

REVISTA DE OBRAS PUBLICAS

PUBLICACIÓN TÉCNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

LANZAMIENTO DE PUENTES METALICOS

POR

DON PRÓSPERO LAFARGA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

I

Importancia del problema.

El corrimiento ó lanzamiento de un puente metálico constituye una operación sumamente arriesgada, principalmente cuando la luz de los tramos y altura de la obra adquieren grandes dimensiones.

La historia de los puentes lanzados en los últimos veinte años está, desgraciadamente, llena de ejemplos de varios accidentes ocurridos en esta delicada operación, suministrando el estudio detenido de las causas que los determinasen enseñanzas prácticas que los Ingenieros deben tener muy presentes al redactar un proyecto de lanzamiento.

Exponer una por una las monografías que tenemos recopiladas de todos aquellos lanzamientos en que han ocurrido accidentes, constituiría un trabajo interesantísimo de gran utilidad, por las consecuencias que de él se derivarían; mas saliéndose la exposición detallada de estos casos particulares de los límites en que han de encerrarse estos apuntes, reduciremos nuestro trabajo á cuanto se refiere al lanzamiento del viaducto de Alcoy.

Penetrados completamente de la importancia del problema, procedimos en el corrimiento del viaducto citado á redactar previamente un detallado proyecto, al cual se ha amoldado la casa constructora interpretando fielmente las disposiciones que proponíamos.

En el lanzamiento de las vigas continuas es preciso darse cuenta exacta de los esfuerzos á que se obliga á trabajar al metal, con el fin de adoptar las medidas necesarias que eviten la rotura del tramo ó su desorganización molecular, perjudicando para el porvenir su estabilidad y duración.

En puentes de luces inferiores á 20 metros, rara vez se adopta precaución alguna, y recientemente hemos practicado el corrimiento de un tramo de esta luz sobre el río de Benilloba sin el menor esfuerzo. Mas pasando de este límite, y sobre todo para luces superiores á 40 metros, es indispensable adoptar medidas especiales si se quiere garantizar el éxito del lanzamiento.

En el viaducto de Alcoy ha sido preciso practicar el corrimiento de los cuatro tramos continuos que lo constituyen á la

respetable altura de 50 metros. De estos cuatro tramos, los dos centrales son de 44 metros de luz y los laterales ó de orilla de 36 metros.

El primer paso que hay que dar en todo proyecto de lanzamiento consiste en la determinación de los momentos flectores y esfuerzos constantes á que los tramos van á estar sometidos durante dicha operación, para compararlos después con los que resultan del diagrama que al proyectar la construcción fué preciso confeccionar, al fijar los perfiles de sus distintos hierros.

Hemos, pues, principiado por calcular el trabajo máximo del metal durante el corrimiento, cuyo estudio se ha practicado en la hipótesis muy desfavorable, ó sea para el lanzamiento de un tramo intermedio.

II

Trabajo de los tramos durante el lanzamiento.

La posición más desfavorable de la viga continua durante el lanzamiento se presenta en nuestro caso particular cuando se salva el espacio comprendido entre la segunda y tercer pila, pues entonces el tramo en voladizo alcanza su máximo vuelo, ó sea 44 metros, y el tramo que le antecede mide también la máxima luz.

Ambas circunstancias determinan en el punto de apoyo del tramo continuo en la primera y segunda pila los momentos flectores máximos.

Estos momentos se componen de dos partes: 1.^a, los debidos al peso propio de los dos tramos que preceden al volado; 2.^a, los que resultan de la influencia del tramo volado sobre si mismo y sobre los dos que le anteceden.

Los momentos flectores que los dos primeros tramos desarrollan se ha estudiado aplicando la teoría de una viga continua de dos tramos desiguales, sometida tan sólo á su peso propio.

Sean (fig. 1.^a) m_1 , m_2 , m_3 los momentos flectores desarrollados en los tres apoyos que anteceden al tramo volado.

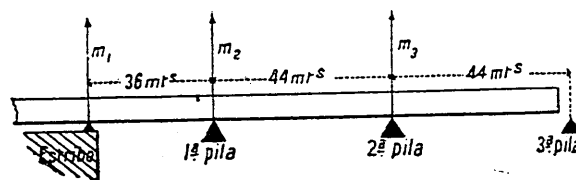


Fig. 1.^a

Sabemos que $m_1 = m_3 = 0$. Para calcular m_2 basta aplicar el teorema de los tres momentos, y llamando l_1 y l_2 las luces de

estos tramos y p_1 y p_2 el peso de las vigas por metro lineal, tendremos

$$m_2 = \frac{p_1 l_1^3 + p_2 l_2^3}{8(l_1 + l_2)} \quad (1)$$

En el proyecto que nos ocupa tenemos los datos siguientes:
Luz del tramo de orilla, $l_1 = 36$ metros; peso por metro lineal de tramo = 2.186 kilogramos.

