

PUENTE DEL FORTH

ESTUDIO LEÍDO EN EL INSTITUTO DE INGENIEROS POR EL SOCIO
DON LUÍS ADAN MOLINA.

Es el puente de Forth la obra más grande en su género, el puente más monumental de los que existen. Este y la torre de Eiffel pueden llamarse con propiedad la gloria del acero en el presente siglo.

Son ellas las concepciones más atrevidas que el ingenio humano haya ejecutado; basta para ello tan sólo fijemos nuestra atención en sus dimensiones colosales: la torre de Eiffel, como es sabido, tiene una altura de 300 metros; el puente de Forth una longitud de más de dos kilómetros con tramos de más de $\frac{1}{2}$ kilómetro que dan libre paso á los navíos más grandes que cruzan los mares.

Es digno hacer notar que las obras que más se admiran y que señalan con mayor derecho el progreso del mundo son aquellas que tienen por base las ciencias exactas, las matemáticas, porque es entonces cuando el hombre con este poderoso y necesario apoyo divide los continentes, cruza los mares, escudriña el espacio, arranca á la naturaleza sus tesoros, vence al abismo.

La construcción de dichas obras fué un incesante y variado

campo de investigaciones y enseñanzas y en donde se hicieron verdaderos descubrimientos prácticos para el porvenir.

La desembocadura del Forth en la parte en donde se construyó el gran puente tiene un ancho de $2\frac{1}{4}$ kilómetros acusando la sonda profundidades hasta de 60 metros. El genio inglés, personificado en los notables ingenieros señores Baker y Fowler, idearon y construyeron la grandiosa obra de que me voy á ocupar.

Proyectos.—Muchos años hace que fueron hechos los primeros estudios. Un proyecto presentado por el ingeniero señor Bouch que consultaba dos grandes tramos principales de 487.^m67 cada uno, fué aceptado y aún se dió comienzo á su ejecución. Sobrevino en ese entonces la terrible catástrofe del puente de la Tay, que, como bien lo sabéis, se volcó por consultar el cálculo apenas 45 kilogramos por metro cuadrado para contrarrestar al esfuerzo del viento. En Francia se adopta generalmente 200 kilogramos por metro cuadrado.

Aprovechándose de esta lamentable enseñanza los empresarios del puente de Forth suspendieron los trabajos para llamar á nuevo concurso á los ingenieros. Estos proyectos fueron presentados en enero de 1881.

La flecha que en el proyecto del señor Bouch era de $\frac{1}{48}$ se redujo en los últimos á $\frac{1}{6}$, $\frac{1}{10}$, y aún $\frac{1}{15}$.

Los tramos variaban de 437 á 527 metros.

Los presupuestos oscilaban entre 27 y 46 millones de francos, en números redondos, de 5 á 10 millones de pesos oro.

La altura mayor de la obra llegaba á 111 metros sobre el nivel del agua.

PROYECTO DE BAKER Y FOWLER.

Este proyecto, que fué el que se llevó la palma, rechazaba en absoluto el tipo de los puentes de suspensión y aceptaba de lle-

no el de armadura rígida; daba un ensanchamiento progresivo al tablero hacia los machones para su mayor estabilidad lateral. En efecto, prueba el cálculo que en estas condiciones necesitaría el viento una intensidad de 975 kilogramos por metro cuadrado para volcarlo, cuando es sabido que á los más fuertes huracanes se les ha apreciado una intensidad de 300 á 350 kilogramos.

En virtud de una inclinación pronunciada dada á los planos de las vigas laterales, el ancho disminuye de 38.^m48 en la base á 9.^m14 en el vértice. Su sección es, pues, trapezoidal.

El arco inferior de las vigas maestras y los puntales principales, que están apoyados en los machones, son tubos cilíndricos, el diámetro del primero varía de 3.^m65 en el arranque á 1.^m52 en el vértice; los puntales tienen un diámetro constante de 3.^m65.

La forma cilíndrica para estas piezas es reconocida como la mejor bajo el punto de vista de la compresión.

Según las especificaciones, el acero empleado para la construcción debería tener un coeficiente de ruptura comprendido entre 45 á 50 kilogramos por milímetro cuadrado. Una sobrecarga en movimiento de 3,550 toneladas sobre un tramo de 527 metros debería el metal trabajar 10 kilogramos por milímetro cuadrado.

En cuanto á la armadura se colocarían grandes andamios metálicos y se efectuaría según el principio de las consolas equilibradas, es decir, avanzando simétricamente á ambos lados de cada machón.

