**ponte
sobre el lago Maracaibo
construcción**

Segunda parte del trabajo iniciado en el número anterior (144) de informes de la construcción.

Descripción de la obra y principios de estabilidad.

El puente, de 8.678 m de longitud total y 135 tramos, cuenta, además, con un dique o pedraplén de acceso que se extiende en una longitud de 406 m. La sección transversal del puente se subdivide en cuatro bandas de circulación, de 3,60 m de anchura cada una; un macizo central, de 1,20 metros, para separar las dos direcciones de circulación, y dos andenes laterales, de 0,90 m de anchura cada uno. La anchura total, por lo tanto, es de 17,40 metros.

El canal navegable que salva el puente permite la navegación de tanques petroleros de 65.000 toneladas.

Este canal tiene 100 km de longitud, 300 m de anchura y 15 m de profundidad. Para salvar el canal se han previsto cinco tramos de 235 m de luz, cada uno de los cuales dispone de una altura libre de 45 m para el paso de la arboladura de las referidas naves.

Tramos

La gran longitud del puente y el perfil mojado del mismo, en conjunción con la necesidad de asegurar el tráfico marítimo en todo momento, han exigido un detenido estudio para la distribución y disposición general óptima de estos múltiples y variados tramos.

La subdivisión en tramos ha sido la que figura a continuación.

Tramos	m	m
1 de	22,60	22,60
1 de	35,80	35,80
19 de	36,60	695,40
77 de	46,60	3.588,20
2 de	46,65	93,30
2 de	65,80	131,60
26 de	85,—	2.210,—
2 de	160,—	320,—
5 de	235,—	1.175,—
135		8.271,90
	Pedraplén...	406,70
	Total	8.678,60

Cimientos

Una obra de esta naturaleza presentaba el problema de posibles asentamientos diferenciales locales o por zonas; en uno y otro caso los efectos de producirse este fenómeno serían de lamentables consecuencias. Todas estas consideraciones han exigido se preste la atención debida al estudio detallado del terreno y materiales que lo componen para prevenirse en el peor de los casos de los referidos asentamientos.

Naturalmente, la naturaleza geológica y tectónica de bancos de apoyo y subyacentes han atraído la atención inicial que, fijada la ubicación de la obra, los límites del campo de estudio se han visto considerablemente reducidos.

Trozos de tablero para los tramos de 85 metros.

Pieza prefabricada para los tramos de 85 metros.

Tren flotante de sondeos.
El pilote, en posición vertical.
Unión de los trozos de que se compone un pilote.

Dentro de estos limites, el interés inmediato se ha dirigido al reconocimiento y comprobación de las características específicas locales de dichos bancos y sus facies.

La experiencia exige que, en obras de tamaño envergadura, la exploración sea lo más directa posible: el sondeo y consiguiente ensayo con los materiales que de los testigos se obtienen.

Una fase de la elevación del pilote.
Equipo de sondeos.

Los ensayos realizados han sido de penetración, capacidad de sustentación, tuaxiales, cortantes, granulométricos, límites de Atterberg, consolidación y de carácter químico-petrográfico. Estos ensayos, cada uno de los cuales constituye una especialidad, se han realizado bajo la dirección e inspección de hombres de la solvencia del profesor J. Kerisel, de la Escuela Politécnica de París.

La parte mecánica de sondeos, trenes, material auxiliar y ejecución requerirían una extensión en su descripción que rebasaría los límites que nos hemos propuesto. Sin embargo, tanto desde el punto de vista técnico como de maquinaria auxiliar utilizada, podemos asegurar que se han efectuado dentro de los niveles que la técnica moderna ha alcanzado actualmente.

Pilotes

Como resultado de cuanto hemos apuntado se decidió era necesario el empleo de pilotes en los apoyos de pilas. De estos elementos se ensayaron tres tipos cuidadosamente estudiados, de los que en principio se presentaban como soluciones posibles. Estos pilotes se sometieron a duras pruebas, en las que se indujeron la carga propia aumentada con las sobrecargas de direcciones verticales y las derivadas de los efectos del viento y frenado que proporcionan esfuerzos tangenciales, es decir, de direcciones horizontales. De los tres tipos de pilotes ensayados distinguiremos:

1.º Pilotes de perforación, de sección circular, de 1,35 m de diámetro exterior y con una capacidad de sustentación de 675 toneladas.

