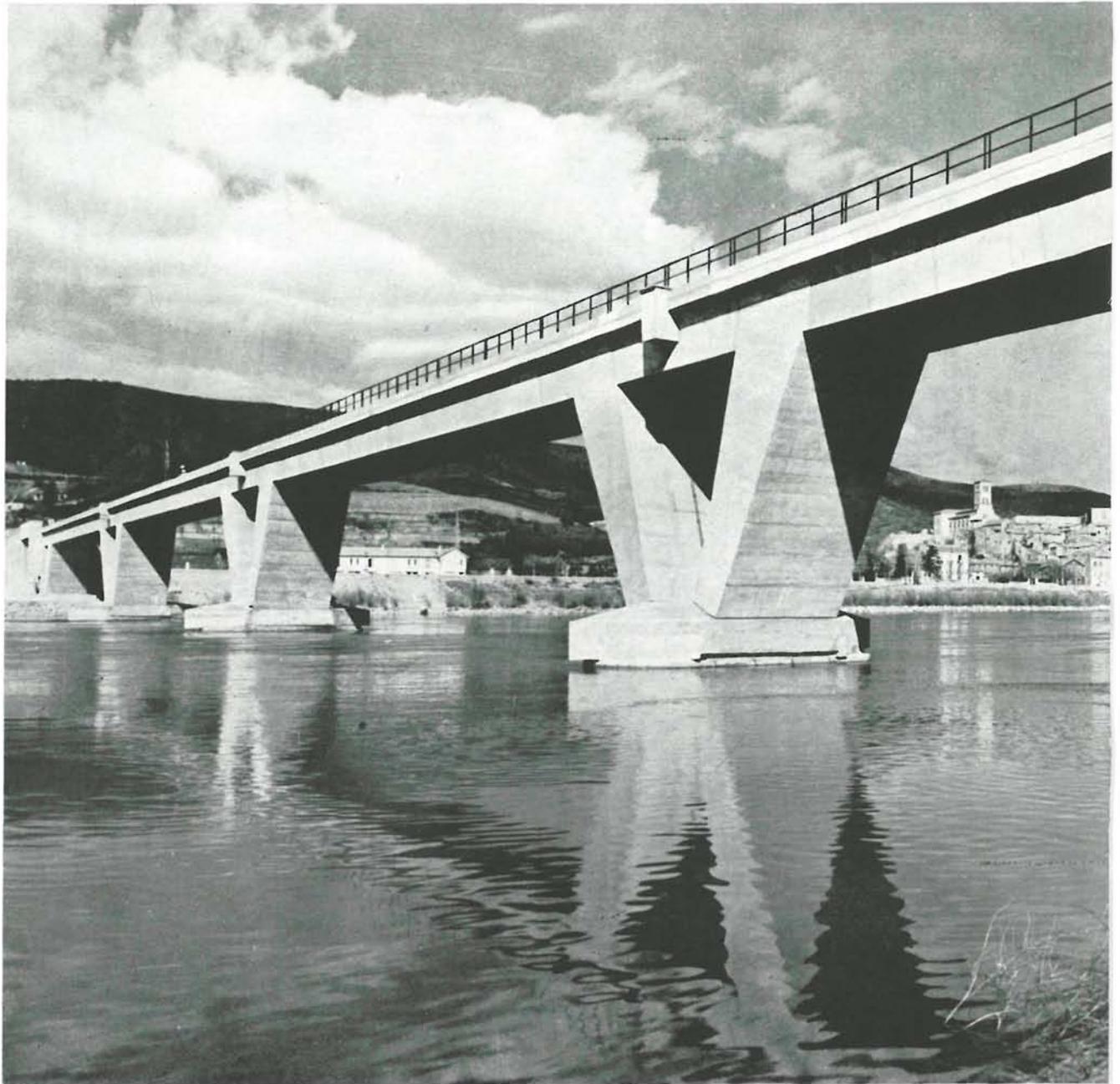


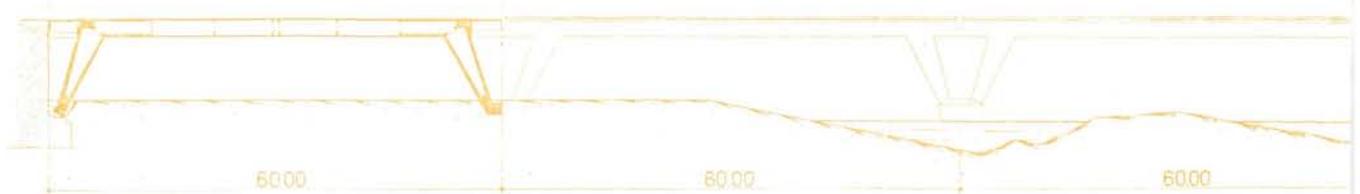
**puente pretensado de la VOULTE**

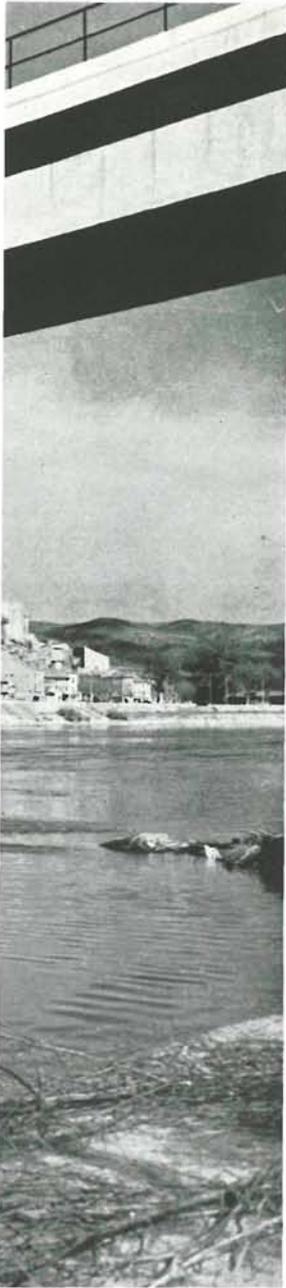
N. ESQUILLAN, ingeniero



562 - 33

*Documentación amablemente facilitada por la  
Empresa Constructora BOUSSIRON*





## Generalidades

El antiguo puente que unía las dos líneas ferroviarias que se extienden entre Lión y Aviñón, apoyándose en cada una de las dos laderas que forman los costeros del cauce del río Ródano, a la altura de La Voulte, sufrió un bombardeo durante la última guerra mundial, tan fuerte, que no solamente lo puso fuera de servicio, sino que se resintió en algunas de sus pilas intermedias.

Para reponer esta obra, la compañía nacional francesa de ferrocarriles (S. N. C. F.) redactó un proyecto, y dió libertad a los concursantes para poder proponer variantes y hasta nuevas concepciones a la estructura que sirvió de base para la adjudicación.

La conocida empresa constructora francesa Entreprises Boussiron, de la que es director el autor de este trabajo, presentó un proyecto original, que fué aceptado y realizado posteriormente.

La estructura del puente está constituida por cinco tramos o pórticos, de 60 m de luz entre ejes de apoyos principales o pilas. La estructura es de hormigón pretensado; se apoya en cuatro pilas y dos estribos. En cada pila descansan dos montantes, articulados en sus bases, que corresponden a pórticos adyacentes. Los cabezales de estos pórticos, elementos de interés dominante de la obra, son vigas cajón rectilíneas, que, por su longitud, apoyo y disposición armónica con sus soportes, dan un bello aspecto a la obra, sobria por su sencillez geométrica y de agradable sentido estético.

La ejecución y métodos constructivos han sido objeto de gran cuidado y estudio, ya que se confiaba lograr toda una serie de consecuencias que debían ponerse a contribución en las nuevas construcciones del futuro, sin olvidar, claro está, la íntima influencia que los sistemas constructivos ejercen sobre las ideas generales que gobiernan las redacciones de proyectos.

