

EL PUENTE DE LUZANCY

Por EDUARDO TORROJA MIRET, Ingeniero de Caminos.

El autor presenta una interesantísima información sobre este puente, que constituye una verdadera lección sobre lo que puede obtenerse de las técnicas del pretensado y la prefabricación en las obras de hormigón armado.

De entre las obras que la destacada personalidad de Freyssinet ha lanzado, como piedras miliarenses en el camino evolutivo de la técnica del hormigón armado, ninguna de ellas presenta la novedad y valentía del nuevo puente de Luzancy.

Mucho se ha discutido sobre la conveniencia y oportunidad de construir tal género de obras, y el mismo Freyssinet indicó, después de terminar ésta, que no era precisamente la solución más económica para el caso; pero, indudablemente, el aprendizaje que su construcción representa, no sólo para los que intervinieron en la obra sino para los Ingenieros todos, compensa, de sobra, el esfuerzo realizado, más que nada por la confianza que puede proporcionar en el futuro desarrollo de las técnicas del pretensado y de la prefabricación, y por las enseñanzas que aporta para el mejor enjuiciamiento de sus ventajas e inconvenientes.

El puente de carretera, con 6 m. de anchura de calzada y andenes de 1 m., había de salvar el río con 55 m. de luz y, debido a las exigencias de la navegación, con una altura posible de viga muy pequeña por debajo de la rasante. La solución clásica hubiera sido una viga o arco superior al tablero, con sus conocidos inconvenientes; sea por ello o por otras causas, la Jefatura del Servicio acordó aceptar la solución propuesta por Freyssinet, consistente en una viga porticada, de gran rebajamiento.

La estructura está constituida por tres vigas-cajón paralelas, con almas muy delgadas — hasta de 10 cm. de espesor en algunos puntos — y con unas cabezas cuyo espesor varía, de una sección a otra, según el esfuerzo que ha de soportar en cada una de ellas. La altura de esta viga, o canto total, es solamente de 1,22 m., en el centro, y de 1,82, en los arranques, donde empiezan los cartabones.

La enorme esbeltez de esta viga se resuelve, en parte, gracias a esta estructura acartabonada de los extremos, que permiten lanzar un empuje oblicuo

sobre los estribos, a unos 3,3 m. por debajo de la rasante.

Todas las vigas están constituidas por elementos prefabricados y con armaduras pretesas; entre cada dos vigas-cajón se completa el tablero con unas losas independientes, apoyadas sobre las vigas, y, del mismo modo están formadas las aceras, también, por trozos independientes, en los cuales empotran las barandillas.

Absolutamente todos los elementos, tanto las vigas-cajón como los forjados intermedios, losas de acera y barandillas, fueron prefabricados en trozos cortos y ensamblados después, en obra, por procedimientos especiales. La complicación principal se presenta en las vigas, que estaban formadas por trozos de unos 2 m.³ cada una de ellas, hormigonadas en taller sobre moldes desmontables muy rígidos; de este modo se pudo emplear un hormigón muy cuidado, con una relación agua-cemento de poco más de 0,4 y sometido a vibración mediante vibradores Vibrogir, unidireccionales, de 2 800 períodos.

Para asegurar la eficacia de este vibrado, que siempre es mayor donde el hormigón está sometido a alguna presión, los moldes eran cerrados por la cara superior y se prolongaban en forma de chimenea, hasta cuya boca se continuaba el hormigonado, retirándose después esta parte de masa.

El hormigón así obtenido presentó una resistencia, en cubos, superior a los 400 Kg./cm.² a los veintiocho días, valor que se consideró suficiente para hacerle trabajar hasta 130 Kg./cm.², teniendo en cuenta que esta resistencia viene aumentada por efecto de la compresión triple que le impone la armadura pretesada dispuesta, tanto longitudinalmente a la viga como en los planos de las secciones rectas, vertical y horizontalmente.

