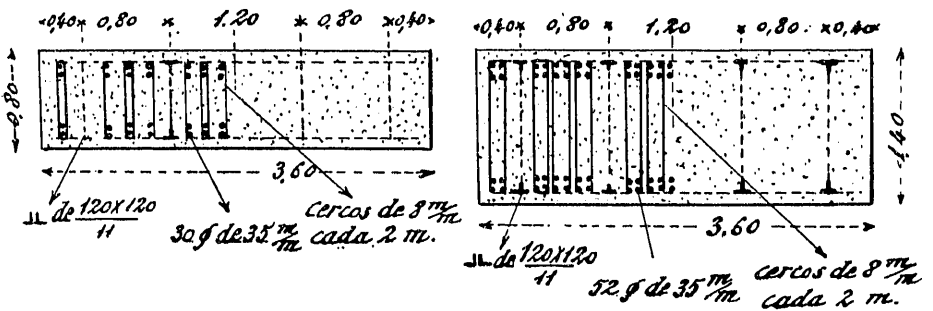


Fig. 3. Corte de la bóveda por la clave

Corte de la bóveda por los arranques

Las características de las bóvedas son las siguientes:

Luz real	30 m
Idem teórica o de cálculo	30,80 »
Anchura uniforme	3,60 »
Espesor en la clave	0,90 »
Idem en los arranques	1,40 »

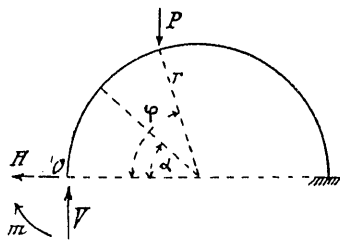
FÓRMULAS DE CÁLCULO

Caso de un peso aislado

Para establecer las fórmulas de cálculo nos atendremos estrictamente a los procedimientos de la teoría

de elasticidad que expone el Sr. Zafra en su obra *Cálculo de estructuras y Construcciones de hormigón armado*.

Supongamos una bóveda en arco de medio punto empotrada en sus arranques de radio r y cargada con un peso aislado P , definida su posición por el ángulo φ , que forma con la horizontal el radio que va al punto de aplicación. (Adoptamos las coordenadas polares para facilitar el cálculo.) Llamemos m , H y V las reacciones desconocidas en el empotramiento izquierdo, que son, respectivamente, el momento flector de empotramiento, componente horizontal o empuje y componente vertical.



Según el adjunto croquis, y despreciando el trabajo elástico debido a los esfuerzos normales y tangenciales, lo cual impunemente puede hacerse en los arcos de medio punto, la teoría de elasticidad nos proporciona el siguiente sistema de ecuaciones:

les, lo cual impunemente puede hacerse en los arcos de medio punto, la teoría de elasticidad nos proporciona el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{EI} \int_0^\varphi M_0^1 \frac{dM_0^1}{dm} ds + \frac{1}{EI} \int_0^\varphi M_1^2 \frac{dM_1^2}{dm} ds &= 0 \\ \frac{1}{EI} \int_0^\varphi M_0^1 \frac{dM_0^1}{dH} ds + \frac{1}{EI} \int_0^\varphi M_1^2 \frac{dM_1^2}{dH} ds &= 0 \\ \frac{1}{EI} \int_0^\varphi M_0^1 \frac{dM_0^1}{dV} ds + \frac{1}{EI} \int_0^\varphi M_1^2 \frac{dM_1^2}{dV} ds &= 0 \end{aligned} \right\} [1]$$

Por M_0^1 y M_1^2 llamamos a las expresiones generales del momento flector entre los puntos 0 y 1 y entre 1 y 2, que desarrollamos a continuación. En efecto:

$$\begin{aligned} M_0^1 &= m + Hr \sin \alpha + Vr(1 - \cos \alpha) \dots \alpha \text{ varía de } 0 \text{ a } \varphi \\ M_1^2 &= m + Hr \sin \alpha + Vr(1 - \cos \alpha) - \\ &\quad - Pr(\cos \varphi - \cos \alpha) \dots \alpha \text{ varía de } \varphi \text{ a } \pi \\ \frac{dM_0^1}{dm} &= 1, \quad \frac{dM_0^1}{dH} = r \sin \alpha, \quad \frac{dM_0^1}{dV} = r(1 - \cos \alpha), \quad ds = r d\alpha \\ \frac{dM_1^2}{dm} &= 1, \quad \frac{dM_1^2}{dH} = r \sin \alpha, \quad \frac{dM_1^2}{dV} = r(1 - \cos \alpha) \end{aligned}$$

