

VIADUCTO MARTÍN GIL

Por FRANCISCO CASTELLON (Jefe), CESAR VILLALBA, ANTONIO SALAZAR y EDUARDO TORROJA, Ingenieros de Caminos.

Según se decía en el número anterior, comprende este segundo artículo lo referente al estudio completo e interesantísimo del procedimiento constructivo seguido en tan importante obra, que a continuación resumen los autores con gran acierto y claridad, pudiendo considerarse como un modelo de precisión lo que se refiere al plan de hormigonado.

II

En el proyecto se contaba, primeramente, con montar una cimbra de madera apoyada en castilletes, pero, una vez terminada la presa del Esla y embalsadas las aguas, se había proyectado la cimbra de madera recogida para montar, colgando de tres grupos de cables, uno central y dos laterales.

La construcción del arco puede decirse que se empezó durante nuestra guerra de liberación; empezando a montarse por administración esta cimbra de madera, pero las dificultades propias de su ejecución, unidas a las accidentales y no menos importantes que llevaba consigo la guerra, en lo que se refiere tanto a mano de obra especializada como a la obtención de los materiales, hizo pensar en la necesidad de cambiar de sistema constructivo.

Efectivamente, resultaba sumamente difícil montar la cimbra en la forma proyectada, es decir, colocando primeramente cuatro cuchillos o armaduras de los diez que formaban el conjunto de la cimbra, y colgando simplemente de unos cables que, naturalmente, variaban de posición a medida que la cimbra iba avanzando por efecto de la variación de los pesos de estos primeros cuchillos, habían de montarse los otros seis.

Teniendo que llevar la obra bastante lentamente, por las dificultades anormales que se atravesaban, las mermas consiguientes de la madera hacían todavía más difícil este montaje, particularmente si se tiene en cuenta que se trataba de escuadrías relativamente grandes, pues las cabezas estaban formadas de seis tabloncillos de 3×10 pulgadas, y las diagonales, que formaban dobles celosías Warren, por tabloncillos de la misma escuadría. La colocación exacta de todos estos elementos y la transmisión de los esfuerzos a través de la clavazón, unido, como decimos, a las mermas de la madera, en un clima tan seco como el de nuestra meseta castellana, aconsejaban desistir de este tipo de cimbra.

Por otra parte, teniendo la cimbra su cabeza superior coincidente con el intradós del arco, resultaba la directriz de la cimbra bastante diferente del funicular de los pesos que había de soportar y, en

consecuencia, habían de producirse flexiones y esfuerzos cortantes difíciles de resistir con una estructura de madera de este tipo. Por otra parte, también la gran altura del arco sobre los arranques era otra nueva dificultad, porque se sufrían y se preveían vientos frecuentes muy fuertes, como efectivamente sucedió, superando, en algunos momentos, los 180 kilómetros por hora; en estas condiciones, la tendencia al vuelco de la cimbra era grande, y hubiera resultado difícil mantenerla con la firmeza necesaria durante el hormigonado.

En estas condiciones, en el verano de 1939, se consideró conveniente estudiar la posibilidad de adoptar otro sistema de construcción que, variando lo menos posible la obra proyectada, permitiera, sin embargo, ejecutarla con la mayor seguridad; y después de diferentes estudios se adoptó la solución propuesta por el Ingeniero asesor D. Eduardo Torroja, de disponer una cercha metálica, constituyendo, en cierto modo, una armadura rígida del hormigón; de tal forma que, a medida que fuera colocándose éste, insistiendo sobre la cercha metálica, se fueran formando cordones de refuerzo que, trabajando conjuntamente con la cercha, en forma de estructura mixta, dieran, en todo momento, resistencia suficiente para soportar el nuevo hormigón fresco, hasta la terminación total del arco, y cuya estabilidad transversal quedara asegurada mediante un sistema de cables y botones de amarre, que luego se detalla.

Esta cercha metálica (fig. 1), cuya directriz se amolda sensiblemente a la directriz definitiva del arco, está formada por dos cuchillos arriostrados entre sí, tanto superior como inferiormente, por medio de montantes y cruces de San Andrés, y cada cuchillo queda constituido por las dos cabezas unidas por diagonales, en la forma acostumbrada, de una viga Warren.

Para dar más rigidez a los cuchillos, fué necesario formar cada cabeza y cada diagonal por dos perfiles dobles T, unidos entre sí por llaves, con lo cual se logra un momento de inercia suficiente para que los peligros de pandeo no obliguen a sobrecargar, inútilmente, de material la cercha.

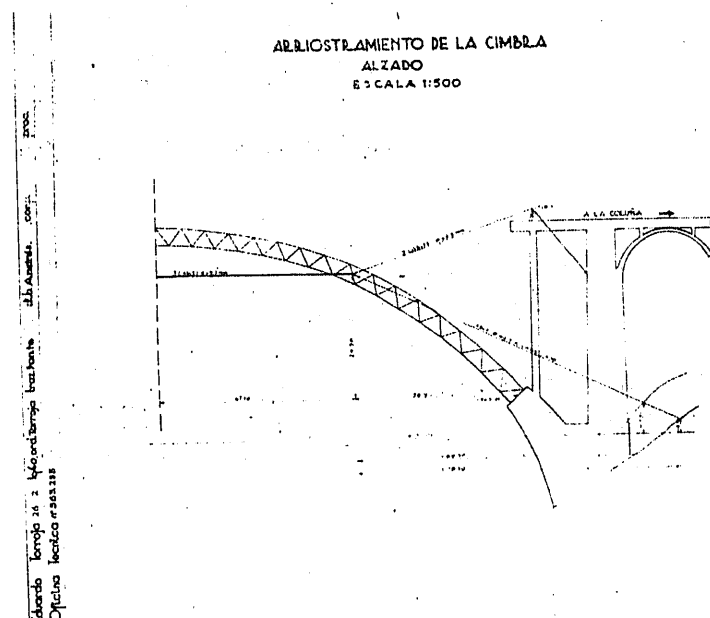


Fig. 1. — Alzado general de la cimbra en montaje.

La cabeza superior está formada por dos dobles T, perfil 26, y la cabeza inferior, así como las diagonales, por dos dobles T, perfil 14.

Los arriostramientos, tanto el superior como el inferior, entre cuchillo y cuchillo; están constituidos, también, por montantes de dobles perfiles del 10, y cruces de San Andrés, formadas por simples cuadrillos.

Para asegurar completamente la estructura contra los esfuerzos de torsión, se dispusieron otras cruces de San Andrés, de igual tipo, en los planos de cada dos diagonales gemelas; es decir, de las dos diagonales correspondientes en cada uno de los cuchillos.