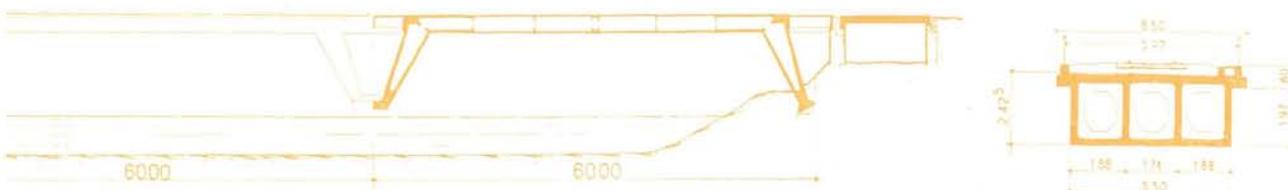
## Estudio, concepto y principios de ejecución

Conocidas las condiciones climáticas locales, con sus vientos fuertes y grandes avenidas del río, se desechó toda idea de obra en altura que opusiera grandes resistencias al viento, cambios de cintras de uno a otro arco y apoyos de entramados provisionales para andamios en el lecho del río.

En principio se abandonaron las soluciones sin empuje, tales como vigas continuas o no y de altura variable, por crearlas pesadas y molestas. Debido a las exigencias para la navegación fluvial y el propio perfil del río, la solución se encaminó hacia un tablero de altura constante, pretensado, reduciendo las luces con soportes inclinados en forma de muleta, si es que su ejecución se prestaba a un procedimiento satisfactorio.

Entre las soluciones se estudió una que consistía en construir el tablero partiendo en voladizo a partir de dos pilas hasta unirse en la clave por

Alzado y sección transversal.





medio de una unión pendular; solución que, por ser del mismo orden el valor de la carga y sobrecarga, resultaría una flecha excesiva, ya que ésta no debía pasar del  $1/2.000$  de la luz. Además, esta solución exigía el anclaje de los voladizos extremos no equilibrados; esto encarecía y complicaba la obra.

Otra solución estudiada consistió en conservar el procedimiento de construir en voladizo, pero formando pórticos triarticulados que absorberían las sobrecargas, mientras que las cargas permanentes las resistirían en voladizos. Esta solución exigía una solidarización definitiva entre tramos. En la obra terminada esta solución sería favorable a los efectos del frenado, pero un inconveniente para la libre dilatación. Este procedimiento no eliminaba la necesidad de anclar los extremos.

El estudio de las dos soluciones anteriores condujo a otra, que consistió en suprimir las solidarizaciones definitivas, transformando la obra en pórticos de tres articulaciones bajo el efecto de la totalidad de las cargas aplicadas. Pero, desgraciadamente, la flexibilidad del pórtico era de gran consideración y del mismo orden que el de puro voladizo. Así, pues, se llegó a un método constructivo que consistió en construir la estructura formando pórticos de dos articulaciones.

Las fases de ejecución se pueden subdividir de la forma siguiente:

- a) Partir en voladizo desde los dos soportes hacia la clave.
- b) Colocar gatos en la región de la losa de extradós, correspondiente a la clave, creando un empuje equivalente al que daría lugar la carga permanente.
- c) Cortar las solidarizaciones entre tramos; y
- d) Solidarizar la losa de intradós en la clave, así como pretensar esta zona de intradós, para resistir a las tracciones que originarían las sobrecargas.

Esta forma de operar no permitía la ejecución de varias pilas a la vez y el inconveniente de tener que esperar a la terminación del hormigonado, conservar el equilibrio por medio de las solidarizaciones entre tramos y mantener los cortes en las claves para asegurar la libre dilatación, antes de proceder a la colocación de los gatos y a cortar las uniones de solidarización entre pilas. Esta doble operación se hubiese tenido que realizar simultáneamente en los cinco pórticos, lo que prácticamente era imposible; o bien, hacer uso de contrapesos móviles muy importantes.

Finalmente, se llegó a un método constructivo que consistía en ir construyendo tramo por tramo, en voladizo, partiendo de los dos arranques de cada pórtico, y conservar el equilibrio durante la ejecución por medio de una viga, trabajando a compresión, que absorbía el empuje. Este procedimiento tenía la ventaja complementaria de no necesitar anclajes en los estribos, pues bastaba un castillete metálico provisto de gatos para evitar la rotación de los soportes inclinados extremos durante su construcción. Los soportes intermedios apoyados sobre las pilas se equilibraban por tracción, dos a dos.

Para la sección transversal de los cabezales de los pórticos se había pensado en una forma sencilla simple, que permitiese la utilización de un encofrado deslizante sin modificaciones durante la ejecución del hormigonado. Antes de llegar a una solución definitiva se estudiaron varios tipos de sección.

La sección elegida consiste en una viga hueca de triple cajón, con espesor reforzado de tabiques en una longitud de 6,25 m a partir de arranques, solución que dió lugar a un cambio de encofrado y a tener que prever un cuadro transversal de rigidez, así como otros dos, a uno y otro lado de la clave, con objeto de evitar las deformaciones.

### **Evolución de los cálculos**

En principio se pensó en admitir una fisuración propia a la correspondiente a una viga de hormigón armado de poca luz, permaneciendo el tablero dentro de un estado de pretensado para los efectos del peso propio, utilizando armaduras de buena adherencia para resistir a las sobrecargas. Pero finalmente se decidió utilizar el pretensado en toda su extensión, ya que no se quería la aparición de grietas aun con las sobrecargas. Los cálculos realizados no pudieron basarse en condiciones de un Pliego por la inexistencia de aquél; pero como los resultados dieron lugar a secciones razonables, se admitieron como buenas.

Posteriormente se aplicaron las instrucciones ministeriales de 1953 para revisar los cálculos definitivos, encontrándose ante una sorpresa al comprobar que la cantidad de acero dedicada al pretensado debía ser aumentada en un 12 %. Esto suponía una gran contrariedad, ya que las secciones, habían sido determinadas definitivamente y no se disponía de espacio en la

tabiquería de la viga cajón sin aumentar los espesores, lo que llevaba consigo el inconveniente de dar más peso a la viga. Afortunadamente, el sistema adoptado para el postesado, llamado helicoidal, que consiste en disponer los cables formando una corona perimetral que, al hacerla girar, tensa los alambres y permitió utilizar el núcleo interior para colocar en él cuatro nuevos cables, que se tesaron por tiro directo sin torsión, constituyó una solución ideal en este caso y que abre nuevas posibilidades de interés. Esto no obstante, los dos últimos tramos se postesaron con grupos de 16 alambres tesados en tiro directo y de una sola vez.

Por salir de las formas clásicas en una obra cuyas propias condiciones así lo exigieron, surgieron algunas complicaciones de orden diverso que motivaron algún retraso y precauciones. Con objeto de hallarse siempre dentro de un campo de fundada seguridad, se prodigaron los cuidados, vigilancias y control, para lograr un estado de postesado efectivo y real en todas las partes.

### **Ejecución de las pilas y montantes**

La construcción empezó por la margen derecha avanzando hacia la izquierda, repitiendo cinco ciclos idénticos, uno para cada tramo. Cada uno de estos últimos se compone de 16 trozos o dovelas.

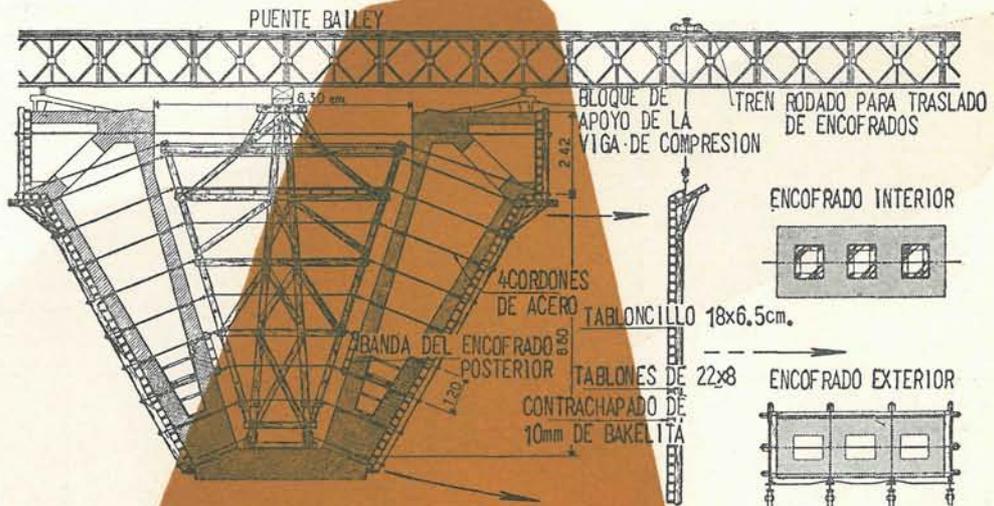
Se empezó preparando las pilas, enrasadas por debajo del nivel de estiaje. Después se procedió a formar los apoyos articulados, tipo Freyssinet, de los pies de los montantes de los pórticos. La margen prevista para las articulaciones es de 275 a 340 toneladas por metro.

