

el puente de Brotonne sobre el Sena • Francia

564-29

CAMPENON-BERNARD-CETRA
MM. ARSAC y FRALEU, arquitectos consejeros

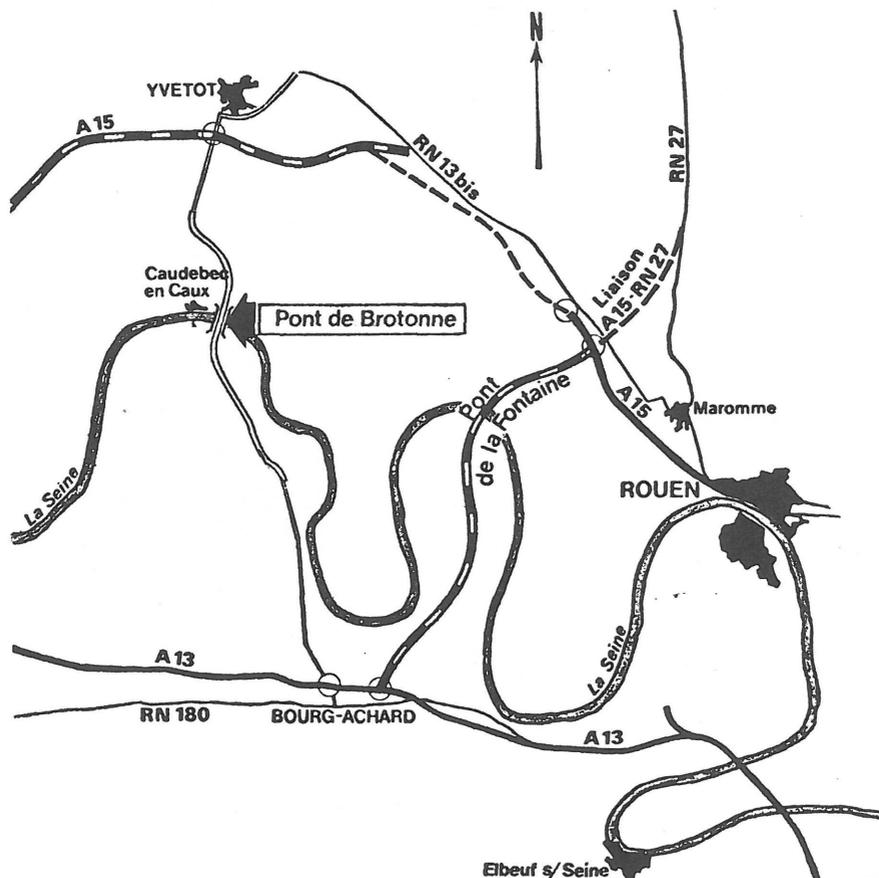
sinopsis

Este puente resuelve el problema de comunicación entre Rouen y Le Havre. La necesidad de respetar la tradición marítima de Rouen y la navegación de barcos de gran tonelaje obligó a realizar una estructura cuya obra principal, de una longitud de 696,5 m, es un puente atrantado que tiene cinco tramos, de los cuales el central, de 320 m, constituye el récord del mundo de luz en hormigón pretensado. La estructura comprende, además, dos viaductos de acceso. En este artículo se hace un análisis de las características y procedimientos de construcción de cada uno de los elementos que componen la obra:

- Las cimentaciones, que son columnas cilíndricas para las pilas principales, y sobre pilotes en las pilas de los viaductos de acceso.
- Las pilas, de forma octogonal curvilínea, que producen un gran efecto estético.
- El tablero es una viga monocelular, formada por dovelas de dos almas pretensadas en todas direcciones.
- Las torres, cuya sección es constante en sentido transversal (2,60 m), y varía de 4,80 a 2,84 m en sentido longitudinal.
- Tirantes, pretensado, etc.

El problema del paso del Sena entre Rouen y Le Havre tiene cierta analogía con el del paso del Loira entre Nantes y Saint-Nazaire. La inauguración del puente de Tancarville, en 1959, remedió de una manera parcial una situación injusta para los intereses de la Alta y Baja Normandía.

Efectivamente, Tancarville aportó una mejora sensible, indispensable por otra parte, teniendo en cuenta el progreso de la ciudad de Le Havre, de su puerto y del complejo industrial de sus alrededores. Todavía se necesitaba un paso para sacar definitivamente de su aislamiento al país de



situación

75

Caux, que sólo estaba comunicado con la margen sur del Sena por medio de dos barcas con un horario de 6 a 22 horas. Para resolver esto, Tancarville estaba mal situado.

Desde la construcción del puente de Tancarville han pasado 20 años, durante los que el tráfico por carretera no ha cesado de aumentar, por lo cual ha sido necesario encontrar otros medios de paso sobre el Sena.

El consejo general del Sena-Marítimo se inclinó desde el comienzo de los años 60 sobre la necesidad de un segundo paso sobre el Sena, en los alrededores de Caudebec, en Caux, a medio camino entre Rouen y Tancarville. Esta elección se hizo tendiendo a favorecer el progreso del país de Caux. Pero hasta 1969 no se realizó un estudio preliminar bajo los auspicios del Puerto Autónomo de Rouen.

Uno de los problemas más complejos es la vocación marítima de Rouen. Ello excluye la colocación de pilas en el río, dada la gran densidad del tráfico fluvial y la presencia de frecuentes nieblas que propician las colisiones.

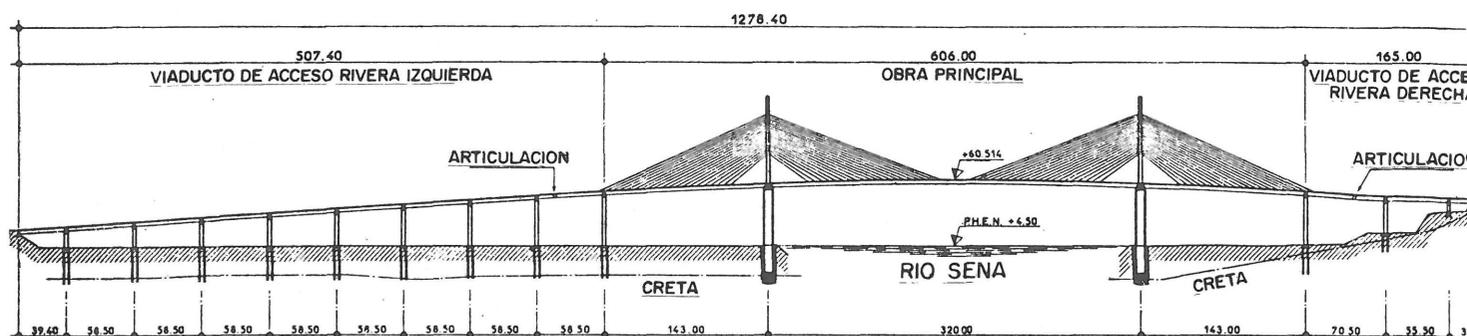
Por lo tanto, se imponía la construcción de un tramo de muchos centenares de metros.

Además, la altura libre necesaria para el paso de barcos de gran tonelaje (50 m por encima de las más altas aguas navegables) obliga a la realización de viaductos y terraplenes de acceso importantes. El proyecto finalizó en 1973 cuando la Dirección Departamental de l'Équipement del Sena Marítimo convocó un concurso para la realización de un puente atirantado en Brotonne. Los dos proyectos de base eran: uno de estructura metálica y otro de estructura de hormigón pretensado.

