562 - 57

puentes para carretera en Serre-Ponçon

J. COURBON

Ing. de Ponts et Chaussées
Director de Estudios de la Sociedad de Grands Travaux de Marseille

Introducción

En el Departamento de los Altos Alpes (Francia) se ha proyectado levantar una presa de cierre sobre el río Durance en una zona denominada Serre-Ponçon. La construcción de esta presa crea un remanso de unos 20 kilómetros de longitud que ha obligado a modificar los trazados de la línea férrea y varias carreteras cuyas plataformas se hallaban en zonas inundables por el referido remanso.

Estas reformas afectan no sólo al cauce del río Durance, sino a sus afluentes próximos, por lo que se han tenido que proyectar varias obras de fábrica para salvar el río y sus afluentes en estos parajes.

Los puentes para ferrocarril son metálicos, mientras que los de carretera, entre los que se encuentran obras muy importantes, tales como el de Riou-Bourdou, Savines, Grande-Côte y el del Réallon, son de hormigón armado y pretensado, cuya construcción y estudio se ha confiado a la Société des Grands Travaux de Marseille, que ha realizado las obras para E. D. F. y bajo el control de los servicios nacionales de Obras Públicas.

Problema general

Aun habiendo una diversidad de casos particulares, existía una cierta base común para las cuatro obras.

Desde un principio se dio la importancia debida al plazo de ejecución, pues un retraso por este motivo daría lugar a una marcada pérdida de carácter económico en la explotación del salto hidroeléctrico de Serre-Ponçon. Todo esto suponía una situación delicada en la construcción por su periodo tan reducido para obras de esta importancia.

La exposición a grandes y violentas avenidas en el río Réallon constituían un gran peligro para los entramados del encimbrado, lo que exigía la supresión de los mismos.

El terreno, en general, no presentó dificultades para las cimentaciones y apoyos.

Concepción general de las obras

La Empresa encargada de la realización, Grands Travaux de Marseille, propuso un tipo de puente del que ya se habían construido varias obras por la referida Empresa, y que presentaban varias características particularmente adaptables a las condiciones presentes en el problema general de este caso. La solución propuesta resultó ser la más económica entre las que se presentaron al concurso, y fue adoptada como proyecto de ejecución.

El principio seguido consiste en construir los tramos en voladizo partiendo en sentido opuesto de cada apoyo intermedio o entre estribo y apoyo, según los casos, y cerrar las ménsulas por medio de una articulación constituida por una rótula cilíndrica en cada clave. Durante el cierre de estos tramos entre apoyos o estribos y apoyo inmediato, los estribos se mantuvieron equilibrados, y las ménsulas arrancan, como es natural, constituyendo un empotramiento perfecto. Las articulaciones en la clave no permiten más movimiento que el vertical.

La construcción en voladizo se realiza sin apoyo alguno sobre el terreno. El apoyo lo constituye la propia obra a medida que avanza. Este tipo de construcción permite trabajar simultáneamente en varios tramos, lo que constituye una singular ventaja para reducir el periodo de ejecución, muy particularmente en el puente de Savines, que tiene casi un kilómetro de longitud. Este tipo de puente se presta muy bien al pretensado, ya que el trazado de los cables es muy sencillo y de grandes radios de curvatura, con la ventaja de obtener una estructura isostática durante el periodo de puesta en tensión de los cables que, después, se transforma en hiperestática al solidarizar las ménsulas en las articulaciones de las claves en los distintos tramos.

puente Savines

Esta obra constituye un paso para carretera sobre el río Durance en las proximidades de Savines, de donde ha recibido el nombre.

El río presenta un perfil casi vertical en la margen izquierda y de pendiente suave en la opuesta. Para determinar la longitud de la obra, teniendo en cuenta el nivel del agua retenida por la presa, se estudió el valor de un dique de relleno comparado con la obra de fábrica, y se llegó a la conclusión que para una cota de 15 m para el terraplén el dique era tan económico como el puente. Esta comparación dio, como consecuencia, 924 m de longitud de puente.

La luz de los tramos, después de tener en cuenta que el cauce propiamente dicho del río debía salvarse en un solo tramo, resultó ser de 77 y de 38,50 m en los dos tramos laterales más próximos a los estribos, lo que constituye un conjunto de 13 tramos en total.