Sustituyendo estas expresiones en el sistema de ecuaciones [1], resolviendo las integrales, haciendo

$$\left. \begin{aligned} V &= \int_0^\pi pr d\varphi \frac{\pi - \varphi + \sin \varphi \cos \varphi}{\pi} = \frac{p\pi r}{2} \\ H &= \int_0^\pi pr d\varphi \frac{\pi - 2\pi \cos \varphi + 4\varphi \cos \varphi - 4 \sin \varphi + \pi \cos^2 \varphi}{\pi^2 - 8} = \frac{pr}{\pi^2 - 8} \left(\frac{3}{2} \pi^2 - 16 \right) \\ m &= \int_0^\pi pr d\varphi \frac{2r}{\pi(\pi^2 - 8)} (\pi - 2\pi \cos \varphi + 4\varphi \cos \varphi - 4 \sin \varphi + \pi \cos^2 \varphi) - \int_0^\pi pr d\varphi \times \frac{r}{\pi} (\pi - \varphi + \sin \varphi \cos \varphi) + \\ &\quad + \int_0^\pi pr d\varphi \times \frac{r}{\pi} (\pi \cos \varphi - \varphi \cos \varphi + \sin \varphi) = \frac{2pr}{\pi(\pi^2 - 8)} \left(\frac{3}{2} \pi^2 - 16 \right) - \frac{pr^2 \pi}{2} + \frac{4pr^2}{\pi} \end{aligned} \right\} [4]$$

Reacciones debidas a una variación térmica

Ahora no hay más causa exterior que una acción térmica que produce un recorrido horizontal y un giro de la sección de empotramiento. Por tanto, subsisten las ecuaciones de elasticidad ya planteadas, sin más que anular el valor de P y añadir además a la segunda y tercera ecuaciones los términos relati-

operaciones y ordenando, se llega al sistema de ecuaciones [2], que nos servirá para determinar m , H y V .

$$\left. \begin{aligned} m\pi + 2Hr + V\pi r - Pr(\pi \cos \varphi - \varphi \cos \varphi + \sin \varphi) &= 0 \\ 2m + H \frac{\pi r}{2} + 2Vr - Pr \left(\frac{1}{2} + \cos \varphi + \frac{\cos^2 \varphi}{2} \right) &= 0 \\ m\pi + 2Hr + \frac{3}{2} V\pi r - Pr \left(\frac{\pi}{2} + \pi \cos \varphi - \varphi \cos \varphi + \right. \\ &\quad \left. + \sin \varphi - \frac{\varphi}{2} + \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{2} \right) = 0 \end{aligned} \right\} [2]$$

Resuelto este sistema [2], obtenemos para las reacciones en el empotramiento izquierdo de la bóveda las expresiones siguientes:

$$\left. \begin{aligned} V &= P \frac{\pi - \varphi + \sin \varphi \cos \varphi}{\pi} \\ H &= P \frac{\pi - 2\pi \cos \varphi + 4\varphi \cos \varphi - 4 \sin \varphi + \pi \cos^2 \varphi}{\pi^2 - 8} \\ m &= -P \frac{2r}{\pi(\pi^2 - 8)} \times (\pi - 2\pi \cos \varphi + 4\varphi \cos \varphi - \\ &\quad - 4 \sin \varphi + \pi \cos^2 \varphi) - P \frac{r}{\pi} (\pi - \varphi + \sin \varphi \cos \varphi) + \\ &\quad + P \frac{r}{\pi} (\pi \cos \varphi - \varphi \cos \varphi + \sin \varphi) \end{aligned} \right\} [3]$$

Si en estas expresiones hiciéramos $P = 1$ kg, se obtendrían las líneas de influencia que, una vez dibujadas, nos darían gráficamente los valores numéricos de las reacciones para los distintos casos de pesos aislados. Pero preferimos seguir el método analítico, que es más exacto, aun a costa de su mayor pesadez.