Luz de un tramo intermedio, $l_2 = 44$ metros; peso por metro lineal de tramo, 2.168 kilogramos.

Puesto que el peso por metro lineal es sensiblemente idéntico en los dos tramos, adoptamos para valor común de esta cantidad el de 2.180 kilogramos.

Según esto, $p_1 = p_2 = \frac{2.180}{2} = 1.090$ kilogramos por metro lineal de viga.

Sustituyendo estos valores en la (1), resulta:

$$m_2 = \frac{1.090 (36^3 + 44^3)}{8(36 + 44)} = 224.540 \text{ kilogramos metros.}$$

La ley de variación de los momentos flectores en los dos tramos que estamos considerando, es la de las ordenadas de una parábola cuyo parámetro es $\frac{p_1}{2}$, siendo dicho parámetro el mismo en los dos tramos, toda vez que $p_1 = p_2$. Esta parábola ha de tener su eje vertical y ha de pasar por los puntos correspondientes a m_1, m_2, m_3 determinados anteriormente.

Tomando para escala de distancia 2 milímetros por metro y para escala de momentos un milímetro por 10.000 kilogramos metros, el valor gráfico del parámetro será:

$$\text{Parámetro} = \frac{2}{1.090} \times \frac{2^3}{0,0001} = 73,4 \text{ milímetros,}$$

y, por lo tanto, la distancia focal = $\frac{73,4}{4} = 18,3$ milímetros.

Definida esta parábola, se han construido en el diagrama adjunto las parábolas que nos dan la ley de variación de los momentos flectores debidos al peso propio de los dos tramos que preceden al volado.

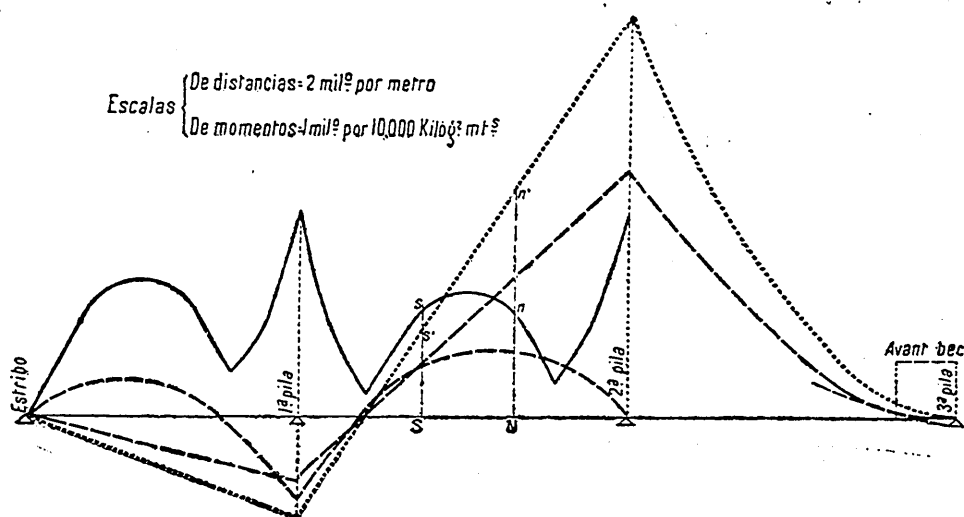


Diagrama de los momentos flectores durante el lanzamiento.

Determinados estos momentos, pasemos a calcular los debidos al tramo en voladizo.

Sea λ la longitud de la viga volada, cuyo peso por metro lineal recordaremos es $p = 1.090$ kilogramos.

La curva representativa de la ley de los momentos flectores es la correspondiente a una viga de longitud λ empotrada por uno de sus extremos, siendo su ecuación

$$m = \frac{1}{2} p (\lambda - x)^2 \quad (2)$$

que representa una parábola de eje vertical que tiene su vértice en el extremo del tramo volado.

El momento m es siempre negativo y tiene por valores límites los siguientes:

En el extremo empotrado, ó sea para $x = 0 \dots m = \frac{1}{2} p \lambda^2$

En el extremo volado, ó sea para $x = \lambda \dots m = 0$.

A medida que el tramo volado avanza, el parámetro λ de la ecuación (2) va tomando distintos valores, individualizando para cada uno de ellos una parábola de las infinitas que dicha ecuación comprende. De todas ellas, la única que nos interesa es la que se refiere al avance máximo del expresado tramo, ó sea al caso en que $\lambda = 44$ milímetros, en cuyo instante el momento flector m alcanza su máximo valor, siendo

$$m = \frac{1}{2} 1.090 \times 44^2 = 1.055.120 \text{ kilogramos métricos.}$$

Para determinar la influencia que el tramo en voladizo ejerce sobre los dos contiguos que le anteceden, basta aplicar el teorema de los tres momentos a dichos tramos, teniendo en cuenta que m_1 es igual a cero, y m_2 vale los 1.055.120 kilogramos metros que se acaban de deducir.

