

PUENTE DEL FORTH

(Continuación.)

Apoyos.—Los tres apoyos centrales sobre que descansa el puente grua, que para mayor comodidad designaremos en adelante con los nombres de Queensferry para el situado al Sur, Inch-Garvie para el central, y Fife para el del Norte (tomados del lugar que ocupan), se componen de dos partes bien definidas—una de mampostería y otra de hierro.—La primera está constituida por cuatro pilares cilíndrico-cónicos, cuyos centros marcan los vértices de un rectángulo de 36,60 metros por 47,27 metros en los apoyos extremos, y de 36,60 metros por 82,34 metros en el central. Las dimensiones de cada pilar son:

21,35 metros de diámetro en la base
y 14,95 metros de id. en el vértice.

Estas pilas se terminan á unos 5,40 metros por encima de las altas mareas. Sobre ellas viene á insistir la segunda parte del apoyo, ó sea la de hierro, de cuya forma general se tendrá perfecta idea imaginando un inmenso tronco de pirámide de base igual á la del rectángulo que forman los centros de los pilares, asentado sobre ellos, y de una altura de 105 metros próximamente, al cual vinieran á adosarse por dos de sus caras laterales y opuestas otros dos troncos de pirámide de 208 metros de altura, de tal modo, que aquéllas constituyeran sus bases. Estos troncos así dispuestos dan clara idea de las ménsulas ó brazos de grua característicos del sistema.

Acerca del detalle de las distintas piezas de que se compone este inmenso almacén de hierro, diremos, de un modo general, que las que trabajan á la compresión tienen la forma tubular, y las que resisten á la tracción son vigas de celosía de sección rectangular.

La base de las partes metálicas de las pilas está formada por un cuadro rígido, compuesto, en el sentido longitudinal del puente, de tubos, y en el sentido transversal, de vigas de sección rectangular. Los tubos tienen 79,30 metros de longitud en la pila central, y 44,22 metros en las otras dos. Las vigas transversales tienen 36,60 metros de longitud.

Tramos.—En los extremos de estas colosales ménsulas vienen á apoyarse en las mismas condiciones que si reposaran sobre pilas ordinarias, dos grandes tramos de 106,24 metros de longitud, compuestos cada uno de dos vigas parabólicas en celosía que tienen respectivamente 15,25 metros de altura en el centro y 12,20 metros en sus extremidades. Estos tramos salvan las luces correspondientes á ambos lados del apoyo central, que son las únicas que quedan por salvar, pues las ménsulas del lado de las orillas, en los apoyos Queensferry y Fife, descansan directamente sobre las pilas estribos de los viaductos de acceso.

Estabilidad del puente.—Para asegurar el equilibrio de los apoyos sobre su base, había que tener en cuenta dos elementos. Primero, las desiguales condiciones en que se hallaban los de las orillas que recibían por uno de sus extremos el peso de medio tramo, mientras que el otro permanecía libre, y segundo, la acción que iba á ejercer la sobrecarga móvil. A estas dos consideraciones se atendió, colocando un lastre de mil toneladas en las ménsulas que terminan el puente grua. Para el apoyo central ó sea el de Inch-Garvie, el equilibrio sin sobrecarga se realizaba por el hecho mismo de su simetría; no había, pues, que atender más que á la acción de aquélla en el caso más desfavorable, esto es, cuando se encontraran dos trenes al mismo tiempo en medio de uno de los tramos. Como por otra parte, no se quería que la unión de la mampostería con el hierro tuviera que resistir á esfuerzos transversales y de tracción, hubo necesidad de aumentar la anchura en la base de este apoyo, á fin de que la resultante de los pesos pasara siempre por el núcleo central de la base de sustentación.

Para tener en cuenta la flexión que tomaría el puente una vez puesto en servicio, se dió á las ménsulas de los grandes tramos un peralte de 254 milímetros en su extremidad libre, es decir, que el desnivel que debía ofrecer el carril (sin sobrecarga) entre este punto y el situado en la vertical del apoyo, había de ser el indicado por aquella cifra. Para obtener este resultado era preciso no perder de vista la flexión propia de la construcción, y en su consecuencia, una vez hechos los cálculos necesarios se establecieron las diversas piezas como si tuvieran que alcanzar una altura de 508 milímetros por encima de la horizontal.

Hecha esta ligera descripción del conjunto pasaremos á ocuparnos de la ejecución de los trabajos; pero antes daremos rápidamente una idea de las disposiciones adoptadas para evitar las deformaciones debidas á los cambios de temperatura.

Los tramos correspondientes á los viaductos de acceso descansan, á la manera ordinaria, sobre placas que les permiten deslizarse libremente.

Los grandes tramos centrales tienen fijos los extremos que se apoyan en las ménsulas de Queensferry y Fife, quedando libres los que descansan en las de Inch-Garvie.

