

PRIMERA PARTE

PUENTES DE HORMIGON ARMADO

- CAPÍTULO **I.—Tramos rectos.**
CAPÍTULO **II.—Arcos corrientes empotrados (hasta 40 metros de luz.)**
CAPÍTULO **III.—Modelos oficiales.**
CAPÍTULO **IV.—Grandes arcos (de 40 metros de luz en adelante.)**
CAPÍTULO **V.—Arcos articulados.**
CAPÍTULO **VI.—Arcos sin empuje.**
CAPÍTULO **VII.—Apoyos de los puentes de hormigón armado.**

CAPÍTULO I

TRAMOS RECTOS

§ I.—Definiciones y ventajas.

§ II.—De tablero superior, en tramos independientes.

Disposición general.—Número de vigas.—Viguetas.—Arriostramientos.—Chaflanes.—Armaduras.—En forjados.—En vigas.—Armaduras con vigas armadas.—Horquillas.—Dimensiones del hormigón.—Ejecución de los tramos.—Andenes.—Dispositivos para dilataciones.

§ III.—Ejemplos de tramos con tablero superior y vigas llenas.

Puentes en Alcazarquivir (Marruecos).—Viaducto de Vallcarca (Barcelona).—Puente del ferrocarril de Lérida a Saint-Girons.—Puente sobre el Zújar (Badajoz).—Puente de Tucumán (Argentina).—Puente sobre el río Salt (California).

§ IV.—Vigas aligeradas, con tablero superior.

Disposiciones empleadas.—Puentes de los ferrocarriles suburbanos de Málaga; de Serradilla, sobre el Tajo; de Alfonso XIII, próximo a Larache.—Defectos de las vigas trianguladas.—Vigas Vierendeel.—Paso superior en el Clot (Barcelona).

§ V.—De tablero inferior o intermedio.

Tablero.—Vigas.—Puentes de Dueñas; de Rambla del Obispo (Almería); sobre el Garona (Valle de Arán); de Unquera (Santander); de la calle de Lafayette (París).

§ VI.—Tramos continuos.

Sus ventajas.—Sus inconvenientes.

§ VII.—Conclusiones.

§ I.—DEFINICIONES Y VENTAJAS

Definiciones.—Clasificamos como tramos rectos de hormigón armado todos aquellos constituídos por vigas rectangulares paralelas al eje del puente y sosteniendo el tablero que constituye la plataforma del puente.

Las vigas pueden ser de *alma llena* o *aligerada*.

Los tableros pueden ser: *superiores* a las vigas, *intermedios* entre éstas, o *inferiores*, apoyándose entonces en sus cabezas inferiores.

En puentes de varios tramos, las vigas pueden ser *independientes* en cada uno de ellos o *continuas* sobre varios o todos los apoyos, análogamente a lo que se hace con frecuencia en los tramos metálicos.

Sus ventajas.—La primordial ventaja de los tramos rectos de H. A. sobre las bóvedas de fábricas o arcos de H. A., es que aquéllos *sólo producen reacciones verticales* en los apoyos y permiten, por lo tanto, *reducir sensiblemente el volumen de pilas y estribos, y sobre todo el de sus cimientos*, que suelen ser factores decisivos en los presupuestos.

Estas economías en cada apoyo permiten a su vez aumentar su número, lo que consiente la reducción de luces de los tramos, que resultan así más baratos por metro lineal de puente; recuérdese, a este propósito, que los momentos flectores de un tramo crecen en proporción de los cuadrados de las luces, y que casi en igual proporción van aumentando las dimensiones de hormigones y aceros; se reduce, pues, sensiblemente el coste de la infraestructura de un puente empleando tramos de la menor luz posible, consentida por el coste de los apoyos, y claro es que también por las exigencias de desagüe del puente.

Por estas razones se han generalizado muy especialmente los tramos rectos de H. A., que, por otra parte, ofrecen sobre los metálicos la sensible ventaja de suprimir las costosas y frecuentes pinturas que éstos exigen.

Examinaremos cada uno de los tipos de tramos rectos que acabamos de clasificar.

§ II.—DE TABLERO SUPERIOR, EN TRAMOS INDEPENDIENTES

Disposición general.—Como dijimos ya en el primer tomo, al ocuparnos de las pequeñas obras, *el sistema de tramos rectos de tablero superior con tramos independientes es el más corriente, y se emplea quizá en el ochenta por ciento de los puentes; existen ya millares de ellos, algunos de los que, construídos por el autor, llevan más de treinta años de existencia, sin que en ellos aparezca la menor señal de fatiga y aun menos de destrucción.*

La disposición más práctica y de mayor aplicación consiste (figura 1 - A) en constituir el tablero por dos vigas de H. A., unidas por su forjado; éste actúa como tablero y plataforma del puente y *trabaja al mismo tiempo como cabeza de compresión de las vigas*, con las que se une rígidamente por las armaduras de ambos elementos entrelazados entre sí.

Esta sensible ventaja es peculiar exclusivamente de los tramos rectos *con tablero superior*, pues en todas las demás disposiciones de tramos rectos o en arco el tablero *pesa* sobre las vigas o arcos, sin contribuir en nada a aliviar su trabajo.

Número de vigas.—Mientras el ancho del tablero no excede de 8 m., es más económico poner sólo dos vigas con forjado simétrico.

Su altura, por debajo del forjado, puede ser de 1/10 de la luz teórica, con lo que suele obtenerse una buena proporción de acero.

Pero hay muchos casos en que, por exigencias de la rasante, no se puede dar esta altura, y para evitar un exceso de metal es preferible aumentar a tres o más el número de vigas (fig. 1 - B).

Lo mismo ocurre cuando el ancho del puente es mayor de 8 metros; en este caso deben tantearse los anchos de forjado y número de vigas más conveniente.

Asimismo, en tramos rectos en poblaciones, en los que por con-

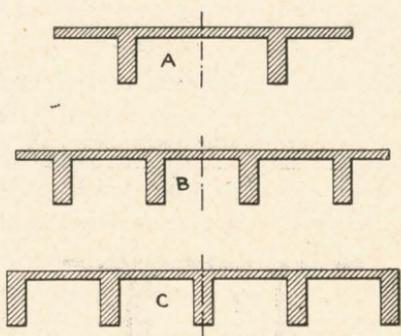


Fig. 1.ª

sideraciones estéticas se quieren evitar los voladizos de forjados, que ciertos artistas consideran poco decorativos (aunque ignoro por qué), se sitúan vigas en los paramentos del puente (fig. 1 - C); pero hay entonces un desperdicio de material, pues que estas vigas de los frentes sólo tienen que resistir la mitad de la sobrecarga correspondiente a las vigas centrales, sobrecargas que, además, son menores en los andenes que en la calzada.

Viguetas.—Algunos ingenieros, para reducir el volumen de forjados y el peso de sus armaduras, completan el entramado del tablero con viguetas $v v$, como en la figura 2 (A y B), a distancias de 1,50 a 2 m.; prolongan entonces estas viguetas por debajo de los voladizos del forjado, quedando éste sostenido por ménsulas exteriores $m m$.

Los espesores de forjados y sus armaduras podrán entonces resultar algo menores y las ménsulas podrán ser más decorativas; *pero el coste de los tableros así dispuestos será, en cambio, más elevado*, por efecto del aumento considerable de coste de los moldes y mano de obra.

Salvo, pues, casos excepcionales, no son necesarias ni convenientes las viguetas ni ménsulas; las disposiciones sencillas suelen ser las mejores.

Arriostramientos.—Para los tramos más corrientes, hasta 15 metros de luz, las vigas no requieren arriostramientos transversales; les

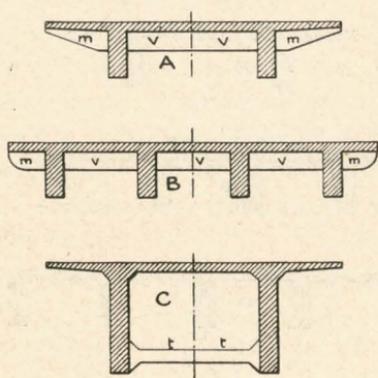


Fig. 2.ª

basta con la solidaridad conseguida por el forjado que une sus cabezas superiores y con la sujeción que en sus extremos se obtiene macizando en los estribos y pilas, con fábrica ordinaria, los huecos que quedan entre las vigas.

Pero en tramos de luces superiores a 15 m., en los que la altura de las vigas excede, por lo tanto, de 1,50 m., ya conviene arriostar las cabezas inferiores con tirantes $t t$ de H. A. (fig. 2 - C), que pueden ser

de sección cuadrada de 20 ó 30 cm. de grueso y altura y a distancias de 8 a 10 m.

Chaflanes.—Para la construcción de estos tramos se precisan moldes de vigas y forjados bien rígidos, de fácil montaje y desmoldamiento.

El molde más sencillo se obtiene con la disposición de la figura 3 - A, y así ejecutamos nuestros primeros tramos.

Pero, con objeto de reforzar el empotramiento del forjado en la cabeza de la viga, es preferible, y así lo hacemos hoy, enlazar ambos elementos por chaflanes *c c* de 10 a 15 cm., a 45° (fig. 3 - B); asimismo, para atenuar las aristas inferiores de las vigas, es conveniente también chaflanarlas en la mayor parte de su longitud con biseles *b b* de 3 a 5 cm. de lado.

Algunos ingenieros, entre otros Zafra, en sus modelos oficiales de tramos rectos, han exagerado la nota poniendo tres chaflanes sucesivos *a b c* entre vigas y forjados (fig. 3 - C); también se han moldeado los forjados como bovedillas (fig. 3 - D).

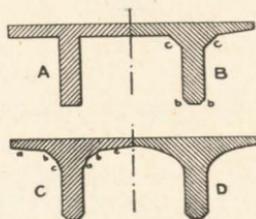


Fig. 3.ª

Nos parece excesivo afinar tanto; se encarecen los moldes y se dificultan sus operaciones, sin ventaja sensible para la rigidez ni resistencia del tramo; lo único que conviene, siendo fácil conseguirlo, es disminuir el grueso de los voladizos, desde su arranque a su extremo, como se ve en la figura 3 - B.

Armaduras.—Mientras estuvieron en vigor las muchas patentes de invención con que los constructores de todos los países quisieron sostener y explotar el monopolio de sus disposiciones, hubo cierta anarquía en la forma de colocar las barras en vigas y forjados y hasta en las secciones de los aceros empleados.