La aplicación de este teorema nos da

$$l_1 m_1 + 2(l_1 + l_2) m_2 + l_2 m_3 = \frac{1}{4} (p_1 l_1^3 + p_2 l_2^3),$$

y puesto que $m_1 = 0$ y $p_1 = p_2 = 0$, toda vez que la influencia del peso propio ya se tuvo antes en cuenta, tendremos que;

$$m_2 = - \frac{l_2 m_3}{2(l_1 + l_2)}$$

y poniendo valores numéricos resultará

$$m_2 = - \frac{44 \times 1.055.120}{2(36 + 44)} = - 290.158 \text{ kilogramos metros.}$$

Tomando en la escala de momentos los valores de m_1, m_2, m_3 que se concluyen de definir, tendremos las líneas quebradas marcadas con línea llena, las cuales representan la ley de variación de los momentos flectores en los tramos 1.º y 2.º bajo la influencia del tramo volado. Estas líneas pasarán todas por los primeros focos de los citados 1.º y 2.º tramos.

El momento flector que en definitiva se desarrollará en una sección cualquiera estará representado por la distancia verti-

cal existente entre la línea de influencia y la parábola de la carga permanente representada de carmin.

Así, por ejemplo, en la sección *N*, el momento será negativo y vendrá dado por nn' . En otra sección *S*, el momento será positivo y valdrá SS' .

El diagrama demuestra que la influencia del tramo volado sobre los que le anteceden es sólo apreciable en el tramo inmediato á él, sea el 2.º, siendo insensible en el 1.º

Dibujados los diagramas que representan los momentos flectores desarrollados durante el lanzamiento de un tramo intermedio, es preciso comparar este diagrama con el de los momentos flectores correspondientes al viaducto en servicio.

Este segundo diagrama se ha dibujado con tinta negra, y es una reproducción del que sirvió al proyectar el viaducto para calcular sus elementos.

El examen de estos dos diagramas nos dice que el momento flector máximo desarrollado en el lanzamiento corresponde á la sección de apoyo en la segunda pila y vale 1.055.120 kilogramos metros. Pero el momento máximo en la misma sección para el viaducto en servicio es de 561.912 kilogramos métricos, cantidad próximamente mitad que la anterior, de lo cual se desprende que durante el lanzamiento el trabajo en esta sección se duplicaría pasando de 8 kilogramos por milímetro cuadrado, á 16 kilogramos para la misma unidad.

Si se observa además la posición que ocupan las mallas del tramo al alcanzar éste su máximo vuelo, se ve que las que tienen que soportar este trabajo excepcional son precisamente las más débiles, por tener una sola chapa de espesor en sus cabezas, corriéndose el riesgo de un accidente.

Si consideramos los esfuerzos cortantes máximos desarrollados en el lanzamiento, tenemos que dicho esfuerzo vale en la sección de apoyo cuando el viaducto esté en servicio 73.504 kilogramos.

El esfuerzo máximo durante el lanzamiento corresponderá al máximo vuelo del tramo y será:

$$E = 1.090 \times 44 = 47.960 \text{ kilogramos.}$$

No es, pues, preciso adoptar en las mallas extremas precaución alguna.

El esfuerzo cortante mínimo corresponde en el viaducto en servicio á las 3 mallas centrales, las cuales están calculadas para resistir un esfuerzo de 22.304 kilogramos. Pero al apoyarse la malla sexta en el rodillo de la pila 2.ª el esfuerzo cortante es de

$$E' = 1.090 \times 24 = 26.160 \text{ kilogramos,}$$

y como dicha malla está constituida por angulares capaces de contrarrestar á razón de 8 kilogramos por milímetro cuadrado, sólo un esfuerzo de 22.304 kilogramos, se deduce que es prudente reforzar esta malla durante el lanzamiento, ó disminuir el esfuerzo cortante.

Del estudio que concluimos de exponer se desprende que el viaducto no debía lanzarse sin adoptar disposiciones que reforzasen los puntos débiles de los tramos, ó disminuyesen los momentos flectores y esfuerzos cortantes desarrollados durante el lanzamiento.

Ahora bien; teniendo en cuenta que los efectos del lanzamiento son temporales, se pueden, desde luego, admitir en esta operación valores prácticos de trabajo superiores á los que corresponden al viaducto en servicio.

La fijación de estos valores varía según los casos, debiendo quedar siempre muy por debajo del límite de elasticidad. El Ingeniero Resal admite un aumento de trabajo durante el lanzamiento de un tercio, es decir, que si el puente está calculado como en el presente caso para trabajar como máximo á 9 kilogramos por milímetro cuadrado, puede elevarse este trabajo á 12 kilogramos para la misma unidad.