Sobre las pilas terminadas se montaban los entramados de madera, celosías preparadas sobre monteá, llevadas a pie de obra sobre pontones. Estos castilletes servían: para soportar un puente auxiliar, tipo Bailey, que permitiría el transporte de materiales; como soporte de los encofrados de los montantes inclinados de los pórticos, y, finalmente, como apoyo del tramo secundario independiente entre pórticos, construido, parcialmente, de hormigón armado, y de 8 m de luz. Desmontado el castillete y trasladado a otra pila, se preparaba una plataforma de servicio para terminar dicho tramo independiente.

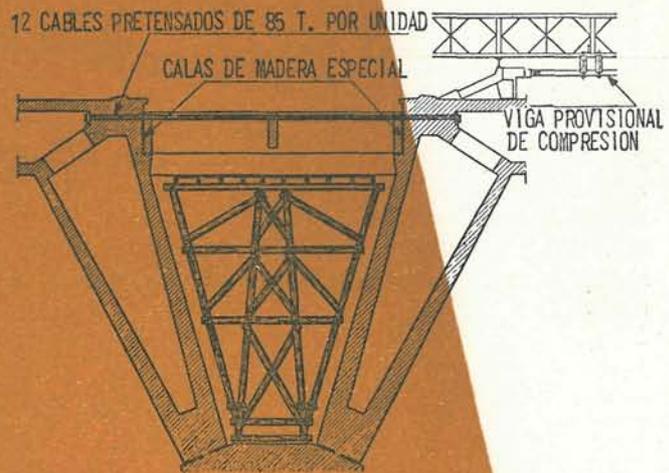
El encofrado de los paños del lado del intradós de los montantes estaba constituido por dos paneles, formados por una serie de tabloncillos de  $18 \times 6,50$  cm de sección, espaciados a 30 cm entre ejes, solidarizados con tabloncillos de  $20 \times 8$  cm y recubiertos con una placa contrachapada, de bakelita, de 10 mm de espesor. Cada uno de estos paneles se retenía en posición por cuatro péndolas de 1,20 m, que, al cruzar el espacio que debía llenar el hormigón, se sustituyeron por cuatro redondos de acero especial de 8 mm de diámetro. El hueco interior de los montantes se encofró finalmente por medio de paneles independientes, porque el sistema de angulares acunados con que se empezó no dió resultado práctico. De haberse puesto cartelas en los ángulos del hueco, la manipulación de los encofrados hubiese resultado facilitada. La parte correspondiente al extradós de los montantes se encofró con paños móviles de 1,50 m de altura, lo que permitió hormigonar por bandas sucesivas. El transporte de encofrados de una a otra pila se pudo hacer por grandes trozos, debido a la comodidad de los trenes de ruedas que corrían sobre el puente auxiliar Bailey.

Después de terminar las cuatro vigas de uno de los tramos independientes, se colocaban calas de una madera especial entre las extremidades de éstas y de la parte que corresponde a los extremos de los cabezales. A continuación se introducían 12 cables de postesado provisional, de 85 t de carga cada uno, que después de tesarlos transformaban el tramo independiente y los montantes inclinados de cada pila en un pórtico de dos articulaciones. La compresión y empotramientos creados a nivel del tablero, eran capaces de absorber las tracciones a que daban lugar los pesos de los montantes inclinados al suprimir las péndolas que sostenían los encofrados y las asimetrías accidentales de cargas, principalmente, durante el hormigonado de los cabezales de los pórticos.

La disposición inicial de estos cables permitió que se pudieran recuperar una vez terminada la provisionalidad del pretensado, para poderlos utilizar en otra pila.



Enfofrados para los montantes inclinados, huecos, de los soportes del tablero y castillete provisional para apoyo del puente Bailey auxiliar.



Pórtico provisional sobre pila, denominado tramo independiente en el texto.

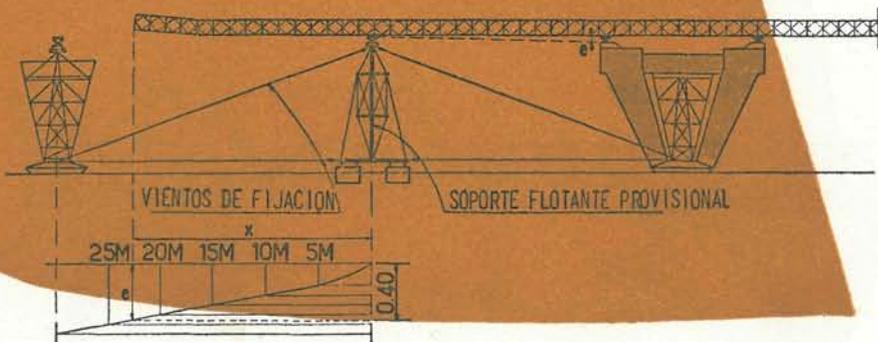


Diagrama de la emersión del apoyo flotante auxiliar empleado para lanzar el puente, en el que se dan las sumersiones relativas según la posición del puente en su avance.

LA VOULTE

PUENTE BAILEY

PARTE REFORZADA PARTE NORMAL

CABLES DE  
PRETENSADO  
PROVISIONAL

- 1 LANZAMIENTO DEL PUENTE AUXILIAR
- 2 ENCOFRADO Y HORMIGONADO
- 3 ENCOFRADO DE LA PILA SIGUIENTE

VIGA PROVISIONAL DE COMPRESION

DOVELAS

- 1 AVANCE DEL PUENTE
- 2 COLOCACION DE LA VIGA DE COMPRESION A B
- 3 HORMIGONADO DEL TRAMO
- 4 HORMIGONADO DE LOS MONTANTES DE LA PILA SIGUIENTE

SOBRECARGA PERMANENTE

JUNTA SOLIDARIZADA

JUNTA ARTICULADA

CABLES DE CONTINUIDAD

- 1 AJUSTE DEL PORTICO DE TRES ARTICULACIONES
- 2 TRASLADO DEL PUENTE AL TRAMO SIGUIENTE
- 3 PRETENSADO DE LOS CABLES DE CONTINUIDAD EN EL TRAMO PRECEDENTE DESPUES DE SOLIDARIZAR LA JUNTA PROVISIONAL DE LA CLAVE Y COLOCACION DE LA SOBRECARGA PERMANENTE

PORTICO SECUNDARIO PROVISIONAL

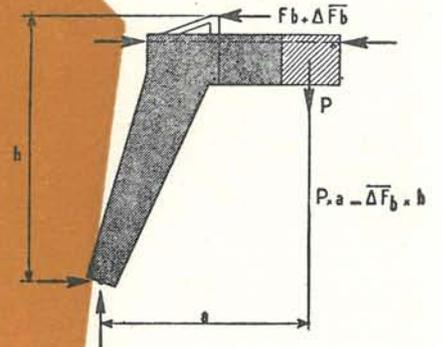
GATOS

VIGA PROVISIONAL DE COMPRESION

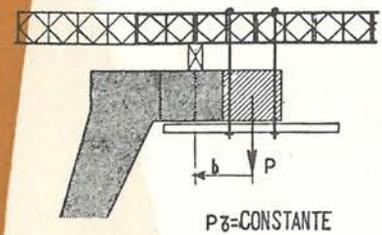
P

P

Fases de ejecución del puente.



Equilibrio de las partes construidas en voladizo.



