

# puente de **t**ancarville

NICOLAS ESQUILLAN, ingeniero

El cruce del río Sena en su curso inferior, entre el Havre y Rouen (Francia), era una necesidad que se hacía sentir para asegurar un paso permanente entre las dos márgenes, dado el intenso y creciente tráfico entre uno y otro lado del río y la carencia de paso en este trozo. Para este cruce se eligió un lugar próximo a Tancarville—de donde recibe el nombre el puente—, ya que el río es más estrecho en este paraje y, además, presenta la particularidad de tener un buen banco rocoso para apoyar una extremidad del puente.

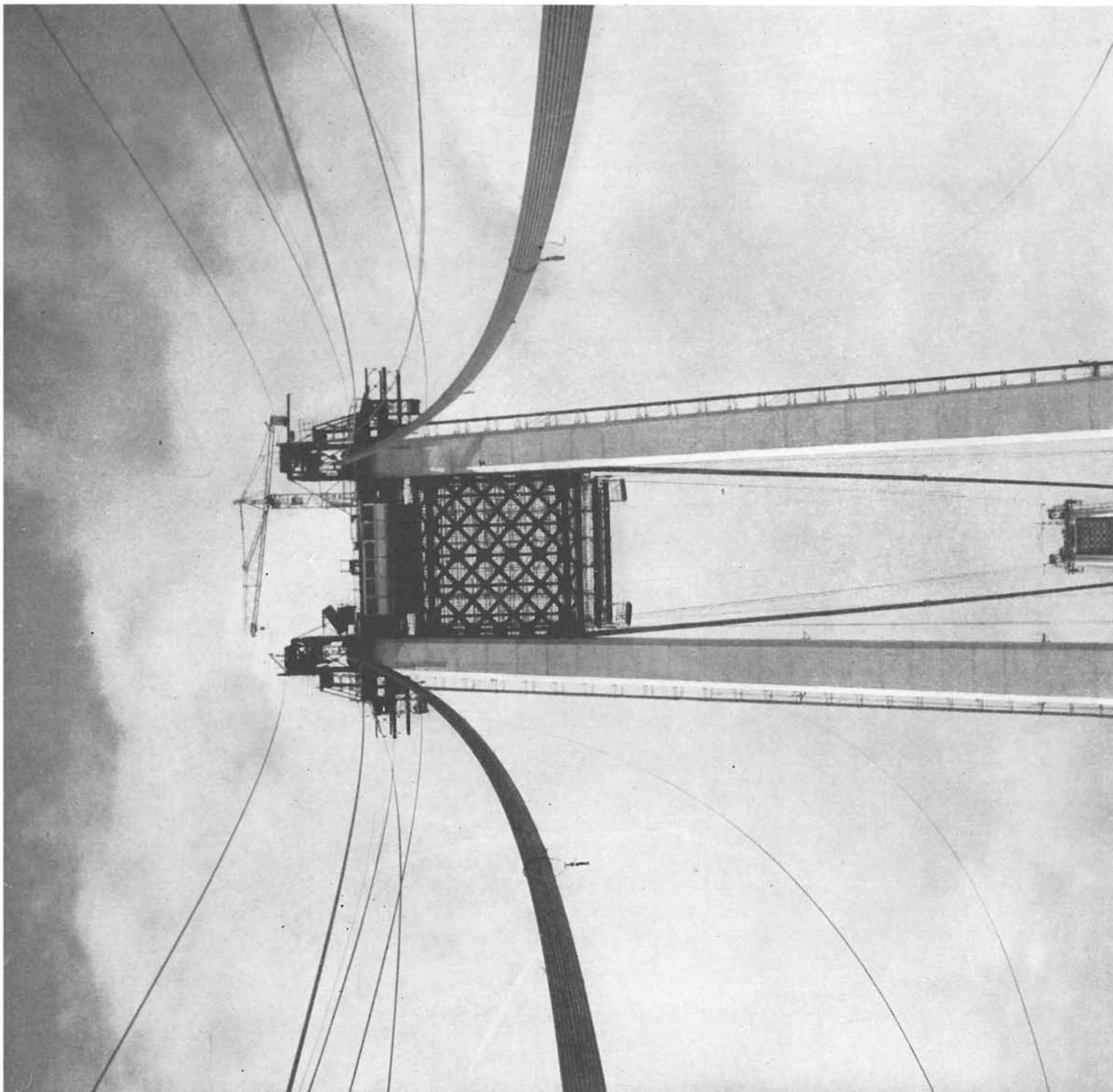
La navegación fluvial ha exigido un tramo central, libre, de 600 m de luz, y una altura de unos 47 m entre el nivel de agua y el puente: todo lo cual ha conducido a la solución de un puente suspendido.