III

Medios de reducir el trabajo durante el lanzamiento.

Para disminuir ó contrarrestar los momentos flectores y esfuerzos cortantes debidos al lanzamiento se ocurren los tres medios siguientes: primero, reducir la luz que hay que salvar; segundo, disminuir el peso de la parte volada; tercero, reforzar los trabajos hasta que sus secciones más débiles puedan resistir, dentro de los límites de trabajo impuestos, los nuevos esfuerzos desarrollados.

El primer medio se suele emplear cuando la altura del puente es pequeña, pues esta circunstancia permite construir económicamente palizadas que dividan la luz total en otra ú otras más pequeñas.

También se ha recurrido á este medio en viaductos de gran altura, construyendo andamios salientes sobre las pilas, como se hizo en el corrimiento del viaducto de Tardes; pero en estos casos no es recomendable el procedimiento indicado por caro y poco seguro.

El segundo medio, ó sea el de disminuir el peso de la parte volada, es el corrientemente empleado. Esta disminución puede obtenerse, bien aligerando el primer tramo de todas aquellas piezas que no perjudiquen la rigidez de las vigas principales, como largueros, placas combadas del piso, ménsulas, barandilla, etc., etc.; ó adicionando á la parte delantera del tramo otro de mucho menos peso por metro lineal, que generalmente afecta forma triangular en su alzado, y que se le denomina *pescante* ó *avant-bec*.

El tercer medio de los enumerados consiste en reforzar los tramos, aumentando su resistencia á la flexión y á los esfuerzos cortantes. Estos refuerzos no es conveniente practicarlos en los tramos mismos de un modo permanente, pues esto llevaría consigo un aumento de peso, y como consecuencia un exceso de coste. El procedimiento generalmente usado consiste en sostener el tramo volado con cables que pasan por un caballete situado sobre la sección de apoyo correspondiente al máximo vuelo. Estos cables van sujetos á dos puntos simétricos con relación á dicho caballete, y constituyen los tirantes de una gran viga armada en que el caballete hace las veces del pendolón.

En el corrimiento de tramos de gran luz se suelen combinar todos los medios indicados para disminuir el trabajo del metal durante dicha operación.

Se ha demostrado anteriormente que en el viaducto de Alcoy se habían de desarrollar durante el lanzamiento momentos flectores y esfuerzos cortantes superiores á los calculados en el proyecto de dicha obra.

Para disminuir dichos esfuerzos se empezó por reducir el peso de la parte volada suprimiendo algunas de sus piezas, y empalmado después en su extremo un *avant-bec*, cuyo efecto vamos á calcular.

Si llamamos λ' la longitud del *avant-bec* y p' su peso por metro lineal, la curva de los momentos flectores del tramo volado se compondrá de dos arcos de parábola, que se cortarán en la vertical que pasa por el punto donde empieza el citado *avant-bec*.

Las ecuaciones de estas parábolas serán:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Parábola del tramo volado.... } m = -\frac{1}{2} p (\lambda - x)^2 - \frac{1}{2} p' \lambda' (\lambda' + 2\lambda - 2x) \\ \text{Parábola del } \\ \text{avant-bec..... } m = -\frac{1}{2} p' (\lambda + \lambda' - x)^2 \end{array} \right\} \quad (3)$$

Los valores límites de m serán asimismo:

En el origen del tramo

$$..... x = 0 m' = -\frac{1}{2} p \lambda^2 - \frac{1}{2} p' \lambda' (\lambda' + 2\lambda)$$

En su extremo

$$..... x = \lambda m'' = -\frac{1}{2} p' \lambda^2$$

En el extremo del avant-bec

$$..... x = \lambda + \lambda' m''' = 0.$$

Aplicaremos estas fórmulas al caso particular objeto de nuestro estudio.

Para ello, se empezó en el viaducto de Alcoy por aligerar el primer tramo de las placas combadas del piso, andenes, volados, barandilla, tornagravas y la mitad de los largueros, con lo cual quedó reducido el peso p del metro lineal de viga a 800 kilogramos, sin quitar rigidez al conjunto.

Se proyectó, además, un avant-bec de 8 metros de longitud y 400 kilogramos de peso por metro lineal de viga.

Esto expuesto, tenemos para la aplicación de las fórmulas anteriores los siguientes elementos:

$$p = 800 \text{ kgs.}; p' = 400 \text{ kgs.}; \lambda = 44 - 8 = 36 \text{ metros}; \\ \lambda' = 8 \text{ metros.}$$

Los valores límites de m serán (fórmulas 3):

En el origen del tramo

$$..... x = 0; m' = -\frac{1}{2} \times 800 \times 36^2 - \frac{1}{2} \times 400 \\ \times 8 (8 + 2 \times 36) = -645.400 \text{ kilogramos métricos.}$$

En su extremo

$$..... x = \lambda m'' = -\frac{1}{2} \times 400 \times 8^2 = -12.800 \text{ kgs. ms.}$$

En el extremo del avant-bec

$$..... x = \lambda + \lambda' m''' = 0.$$

En el diagrama se han representado las nuevas parábolas con sus líneas de influencia.