En los tres apoyos centrales era preciso contar con los efectos de la temperatura en el sentido longitudinal y en el transversal del puente. A este efecto, solo se ha fijado de un modo invariable la parte de hierro á la de fábrica en los puntos siguientes: Pilar Sud-Este en Queensferry y pilares nordeste en Inch-Garvie y Fife. Alrededor de estos puntos, completamente fijos, puede la construcción tomar movimientos de cierta amplitud que impiden toda deformación.

Es interesante darse cuenta de la importancia que pueden adquirir las

dilataciones en obra de tal magnitud, suponiendo una variación extrema de 40° centígrados de temperatura.

Las longitudes que para los efectos de la dilatación deben asignarse á las ménsulas que insisten sobre los estribos de los viaductos, á los cuales están invariablemente unidos, son de 251,62 metros, recordando lo que antes hemos dicho acerca de los enlaces con los pilares, y dadas las dimensiones acotadas en la fig. 2.ª. Esta longitud produciría un alargamiento de 0mm,092.

En los dos claros centrales, la dilatación se ejercería sobre longitudes de 521,55 metros y 600,85 metros respectivamente, y alcanzaría las cifras de 193 milímetros y 219 milímetros.

Se ha dispuesto la construcción de modo que estos movimientos pueden verificarse libremente con una amplitud doble de la indicada.

Ejecución de los trabajos.—Causa verdadera admiración la grandiosidad de las instalaciones y de los medios auxiliares empleados en la construcción.

En la orilla Sur, ó sea del lado de Queensferry, levantáronse talleres provistos de toda clase de máquinas-útiles, las más perfeccionadas, entre ellas, una notable prensa hidráulica de cuatro cilindros, que podía desarrollar un esfuerzo de 1.000 toneladas, destinada al encurvado de los palastros de los tubos. Un edificio especial contenía grandes acumuladores hidráulicos, que distribuían la presión de 70 atmósferas á los talleres y hasta la gran pila Sur.

Una fábrica de luz eléctrica mantenía en actividad 80 lámparas de arco voltaico de 3.000 bujías y 500 lámparas de incandescencia. Allí se establecieron las viviendas y oficinas de los Ingenieros y empleados de la Compañía, como también las de los contratistas; construyéronse casas para obreros, abriéronse cantinas y grandes almacenes, levantóse una iglesia, en una palabra, constituyóse una verdadera población.

Los talleres se ligaron con vías al camino de hierro del North British Railway, y un plano inclinado instalado en la orilla les permitía alcanzar el apoyo Queensferry; desde allí los materiales se trasportaban por medio de barcas á la isla Garvie y al apoyo Fife.

En la isla se montaron también acumuladores hidráulicos y otra fábrica de luz eléctrica.

En resumen; se tendrá una idea de la importancia de las instalaciones y del material auxiliar destinado al trabajo, cuando se sepa que su coste se elevó á 10 millones de pesetas.

Pasemos á ocuparnos de las fundaciones y montaje del puente.

El terreno que forma las dos vertientes y el lecho del golfo en el lugar de su emplazamiento se compone (siguiendo la dirección Sur-Norte), de

rocas esquistas aparentes hasta la sexta pila del primer viaducto; á continuación de una capa de fango y otra de arcilla, cuyo espesor no se llegó á determinar, y hacia la mitad del golfo emergen las rocas basálticas de la isla Garvie, que perdidas al llegar al centro del segundo canal por estar recubiertas de arcilla y fango, vuelven á aparecer en la orilla Norte.

Con terreno de tal naturaleza se comprende que no ofreciera dificultad ninguna la fundación de las pilas del viaducto Queensferry. Las fundaciones eran directas y podían hacerse en seco: bastó, por consiguiente, nivelar la roca y asentar desde luego la mampostería. Empleóse el granito de Aberdeen para los paramentos y sillería de los ángulos, y basalto de la localidad para el relleno interior. La construcción se suspendió al llegar á 12,20 metros de altura sobre el nivel del agua, para continuarle más tarde como luego veremos.

En el viaducto del lado opuesto, las condiciones del terreno eran análogas y pudieron también fundarse las pilas directamente sobre la roca. Solo para las cuatro últimas hubo necesidad de recurrir á sencillas ataguías formadas por un doble recinto de tablestacas con relleno intermedio de arcilla, en las que se agotó fácilmente, sin que se presentara particularidad digna de mención. La piedra empleada fué la misma que para el viaducto del lado Queensferry, y la altura alcanzada por las pilas en este primer período de la construcción fué también de 12,20 metros por encima del nivel del agua.

En análogas ó muy parecidas circunstancias se fundaron los cuatro pilares del apoyo Fife, que no detallaremos, para fijar preferentemente nuestra atención en los de Inch-Garvie y Queensferry, que son los que más dificultades ofrecieron.