En lugar de disponer los planos de los cuchillos en los ejes de los tabiques exteriores de la sección definitiva, como parecía lo lógico a primera vista, se consideró preferible colocarlos en los huecos que quedan entre tabique y tabique, aun a trueque de disminuir con ello la anchura total de la cercha, y, por consiguiente, su resistencia transversal al viento (fig. 2).

Esto es debido a que, de no hacerlo así, hubieran quedado los perfiles de las diagonales dentro de los tabiques estrechos de hormigón, y además, cruzándolos en dirección francamente inclinada con relación a la máxima compresión en el sentido del arco. Dada la importancia de la obra

⑥

y los esfuerzos a que ha de estar sometida, no parecía prudente exponerla, en toda la altura de los tabiques, a posibles fenómenos de deslizamiento, que podrían originarse como consecuencia de estos planos inclinados, pues la adherencia en ellos es siempre menor que en el seno del hormigón.

Por otra parte, con objeto de tener en todo momento la resistencia y rigidez necesarias para continuar el hormigonado en buenas condiciones, sin un exceso de hierro en la cercha metálica, se decidió reforzar, primeramente, las cabezas de la cercha, hormigonando sus cuatro cabezas o aristas, y si las superiores cayeran precisamente en el plano de los tabiques, sería necesario hormigonar éste de abajo a arriba contra el hormigón de la cabeza superior, hecho con anterioridad, lo cual daría lugar a una junta peligrosa por sus dificultades de ejecución.

Por el contrario, colocando los planos de cuchillos de la cercha metálica fuera de tabiques, este último inconveniente desaparece totalmente, ya que las cabezas a hormigonar primeramente se pueden construir de toda la altura definitiva, y, por consiguiente, las juntas a establecer entre estas cabezas y el resto del hormigón, que forma la sección del arco, son juntas verticales, contra las cuales el hormigón se puede verter cómodamente, desapareciendo, por com-

ARRIOSTRAMIENTO DE LA CIMBRA
PLANTA
ESCALA 1:500

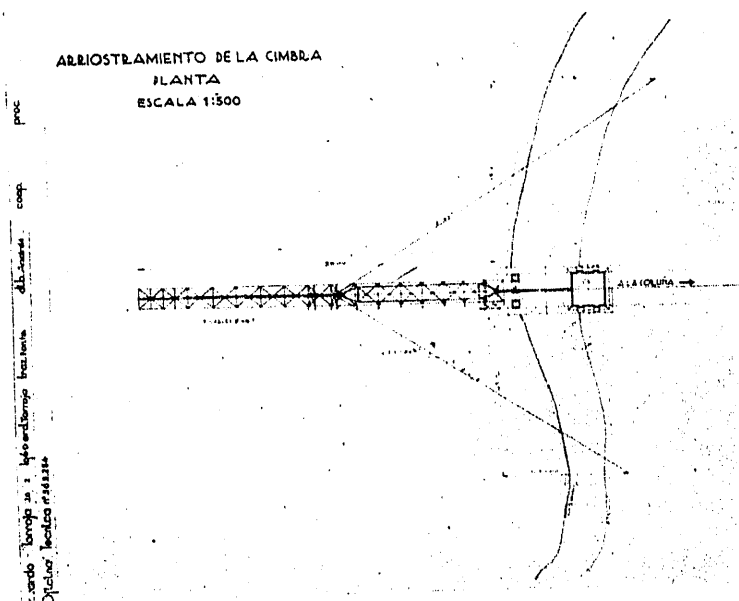


Fig. 2. — Planta general de la cimbra en montaje.

⑦

pleto, los inconvenientes del hormigonado bajo techo.

Los perfiles de las cabezas quedan en la dirección de los máximos esfuerzos, trabajando en buenas condiciones sin grandes tensiones de adherencia entre el hierro y el hormigón, y las diagonales que van inclinadas con relación al esfuerzo principal quedan, en casi la totalidad de su longitud, fuera del hormigón; solamente en una longitud muy pequeña, junto a su unión con las cabezas, quedan éstas colocadas oblicuamente en el hormigón. Cada diagonal, formada por dos perfiles, cuyas almas quedan en el plano vertical del arco, presenta el mínimo frente de discontinuidad dentro del hormigón ante los esfuerzos de compresión, reduciéndose, por consiguiente, al mínimo posible los inconvenientes de las estructuras rígidas dentro del hormigón, y aprovechándose, por otra parte, todas sus ventajas.

Las diagonales correspondientes a las cruces de San Andrés, tanto en la cabeza superior como en la inferior, cruzan oblicuamente estas cabezas, pero, como se ha adoptado el sistema de cruces de San Andrés, y no era necesario que estas diagonales trabajasen a compresión, pudo dárseles forma compacta de cuadradillo con pequeño lado, no representando, prácticamente, discontinuidad dentro del gran espesor de la cabeza; los esfuerzos son suficientemente pequeños para haber podido soportarlos con simples cuadradillos de tres centímetros de lado.

Se consideró preferible la forma de cuadradillo a la de barras redondas corrientes, por la mayor seguridad y facilidad que representa el enlace con las

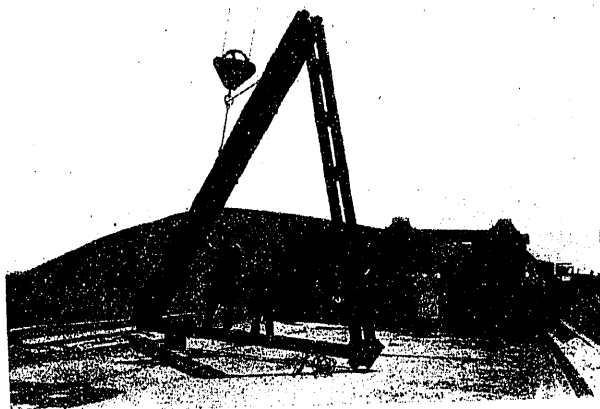


Fig. 3. --- Vista de un triángulo.

cabezas, particularmente si este enlace se hace por soldadura.

Las cruces de San Andrés, correspondientes a los planos inclinados de las diagonales de los cuchillos, que son del mismo tipo, quedan también al aire en su mayor longitud, cruzando solamente los tabiques interiores en dos puntos, y, por consiguiente, sin peligro ninguno para el trabajo de los mismos.

Los enlaces de todas las piezas de esta cercha metálica se proyectaron soldados en lugar de roblonados, también con la misma finalidad de introducir el mínimo de estorbos y el mínimo de planos de deslizamiento posibles dentro del hormigón. Así, se suprimieron las cartelas y los nudos quedaron con la máxima compacidad.

Desde luego, se consideró preferible la soldadura eléctrica al arco con electrodo revestido, por las mayores garantías que ofrece.