La empresa Campenon-Bernard-Cetra obtuvo la adjudicación de la obra presentando un proyecto de hormigón pretensado cuyo tramo central constituye, con sus 320 m, un nuevo récord mundial de luz para una obra de este tipo. Esto merece ser subrayado. Sobrepasa largamente los 240 m que tiene, en su tramo central, el tablero del puente de Corrientes, construido hace pocos años sobre el río Paraná, en Argentina, y considerado desde entonces como la realización más espectacular de su género.

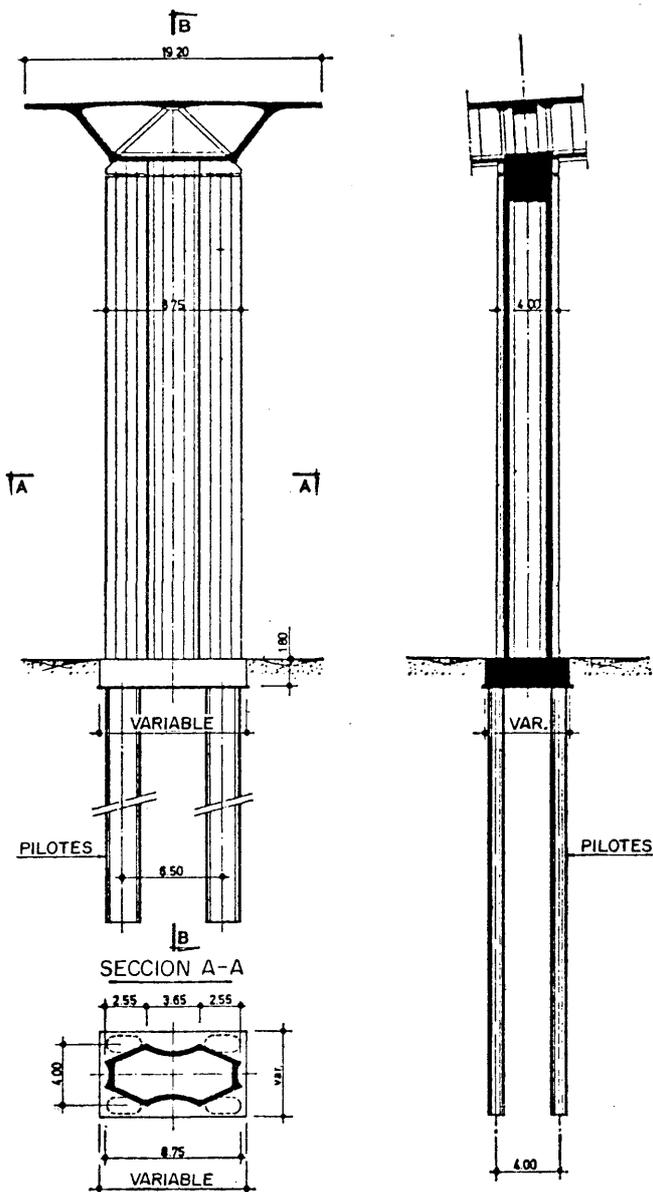
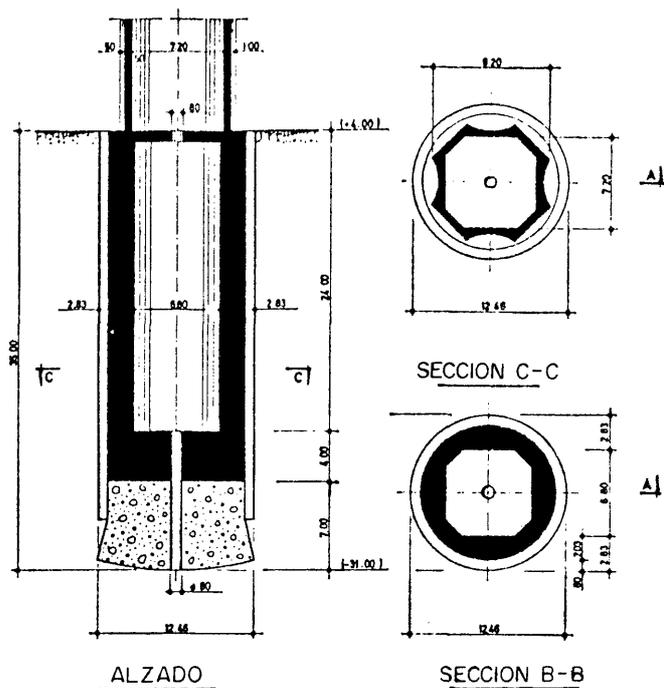
Con una longitud total de 1.278,40 m, el puente de Brotonne está constituido por una obra principal y dos viaductos de acceso. La obra principal, con una longitud de 696,50 m, es un puente atirantado de hormigón pretensado con suspensión axil, que tiene un tramo central de 320 m, dos tramos laterales de 143,50 m y dos tramos parciales de compensación. Los tirantes han sido dispuestos en forma de abanico en el plano medio de la estructura y se apoyan sobre dos torres de hormigón armado de una altura de 70 m por encima del tablero.

Con una longitud de 464,40 m, el viaducto de acceso de la margen izquierda se descompone en un tramo de 38,90 m, siete tramos de 58,50 m, y una ménsula de articulación de 16 m.



sección longitudinal

cimentación pilas principales



El viaducto de acceso de la margen derecha, con una longitud de 116,50 m, tiene dos tramos de 39 y 55,50 m y una ménsula de 22 m.

El perfil longitudinal de la obra posee las siguientes características: el viaducto de acceso de la margen izquierda presenta una pendiente regular de 6,5 %; la obra principal convexa se inscribe en un radio de 5.000 m, y el viaducto de acceso de la margen derecha se halla en contracurva con la horizontal. La cota del tablero varía desde 18,61 m en el estribo de la margen izquierda hasta 60,51 m en la clave del tramo central, siendo de 45,97 m en el estribo de la margen derecha. La obra principal tiene una altura libre de alrededor de 50 m por encima del nivel más alto de aguas navegables. No tiene ningún apoyo en el Sena y las pilas principales, colocadas en la orilla, han sido dotadas de una protección contra los choques eventuales.

LAS CIMENTACIONES

Todas las zapatas de las pilas de los viaductos de acceso están cimentadas sobre cuatro pilotes de 2,2 m de longitud y 0,8 m de anchura, hincados en la caliza, o sea, hasta una profundidad de 23 a 28 m respecto del terreno natural. Sólo la zapata de la primera pila de la margen derecha ha podido ser cimentada directamente en la caliza, ya que ésta aflora en la ladera sobre la que está colocada la pila.

En cuanto a las pilas principales, se apoyan sobre columnas de cimentación de 10,50 m de diámetro medio, hincadas a 35 m de profundidad en la caliza, y realizadas en el interior de un recinto circular, con pared moldeada, de 12,46 m de diámetro exterior.

El recurrir a cimentaciones de gran profundidad es consecuencia, por una parte, de la importancia de los cálculos de carga sobre los apoyos, de alrededor de 2.000 t para las pilas de los viaductos y de 17.000 t para las pilas principales, y, por otra, de la configuración geológica del terreno.

Reconocimientos geotécnicos han permitido definir las características del subsuelo y evaluar su permeabilidad.