2.º Pilotes cilíndricos, de hincia directa y de 91,4 cm de diámetro exterior, y con una capacidad de sustentación de 675 toneladas.

3.º Pilotes de sección cuadrada, de hincia directa, de 50 x 50 cm, sólidos y con una capacidad de sustentación de 75 toneladas. Estos pilotes están destinados para los tramos de 36,6 m de luz.

Colocación del pilote en la entubación de la perforación.

Entramado tubular auxiliar en la pila número 18.

Teniendo en cuenta la carga correspondiente a cada soporte, se previeron de 4 a 5 pilotes de perforación para cada soporte de los tramos de 46,6 m de luz, de 10 a 12 para los tramos de 85 m y de 62 pilotes para los tramos de 235 metros.

Los pilotes son del tipo prefabricado por trozos de 6 m de longitud, preparados utilizando el sistema «vacuum» de hormigonado, uniéndolos entre sí por medio de alambres pretensados para formar trozos de la longitud deseada.

Los apoyos tienen capital importancia en obras de este género; esto ha exigido que los pilotes que debían garantizar la estabilidad de los soportes y, máxime si se considera la gran longitud de estos elementos, se comprenderá mejor la justificación de las 137 pruebas de cargas que de ellos se hicieron. Estos ensayos, realizados por grupos y aisladamente, han sido llevados a cabo utilizando sobrecargas de hasta 2.000 toneladas por pilote. El cuidado, interés y minucia en ellos desarrollados, junto con los resultados adquiridos, alcanzan un carácter de trascendencia mundial.

La preparación de estos pilotes ha necesitado de grandes instalaciones auxiliares en los talleres de prefabricación. La importancia de éstos es una consecuencia de los 67.000 m de pilotes que se armaron y hormigonaron en los referidos talleres de prefabricación.

También se comprenderá el enorme volumen de materiales que se ha necesitado en la preparación de los pilotes.

La manipulación de estos elementos de gran peso, así como su transporte por mar hasta el lugar de ubicación, ha exigido un tipo pesado de material auxiliar. La preparación de pilotes para su hincia ha creado problemas que han exigido particular esmero para obtener cotas y direcciones previamente establecidas en el cálculo de los mismos.

La diversidad de especialidades y auxiliares que la prefabricación y conducción de grúas y pontones exige ha obligado a la construcción de un campamento, verdadero poblado, para albergar a todo este personal y familias. Como es natural, las edificaciones para almacenes, oficinas y administración también han sido de consideración.

Entre toda la maquinaria auxiliar presenta mayor interés una grúa-pórtico, de 52 m de luz entre apoyos, que corre a lo largo de una vía de 700 m de longitud, 14 m de altura libre y 200 toneladas de capacidad.

La central hormigonera, moderna, de una capacidad horaria de 70 m³, funciona automáticamente.

Encofrado de la pila 19.
Transporte de una viga del taller de prefabricación al pontón.
Colocación de una viga en obra.

Entre la maquinaria auxiliar marítima destacan, entre otras:

a) La plataforma flotante, llamada «Elefante», cuya torre central dispone de una grúa de 250 toneladas de capacidad y una altura que puede llegar hasta los 70 metros.

b) Una grúa flotante «Ajax» de 300 toneladas de capacidad, 52 m de altura libre y 135 toneladas de capacidad si esta altura se eleva a 75 metros.

c) Una draga tipo «Dixie» con dos motores de 248 y 82 CV., equipada con un tubo de succión de 25 cm de diámetro.

d) Centrales hormigoneras flotantes, automáticas, con distintas capacidades horarias que varían de 10 a 30 m³ por hora.

e) Para las pilas centrales se utilizaron grúas especiales que podían llegar hasta 100 m de altura.

A todo este material auxiliar y otro de menor importancia se une una serie de remolcadores y barcazas prestadas por el Departamento de Marina para este efecto.

El proyecto

Para la redacción y despiece de las distintas partes de que se compone el proyecto general se utilizaron las normas italianas para el pretensado, para las cargas móviles las HSS americanas y las DIN alemanas.

Las consideraciones de principios generales del cálculo estático de la obra y detalles de los mismos han sido tratados con tal prodigiosidad que requerirían una enorme extensión, por lo que sólo trataremos de los datos prácticos que en estos estudios se han empleado.

El efecto del viento, supuesto el puente descargado, se pensó sería de 250 kg/m²; y cargado, incluyendo el tráfico, de 150 kg/m². Los tramos de 235 m de luz se someterán a ensayos sobre modelo reducido en el túnel soplante.