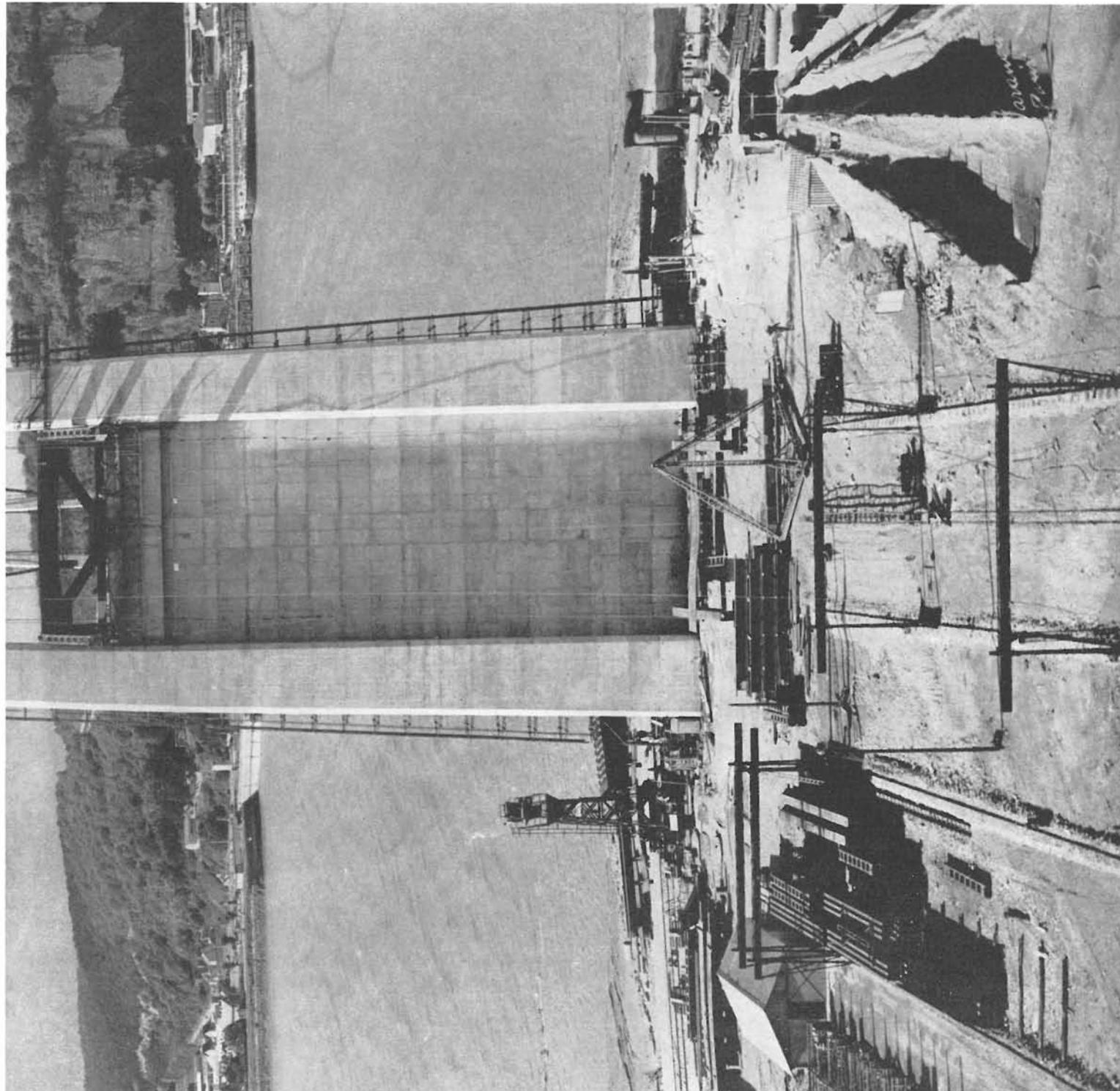


## construcción

En la margen izquierda del río se ha construido un acceso en rampa de ocho tramos independientes de 50 m de luz cada uno. Estos tramos se han salvado con cinco vigas de hormigón pretensado, prefabricadas a pie de obra y de 120 toneladas de peso cada una. La pendiente dada a la rampa es de 6,5 %, alcanzando una cota relativa de 45 m en la parte superior del macizo de anclaje de cables.

Este macizo de anclaje de  $46 \times 47 \times 20$  m presenta como característica el haberse construido formando dos muros de contrafuertes, de gran espesor, de hormigón pretensado y vaciado. El macizo se apoya sobre tres cajones de hormigón armado—dos longitudinales en la parte anterior y uno transversal en la posterior—convenientemente dispuestos para formar articulación.





nen una disposición original para resistir a los efectos del viento. Los cables que soportan el tablero se han fijado, en el tramo central, a las vigas de rigidez en el centro del tramo. Las vigas de rigidez, continuas, se han amarrado sobre el macizo de anclaje, de la margen izquierda, por el intermedio de una articulación. Todo el entramado que constituye el tablero forma una celosía de considerable inercia para resistir a los esfuerzos de torsión y viento.

El tablero metálico, de casi 1 km de longitud, se apoya en dos vigas trianguladas, tipo Warren, de 6 m de altura, espaciadas a 16 m y unidas, en su parte superior, con una chapa de 10 mm de espesor, sobre la que se ha hormigonado una losa de 9,5 cm, solidarizada con la chapa por medio de 560.000 espigones soldados.

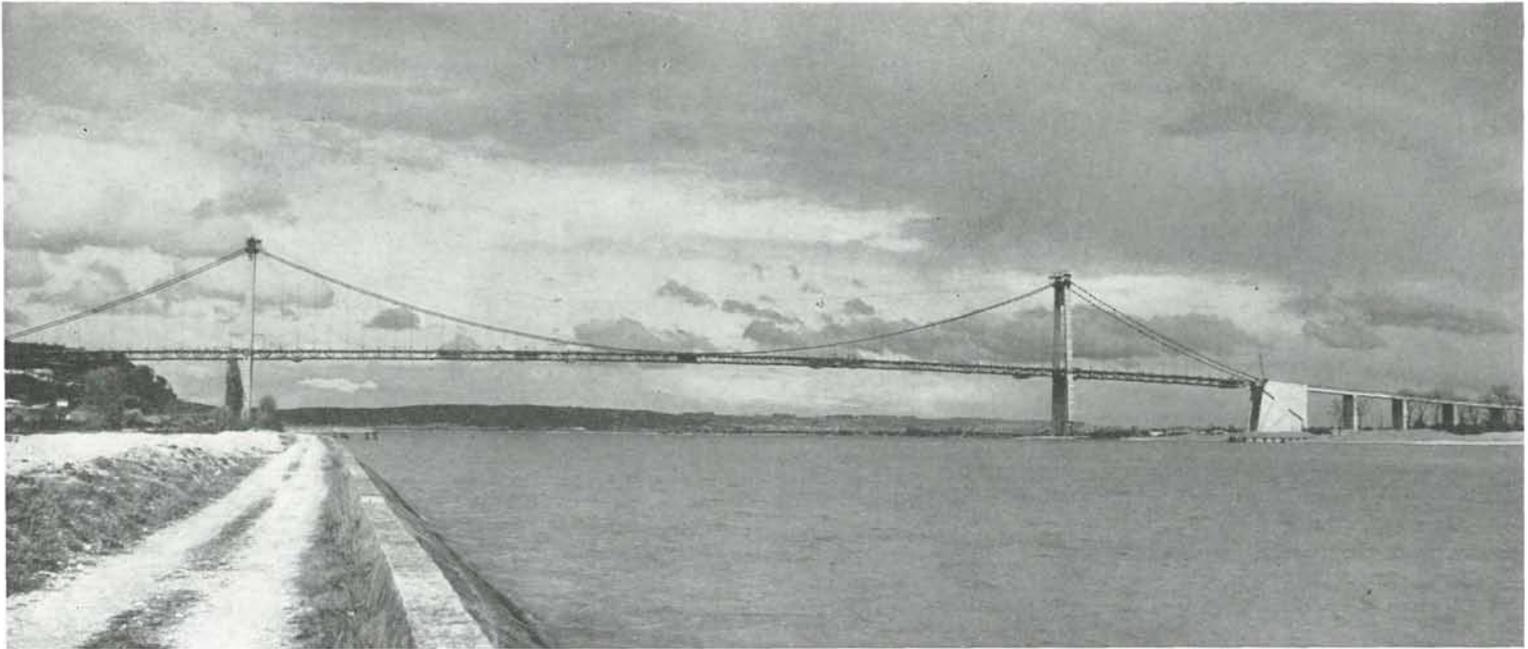
Los dos cables de suspensión, formando cada uno un paquete hexagonal de 56 cm de altura, tienen 56 cables elementales de 72 mm de diámetro y de 1.067 m de longitud. En los dos tramos laterales, cuatro cables unen la parte superior de las torres con los anclajes.