$P\bar{b} = \text{CONSTANTE}$

Equilibrio del puente auxiliar Bailey, durante la construcción de las dovelas.

Equilibrio general de un pórtico, en vías de construcción.

### **Puente auxiliar de servicio**

El puente auxiliar Bailey desempeña un cuádruple papel, pues sirve de pasarela; de elemento de rigidez para evitar el pandeo de la viga comprimida que une las dos cabezas de los montantes del pórtico, y de medio de traslación de encofrados y de la propia viga provisional comprimida.

Debido a la gran luz que se debía salvar para lanzar este puente, 50 m, se hacía indispensable el empleo de un apoyo intermedio en el río o reforzar la estructura apropiadamente. Como se había prohibido la colocación de apoyos provisionales en el río, se evitó este inconveniente por medio de cuatro pontones de 10 toneladas de empuje de flotación por pontón. Sobre la plataforma formada por estos pontones se montó un soporte metálico, formado por dos pies derechos de perfiles laminados convenientemente arriostrados con vientos para evitar un posible pandeo.

Este soporte provisional flotante había sido objeto de ensayos en modelo reducido para conocer su comportamiento durante el proceso de carga. Una vez llevado al lugar previsto se le fijó, por una parte, por medio de cables situados en un plano horizontal y vientos que partían de la cabeza de los pies derechos por otra. Todos estos cables de fijación, que sólo permitían un movimiento vertical del soporte flotante, se amarraron a las dos pilas más próximas.

Colocado el soporte flotante se procedió a lanzar el puente Bailey, que consiste en una celosía metálica terminada en su extremidad por una punta de esquí. Cuando esta parte del puente se apoyaba en el soporte, convenientemente lastrado, éste iba absorbiendo la carga progresivamente hasta llegar a la región plana del puente, en cuyo momento, por ser mayor la carga, los cajones se hundían excesivamente, teniendo que quitar el lastre para aumentar el esfuerzo de flotación.

Terminada la operación, y después de apoyar el puente sobre dos pilas, se lastraban nuevamente los cajones, descendía el soporte flotante y se retiraba al nuevo tramo contiguo para ir pasando el puente, y así sucesivamente en los otros tramos.

Los dos primeros tramos se pasaron con el puente auxiliar muy rápidamente, un día por tramo, aproximadamente, ya que no se debía interrumpir la navegación fluvial más que durante el menor tiempo posible. En estos dos pasos, los más difíciles, se obtuvieron un gran número de datos, experiencia que se aprovechó para pasar los otros, de menor fondo, y en los que se disponía de más tiempo.

Un accidente grave se presentó cuando faltaban aún una docena de metros para llegar al apoyo de la primera pila. Aunque no se conocen aún las causas de este lamentable accidente, que resultó en un descenso brusco del apoyo flotante, que casi rompió la viga del puente, se cree que el origen debería estudiarse en una pérdida de equilibrio del sistema de cables y posibles apoyos en contactos de fondo, por lo que se recomienda especial cuidado al proyectar suspensiones flotantes de este tipo en la distribución y disposición de cables y sus tensiones.

### **Ejecución de los pórticos**

Pasado el puente auxiliar entre pilas, colocada la viga provisional de compresión y dispuestos a hormigonar el cabezal en voladizo, el conjunto así formado sería inestable, pues tendría cuatro articulaciones: dos de pie y una en cada extremidad de la viga de compresión. Para evitar la inestabilidad, aun hormigonando por dovelas simétricas de 2,75 m de longitud, una a cada lado, se dispuso en pórticos provisionales los montantes de cada pila y la viga del tramo independiente (cabezal secundario).

Así, pues, la estabilidad de este conjunto se aseguró por medio de la referida viga de compresión, que se arriostró al punto con objeto de evitar el pandeo o desviación en el plano horizontal.

Esta viga (conjunto de cuatro viguetas) se unía a los montantes por medio de bloques provisionales de hormigón que servían de apoyo a otros tantos gatos de 100 toneladas de capacidad. Los bloques provisionales se

unían a los montantes por medio de un pretensado con cables independientes, que, una vez terminada su misión, se quitaban y los bloques se podían recuperar para llevarlos a otro tramo. Los gatos se colocaron de tal forma, que en caso de averías en cualquiera de ellos se pudiesen sacar sirviéndose de otros provisionales.

La viga de compresión debía tener siempre una contraflecha para ayudar a la viga del puente en su carga y evitar las deformaciones que pudieran conducir a efectos de pandeo.

Los bloques provisionales que servían de apoyo a la viga de compresión se ajustaron meticulosamente, con objeto de lograr una distribución de esfuerzos casi impecable sobre el pórtico provisional formado en cada pila.

Los encofrados para la rosca de fondo de intradós y tabiques verticales de la viga cajón o cabezal, se suspendieron del puente auxiliar y se iban corriendo a medida que avanzaba el hormigonado. La longitud de estos encofrados era de 5,50 m, es decir, la correspondiente al doble de la de una dovela o trozo.

Las placas de contrachapeado de bakelita, empleadas en estos encofrados, han dado un resultado magnífico en la tabiquería vertical, cosa que no ha sucedido en la rosca de fondo, debido a los golpes que recibieron de las armaduras y puntas de las agujas vibrantes.

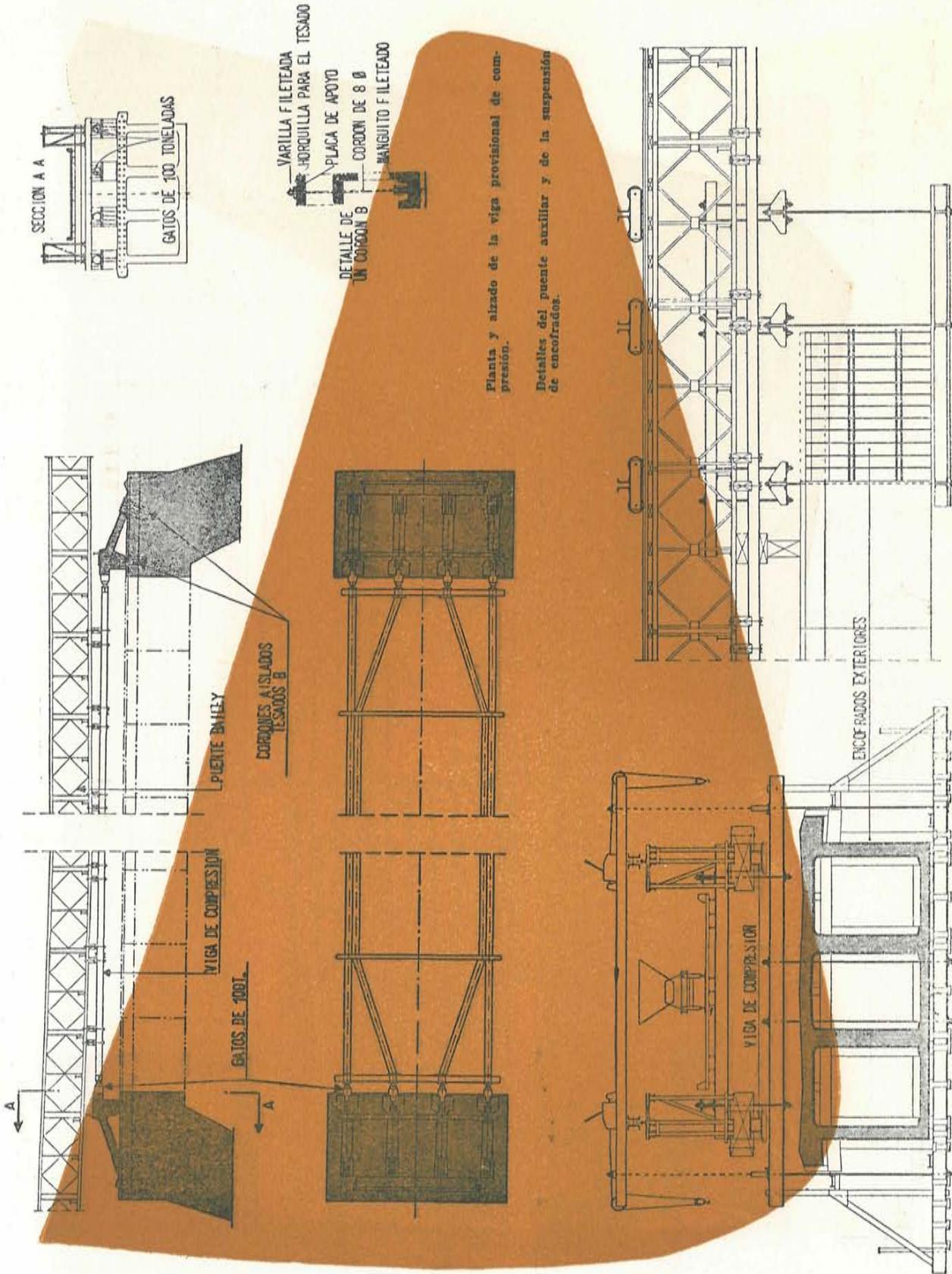
Terminado el hormigonado de un trozo, se soltaban las tuercas que retenían las péndolas de suspensión de los encofrados, de 32 mm de diámetro. Ayudándose de gatos que aligeraban esta operación, se desencofraba y se corría el encofrado, por medio de trenes de ruedas apoyados sobre vías instaladas en la parte superior del puente auxiliar, a su nueva posición, repitiendo estas mismas operaciones en las distintas posiciones relativas de dichos encofrados. El paso de los encofrados de uno a otro tramo como no se podía hacer directamente, se descendían los encofrados a un pontón que los llevaba al nuevo tramo, y, de allí, se los volvía a elevar para llevarlos a su nueva posición.

