

# PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS EN LA ESPERIMENTACION DE LOS PUENTES METÁLICOS

POR

MANUEL TRUCCO,

Ingeniero de los Ferrocarriles del Estado.

---

1. — Como se sabe, el cálculo usual de los puentes metálicos, por razones de sencillez, se ejecuta basándose en hipótesis que se encuentran léjos de ser satisfechas en la realidad. De aquí que los resultados sean mas o menos inciertos i que difieran a veces considerablemente de los valores verdaderos.

Principalmente son dos las hipótesis adoptadas sistemáticamente i que se apartan — i no poco — de los hechos. Una de ellas es suponer las diversas barras de la construcción como articuladas en sus extremos, considerándolas como exclusivamente solicitadas por esfuerzos cuya línea de acción coincide con el eje de dichas piezas; miéntran tanto, en la obra construida los esfuerzos actúan a menudo escéncricamente i, en vez de articulaciones, la rijidez de los ensambles realizan empotramientos, todo lo cual se traduce por esfuerzos de flexión para las barras, lo que no es tomado en cuenta por la teoría. De esa manera, una pieza que segun el cálculo es considerada como trabajando por estension simple, es decir, para la cual se obtiene un trabajo uniforme en todas sus fibras, en la realidad, debido a los fenómenos de flexión, sufrirá fatigas que varían de una fibra a otra: el máximo i el mínimo de estas fatigas pueden acusar, en una misma pieza, diferencias notables i como resultado final, en la barra en cuestión, no sólo habrá fibras estendidas, con tasas muí diversas a las indicadas por el cálculo, sino que existiran otras fibras en la que esa tension llegue aun a cambiar de signo, hecho que en la práctica se observa frecuentemente.

Otra de las hipótesis a que nos hemos referido es el no considerar debidamente la solidaridad que existe entre todas las piezas de la construcción. En la realidad el esfuerzo i la deformación sufridas por una barra es compartido por las demas con cuotas mas o menos diversas. Todas las piezas se ayudan, alivian i fatigan, pues, mutuamente. De modo que el suponer que una sola pieza, o un grupo reducido de ellas, soporta exclusiva-

mente un esfuerzo dado, equivale a admitir una sollicitacion exajerada para esas piezas i a no tomar en cuenta una causa de fatiga suplementaria para las demas.

Los esfuerzos i fatigas determinados con los métodos e hipótesis usuales de cálculo son los denominados *primarios* o *principales*; los orijinados por las causas que hemos señalado, i que no son tomadas en cuenta por el cálculo, son las fatigas *suplementarias* o *secundarias*. Como lo veremos, estas últimas no son secundarias sino en el nombre, pues a menudo son superiores a las principales.

2.—Los métodos usuales de cálculo se limitan, pues, a aproximaciones groseras que a veces, como se verá, son verdaderamente inaceptables.

En consecuencia es obvia la ventaja i conveniencia de precisar mejor los valores que alcanzan las fatigas *reales*, es decir, las que *efectivamente* soportan las piezas, i que, como se ha dicho, son mui diversas de las fatigas *teóricas* o *calculadas*, entendiéndose por estas últimas las dadas por los métodos ordinarios de cálculo.

Se puede lograr ese objeto por el análisis, planteando los problemas a que da lugar el cálculo de puentes con hipótesis mas rigurosas; pero, en jeneral, se omite hacerlo por este medio en razon de lo laborioso del procedimiento.

Para obtener las fatigas reales, mas natural i mas práctico ha parecido el recurrir a la esperimentacion directa de los puentes, o sea a la medida de las deformaciones sufridas por sus diversas piezas. Asi se observan los hechos i resultados mismos, independientemente de toda hipótesis o teoría mas o ménos sujeta a controversia; por manera que tal esperimentacion, al propio tiempo que comprueba la estabilidad de los puentes existentes, tiene ademas todas las ventajas peculiares del método esperimental aplicado al estudio de la Resistencia de Materiales: permite apreciar la exactitud de los procedimientos de cálculo empleados i, con los fenómenos observados, sujere los medios de corregirlos i completarlos.

La esperimentacion directa persigue, pues, simultáneamente dos objetivos de la mas alta importancia, cuya realizacion, sin embargo, no habia sido fácil hasta hoi obtener, subordinado como se encuentra siempre la aplicacion del método esperimental a la combinacion i perfeccionamiento de los instrumentos que le son necesarios.