Las torres, con una altura de 122 m, constituyen una novedad, ya que se han construido de hormigón armado.

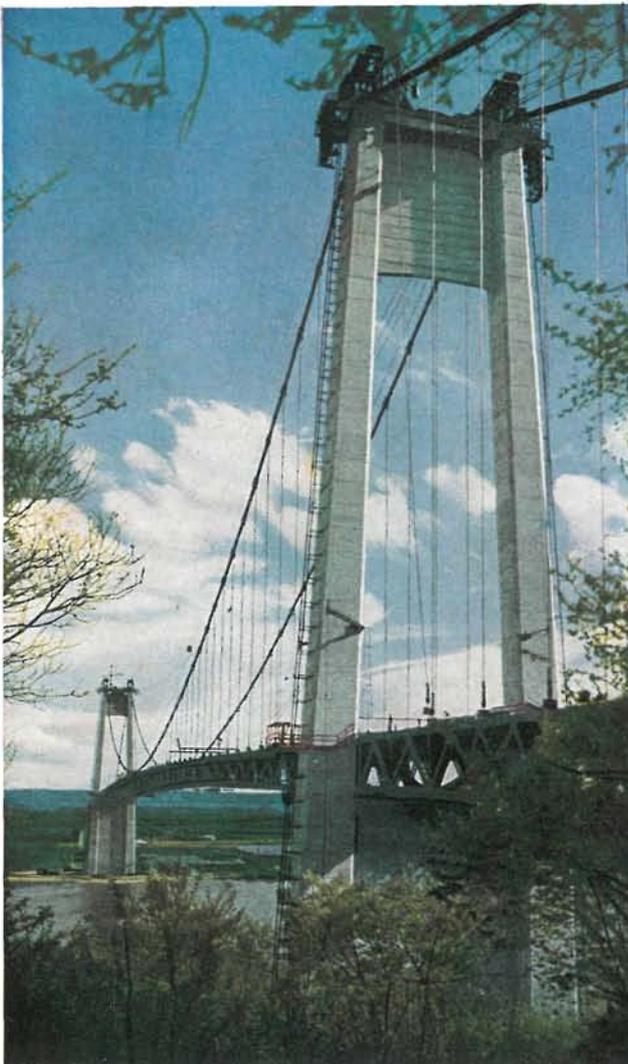
En la margen derecha se ha utilizado el banco rocoso para el anclaje de cables. Este anclaje está constituido por dos macizos de hormigón, sobre los que se apoyan las sillas de inflexión para esparcir los cables y dos cámaras visitables.

Cada uno de los cables elementales termina en un mango que, a su vez, se une a tres barras fileteadas, de 68 milímetros y 6 m de longitud, que se han anclado en el hormigón. El conjunto de estos cables engendra una tracción de 16.000 toneladas.

Torre del puente aún en construcción.



Aspecto general del puente.



En este anclaje también se han construido dos tirantes de hormigón pretensado, en cuyo interior se ha dejado una galería central con objeto de poderlos visitar. El pretensado de los dos tirantes se ha realizado con alambre de 7 mm de acero de 140 kg/mm<sup>2</sup>. Los tirantes se unen a un cabezal de hormigón armado que tiene 32 m de longitud.

Todo el anclaje se halla en un banco calizo fisurado que ha sido necesario inyectarlo para su consolidación.

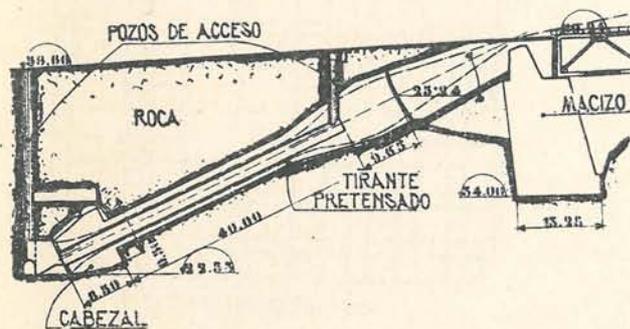
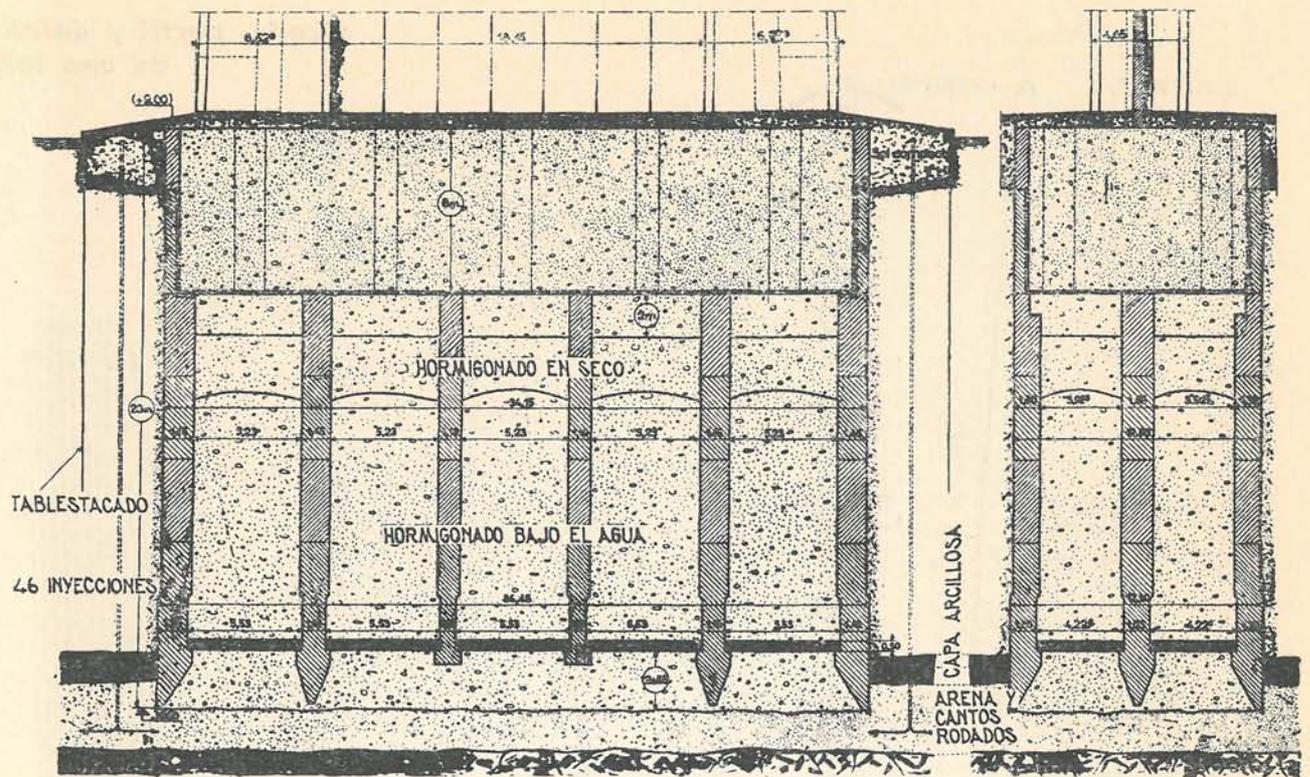
#### **Características de las torres y sus cimientos**