Las armaduras estaban formadas por alambres de 3 y de 5 mm. de diámetro, con 150 a 170 Kg./mm.² de carga de rotura; 120 a 145 de límite elástico Johnson, y de 7 a 8 por 100 de alargamiento; el trabajo

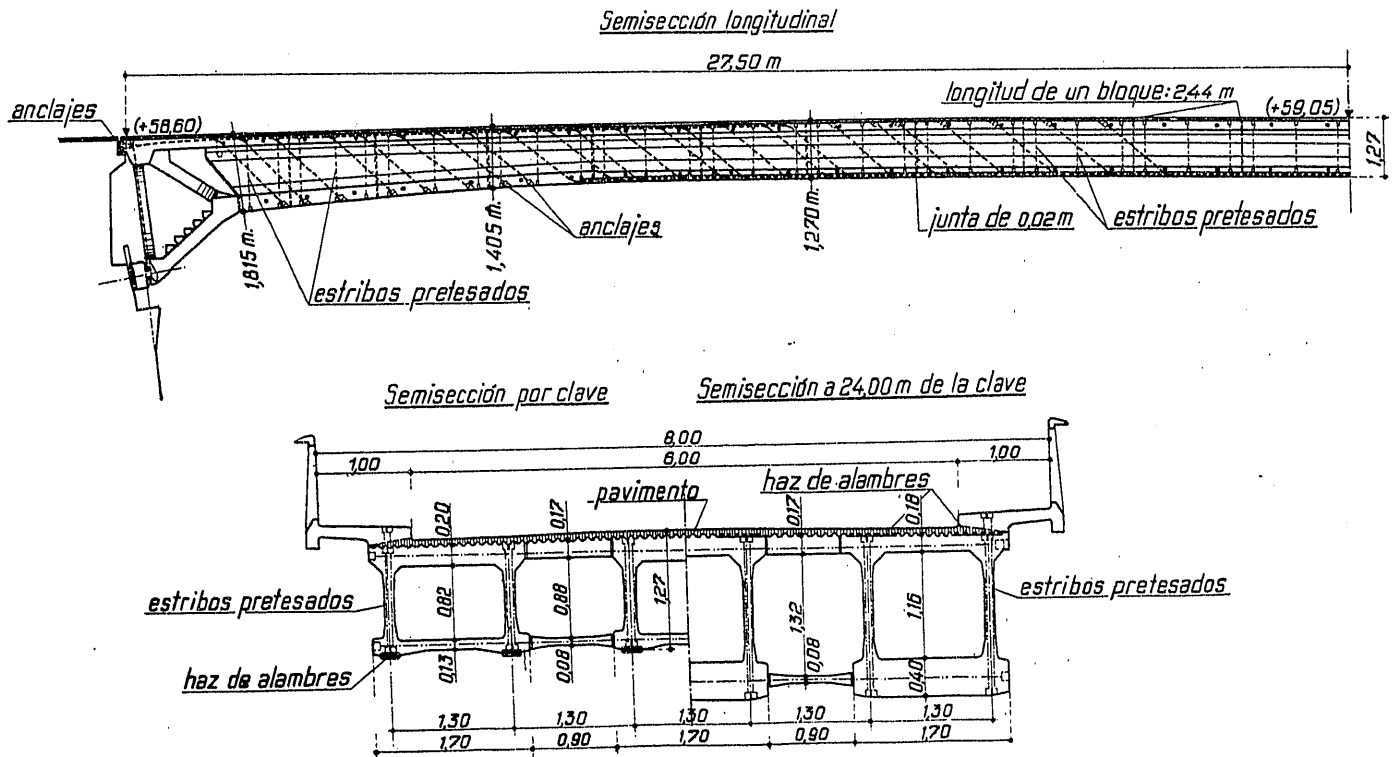


Fig. 1.^a — Semisecciones longitudinal y transversales.

normal de esta armadura se previó a 85 Kg./mm.², si bien para obtenerlo era necesario alcanzar, provisionalmente, los 120 Kg./mm.², dadas las dificultades de tesado que más adelante se indican.

Cada viga-cajón está, pues, constituida por 22 trozos prefabricados. De ellos, se ensamblaron las partes extremas de la viga en dos grupos de 3 bloques, y la parte central, en un solo conjunto de 16 bloques, pesando 90 toneladas. El enlace de los trozos para formar esta viga se hizo a tope, rejuntando las juntas, de 2 cm. de espesor, con mortero de cemento de 800 Kg./m.³, muy seco y fuertemente retacado. Para lograr el monolitismo de este conjunto se establecieron, sobre los tres bloques que constituían cada trozo lateral, un pretensado previo provisional, y sobre los 16 que constituían el trozo central se utilizaron, para este efecto, las mismas armaduras definitivas.