Felizmente, en este camino se ha recorrido en estos últimos años una gran jornada. Desde el primer instrumento ideado por M. Dupuy, los perfeccionamientos han sido rápidos i numerosos; entre los cuales los mas importantes i conocidos llevan los nombres de los señores, Manet, Fränkel, Rabut, Van Schroeder, Mesnager, etc., a todos los cuales se debe el que hoi dia la esperimentacion de puentes se haya vulgarizado grandemente, obteniéndose los resultados con facilidad i precision.

Merced al gran perfeccionamiento alcanzado en tales instrumentos, su empieo se ha hecho obligatorio por muchas compañías, tanto en la recepcion de las obras nuevas, cuanto en las inspecciones periódicas a que el servicio de conservacion somete a los puentes en servicio.

Por tales circunstancias el caudal de observaciones en mui poco tiempo se ha hecho cuantioso i ya han podido presentarse i deducirse conclusiones del mayor interes. Resumir algunas de estas observaciones i conclusiones es el propósito que procuramos en las líneas que siguen.

3. — Hemos dicho que la experimentación directa de los puentes logra simultáneamente un doble fin: a) Verificar la estabilidad de los puentes en explotación; i b) deducir leyes que guíen la elaboración de los proyectos de las obras nuevas.

Respecto al primer punto, los servicios prestados ya por el método experimental son incalculables: han sido numerosos los puentes que según el cálculo deberían ser reemplazados, es decir, para los cuales encontraba que el trabajo del material era excesivo bajo las cargas que debía soportar, i la experimentación directa ha venido a demostrar contrariamente a las indicaciones del cálculo, que las fatigas del metal quedaban dentro de las normas prudenciales fijadas por los Reglamentos.

En otros casos ha sucedido precisamente lo contrario.

Entre los muchos ejemplos que podríamos citar al respecto, bastará recordar el del viaducto de Eauplet, sobre el Sena, en Ruan. Ese viaducto, que da paso a la línea de París al Havre, sirve un tráfico muy intenso, consta de ocho tramos de 40 m. i cada tramo es formado por cuatro arcos de fundición, con tímpanos i largueros del mismo metal. Esta obra estaba condenada por el cálculo que indicaba fatigas excesivas para el metal. La experimentación minuciosa demostró que las fatigas reales eran muy inferiores a las calculadas. El viaducto fué salvado; i con algunas consolidaciones de poca importancia, figurará, dice M. Rabut, «entre las obras más sólidas de la red del oeste. *Su reconstrucción habría costado más de cuatro millones.*»

Exactamente el mismo caso sucedió con el magnífico puente de Asnières, que consta de cinco vigas paralelas i que soporta cuatro vías. Por ese puente pasan todas las líneas que arrancan de la estación de San Lázaro, en París. «Es de todos los puentes de Francia el que produciría con su falta la más grande perturbación.» También la experimentación directa salvó a ese puente de la reconstrucción a que lo condenaba el cálculo, economizándose así mucho dinero i mayores dificultades e inconvenientes provenientes del tráfico intenso que sirve.

Son numerosos los hechos análogos. Por ésto, los más eminentes ingenieros especialistas que se ocupan de estas cuestiones están de acuerdo en que *para evitar gastos inútiles i refuerzos a veces perjudiciales, no se debe emprender consolidación alguna en la superestructura de los puentes por la sola indicación del cálculo ordinario; ni bastan, tampoco estas indicaciones para poder aceptar como satisfactorio un puente desde el punto de vista de su resistencia. En ambos casos, únicamente la experimentación directa es capaz de dar indicaciones seguras.*

4. — Con relación al segundo fin logrado por las experimentaciones a que han venido siendo sometidos los puentes metálicos, i que se refiere a las observaciones i reglas deducidas para servir de guía en la elaboración de los proyectos, para esponer el resumen de los principales hechos comprobados nos concretaremos a los tramos rectos discontinuos tratando, para mayor claridad, por separado cada uno de sus elementos.

#### A) Largueros

1. — Habitualmente se les calcula considerándolos como piezas simplemente apoyadas por sus extremos en los travesaños, atendiendo a que la deformación principal es en efecto una flexión.