Las mallas más débiles del tramo volado son la 7.^a y 8.^a, en las cuales sus cabezas sólo tienen una chapa de palastro de 8 milímetros de espesor, correspondiendo a estas mallas en el viaducto en servicio un momento flector máximo de 271.360 kilogramos metros, según se desprende del diagrama del proyecto. Pero el momento flector máximo a que habían de estar sometidas estas mallas durante el corrimiento es de 645.400 kilogramos metros según se deduce de la parábola de carmin correspondiente al tramo volado; luego es preciso reforzar las cabezas de las expresadas mallas.

Ahora bien; del proyecto del viaducto resulta que para la altura de 4 metros que la viga tiene, y un ancho en sus cabezas de 0,40 metros, cada milímetro de espesor de dichas cabezas resiste trabajando a 8 kilogramos por metro cuadrado a un momento de 12.800 kilogramos metros. Además, las escuadras de las dos cabezas equivalen a un espesor de platabanda de 13 milímetros.

Luego aumentando en dos chapas más, las expresadas cabezas de las mallas 7.^a y 8.^a podrán éstas contrarrestar un momento de

$$12.800 \times 37 = 473.600 \text{ kilogramos metros}$$

cuya cantidad es inferior a 645.400 en un tercio próximamente, que es lo que perseguíamos.

Como consecuencia de este estudio, se reforzaron en el viaducto de Alcoy con dos chapas de 8 milímetros las cabezas de las mallas 7.^a y 8.^a de su primer tramo.

La rotura del puente de Douarnenez durante el corrimiento

fué precisamente debida a no haberse adoptado en la parte más débil de las cabezas inferiores precaución alguna.

Hemos visto la influencia grande que la adopción del avant-bec ejerce en la disminución de los momentos flectores, pero hemos de llamar muy seriamente la atención acerca de los peligros que puede acarrear un avant-bec mal construido.

Somos desde luego contrarios a que se adicione al tramo volado el avant-bec, por lo imperfectamente que se enlazan ambos elementos. Es preferible, y así nos lo ha demostrado la experiencia, construir el avant-bec con las mismas piezas del puente, para lo cual basta aprovechar la cabeza inferior de la viga tal como está y disponer en forma triangular la primera malla, aligerando completamente la segunda o más mallas, según la longitud que se necesite, de todos los largueros y viguetas, y arrastrando simplemente los pisos superior e inferior con cruces de San Andrés. Por este medio hemos conseguido formar un avant-bec intimamente unido al tramo, toda vez que forma parte de él, sin exceder del peso por metro lineal que ha servido de base a los cálculos anteriormente expuestos.

Las caídas de puentes durante el lanzamiento por roturas del avant-bec son muy frecuentes, pudiendo citar, sin ir más lejos, la ocurrida en Julio de 1905 al correr un puente sobre el río Saona.

En Alcoy se empezó el corrimiento del viaducto con un avant-bec de 8 metros de longitud, adicionado al tramo, pero al salvar el espacio de 44 metros correspondiente al segundo tramo, y cuando el avant-bec estaba ya a punto de franquear el rodillo de apoyo en la segunda pila, comenzó a doblarse ligeramente impidiendo el movimiento del tramo, y creando una situación crítica por el temor de que al continuar la flexión pudiera romperse dicho avant-bec, poniendo en peligro el viaducto. Por medio de gatos se consiguió enderezar el avant-bec y completar el corrimiento del segundo tramo; mas el que suscribe, desconfiando de su efecto, ordenó quitarlo, sustituyéndolo por otro formado por piezas del mismo puente en la forma antes expuesta.

En el lanzamiento del tramo de orilla no es preciso hacer cálculo alguno para convencerse de que los refuerzos adoptados para un tramo intermedio, con mayor motivo responderán al expresado tramo de orilla, por ser éste de menor luz.

Es, sin embargo, necesario conocer el máximo momento flector que se desarrolla al correr el tramo de orilla, por ser éste un dato que interviene en el cálculo de la deformación de los tramos.

Este momento valdrá:

$$m_o = -\frac{1}{2} p \lambda^2 - \frac{1}{2} p' \lambda' (\lambda' + 2 \lambda)$$

en cuya fórmula $\lambda = 36 - 8 = 28$ metros $\lambda' = 8$ metros; $p = 800$ kilogramos; $p' = 400$ kilogramos, y sustituyendo y haciendo operaciones, resultará:

$$m_o = -416000 \text{ kilogramos metros,}$$

cuya cantidad es inferior a la que antes nos resultó para un tramo intermedio.