Todas estas armaduras estaban constituidas, como se ha dicho, por alambres de acero especial alojado, bien en cajas o rebajos junto a la superficie, bien en tubos atravesando el hormigón de una cara a otra de la viga; para el tesado de estos alambres se empleó un dispositivo especial (figs. 2.^a y 3.^a), consistente en sujetarlos, uno por uno, al contorno del cilindro exterior, A, de un gato, cuyo émbolo, B, va aligerado para

alojar un segundo émbolo más pequeño, C, encargado de acuñar el cono de aprieto, D, que, por frotamiento, sujeta las armaduras contra la cara exterior del zuncho, E, alojado en una pequeña pieza prefabricada de mortero armado y zunchado, encargada de transmitir y repartir la tracción de los alambres sobre el hormigón en que queda embebida. Como el alargamiento de las armaduras resultaba del orden de los 25 cm. y el recorrido de los gatos era mucho menor, había que repetir la operación de tesado varias veces, para lo cual este dispositivo se presta perfectamente.

Mientras los alambres van rectos en su entubación y el número de ellos no es grande, el sistema funciona perfectamente; pero cuando se trata, como sucedía aquí con las armaduras longitudinales, de tesarlos obligándoles a tomar una curva más o menos pronunciada para pasar de la alineación horizontal, como armadura de tracción, a la alineación como barra levantada, el rozamiento con las paredes del tubo dificulta y disminuye la eficacia de la tracción. Como consecuencia de ello, aun llegando, mediante la presión del gato, a unas tensiones de 120 Kg./mm.², la tensión, en la parte central de algunas de las armaduras, no alcanzaba los 65 Kg. y fué necesario, por consiguiente, repetir la operación, calentando con braseros las partes

de armaduras que quedaban al descubierto por la cara inferior de la viga, para ayudar a su dilatación; ya indica Freyssinet que, si se quiere continuar empleando esta tracción de armadura, será necesario utilizar el calentamiento de la armadura por corriente eléctrica, sistema que, por cierto, fué propuesto y estudiado, hace algunos años, por los señores Aracil y Angulo, quienes pudieron comprobar las dificultades que para ello se presentan y que, en el caso particular de ir las armaduras entubadas, requieren el empleo de aislamiento eléctrico.

Como se trataba de construir la viga sin cimbra alguna, fué necesario proyectar y realizar el lanzamiento de los tres trozos, en que, como se acaba de decir, había quedado armada en taller, y la dificultad principal se presentaba para el trozo central, de 90 toneladas de peso y 39 m. de longitud.

El sistema utilizado (fig. 5.^a) para ello es también original: fundamentalmente, consiste en el establecimiento de dos plumas de 23,50 m. de altura, montadas verticalmente sobre los estribos, a 60 m. de distancia una de otra; las plumas abren de patas en su parte inferior, para permitir el paso de las vigas; quedan sujetas en cabeza por vientos, y llevan los sistemas de poleas y dispositivos necesarios para el establecimiento de dos cables que, pasando cada uno de ellos por la cabeza de la pluma correspondiente, bajan a unirse en un gancho, del que ha de colgar un extremo de la viga; maniobrando oportunamente con los cables, es decir, tirando de uno de ellos y arriando el otro, se logra llevar el gancho, del que cuelga el extremo de la viga, a la posición definitiva.