Caso de peso uniforme por metro lineal de bóveda

Para determinar las reacciones en el caso particular de tener un peso repartido uniformemente por metro lineal de arco, que es el caso del peso propio de la bóveda, basta sustituir en las expresiones [3] el valor de P por $pd s = pr d\varphi$ e integrar entre 0 y π . En efecto,

vos al trabajo elástico debido al esfuerzo normal. El sistema de ecuaciones será ahora:

$$\begin{aligned} \frac{1}{EI} \int_0^\pi M \frac{dM}{dm} ds + \frac{1}{ES} \int_0^\pi N \frac{dN}{dm} ds &= 0 \\ \frac{1}{EI} \int_0^\pi M \frac{dM}{dH} ds + \frac{1}{ES} \int_0^\pi N \frac{dN}{dH} ds + \int_0^\pi \Delta r \sin \alpha d\alpha &= 0 \\ \frac{1}{EI} \int_0^\pi M \frac{dM}{dV} ds + \frac{1}{ES} \int_0^\pi N \frac{dN}{dV} ds &= 0 \end{aligned}$$

Siendo $M = m + Hr \operatorname{sen} \alpha + Vr(1 - \cos \alpha)$,
 $N = -H \operatorname{sen} \alpha + V \cos \alpha$
 $\frac{dM}{dm} = 1, \frac{dM}{dH} = r \operatorname{sen} \alpha,$
 $\frac{dM}{dV} = r(1 - \cos \alpha), \frac{dN}{dm} = 0, \frac{dN}{dH} = \operatorname{sen} \alpha, \frac{dN}{dV} = \cos \alpha, \Delta = 0,000011$ por metro lineal y grado.

Multiplicando las tres ecuaciones por EI , resolviendo las integrales y haciendo $\rho^2 = \frac{I}{S}$, se tiene:

$$m\pi + 2Hr + Vr\pi = 0$$

$$2mr + \frac{\pi r^2}{2} H + 2Vr^2 + H \frac{\pi}{2} \rho^2 + 2EI\Delta = 0$$

$$m\pi + 2rH + \frac{1}{2} \pi r V + V \frac{\pi}{2} \rho^2 = 0$$

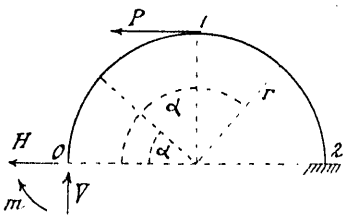
De este sistema se deducen las siguientes expresiones para las reacciones térmicas:

$$V = 0, \quad H = -\frac{4EI\pi\Delta}{\pi^2(r^2 + \rho^2) - 8r^2} (\pm n^0)$$

$$m = \frac{8EI r \Delta}{\pi^2(r^2 + \rho^2) - 8r^2} (\pm n^0)$$

Reacciones debidas al frenaje

Para tener en cuenta el efecto de un frenaje rápido, según la Instrucción vigente para el cálculo de puentes, hay que aplicar en la clave del arco una fuerza horizontal igual a $\frac{1}{7}$ de los pesos de los ejes de las locomotoras que quepan en el tramo. Veamos cómo se cal-



culan las reacciones debidas a ese esfuerzo horizontal aplicado a la clave. Llamémosle P, y según el adjunto croquis, se tiene:

$$M_0^1 = m + Hr \operatorname{sen} \alpha + Vr(1 - \cos \alpha) \dots \alpha \text{ varía de } 0 \text{ á } \frac{\pi}{2}$$

$$M_1^2 = m + Hr \operatorname{sen} \alpha + Vr(1 - \cos \alpha) - Pr(1 - \operatorname{sen} \alpha) \dots \alpha \text{ varía de } \frac{\pi}{2} \text{ á } \pi$$