A la altura de los cimientos de las pilas principales, los terrenos que se encuentran son los siguientes:

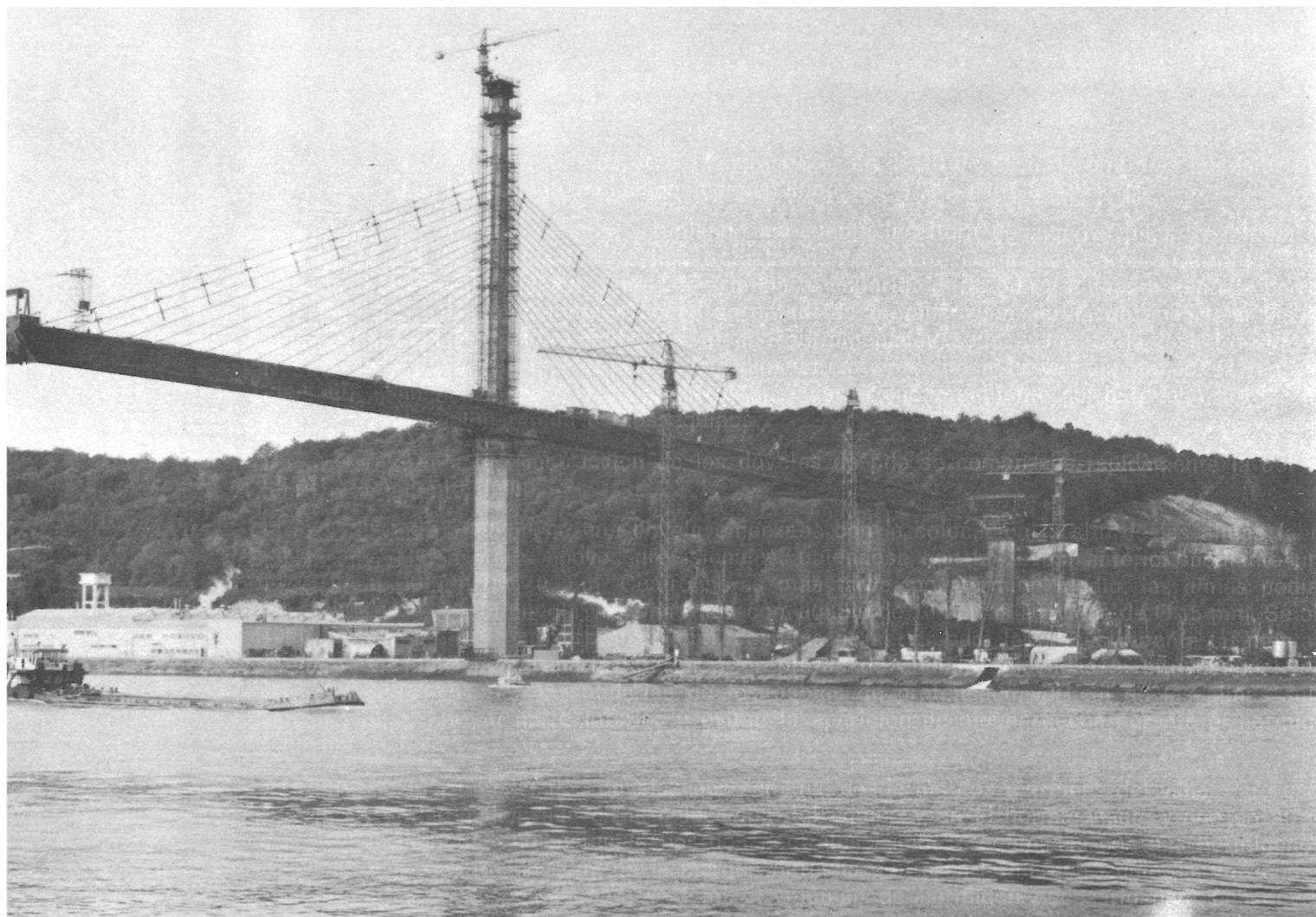
- En superficie de + 4 a - 13 terraplenes, aluviones y limos.
- Aluviones de arena mezclada con grava de - 13 a - 23.
- Creta alterada, que va aumentando su resistencia a partir de - 23.



— Debido a esto, la cota teórica de cimentación, la de la creta sana, es la cota — 31, o sea, a 35 m de profundidad.

La solución adoptada para la cimentación de las pilas principales presenta un cierto número de ventajas:

- a) Se trata de una cimentación maciza que ofrece una buena resistencia cara a los posibles choques.
- b) Es una estructura simple y económica cuya realización tiene mayor fiabilidad que la cimentación sobre pilotes.

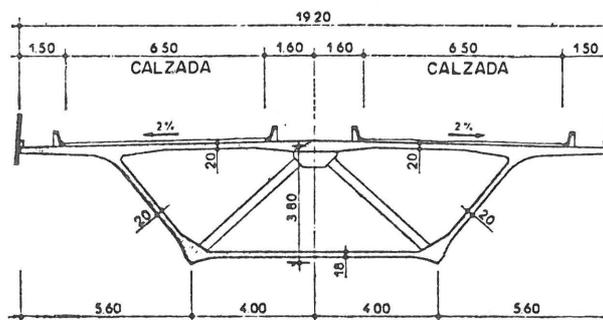


- c) Finalmente, permite, si el substrato es impermeable o se ha impermeabilizado por medio de inyecciones, un reconocimiento visual y una investigación geotécnica del terreno que pueden conducir a un ajuste del nivel de la cimentación después del examen del fondo de la excavación.

LAS PILAS Y LOS ESTRIBOS

Las pilas constituyen, desde el punto de vista estético, uno de los aciertos de la obra. Tienen la forma de un octógono curvilíneo, cuya altura varía de 10 a 50 m respecto del terreno natural. En las pilas de los viaductos el espesor de las paredes tiene un mínimo de 0,25 m, y la sección del octógono se inscribe en un rectángulo de 8,75 m de longitud, y 4 m, como mínimo, de anchura:

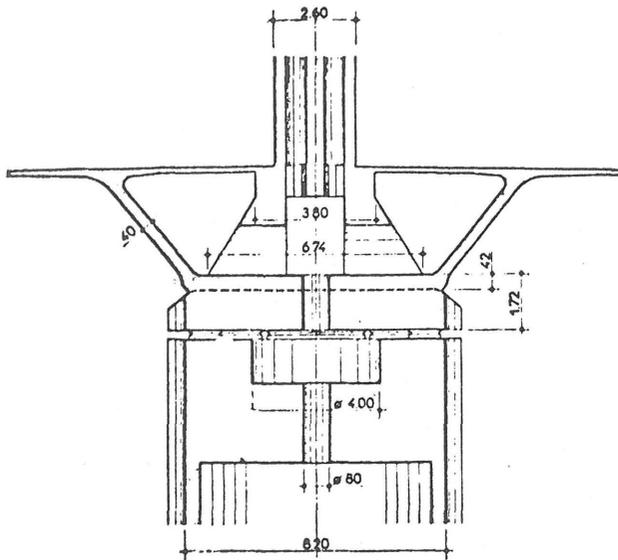
Para las pilas principales, la sección es la de un octógono inscrito en un cuadrado de 9,20 m de lado. El espesor mínimo de las paredes es de 0,50 m. Las pilas principales llevan en su parte superior una traviesa de 4 m de espesor que tiene en su centro un agujero, para paso de personas, de 0,80 m de diámetro, y en la periferia un hueco de 4 m de diámetro por 1,50 m de altura, que permite la colocación y examen de diez elementos de apoyo de neopreno en la dovela de pila y en la torre.