El montaje de esta cercha se proyectó por elementos separados, es decir, soldando entre sí el conjunto, formado por dos triángulos homólogos de cada cuchillo, con sus arriostros respectivos para trasladar, con el blondín de que se disponía, estos elementos hasta su posición definitiva; y hacer, después, la soldadura de unos triángulos con otros, pero formando solamente grupos de cuatro elementos triangulares (fig. 3), con longitudes alrededor de los 25 metros, dejándolos colgados, mediante pendolones provisionales, de los cables de suspensión, para no hacer la soldadura definitiva de estos trozos entre sí, hasta tener todos ellos dispuestos en su posición definitiva, y después de

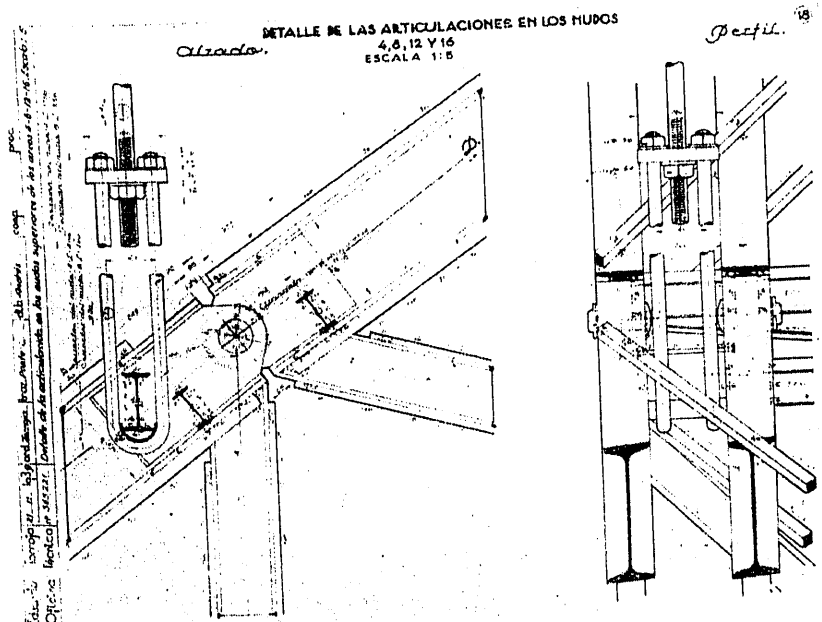
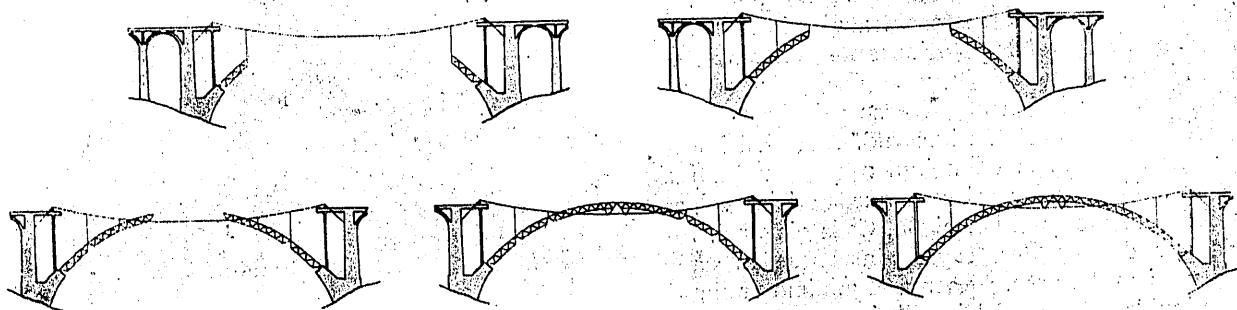


Fig. 4. --- Detalle de una articulación.



Fases del montaje de la cimbra.

corregir, perfectamente, la directriz general de la cercha, como vamos a ver.

Para facilitar la soldadura en obra de los cuatro elementos triangulares que forma cada grupo, iban provistos de pasadores provisionales que aseguraban la sujeción de cada dos triángulos consecutivos mientras se hacía una primera soldadura por puntos, para enlazarlos ya rígidamente y poder efectuar después la soldadura total con toda tranquilidad y seguridad.

En la unión de un grupo de triángulos con otro se dispusieron pequeñas rótulas provisionales, de tal forma, que, en este momento intermedio, la cercha metálica formaba una especie de arco con seis articulaciones.

Cada grupo o elemento rígido, entre articulación y articulación, quedaba colgado de los cables de suspensión por un corto número de pendolones, que permitía la corrección perfecta de la posición en el espacio de cada rótula; una vez logrado esto y comprobado por medios especiales de medida, se hacía una primera soldadura de sujeción por puntos, y después, la soldadura final, para dejar enclavadas ya las articulaciones intermedias, y que la cercha metálica constituyera de por sí un arco de tres articulaciones: dos en arranques y una en clave (fig. 4).

En este momento se retiraron los pendolones de los cables de suspensión, inútiles como elementos de sustentación de la cercha metálica, pues ésta, por sí sola, quedaba en buenas condiciones para soportar los esfuerzos de hormigonado hasta constituir el arco definitivo.

Sin embargo, carecía de rigidez suficiente para soportar los fuertes empujes de viento a que había de estar sometida durante la construcción. Aun teniendo resistencia teórica suficiente, las deformaciones y corrimientos que resultaban del cálculo, bajo la acción del viento, eran tan grandes que sobrepasaban los límites de lo admisible en buenas condiciones de trabajo, y por eso se adoptó, después de diferentes ensayos y tanteos, el sistema de completar la rigidez transversal de la cimbra, mediante unos cables de arriostramiento que mantuvieran, sensiblemente fijos en el espacio, dos puntos de la cercha

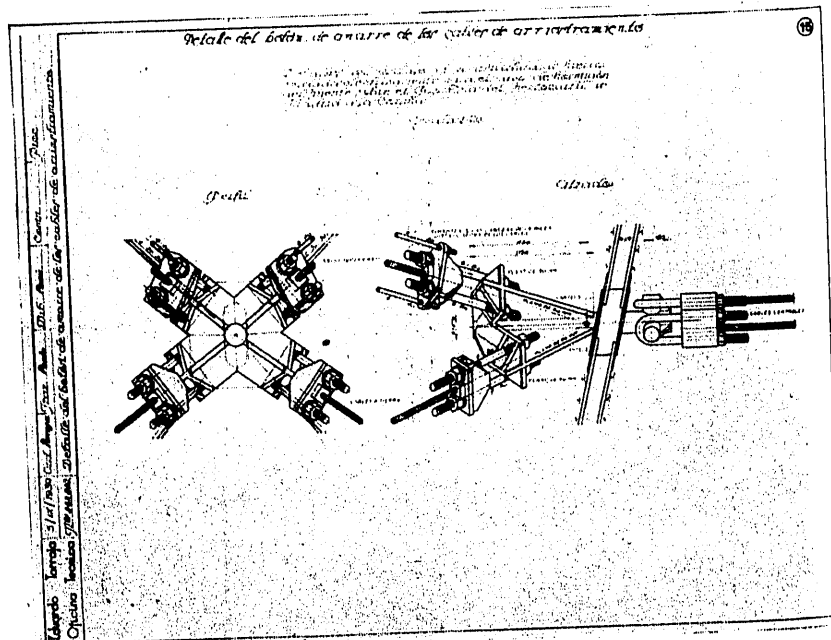
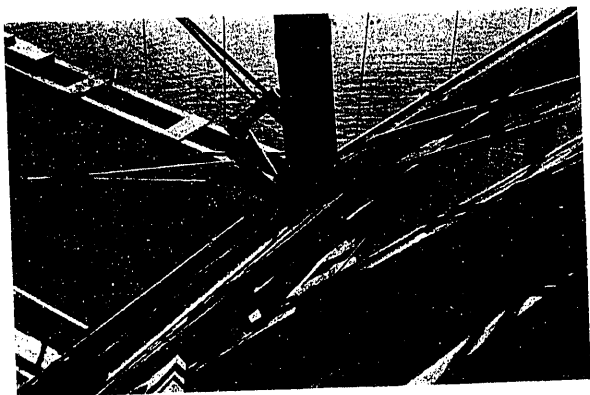