Las torres tienen forma sencilla y carecen de adiciones decorativas. Los estudios arquitectónicos se han limitado a las dimensiones y taludes de los paramentos. Estas torres sirven de apoyo a las vigas continuas para contrarrestar los efectos del viento lateral. Las torres tienen una altura total de: 123,40 metros en la torre de la margen derecha y de 121,90 metros en la de la izquierda.

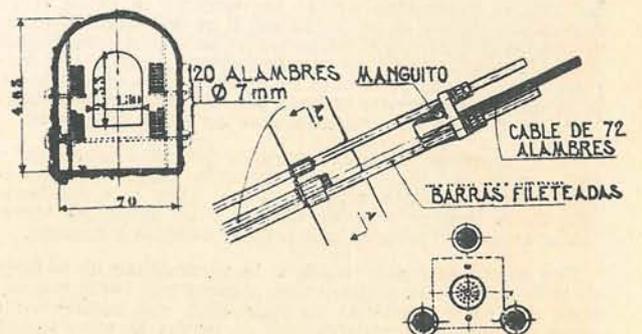
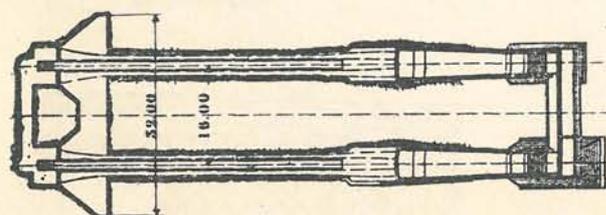
Cada torre se compone de dos montantes de sección rectangular, de cuyos cuatro paramentos sólo uno es vertical y con 4,65 m de anchura constante. En el interior de cada montante se ha dejado una galería de sección cuadrada, de 1,20 m de lado, que se utiliza para las visitas de inspección.

Entre los montantes se ha levantado un diafragma, de 0,60 m de espesor, que llega hasta la parte inferior de una travesa sobre la que se apoya el tablero. En la parte superior, y a 3,50 m por debajo de las extremidades de los montantes, se ha construido una pantalla de arriostramiento, de 15 m de altura y 80 cm de espesor, que completa las disposiciones necesarias para la estabilidad.

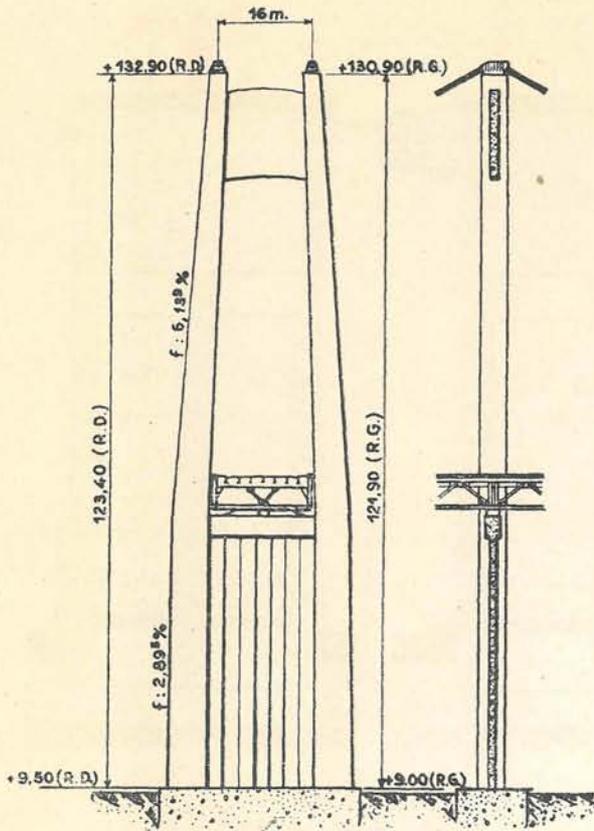
Los montantes se han empotrado en una losa fuertemente armada, de 8 m de espesor, que constituye la parte superior de cimientos. Debido a la retracción considerable del hormigón, motivada por la acción combinada de las cargas, fluencia y del propio hormigón, las barras longitudinales, de 50 milímetros de diámetro, son de acero duro, de 65 a 75 kg/mm<sup>2</sup>, de carga de ruptura y de unos 38 kg/mm<sup>2</sup> de límite elástico, lo que ha exigido la necesidad de disponer estas barras a tope.



**hundimiento del cajón  
biela de anclaje de pretensado  
galería registro**



## alzado, perfil y detalles de una torre



Después de varios ensayos se llegó a disponer las uniones de estas barras por medio de manguitos, que se inyectaban con lechada de cemento para rellenar las desigualdades de las superficies y solidarizarlas lateralmente.