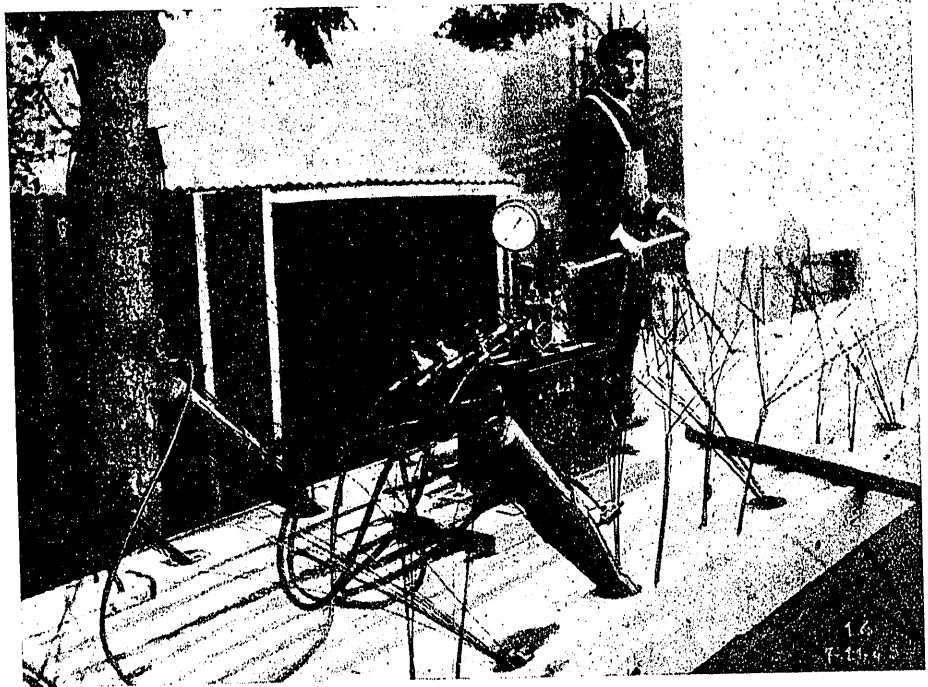


Fig. 3.^a — Gatos de tesado en funcionamiento.

La viga, después de avanzar sobre rodillos por el camino de acceso, hasta llegar su extremo a plomo de una de las plumas, continúa su avance hacia el centro del río, colgada por la punta de este gancho y apoyando, en el extremo posterior, sobre rodillos, hasta que este extremo queda, a su vez, a plomo de la pluma, en cuyo momento un sistema análogo de gancho, colgado de otros dos cables, levanta también esta punta y permite continuar el avance hasta que la viga está en el centro del río.

Hasta aquí el sistema es conocido y todo se reduce, al parecer, a emplear un sistema de cables, pilas,

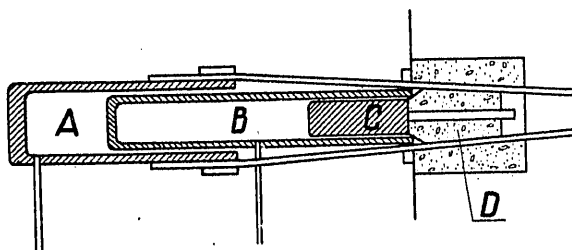
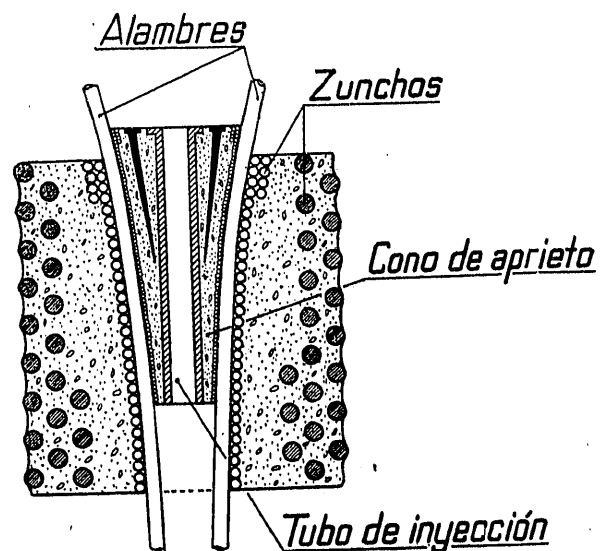


Fig. 2.^a — Gato de tesado y cono de aprieto.