Ecuaciones que resultan de integrar, sustituir límites y simplificar

$$m\pi + 2Hr + V\pi r = Pr \frac{\pi - 2}{2}$$

$$2m + H \frac{\pi r}{2} + 2Vr = Pr \frac{4 - \pi}{4}$$

$$m\pi + 2Hr + \frac{3}{2} Vr\pi = Pr \frac{\pi - 1}{2}$$

Resuelto este sistema, encontramos las siguientes expresiones para las reacciones:

$$V = \frac{P}{\pi}, \quad H = -\frac{P}{2}, \quad m = Pr \frac{\pi - 2}{2\pi} \quad [6]$$

En otro artículo haremos la aplicación numérica de todas las fórmulas anteriores y la comprobación elástica de las secciones adoptadas.

José ROSELLÓ
 Ingeniero encargado del ferrocarril de Alicante a Alcoy

Los radiofaros españoles: Villano y Finisterre

Fueron los dos primeros radiofaros instalados (mayo de 1922) anteriores al plan general, para el que sirvieron de experiencia preliminar. Situados ¹ en la provincia de Coruña, en el trozo denominado

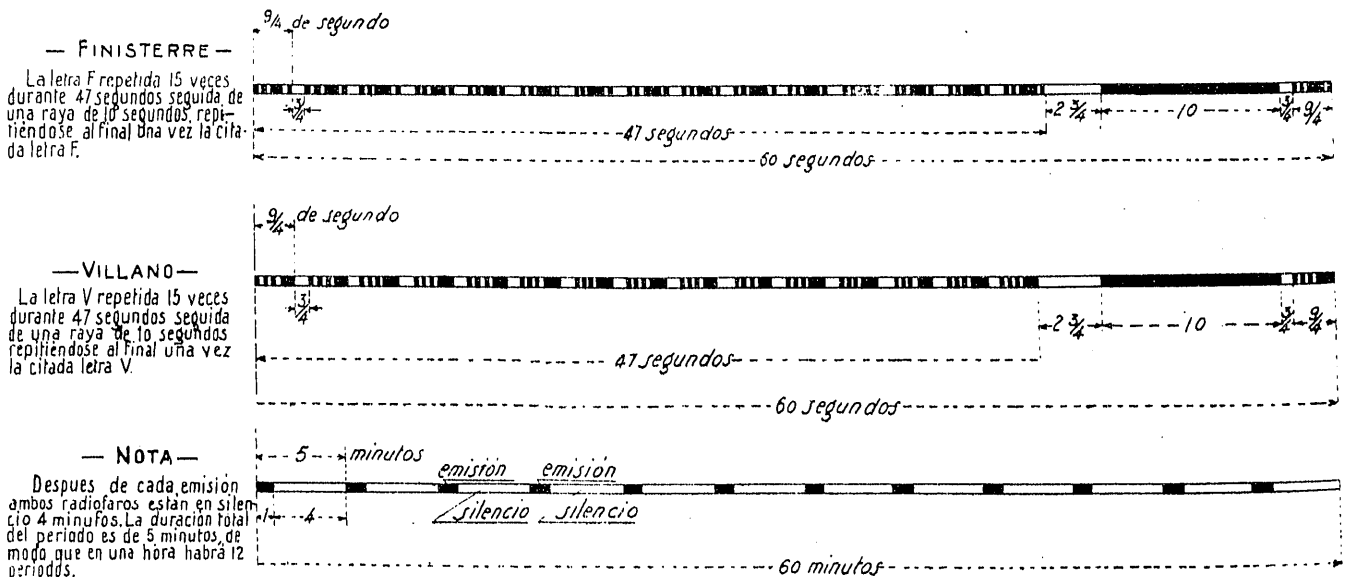


Fig. 1.ª Características de los radiofaros de Finisterre y Villano

¹ La situación geográfica del radiofaro de Villano es: 43° 9' 36" de latitud N. y 9° 12' 41" de longitud W. La del radiofaro de Finisterre 52° 52' 56" de latitud N. y 9° 16' 41" de longitud W.