Fig. 5.—Botón de amarre.



Vista de la cimbra metálica.

metálica, situados a 39 metros de los arranques, y, por consiguiente, a una separación, entre sí, de 94 metros.

Cada uno de estos dos puntos o botones de amarre quedaban fijados por cuatro cables o grupos, de ellos: uno, horizontal, en el plano del arco, uniendo un botón con otro, que, arrancando del botón iban a parar a la ladera más próxima a uno y otro lado de la planta del arco, y otro, que, en el plano vertical del arco, subía desde el botón de amarre a la coronación de la pila-estribo. Así, cada botón quedaba fijo en el espacio por cuatro tensores, y todo el conjunto de cables podía disponerse con los mismos que constituían, primitivamente, el grupo central de cables de suspensión de la cimbra de madera. Los amarres, en las laderas, estaban formados por un solo cable. El elemento entre un botón y otro, por tres cables para-

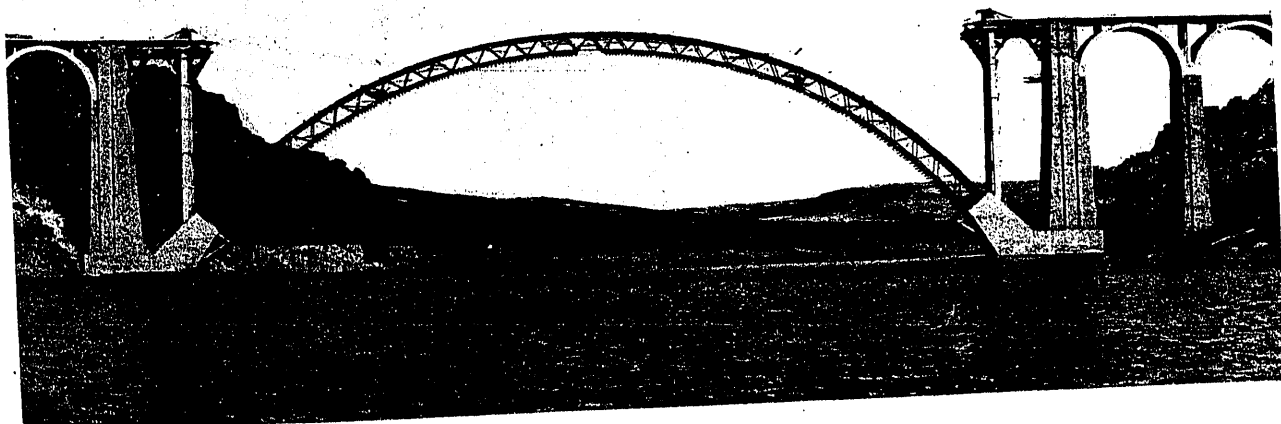
lelos, y los de sujeción de los botones a las pilas, por dos cables paralelos.

Estos dos últimos cables, que corresponden al plano vertical del eje del arco, quedaban, por consiguiente, debajo del cable del blondín, y hubieran constituido una dificultad para el hormigonado, ya que quedaban, en toda su longitud, por encima de la zona de arco a hormigonar. Para evitar estas dificultades, se separaron los cables al salir del botón de amarre, mediante una travesa horizontal de separación, volviendo a reunirse otra vez sobre la pila, de tal forma, que la cuba de hormigonado, que bajaba del blondín, podía pasar por entre los dos cables, sin dificultad.

Los cables de unión entre un botón y otro, aun cuando también iban por el eje del arco, no requerían ya esta precaución, puesto que pasaban por debajo del arco y no estorbaban el hormigonado.

La cercha, durante el montaje, quedó, primeramente, colgada de los cables laterales de suspensión de la cimbra de madera, pero sin colgar del sistema de cables centrales, de los cuales podía disponerse desde el primer momento para formar este sistema de arriostamiento de la cercha metálica.

Con objeto de asegurar la indeformabilidad de este sistema de triangulación, que forman los cables sobre el botón de amarre, era necesario evitar que, bajo la acción del viento, se aflojasen los cables del lado opuesto al viento, hasta el punto de quedar teóricamente trabajando en compresión, lo cual, naturalmente, no sería posible. Para ello se adoptó el sistema de establecer sobre los cables una tensión previa tal, que la compresión teórica, por efecto del



Vista general de la cimbra metálica.

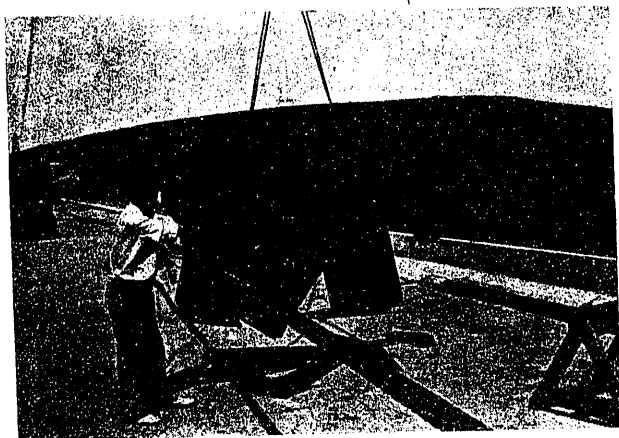


Fig. 6. — Vista del botón de amarre.

viento, no alcanzase, en ningún momento, esta tensión previa, y los cables estuvieran, por consiguiente, sometidos a tracción en todo momento.