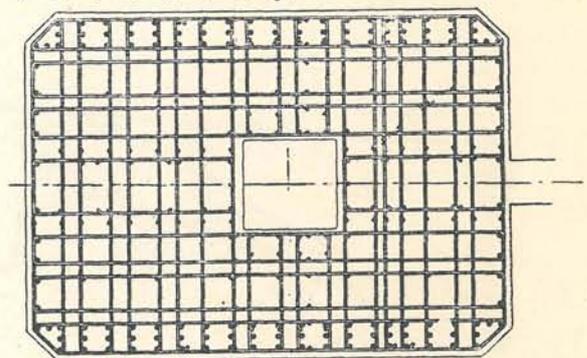
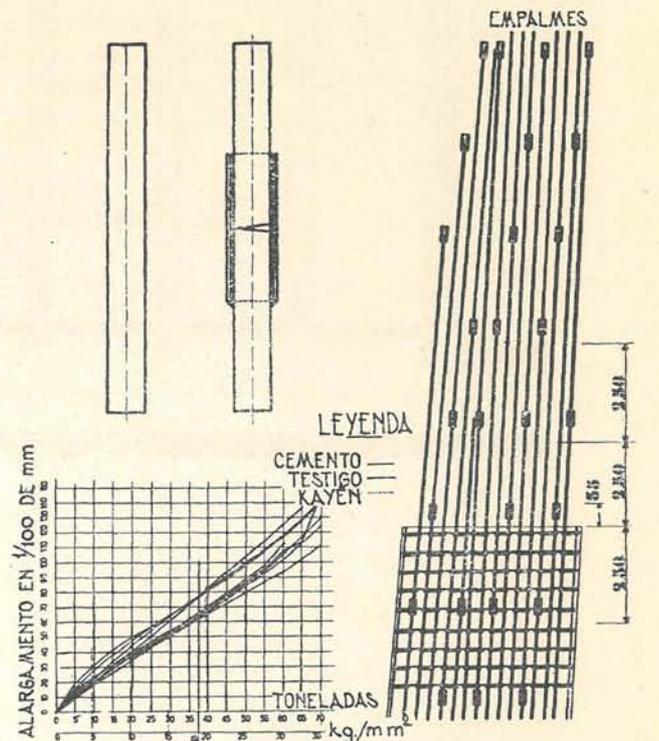
El cimiento de la margen derecha está constituido por dos cajones cuadrados, de 12 m de lado y 19 m de altura, que descansan sobre el banco calizo. Uno de estos cajones se ha hincado con aire comprimido.

La importancia de las cargas y de los momentos flectores ha motivado se haya hecho un estudio fotoelástico de la parte comprendida entre la base de los montantes y el suelo de apoyo de cimientos. Como consecuencia de estos estudios se han reforzado las armaduras previstas.

El cimiento de la margen izquierda está constituido por un solo bloque, de  $34,45 \times 12,30$  m en planta y 28 m de altura. Antes de empezar se procedió a la hincada de un tablestacado formando una circunferencia de 42 m de diámetro, y descendiendo hasta 17 m de profundidad. La triple función de este tablestacado obedece a los siguientes aspectos: primero, protección del terreno del pie de la torre; segundo, aumentar la estabilidad del cajón de cimientos y, finalmente, evitar que durante la hincada sufra desviación alguna el cajón. El cajón se descendió normalmente los 23 primeros metros y mediante aire comprimido los 5 últimos. La capa de cantos rodados y arena que forman el apoyo de cimientos se inyectó para consolidarla. Si el puente en servicio trabaja con las sobrecargas calculadas, la presión en cimientos será de 50.000 toneladas.

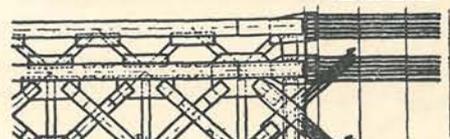
Para recuperar el tiempo perdido por diversas causas y poder mantener el período de ejecución previsto, se procedió, simultáneamente, a la hincada del cajón, a la construcción de la losa de 8 m de espesor y de la propia torre. Todas estas operaciones han exigido audacia y método.

Con objeto de poder rectificar la verticalidad de la torre en todo sentido, se preparó una cámara con gatos hidráulicos, de 14.600 toneladas de capacidad, que podían utilizarse si durante la construcción se perdía la verticalidad. Esta cámara se halla debajo de la losa de 8 m de espesor.

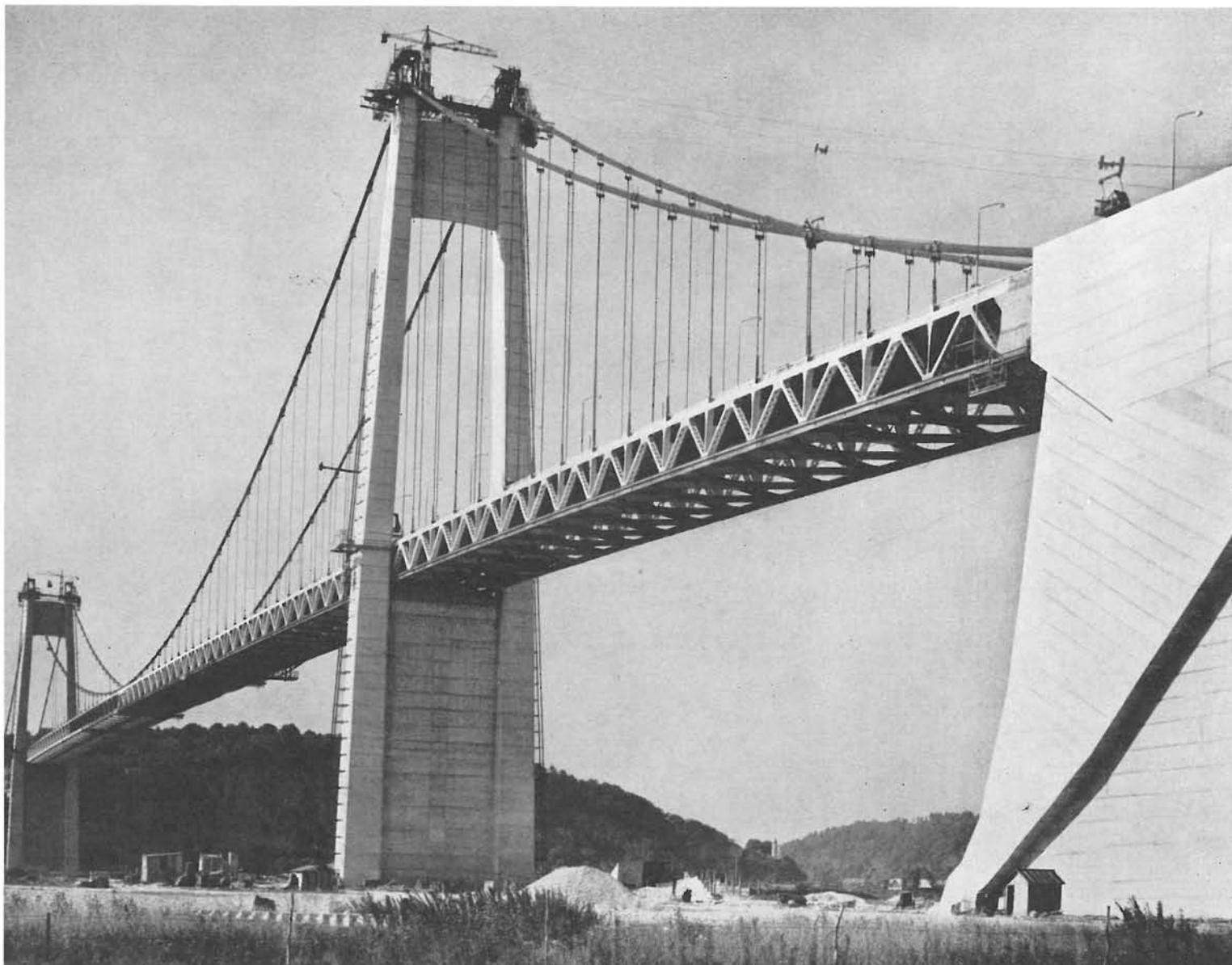


ARMADURAS DEL MONTANTE

DIAFRAGMA SUPERIOR







Montaje de péndolas.