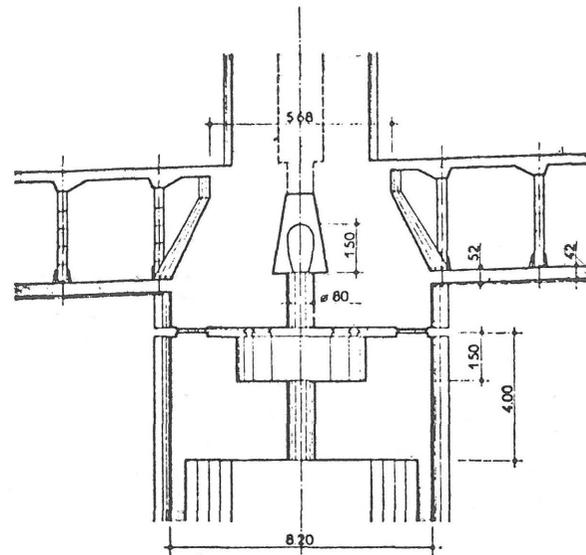
sección transversal tipo del tablero

Los estribos presentan la particularidad de haber sustituido a la losa de transición clásica por un macizo de suelo-cemento. El estribo de la

SECCION TRANSVERSAL

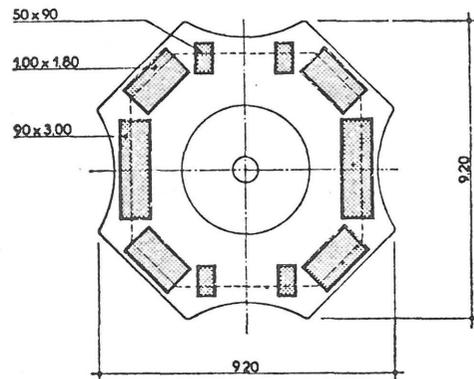


SECCION LONGITUDINAL



**sección transversal
y longitudinal de la cabeza
de la pila principal y de la
dovela de pila con el macizo
de asiento del mástil**

DISPOSICION DE LOS APOYOS



margen izquierda está cimentado directamente por medio de zapatas sobre un terraplén de 14 m de altura realizado muchos meses antes. El estribo de la margen derecha, cimentado en una ladera caliza, ha sido constituido esencialmente por dos zapatas de $7 \times 3,5$ y 1 m de espesor, y muros de sostenimiento destinados a contener los terraplenes.

EL TABLERO Y LAS TORRES

Gracias al pretensado el tablero, aunque realizado en su totalidad de hormigón, asombra por su ligereza, ligereza que nos viene impuesta por la longitud del tramo central: 320 m.

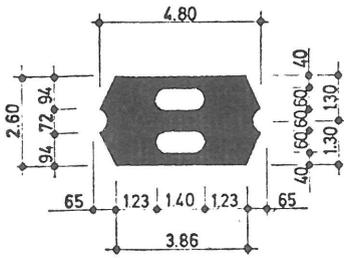
Se trata de una viga monocelular de espesor constante, rigidizada interiormente por riostras oblicuas, realizadas mediante dovelas de dos almas pretensadas longitudinal, transversal y verticalmente.

La altura constante de las almas es de 3,80 m, con un espesor que varía de 0,20 a 0,40 m y una inclinación de 45° .

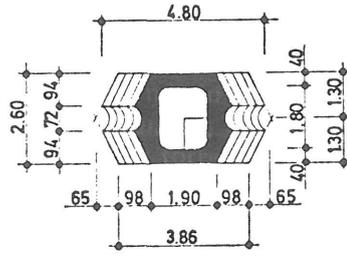
El cajón, de 3,97 m de altura y 19,20 m de anchura, pesa 23 t/m.l. La cabeza superior que recoge las almas tiene 0,20 m de espesor normal, con voladizos de 2,90 m de anchura. El espesor de la cabeza inferior, con una anchura de 8 m, varía de 0,18 m en la parte central a 0,42 m en los apoyos.

La longitud media de las dovelas es de 3 m, lo que equivale a un peso de cerca de 65 t. Su construcción se efectúa por voladizos a partir de las dovelas de pila, construidas in situ de

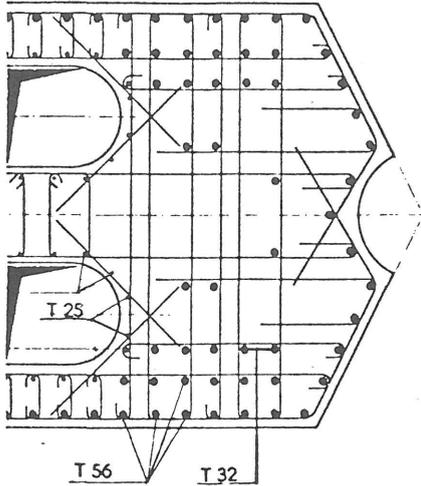
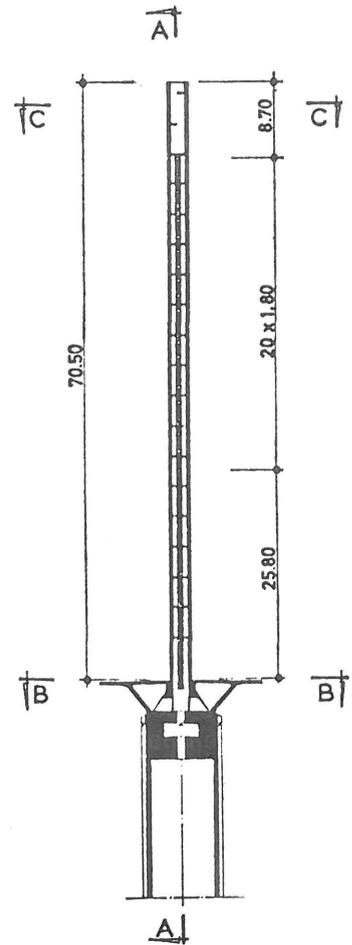
sección B - B