Hemos también estudiado los esfuerzos cortantes que se desarrollan adoptando el avant-bec.

El máximo de este esfuerzo corresponde al apoyo en la segunda pila y será:

$$E = 800 \times 36 + 8 \times 400 = 32.000 \text{ kilogramos.}$$

Pero el esfuerzo cortante máximo en el viaducto en servicio es, en la misma sección, de 73.504 kilogramos; luego no es preciso adoptar precaución alguna.

En las tres mallas centrales, los angulares de su celosía se dijo ya que están calculados en el viaducto en servicio para un esfuerzo cortante mínimo de 22.304 kilogramos.

En el lanzamiento con avant-bec, la hipótesis más desfavorable

rable corresponde al caso en que la última de las tres mallas centrales insista sobre la segunda pila, en cuyo caso el esfuerzo cortante vale:

$$E' = 24 \times 800 + 8 \times 400 = 22.400 \text{ kilogramos.}$$

Este resultado nos dice que tampoco las mallas centrales están expuestas á contingencia alguna.

Cuando los esfuerzos cortantes debidos al lanzamiento son superiores á los que las diagonales pueden resistir, es preciso evitar la flexión lateral de éstas, y con dicha flexión el alabeo de las vigas.

Para ello basta acodalar las dos cabezas con pares de tablo- nes de suficiente escuadría, de modo que la celosía quede com- prendida entre ellos. Cada par de tablo- nes se enlaza con tacos y tornillos. Esta sencilla disposición da gran rigidez al alma de las vigas, resultando sumamente económico el refuerzo.

En vigas de grandes mallas con montantes comprimidos y diagonales estiradas de los tipos Pratt ó Linville, es siempre preciso este refuerzo durante el lanzamiento, pues la circuns- tancia de ser barras planas las diagonales hace que inevitable- mente se doblen, de no reforzar provisionalmente con montan- tes de tablo- nes los grandes claros que separan los montantes metálicos de esta clase de vigas.

IV

Detalles que deben tenerse en cuenta en todo lanzamiento.

Cálculo de las flechas.—Reforzados los tramos que se han de correr con arreglo á las bases que del estudio anterior se deri- van, es preciso calcular la flecha máxima que tomará el extre- mo del tramo volado, no sólo con objeto de dar á éste la inclina- ción necesaria para evitar que en el lanzamiento vaya á tropez- zar con las pilas, sino que también para que al medir las flechas que vayan resultando, sepamos si éstas están dentro de los lí- mites calculados, ó si, por el contrario, por lo excesivas anun- cian algún peligro en la estabilidad del tramo.

Las flechas se han calculado por medio de las fórmulas si- guientes:

En un tramo

$$\left. \begin{array}{l} \text{intermedio... } f = \frac{l}{24EI} (-8m_3 - 4m_2 - pl_2) + \frac{p\lambda^4}{8EI} \\ \text{En el tramo de} \\ \text{orilla..... } f = 0.2428 \frac{p\lambda^4}{EI} \end{array} \right\} (4)$$

en cuyas fórmulas $l = 44 \text{ mm}$; $E = 1,6 \times 10^{10}$, $I = 0,09344$.

En cuanto λ , se deduce su valor con la condición de que

$$\begin{aligned} m_2 &= -\frac{1}{2} p \lambda^3 \text{ para el tramo intermedio} \\ m_0 &= -\frac{1}{2} p \lambda^3 \text{ para el tramo de orilla.} \end{aligned}$$

El valor de m_2 es el del momento flector desarrollado en la segunda pila, teniendo en cuenta el empleo de *avant-bec*, cuyo momento recordaremos es

$$m_2 = 645.400 \text{ kilogramos metros.}$$

El valor de m_2 es igual á 185.000 kilogramos metros, según se deduce de las líneas de influencia marcadas en el diagrama.

Por último, m_0 es el momento flector máximo obtenido en el lanzamiento del tramo de orilla y vale, como se demostró antes,

$$m_0 = 416.000 \text{ kilogramos metros.}$$

Los valores que resultan para λ son los siguientes:

$$\begin{array}{ll} \text{Para un tramo intermedio.....} & \lambda = 40 \text{ metros.} \\ \text{Para el tramo de orilla.....} & \lambda = 32 \text{ metros.} \end{array}$$

Poniendo los valores de m y λ en las fórmulas (4) se obtienen para f los siguientes valores:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Flechas teó-} \\ \text{ricas.....} \end{array} \right\} \begin{array}{ll} \text{Para un tramo intermedio. } & f = 0,178 \text{ metros.} \\ \text{Para el tramo de orilla....} & f = 0,136 \text{ metros.} \end{array}$$

Durante el lanzamiento del viaducto de Alcoy se midieron con toda precisión las flechas que resultaban, obteniéndose los resultados siguientes:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Flechas ob-} \\ \text{tenidas....} \end{array} \right\} \begin{array}{ll} \text{Para un tramo intermedio. } & f = 0,162 \text{ metros.} \\ \text{Para el tramo de orilla....} & f = 0,124 \text{ metros.} \end{array}$$

Cuyos resultados se aproximan bastante á los calculados de antemano.