Pero, caducadas ya todas aquellas patentes, han ido poco a poco los ingenieros disponiendo las armaduras con arreglo a su más racional distribución, a su más fácil montaje y enlace.

La experiencia mundial en los últimos treinta años y los experimentos de laboratorios han uniformado casi por completo las disposiciones que hoy se emplean.

En forjados.—Se constituyen con aceros redondos de 6 a 20 milímetros, a distancia de 8 a 12 cm., según las cargas y luces.

En el tipo corriente (fig. 4) se doblan *la mitad* de las barras para

que sus extremos resistan a las flexiones del voladizo; preferimos esta sencilla disposición a la de la figura 5, en la que se arma tam-

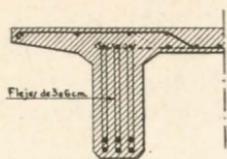


Fig. 4.ª

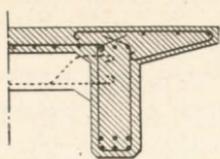


Fig. 5.ª

bién la parte inferior del voladizo, pues en éste el hormigón se basta para resistir a la compresión.

Cuando se pongan viguetas, *que deben situarse a menor distancia* entre

ellas que las vigas, las barras de resistencia del forjado deben, claros, situarse normalmente a las viguetas (fig. 5).

En ambos casos conviene añadir en forjados y voladizos *algunas barras de repartición*, en sentido normal a las de resistencia, de 6 a 8 mm. de diámetro y a distancias de 15 a 20 cm.

Algunos ingenieros (1) añaden también horquillas para las barras de forjado, pero el autor no las emplea por considerarlas inútiles.

Asimismo, para la adherencia, considera el autor que basta doblar a ángulo recto las puntas de estas barras, sin necesidad de doblarlas en forma de ganchos curvos y geométricos.

Armaduras en vigas.—Se emplean casi exclusivamente aceros dulces redondos del comercio.

Conviene distribuir los esfuerzos de tensión de las vigas en un número par de barras, todas ellas de igual diámetro y dispuestas en varias filas.

Muchos ingenieros, como Zafra, en sus modelos oficiales, para reducir el número de barras emplean ^{las} diámetros de 40 a 50 mm. de diámetro; pero éstas son difíciles de manejar y, sobre todo, de doblar en sus extremos.

La experiencia del autor le permite aconsejar se reduzca el diámetro máximo de estas barras a 35 mm., aunque para ello fuera menester aumentar algún tanto la altura de las vigas, pues así pueden encargarse a fábrica con toda su longitud, por ser posible doblarlas para su transporte, evitándose con ello las soldaduras o empalmes,

(1) Entre otros, Zafra, en sus modelos oficiales de carreteras. (Véase capítulo III.)

que exigen precauciones especiales (1); al aumentar el número de barras crece también la superficie total de las mismas y, por lo tanto, su adherencia al hormigón.

Respecto a su disposición en alzado, deben estas barras doblarse en la forma representada en la figura 6, correspondiente a los modelos que hemos estudiado para Marruecos y Guinea; conviene también alternar los puntos de doblez de todas las barras para distribuir sus zonas inclinadas en toda la masa de hormigón de las vigas y darle así más homogeneidad.

De esta manera contribuyen las barras principales de las vigas a

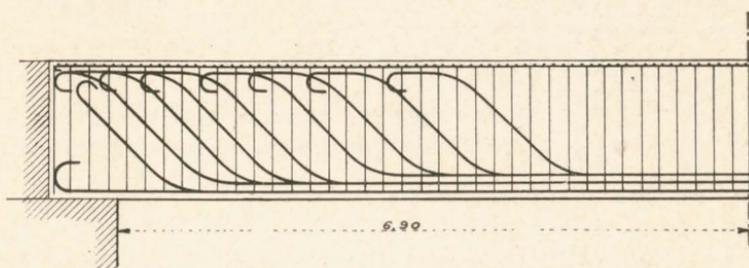


Fig. 6.^a

resistir a los esfuerzos cortantes, a la vez que a las tensiones que en las cabezas superiores de las vigas determinan en sus extremos el empotramiento imperfecto que siempre se produce en sus apoyos.

En cuanto a la forma de los ganchos, los experimentos de laboratorio han demostrado que la forma circular con un diámetro de seis veces el grueso de las barras es el más eficaz de todos los tipos de ganchos empleados hasta ahora.

Armaduras con vigas armadas.—En algunos casos, así como para alcantarillas y pontones se armaron las losas con viguetas del comercio (2), hemos empleado vigas armadas. Así, por ejemplo, en los tramos rectos de 22 m. del puente del Kursaal, en San Sebastián (figuras 7, 8 y 9). Está dicho puente en la propia barra del

(1) Véase art. 9.º del pliego de condiciones facultativas generales aplicables a todas las obras de H. A., apéndice núm. 2 del tomo I de este libro y lo que en éste decimos (cap. III, § III) sobre estos empalmes.

(2) Véase tomo I, pág. 229.

río Urumea, con gran oleaje en las pleamares del Cantábrico, y hubiera sido muy peligroso moldearlas con cimbras fijas, apoyadas sobre arena, expuestas a las marejadas y resacas, que se intensifi-

can en aquel emplazamiento.

Para evitar aquel peligro, que hubiera en todo caso retrasado la construcción de 4 tramos de 22 m. de luz por 20 m. de anchura, preparamos previamente para las vigas unas cerchas rígidas (figs. 8 y 9), que se montaron sobre ligeros andamios, de cuyas cerchas sus-

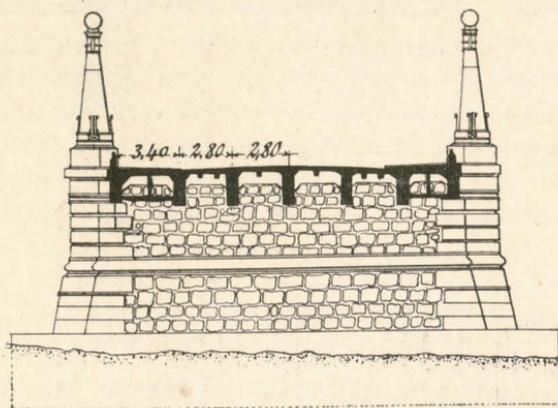


Fig. 7.ª.—Puente del Kursaal en San Sebastián.

pendimos los moldes de vigas y forjados, que permitieron construir todo el puente en un verano; hubo un exceso evidente de metal, pero nos lo ahorramos en tiempo y en la supresión de una costosa cimbra.

Para reducir su altura a 1,60 m., o sea $1/13,3$ de la luz, proyectamos siete vigas por tramo, lo que también exigía un aumento de hierro (1).

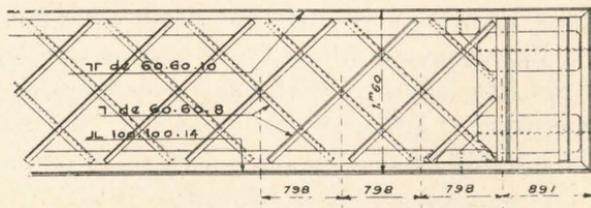


Fig. 8.

Horquillas.—Para solidarizar las vigas y sus forjados se añaden horquillas verticales, también de aceros redondos, que con los dobleces de las barras principales resisten los esfuerzos cortantes (2).

(1) Proyectadas y dirigidas sus obras, por administración, por el autor de este libro y el ingeniero industrial D. Víctor Arana.

(2) El cálculo de todos estos elementos se explica en el libro *Hormigón armado*, de Zafra.

La casa Hennebique emplea, sin embargo, para estas horquillas unos flejes de acero de 30 a 60 mm. de ancho y gruesos de 1 a

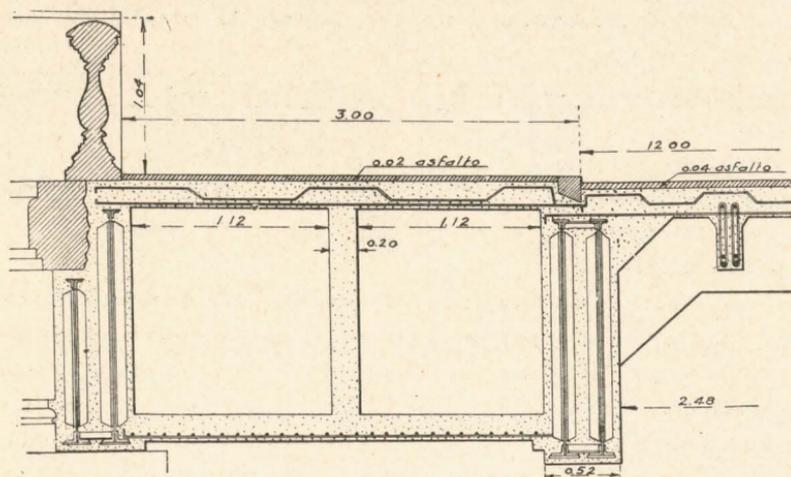


Fig. 9.ª—Sección transversal del puente del Kursaal.

3 mm. abrazando cada una de las filas de barras y dobladas ligeramente en sus extremos (fig. 4).

Zafra empleó redondos (fig. 5) abrazando todas las filas de barras.

El autor utiliza también redondos, de 5 a 10 mm., dispuestos como se ve en la figura 10, que envuelven asimismo unas pequeñas barras de comprensión, añadidas a las armaduras principales de las vigas y colocadas por encima de las barras del forjado, para completar así la solidaridad y, por ende, el monolitismo de vigas y forjados.

En la figura 11 presentamos otras disposiciones de horquillas, preconizadas por sus autores; pero nos parecen más complicadas y no más eficaces que las anteriormente descritas.

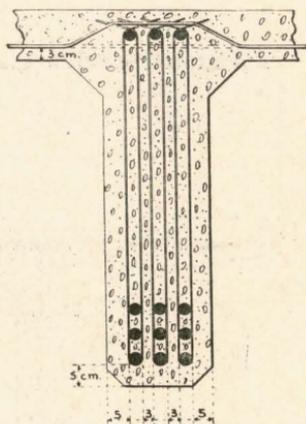


Fig. 10.

Dimensiones del hormigón.—Los forjados de los puentes deben prácticamente tener un grueso mínimo de 8 cm. y un máximo de 20 cm.