La unión entre la cercha metálica y el botón de amarre se hacía mediante un grueso árbol que pasaba a través de unas abrazaderas (fig. 5) metálicas, rígidamente unidas a la cercha, y cuyo agujero o abertura era ovalado en sentido vertical. De este modo se evitaron los movimientos horizontales en dirección perpendicular al plano del arco, entre la cercha y el botón de amarre, ejerciendo así su acción de arriostramiento y rigidización contra la acción del viento, pero quedando la cercha metálica con posibilidad de movimiento en relación con el botón de amarre, en el plano vertical del eje del arco, para que los movimientos de la cercha, en este plano, por efecto de las dilataciones térmicas, y por efecto del hormigonado mismo, no vinieran coartados por el botón de amarre.

Una vez construída la cercha metálica, como acabamos de indicar, y arriostrada transversalmente por este sistema de cables, quedaba, holgadamente, resistente contra los esfuerzos del viento durante el hormigonado, siempre que éste se realizase progresiva y cuidadosamente, para evitar esfuerzos de flexión demasiado grandes sobre la cercha, a medida que se fuera extendiendo el hormigón de unos puntos a otros. Este estudio del plan de hormigonado constituyó una de las labores más pesadas del proyecto, no habiéndose llegado a la solución definitiva más que a través de multitud de tanteos, que permitieron ir mejorando la distribución del hormigonado hasta encajar los esfuerzos de las piezas metálicas de la cercha, dentro de unos máximos muy aceptables, ya que el peso total de esta cimbra no alcanzó los 500 kilogramos por metro lineal de arco.

Esto se logró en la siguiente forma:

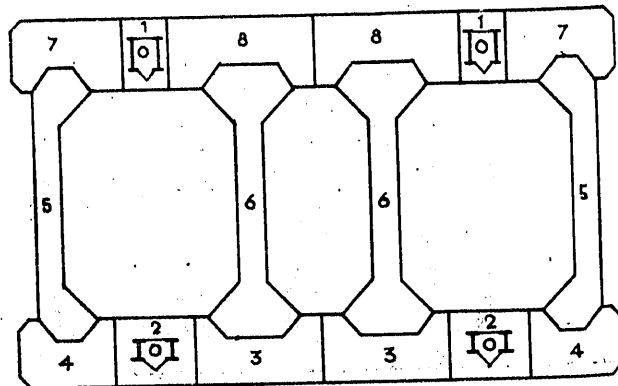
La cercha metálica, libre ya de los pendolones,

quedó constituyéndose un arco de tres articulaciones, situadas en la cabeza superior de la estructura, dos en arranques y una en clave. Se hormigonaron, primeramente (fig. 6), los núcleos o espacios que quedan comprendidos entre los perfiles de la cabeza superior de cada cuchillo, con objeto no solamente de aumentar la resistencia de ésta a compresión, sino de asegurarlos perfectamente a pandeo; el peso de estos rellenos de hormigón era pequeño, y podía efectuarse sin grandes preocupaciones.

Después de esto se hormigonaron, en toda la altura de la cabeza superior, los elementos o secciones que rodean cada una de las dos cabezas (cordón 1). Este hormigonado se hacía por trozos cortos, de unos 3,50 metros de longitud, para que los efectos de retracción fueran pequeños y pudieran quedar, en gran parte, anulados, dejando unas pequeñas juntas de unos 10 centímetros entre unos trozos y otros, las cuales se hormigonaban las últimas, cuando la retracción de todo el conjunto de trozos del arco hubiera podido producirse ya en su mayor parte. No era indiferente, en estas dovelas, la marcha de hormigonado, sino que era necesario ir siguiendo un determinado orden para que el funicular de cargas no se separase demasiado de la directriz de la cercha y, por consiguiente, no se produjesen tensiones excesivas en las cabezas, por flexión, ni en las diagonales, por efecto de los esfuerzos cortantes correspondientes.

Una vez hormigonados estos dos cordones superiores, la resistencia de la cabeza superior de la cimbra quedaba muy aumentada, y era ya posible hacer, en análoga forma, el hormigonado de las dos cabezas inferiores (cordón 2). Al terminar este hormigonado, como esta cabeza inferior quedaba sin trabajo en el primer momento, el de la cabeza superior era demasiado fuerte para poder continuar vertiendo hormigón, y sobrecargándola todavía más.

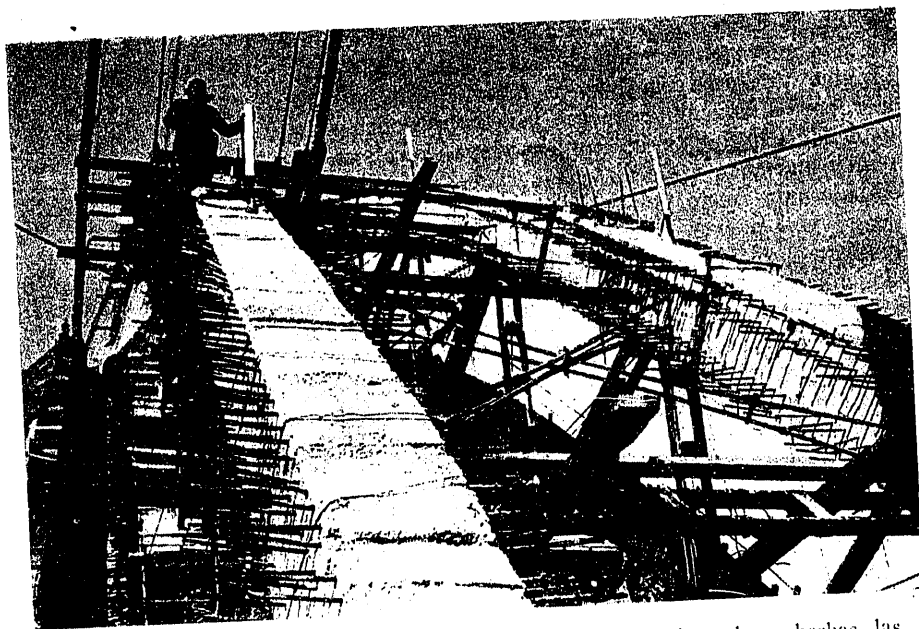
Para evitarlo, se introdujeron unos gatos hidráulicos, tanto en arranques como en clave, en la cabe-



Sección transversal con orden de cordones.

za inferior, con objeto de provocar en ésta una compresión de unas 150 toneladas por cuchillo, que, al mismo tiempo que ponía en carga la cabeza inferior, aliviaba, en una cantidad semejante, la carga a compresión de la cabeza superior, repartiéndola, por consiguiente, los esfuerzos entre ambos elementos; una vez hecha esta maniobra y enclavadas con hormigón las juntas, en las que se habían aplicado los gatos, el conjunto quedó formando un arco continuo empotrado en sus extremos, y constituido por cuatro cabezas o cordones de hormigón, unidos entre sí mediante las diagonales y arriostramientos metálicos de la cercha. Este conjunto estaba en buenas condiciones de resistencia para soportar las cargas correspondientes al hormigonado de la cabeza inferior, entre cuchillo y cuchillo; después de ello, el conjunto soportaba también el hormigonado de las partes laterales de la cabeza inferior, quedando ya ésta totalmente hormigonada.