### Base de cálculo para las torres

Las cargas admitidas para el hormigón son de  $125 \text{ kg/cm}^2$ , con un límite de rotura de  $450 \text{ kg/cm}^2$  en cubos de  $20 \text{ cm}$  de arista a los 90 días. Se han adoptado como coeficientes de deformación del hormigón los valores variables comprendidos en  $1 \times 10^6$  y  $4 \times 10^6$  toneladas/metro cuadrado.

Las cargas admitidas para los aceros fueron de  $13 \text{ kg/mm}^2$  para el tipo Ac 42,  $18 \text{ kg/mm}^2$  para el 65/75 y de  $21 \text{ kg/mm}^2$  para el acero 40/50 de adherencia mejorada. Según las combinaciones de cargas y sobrecargas, así como de la probabilidad de que se produzcan, se han introducido aumentos de hasta el 30 % en la fase elástica y del 90 % a la ruptura.

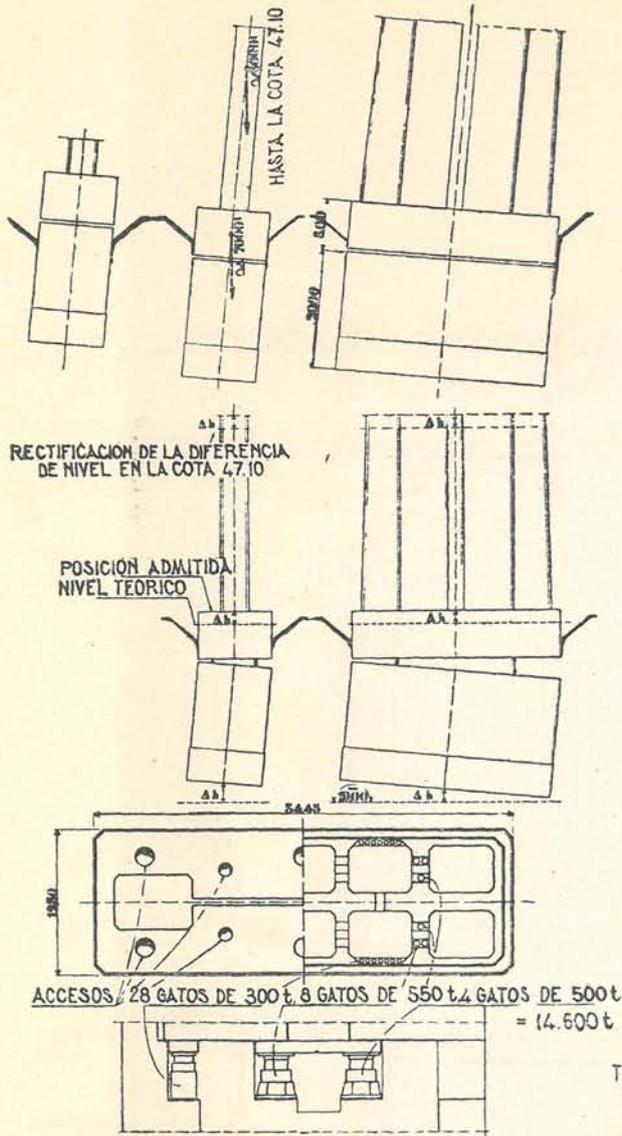
En servicio, la torre puede soportar en su extremidad superior una carga de 14.500 toneladas con un desplazamiento horizontal de  $41 \text{ cm}$ . Bajo este efecto aparecen momentos flectores suplementarios que han sido calculados por aproximaciones sucesivas. A estas cargas se suman las producidas por la inclinación lateral de los montantes de la torre que forman pórtico. La seguridad al pandeo bajo las cargas permanentes es superior a 3, con un coeficiente de  $1 \times 10^6$  para la deformación del hormigón.

Las torres se han comprobado teniendo en cuenta: el efecto de un viento transversal de  $250 \text{ kg/m}^2$ ; una diferencia de temperatura entre los paramentos; para una torsión asimétrica manteniendo cargada solamente la mitad longitudinal del puente; errores de construcción, tales como fibra media no rectilínea; presentando una curvatura igual a 200 veces la altura de la torre; para la posición incorrecta de la silla de apoyo de los cables con una diferencia de  $10 \text{ cm}$  y, para terminar, de la falta de verticalidad de la fibra media con una inclinación de medio milímetro por metro.

También ha sido objeto de verificación la estabilidad de la torre durante la ejecución. Estas verificaciones han exigido ciertas disposiciones en la ejecución:

1) Para paliar los efectos de la retracción y evitar la fisuración que pudiera producirse en el diafragma inferior, grietas que se presentarían por la rigidez de los montantes, se ha tenido que seccionar el diafragma en toda su altura.

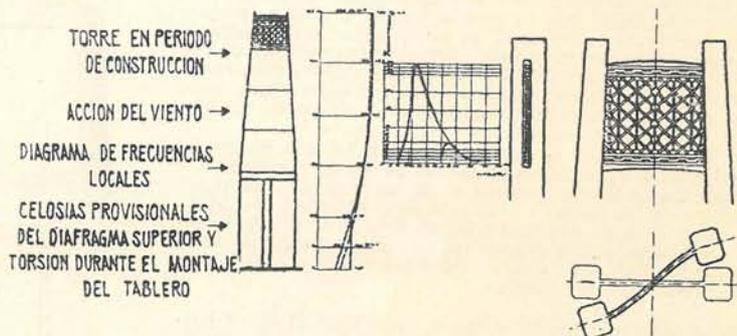
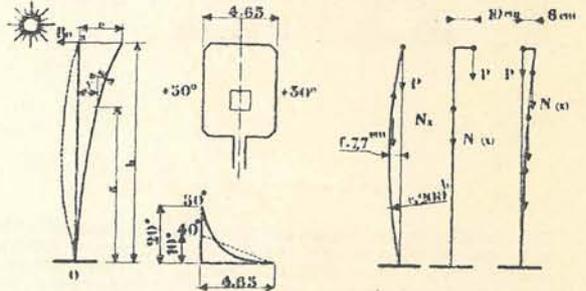
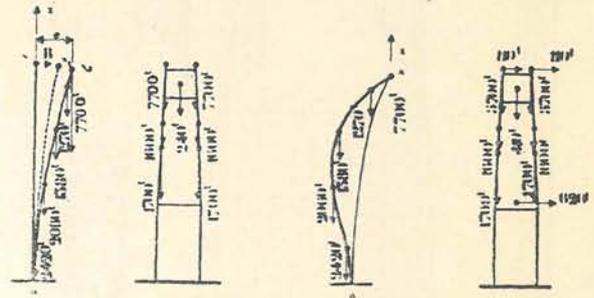
**dispositivo para conservar la verticalidad de las torres**