Desnivelación de los apoyos.—Cuando las pilas de los puentes ó viaductos sobre las cuales ha de correrse un tramo continuo, están fundadas sobre terrenos de consistencia dudosa y existe, por lo tanto, el temor, por remoto que sea, de la depresión de uno ó de varios de los apoyos, es preciso estudiar los efectos que en el trabajo del metal podría producir la desnivelación de aqué- llos, fijando el límite á partir del cual esta desnivelación podría resultar peligrosa.

En nuestro caso particular, no era de temer tal contingencia por las excelentes condiciones en que está fundada la obra, pero en aquellos casos en que no exista esta confianza, debe practicarse este estudio.

Acción del viento.—En los valles enfilados á los vientos fuertes deben adoptarse las medidas necesarias para evitar que en el corrimiento pueda ser volcado el puente. El desastre del puente de Tardes fué debido á esta causa.

El Ingeniero Resál demuestra que el viento, al hacer oscilar la parte volada, determina un esfuerzo constante cuádruple del que tendrá que soportar el puente una vez en servicio, y un mo- mento flector doce veces mayor.

En general, las secciones de las cabezas de las vigas son su- ficientes para contrarrestar la flexión debida al viento. En cam- bio las piezas del arriostramiento horizontal son débiles. En Al- coy llegaron á doblarse ligeramente estas piezas, lo cual no es de extrañar, pues son barras planas, por haberse calculado este arriostramiento como una viga sistema Pratt de montantes comprimidos y diagonales estiradas. Esta enseñanza nos per- mite aconsejar que en aquellos puentes que deban correrse, el arriostramiento horizontal debe calcularse para aquella opera- ción huyendo de los hierros planos y adoptando secciones perfi- ladas para las diagonales.

Para evitar las oscilaciones del tramo volado se debe sujetar su extremo por medio de cables á puntos fijos de la ladera situa- dos á nivel con el puente.

El viento puede también desplazar el tramo sobre los rodi- llos que le sirven de apoyo, y para evitarlo, lo mejor es suspen- der el lanzamiento cuando el viento es muy fuerte, y por medio de un castillete de traviesas ó pedazos de tablón, calar con cuñas dichos tramos hasta que insistan sobre este castillete.

Rodillos de lanzamiento.—Durante el lanzamiento los distintos puntos de la cabeza inferior deben soportar todo el peso de la parte volada en el instante en que pasan sobre el rodillo coloca- do en la pila.

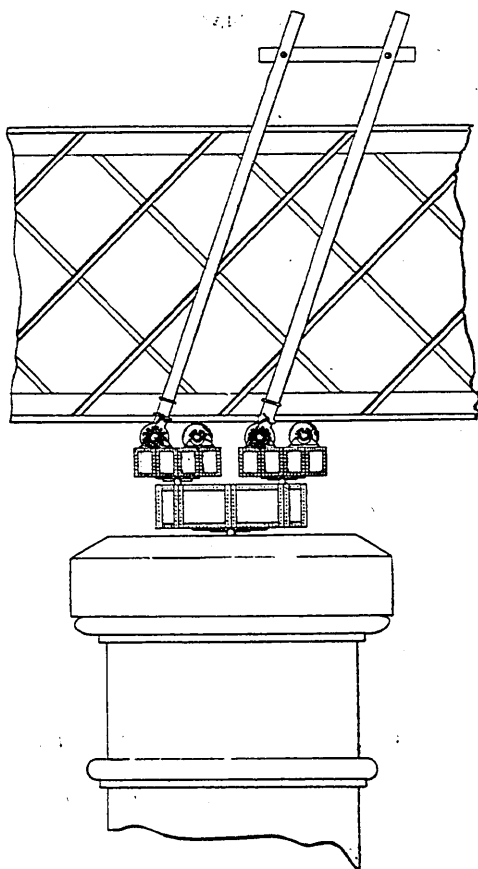
En las celosías modernas, en las cuales la triangulación es de grandes mallas, se verifica, que el peso total se transmite, en un momento dado, al punto medio de la porción de cabeza infe- rior comprendida entre dos nudos consecutivos, obligando á di- cha cabeza á trabajar por un lado á la compresión simple, como formando parte de la estructura del puente, y por otro á la fle- xión al considerarla como una viga aislada, soportando en su punto medio el peso total del tramo volado.