Colocados los encofrados se procedió a montar las armaduras y disponer los cables de pretensado correspondientes a la dovela objeto de hormigonado. Para evitar la fisuración superficial antes de pretensar, se colocó un reticulado de alambre, de 6 mm de diámetro, formando malla de 15 cm de lado. La retracción se disminuyó empleando un hormigón seco, al que se le mezcló un producto plastificante, que no solamente evitaba la separación del hormigón durante su transporte, sino que mejoraba la resistencia y regularidad del mismo.

Cuando el hormigón alcanzaba una resistencia de 215 kg/cm<sup>2</sup>, lo que sucedía a los tres días, se procedía a postesar la dovela recién terminada por medio de cuatro cables capaces de mantener en equilibrio el voladizo formado. Para asegurar la nueva condición de equilibrio respecto al pie del montante articulado—véase la figura correspondiente—creada por el peso propio de la nueva dovela, que oscila de 45 a 27 toneladas, se crean dos pares contrapuestos: uno, resultante de dicho peso y el brazo que pasa por el pie de la articulación, y el otro, opuesto, el proporcionado por el nuevo ajuste de los gatos que comprimen la viga provisional y que tiene por brazo la altura de dicha viga respecto a la misma articulación. La contraposición de estos dos pares mantienen en equilibrio las distintas fases de construcción en que se ha subdividido la semiluz del cabezal del pórtico trabajando como una ménsula.

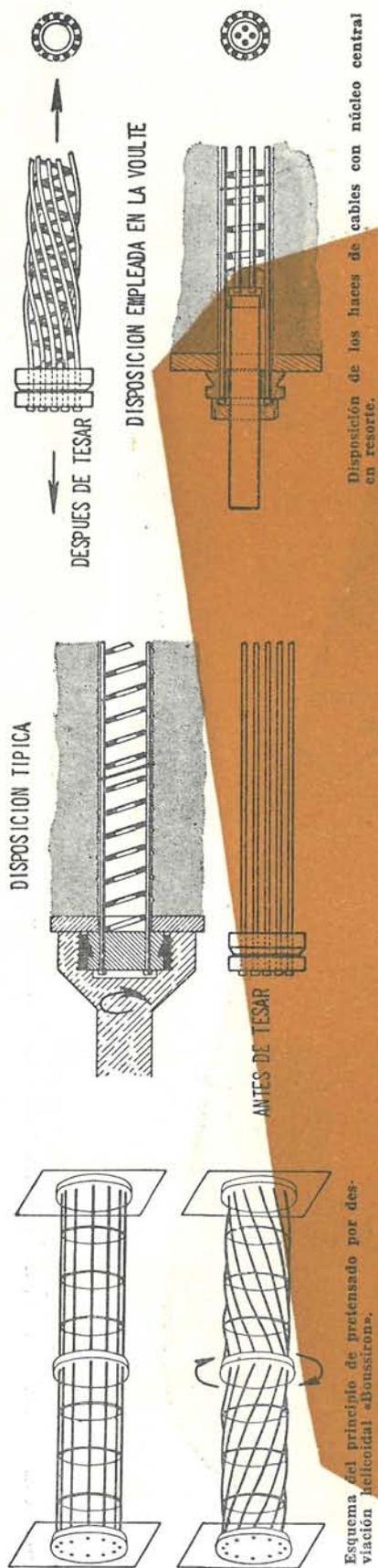
Como el puente auxiliar ha de salvar una luz de 47 m y resistir a serias sobrecargas, se ha reforzado en la zona que corresponde al vano de ejecución.

Durante la construcción de un par de dovelas, una a cada lado, entre el puente auxiliar y la última dovela construida, ya pretensada, se coloca una cala, que da lugar a la formación de un par que tiene por fuerza vertical el peso del hormigón fresco y por brazo la longitud de una dovela (2,75 m), momento que ha de absorber el puente, así como el esfuerzo cortante correspondiente al peso del hormigón fresco. Como la colocación de estas calas se va repitiendo, las solicitaciones antes mencionadas siguen la misma suerte. La única diferencia apreciable consiste en que el peso de las dos primeras dovelas es de 45 toneladas, mientras que el de las otras es de sólo 27 toneladas.

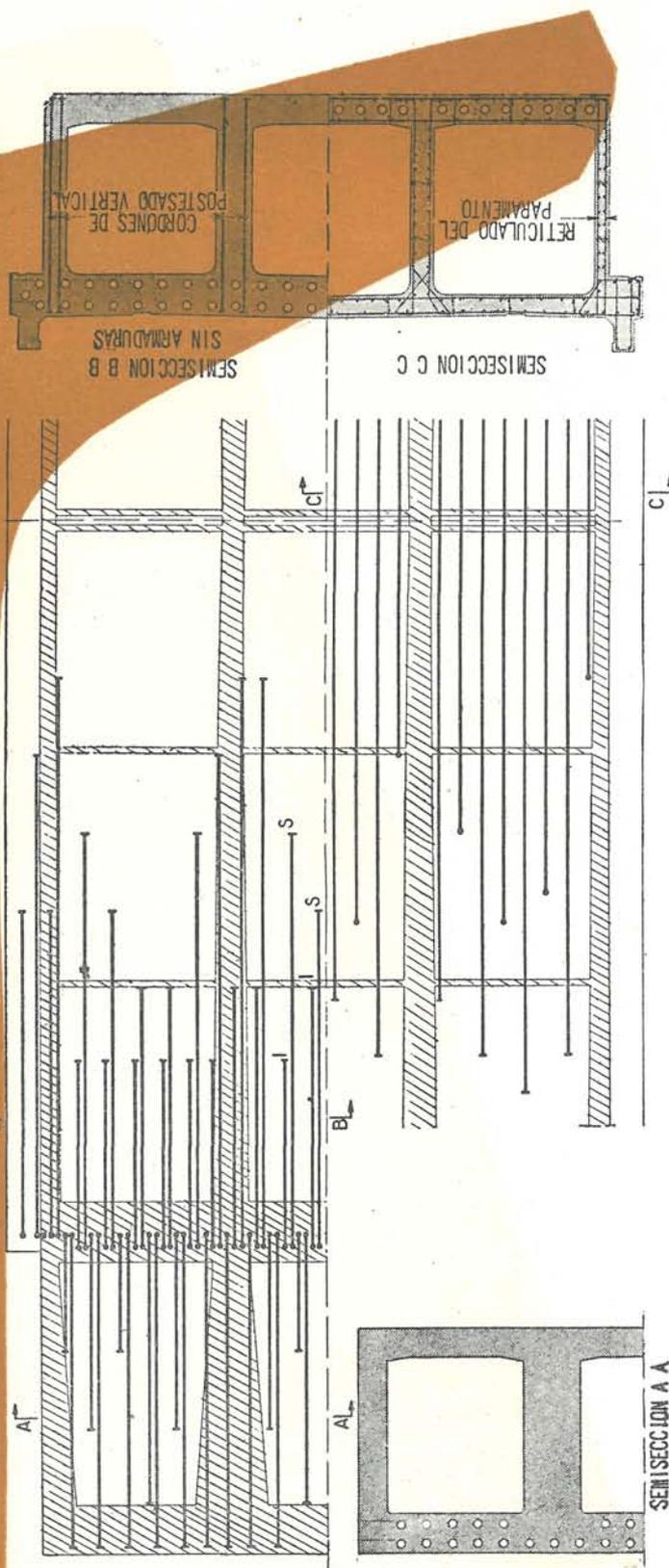


Planta y alzado de la viga provisional de compresion.