Pero los esfuerzos secundarios modifican considerablemente el valor de las fatigas teóricas. Recordemos al respecto que segun el cálculo el trabajo máximo debería ser el mismo para todos los largueros de un mismo puente, cuando todos ellos son idénticos en su construccion i en sus dimensiones; sin embargo, ese trabajo difiere enormemente en la realidad. Así, por ejemplo, el trabajo calculado para los largueros del puente sobre el Meusa en Dordrecht era de 5,5 kg., miéntras que la esperimentacion anotó fatigas máximas que variaban de 2,2 a 9,2 kg. En el puente de Kuitenburg se observó que el máximo en uno de sus largueros fué de 0,4 kg., i en otro se obtuvo 10,1 kg.

Resultados análogos se han obtenido en los puentes sobre el canal de Bommel i sobre el Meusa en Rotterdam, como lo manifiesta el cuadro siguiente:

| PUENTES                 | Fatigas máximas en las hogueras |          |            |     |
|-------------------------|---------------------------------|----------|------------|-----|
|                         | OBSERVADAS                      |          | Calculadas |     |
|                         | Mas baja                        | Mas alta |            |     |
| Meusa, en Dordrecht.... | Tramo de 87,64 m.....           | 2,2      | 9,2        | 5,5 |
|                         | » de 64,54 m.....               | 2,0      | 10,4       | 5,9 |
| Lek en Kuilenburg ..... |                                 | 0,4      | 10,1       | 3,5 |
| Canal Bommel.....       |                                 | 0        | 6,6        | 3,3 |
| Meusa en Rotterdam....  | Tramo de 87,40 m.....           | 1,6      | 7          | 4,7 |
|                         | » de 64,54 m.....               | 2,0      | 7,4        | 5,0 |

Esas esperiencias indicaron tambien que en la cabeza superior de los largueros, ademas del trabajo por compresion, se desarrolla un lijero trabajo de estension; así como en la cabeza inferior se anotaron trabajos de compresion ademas del de estension. En el cuadro anterior no se han consignado los trabajos de signo contrario.

En el puente Bommel, en una cabeza superior de larguero no se encontró sino indicacion de estension, lo que esplica el cero del cuadro anterior.

De 831 medidas hechas en las cabezas inferiores de los largueros del puente de Kuilenburg, el 1% de ellas indicaron trabajos inferiores a 2 kg. por milímetro cuadrado, el 90% indicaron de 2 a 4,9 kg. i el 9% registraron 5 kg. o mas. Esas cifras i las obtenidas para las cabezas superiores de los largueros del mismo puente Kuilenburg se encuentran en el cuadro que sigue:

|                         | Menores<br>de 2 kg. | 2 a 4,9 kg. | 5 kg. o mas |
|-------------------------|---------------------|-------------|-------------|
| Cabezas inferiores..... | 1%                  | 90%         | 9%          |
| » superiores.....       | 6%                  | 73%         | 21%         |

En la cabeza inferior de los largueros del puente de Kuilenburg el trabajo máximo ha variado de 1,1 a 7,5 kg. por milímetro cuadrado, mientras que en la cabeza superior, como se ha indicado, ese trabajo fluctuó entre 0,4 i 10,1 kg.

El trabajo máximo mas alto (10,1 kg.) i la cuota 21% indican que la cabeza superior del larguero sufre mayores fatigas. Debemos observar desde luego que en el puente de Kuilenburg el riel se encuentra con 15 cm. de excentricidad, hácia el interior, respecto al eje del larguero.

2. *Deformaciones secundarias.*—Se ve, pues, la importancia de los esfuerzos secundarios, que corresponden a las deformaciones secundarias.

El estudio metódico de estas deformaciones secundarias ha hecho ver que los mas importantes son dos:

1.<sup>a</sup> *Alargamiento* o acortamiento de los largueros segun que se trate de vía inferior o superior.

Bajo la accion de las cargas una de las cabezas de las vigas principales sufre un alargamiento i la otra un acortamiento. Por intermedio de los travesaños, la deformacion de la cabeza a la cual se ensamblan esas piezas es transmitida a los largueros. De aquí que éstos esperimenten la deformacion secundaria que hemos apuntado i que fué señalada por primera vez por M. Dupuy.

2.<sup>a</sup> *Torsion* del larguero en torno de su eje longitudinal, deformacion que se produce siempre que los rieles no se encuentran exactamente a plomo del eje del larguero. Esta deformacion fué señalada por primera vez por M. Rabut.