Este exceso de trabajo ya se ha tenido en cuenta al estudiar los momentos flectores que el lanzamiento determina, y como consecuencia de aquel estudio se procedió en Alcoy á reforzar con dos chapas de palastro las cabezas de las mallas más débiles.

Aparte de estos refuerzos se suele emplear en los lanzamientos en el punto de apoyo de los tramos sobre las pilas, en vez de uno solo, un sistema de rodillos oscilantes, sobre los cuales se reparte el peso total. El número de rodillos debe fijarse con la condición de que constantemente caiga un rodillo en las inmediaciones de un nudo.

En el viaducto de Alcoy se han adoptado cuatro rodillos, cuya disposición aparece en la figura adjunta. Cada par de rodillos

Rodillos de lanzamiento
del
Viaducto de Alcoy
Escala de 1:100



está montado sobre un eje, pudiendo oscilar alrededor de él, consiguiéndose por este medio que la cabeza inferior del tramo esté siempre en contacto con las llantas. Los balancines correspondientes á cada par de rodillos se apoyan á su vez en una capa de palastro que gira también alrededor de un eje fijo en la pila, resultando de esta disposición que el peso total se transmite con toda exactitud al eje de la expresada pila.

Los rodillos oscilantes que se concluyen de describir, no sólo responden á disminuir la luz que existe entre dos nudos sucesivos, sino que se emplean también para imprimir movimiento al tramo durante el lanzamiento.

Para ello se une á sus ejes una palanca que se maniobra desde el piso superior de los tramos. Esta palanca se hace solidaria á los ejes por medio de un trinquete ó carraca.

Antiguamente los corrimientos de los puentes se hacían con cables y cabrestantes. Este procedimiento está lleno de inconvenientes y peligros y va cayendo en desuso.

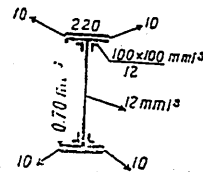
Durante el avance de los tramos, los sirve de guía la calle que forman las dos hileras de roblones que comprenden los rodillos. Es, pues, preciso que la llanta de éstos, no sólo quepa dentro de dicha calle, sino que deje un huelgo de un centímetro, por lo menos, por cada lado.

Para corregir las desviaciones que en su dirección puedan sufrir los tramos, basta interponer una cuña de hierro entre un roblón y la llanta del rodillo, con cuyo obstáculo no tardan aquellos en recobrar su verdadera dirección.

Los distintos palastros de la cabeza inferior dan lugar á escalones que se salvan poniendo una cuña de unos 15 centímetros de longitud, del ancho de la llanta del rodillo, y del espesor del palastro que forma el escalón. Esta cuña no debe ponerse á tope en el escalón que se trata de salvar, sino separada de él un centímetro, con objeto de dejar suficiente espacio al alargamiento que sufre la cuña por efecto del laminado á que se la somete.

Descenso de los tramos.—Lanzado el viaducto, era preciso quitar las capas de rodillos oscilantes que sirvieron para el lanzamiento, y sustituirlas por los rodillos definitivos que habían de quedar en la obra.

Para llevar á cabo esta operación, fué ante todo necesario proporcionar á los gatos que habían de sostener los tramos sólidos puntos de apoyo, y para ello se sustituyeron los montantes del arriostramiento inferior situados encima de cada pila, por vigas de I. Esta sustitución se hizo, como es lógico, antes de principiarse el lanzamiento.



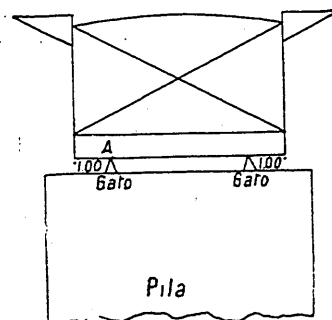
Estas vigas se calcularon del modo siguiente:

Peso de un tramo = $44 \times 2.000 = 88.000$ kilogramos.

Carga correspondiente á cada gato = 44.000 kilogramos.

Punto de aplicación del gato; á un metro de las vigas principales.

Momento flector en A = $Pl = 44.000 \times 1 = 44.000$ kilogramos metros.



Adoptando la sección adjunta se tiene:

$$R = \frac{M}{I} = \frac{44.000}{0,0054} = 8 \text{ kilogramos por mm.}^2$$

Peso por metro lineal = 213 kilogramos..

Los gatos empleados eran hidráulicos, de 50 toneladas de potencia y 0,16 metros de excursión en su émbolo.

* *

Expuesta queda, en cuanto antecede, la marcha y cálculos que han presidido el lanzamiento del viaducto de Alcoy; réstanos tan sólo manifestar que la teoría ha respondido con verdadera exactitud á nuestras previsiones, coronando el éxito más completo tan arriesgada operación.

Alicante, Noviembre 1906.