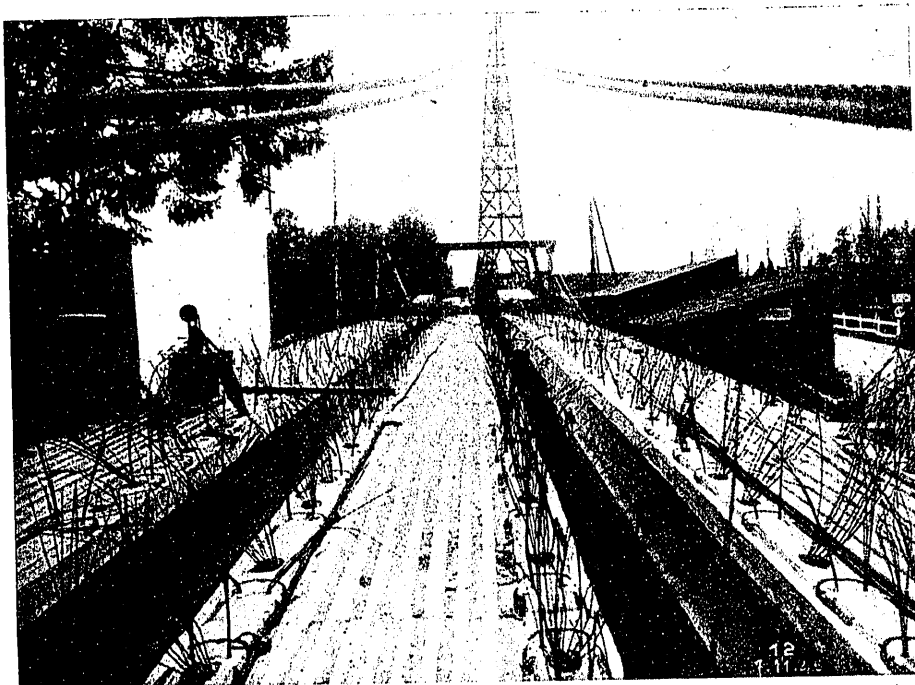


Fig. 4.ª — Armaduras preparadas para su tesado.

trócolas y cabrestantes suficientemente potentes para hacer el traslado de esta carga de 90 toneladas; pero el autor, invadido de sus deseos de perfeccionamiento continuo, no se conformó con ello, sino que ideó el mejorarlo, suprimiendo las dificultades y la energía perdida que representa el tener que actuar sobre la punta de un cable con toda la fuerza necesaria para el avance, mientras el otro aguanta y arría, perdiendo la misma cantidad de energía total; para evitarlo, Freyssinet enrolló los dos cables en un tambor único, pero no cilíndrico, sino de radio variable, en forma de elipsoide de revolución, de tal forma que, en cada momento, los tiros desiguales de los dos cables quedasen equilibrados. Para ello tuvo en cuenta las distintas fuerzas que actúan sobre cada cable, en las distintas posiciones y avances de la viga; calculó los alargamientos elásticos que correspondían a los cables en cada una de estas posiciones, y, por consiguiente, las relaciones de radio necesarias para asegurar el equilibrio en el tambor, y de este modo, la carga pudo avanzar horizontalmente, sin más pérdida de energía que la debida a los rozamientos, la cual se proporcionaba al sistema mediante un pequeño cabrestante enlazado, con juego de trócolas, al cable de avance. Para comprobar la eficacia del sistema, se hizo primeramente una prueba, en modelo reducido, de todo el mecanismo.

Cualquier Ingeniero acostumbrado a trabajos de

taller, pensará en la enorme dificultad que presentaría la ejecución, a torno, de un tambor, en el que las ranuras siguen una hélice de paso constante, pero de radio variable. Freyssinet la resolvió, como tantas otras cosas, utilizando el hormigón armado y haciendo el tambor de hormigón moldeado, en dos partes, que se ensamblaron después, mediante otras armaduras pretesas en forma de zuncho. Según cuentan los partes de obra, con este dispositivo se logró que la viga avanzase horizontalmente, llegando a su posición definitiva con sólo un centímetro de error en la nivelación.

El mismo mecanismo se utilizó para colocar, primeramente, las partes laterales de

las vigas y apoyarlas sobre los cartabones triangulados, que se habían hormigonado anteriormente *in situ*, anclándolas mediante armaduras pretesas a un macizo posterior, previamente preparado, de forma que esta parte lateral de la viga quedaba, en forma de ménsula, dispuesta para recibir y sostener la parte central de la viga, que se trasladó y colocó después utilizando la instalación antedicha.