El proyecto del señor Baker que prefiere la armadura rígida se explica por esta consideración: á un puente suspendido de grandes tramos para un ferrocarril se necesita imprescindiblemente hacerlo rígido para lo cual hay que agregarle órganos auxiliares. De modo, pues, que en igualdad de condiciones tenemos para el puente suspendido mayor peso y por consiguiente menor economía.

La longitud total del puente se descompondría así:

| | | | | | |
|----|-----------|-----|--------|------|-----|
| 2 | tramos de | 517 | metros | cada | uno |
| 2 | " | " | 205 | " | " |
| 15 | " | " | 51 | " | " |
| 5 | " | " | 7.60 | " | " |

Total 24 tramos y 2,250 de largo total. (*).

La altura de la parte central de la obra sobre la alta marea, sería de 45.60, más que suficiente para el paso de las mayores embarcaciones.

Los puntos más elevados con relación al mismo nivel estarían á 109 metros de altura.

Cada uno de los tres machones principales se compondrían de cuatro macisos cilíndricos de albañilería de 14.75 metros de diámetro en la parte superior y de 18 á 21 en la fundación. El machón enterrado á mayor profundidad lo estaría á 21 metro del nivel de la baja marea.

En los machones se emplearían 93,000^{m3} de albañilería y en la superestructura 45,000 toneladas de acero.

Construcción.—Los trabajos de la ejecución del magno proyecto que á grandes rasgos he dado á conocer, dieron comienzo en Enero de 1883 y por tres puntos á la vez, los extremos y en la isla Inch Garvie situada más ó menos en la mitad.

Los talleres se establecieron en la ribera sur y ocuparon una extensión de ochenta hectáreas.

El material empleado comprendía 14 embarcaciones de distinto género, 72 grúas, de ellas 12 hidráulicas, 22 á vapor y 38 á mano, 28 máquinas motrices, aparatos hidráulicos para la compresión del aire, alumbrado eléctrico, etc., etc. Los operarios pasaron en ocasiones de cuatro mil.

(*) Es lógico que la distribución de los tramos estaba subordinada á las inflexiones del perfil de atraveso.

Fundaciones.—No fueron grandes las dificultades que se vencieron para la fundación de los machones del viaducto de acceso.

El cajón destinado al machón principal del lado norte tiene dimensiones considerables. Se reconoció á los 10.50 metros más abajo de las altas mareas un conglomerado que dió un fondo excelente. Los paramentos de los machones del viaducto de acceso y el de los principales fueron hechos de granito de Aberdeen y de un espesor de 0,60 metros.

Los machones principales fueron fundados ó con cajones abiertos ó valiéndose del aire comprimido: el primer procedimiento fué el casi exclusivamente empleado para el machón del norte. Este está compuesto de dos macisos, para uno se ensayó la preparación del fondo con perforadoras de diamante, pero la extracción de la roca fué reconocida como operación larga y difícil.

El segundo maciso fué fundado por un cajón formado de una cámara metálica permanente de 18 metros de diámetro que sobrepasaba el nivel de las aguas altas y de otro cajón, también metálico, que no es permanente, se unía al primero.

Para asegurarse de la impermeabilidad se echó betón ó bien arcilla pisoneada entre las caras del cajón.

Los machones fundados en la isla de Inch Garvie, que lo están á poca profundidad, han sido ejecutados de una manera análoga.

Se ve, pues, que en toda esta parte de los trabajos, la fundación por el aire comprimido no se adoptó, á pesar de las experiencias tan concluyentes hechas en todos los grandes trabajos de la época.

La parte inferior del machón principal del sur consta de cuatro cajones de 21 metros de diámetro que por la gran dureza del conglomerado arcilloso se impuso el procedimiento neumático. Los cajones fueron construídos en tierra, puestos á flote y remolcados á su lugar definitivo; tienen 21 metros de diámetro

en su base y una inclinación de $\frac{1}{16}$. A 0.30 metros más arriba de las aguas bajas concluye el cajón permanente y comienza la albañilería revestida de un paramento de granito, el diámetro exterior es de 18 metros.

Los cajones neumáticos están llenos de betón hasta el nivel de las aguas bajas. La mezcla que se usó fué por yarda cúbica de 0.^{m3}756 de piedra chancada, 0.^{m3}195 de arena y 0.^{m3}154 de cemento. La resistencia al arrancamiento es de 56 k. por un centímetro cuadrado.

Más arriba de las aguas bajas los machones son hechos por capas horizontales de piedra de Arbroath y su paramento de granito.

En las excavaciones profundas donde se ha podido hacer escalones en la roca, la albañilería empezó desde la roca misma, colocando un anillo de fierro en la base del machón de 0.90 m. de altura por 0.032 de espesor.