Los tramos centrales se han construido con dos ménsulas unidas en la clave, y en los dos laterales por una ménsula, en cada tramo, que, arrancando de un apoyo, termina descansando simplemente en el estribo con una longitud de 38,50 m. Debido a esta disposición, los estribos dan reacciones relativamente ligeras, y pueden apoyarse sobre el propio relleno de los accesos.

La calzada de este puente es de 7 m de anchura, y se ha extendido lateralmente con dos andenes de un metro cada uno.

Las pilas o soportes están constituidos por fustes pretensados que descansan sobre una base de cimientos que sirve de anclaje para los cables de pretensado. Las dos pilas que soportan el tramo que salva el río tienen por cimiento, cada una, un cajón que se ha hundido hasta terreno firme y a cielo abierto. Estos cajones son de forma cúbica de $12 \times 10 \times 10$ m, con 1,10 m de espesor de paredes. Una vez colocados se han rellenado con hormigón en masa hasta una altura de 7 m. En los 3 m restantes de la altura del cajón se ha hormigonado una losa armada que sirve para anclar los cables del pretensado. Los demás soportes se han construido sobre cimentaciones ordinarias que descienden, según los casos, hasta 8 m de profundidad, pero en la parte superior se ha formado una base cuadrada, de 5,60 m de lado, de 3 m de altura y muros de un metro de espesor.

El cuerpo de cada pila, de sección tubular cuadrada, de 5 m de lado, tiene sus paredes de 0,40 m de espesor. La altura de estos soportes varía de 15 m en la primera pila de la margen derecha hasta 45 m en las dos que encuadran el paso del río Durance. Las paredes se han pretensado con 24 cables con una capacidad de 65 toneladas cada uno.

alzado

pila

entramado móvil auxiliar

sección transversal

El tablero se ha formado con una viga cajón, de 5 m de anchura, cuya pared superior sirve de losa de apoyo de la calzada. La altura varía de 1,15 m en la clave a 4,15 m en los arranques, y el intradós forma un arco de círculo de 286 m de radio. El espesor de los tabiques verticales, constante, es de 0,40 m, mientras que el de la losa inferior varía de 0,18 a 0,45 m de la clave a los arranques.

La losa superior del tablero tiene doble pendiente de 2 %, que vierten lateralmente y que se han unido por medio de un arco de parábola. El paramento interior de esta losa se une a los tabiques laterales formando cartela en una longitud de 0,50 m, y, a partir del eje longitudinal, se han formado dos paños de 4,3 % de pendiente. Así, pues, el espesor de esta losa varía de 0,20 m en el eje a 0,29 m en su unión con los tabiques verticales en el interior del cajón y de 0,15 m en su extremidad lateral.

Sobre cada pila, y en una extensión de 5 m en el sentido longitudinal, la viga cajón se ha rellenado formando un macizo de hormigón, a excepción de un pozo vertical, cuadrado, de 1,20 metros de lado, que se ha dejado en el eje de la pila.

A 0,45 m de la extremidad de cada ménsula, se ha hormigonado un elemento transversal de arriostramiento, armado, de 0,30 metros de espesor, que se une a las dos almas o tabiques verticales.

La viga cajón se ha pretensado longitudinalmente con 72 cables para cada conjunto formado por las dos ménsulas que parten de una misma pila, y de una capacidad de 65 toneladas cada uno.

junta de dilatación
y articulación en clave

Transversalmente se han utilizado armaduras de acero Tor. Cada ménsula se ha construido en nueve avances sucesivos de trozos de 3,55 m cada uno a partir de un arranque de 2,55 m que se había preparado previamente. Desde la extremidad de la ménsula hasta la articulación, en una longitud de 1,50 m, la obra es de hormigón armado.

Las articulaciones de la clave están constituidas por piezas de acero moldeado con forma cilíndrica en la hembra, dentro de la cual se mueve una parte esférica que constituye el macho.

Las cornisas se han formado con elementos prefabricados, de hormigón, que permiten una excelente alineación durante su colocación en obra. Los antepechos son del tipo barandilla metálica.

Las juntas de dilatación, previstas para el tablero, constituyen un sistema metálico deslizante que se apoya sobre los dos durmientes formados por las extremidades que crean la junta. La parte móvil deslizante de la junta se une por medio de pernos provistos de arandelas especiales que no necesitan contratuerca.