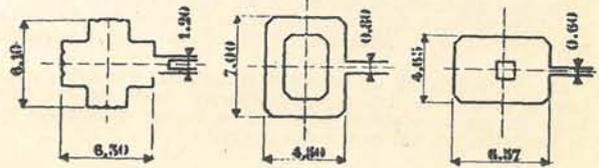
El cierre de esta parte se ha efectuado después de colocar los cables y aprovechando el período de bajas temperaturas. En la parte superior no se ha podido seccionar el diafragma sin peligro de la estabilidad, por lo que la retracción crea tensiones que se han tenido en cuenta.

2) Los montantes, inclinados en la parte superior al tablero, flectan por su propio peso. Esto ha obligado a colocar piezas metálicas transversales, provisionales, provistas de gatos, que han permitido mantener en su posición correcta los montantes y eliminar así los momentos de flexión.

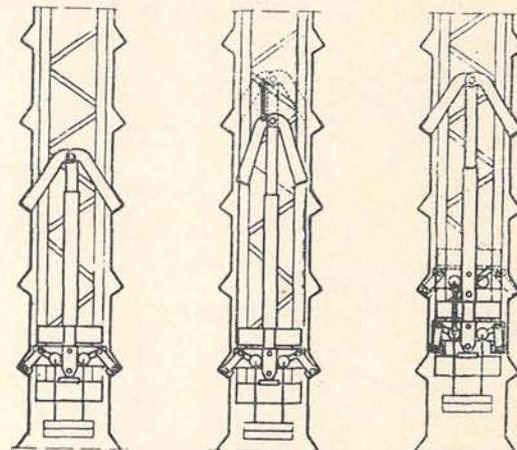
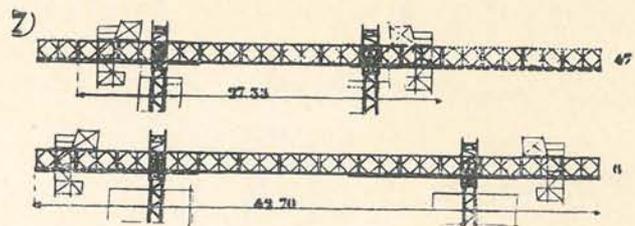
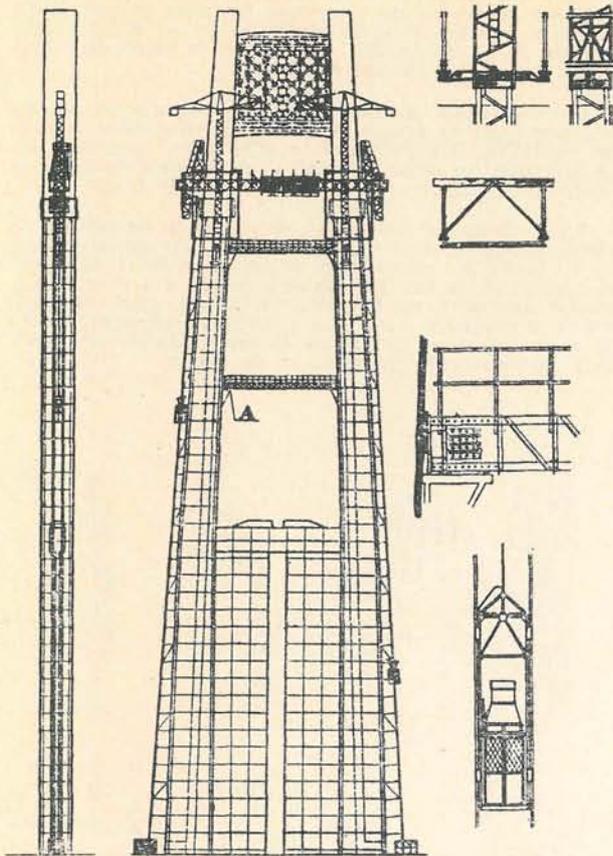
3) Antes de colocar los cables, el viento de dirección longitudinal producía efectos peligrosos por su acción directa y por los momentos secundarios al flectar la torre. El período de oscilación de la torre aislada era de 4 a 6 segundos, y como el diafragma superior con un período medio de oscilación de 5 segundos daba una velocidad crítica del viento de 20 m/s, se trataba, por tanto, de un viento laminar peligroso y relativamente frecuente en la región.



**pandeo y deformación de las torres**



**dispositivo y detalles de construcción de las torres**



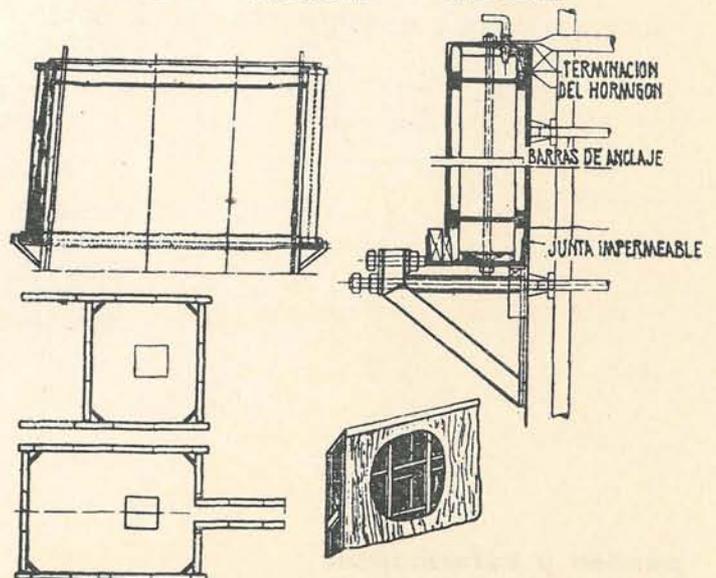
Este peligro se ha eliminado modificando esta velocidad crítica del viento, por medio de un diafragma superior formando celosía para reducir el efecto del viento durante el período de ejecución. Esta celosía se hormigonó después, durante la construcción del tablero.