Después de rejuntar la unión entre la viga central y las ménsulas laterales, se aflojó la armadura que sostenía estas últimas, quedando así el sistema definitivo de viga acartabonada trabajando con sus 55 m. de luz.

Para corregir los movimientos elásticos que habían de sufrir los estribos y para que el reparto de momentos flectores se ajustase mejor a lo previsto, debajo de la rótula de apoyo sobre el estribo se dejó preparado un juego de gatos que permitía apretar las rótulas y llevarlas a su posición definitiva, apoyando sobre las cuñas de hormigón preparadas al efecto, las cuales iban entrando, por su propio peso, a medida que los gatos iban abriendo la junta entre las rótulas y el estribo. Una vez dispuestas así las tres vigas-cajón, se colocaron, entre ellas, las piezas de forjado para cubrir los vanos entre vigas; se rectificó el trazado de las armaduras longitudinales y el de los estribos verticales, también pretesos, y se introdujeron otras armaduras horizontales, cruzando de lado a lado las

cabezas superior e inferior de las vigas, las cuales se tesaron, a su vez, con los mismos procedimientos para que, de este modo, el hormigón quedase comprimido en todos sentidos, inclusive para su trabajo a flexión como forjado entre viga y viga.

La complicación no acaba aquí: los trozos que forman las aceras, también prefabricados, se colocaron y rejuntaron, y después de ello, se sometieron a una presión longitudinal de 50 toneladas, mediante gatos horizontales aplicados en clave, con objeto de que las aceras también ayudasen al trabajo de la cabeza de la viga. Como la calzada se dispuso con ligero bombeo longitudinal, este trabajo tiene también un pequeñísimo efecto de arco.

Todas las cajas y tubos, donde iban alojadas las armaduras, se taponaron con mortero fluido de cemento a una presión de 7 atmósferas, para asegurar su trabajo conjunto con el hormigón e impedir cualquier posibilidad de deslizamiento de los alambres en los conos de anclaje. Una vez hecho esto, se cortaron las puntas sobrantes de estos alambres y se tendió el pavimento, formado por una capa de 5 cm. de espesor, de hormigón vibrado y apisonado sobre la superficie escalonada o rugosa de la estructura. Por último, se colocó la barandilla, formada también por paneles prefabricados; pero éstos ya sin pretesados ni ulteriores complicaciones.

La sobrecarga de prueba consistió en 12 camiones, con un total de 244 toneladas, más la carga de arena correspondiente a 400 Kg./m.² de los andenes; la flecha fué de 24 mm., y el resultado, satisfactorio, tanto en esta prueba como en una dinámica que se hizo con un camión de 20 toneladas saltando sobre un tablón plano. Con la coincidencia de resultados que cabe esperar en este género de obras, se hicieron detalladas y numerosas medidas de deformación, mediante flexímetros de un tipo análogo al tensifil español y elongómetros de 5 m. de longitud, análogos también a los empleados en el Viaducto del Esla. Para completar la impresión sobre esta obra, bastará indicar las cifras siguientes:

Luz: 55 metros.

Canto total en el centro de la luz: 1,22 metros.

Canto total en arranque de cartabones: 1,81 metros.

Altura del tablero sobre las rótulas de apoyo: 3.3.