Detalles del puente auxiliar y de la suspension de encofrados.



Disposición de los haces de cables con núcleo central en resorte.



Secciones transversales y repartición de los cables de pretensado.

Al terminar una dovela, y antes de correr los encofrados, se retiraban las calas, recobrando así el puente auxiliar su posición inicial de equilibrio con luz de 47 m y peso propio. Esta forma de operar evitó las acumulaciones de deformaciones y sollicitaciones secundarias; sin embargo, después de construir las últimas dovelas correspondientes a la proximidad de la clave, se procedió a calarlas antes de quitar las calas de las dovelas anteriores, con objeto de evitar las grandes sollicitaciones a que se vería sometido el puente durante el paso de los encofrados por la clave.

Terminado el cabezal y colocados los gatos de 300 toneladas entre las últimas dovelas, el pórtico se transformó, sucesivamente, en arco de tres articulaciones, para lo cual el esfuerzo de compresión de la viga provisional se iba transfiriendo a los gatos. Esta operación se combinó cediendo los gatos de la viga de compresión, a la vez que entraban en acción los gatos colocados en la clave.

Después de trasladar la viga de compresión al tramo siguiente, utilizando el puente auxiliar, se retiraron seis de los doce cables de pretensado provisional del tramo independiente y las calas, con objeto de retener en equilibrio el montante inclinado de la pila más avanzada del pórtico, sobre la que se apoyaba el puente auxiliar.

En este estado de cosas se procedió a ajustar el pórtico anterior, colocando el balasto y otras cargas permanentes antes de cerrar definitivamente la clave, a fin de lograr una contracción elástica máxima y un momento de corrección más grande en los ángulos de los pórticos. Los momentos negativos en los arranques de empotramiento de los semitramos en voladizo sufrieron una reducción, ya que se hizo pasar la línea de empujes por la articulación provisional creada en la clave a nivel con la losa de extradós del cajón. Esta disposición provisional introdujo tracciones en la losa de intradós en las proximidades de la clave, por lo que se colocaron cuatro cables de pretensado, de 80 toneladas de capacidad cada uno, trabajando a media carga, en esta zona del intradós, es decir, un esfuerzo total de 160 toneladas. La reacción así originada se contrarrestó colocando cuatro gatos de 50 toneladas, cada uno en la clave, situados en el plano de estos cables.

Una vez definida la posición inicial del arco de tres articulaciones, sometido a las cargas permanentes, se procedió a cerrar la junta de la clave. Después, para lograr la resistencia necesaria para soportar los trenes tipo de sobrecarga, se transformó el pórtico de tres articulaciones en otro de dos, para lo cual se tesarón, definitivamente, los cables de la losa de intradós. Como los gatos empleados en esta operación, aun siendo de 100 toneladas de potencia, eran relativamente pequeños, el gran número de asientos necesarios para sus apoyos resultaron ser de pequeñas dimensiones. Rellenados estos huecos de asientos, enrasado el intradós en estas zonas y recuperados los cables provisionales de los subtramos independientes de las pilas, se procedió a terminar la losa—que en éstos constituye el tablero—y, por tanto, el pórtico se podía considerar como construido.

### **Procedimiento de pretensado**

En principio, el pretensado final debía responder a las exigencias de la S. N. C. F., es decir:

- a) Haces rectilíneos, con objeto de reducir en lo posible toda clase de rozamientos y conocer con exactitud el esfuerzo de tesado real.
- b) Anclajes rigurosos sin deslizamiento inicial o futuro.
- c) Adherencia de cables a la masa de la obra.

Después de considerar el anclaje de alambres en piezas metálicas, se desistió del procedimiento, por creerlo incómodo; además, la S. N. C. F. no creía prudente el empleo de las vainas corrientes cuadradas ni los huecos a que éstas daban lugar en las losas.

Para lograr la tracción de los cables puestos en tensión se puede proceder por tracción longitudinal directa de las armaduras que componen los cables o barras del sistema; este mismo resultado se puede alcanzar desviando las armaduras transversalmente. El tesado directo tiene el inconveniente de necesitar grandes esfuerzos y, además, conduce a un desplazamiento, por lo menos de una de las dos extremidades, de gran con-

sideración. Por el contrario, la desviación lateral deja las dos extremidades de las armaduras fijas y exige esfuerzos relativamente pequeños, pero se efectúa siempre dentro de grandes desviaciones transversales y angulares.

La empresa Boussiron ha concebido un nuevo procedimiento de tesado, que ha recibido el mismo nombre, en el que se mantienen fijas las dos extremidades de las armaduras; se necesitan pequeños esfuerzos de tesado y las desviaciones que en él intervienen no presentan inconveniente alguno en la construcción.

En síntesis, este procedimiento consiste en disponer los cables regularmente espaciados formando un haz o cilindro, el cual, por rotación, da una desviación helicoidal a los cables sobre una superficie de revolución. Los alambres o cables se mantienen en posición por unos discos o calas, que los retienen a una distancia fija del eje de superficie real o ficticia de enrollamiento helicoidal. Estos discos o elementos que sirven de guía mantienen los alambres o cables convenientemente aislados unos de otros, de tal forma dispuestos, que permiten toda libertad de movimiento de los cables durante el proceso de aplicación de la desviación helicoidal.

Teóricamente, se debería poder aplicar el esfuerzo de la puesta en tensión por rotación, en uno o varios sitios del trazado rectilíneo, particularmente en una extremidad o en la parte central entre ambas. De esto se infiere la posibilidad consiguiente de un anclaje simple en las extremidades, así como la supresión del efecto de torsión de los alambres, ya que éstos pueden girar libremente sobre sí mismos.

En algunos casos podría presentar alguna ventaja utilizar hilos que previamente han sufrido una desviación helicoidal. Esta forma de operar ofrece la ventaja de limitar el número de vueltas que hay que dar para llegar al grado de tensión prevista y, además, reducir los esfuerzos de torsión de los propios cordones, porque al elegir una desviación previa juiciosa, el valor de este esfuerzo puede ser prácticamente nulo si, durante la desviación previa, se ha dejado girar libremente a los hilos sobre ellos mismos.

Durante la gestación y estudio de este procedimiento de pretensado se supo que algunos inventores habían propuesto sistemas de pretensado que consistían en torcer los alambres formando una especie de torcida o mecha. Esta forma de proceder no puede dar buenos resultados por las grandes torsiones a que se someten los hilos, flexiones y rozamientos nocivos a muchos respectos. En el procedimiento Boussiron los cordones no se tocan, ya que se enrollan formando hélices paralelas distintas y, por tanto, sin contacto, sufriendo únicamente flexiones y torsiones reducidas, cuya influencia sobre la carga de ruptura, según se ha demostrado en los ensayos, se puede considerar despreciable.