Las vigas deben tener una altura media de $1/8$ a $1/10$ en la luz, aunque se puede reducir a $1/12$ y hasta un $1/15$ si la rasante lo exigiera; pero se encarecen entonces, porque la cuantía del acero aumenta muy considerablemente.

Respecto al ancho o grueso de las vigas, que no debe ser infe-

rior a 25 cm., ha de reducirse en lo posible para disminuir su peso muerto. Para ello se superponen las barras en una o varias filas, pero aun así hay que tener en cuenta que las barras deben situarse a una distancia mínima de 5 cm. de los costados y fondo y a 3 cm. de distancia entre sus filas (fig. 10), para sustraerlas a la oxidación posible y permitir el perfecto apisonado del hormigón.

En entramados de edificios puede reducirse a 3 y hasta 2 cm. la distancia de las barras al paramento; pero en puentes sometidos a humedades, cuando no a emanaciones salinas o salitrosas, conviene que esta distancia no sea inferior a 5 cm. en las vigas y a 3 cm. en los forjados.

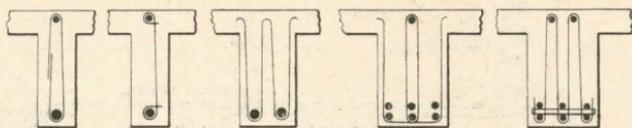


Fig. 11.

Ejecución de los tramos.—En cuanto a sus dosificaciones y

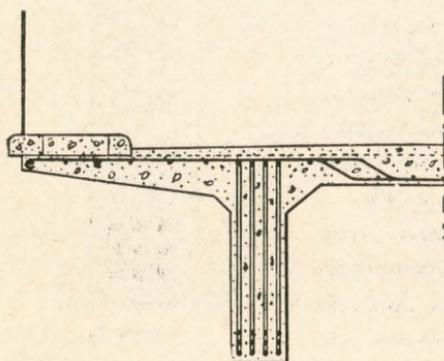


Fig. 12.

construcción, conviene tener en cuenta las prescripciones detalladas en los apéndices números 2 y 5 del tomo I, en las que se incluyen las condiciones facultativas para las obras de H. A., y especialmente para los tramos rectos.

Andenes.—Poco tenemos que añadir a lo dicho sobre

esto en el capítulo V del tomo III.

Para carreteras y aun para caminos vecinales, el autor prefiere disponer los andenes por encima de la calzada, como en la figura 12,

pues el aumento de peso muerto de estos andenes es insignificante, y en cambio se facilita la construcción y los forjados trabajan en muy buenas condiciones como cabezas de compresión de las vigas.

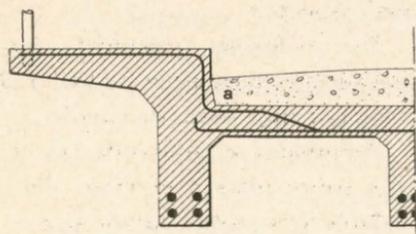


Fig. 13.—Disposición viciosa.

Muchas veces se han dispuesto los andenes como en la figura 13, pero es una disposición viciosa, porque entonces las barras del voladizo no quedan bien empotradas y tienden los forjados a abrirse por el ángulo *a* cuando el andén está fuertemente sobrecargado.

En tramos de ferrocarriles se trató primeramente de suprimir el peso muerto del balasto.

La interposición de los largueros dentro de ambas vigas (figura 14 - A), como se hizo algunas veces, dió mal resultado, porque la hinchazón de la madera por la humedad abre el hormigón.

La colocación directa de la traviesa sobre el forjado (fig. 14 - B), que imitando a Zafra preconizó el autor, obliga a sujetar sus extremos con bridas que la experiencia ha demostrado que tenían una delicada conservación, o con bordillos laterales, por lo menos.

Por otra parte, la colocación de todo el balasto sobre el forjado (figuras 14 - C - D) aumenta considerablemente el peso muerto del tramo y lo encarece mucho.

La Comisión que el autor presidió, encargada por la Dirección general de Ferrocarriles de estudiar los modelos oficiales para los puentes de vía ancha, se ha inclinado por una solución intermedia, que discutimos en el capítulo III, al ocuparnos de los modelos oficiales para tramos rectos en ferrocarriles (fig. 15).

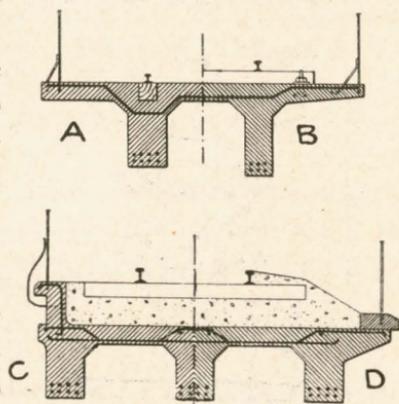


Fig. 14.

Dispositivos para dilataciones.—Los tramos independientes de-

ben poderse contraer y dilatar con libertad. Si se moldean a la vez dos tramos inmediatos, se produce indefectiblemente en invierno una grieta transversal sobre el apoyo, según una línea irregular, de mal aspecto.

Es preferible prevenirla, separando el hormigón de los tramos por una junta de cartón.

Asimismo, el apoyo de las vigas sobre pilas y estribos debe establecerse sobre cartón o, mejor aún, sobre chapas de plomo, si el puente se establece en regiones de temperaturas muy variables.

Estas chapas de plomo pueden tener unos 15 mm. de grueso y sus dimensiones se calculan para que la presión máxima sobre ellas no exceda de 30 kg. cm².

Debemos, sin embargo, consignar que hasta en puentes de 80 metros de longitud, constituidos por tramos independientes de 10 a 15 m. apoyados muchos de ellos sobre pilares de H. A., hemos siem-

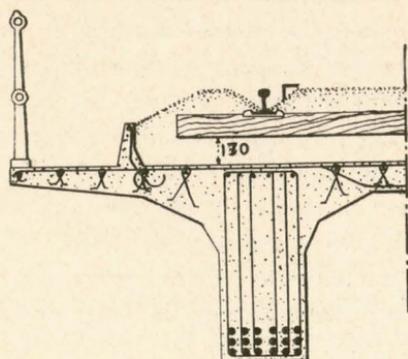


Fig. 15.

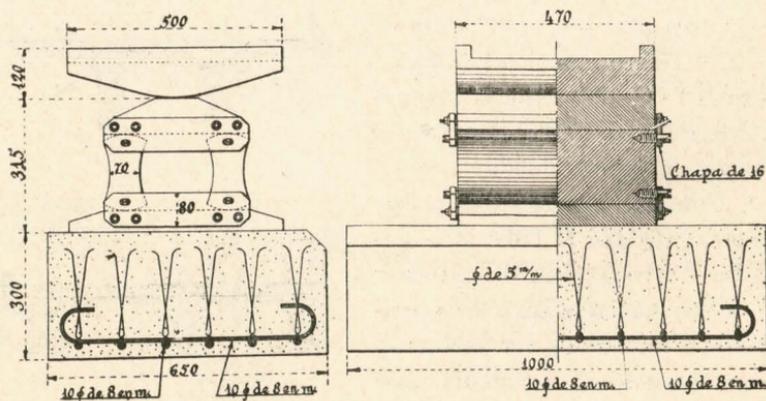


Fig. 16.

pre prescindido de chapas de plomo para su libre dilatación, sin que hayamos observado el menor inconveniente.

No quiere esto decir que sean estos tramos insensibles a los cam-

bios de temperatura; pero es evidente que sus expansiones o contracciones (que para diferencias de 40° representan bastantes milímetros) *se reparten* en las juntas de todos los tramos *independientes*, en vez de *integrarse* en los extremos del puente, *como ocurriría si los tramos fueran continuos*.

Cuando los tramos tienen luces superiores a 20 m., es mejor aún disponer en sus extremos aparatos de dilatación de los tipos corrientes para tramos metálicos; Zafra los proyectó como la figura 16 para sus modelos de tramos para carretera.

Pero, para evitar su oxidación y hacerlos eficaces, se precisa pintar y engrasar con frecuencia estos aparatos de dilatación (1).

§ III.—EJEMPLOS DE TRAMOS RECTOS CON TABLERO SUPERIOR Y VIGAS RECTAS DE ALMA LLENA

En nuestros treinta años de constructores hemos intervenido en más de trescientos tramos de esta clase, con luces comprendidas entre 10 y 25 m., tanto para carreteras como para ferrocarriles de vía estrecha y vía ancha (2).

En Marruecos hemos proyectado de este tipo *todos los puentes* de las carreteras y ferrocarril de Ceuta a Tetuán y de Tánger a Alcázar, siempre con excelente resultado técnico y económico.

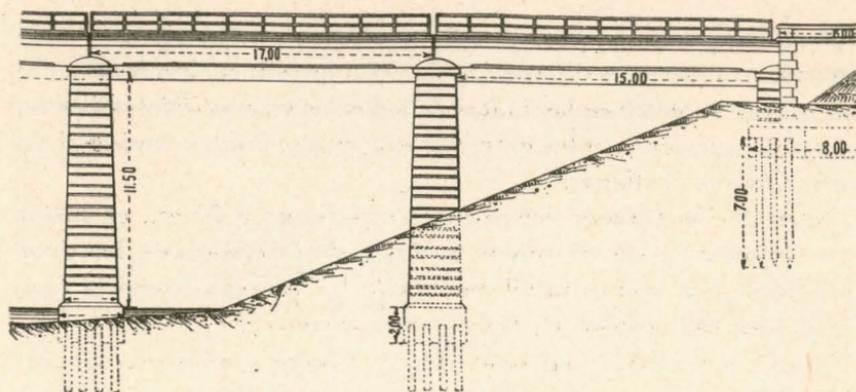
Reseñaremos algunos de los puentes más característicos.

Puentes en Alcazarquivir sobre el Lucus (Marruecos).—Para la carretera en Tánger y Rabat y el ferrocarril de Tánger a Fez se han construido en Alcazarquivir y sobre el río Lucus dos puentes de tramos rectos.

