PROGRESOS REALIZADOS

EN EL ESTUDIO I CONSTRUCCION DE PUENTES DE FERROCARRIL

(Traducido de los *Annales des Travaux Publics de Belgique*, de Abril de 1903, por Ernesto Lyon).

(Conclusion)

Puentes de arco

Los puentes de arco han sufrido trasformaciones análogas i han llegado a un grado de perfeccionamiento comparable a los anteriores.

Estos puentes fueron al principio considerados como compuestos únicamente de un arco que servia de apoyo al larguero, por intermedio de piezas verticales circulares en N o en forma de cruz. Se les calculaba no tomando en cuenta mas que la resistencia del arco. Sin embargo, no se pone en duda que el larguero, con las piezas que lo unian al arco, contribuian a la resistencia; pero las fórmulas de las cuales se disponia no se aplicaban mas que a arcos simples. Ritter i despues Albaret indicaron un método i fórmula por medio de los cuales pueden avaluarse los esfuerzos de todas las piezas del arco, del larguero i del enrejado que forma los riñones.

Es de notar que, en una construccion de esta especie, en la cual el largo del larguero es jeneralmente igual a la luz del arco, los estremos del larguero no son solicitados por ningun esfuerzo, ya sea que el arco esté apoyado o encastrado en los arranques. En consecuencia, el metal del larguero cuya seccion tiene un límite bajo el cual no puede bajar, no soporta, en la parte vecina a sus estremos, sino esfuerzos unitarios mui débiles por consiguiente, el metal está allí mal utilizado.

A Cadiat se le ocurrió fijar los dos estremos del larguero a la albañilería, cuando la obra no tenia sino un tramo, o bien a los largueros de los arcos vecinos cuando el puente constaba de varios tramos.

De esta manera obtenia a los estremos del tramo un encastramiento del cual debian resultar, segun él creia, una mejor reparticion de los esfuerzos, i por consiguiente una economía en metal. Este razonamiento parecia exacto, porque tales uniones hacian desarrollarse, bajo la accion de la sobrecarga, esfuerzos lonjitudinales en la direccion del larguero. Estos esfuerzos aumentaban el trabajo de las partes cercanas a los estremos del larguero, cuyo metal estaba, de este modo, mejor utilizado. Ademas de esto, dismi-

nuian el empuje i con eso aliviaban el arco mismo, con lo cual podia disminuirse la seccion necesaria de este último.

El puente de Arcole, de un solo arco (1855), i el puente de Szegedin (Hungría), de ocho arcos contínuos (1856-1859), fueron proyectados segun este sistema.

Pero en estas obras el encastramiento que se obtenia por medio de esta disposicion, ventajoso con respecto a la sobrecarga, se convertia en perjudicial bajo la accion de la temperatura. En efecto, como sus estremos se mantenian a una distancia invariable, el larguero, pieza rectilínea o sensiblemente rectilínea, no podia acortarse i dilatarse libremente, de lo cual resultaban esfuerzos unitarios considerables de traccion o de compresion. En el puente de Arcole hubo ruptura de los anclajes en la mampostería; éstos fueron suprimidos, pero fué necesario agregar a la construccion, de la cual algunas partes se encontraban entónces mui debilitadas, piezas suplementarias de refuerzo. En el puente de Szegedin la mampostería de uno de los estribos fué arrancada en parte i hubo que suprimir los anclajes en los estribos.

Desde entónces se han construido un gran número de puentes de arco, pero todos son de tramos independientes, puesto que la esperiencia ha demostrado que el encastramiento era mas perjudicial que útil. Tales son los puentes de:

Pesth (Hungría);
Morand i Lafayette, en Lyon;
Sobre el Douro, en Oporto;
Garabit, del mismo tipo que el que precede.

En algunas de estas obras los arcos son encastrados; en los otros son articulados, pero en todos el larguero tiene sensiblemente el mismo largo que el arco; en todos el larguero tiene los estremos libres.