En lo que respecta al efecto de frenado se ha calculado admitiendo como esfuerzo la quinta parte de la carga móvil, sin tener en cuenta coeficiente alguno para los efectos de la vibración.

Considerando que las variaciones diurnas y estacionales de la temperatura son de la menor importancia, las variaciones admitidas han sido de 5° C para los tramos de 46 m de luz, $\pm 10^\circ$ C para los 85 m y de $\pm 20^\circ$ C para los de 235 m. Teniendo en cuenta, naturalmente, las dilataciones y los efectos de los cables soporte.

Las cargas de rotura para el hormigón de las piezas pretensadas fue de 450 kg/cm² a los veintiocho días, y la compresión máxima durante el montaje, de 189 kg/cm². La carga máxima de trabajo es de 144 kg/cm².

El acero, tipo St 150-170, de un 0,8 % de carbono en cordones de 7 mm de diámetro podrá someterse a una carga de 12.000 kg/cm², pero, debido a la fluencia, relajación y contracción, la carga máxima de trabajo será de 9.000 kg/cm².

Pretensado

El sistema de pretensado empleado es el mismo propuesto por Morandi, autor del proyecto, es decir, dando un esfuerzo de 70 toneladas por cable en las vigas principales y uno de 35 toneladas por cable en el pretensado transversal de la losa del tablero.

Los anclajes en los cables de 70 toneladas de esfuerzo se verifican por medio de seis placas de 18 cordones, subdivididos en grupos de tres alambres, que se tensan simultáneamente con gatos hidráulicos.

El Ministerio de Obras Públicas introdujo una proposición para que el sistema de cables pudiese ser reemplazado por otro de tipo normal si se trata de emergencias o destrucción parcial en caso de guerra, lo que permitiría una rápida reparación y nueva entrada en servicio.

Cimientos

Las cabezas de los pilotes correspondientes a cada pila se han unido convenientemente para formar un emparrillado constituido por elementos prefabricados. Este emparrillado se hormigonó después de manera que se obtuvo una solera o dado de base de apoyo de las pilas, también hormigonadas «in situ» y con ayuda de encofrados metálicos deslizantes. En estos trabajos se utilizaron, como andamios, un entramado metálico tubular.

Las pilas correspondientes a los tramos de 46,6 m de luz están constituidas por montantes de sección trapezoidal, y para los tramos de 85 m estos montantes se unen formando, unas veces, una V, y otras, una X, formas que se adoptan teniendo en cuenta la altura que ha de alcanzar la pila de que se trata. Finalmente, en los tramos centrales de 235 m de luz, éstas tienen una forma particular, que la constituye la unión de dos elementos en X, ganando con ellos una altura de 50 m sobre el nivel del mar o lago. El elemento pila, considerado como un todo, llega hasta 92,50 m de altura.

Los tramos de 36,6 y 46,6 m de luz se ubicaron en los accesos de Punta Iguana, pues en esta zona el terreno que servía de base de apoyo era poco estable y de pobre capacidad de sustentación, lo que exigía que las cargas que gravitasen sobre ellos fueran de la menor consideración posible, condición que cumplen los tramos de menor luz. El empleo de estos tramos en una extensión de unos cuatro kilómetros se ha traducido en una fuerte economía.

Los tramos de 36,6 y 46,6 m de luz se pueden considerar, desde el punto de vista estático, como una viga simplemente apoyada y de 1/18 como coeficiente de rigidez. La losa pretensada constituida en la parte superior tiene un espesor de 17 centímetros.

La calzada que estos tramos forman se ha subdividido en dos partes: una, de dos vigas centrales, y la otra, de dos exteriores. De estas últimas arranca la losa de los andenes, hormigonada en obra.

Estas vigas, de gran peso, prefabricadas en taller, se transportaron sobre pontones que, previstos de un compartimiento estanque, permitían lastrarlas para regular la altura debida sobre sus apoyos, continuando después el lastre hasta dejarlas apoyadas sobre las pilas definitivamente. Los apoyos de estas vigas son de dos tipos: unos, fijos, y otros, que permiten el libre movimiento de la extremidad de viga opuesta a la fija.

Las juntas formadas entre vigas se sellaron utilizando un encofrado metálico apoyado en pontones. Las vigas así hormigonadas constituyen, en su parte o cabeza superior, la losa de la calzada que, posteriormente, se pretensa, transversalmente, con las vigas transversales del entramado del tablero del puente.