Superestructura.—Las piezas sometidas á la compresión son como ya lo hemos dicho, de sección circular. Cada una es de 4.80 metros de longitud y 0.032 m. de espesor. Hubo que encorvar una longitud más ó menos de 67 kilómetros de estas planchas de acero.

La operación de encorvar es de enorme importancia; no se hizo en frío porque el cálculo exige una potencia de 10,000 toneladas. Se ensayó el calentar las planchas en hornos de gas y hacer el encorvamiento en caliente, pero dió un mal resultado, porque las planchas se deformaban al enfriarse; se las protegió entonces con ceniza para su enfriamiento paulatino, y dió todavía mal resultado. Por fin, se aceptó el de calentar las piezas en hornos de calentamiento uniforme y someterlas en seguida á una compresión en frío bajo una presión de 2,000 toneladas.

Las piezas del puente sometidas á la compresión son de acero y de una resistencia á la tracción comprendida entre 55 y 60 kilogramos por milímetro, con un alargamiento de 17%.

Más arriba de los machones la cabeza tubular inferior se une á los contravientos, á los tubos que forman los montantes y diagonales y á las placas de fundación. El sistema de unión fué objeto de numerosos estudios, siendo hecho como sigue:

La cabeza tubular inferior se termina por una especie de caja dividida por manparas interiores horizontales y verticales; presenta así una estructura celular de una fuerza considerable y de una rigidez perfecta, permitiendo efectuar la unión de las piezas en todas direcciones.

Las cabezas sometidas á la tensión son de acero como también los contravientos. Las especificaciones prescribían un metal de 48 á 52 kilogramos por milímetro cuadrado con un alargamiento de 21%.

SEGURIDAD DE LA OBRA.

Para contrarrestar el esfuerzo lateral del viento, el cálculo fijó una resistencia de 273 kilogramos por metro cuadrado, ó sean 9,765 toneladas, por la superficie de un tramo principal. Por las observaciones hechas en la localidad se ha comprobado que los más fuertes vientos no han pasado de una potencia igual á 170 kilogramos. Diferencia á favor del puente, 103 kilogramos por metro cuadrado.

La superestructura está asegurada sobre uno solo de los cuatro machones cilíndricos de cada grupo, de manera que puede haber un ligero movimiento de resbalamiento sobre los otros tres.

El cálculo da como esfuerzo máximo ejercido sobre los machones un esfuerzo de 13 kilogramos por centímetro cuadrado en el caso más desfavorable. Como el betón empleado posee una resistencia al arrancamiento de 56 kilogramos y las piedras empleadas una resistencia superior; se ve pues que el coeficiente de seguridad pasa de 4.

En cuanto á las fundaciones de los machones principales presenta igualmente toda garantía, puesto que ellos reposan sobre roca ó un conglomerado arcilloso de gran dureza. Es necesario agregar que el peso máximum trasmitido al suelo, por uno de los cajones de 21 metros de diámetro es poco más ó menos de 24 toneladas y comprendiendo la componente vertical de la acción del viento estimada en 28 kilogramos por metro cuadrado, da una presión media sobre el suelo de 6 á 7 kilogramos por centímetro cuadrado.

PRUEBA DEL PUENTE

Siete años después de la iniciación de los trabajos, el 21 de Enero de 1890, se comprobó la resistencia y estabilidad de la obra dando muy buenos resultados.

Entraron dos trenes al puente sobre ambas vías y compuestos como sigue: cada tren tenía dos locomotoras de 72 toneladas cada una, seguidas por 50 carros que llenos pesaban 13.5 toneladas cada uno y una máquina atrás también de 72 toneladas. Peso de cada tren, 900 toneladas, peso total 1,800 toneladas. Largo del convoy 304 metros, tope contra tope y en marcha 317.

El tren fué movido lentamente hasta que las dos locomotoras de adelante quedaron en las tres cuartas partes del tramo y la locomotora de atrás quedaba en el machón. Esto es considerado como el peso más desfavorable para el tramo norte. En esta posición se hicieron las observaciones siguientes: las columnas de la torre construída sobre el tramo en que estaba la máquina trasera sufrió una inclinación hacia el norte de $0^{\text{m}}004$. El extremo del tramo norte en equilibrio sufrió una deflexión de $0^{\text{m}}027$, el tramo sur $0^{\text{m}}14$ y su extremo (cargado con doscientas toneladas) $0^{\text{m}}004$. Así se probaron los otros tramos siendo el resultado satisfactorio.

El máximo de peso con que se cargará el puente, de una vez, en su uso diario, será de 800 toneladas, habiéndose hecho la prueba sobre 1,800 toneladas.

Para que se aprecie una vez más la magnitud de la obra apunto este dato: la parte metálica de un tramo pesa más de 16 mil toneladas, estando destinado á soportar un peso que no pasa de 800.