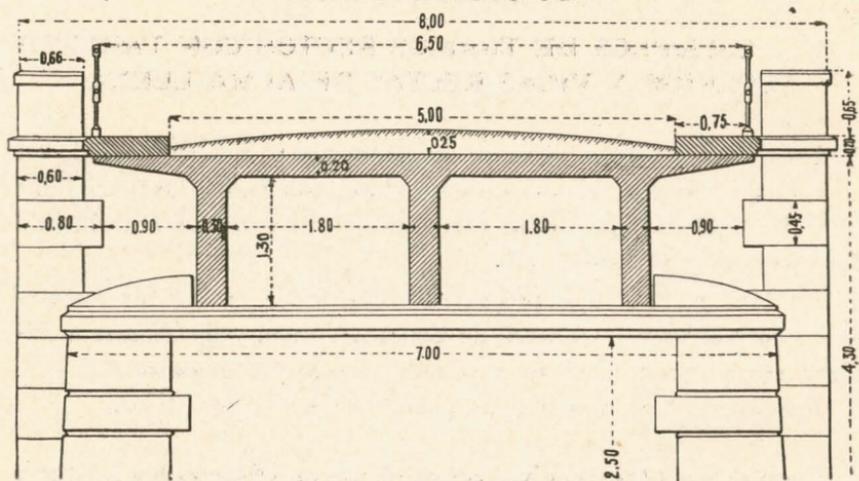
Los tramos del puente carretero son cinco, de 15 m. de luz

(1) Puede evitarse la oxidación con rodillos de uralita, análogo a las articulaciones imaginadas por el ingeniero Sánchez del Río. (Véase capítulo V.)

(2) Citaremos entre ellos un tramo en el canal de Reguerón (Murcia) y dos puentes de varios tramos sobre el río Jarama para la Azucarera de Madrid, y sobre el río Martín, en Tetuán (Marruecos); han sido totalmente recubiertos por crecidas extraordinarias, sin el menor inconveniente para su estabilidad.



Sección transversal



Figs. 17 y 18.—Puente sobre el Lucus en Alcázar (Marruecos).

(figuras 17 y 18); los del ferrocarril son cuatro, de 18 m. de luz, para vía de 1,50 m. (fig. 19).

Las disposiciones de vigas y armaduras son las antes descritas, que preconizamos a nuestros ingenieros. Para no exagerar la altura de la rasante se pusieron tres vigas en los tramos carreteros. (1).

(1) El proyecto del puente carretero es de D. Cayetano R. Noguera, ingeniero de la Compañía de Construcciones Hidráulicas y Civiles, que los construyó.

El puente del ferrocarril cuya Compañía dirige el autor, es de D. José Sanz Soler, y fué construído por D. José María Escriña.

A pesar de que en aquel emplazamiento parecían estar indicados tramos en arco y hasta un gran arco, nos decidimos en ambos casos por tramos rectos, porque las crecidas del río alcanzan y a veces

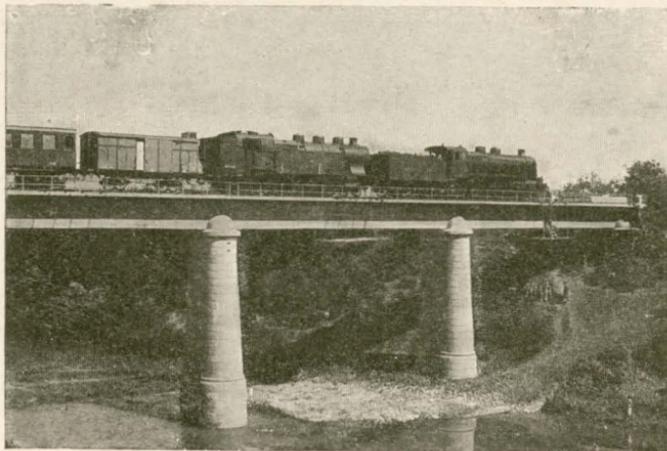


Fig. 19.—Puente sobre el Lucus.

superan los bordes superiores de las márgenes; aun así, con esos tramos rectos tan elevados hubo crecidas que casi mojaron las cabezas inferiores de las vigas.

Viaducto de Vallcarca (Barcelona).—Consta de cuatro tramos de luz variable, formados por dos estribos oblicuos y tres pilas normales al eje del puente; la luz de los tramos varía entre 22,40 m. y 27,60 m.; la de los dos tramos centrales es de 25 m. (figs. 20 y 21).

Las pilas tienen una altura comprendida entre 9 y 10 m.

Cada tramo está constituido por una *viga tubular múltiple*, formada por 8 vigas en doble T, de alma llena y con las cabezas unidas formando un tablero superior y otro inferior. El ancho de esta viga tubular es de 10,75 m.

El forjado inferior, aunque se utiliza como arriostramiento de las vigas, debe haberse proyectado para los efectos estéticos, ya que están estos tramos sobre una calle de bastante circulación (1).

(1) Autores del proyecto: D. Eduardo Ferrer Puig, arquitecto, y D. Lorenzo Matéu, ingeniero industrial. Sociedad constructora: Construcciones y Pavimentos.

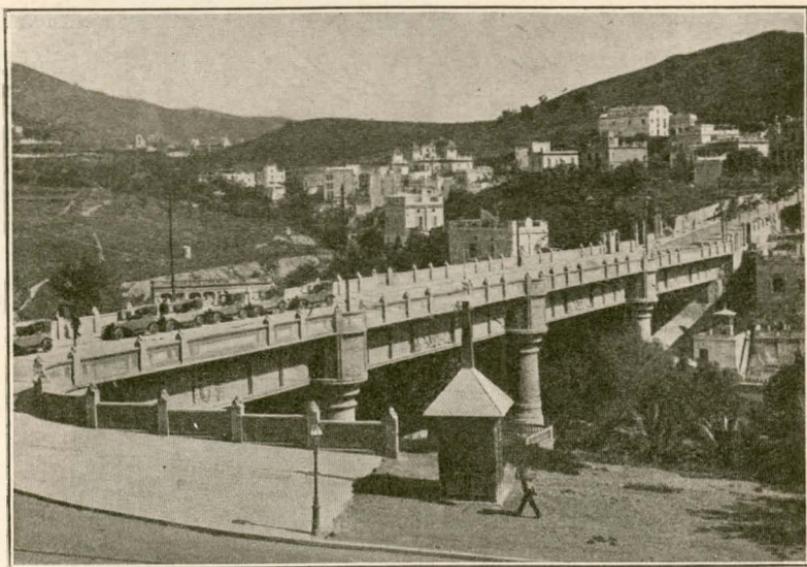


Fig. 20.—Viaducto de Vallcarca (Barcelona).

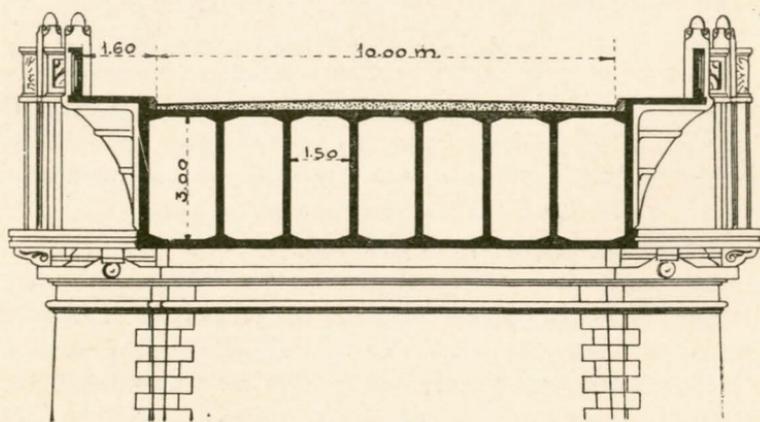


Fig. 21.—Viaducto de Vallcarca.

Puente para el ferrocarril de Lérida a Saint-Girons.—Próximo a Lérida construimos dos tramos rectos *muy oblicuos*, de 20 m. de luz, para esta vía transpirenaica, de ancho normal español (fig. 22). Para reducir las armaduras de las vigas a 16 barras de 36 milí-

Ocho tramos independientes de 27,50 m. de longitud y 25 m. de luz.

Son los tramos de alma llena de mayor luz construídos hasta ahora en España.

Cada tramo lleva dos riostras inferiores (fig. 23).

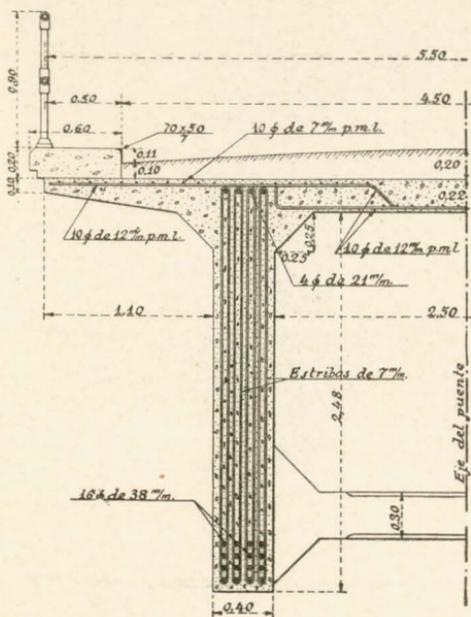


Fig. 23.—Puente sobre el Zújar.

Han resultado más económicos que con vigas aligeradas y se han comportado perfectamente en las pruebas, con flechas que no excedieron de 4 mm., o sea 1/6000 de la luz.

El transporte de las barras, de 38 mm. y 28 m. de longitud, ocasionó algunas dificultades. Las crecidas súbitas del río destruyeron dos veces las cimbras de uno de los tramos.

Puente en Tucumán, sobre el río Sali (Argentina) (1).—Es un interesante ejemplo de vigas consolas formando *cantilever*.

Su longitud, de 380 m., se ha dividido en 19 tramos rectos de 20 m. de luz.

Son estos tramos de tres tipos diferentes (fig. 24).

Tipo A.—Tramos extremos de 24 m. de longitud, con una ménsula o consola en voladizo de 4 m.

Tipo C.—Tramos impares menos los extremos, de 28 m. de longitud, con dos ménsulas.

Tipo B.—Tramos pares, de 12 m. de longitud, que se apoyan en las ménsulas de los tramos A y C.

Cada tramo está constituido por 11 vigas de 0,38 m. de grueso y 1,20 m. de altura, que aumenta a 1,80 m. en los apoyos.

(1) Detalles, en *La Ingeniería* (revista técnica de Buenos Aires), año 1928, pág. 513, por el ingeniero J. M. Zavalla Carbó.