sección C - C

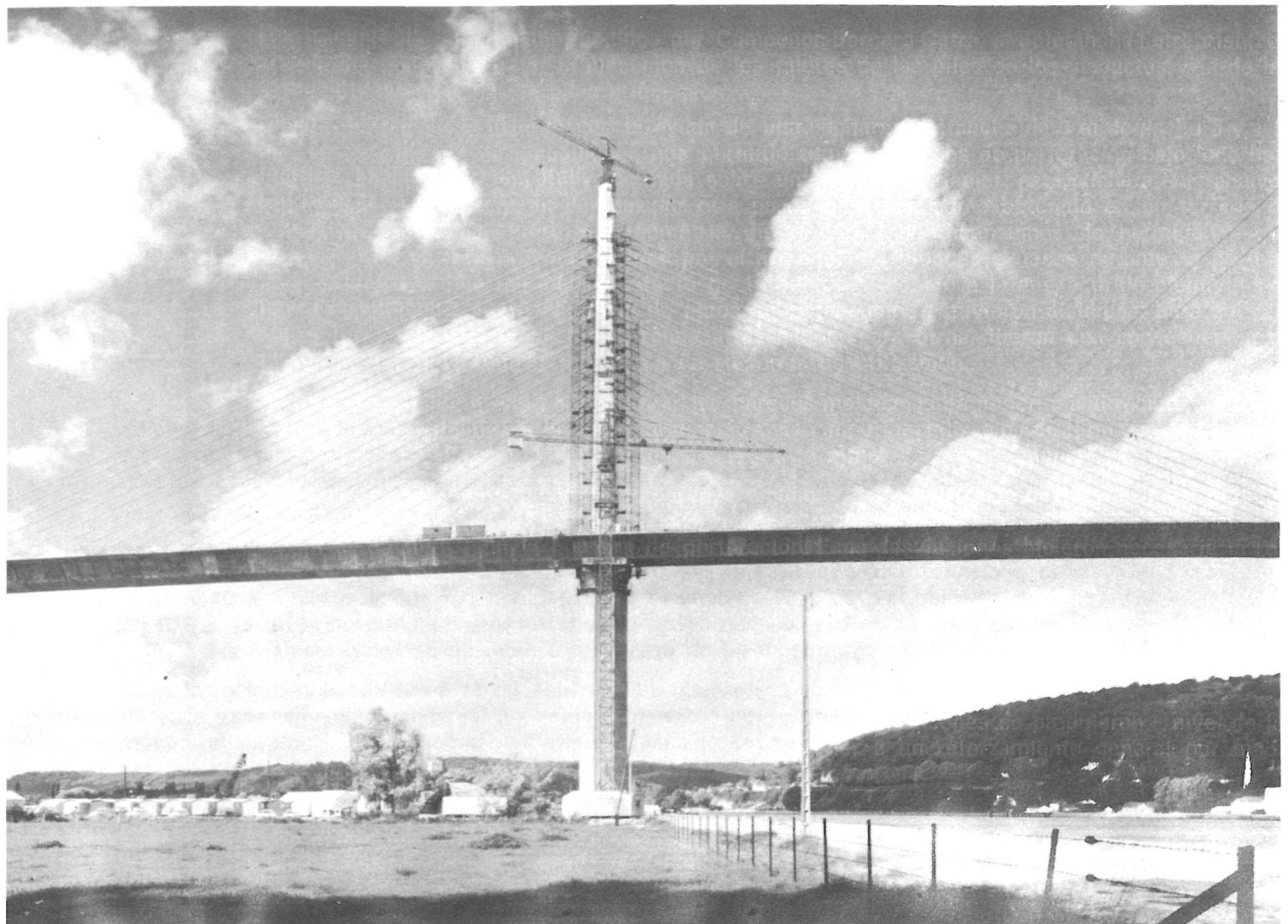


sección vertical



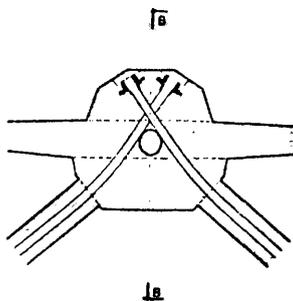
sempianta de las armaduras de la base del mástil

sección vertical y secciones horizontales del mástil

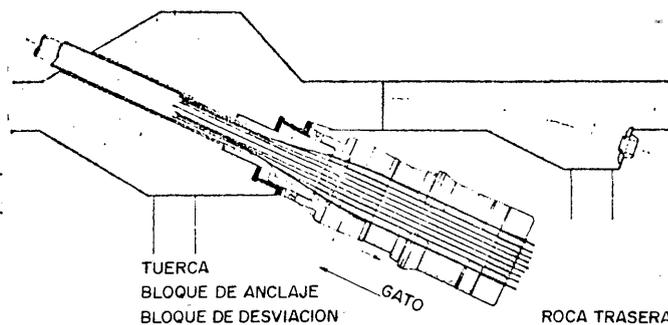
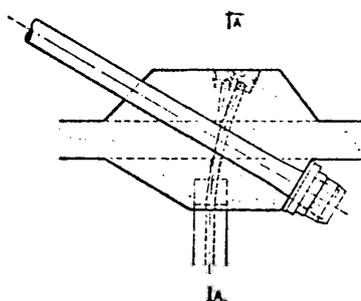


anclaje de los tirantes en el tablero

sección A - A



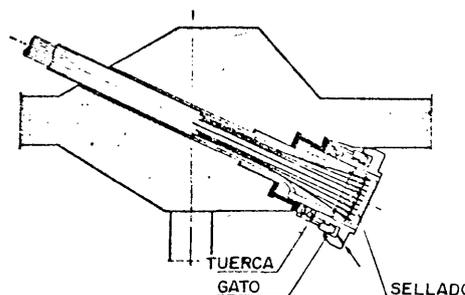
sección B - B



manera tradicional. Dichas dovelas de pila tienen una cabeza inferior que cumple el papel de riostra exterior y transmite directamente los esfuerzos del tablero a los elementos de apoyo.

Las dovelas de las pilas principales tienen un arriostramiento interior que asegura la transmisión de los esfuerzos que provienen de la torre.

Las dos torres, de hormigón armado, están empotradas en el tablero, el cual se apoya sobre la traviesa de las pilas principales por intermedio de apoyos de neopreno. Con una altura de 70 m por encima del tablero llevan armaduras de hormigón armado de 56 mm de diámetro.



Sometidas a esfuerzos permanentes importantes, del orden de 90 kg/cm^2 , que pueden doblarse debido al efecto de la flexión producida por el viento, esas torres constituyen la parte más compleja de la obra. Su sección, de 2,60 m de espesor constante en sentido transversal de la obra, varía desde 4,80 m en la base hasta 2,84 m en el vértice, en sentido longitudinal. Sus armaduras, con una densidad media de 300 kg/m^3 , alcanza 500 kg/m^3 en el empotramiento del tablero.

EL PRETENSADO

La excepcional luz central del tablero se ha conseguido gracias a una masiva utilización del pretensado.

La losa superior, apoyada de una manera continua sobre las almas oblicuas y puntualmente sobre riostras triangulares, está dotada, debido a su luz, de un cableado transversal formado por cables de $12 \text{ } \varnothing 8$.

La losa inferior que recoge la presión de las riostras ha sido pretensada transversalmente en los codos por monocordones T 15.

Las almas están pretensadas verticalmente por medio de cercos activos $4 \text{ } \varnothing 8$; sufren efectos de cizallamiento muy elevados, de cerca de 50 kg/cm^2 , por lo que deben ser comprimidas en su plano. Finalmente, las riostras en las que se enlazan los tirantes pueden sufrir una tracción considerable, por lo que se han pretensado con cables de 12 T 15.

Los tirantes, que son considerados como un pretensado exterior de la obra principal, ya que ejercen un pretensado longitudinal del tablero debido a la componente horizontal de su tensión, se han realizado con 39 a 60 cordones T 15 protegidos por tubos $\varnothing 165$ inyectados con mortero de cemento. Estos tirantes son 21 en cada torre y su longitud varía de 84 a 340 m. Atraviesan las torres por intermedio de un apoyo, cuyo radio de curvatura es de 3 m.

La importancia del dispositivo de pretensado da una idea de la complejidad tecnológica de la estructura, debida principalmente a los cruces de cables y a las superposiciones entre ellos en algunas secciones. Esta sujeción es mayor cuando se trata de pequeños espesores de hormigón, por ejemplo, 0,20 m para las almas.

LOS ESTUDIOS

Vamos a dar dos cifras para resaltar la importancia de los estudios que han dado como resultado la estructura que acabamos de describir: han sido necesarios 540 planos y 5.600 hojas de cálculo. Estos estudios fueron distribuidos de la manera siguiente:

Estudios relativos a la flexión longitudinal del conjunto «apoyos-torres-tirantes», que han sido realizados con la ayuda de un programa de cálculo electrónico puesto a punto en la oficina de proyectos Campenon-Bernard-Cetra. Una comprobación manual de ese programa se ha efectuado por la dirección de la obra, ayudada por estudiantes del E.N.P.C., sobre modelos simplificados de 2 a 4 tirantes, comprobación que ha permitido descubrir las imperfecciones del programa principal.

La obra principal se ha definido mediante más de 500 barras que restituyen la geometría y las características de la estructura, incorporándose igualmente un cierto número de tramos de viaductos de accesos suficientes para que el comportamiento de los tramos con sobrecargas esté de acuerdo con la realidad.

El programa ha permitido el cálculo de los esfuerzos originados por: el pretensado, las superestructuras, la sobrecarga de tráfico, las variaciones de temperatura uniformes en toda la estructura, las diferencias de temperatura entre el acero (tirantes) y el hormigón (tablero, torre) y el gradiente térmico en el tablero.