En los tramos de 36,6 m de luz se puede tomar, como relación entre volumen y superficie por metro cuadrado en planta o proyección, el valor de $0,39 \text{ m}^3/\text{m}^2$ para la losa de hormigón y el de $113 \text{ kg}/\text{m}^3$ para las armaduras.

En los tramos de 46,6 m, estos valores son, respectivamente, de $0,49 \text{ m}^3/\text{m}^2$ y $103 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Los tramos de 85 m de luz se emplearon con la finalidad de elevar el nivel de la calzada sobre el lago, presentando la particularidad de que la losa hormigonada directamente a partir de los soportes o pilas se hormigonaron «in situ». Tanto los encofrados como los entramados auxiliares de andamio se prepararon en taller, pero fueron colocados con la ayuda de grúas flotantes montadas sobre pontones.

Los trozos de losa hormigonados directamente sobre los soportes se unieron entre sí por medio de vigas particulares, de 46,6 m de longitud, adaptables a sus apoyos, y que, gracias a ellos, se hace posible una independencia entre los tramos y descargar estáticamente los trozos de losa hormigonados directamente sobre las pilas que los autores de este trabajo las han denominado con el nombre de mesas.

En una sección transversal, estos trozos de losa, a que nos venimos refiriendo, presentan dos vigas, tipo cajón, arriostradas entre sí por medio de vigas transversales pretensadas y la propia losa.

El conjunto estructural constituido por cada uno de estos trozos y su soporte o pila se calculó siguiendo el método de Pucher para la flexión oblicua.

Para las vigas correspondientes a estos trozos de losa o tablero se puede admitir un coeficiente de $0,55 \text{ m}^3/\text{m}^2$, es decir, una relación entre el volumen y la superficie del mismo proyectada sobre un plano, y la de $128 \text{ kg}/\text{m}^3$ para las armaduras.

Tramos de 235 m de luz

Los cinco tramos centrales, de 235 m de luz, son la parte más importante de esta enorme estructura y constituyen en sí una interesante solución estática que, desde el punto de vista de su gran luz, pueden estudiarse ya considerándolos como vigas pretensadas o como estructuras aporticadas.

En estos casos el hormigón se halla sometido a una carga de $150 \text{ kg}/\text{cm}^2$, y, de disminuir las tensiones debidas al peso propio, dicha carga no deberá exceder diez veces la sobrecarga más elevada.

Vista general de una solera de cimientos.

Emparrillado de pilotes para los tramos de 235 metros.

Hemos de hacer notar que la estructura central suspendida por medio de cables o vientos tiene un trozo de tablero de 189,05 m de longitud, y, por tanto, hay que intercalar, entre uno y otro trozo, cuatro vigas, tipo normal, de 46 m de longitud, con objeto de lograr la longitud o luz total de 235 m del tramo.

El trozo de tablero sobre cada uno de sus soportes se compone de cuatro vigas cajón, con dos ménsulas de 15 m unidas por una viga transversal sobre la que se apoyan las vigas longitudinales de cierre, de 46 m de longitud.

Las pilas a partir del tablero se continúan en altura en forma de torre de 92,50 m de altura sobre el nivel del lago. En la parte superior de estas torres se apoyan los cables o vientos de suspensión. Los cables pasan sobre cuatro sillas que soportan 16 cables de 7,4 cm de diámetro exterior que provocan una carga de 150 toneladas. Los cables se anclan en una viga transversal, de grandes dimensiones, hor-migonada en el lugar previsto para el anclaje de los referidos cables.

Los elementos para las torres son independientes, en lo que a construcción se refiere, de los correspondientes a las pilas y elementos combinados en forma de doble X que se utilizan como apoyo.

La simplificación introducida en los cálculos estáticos complicados por la presencia del hiperestatismo, pudo ser llevada a cabo gracias a los apoyos de las ménsulas.

La transmisión de los esfuerzos provocados por los efectos del viento se realiza por el intermedio de los apoyos de doble X, quienes lo retransmiten a cimientos.

En estos tramos y para los trozos de losa de 189,05 m de longitud se puede admitir un coeficiente o relación de $101,04 \text{ m}^3/\text{m}^2$, es decir, relación volumen a superficie proyectada sobre un plano horizontal, y de $81 \text{ kg}/\text{m}^3$ para las armaduras.

información amablemente facilitada por el
ingeniero colaborador L. SBALZARINI