Su forjado, que es una losa de 0,15 m. con doble armadura de 12 mm. y barras de repartición de 8 mm., solidariza las vigas por su parte superior, pero sólo en la parte central de los tramos, pues con

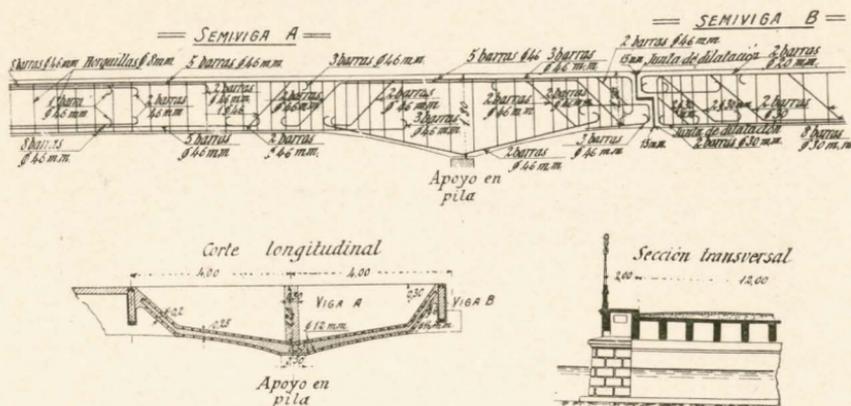


Fig. 24.—Puente de Tucumán.

los cuatro metros a cada lado de los apoyos la losa descende hacia el borde inferior de las vigas, en concordancia con la inversión de momentos flectores sobre las pilas. (Véase corte longitudinal.)

Esta original disposición de *cantilever* permite alguna economía en los tramos pares, cuya luz queda reducida a 12 m., pero cree el autor que el aumento de gasto de las ménsulas compensará aquella ventaja.

Puente sobre el río Salt, en California (1).—No tenemos noti-

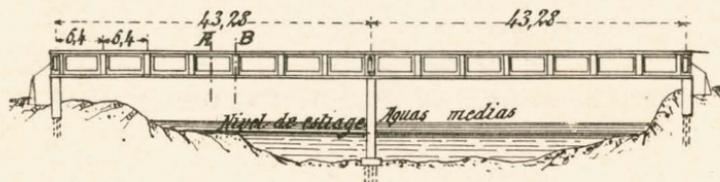


Fig. 25.—Puente sobre el Salt.

cia de ningún otro puente de tramos rectos de mayor luz que la de las vigas de esta obra (43,28 m.), representada en las figuras 25, 26 y 26 bis.

(1) Detalles, en *Engineering News-Record*, 26 de febrero de 1920.

Se calculó para una sobrecarga estática de 342 kg. por metro cuadrado y para un cilindro de 15 toneladas.

Se sustituyeron los aparatos de dilatación por planchas de asfalto. Para reducir el peso muerto de esas enormes vigas, se redujo

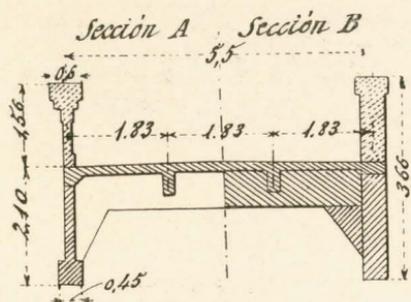


Fig. 26.

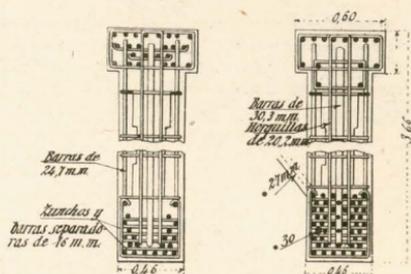


Fig. 26 bis.—Armaduras de las vigas por A y B de fig. 25.

su espesor en sus zonas centrales; aun así, el número de barras que necesita en las dos cabezas es muy considerable.

El autor de este proyecto justifica tan anómala disposición asegurando que su presupuesto (25.250 dólares) resulta inferior a las soluciones en arco, lo que no es extraño por la flojedad del lecho del río en que se cimientan los apoyos con pilotes, lo que encarecería los estribos si hubieran de resistir los empujes oblicuos de unos arcos.

Pero no parece dudoso que podría obtenerse una solución más barata aumentando dos pilas intermedias para obtener cuatro tramos de 21,64 m., con tablero superior, que es la solución óptima, constructiva y económicamente.

§ IV.—VIGAS ALIGERADAS CON TABLERO SUPERIOR

Disposiciones empleadas.—Cuando los tramos rectos independientes tengan luces superiores a 25 m. en carreteras y a 20 metros en ferrocarriles, las vigas macizas alcanzan alturas y espesores considerables; su hormigón sólo trabaja como envolvente de las barras y horquillas; su peso muerto excesivo exige por sí solo grandes secciones de acero; resultan más caros que los tramos en arco.

Pero cuando los lechos de los ríos ofrecen poca resistencia y no

convenga someter los cimientos a las grandes y variables presiones correspondientes a los empujes oblicuos que en los apoyos de los arcos determinan las sobrecargas desiguales y sobre todo las móviles, debe procurarse proyectar puentes de tramos rectos, que sólo ejercen reacciones verticales.

Pero entonces hay que aligerar las vigas para reducir su peso muerto.

La disposición primera que imaginó nuestro malogrado compañero D. Juan Manuel de Zafra, en 1908, fué la de triangular las vigas (fig. 27 - A) con montantes comprimidos y diagonales estiradas.

Posteriormente se invirtió la triangulación en muchos puentes, sometiendo a compresión las diagonales y a extensión los montantes (fig. 27 - B).

Por último, pueden también suprimirse las diagonales con arreglo al tipo del profesor Viendeel (fig. 27 - C).

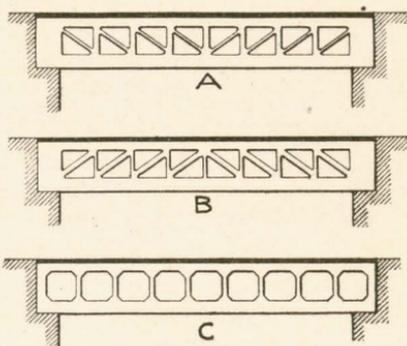


Fig. 27.

Puentes de los Ferrocarriles Suburbanos de Málaga.— Los

primeros tramos, que sepamos, construídos con vigas aligeradas, son los de esta Compañía de Ferrocarriles, que en 1907 había adoptado para sus tres líneas de Málaga a Vélez, Coín y Fuengirola dos únicos tipos de puentes en tramos rectos de H. A. de 10 y 26,40 m. de

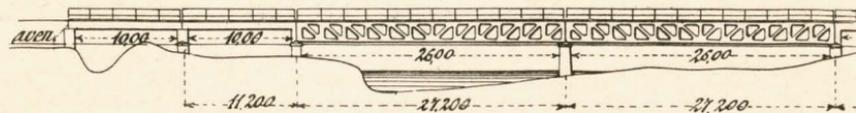


Fig. 28.

luz, ambos con tablero superior, encomendando sus proyectos al ingeniero Sr. Zafra.

La disposición adoptada por éste (figs. 28, 29 y 30) se aplicó en un gran número de tramos independientes, con éxito completo, de 1908 a 1912.

Zafra supuso que las armaduras trabajarían como un sistema

isostático, y admitió la hipótesis consiguiente de la articulación de las barras en todos los nudos.

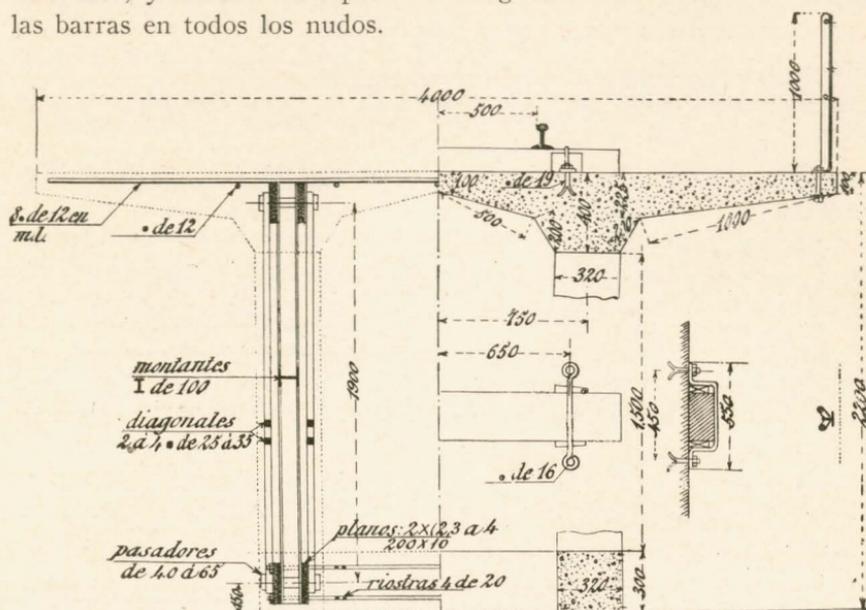


Fig. 29.

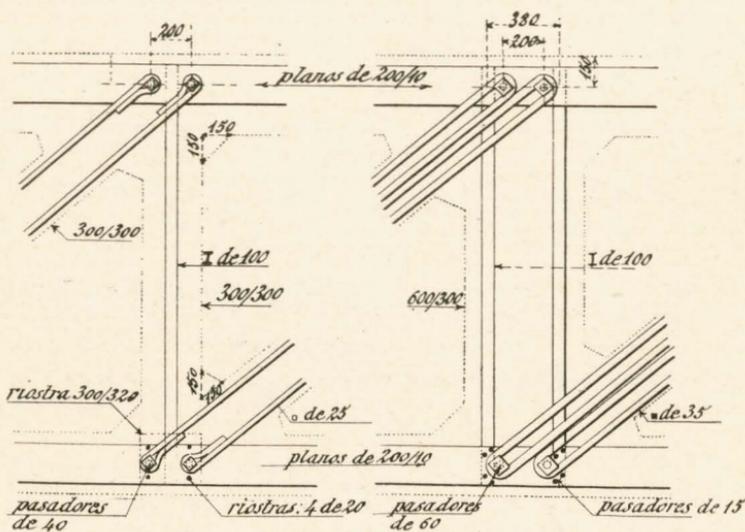


Fig. 30.