En la misma forma se hormigonaron después los cuatro tabiques y, por último, los elementos de la



Viaducto del Esla. Vista superior del cordón 1, ya hormigonado y hechas las juntas, y por lo tanto en pleno trabajo. Se aprecian en la fotografía las miras fijas de nivelación colocadas en cada uno de los nudos.

cabeza superior, hasta completar el arco. Las juntas entre estos diferentes cordones o roscas, se colocaron en forma que dieran una superficie de contacto suficientemente grande, y dejando, a los tabiques, una zona de ensanchamiento en la parte superior, para asegurar sus condiciones de estabilidad contra pandeo lateral.

Este pandeo, además, venía impedido por la sujeción de estas cabezas superiores de los tabiques a los elementos metálicos de la cercha, preparados al efecto.

El hormigonado de todos estos cordones se hizo en la misma forma que hemos explicado para el hormigonado de las cabezas superiores iniciales; es decir, por trozos cortos, con arreglo al plan establecido en el proyecto, y dejando, entre uno y otro, pequeñas juntas de contracción para rellenarlas o enclavarlas, una vez terminado el hormigonado de cada cordón, habiendo dado con ello tiempo a que se verificase la parte más importante de la retracción.

Una vez terminado el hormigonado del arco, en la forma prevista, podría darse ya por



Viaducto del Esla. Vista de dos dovelas hormigonadas y la intermedia sin hormigonar del cordón 2, viendo a la izquierda de la fotografía el encofrado lateral del cordón 4.

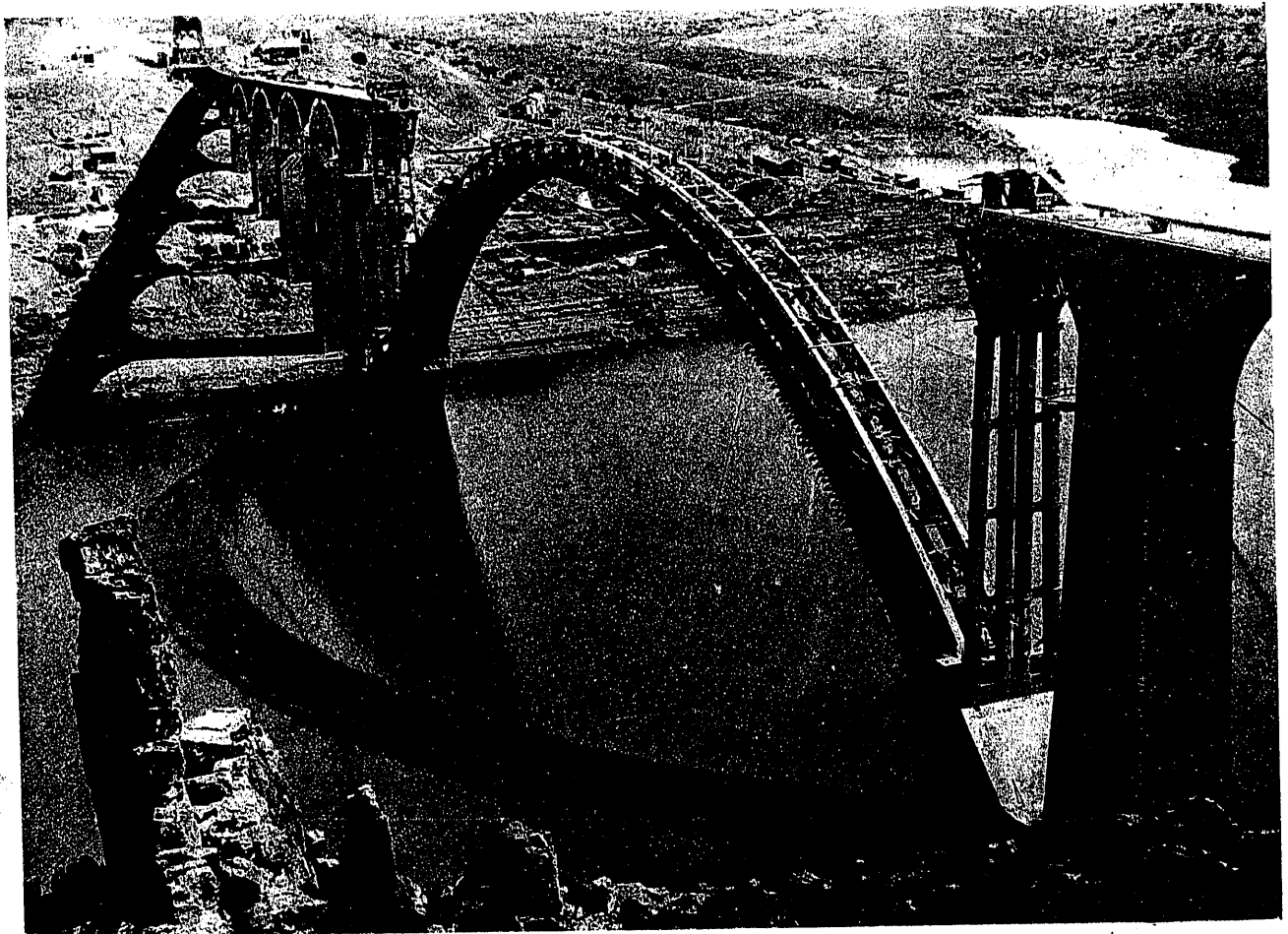
terminado éste, pero se consideró preferible introducir una nueva compresión en clave, con los gatos hidráulicos, mayor en la cabeza superior que en la inferior, para igualar, nuevamente, las compresiones, pues habiéndose hormigonado en último lugar la cabeza superior quedaban estos últimos cordones sin carga de trabajo por efecto del peso propio del arco, y aun cuando las nuevas cargas producidas por el tablero tendían a disminuir esta desproporción, se obtenía, sin embargo, un reparto más igual de esfuerzos en toda la sección mediante esta maniobra de apertura angular de la clave, cuya introducción en arcos de importancia es ya clásica.