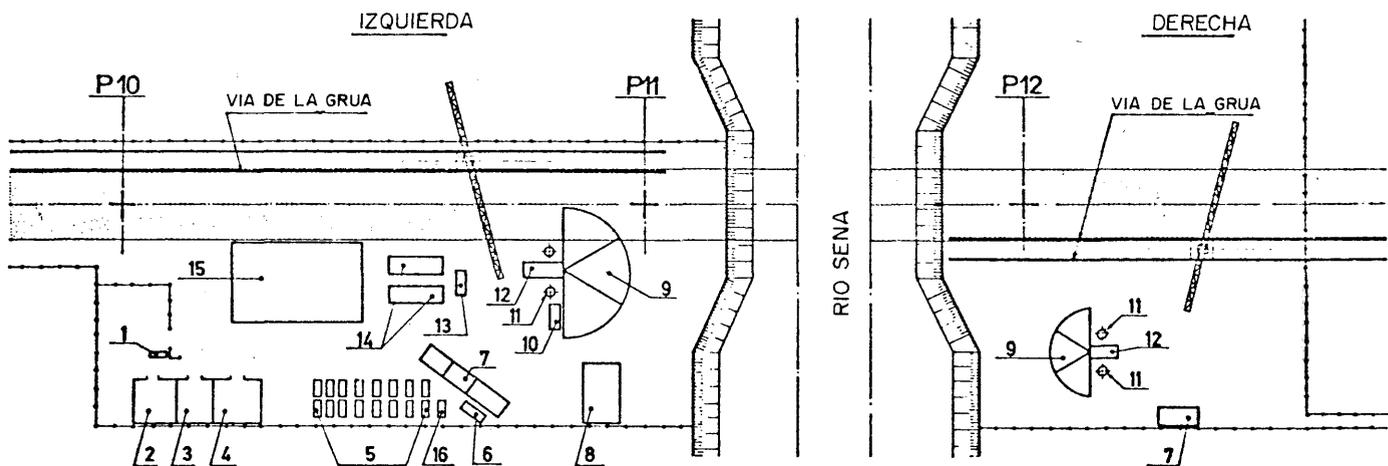
Los estudios relativos a la flexión transversal del tablero se han realizado por medio de un programa tridimensional de la Universidad de Calgary, que permite estudiar el efecto de las cargas de tráfico repartidas sobre pequeñas superficies y el de las cargas puntuales tales como los esfuerzos engendrados en la proximidad de cada tirante.

Los ensayos más delicados se han llevado a cabo en el estudio de las estructuras de gran altura que están muy fuertemente comprimidas y que reciben los efectos de los vientos del valle del Sena.

El estudio experimental de su estabilidad transversal se ha hecho por dos caminos muy diferentes:

— El primero consistió en ensayar, por medio de un ventilador, un modelo con la misma forma de la torre y realizado en el laboratorio del C.E.B.T.P., a escala 1/200, con la ayuda de una resina cuyas características elásticas son parecidas a las del hormigón armado. Esa torre, en miniatura, estaba solicitada por un conjunto de tirantes de hilo de nylon que producían un estado de tensiones parecido al de la torre real. También se construyeron en modelo reducido las pilas y el tablero, a fin de poder ensayar el conjunto de la obra.

Se analizaron dos direcciones del viento, una paralela y otra perpendicular al eje de la obra, y se comprobó que el aumento de la velocidad del viento hasta alrededor del doble del que es de esperar en el valle del Sena, o sea, alrededor de 300 km/h, no ocasionaba ninguna inestabilidad aerodinámica.



1. Depósito de fuel.—2. Almacén.—3. Armadura.—4. Mecánica.—5. Dormitorio.—6. Comedor.—7. Vestuario-Comedor.—8. Oficinas.—9. Aridos.—10. Agua.—11. Cemento.—12. Central hormigón.—13. Caldera.—14. Prefabricación.—15. Parque ferralla.—16. Sanitarios.

organización de obra

- El segundo estudio analítico consistió en comprobar la estabilidad de la torre en estado límite. Fue realizado con un programa que permite tener en cuenta las características reales de resistencia y deformación del hormigón armado (fluencia y fisuración), los defectos de no verticalidad y de no rectitud eventuales, así como las solicitaciones suplementarias engendradas por las deformaciones de la torre y los desplazamientos simultáneos de los puntos de paso de los tirantes, bajo el efecto del viento.

El estudio de la obra principal durante la construcción se hizo en dos etapas sucesivas:

- La primera es la del cálculo de las tensiones originadas por la colocación in situ de los tirantes con la ayuda del programa de la estructura.

El pretensado de construcción se determinó a partir de los resultados de esta primera etapa.

- La segunda permitió comprobar que las tensiones en la estructura, durante la construcción, quedaban siempre dentro del campo admisible y que, además, el estado final obtenido era idéntico al que se deseaba. Esta segunda parte del estudio permitió la posibilidad de determinar la evolución de las cotas de regulación teóricas de los encofrados móviles del tablero y del perfil longitudinal de la obra, después de cada tensado del tirante, con lo que era posible disponer de un medio de control permanente.

Otorgado el concurso a la empresa Campenon-Bernard-Cetra, los trabajos empezaron al comienzo de la primavera de 1974. La obra padeció la crisis energética surgida de los acontecimientos de 1973. Sin tener realmente dificultades para cumplir los plazos previstos, sufrió, no obstante, algunos retrasos debidos a la falta de suministros de determinados materiales especiales. También hubo ciertos problemas con los aceros de pretensado y, en particular, con los cables trenzados T 15 para tirantes. Una cierta penuria, real o supuesta, provocó anomalías durante el año 1974, por lo que la Dirección Facultativa tuvo que decidir entre una posible ruptura del suministro o el mayor coste que produciría el reemplazamiento de los cables de pretensado por cables cerrados. Al final se mantuvo la primera solución.

LAS CIMENTACIONES

Los trabajos de cimentación, cedidos por Campenon-Bernard-Cetra a Solétanche-Entreprise, tuvieron dos fases distintas: la ejecución de los pilotes de las pilas de los viaductos y la de las paredes moldeadas de las pilas principales.

Dichos pilotes se realizaron con la ayuda de una cuchara Solétanche de 3 m de anchura y 1 m de espesor, dotada de mandíbulas, que permitió ritmos elevados de perforación bajo lodo bentonítico. Llevada por una Kelly montada sobre una grúa NCK Rapier, esta cuchara ha trabajado a una velocidad de 4 m/h. Parece, por otra parte, que este ritmo obtenido en un terreno de gravas, o sea, de una fuerte granulometría, dio origen a sobreconsumos de hormigón —que alcanzaron el 60 %— provocados bien por el arranque de bloques gruesos durante la perforación, o bien por una pérdida del efecto de la bentonita debido a la ausencia de elementos finos. Las opiniones sobre el origen de estos sobreconsumos estuvieron divididas: para unos, la causa fue la naturaleza de los terrenos atravesados; para otros, fueron una consecuencia de la concepción misma de la máquina y de su forma de utilización.

La misma máquina sirvió para perforar las paredes moldeadas de impermeabilización, de 0,80 m de espesor, destinadas a las pilas principales. Esa impermeabilización de forma circular ha sido resuelta a base de paneles secantes de 31 m de altura y 4 m de anchura.

Después de la construcción de las paredes algunos paneles sufrieron desviaciones debidas, bien a una detención del hormigonado durante la realización de las juntas, bien al encuentro de un punto duro bajo la cuchara de perforación. Esas desviaciones hicieron necesaria la realización de trabajos de consolidación.

En la margen izquierda dos paneles se desviaron en los 7 últimos metros, o sea, al nivel de la creta. Por consiguiente, hubo que realizar un anclaje en el terreno resistente con la ayuda de tirantes pretensados; la continuidad de la pared se aseguró mediante un hormigonado complementario a base de armaduras pasivas.