Otra originalidad de estos tramos consiste en la sustitución de los aceros redondos, generalmente empleados por otras secciones.

En los montantes comprimidos puso viguetas de doble T; en las cabezas inferiores, aceros planos yuxtapuestos de 200×10 ; en las diagonales se emplearon cuadradillos, fuertemente enganchados a los montantes.

El éxito obtenido en la prueba de estos puentes (1), que por su luz excepcional en aquella época (1910), y aún más por la circunstancia de ser para ferrocarriles, en los que no había entonces sino modestos y contadísimos ejemplos, contribuyó a que la Dirección de Obras públicas aceptara parecidas disposiciones para los modelos oficiales de puentes para caminos vecinales y carreteras, para los tramos rectos de 25 m. de luz en adelante, proyectados también por Zafra.

Pero ya en estos modelos, que describimos en el capítulo III, el Sr. Zafra admitió los montantes estirados y diagonales comprimidas, y substituyó por redondos los hierros en doble T, los cuadradillos y los flejes de la cabeza superior.

Puente de Serradilla sobre el Tajo (Cáceres).—Este puente, costeado por el Ayuntamiento de Serradilla, consta de tres tramos

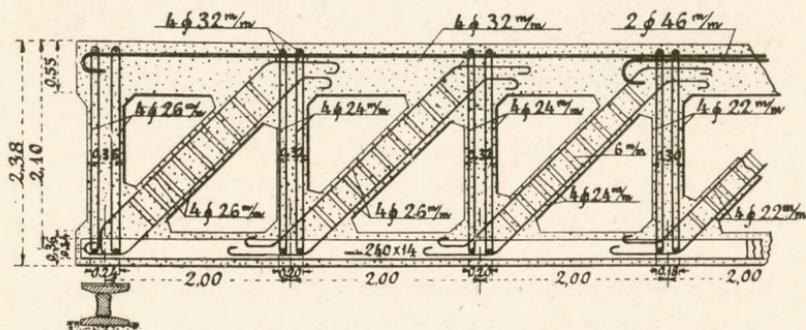


Fig. 31.—Puente de Serradilla.

rectos: uno central, de 32 m., con vigas aligeradas, y dos tramos laterales con vigas rectas de alma llena.

El tramo central es de celosía, tipo Howe, de montantes estira-

(1) Descritos con detalle en la *Revista de O. P.* de 10 de noviembre de 1910.

dos y diagonales comprimidas (figs. 31 y 32), que, como se ve, es muy parecido a los modelos oficiales de Zafra que acabamos de citar.

Aunque el tablero está a 23 m. sobre el estiaje, el nivel de las crecidas máximas en aquel emplazamiento queda sólo a un metro por debajo del plano inferior; ésta es la razón por la que fué preferida esta solución a la de arcos, que también resultaba más cara.

El coste del puente fué sólo de 230.000 pesetas, y en las pruebas el tramo central sólo dió 7 mm. de flecha (1).

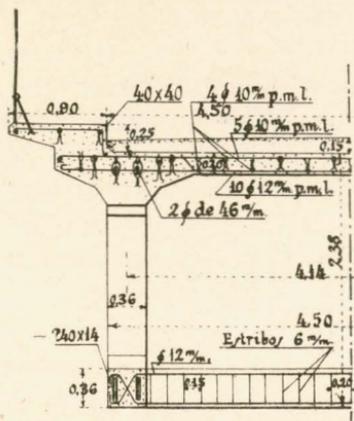


Fig. 32.

Puente de Alfonso XIII, próximo a Larache, sobre el Lucus (Marrruecos).—El 23 de enero de 1929

se abrió al tránsito este importante puente (fig. 33), que era el único que faltaba en la carretera de Tánger a Rabat.

Consta de cinco tramos de luces teóricas, comprendidos entre 28 y 32,65 m.

La rasante del puente afecta la forma de un arco de circunferencia tangente a las de las rampas de acceso. La altura que con ello se gana en el centro contribuye a su efecto estético y a facilitar la navegación.

El coste de este puente se aproxima a 1.700.000 pesetas, a causa de vicisitudes imprevistas en los cimientos, que logró vencer la inteligencia y voluntad del ingeniero D. Pascual Aragonés (2).

Defectos de las vigas trianguladas.—El principal defecto es su mayor coste, pues exigen una carpintería perfecta, un gran desperdi-

(1) Detalles interesantes de su construcción, en la *R. de O. P.* de 1929, página 128, por el autor de su proyecto, el profesor D. Enrique Colás.

(2) En la *Revista de O. P.* de 1929, pág. 49, se describen con detalle los incidentes de la construcción. Hubiera sido mucho más económico construir tramos rectos con vigas de alma llena de 18 a 25 m. sobre palizadas dobles de H. A., y así lo había propuesto el Sr. Aragonés; pero no se aceptaron por consideraciones estéticas, algún tanto pueriles, en aquel país y a dos kilómetros de Larache.

cio de madera y dificultades de montaje de barras y apisonado del hormigón.

Se cree obtener economía al reducir los metros cúbicos de hormigón y los kilogramos de hierro, olvidando que al aligerar las vigas, sobre todo en la disposición triangulada que preconizó Zafra, se aumenta en proporción de 15 a 20 por 100, a juicio del autor, con relación a las vigas de alma llena, el coste de los moldes y el de la mano de obra.

Pero, además, obsérvese que no es exacta la hipótesis de cálculo

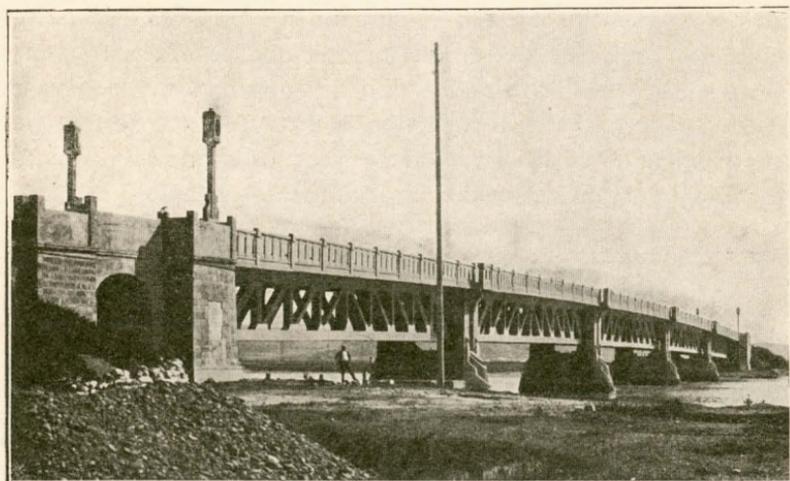


Fig. 33.—Puenle de Larache.

que suele aplicarse a estas vigas, suponiéndolas isostáticas. Para ello tendrían que realizarse las articulaciones en los nudos de las vigas, hipótesis errónea, ya que todas las barras que afluyen a dichos nudos quedan aprisionadas dentro del hormigón que las envuelve. Hay, pues, empotramiento y no articulación, y se producen en esos nudos esfuerzos secundarios de torsión no previstos en el cálculo y que pueden ser importantes (1).

(1) El profesor D. Alfonso Peña Beuf, que comparte nuestra opinión, para evitar aquel error de cálculo propone, en la segunda edición (pág. 235) de su *Mecánica elástica*, un método de cálculo de estas vigas, original y sencillo, que da suficiente aproximación para estimar los empotramientos y leyes de momentos secundarios en los nudos de estas vigas.

En todo caso, en varios puentes con vigas aligeradas del tipo triangular, el autor ha comprobado la presencia de grietas muy visibles en los nudos de empalmes, por las que penetra el agua y oxida las barras. Es la razón por la que aconsejamos las debidas previsiones en su cálculo, amén de una minuciosa ejecución en la obra.

Vigas Vierendeel.—Algo más sencillas de construcción son las vigas aligeradas, sin diagonales, del tipo Vierendeel, que pueden calcularse con bastante precisión (1).

Los ingenieros belgas, que preconizan y han aplicado en varios puentes la original disposición de su eminente profesor de la Escuela de Lieja, han vencido las resistencias que se ofrecieron en los primeros años al empleo de este tipo de entramados, y son ya muchísimos los tramos metálicos y los de H. A. en que se han adoptado, sancionando así la exactitud de las teorías que la justifica.

En España también tenemos un interesante ejemplo.

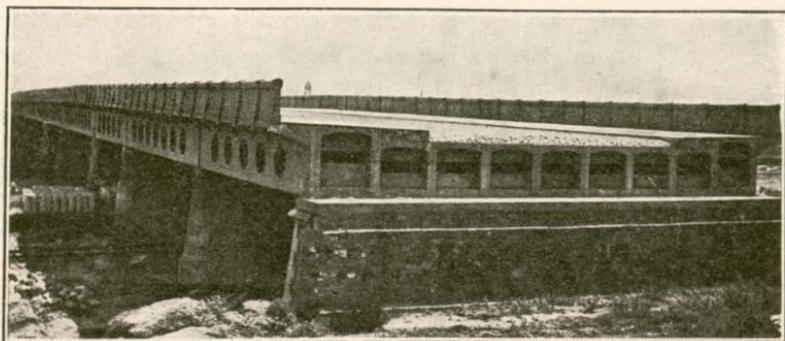


Fig. 34.—Paso superior en la estación de Clot.

Paso superior en la estación del Clot (La Sagra), Barcelona.

Construido por la Sociedad Construcciones y Pavimentos para la Compañía de M. Z. A.

Autor del proyecto: arquitecto D. Eduardo Fernández Díaz.

Vigas tipo Vierendeel.

Nueve tramos independientes de luces desiguales, comprendidas entre 13,61 y 23,61 m., por efecto de la situación de las vías

(1) Cuyo método de cálculo explica D. Alfonso Peña en su citada *Mecánica elástica*, segunda edición, pág. 227.

20 m. de ancho entre barandilla, antes de construído el terraplén de acceso.

La figura 35 representa la perspectiva isométrica de las armaduras de los montantes, que, como se ve, resultan bastante complicadas.

§ V.—DE TABLERO INFERIOR O INTERMEDIO (1)

Cuando la altura de rasante no permite disponer las vigas debajo del tablero, es necesario bajar éste, ya poniéndolo en la parte inferior de las vigas, como en la figura 37 - A - B - y C, o ya en la parte intermedia, si la rasante lo permite (fig. 37 - D).