En ciertos puentes el arco está completamente ligado al larguero por medio de piezas en cruz o en N; en otros el arco no va unido al larguero sino por piezas verticales que no establecen entre ellos sino una solidaridad relativa.

En algunos casos los apoyos son formados por planchas que aseguran la invariabilidad del nivel de los arranques, esto es, que realizan el encastramiento del arco. En otros casos esta invariabilidad no se realiza sino despues de la terminacion completa de la construccion por medio del empleo de cuñas, de suerte que los arcos pueden ser considerados como articulados para su peso propio a la temperatura de colocacion, i encastrado para la sobrecarga. Finalmente, en el caso de otros puentes, los apoyos son formados por rótulas como en el primer puente de Oporto i en el viaducto de Garabit.

Pero en todas estas obras, ya sean encastradas en los arranques para el peso propio i la sobrecarga, ya sean encastradas únicamente para la sobrecarga, o, por fin, que sean articuladas en los arranques, los cambios de temperatura producen siempre variaciones en el trabajo del metal. Estas variaciones son tanto mas importantes cuanto mayor sea la rijidez de la construccion, i sin embargo es necesario que la construccion tenga la ménos flexibilidad posible.

Se ha llegado a impedir en los puentes de arco estos esfuerzos suplementarios i a dejarlos tan independientes de la accion de la temperatura como lo son los puentes de vigas, colocando una tercera articulacion en la clave. Con este agregado las dos partes

de que se compone el arco se levantan o se bajan segun aumente o disminuya la temperatura; pero no puede producirse ningun esfuerzo suplementario, i por consiguiente ninguna modificacion en el trabajo del metal, puesto que en estos movimientos cada una de las partes de la construccion conserva su forma.

La idea de construir arcos con tres articulaciones es ya antigua. Se la encuentra aplicada en los pequeños puentes del canal del Aisne, en Marne. Este sistema ha sido propuesto en un proyecto presentado en 1883 al concurso para la construccion del puente sobre el Danubio, en Tchernavoda; está aplicado en la obra de Leon Boyer, en el viaducto de Garabit, i ademas en el puente sobre el Oued Laf-Laf.

Finalmente, la primera aplicacion importante, conocida por todos, fué hecha en la Esposicion Universal de 1889, en las armaduras del techo de la galería de las máquinas, que existe todavía.

Esto era dar prueba de una grande audacia, pues en esa época muchos injenieros criticaban el empleo de este sistema, dando como razon que la continuidad del arco cesaba de existir en la clave.

Hemos visto que las vigas de puentes de tramos independientes, en las cuales las variaciones de temperatura no producen, teóricamente a lo ménos, modificaciones en el trabajo del metal, habian sido perfeccionadas de una manera mui feliz, disponiendo sus elementos de modo que no hubieran barras superabundantes, proporcionando la altura de la viga a los esfuerzos, i, por fin, obteniendo un encastramiento parcial en los apoyos, conseguido éste por medio del agregado de consolas.

Los puentes de arco habian llegado a poseer todas estas ventajas, con la escepcion, sin embargo, del encastramiento parcial en los apoyos.

Se ha podido crear un tipo de puente de arco que posee este último perfeccionamiento, agregando una consola a cada lado del tramo i a continuacion de los apoyos. Estas consolas, llamadas «*encorbellements*» o «*culasses*», producen verdaderos encastramientos parciales, cuya importancia está en relacion con sus dimensiones. Por medio de ellas se obtiene, en consecuencia, la economía que buscaba Cadiot, no teniendo ninguno de los inconvenientes del encastramiento fijo; porque siempre es posible proveer a los arcos de tres articulaciones, para que el sistema quede siempre en libertad para amoldarse a los efectos de los cambios de temperatura.

De este modo se llega a obtener un sistema que, por lo ménos para los grandes tramos, es mas económico que los arcos ordinarios, porque se reduce el empuje i el esfuerzo se reparte convenientemente por medio del larguero.