Para los pilares Sud-Este y Sud-Oeste del primero, se había pensado recurrir en un principio al empleo de cajones sin fondo de doble pared, recortados en su parte inferior de modo que se aplicaran exactamente al terreno. La inclinación de éste era muy fuerte en los dos emplazamientos, pues en el espacio de 21,34 metros, ancho de las fundaciones, existía una diferencia de nivel próxima á 6 metros. Los cajones debían conducirse por medio de flotadores, y una vez asentados sobre la roca y rellenos de hormigón los espacios anulares de las paredes, había que tratar de hacer impermeables las juntas con el terreno, empleando al exterior sacos de hormigón y cemento líquido que los ligara á los palastros. Este procedimiento, que recuerda al empleado por Brunel en el puente de Saltash, no satisfacía por completo á los ingenieros; tener que agotar en una altura de 22 metros para escalonar un fondo que se presentaba tan inclinado, era operación difícil y de éxito más que dudoso. Entonces se aceptó la proposición hecha por Mr. L. Coiseau, que consistía en el empleo combinado de los cajones y

del aire comprimido y de un sistema especial para el asiento de aquéllos en la roca.

Los nuevos cajones terminaban en su parte inferior por una sección normal al eje vertical del mismo, diferenciándose en esto de los anteriores, que debían seguir las sinuosidades del terreno como se ha dicho. Para colocarlos en obra era preciso levantar un suelo artificial que los mantuviera en la debida horizontalidad, y les permitiera conservar esta posición á medida que se fuera desmontando la roca y verificara su paulatino descenso. A este fin se llenaron de arena unos 50.000 sacos y se formó con ellos un murete circular, cuya coronación se hallaba un metro por encima del punto más alto de la roca (véase la fig. 3.^a)

El filo del cajón, ofrecía, á la distancia de un metro de su extremo inferior, una banqueta circular destinada á contener el movimiento de hincá del cajón en los sacos; de modo que una vez colocado aquél sobre el murete y lastrado con la cantidad de hormigón necesaria para contrarrestar la presión del aire comprimido, viósele descender en marea baja á través de los sacos hasta que éstos alcanzaron la banqueta, al mismo tiempo que una parte del filo venia á apoyarse en el terreno natural. Empleóse el aire comprimido para desalojar el agua, y fuese desmontando la roca por medio de la tonita (especie de algodón pólvora que produce muy poco humo), mientras se daba salida á la arena de los sacos con objeto de que el cajón fuera descendiendo lentamente y sin perder la horizontalidad. Por este procedimiento se llegó á asentar el cajón sobre una superficie horizontal, y una vez rellenos de hormigón la cámara de trabajo y la parte superior del mismo pudo continuarse la obra sin ninguna dificultad. Las profundidades alcanzadas fueron de 22,87 y 25,01 metros bajo la marea alta, para cada uno de los pilares Sud-Este y Sud-Oeste respectivamente.

Para los otros dos pilares del apoyo central no hubo inconveniente en aplicar el procedimiento de cajones con agotamiento, que tuvo que desecharse en los pilares Sur á causa de la altura. La única diferencia que se introdujo, consistía en que los cajones eran simples recintos de palastro en lugar de ser de doble pared como los descritos. Fueron necesarias dos bombas centrifugas de 6 á 7 mil litros de gasto por minuto.

En el apoyo Queensferry se fundaron los cuatro pilares sobre cajones de doble pared y empleando el aire comprimido. Nada hubiera turbado la marcha regular de los trabajos si el terreno, compuesto de una capa de arcilla de espesor indefinido, no hubiera opuesto una resistencia tan extraordinaria á ser desagregado, que la dinamita apenas si dejaba sentir sus efectos. Había, pues, necesidad de recurrir á nuevos medios, y entonces se pensó en utilizar la presión hidráulica de que se disponía para hacer funcionar una pala ideada por Mr. Colseau, reducida á un cilindro de hierro

con su émbolo y varilla, en cuyo extremo se hallaba fijo el útil ó pala. Tomando como punto de apoyo el techo de la cámara de trabajo, é inyectando el agua dentro del cilindro, se consiguió introducir la pala dentro del terreno 0,30 metros. La presión ejercida en el filo de ésta se calculó en unos 60 kilogramos por centímetro cuadrado.

Los operarios trabajaron en los cajones sin sentir molestia alguna hasta que la presión llegó á dos atmósferas. A partir de este momento fueron cayendo enfermos muchos de ellos, algunos de gravedad, debido, sin duda, no tan solo á la presión que excedió de tres atmósferas, sino también y principalmente, á un gas que se desprendía del terreno, ofreciendo la particularidad de inflamarse sin producir detonación. Este contratiempo exigió renovar las brigadas tres y cuatro veces en las diez horas ordinarias de trabajo.