Tablero.—Cuando se trata de un camino vecinal de simple vía, puede estar constituido el tablero por un forjado de 2,50 a 3 m. de luz; se puede además poner un andén en voladizo (fig. 37 - A).

Pero para carreteras o ferrocarriles en los que las distancias de las vigas excedan de 4 m., hay que poner viguetas transversales, como en las figuras 37 - B - C y D.

Los andenes en voladizo, por fuera de las vigas, permiten reducir la sección y peso de las viguetas.

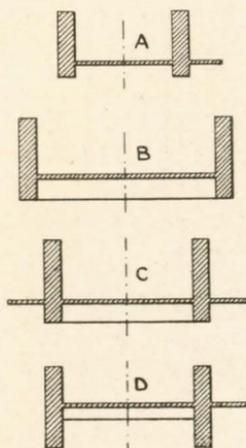


Fig. 37.

Vigas.—En estos tipos de vigas el forjado del tablero *no contribuye a la resistencia de aquéllas*, como ocurre en los tramos de tablero superior que antes examinamos, en los que el forjado actúa como cabeza de compresión de las vigas.

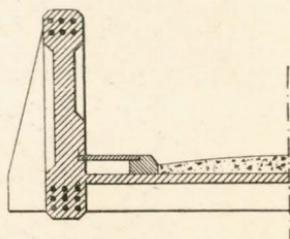


Fig. 38.

Tenemos, pues, que suplir aquella deficiencia con fuertes armaduras en la cabeza superior (fig. 38), y como entonces el conjunto de la viga tiene un peso muerto considerable, se anulan en gran parte las ventajas del H. A.

Tenemos, pues, que suplir aquella deficiencia con fuertes armaduras en la cabeza superior (fig. 38), y como entonces el conjunto de la viga tiene un peso muerto considerable, se anulan en gran parte las ventajas del H. A.

(1) En el tomo I, pág. 234, detallamos un ejemplo de pontón de este tipo.

Podrá, pues, ocurrir en algunos casos, que puedan resultar más económicos los tramos de tablero inferior enteramente metálicos, sobre todo en ferrocarriles, en que el tablero puede estar constituido por un ligero entramado al aire de viguetas y largueros; habrá, sin embargo, que tener en cuenta, en carreteras muy principalmente, la ventaja apreciable de la economía de conservación.

Respecto a disposiciones exteriores de las vigas, pueden ser muy variables, y presentamos algunos ejemplos.

Puente de Dueñas sobre el Pisuerga (Palencia).—Para sustituir a un puente colgado de 72 m. de luz, construido en 1845, se han construido cuatro tramos de tablero inferior y vigas con cabeza superior encorvada (fig. 39), solución que resultó más económica que la de otro puente colgado, o tramos exclusivamente metálicos.

Los cuatro tramos son iguales, de 18,54 metros de luz.

Las vigas laterales (fig. 40) sostienen 16 viguetas transversales. Costó este puente 382.000 pesetas, con pilas, un arco de aligeramiento en el estribo y barca de paso y defensa de márgenes (1).

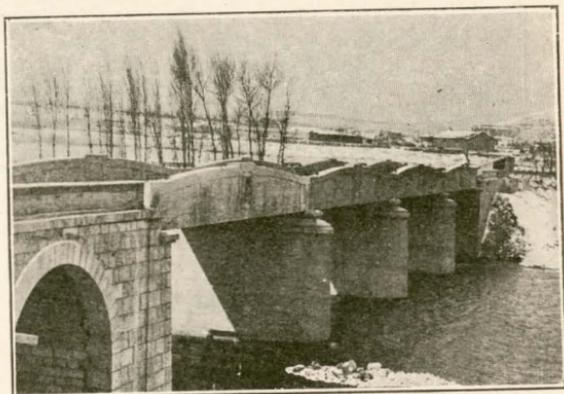


Fig. 39.—Puente de Dueñas.

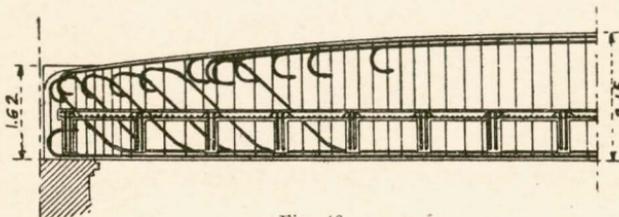


Fig. 40.

(1) Proyecto del ingeniero jefe D. José María Sáinz, que escribió un detallado artículo sobre esta obra en la *Revista de Obras Públicas*, 1928, pág. 236.

Puente sobre la Rambla del Obispo (puerto de Almería).—

Autor del proyecto: ingeniero D. Eusebio Elorrieta.

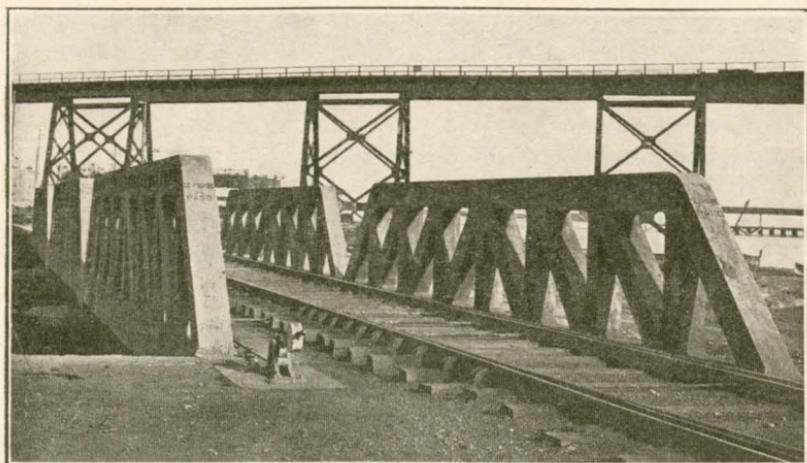


Fig. 41.—Puente de la rambla del Obispo.

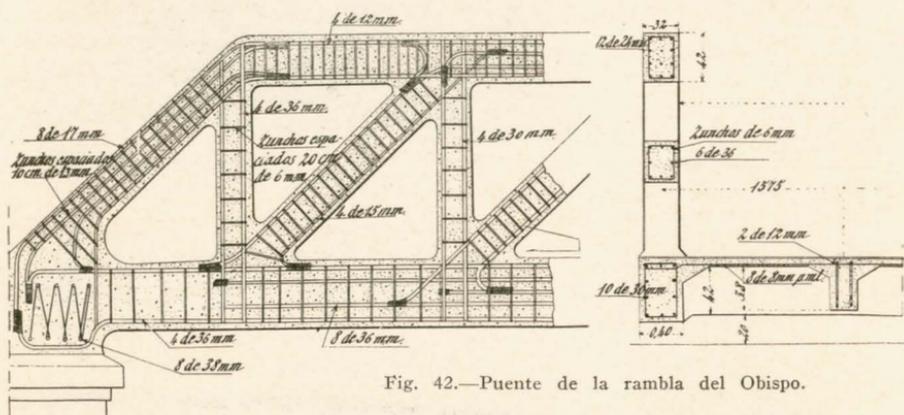


Fig. 42.—Puente de la rambla del Obispo.

Construído en 1921 para unir la estación del ferrocarril con el puerto.

Consta de tres tramos oblicuos de 15 m., sobre pilas cimentadas por aire comprimido (figs. 41 y 42).

Las barras redondas, exclusivamente empleadas para las armaduras, se han enlazado con fuertes ligaduras de alambre.

Puente sobre el Garona (Valle de Arán).—Construído por la Mancomunidad de Cataluña.

Tramo de 19 m. con *aceras voladas* de un metro; calzada

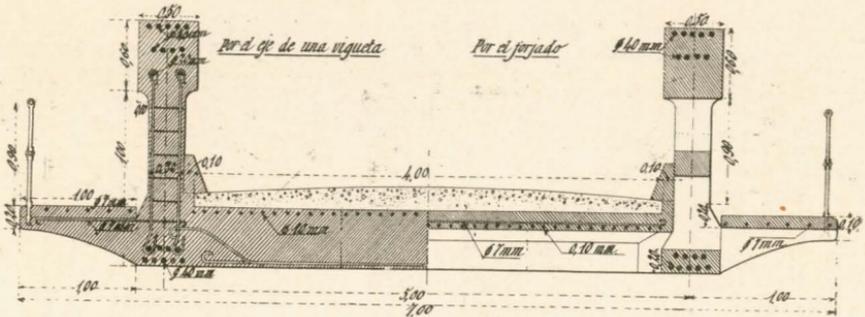


Fig. 43.—Puente en el Valle de Arán.

de cuatro metros; grueso de vigas, 0,50 (figs. 43 y 44).

Proyecto de D. Joaquín Camón, reformado por don Félix Ferrer.

El tramo costó 30.719 pesetas.

Esta disposición de aceras voladas es económica, porque reduce la luz del tablero de la calzada, y podría permitir la supresión de las viguetas, ya que para 4 m. de luz puede ponerse un simple forjado para la calzada.

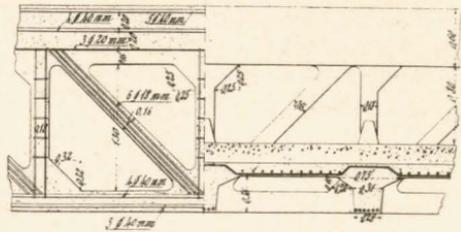


Fig. 44.—Puente del valle de Arán.

Puente de Unquera sobre el Deva (Santander).—Para la carretera de segundo orden de Torrelavega a Oviedo se construyó un puente con tres tramos de 26,50 m. de luz (figs. 45 y 46).