El sistema de arcos equilibrados fué aplicado por la primera vez en el caso del viaducto de Viaur, proyectado por la «Societé de Construction des Bastignolles». La construccion de este viaducto acaba de terminarse; la línea Carmaux à Rodez, en la cual se encuentra, fué entregada a la esplotacion el 18 de Diciembre último.

Se han hecho ya otras aplicaciones: el proyecto del puente Mirabeau sobre el Sena, en Paris; el puente Troitzky sobre el Neva, en San Petersburgo; un puente recientemente construido sobre el Rio Grande, etc.

Cuando el tramo es de un largo considerable, como en el viaducto de Viaur, cuyo arco central tiene 220 metros, i que la altura sobre el suelo no permite la colocacion de

andamios, la armadura tiene que ser hecha principiando por los lados i sin apoyo en el centro. En este caso es necesario que cada pieza, o parte de pieza, tenga su posicion fijada de antemano i que quede colocado definitivamente, ántes de la colocacion de la pieza que debe seguirla. Se concibe que en una obra importante es absolutamente necesario verificar que la última pieza colocada ocupe exactamente la posicion que le esté destinada: sólo de esta manera presentará el conjunto de la construccion, a su terminacion, la forma prevista. Como el sistema es elástico, su forma varía al agregar una pieza nueva i con cada cambio de posicion de los aparatos empleados en la armadura; es preciso tomar en cuenta estas deformaciones i calcularlas para cada una de las fases de la construccion.

Este cálculo puede hacerse con grande exactitud, suponiendo que el sistema esté formado por barras articuladas, por la aplicacion del principio del trabajo virtual; pero debe ser repetido para cada uno de los puntos de los cuales se desee conocer la posicion, lo que es de una aplicacion mui larga.

Se puede proceder por medio de un simple depurado, que da, para cada variacion de la carga, la forma completa del sistema entero. En efecto, dentro de ciertos límites compatibles con la forma del sistema, las deformaciones son proporcionadas a las cargas aplicadas. Entónces, si se supone que las cargas sean n veces mayores que las verdaderas i si se dibuja el depurado en escala natural, con el largo de las barras reducido o aumentado en la proporcion de n veces las disminuciones o aumentos producidos por los esfuerzos, se tendrá un diagrama que representará el sistema deformado n veces, es decir, un depurado en que las deformaciones serán n veces mayores que en la realidad.

Pero es mucho mas sencillo dibujar el depurado a la escala de $1/n$: entónces la traslaciones serán reducidas en proporcion i en definitiva, el depurado indicará las deformaciones verdaderas, que bastará medir.

Desde 1886, fecha de los primeros estudios del proyecto del viaducto de Viaur, este método se empleaba en las oficinas de la «Societé des Batignoles».

La gran ventaja que presenta este método es que todas las deformaciones, i por consiguiente todas las flechas verticales i horizontales se obtienen inmediatamente, sin dificultad ni tanteos. No es ya necesario, pues, al buscar la mayor flecha producida por las cargas, hacer una hipótesis o un primer estudio, para determinar el punto donde esta flecha se produce.

Este depurado puede aplicarse en el caso de un sistema de barras superabundantes.

Este método no consiste, en suma, sino en la aplicacion gráfica del trabajo virtual. Ha sido empleado con motivo de la armadura del viaducto de Viaur, donde ha permitido darse cuenta de las menores desviaciones que se han producido en la posicion de las piezas. De esta manera se llegó a obtener la calzadura de este viaducto con una exactitud verdaderamente sorprendente, pues la diferencia entre la altura prescrita en la clave i la altura real no era apreciable: 1 a 2 mm.

De todas las obras actuales, entre los puentes de vigas, el puente del Forth es el que tiene mayores tramos; entre los de arco, el viaducto de Viaur es el que tiene la luz mas grande. Pero no parece dudoso que las luces actuales sean luego excedidas: los tipos de estos puentes que lo permiten ahora mismo, se perfeccionarán aun mas, fuera de esto, siguiendo las leyes del progreso.—ERNESTO LYON