En la margen derecha, por el contrario, las primeras desviaciones se produjeron a nivel de las capas superficiales, por lo que fue necesario proceder a un reforzamiento general por medio de cercos sucesivos.

Las excavaciones de las columnas se efectuaron con la ayuda de una grúa P y H 218 equipada de cuchara. Para los materiales duros se le sumó una cargadora Caterpillar equipada de Riper y colocada en el fondo de la excavación. En los 2 últimos metros la excavación se acabó con martillo picador. Debido a la permeabilidad importante de la roca, durante la realización de las excavaciones, aquélla tuvo que mantenerse en seco mediante bombeo; las avenidas de agua fueron de 150 m³/h en la margen izquierda y 50 m³/h en la margen derecha.

Después de realizada la excavación y para evitar una disgregación de la creta, por efecto de las avenidas de agua en la base de la pared moldeada, se recurrió al auxilio de un tubo sumergible con el que se construyó un tapón de hormigón de 7 m de longitud.

La superestructura de la columna se hormigonó enseguida en seco después del encepado, colocación de las armaduras y hormigonado de la zapata, de 4 m de espesor, con ayuda de un encofrado deslizante Proco, a un ritmo de 0,20 m/hora.

La traviesa que tiene la columna, en su parte superior, se hormigonó sobre losas pretensadas.

LAS PILAS

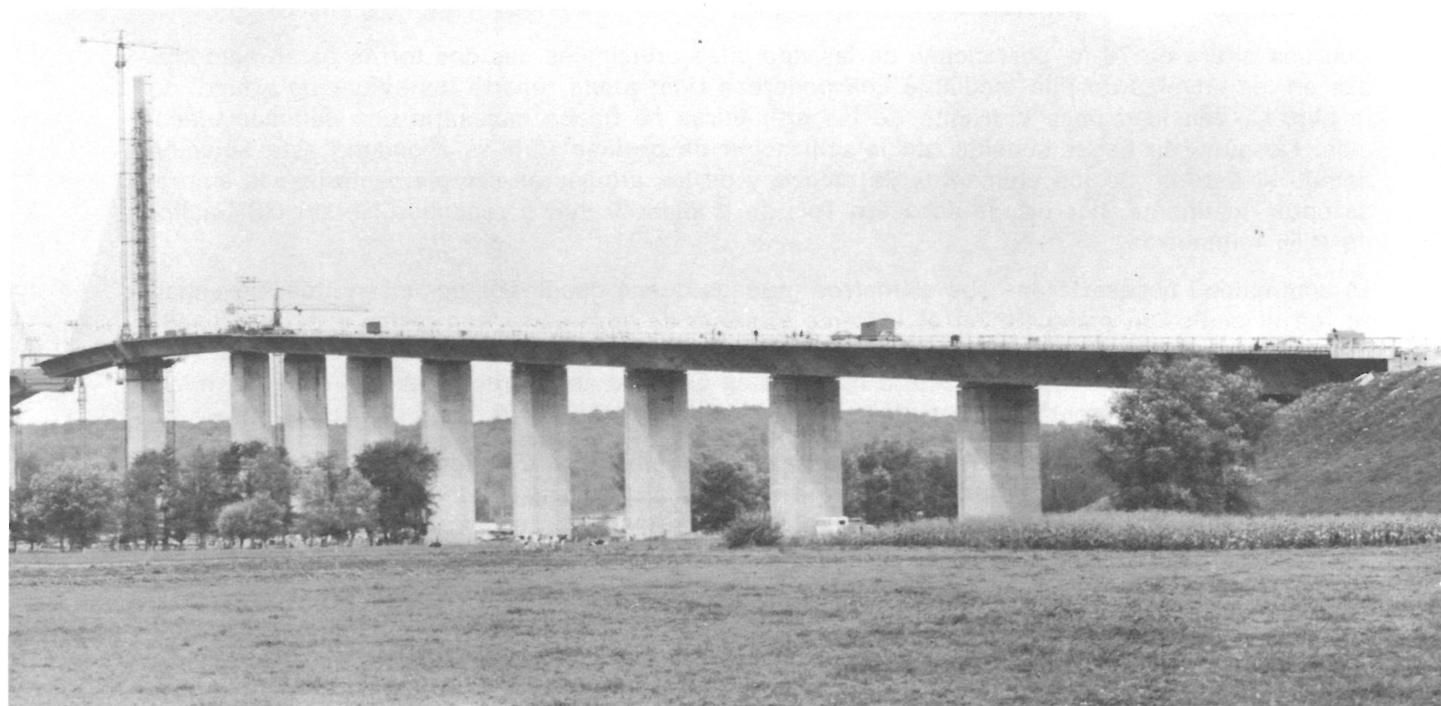
La construcción de las pilas no tuvo problemas especiales. Se realizó con la ayuda de un encofrado deslizante Proco, a un ritmo medio de 0,30 m/h. El suministro de hormigón estaba asegurado por grúas-torre Richier 1372, de 300 t/metro.

EL TABLERO

El tablero, con voladizos de 160 m por encima del Sena, se construyó a partir de las pilas mediante ménsulas equilibradas con la ayuda de dos pares de equipos móviles que permitieron la ejecución in situ de cada dovela, con la excepción de las dovelas de pila; las almas se prefabricaron en el suelo debido, principalmente, a su gran inclinación.

Un taller único de prefabricación, situado en la margen izquierda, aseguraba la construcción de las almas, ya que con la barca de Caudebec se trasladaban los elementos prefabricados a la margen opuesta. Dos bancos de prefabricación, contruidos por Cofral, y que llevan cada uno una pareja de moldes y una única serie de gatos para el tensado de los cables, permitían la fabricación de dos almas a la vez. Ese dispositivo garantizaba una perfecta colocación in situ del pretensado y permitía, después del adecuado curado, un desencofrado en sólo 24 h. Debido a las dificultades de curado, especialmente en el cimiento y, desde luego, a la necesidad de no

FOTOS: J. QUILLET



sobrepasar la temperatura límite de 30° C y respetar un plazo de 48 h, la empresa necesitó instalar otros dos bancos de moldeado independientes.

Respecto a las dovelas de pila, y teniendo en cuenta la altura de algunas pilas, resultaba difícil recurrir a una entibación de tipo tradicional. Por tanto, Campenon-Bernard-Cetra ha utilizado un sistema de ménsulas fijadas a la parte superior de la pila y unidas a ella por barras Dywidag. Sobre las ménsulas se apoyó un entablado metálico que servía de soporte a las almas prefabricadas y a los encofrados, siendo hormigonadas sucesivamente la losa inferior, la riostra triangulada y la losa superior. Ese dispositivo presentaba la ventaja de poder realizar, mediante avance, las dovelas de pila y obtener así el endurecimiento del hormigón, lo que garantizó la colocación rápida de los equipos.

Una vez realizada la construcción de las dovelas de pila se comenzaba rápidamente la del tablero propiamente dicho.

El ciclo de construcción de una dovela empezaba con la colocación in situ de las almas fabricadas, dispuestas sobre apoyos provisionales, uniéndose con la dovela anterior mediante una junta de hormigón de 40 mm. Cuatro horas más tarde, por término medio, las almas podían ser solidarizadas a la dovela ya construida con auxilio de 16 barras Dywidag de Ø 15 mm. Se obtenía así un soporte para el equipo que, después de servir para las almas durante su montaje y ajuste, se fijaba por su parte inferior a las piezas de anclaje colocadas in situ después del hormigonado. Esas piezas solidarias de los cables de pretensado vertical de las almas sujetan al equipo por su parte inferior y evitan la aparición de alguna flecha durante el hormigonado de la losa.