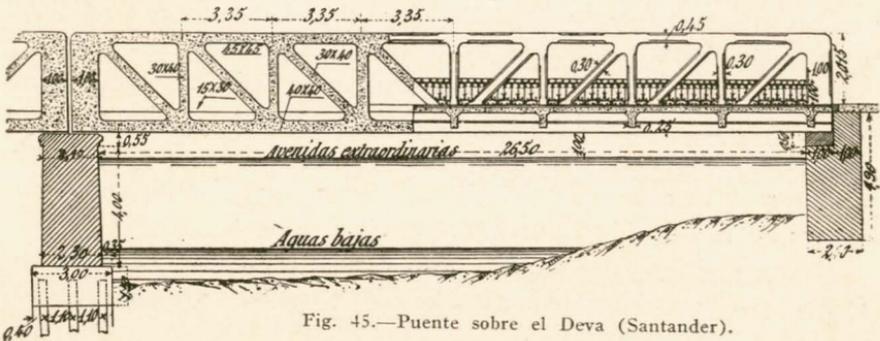


Fig. 45.—Puente sobre el Deva (Santander).

El ancho entre bordes interiores de las vigas laterales es de 6 m., que se distribuyen entre dos andenes interiores de 0,75 y una calzada de 4,50 m.

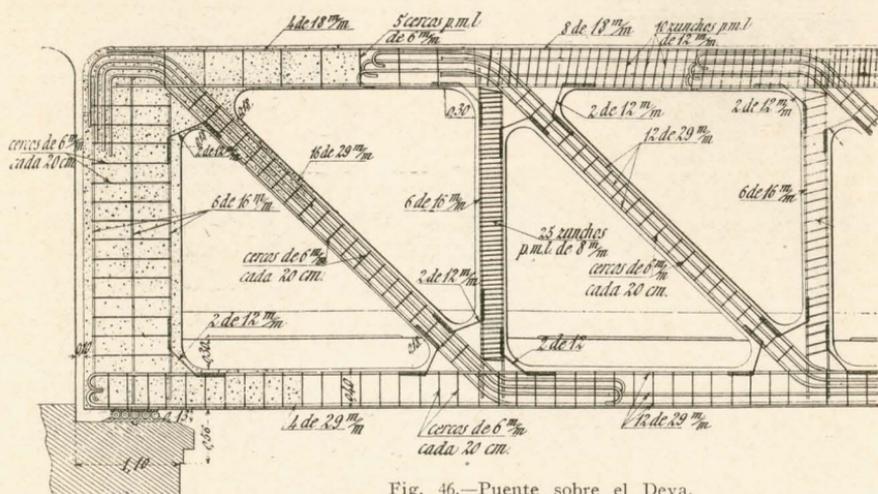


Fig. 46.—Puente sobre el Deva.

Puente de la calle de Lafayette (París).—Con motivo de considerables ampliaciones de la estación del Este, en París, se presentó el difícil problema de un paso superior a las vías, con dos tramos muy oblicuos, cuyas luces debían alcanzar 76,84 y 71,86 m. entre ejes.

El ancho libre del puente debía ser además de 19,50 m., y por debajo de su plataforma debían pasar todas las canalizaciones que corren a lo largo de la calle de Lafayette.

El ingeniero M. Caquot lo realizó con una solución original y bien proporcionada: mediante dos enormes vigas laterales y aligeradas de 10,40 m. de altura a 20,40 m. de distancia, sosteniendo un tablero inferior (figuras 47 y 47 bis).

El entramado del tablero está constituido por viguetas a 2,49 metros de distancia y cuatro largueros longitudinales L.L., unos y otros de H. A. y celosía, con objeto de que pueda circularse entre ellos sobre el forjado interior que los une, lo que permite, no sólo defender el tablero contra los efectos corrosivos de los humos de locomotoras que pasan por debajo, sino soportar todas las canalizaciones de la calle de Lafayette.

Las sobrecargas formidables a que están sometidas las vigas laterales, por la anchura de la calzada y las luces de los tramos, obligó

al empleo de aceros con resistencia de 45 kg. por milímetro cuadrado y límite mínimo elástico de 30 kg.; aun así, la cantidad de barras es tan elevada

en muchos de los nudos, que fueron precisas especiales precauciones de preparación de armaduras y moldes de hormigones.

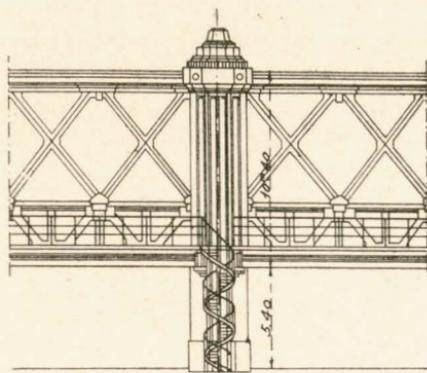


Fig. 47.—Punto de apoyo del puente de la calle de Lafayette (París).

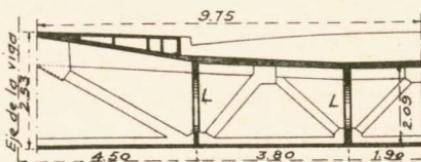


Fig. 47 bis.—Semi sección del tablero.

Esta muy interesante obra, inaugurada en 1928, costó seis millones de francos, y creemos que son los tramos rectos de más luz construídos hasta la fecha (1).

§ VI.—TRAMOS CONTINUOS

Sus ventajas.—Los tramos continuos de H. A., a semejanza de los metálicos, permiten disminuir la sección de las armaduras por efecto de la reducción de los momentos a favor de su empotramiento sobre los apoyos intermedios.

Para que esta hipótesis se realice es indispensable que las pilas no se muevan ni horizontal ni verticalmente. *Hay, pues, que tener la seguridad completa de la inmovilidad de los cimientos y de la absoluta rigidez de las pilas.*

Cuando se reúnan estos dos factores, los tramos continuos permiten conseguir una economía de metal de un 10 a un 15 por 100 de su peso, y para ello conviene, como en los tramos metálicos, aumentar en un 20 por 100 la luz de los tramos intermedios con relación a la de los extremos.

(1) Véanse detalles de su construcción en *Génie Civil* de 1.º de diciembre de 1928.

Ahora bien: como entonces los efectos de la dilatación son más sensibles en sus extremos, para no acentuarlos con exceso en los estribos terminales del puente, cuando se trata de puentes de longitudes superiores a 60 m., es preferible dividir la luz total en dos o más trozos, cada uno de ellos constituido a su vez por varios tramos continuos, apoyados en sus extremos sobre pilas-estribos, que lleven sus aparatos de dilatación.

Sus inconvenientes.—Los tramos independientes, a ser posible, deben proyectarse de igual luz, lo que permite utilizar los moldes sucesivamente en cada uno de los tramos.

Cuando son continuos, ya hemos visto que conviene darles luces desiguales: de aquí un aumento de coste en los moldes y mayor sujeción en su moldeo, que debe llevarse sin interrupción en todos los tramos solidarios.

Pero sobre todo ofrecen estos tramos continuos un peligro serio, si han de apoyarse sobre pilas cuyos cimientos no ofrezcan una seguridad completa, como son, por ejemplo, las cimentadas con pilotaje, tan frecuente en esta clase de puentes.

Los pilotes siempre están expuestos a un asiento, ya sea por socavación, ya por insuficiencia de hinca; en cuanto se produce el menor asiento de una pila, desaparece la hipótesis del empotramiento absoluto y se deforman y rompen las vigas en su apoyo.

Por último, la continuidad de los tramos acentúa en sus extremos los efectos de la dilatación y obliga a dispositivos complicados y no siempre eficaces.

Así es que serán contadísimos los casos en que puedan convenir los tramos continuos, y como la economía de hierro no es sensible en tramos de 10 a 20 m. de luz, que son los más corrientes, el autor siempre ha preferido construirlos independientes, en los que las dilataciones son poco apreciables (1).

(1) En dos puentes, en Marruecos, nos ha ocurrido que por socavaciones de los pilotes de palizadas, sufrieron éstas asientos de bastantes centímetros. Gracias a la independencia de los tramos, no sufrieron en lo más mínimo al seguir el descenso de los pilares de palizadas. Bastó defender y reforzar los cimientos, levantar con gatos hidráulicos los tramos movidos y recrecer los capiteles en los centímetros asentados. De haber sido los tramos continuos, hubiera resultado grave el accidente y forzosa la reconstrucción total de los tramos movidos.

Es el mejor procedimiento para suprimir las indecisiones de cálculo y las dificultades de construcción que se presentan en los tramos continuos.

Sin embargo, en el capítulo VII, cuando nos ocupemos de los apoyos de H. A., detallaremos algunos dispositivos que conviene realizar para el enlace de apoyos y vigas continuas.

§ VII.—CONCLUSIONES

El tramo independiente con tablero superior es la solución más económica de puente hasta luces de 25 m. en carreteras y ferrocarriles de vía estrecha, y hasta unos 20 m. en los ferrocarriles de vía ancha.

No deben emplearse vigas continuas sino en aquellos casos en que los cimientos de pilas y estribos estén asegurados contra todo asiento vertical y todo movimiento horizontal.

Si la altura de rasante y el nivel de crecidas no permitiera el empleo de tablero superior, pueden emplearse tramos rectos aligerados con tablero inferior, que en puentes carreteros serán hoy día más económicos en H. A. que con tramos metálicos.

Pero tratándose de puentes de ferrocarril, convendrá comparar los dos procedimientos constructivos, ya que en este caso el tablero metálico no necesita más que el entramado indispensable para las traviesas de la vía.

De los tipos de aligeramiento empleados, el autor prefiere el de reducir los espesores de las vigas en su parte central, adaptado para los modelos para ferrocarriles (véase capítulo III), y en América, para el puente sobre el río Salt, para 43 m. de luz.

Las disposiciones de vigas trianguladas y aun las de vigas de Viendeel aumentan sensiblemente el gasto de madera y mano de obra.

Conviene reducir las luces de los tramos cuanto lo consientan la altura de rasante y la importancia de los cimientos.

Al ocuparnos de los *Apoyos* (capítulo VII), insistiremos sobre este particular, ya que en este problema *los cimientos mandan*.

Sin embargo, recordamos aquí lo que con alguna insistencia dijimos en el tomo II, e hicimos observar en algunos ejemplos de puentes del tomo III; los ingenieros tienden a adoptar grandes luces, y son

muchos los casos en que sería *más económico* aumentar el número de apoyos y de cimientos.

Pero si fuese preciso adoptar luces superiores a 20 m. y no ofreciera confianza el terreno para someterlo a los empujes oblicuos de unas bóvedas o arcos, puede recurrirse a disposiciones especiales aplicables también a grandes luces, que sólo ejercen presiones verticales sobre los apoyos.

Son los *arcos sin empuje*, que estudiaremos en el capítulo VI.