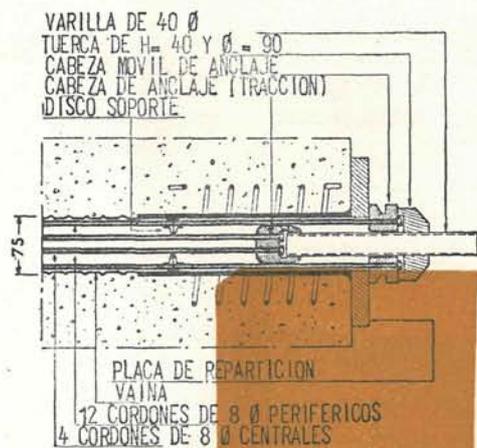
Como se comprenderá, existe un gran número de disposiciones de este sistema de pretensado por desviación helicoidal. En la obra que nos ocupa, el procedimiento empleado consiste en una cabeza fija, anclada, y otra móvil que sirve para aplicar los gatos. Entre extremos se colocaron los guías o discos para mantener el espaciado de cordones en todo momento y permitir el giro de éstos sobre sí mismos.

La extremidad dedicada a experimentar la puesta en tensión debía ser anclada de tal forma que no pudiese haber deslizamiento posible, lo que se consiguió por contacto mutuo de metal contra metal, condición ésta exigida en el Pliego. Además, la cabeza empleada para el tesado debía de poderse utilizar para realizar una tracción directa, que permite un control del efecto de tesado y, eventualmente, completar la tensión lograda por desviación helicoidal.

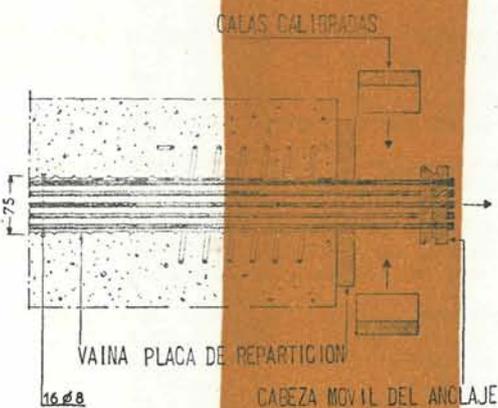
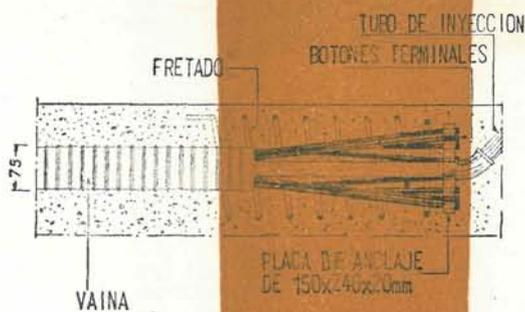
Los cordones se colocaron en el interior de vainas metálicas rígidas de 5/10 mm de espesor, provistas de ondulaciones externas que refuerzan la trabazón con el hormigón, con objeto de sacar el mayor partido posible de la adherencia mejorada de los cordones en hélice.

### **Ensayos de materiales y del sistema de pretensado**

En un principio, los resultados obtenidos en ensayos rudimentarios del procedimiento de pretensado por desviación helicoidal, se tomaron con excesivo optimismo. Pero la aplicación práctica en obra necesitaba una seria y responsable seguridad de las consecuencias que se pudieran derivar.



Cabeza móvil para el anclaje.



Anclaje de la extremidad fija.  
 Cabeza móvil para tesar por tracción directa.



Curva de las tensiones de tesado en función del número de vueltas del haz de cordones, en el pretensado por desviación helicoidal.

Esto dió lugar a una serie de experiencias en el laboratorio y obra, para llegar al convencimiento de que el funcionamiento del sistema sería correcto, particularmente en lo referente a la persistencia del postesado, la regularidad y, en fin, el coeficiente de seguridad propuesto.

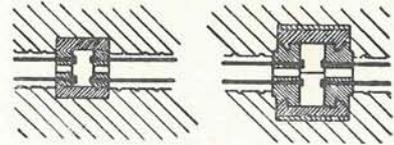
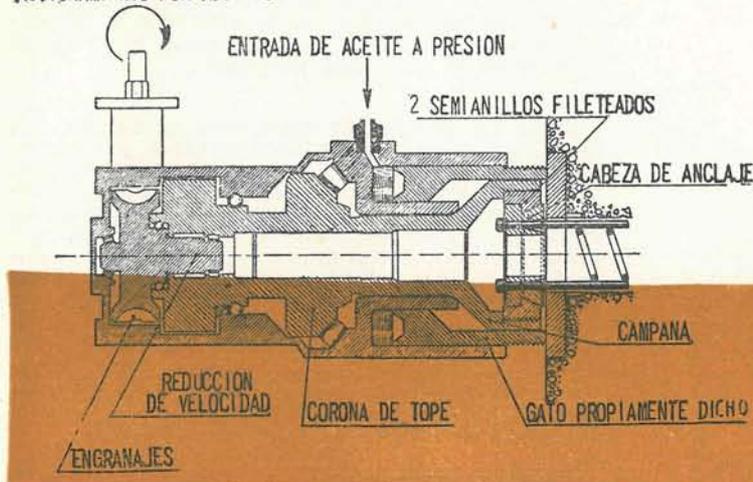
Entre los ensayos de materiales se cuentan los llevados a cabo con cordones vírgenes y otros ya torcidos previamente. Los anclajes de cordones fueron también objeto de estudio y experimentación, pues se presentaron varios tipos, de entre los cuales se pretendía hallar el bueno. La idea más simple de amarrar un hilo de forma absoluta, consiste en dotar a éste de un abultamiento o botón en su extremidad y hacerle apoyar en los bordes de un orificio por el que se le hace pasar a la punta antes de formar el abultamiento. De este tipo de botones se eligió uno cuyos ensayos dieron resultados concluyentes; pues al llegar a la ruptura, ésta se verificaba en cualquier parte del cordón, menos en la región del botón de retención.

Para los procedimientos de tesado se estudiaron distintas variantes, se realizaron gran número de ensayos y se probaron algunos tipos de soportes de cables en forma de discos, que constituyen el núcleo interior del haz de cordones y la distancia más conveniente que debía darse entre discos. En los primeros ensayos se pudo comprobar que, para un núcleo de apoyos de cordones de 38 mm de diámetro, la inestabilidad se presentaba al espaciar los discos a más de 0,185 m, lo que obligó a espaciarlos a razón de seis por metro. De todos estos ensayos de tesado por desviación helicoidal, el resultado óptimo corresponde al sistema que emplea cordones de 7 mm de diámetro y núcleo central en forma de resorte.

También fueron objeto de investigación los efectos de la longitud del haz de cordones y de la posible pérdida de tensión por rozamiento. Los ensayos de tesado por desviación helicoidal utilizando un gato de rotación en el extremo de un haz de 18,15 m de longitud y un gato ordinario en el otro, dieron 60 toneladas de esfuerzo en el gato de rotación y 59,80 en el otro, es decir, que las pérdidas de carga son prácticamente inexistentes.

En el viaducto se pretensaron 23 cables por el procedimiento de desviación helicoidal. Estos haces iban provistos de un resorte formando el núcleo central y de discos con alojamientos para los cordones, con objeto de mantenerlos debidamente espaciados. En el interior del núcleo se montaron cuatro cordones que se debían tesar por tracción directa. La primera serie de estos cables dieron una curva de tensiones cuyas ordenadas eran solamente el 70 % de las correspondientes a la curva típica. Al pasar a postesar una serie de cables de 14,75 m de longitud, las tensiones resultantes eran equivalentes a las de la curva patrón, lo que indujo a la conclusión de que existía una anomalía. En efecto, por error, los discos soporte se habían espaciado en obra a 1 m, en lugar de a 0,166 m, o, lo que es lo mismo, que se prepararon como si se tratase de un tesado por tracción directa. Bastó destorcerlos y aplicarles una tracción directa para recobrar una situación correcta. A continuación se tesaron una serie de ocho haces de 6,50 m de longitud, siguiendo el procedimiento de desviación helicoidal, sin encontrar dificultad alguna. Y para terminar, la última serie de tres cables puestos en tensión por rotación dió lugar a nuevas dificultades, por lo que, dado el corto espacio de tiempo del Pliego, se juzgó preferible abandonar el método por rotación en esta obra.

## ACCIONAMIENTO POR ROTACION



Sección del gato de rotación, empleado para tesar por desviación helicoidal.

Disposición de empalme de haces de cordones con botones terminales.