Los estribos, como se dijo anteriormente, sólo han de resistir cargas moderadas, por lo que su cimiento es superficial y sobre el escombros del terraplén. Son de hormigón armado, y se componen de dos partes: una exterior, envolvente, que constituye la caja, provista de pequeños muros de acompañamiento, y la otra, interior, constituida por un bloque que se une al tablero por medio de una articulación idéntica a las empleadas en las claves de los tramos centrales y cuya masa es suficiente para evitar el levantamiento aun contando con las posiciones más desfavorables de las sobrecargas.

Con objeto de poder restablecer los niveles relativos del bloque y caja que lo envuelve en caso de un asiento del escombros del terraplén, se han previsto unos gatos que podrán utilizarse con estos fines.

Este puente tiene 225 m de longitud total, subdividida en cuatro tramos de 59,60 m de luz cada uno, por lo que las ménsulas en éstos son de 29,80 m de longitud.

El tramo lateral de la margen izquierda tiene 49,50 m de luz y está formado por dos ménsulas: una empotrada en la pila, de 29,80 m de longitud, y la otra, de 19,75 m, empotrada en el estribo. En la margen derecha el tramo lateral tiene 45,10 m de luz y la ménsula empotrada en el estribo es de 15,30 m de longitud. La repartición de tramos así dispuesta no es la más favorable, pero ha favorecido el poder emplear un cimiento común con los apoyos del puente contiguo y paralelo utilizado para el paso de una línea férrea.

Este puente es muy similar al de Savines, y como él tiene una calzada de 7 m y dos andenes de 1 m cada uno.

Las pilas de este puente son del mismo tipo que las del anterior, y, aunque los demás elementos estructurales son casi iguales, los estribos, en este caso, tienen una gran masa, pues como las ménsulas que de ellos parten dan lugar a grandes momentos de vuelco ha sido necesario dotarlas de un contrapeso.

puente de Réallon

Este puente salva el torrente de su nombre, y se halla situado en las proximidades de Savines. Su calzada es de 5,50 m, ampliada con dos andenes laterales de 0,50 m. El perfil longitudinal está en rampa, de la margen derecha a la izquierda, con una pendiente del 8 % continua en toda su longitud.

Este torrente, sometido a un régimen de violentas crecidas, debía salvarse a partir de una de sus márgenes rocosas, pero el otro apoyo correspondía con la parte baja del vaso del río, lo que dio lugar a formar un estribo de gran masa en esta parte, partir con un tramo en ménsula y apoyarlo en el otro extremo sobre un estribo ligero que descansa sobre roca.

El tablero de este puente está constituido por una viga cajón análoga a las de los otros puentes de esta zona y de 5 m de anchura. Su canto varía de 1,30 m en el estribo de la margen izquierda a 4,85 m en el empotramiento del estribo de la margen derecha, y su intradós lo forma un arco circular de 327 m de radio.

Las almas o tabiques laterales tienen un espesor constante de 0,30 m. El espesor de la losa inferior varía de 0,10 m en el estribo de la margen izquierda a 0,42 m en el de la derecha. La losa superior varía de espesor, de 0,20 m en el eje del puente a 0,16 m en los extremos laterales del voladizo.

El tablero se ha pretensado longitudinalmente con 68 armaduras de 65 toneladas de capacidad cada una, y que se han anclado en la parte posterior del estribo de la margen derecha. Transversalmente, se ha armado con acero Tor. La ejecución se ha llevado a cabo por trozos sucesivos de 3,55 m de longitud.

El estribo de la margen derecha está constituido por un bloque paralelepípedo de hormigón armado, de 5,70 m de anchura y 15 de longitud, que descansa sobre un macizo de cimiento de 3,50 m de espesor, y cuya sección transversal, trapezoidal, tiene una anchura de 9,50 m en la base. El paramento de este macizo rebasa al del estribo, en su parte anterior, en una longitud de 3 metros.

Para equilibrar los esfuerzos creados por el anclaje de los cables del pretensado del tablero se ha armado fuertemente en dirección vertical, y se ha pretensado en la proximidad de su paramento posterior con 10 armaduras verticales de 65 toneladas de capacidad cada una.