Se avanzó a un ritmo de dos dovelas por semana, desde los dos extremos del vano. Para cada dovela se tardaron dos días en la colocación del equipo y en el hormigonado, y uno en el secado. El hormigón era abastecido por dos centrales Lambert, equipadas con una hormigonera Teka de 500 l, y situadas una en la margen derecha y otra en la margen izquierda, vertiéndolo in situ con ayuda de una cuchara de 1 m³. El volumen de hormigón necesario para una dovela fue de cerca de 25 m³, lo que corresponde a un peso de dovela entre 65 y 70 toneladas.

Aunque no se procedía a un verdadero secado, los áridos fueron, sin embargo, precalentados por chorros de vapor saturado después del pesado, de manera que, a la salida de la hormigonera, el hormigón tenía una temperatura comprendida entre 25° y 30° C. Después del hormigonado la empresa procedió a un curado eléctrico de los voladizos mediante una serie de resistencias colocadas en los encofrados. En el interior del cajón la temperatura se mantuvo prácticamente constante mediante mecheros de gas colocados en la losa inferior.

LAS TORRES Y LOS TIRANTES

Con una altura de 70 m, por encima de las dos pilas principales, las dos torres están empotradas en las dovelas de pila mediante una poderosa riostra que reparte los esfuerzos a nivel de la pila. La densidad poco corriente de las armaduras ha hecho necesaria una delicada ejecución. Después de haber considerado la utilización de perfiles HEB se abandonó esta solución debido al estorbo de los elementos de enlace y de las armaduras complementarias; la empresa optó, finalmente, por barras de acero Tor, de Ø 20 a 40 mm y redondos Nersid GS Sacilor de Ø 56 milímetros.

La continuidad necesaria en esos diámetros gruesos quedó asegurada por manguitos; se engarzó, en el suelo, un manguito en el extremo superior de cada barra, con resina epoxi, y se selló el extremo inferior de esta barra directamente con el manguito de la barra anterior a base también de resina epoxi. El contacto a compresión quedaba así correctamente asegurado, mientras que la resina garantizaba la suficiente continuidad a tracción.

La misma torre se construyó mediante un encofrado Biémont, a un ritmo de dos recorridos de 3 m cada 4 días; el abastecimiento de hormigón y el transporte se aseguraron con una grúa-torre Potain de 3 t, elevándose hasta 16 m a medida que avanzaba la torre, a la cual estaba unida. El enfilado de los tirantes en su tubo de protección y la colocación in situ de esos tubos requirió la construcción de todo un aparato de carretones y cabrestantes.

Los tubos se colocaron con ayuda de un montacargas, fijándose después en carretones portadores. Para poner, por ejemplo, el tirante N, los carretones se colocaron sobre el tirante N-2, que aseguraba la estabilidad, rodando sobre el tirante N-1, con objeto de llevar al tirante N has-

ta su emplazamiento en la torre. A medida que avanzaban los carretones, los tubos eran soldados unos a otros.

Los tirantes propiamente dichos fueron enfilados en los tubos y movidos por un conjunto de poleas, trócolas y cabrestantes, anclados en el tablero, tensados e inyectados después en toda la longitud del tubo de protección. Una vez terminado, el puente de Brotonne da paso a cuatro vías de circulación —dos en cada sentido— y dos pasos de peatones. Los clásicos bordillos de seguridad fueron sustituidos por bordillos prefabricados Autonor de Sotubema, mientras que las barandillas se completaron con una cornisa metálica y se fijaron directamente a los voladizos del tablero.

Las dos ciudades principales de la región, Bourg-Archard, en el sur, dotadas de un enlace con la autopista de Normandía (A 13) e Yvetot, al norte, por donde pasará dentro de algunos años la autopista Rouen-Le Havre A 15, quedan unidas así por una carretera de unos 30 km. De los 35 km que separan esas dos localidades, 15 km son de nueva creación.

El puente de Brotonne ha costado 55 millones de francos, descompuestos en 36 millones para la obra principal, 15 millones para el viaducto de la margen izquierda y 4 millones para el viaducto de la margen derecha.

résumé

Le pont de Brotonne sur la Seine - France

Campenon-Bernard-Cetra

MM. Arsac et Fraleu, architectes conseils

Ce pont vient résoudre le problème du franchissement de la Seine entre Rouen et Le Havre. La nécessité de respecter la tradition maritime de Rouen et le passage de navires de haute mer imposa la réalisation d'un ouvrage dont la partie principale, d'une longueur de 696,5 m est un pont à haubans de 5 travées dont la centrale, de 320 m, constitue le nouveau record du monde de portée en béton précontraint.

Dans cet article sont analysés les caractéristiques et procédés de construction de chacun des éléments qui composent cet ouvrage:

- Les fondations, qui sont des colonnes de fondation pour les piles principales et des barrettes pour les piles des viaducs d'accès.
- Les piles de forme octogonale curviligne, d'un bel effet esthétique.
- Le tablier est une poutre mono-cellulaire constituée de voussoirs à deux âmes, précontraints dans toutes les directions.
- Les mâts dont la section constante en sens transversal de l'ouvrage —2,60 m— est variable de 4,80 à la base à 2,84 m au sommet dans le sens longitudinal.
- Haubans, précontrainte, etc.

summary

The Brotonne Bridge over the Seine France

Campenon-Bernard-Cetra

MM. Arsac & Fraleu, Consulting architects

This bridge solves the connection problem between Rouen and Le Havre. The need to preserve the maritime tradition of Rouen and to permit the heavy shipping traffic through the estuary forced a structural design which main part, 696,5 m long, consists of a 5-span truss-braced bridge. The central span, 320 m long, is the longest pre-stressed concrete span in the world. The structure also includes two access ramps.

This article analyses the features and construction procedures of each element in the structure, namely:

- Foundations, consisting on cylindrical piers for the main spans and piers on piles for the access ramps and viaducts.
- The curved octogonal piles, creating an interesting aesthetical effect
- The deck consisting on a single mono-cellular girder, formed by twincore wedged, pieces, prestressed in all directions.
- The tower with a constant 2,60 dimension crosswise and tapered from 4,80 to 2,84 meters lengthwise.
- Tensors, pre-stressing, etc.

zusammenfassung

Die Brotonne-Brücke ueber die Seine - Frankreich

Campenon-Bernard-Cetra

MM. Arsac u. Fraleu, Beratende Architekten

Diese Brücke löst das Verbindungsproblem zwischen Rouen und Le Havre. Die Notwendigkeit, die seemässige Tradition der Stadt Rouen und die Navigation von Schiffen grosser Tonnage zwangen zur Durchführung einer Struktur, deren Hauptwerk von 696,5 m Länge eine versteifte Brücke ist, die aus fünf Teilen besteht. Der Mittelteil mit einer Länge von 320 m stellt den Rekord an Tragweite bei Brücken aus vorgespanntem Beton dar. Die Struktur umfasst ausserdem zwei Zugangsbrücken.

In diesem Artikel werden die Baumerkmale und -verfahren der einzelnen Elemente des Bauwerkes untersucht:

- Die Fundamente bestehen aus zylinderförmigen Säulen für die Hauptpfeiler auf Pfählen an den Pfeilern der Zugangsbrücken.
- Die achtseitigen, kurvenförmigen Pfeiler erzielen eine gute ästhetische Wirkung.
- Die Tafel besteht aus einem einzelligen Balken, der von Wölbsteinen von je zwei Stegen gebildet wird, die in allen Richtungen vorgespannt, sind.
- Die Türme, deren Querschnitt in Querrichtung gleichbleibend ist (2,60 m), während er in Längsrichtung zwischen 4,80 und 2,84 schwankt.
- Verstrebungen, Vorspannung, usw.