Como conclusión general se puede recomendar, a fin de evitar la presencia de un par en las armaduras de este sistema de pretensado, desviar la mitad de ellas en un sentido de rotación y el resto en el otro opuesto al primero.

### Gatos utilizados para tesar

Los gatos de rotación empleados para la puesta en tensión por desviación helicoidal están constituidos por tres órganos esenciales: un gato propiamente dicho, que sirve para liberar la cabeza de anclaje de la placa de apoyo, controlando, a su vez, el valor de la tracción realizada; un reductor de rotación, y un motor eléctrico constituido por un simple mecanismo como el de una perforadora eléctrica portátil. La operación de tesado se controla por cuentavueeltas y un manómetro.

También se emplearon gatos tipo BBRV, suizos, que utilizan disposiciones análogas a los Boussiron, es decir, botones terminales de los cordones y anclaje fijo sobre acero. La diferencia esencial entre este tipo de gatos y los de rotación, consiste en que éstos tesan por tracción directa, mientras que aquéllos lo hacen por desviación helicoidal. La tracción en éstos se realiza por medio de anillos o gatos anulares y varillas fileteadas, dejando la fijación del anclaje a la acción de una tuerca, o espera a que el mortero haya fraguado.

Por razones de premura de tiempo para poder llegar a un resultado definitivo de los gatos Boussiron, en esta obra se ha procedido a un proceso

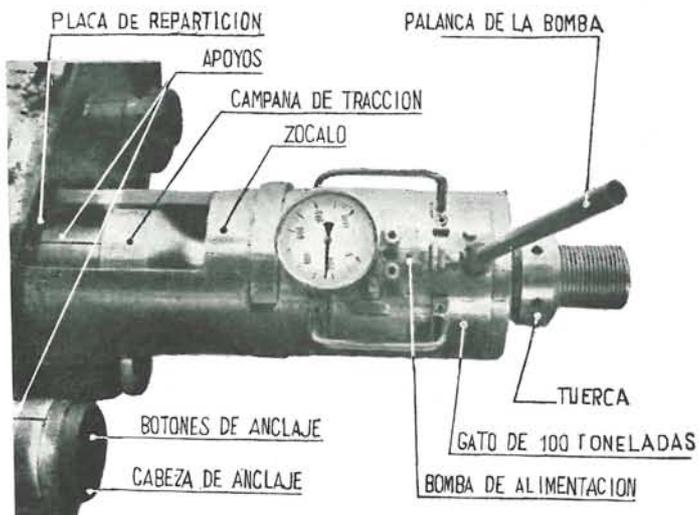
mixto de postesado, para el cual se han empleado los dos tipos de gatos ya referidos.

Estos sistemas mixtos de tesado, Boussiron-BBRV, presentan ciertas ventajas interesantes:

- a) Anclaje absoluto y técnicamente seguro, ya que no se basa en fuerzas de rozamiento o de cuña.
- b) Tesado simultáneo e idéntico de un número cualquiera de cordones provistos de botones terminales sobre una pieza común de anclaje.
- c) Facilidad de adaptación a cualquier esfuerzo de tesado, haciendo variar el número de cordones. El empleo de cables de 100 toneladas es corriente en este procedimiento.
- d) Se puede ajustar el postesado progresivamente por fases sucesivas.
- e) Un control del postesado, posible en todo momento antes de haber inyectado.
- f) Posibilidad de empalmes de cables por medio de manguitos.

A estas ventajas relativas a los cordones tesados por tracción directa, se pueden añadir las correspondientes a cables tesados por torsión:

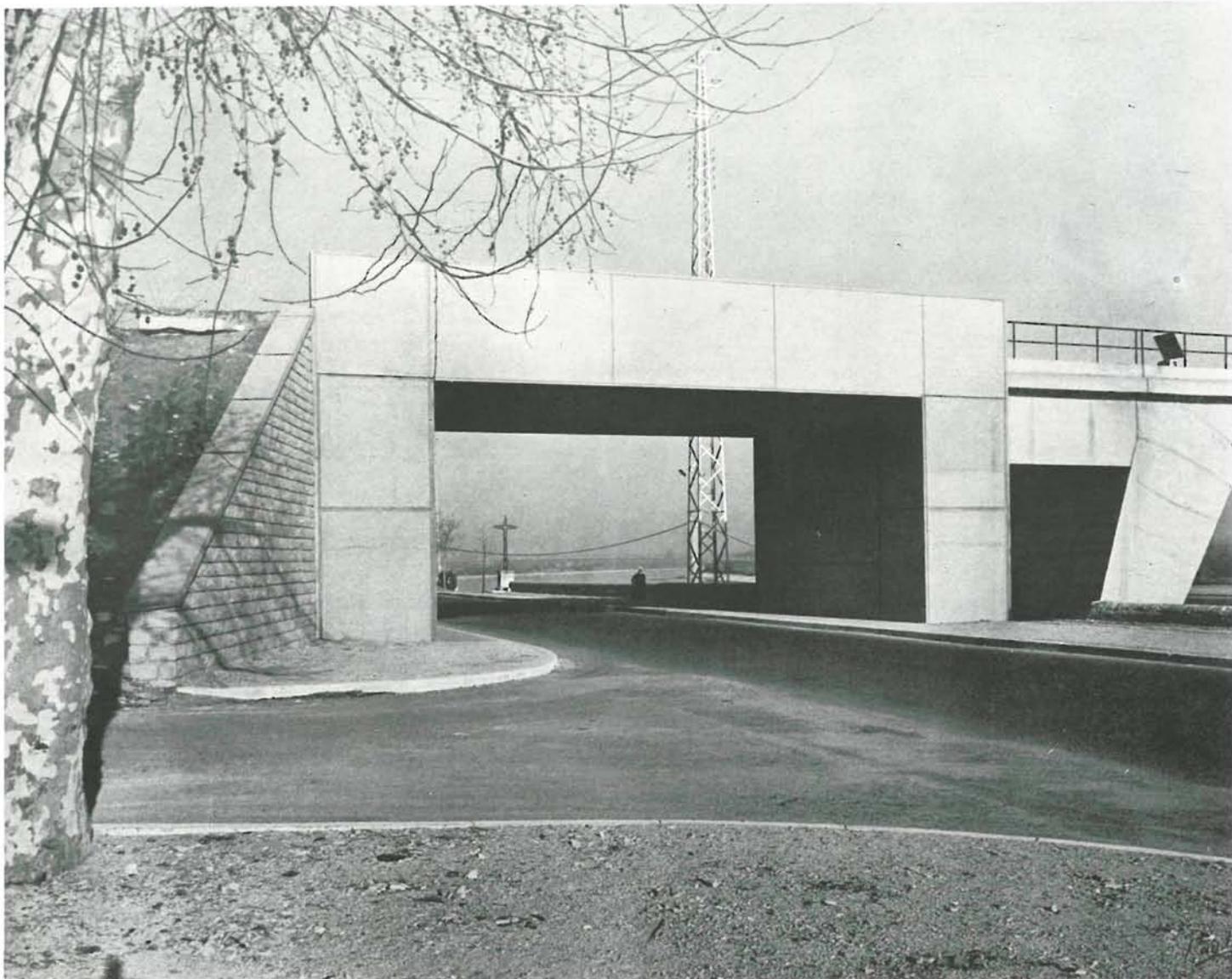
- a) Unión perfecta con el hormigón y buena repartición de los esfuerzos del postesado.
- b) Ninguna pérdida de tensión, debido a la ausencia de rozamiento longitudinal.



Gato patentado suizo BBRV, de concepción para anclajes similares al del sistema Boussiron, pero que tesa por tracción directa.

## construcción





Estribo y paso inferior para carretera, del puente de hormigón pretensado de La Voulte.

Como se puede apreciar por cuanto se ha dicho, se han introducido dos innovaciones de gran alcance: una que concierne al procedimiento de pretensado, y la otra, a los métodos constructivos. Por consiguiente, antes de llegar a las disposiciones más favorables, se ha tenido que pasar por un gran número de cálculos, ensayos, análisis, modificaciones y controles, que, con frecuencia, han revelado alguna sorpresa.

*J. J. U.*

INFORMES DE LA CONSTRUCCION 90