El estribo de la margen izquierda, de hormigón ligeramente armado, está constituido por un muro frontal de 1 m de espesor y 2 m de altura, que se apoya sobre una losa de cimiento, de 0,50 m de espesor. El muro frontal va provisto de nichos para colocar los gatos destinados a la compensación de los movimientos que se puedan originar en la estructura.

Durante la construcción, el tablero funcionó como una ménsula empotrada en el estribo de la margen derecha. Pero para resistir económicamente una vez que entre en servicio, a la acción de la totalidad de cargas permanentes y sobrecargas, es conveniente que se cree, bajo la acción única de las cargas permanentes, una reacción de apoyo positiva en el estribo de la margen derecha. Esta reacción se ejerce por el intermedio de los gatos de compensación. Cuando éstos han entrado en presión se cala el tablero sobre sus apoyos definitivos formados por placas de "neopreno" armado, y después se disipa la presión de los gatos.

puente de la Grande Côte

Este puente salva el regato del mismo nombre, dispone de una calzada de 6 m y dos andenes de 0,75 m cada uno.

El terreno de cimientos de este puente, de esquistos descompuestos, presentó el problema de tener que descender hasta unos 100 m de profundidad si se quería llegar al firme. Esto y la angostura del valle motivaron la solución de construir en voladizo, como las otras obras de esta zona, y mantener fijos los estribos o, por lo menos, equilibrados, durante el periodo de ejecución y, finalizar, formando un tramo de tres articulaciones. Terminada la construcción del puente se liberaron los estribos, y el tramo se transformó automáticamente en arco de tres articulaciones.

La luz de este puente, de 105,30 m, constituye un récord en Francia para puentes de hormigón pretensado. La flecha es de 11,55 metros.

Por ser el tablero de esta obra muy similar al del puente de Savines, no lo describiremos. Los estribos equilibrados durante la construcción para formar un arco de tres articulaciones una vez terminado el cierre en la clave presentan una parte notable de esta obra, de cuya disposición se ha sacado partido. El apoyo definitivo está constituido por una articulación tipo Freyssinet, situado a 12,30 m del paramento posterior del estribo.

sección longitudinal

Los apoyos provisionales los forman cajas de arena. En la parte anterior, los apoyos provisionales están constituidos por gatos planos Freyssinet que descansan sobre una losa de hormigón de 1 m de espesor. Los macizos de los estribos tienen una longitud de 14 m y una anchura de 10 m en la parte posterior y 11 m en la anterior. El eje de la articulación coincide, aproximadamente, con el eje transversal del macizo.

La articulación de la clave la forma un cilindro metálico relleno de hormigón, encajado en un bloque, también de hormigón, que se coloca en la clave ayudándose de gatos, después de la cual se sueltan las cajas de arena y resulta el arco de tres articulaciones después de dar la correspondiente contraflecha, retirar los gatos y quitar los apoyos provisionales.

Ejecución

El ardid de la realización responde a la originalidad de la concepción de estas estructuras.

Aparte las particularidades peculiares a cada obra se partió de la base de repetición ordenada de maniobras, consiguiendo así una cierta uniformidad de material y personal de todas las estructuras.

En cimientos todo se realizó siguiendo los procedimientos normales; pero al hundir los cajones correspondientes a las dos pilas entre las cuales pasa el río Durance en el puente de Savines, surgieron grandes dificultades, ya que se encontraron bloques que se tenían que dinamitar para subdividirlos y poderlos sacar con ayuda de grúas.

Las pilas se levantaron con encofrados deslizantes compuestos de paños, de 1,25 m de altura, que, por medio de estribos metálicos, se unían a los gatos que se encargaban de elevarlos.

Estos gatos se apoyan, a su vez, en barras de 28 mm de diámetro, que se van dejando en el hormigón de las paredes laterales de las pilas de sección hueca. Estas barras se disponían de tal forma que se podían recuperar.

El hormigón empleado era de 400 kg de cemento por metro cúbico, áridos de graveras del río, de consistencia plástica, y al que se añadió un agente aireante con objeto de mejorar su resistencia a la helada, pues las pilas están sometidas, en la proximidad del nivel del agua, a cambios de su estado de humedad. El hormigón se ha curado en las pilas, interior y exteriormente, regándolo.