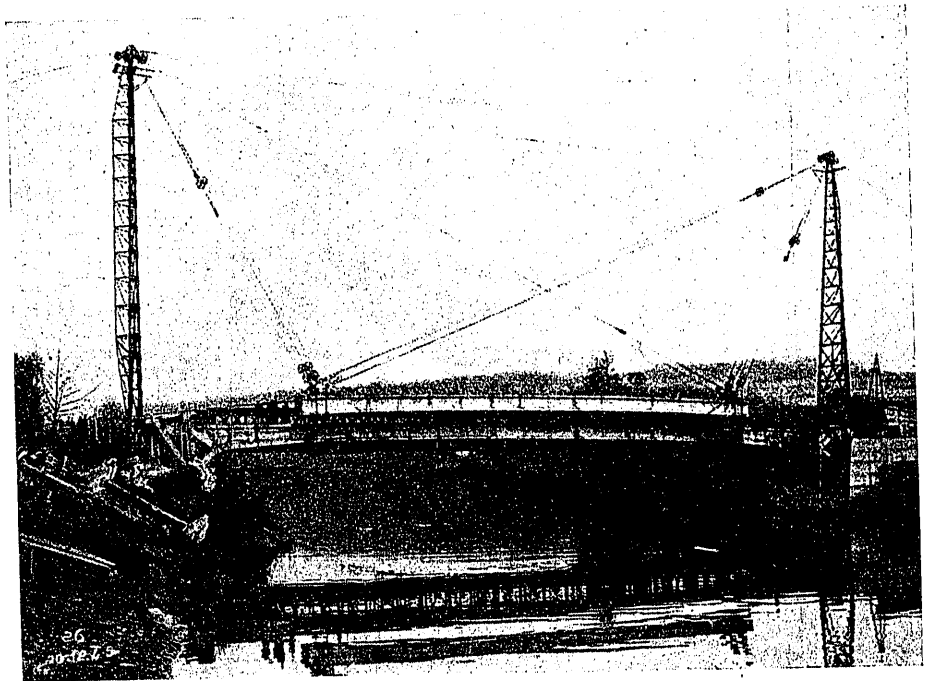


Fig. 5.ª — Dispositivo para transporte de las vigas.

Momento flector en el centro: 493 m./Tn.
 Momento flector en arranque de cartabones: 1 253 metros/tonelada.

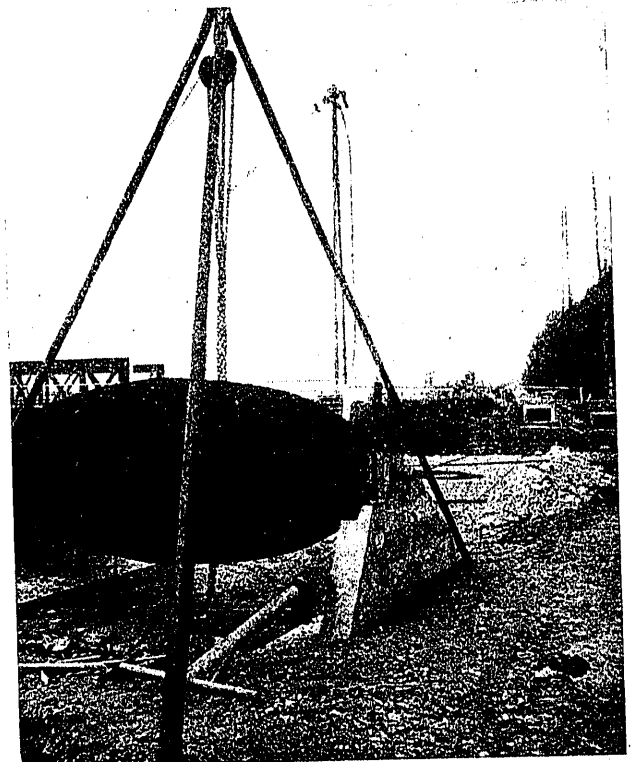


Fig. 6.ª — Tambor para arrollamiento de cables.