Terminado el hormigonado del arco en esta forma, se retiraron los cables de sujeción; las diagonales interiores que quedaron alojadas en los cajones interiores del arco, sin utilidad posterior, pudiendo cortarse a soplete y retirarse, siendo éste el único material que puede considerarse inútil en la obra definitiva, ya que el resto de los elementos metálicos queda embutido en el hormigón, formando parte in-

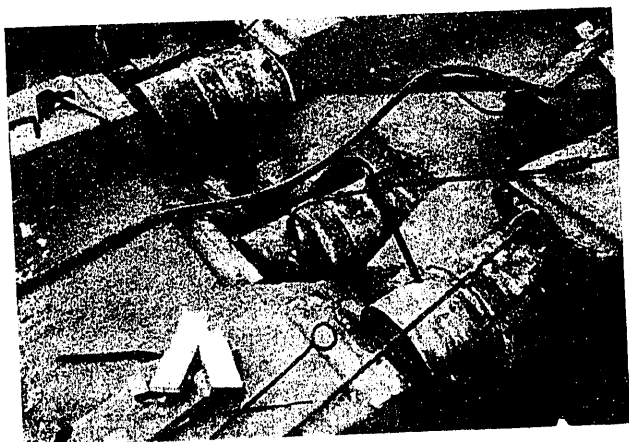
tegrante de éste, particularmente en las cabezas, en las que su resistencia a compresión se suma al de compresión del hormigón.

Se dió especial importancia, no solamente a los esfuerzos que tenían que sufrir todos y cada uno de los elementos durante el período de construcción, sino también a las deformaciones y recorridos que se habían de producir.

Para ello, se tuvieron en cuenta los conocimientos actuales sobre el comportamiento elástico y plástico del hormigón; se consideraron no solamente las deformaciones elásticas con los módulos de elasticidad correspondientes a las diferentes edades del hormigón, sino también las deformaciones lentas que tiene que sufrir cada cordón por efecto de la tensión a que se le somete en los diferentes períodos de la construcción, pudiendo estas deformaciones lentas, como se sabe, alcanzar valores relativamente importantes, particularmente durante el período de construcción, en que los hormigones son jóvenes y tienen una deformabilidad mayor bajo la acción de las cargas.



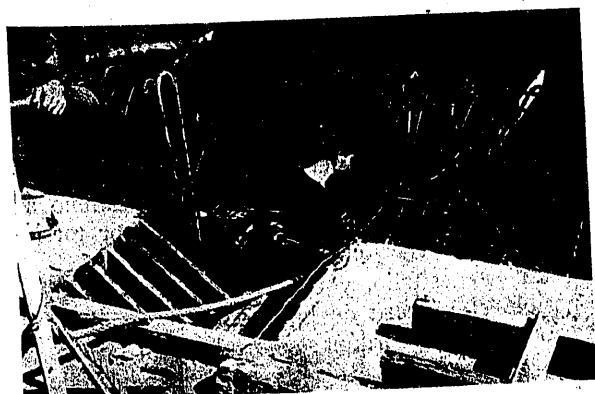
Vista general en período de hormigonado.



Vistas de los gatos.

Del estudio detallado que se hizo en este conjunto de movimientos, se dedujeron los cuadros de los recorridos probables, aproximados, que debía sufrir el arco en diferentes secciones, y más particularmente la sección de clave, las secciones de riñones y cuatro secciones intermedias, una en cada semiarco, entre arranques y riñones, y otra entre arranques y clave. Estos datos se consideraron esenciales para poder establecer un "control" de los movimientos y de los regímenes de trabajo del arco durante la construcción; pues, no podía evitarse el que, durante ella, se produjesen diferencias de peso con relación a lo previsto, de unos puntos a otros del arco, y siendo el equilibrio de éste muy sensible a estas variaciones, había un gran interés en conocer, en cualquier momento, el estado de tensión y deformación del arco para poder corregir, inmediatamente, las diferencias de peso o de tensión que apareciesen.

Con este fin, se incluyó también en el proyecto un capítulo referente a la forma de hacer estas medidas y a las instalaciones necesarias para ello.

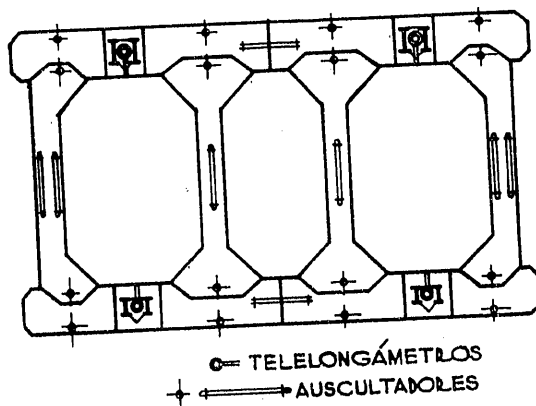


Vista de la disposición de rótulas en clave durante el hormigonado.

La marcha de hormigonado, con arreglo a todo lo que acabamos de exponer, se suponía desarrollada en un plazo de seis meses y medio, a razón de unos treinta días por rosca, con objeto de dar siempre tiempo a que cada una pudiera entrar en trabajo al sobrecargarla con el peso de la rosca siguiente, cuando ya ella tenía resistencia aceptable para estos trabajos provisionales, y en la construcción se prolongaron aún más estos plazos.

Esta marcha de hormigonado se estudió también de acuerdo con las posibilidades de la obra; es decir, con la capacidad de trabajo del blondín, de tal forma que pudieran hormigonarse, simultáneamente, cuatro elementos colocados simétricamente con relación a los ejes de simetría del arco.

Las cargas unitarias o tensiones de trabajo que resultaron de la total maniobra quedaban, en general, por bajo de los 75 kilogramos por centímetro cuadrado, carga que se elevaba accidentalmente has-



Sección transversal con posición de aparatos para lectura de deformaciones.

ta 105 kilogramos por centímetro cuadrado en algunas partes zunchadas al efecto, y bien defendidas contra rotura por los elementos colindantes.

En los puntos de aplicación de los gatos hidráulicos se dispusieron los ensanchamientos de hormigón y los zunchos de enrejados necesarios para resistir este empuje local y transmitirlo, en buenas condiciones, al conjunto de la sección del arco.

Dada la complejidad y extensión de los cálculos desarrollados, y estando en preparación una publicación especial sobre el proyecto de ejecución de este viaducto, no hemos de entrar aquí en el detalle de los mismos.

Solamente indicaremos, por consiguiente, ligeramente, los temas estudiados y algo sobre la marcha seguida.

El cálculo se dividió en las seis partes siguientes:

Cálculo de los elementos de montaje y arriostramiento de la cercha metálica.

Cálculo de los esfuerzos producidos por las cargas verticales, debidos al hormigonado y la sobrecarga.

Estudio de las deformaciones longitudinales, elásticas y lentas, sufridas por las diferentes roscas y reparto de cargas en las mismas.

Cálculo de los esfuerzos accidentales y secundarios producidos por el viento, en dirección transversal y longitudinal, y por efecto térmico.

Estudio de los movimientos del arco y correcciones a introducir en su directriz inicial.

Sistema de medidas de deformación y recorridos, y "control" a establecer durante la marcha de la obra.