En régimen normal y de condiciones óptimas el avance horario ha sido de 22 cm de media, es decir, 6 m por día. Esta velocidad ha exigido se instalase una grúa adosada a la pila, ya que el avance y ejecución exigían gran regularidad en el aprovisionamiento de hormigón y acero.

Para la construcción del tablero se empezó construyendo dos trozos de 2,55 m que, formando ménsula, salían a cada lado de la pila. Con objeto de no cargar demasiado sobre el entramado de apoyo de estos primeros trozos de arranque, se hormigonaron en tres fases: en la primera se llegó a la parte superior del nivel de la losa inferior; en la segunda a 2/3 de la altura, y en la tercera, al nivel de los cables del pretensado.

Este procedimiento permitió formar una plataforma superior, de $10,10 \times 10,50$ m, que se utilizó para montar los equipos móviles que se debían utilizar durante el hormigonado de las ménsulas.

Los avances se han realizado por trozos sucesivos de 3,55 m de longitud. Los elementos del equipo móvil se han descompuesto de manera que el peso máximo de la pieza más pesada no sea superior a la capacidad de la grúa que debía utilizarse durante la construcción, es decir, de 3 toneladas. En síntesis, el equipo se compone de una viga triangulada, metálica, dotada de un contrapeso en la parte inferior y de los dispositivos necesarios para suspender los encofrados en la parte anterior. Al iniciar la operación los dos equipos formaban un solo cuerpo, pero después se separaban y se lastraban convenientemente. Estos equipos estaban dotados de ruedas con neumáticos cuya presión se aligeraba en posición inmóvil por medio de gatos.

El hormigonado se realizó siguiendo las operaciones que se indican: a) Encofrado de la losa inferior; b) Colocación de armaduras de esta losa; c) Hormigonado; d) Encofrado de la parte hueca de la viga cajón y de las alas que vuelan del tablero; e) Colocación de armaduras de la losa superior; f) Hormigonado de los arranques de la losa superior; g) Colocación de los cables del pretensado; h) Tensado de cables, de 4 a 6 por trozo, salvo en la extremidad, donde van 26, esperando, por lo menos, 72 h a partir del hormigonado, y a condición que la resistencia a la compresión con probetas cúbicas sea superior a 200 kg/cm^2 ; i) Desencofrado; y j) Avanzar el equipo móvil para iniciar el próximo trozo.

Al encofrar se debe tener especial cuidado para dejar un buen aspecto después de desencofrar, pero merece especial cuidado el dar las contraflechas necesarias para contrarrestar los efectos del peso propio, sobrecarga del equipo móvil y del pretensado.

El hormigón empleado se dosificó a razón de 370 kg/m^3 , y debía dar una resistencia de 300 kilogramos por centímetro cuadrado a los siete días. Las resistencias comprobadas han rebasado, a los noventa días, 400 kg/cm^2 .

Para la inyección de las vainas de los cables se tomaron precauciones especiales, ya que debían rellenarse zonas de 40 m de altura vertical y hasta de 80 m de recorrido de trazado casi horizontal.

Fotos: H. BARANGER

Mediante instalaciones especiales para mantener los áridos y el agua a temperaturas adecuadas, así como la protección de las partes hormigonadas con paños de lana de vidrio y la protección y calefacción del lugar mediante toldos, entablados y estufas, se ha logrado hormigonar con temperaturas de -12 y en algunos momentos de hasta -24°C . De no haberse empleado todas estas medidas, no hubiera sido posible mantener los plazos tan escasos de tiempo que se habían fijado para la terminación de las obras.

Ensayos y deformaciones

La estructura se sometió a una vigilancia severa respecto a su comportamiento. Uno de los ensayos de las ménsulas dio una flecha máxima en su extremidad, después de cargarla de acuerdo con las cargas previstas, de 68 mm. En otra de las ménsulas ensayadas se observó que después de haber sido cargada y descargada presentaba una contraflecha de 13 mm paradoja que sólo pudo explicarse como una consecuencia de la variación diurna de la temperatura. Para explicarse este fenómeno se cree que, debido a la inercia térmica, el calor se puede acumular en ciertas partes de la obra más que en otras.

Se ha podido observar una concordancia absoluta entre el gráfico de temperaturas y las deformaciones registradas, estableciéndose así una relación entre causa y efecto. La amplitud máxima observada en las deformaciones es del orden de 15 mm en la extremidad de la ménsula.