4) Durante el comienzo de montaje del tablero, el viento transversal de 250 kg/m<sup>2</sup>, actuando sobre los montantes y sobre los cables, por su propia acción y el peso propio de la torre y la inclinación de los montantes engendraba esfuerzos importantes, ya que el diafragma inferior de rigidez no se había cerrado aún. Un ensayo de ruptura efectuado con un esfuerzo doble del viento ha permitido asegurar que el margen de seguridad era todavía apreciable.

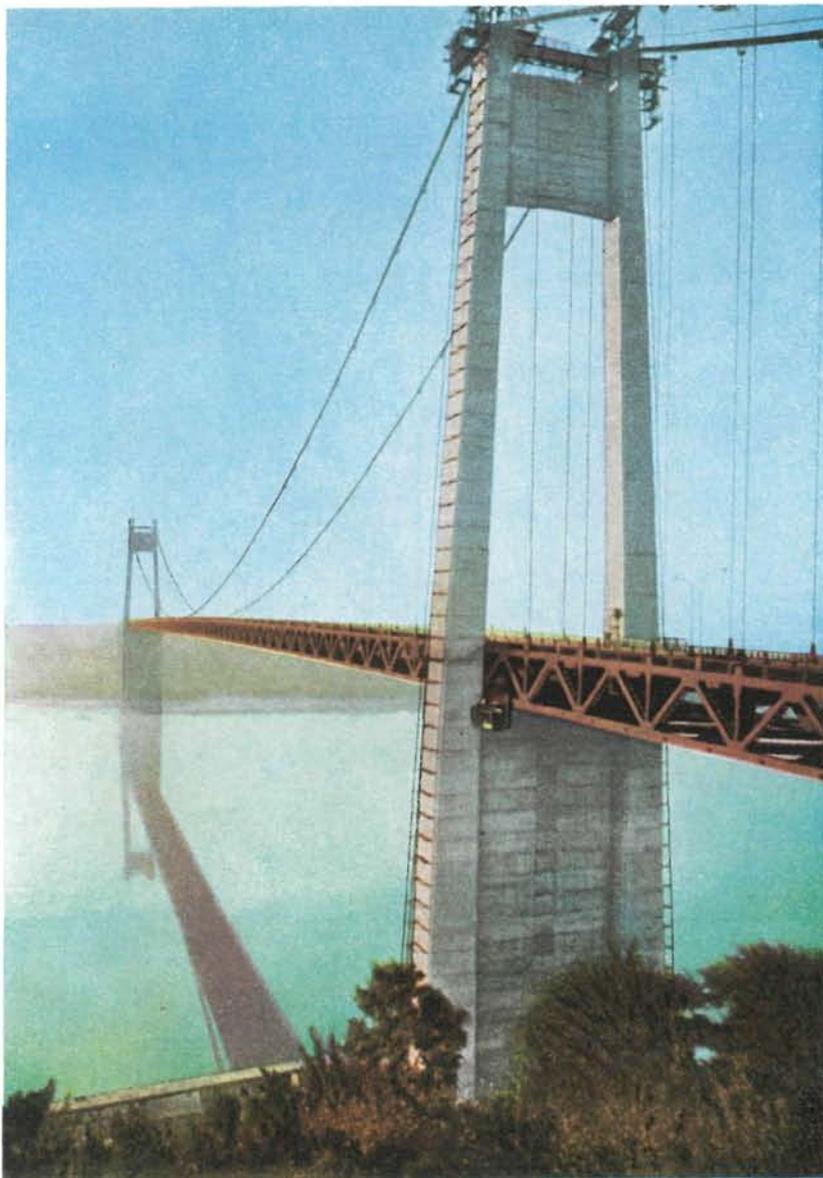
5) La colocación de los cables y del tablero producen un esfuerzo horizontal en la cabeza de las torres de 40 toneladas y una torsión posible de 13 cm. Además, las sillas de apoyo de los cables tenían una excentricidad de 0,57 m con respecto a su posición final al principio. El efecto de estas deformaciones y reacciones se hacían tanto más sensibles a medida que la torre iba soportando cargas verticales relativamente débiles.

Todos estos movimientos en la cabeza de la torre han conducido a buscar la máxima flexibilidad en los montantes compatible con la estabilidad. Toda rigidez excesiva introduce un efecto inadmisibles, de donde aparece el interés de recurrir a tensiones elevadas y secciones que, para un momento de inercia determinado, dan altura mínima.

En el proyecto de las torres se estudiaron varias soluciones, eligiendo la actual, que presenta una sección casi llena de los montantes, dándoles la mayor dimensión en la dirección normal al eje del puente.







Fotos: H. BARANGER

Durante todos estos estudios no se olvidó la preparación de los métodos de construcción que debían emplearse en la construcción, en la que se ponía en juego la estabilidad particular de las torres.

### **Construcción**

La idea conservada consistió en la rapidez, repetición posible de operaciones y seguridad para el personal.

Los taludes verticales facilitan las comprobaciones de verticalidad y la preparación de encofrados, por lo que en los montantes dos de sus caras están en planos verticales.

Tratándose de estas alturas y reducido espacio, no se podía contar con escaleras para el personal y grúas para el material, pues se perdería mucho tiempo y se incurriría en operaciones peligrosas.

Para el personal y materiales se instalaron dos montacargas de 1.500 kg de capacidad cada uno, y dotados de una velocidad de 1 m por segundo.

La distribución de materiales en la parte superior—plano de trabajo—, se verificó con dos grúas de 1.500 kg de capacidad y cuya suma de radios de acción es inferior a la distancia entre ejes, evitando así, aun en caso de descuido del operador, la colisión.

Una pasarela tipo puente Bailey servía para el paso del personal de uno a otro montante. Para evitar el subir y bajar, se instaló un vestuario y almacén en el plano de trabajo. Esta pasarela se apoyaba y transmitía los esfuerzos del viento de un montante al otro sobre unos pies derechos preparados en el interior de las galerías de visita de los montantes. Después de terminado el tramo de ejecución previsto, se levantaba la pasarela y plataforma con grúas y encofrados al nuevo nivel mediante gatos de gran carrera apoyados en los pies derechos del interior de los montantes.

Cada fase constructiva, que tenía 2,50 m de altura, se cubría con encofrados isotérmicos y semi-deslizantes formados por una estructura alveolar y dos hojas de placa de madera que la recubrían para lograr así una gran protección contra la acción del frío.

Toda esta serie de disposiciones han permitido a la conocida empresa Société des Entreprises Boussiron, no sólo mantener la cadencia de 2,50 m cada cuatro días, sino llegar a doblar esta velocidad de ejecución, lo que justifica el mérito y prestigio del constructor.