Siguiendo este mismo orden, se empezó por estudiar los esfuerzos producidos en la cercha metálica durante las diferentes fases de montaje, y, en particular, cuando uno de los cuatro triángulos quedaba colgado de sus extremos, y sostenía, en voladizo, los cuatro siguientes, hasta alcanzar el pendolón próximo. Asimismo se comprobó, en la posición más desfavorable, la resistencia de los cables de suspensión de los pendolones correspondientes de los elementos auxiliares de sujeción y corrección de montaje, articulaciones, etc.

Los cables de sujeción del botón de amarre se calcularon, para el empuje de viento, en el momento más desfavorable; es decir, cuando no estaba todavía hormigonada la cabeza inferior, y, sin embargo, estaban montados los encofrados con la superficie correspondiente de resistencia al viento.

En estas condiciones, se vio que en el sistema hiperestático, que formaba la cercha trabajando a flexión y torsión, y los cables de sujeción, prácticamente casi todo el esfuerzo era soportado por estos últimos, y en estas condiciones se determinó la tensión previa que había de dárseles, para evitar que ninguno de ellos trabajara a compresión.

Después de esto se estudiaron las múltiples condiciones de trabajo a que se sometía la cimbra durante el proceso de hormigonado, de las diferentes roscas o cordones, considerando, en cada momento, la sección resistente correspondiente; es decir, la sección mixta formada por la estructura metálica y los cordones o roscas de hormigón, ya hormigonadas y rejuntadas previamente.

Asimismo, se calcularon también los esfuerzos producidos por los gatos, que se aplicaron, como hemos dicho, en la cabeza inferior, antes de enclavar las articulaciones de clave y arranque; es decir, en el momento de convertir el arco de tres rótulas en un arco empotrado continuo.

Al hacer estos cálculos se vio la conveniencia de

variar el espesor de los cordones longitudinales; en particular, los que envolvían las cabezas superiores de los cuchillos metálicos se hicieron de 1,25 metros de anchura, en arranques; 1 metro, en riñones, y 0,70, en clave.

También fué necesario, en el plan de hormigonado, introducir muchas veces dovelas de un cordón antes de terminar el cordón anterior, con objeto de centrar el funicular de cargas y repartir siempre los esfuerzos en la forma más conveniente, según la sección resistente de que se iba disponiendo.

Para todos estos cálculos se consideró, también, necesario estudiar la variación probable del módulo de elasticidad longitudinal del hormigón y del módulo de deformación a lo largo del tiempo, según fuera la edad del hormigón en cada cordón en el momento estudiado.

Mediante el trazado de líneas de influencia, y aplicando el método gráfico de Janni, se disponía de los datos necesarios para el cálculo de los esfuerzos en las diagonales y cabezas.

En particular, para el cálculo de las diagonales, se tuvo en cuenta que, durante el hormigonado correspondiente de los cordones de las cabezas, la totalidad de dichos esfuerzos se repartían entre los tabiques y las diagonales, en proporción inversa a la deformabilidad que ofrecía uno y otro elemento en el trabajo, por esfuerzo cortante.

El cálculo de los esfuerzos producidos sobre el arco una vez terminado, por la palizada, tablero, sobrecargas, etc., así como por efecto de la apertura de clave, no presentaba ya ninguna particularidad especial. La sobrecarga era la correspondiente a doble vía normal, con balasto.

• Pero para el estudio anterior, particularmente durante el proceso de hormigonado, y aun después de efectuada la apertura de clave, así como para el cálculo del esfuerzo que había que introducir para esta apertura, y el recorrido probable que hubiera que dar a los gatos, era necesario estudiar, con detalle, las deformaciones, no solamente del conjunto, sino de cada una de las partes o cordones dentro del conjunto de la sección, pues dadas las proporciones de la obra, la influencia de fenómenos que pudiéramos llamar anormales, era ya muy apreciable. Ciertamente, el gran peralte del arco disminuía los efectos perjudiciales de estos fenómenos, y en cambio aumentaba mucho los peligros de vuelco, por torsión, durante la construcción.

Para este estudio, y con objeto de disminuir en lo posible el número de hipótesis, se consideró necesario que cada cordón se hormigonara en un período de diez a quince días, y se prescindiera de los incrementos de flexión y esfuerzo axial debido a cada parte del cordón, considerando solamente los valores producidos después de la adición de cada uno

de estos cordones completos. Así se suponían los módulos elásticos del material en cada cordón, correspondientes a cada uno de los momentos en que se terminaba de hornigonar uno cualquiera de los cordones siguientes; y se suponía que estas condiciones de deformación se mantenían constantes en el período comprendido entre el hornigonado de un cordón y el siguiente. Con estos datos, es decir, sabiendo en cada momento las cargas que soportaba cada cordón y sus condiciones de deformación, se determinaba, por los métodos correspondientes de la resistencia de materiales, las deformaciones y reco-

je del viento, determinándose el reparto de esfuerzos cortantes por el método de Prandtl, particularmente, para comprobar si en las juntas de hornigonado, tal como se habían dispuesto, la resistencia era suficiente.

En cuanto a los esfuerzos térmicos, se estudiaron también, en la forma clásica, a partir del momento en que se enclavaban las articulaciones, considerando no solamente la sección completa, sino también los períodos intermedios; esto es, cuando la sección de hornigón estaba formada solamente de los cordones que rodeaban las cabezas de la cercha metálica, cuan-



Viaducto del Esla. Vista general del arco hornigonado.

rridos, o movimientos en el espacio, correspondientes a la terminación de hornigonado de cada uno de los cordones.

Como la retracción podía producirse, en gran parte, antes de enclavar las juntas entre dovelas de un mismo cordón, se consideró incluida la retracción remanente en la deformación lenta del hormigón, para no tener que hacer un cálculo independiente de ello.

Para todos estos estudios se adoptó la ley general de deformación del hormigón, propuesta anteriormente por uno de los autores del proyecto.

Aparte de esto, se estudiaron también otros esfuerzos accidentales. Hemos indicado cómo se hizo el estudio del viento sobre la cercha metálica. También se analizó, con detenimiento, la flexión y torsión que producía sobre el arco definitivo el empu-

do estaba totalmente hornigonada la cabeza inferior y cuando estaban hornigonados los tabiques.

El cálculo se completó con el estudio de multitud de esfuerzos accidentales o secundarios que se presentaban, tales como: la influencia del peso de cada devela sobre los elementos que la sustentaban; posibles esfuerzos secundarios producidos por la diferencia de contracciones o dilataciones térmicas entre tabiques interiores y exteriores, o entre las paredes interior y exterior de estos últimos, etc.

Por último, para la determinación de las cargas de trabajo del arco en cada cordón, se hizo la corrección que resultaba de los estudios de deformación hechos, como se ha dicho anteriormente, y que, en general, venían a disminuir la carga de trabajo de los más cargados, tendiendo a regularizar el trabajo del conjunto.