En todos estos trabajos se utilizó la electricidad para la iluminación de las cámaras y para dar fuego á las materias explosivas. La extracción de los productos se verificó por medio de tornos y gruas de vapor. El tiempo invertido en las fundaciones fué por término medio de 6 á 9 meses.

Montaje.—El de los tramos de los dos viaductos de acceso se verificó directamente por medio de gruas cuando las pilas no tenían más altura que la de 12,20 metros en que, según dijimos, habíase suspendido su construcción. Una vez montadas por completo las vigas de los tramos, fuéronse elevando con criks hidráulicos y en espacios sucesivos de 1,83 metros para dar lugar á la terminación de las pilas, cuya altura definitiva era de unos 46 metros. Este procedimiento, muy seguro como ejecución, debió salir poco económico, y hubiera dado quizás mejor resultado operar por lanzamiento después de terminada la construcción de las pilas.

El montaje de los tres apoyos centrales comenzó á un mismo tiempo en el año 1886. Las piezas inferiores se fueron montando con gruas hasta la altura de 2,5 metros por encima de la mampostería, y á partir de este punto se continuó la operación instalando las gruas con todos los accesorios necesarios en una plataforma formada con las piezas que debía llevar el apoyo en su parte superior. Esta plataforma, que descansaba, como ahora diremos, en los cuatro grandes tubos que constituyen las aristas del tronco de pirámide central, se fué elevando por medio de prensas hidráulicas á medida que avanzaba la operación del montaje. Para enlazar la plataforma á los tubos de modo que fuera fácil fijarla con la debida resistencia después de cada una de las ascensiones sucesivas, se empleó el método siguiente: al tiempo de montar los anillos de los tubos, dejaban de ponerse los palastros correspondientes á los extremos de un diámetro paralelo al eje longitudinal del puente, y en ese claro, y descansando sobre los palastros del anillo inferior, colocábanse dos de las vigas que constituían el bastidor de la plataforma. Como cada elevación parcial salvaba la altura de un anillo, una vez

alcanzada, podía terminarse el montaje de éste, y entonces se hacía insistir sobre él el peso sostenido hasta aquel momento por las prensas. El montaje de las ménsulas fué haciéndose con gruas colocadas en la parte superior ya montada, y en las vigas destinadas á soportar el tablero del puente, á cuyo efecto se llevaba siempre su construcción en avance con relación al resto. Las gruas eran de vapor ó hidráulicas, y su peso de unas 50 toneladas.

Para el montaje de cada uno de los tramos centrales de 106,24 metros de luz, se empezó por fijar sus extremos en cada una de las ménsulas sobre que debían apoyarse definitivamente, y después se fueron montando las dos mitades en falso ó saliente, avanzando al mismo tiempo por ambos lados. Fué preciso, para ello, ligar fuertemente la parte superior de las vigas á las ménsulas por medio de cuatro tirantes de 0,66 por 0,057 metros, y hacerlas descansar sobre placas y cuñas de acero dispuestas de tal modo (fig. 5.^a) que las dos mitades ofrecieran una ligera inclinación sobre la horizontal acusada por un peralte de 0,089 metros en el punto medio de la luz del tramo. Cuando los dos extremos se encontraron enfrente el uno del otro se procedió á la unión de sus piezas inferiores aprovechando el instante en que la dilatación producida por un máximo de temperatura produjo su mutuo encuentro. En esta disposición esperóse á que una contracción del metal permitiera quitar las cuñas que mantenían inclinadas las dos mitades, lo que una vez realizado dejó en contacto las partes superiores, cuyo enlace definitivo no ofrecía ya dificultad ninguna.

Tal ha sido el montaje de esta obra colosal. Como se ve todo es en él racional y sencillo, ofreciendo en sus distintos procedimientos las mayores garantías de seguridad, que es la condición primera á que ha de satisfacer esta clase de trabajo.

Para terminar, daremos algunas cifras curiosas. La cantidad total de fábrica empleada asciende á 115.068 metros cúbicos, y el peso del acero á 54.076 toneladas.

El peso por metro corriente del puente grua es de 31.780 kilogramos.

El precio total de la obra se elevó á 75 millones de pesetas, correspondiendo á las fundaciones unos 20 millones próximamente. El precio de la parte metálica resultó á una peseta el kilogramo; á la mano de obra corresponden 173,56 pesetas por tonelada.

El trabajo, empezado en Abril de 1883, se terminó en Febrero de 1890, y el número de obreros empleados fué por término medio de 3.000, habiendo alcanzado en algunos momentos la cifra de 4.600.

La inauguración oficial tuvo lugar el 4 de Marzo del corriente año.

A. F.