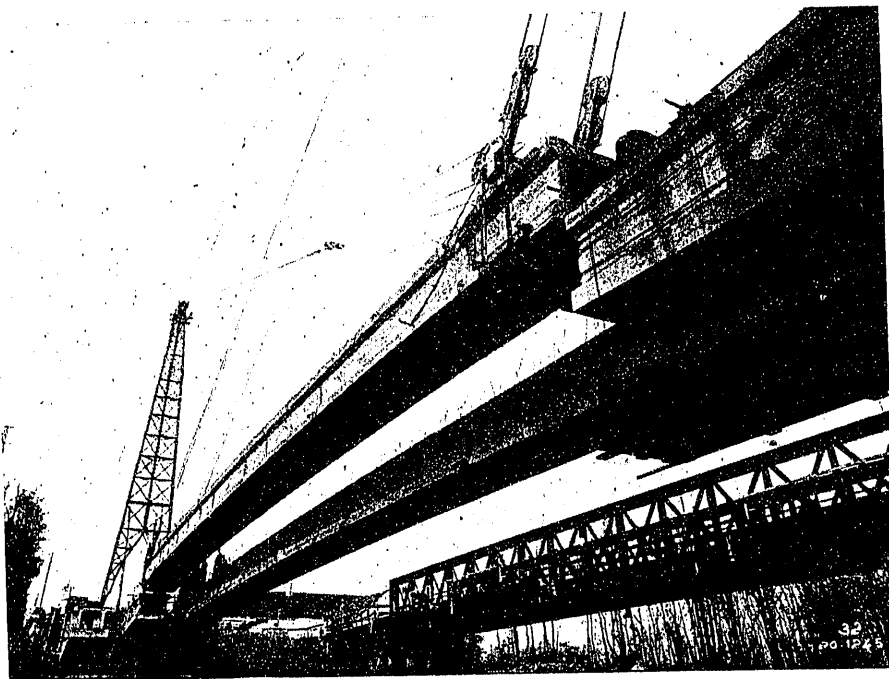


Fig. 7.^a — La viga llegando a su posición definitiva.

Volumen de hormigón: 270 m.³.

Peso de armadura: 14 toneladas.

Para quien esté acostumbrado a trabajos de este tipo, las cifras resultan escalofriantes. En esta obra, Freyssinet no ha prescindido de ningún perfeccionamiento: el vibrado y el pervibrado, el pretensado triple, las vigas prefabricadas por trozos en taller, ensambladas y transportadas por medios auxiliares originalísimos; el montaje de la viga articulada sobre los bordes inferiores de cartabón, para hacerlas trabajar en arco extrarrebajado; todo esto se utiliza al máximo, para el desarrollo y afinamiento de la obra. Hasta las mismas aceras se hacen trabajar como cabezas precomprimidas de la viga, y llega uno a extrañarse de que se haya dejado a las barandillas cumplir su misión protectora solamente, sin incorporarlas al trabajo estructural del conjunto.

Todo ha funcionado, hasta la fecha, como se había previsto, y ello hace esperar, de la obra, un éxito definitivo. El peso de acero, especialmente,

tuviesen conocimiento de ella, dadas las dificultades compañeros, pensando que muchos de ellos quizá no tuviesen conocimiento de ella, dadas las dificultades de información extranjera (*).

(*) En la Revista *Travaux*, núm. 142, viene una referencia algo más extensa del conjunto de la obra.

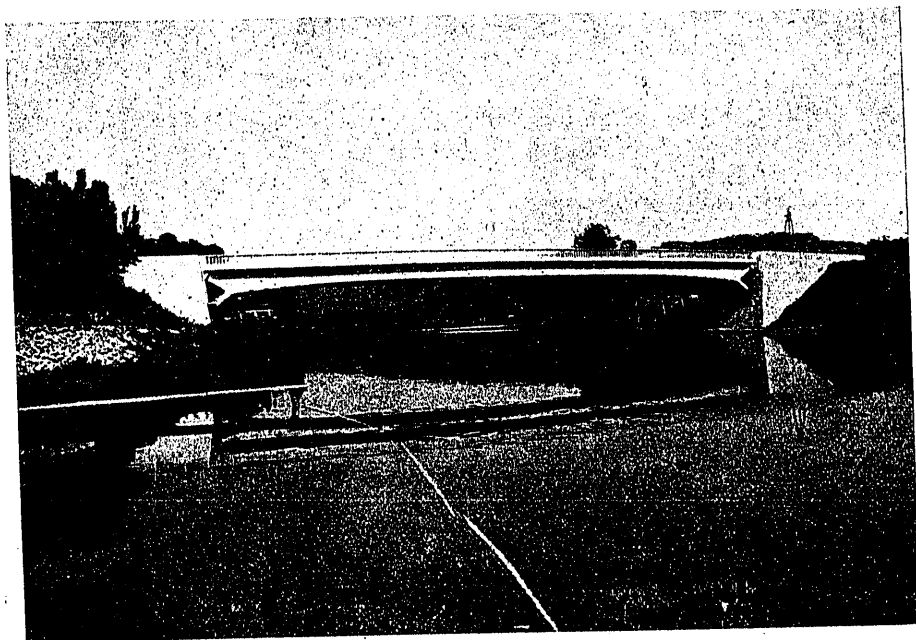


Fig. 8.^a — Puente terminado.