Las experiencias siguientes manifiestan el efecto de la excentricidad del riel.

En el viaducto sobre el Creuse, el riel va sobre longuerina de madera i su excentricidad es de 20 mm.

La lectura de las fatigas dió (fig. 1):

|                                |             |
|--------------------------------|-------------|
| Aparato núm. 1.—Estension..... | 9,50 kg/mm. |
| » » 2 » .....                  | 3,00 »      |

La fatiga en una de las alas es mas de tres veces mas fuerte que la de la otra.

En la línea de Limoges a Angulema se tomó el caso de rieles sobre durmientes. Uno de los rieles se encontraba a plomo del larguero i el otro con 15 mm. de exentricidad (fig. 2.)



Fig. 1

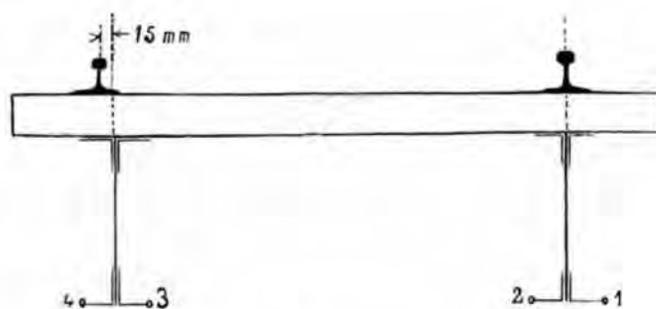


Fig. 2

Se obtuvo:

|                |             |       |                          |
|----------------|-------------|-------|--------------------------|
| Aparato núm. 1 | - Estension | ..... | 4,25 kg/mm. <sup>2</sup> |
| »              | »           | 2     | »                        |
| »              | »           | 3     | »                        |
| »              | »           | 4     | »                        |

Lo que hace resaltar que no se produce torsion en el larguero en que no hai exentricidad del riel. En el larguero en que esta exentricidad existe, la torsion es mas pronunciada en el caso de longuerina que en el de durmiente, debido a la rijidez de éste, lo que indica que a este respecto es preferible el durmiente i mui particularmente deberá recurrirse a él para los puentes en curva, en donde la exentricidad es inevitable.

3. *Influencia de los rieles i longuerinas.*— Cuando no hai exentricidad en la colocacion del riel, mas ventajoso es el empleo de las longuerinas de madera por la influencia favorable tan eficaz que, junto con el riel, ejercen en la resistencia de los largueros, como lo demuestran las esperiencias practicadas en los siguientes puentes:

1. *Puente Cosquer*

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| Luz del larguero.....       | 1,79 m.     |
| Secc. de la longuerina..... | 35 x 15 cm. |
| Trabajo observado.....      | 3,30 kg.    |
| » calculado.....            | 6,65 kg.    |
| Reduccion obtenida.....     | 50%         |

2. *Puente de los Hingleux*

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| Luz del larguero.....       | 1,48 m.     |
| Secc. de la longuerina..... | 25 x 15 cm. |
| Trabajo observado.....      | 1,00 kg.    |
| » calculado.....            | 9,75 kg.    |
| Reduccion obtenida.....     | 90%         |

3. *Puente de 9,60 m. (Burdeos. — La Sauve.*

|                              |             |
|------------------------------|-------------|
| Luz del larguero.....        | 1,60 m.     |
| Secc. de la longuerina. .... | 33 x 16 cm. |
| Trabajo observado.....       | 5,83 kg.    |
| » calculado.....             | 11,16 kg.   |
| Reduccion.....               | 47%         |

4. *Puente sobre el canal de Berry a Montluçon*

|                             |             |
|-----------------------------|-------------|
| Luz del larguero.....       | 1,852 m.    |
| Secc. de la longuerina..... | 30 x 10 cm. |
| Trabajo observado.....      | 4,12 kg.    |
| » calculado.....            | 7,70 kg.    |
| Reduccion.....              | 46%         |

En estas condiciones, pues, no se deben reforzar los largueros por las solas indicaciones del cálculo.

4. *Influencia de las juntas de los rieles.*—Cuando se emplean aparatos inscriptores del trabajo, se ve que éste aumenta bruscamente cada vez que pasa una rueda sobre la junta del riel. Para hacer mas sensible el efecto de la junta, M. Rabut sometió a la esperiencia un puente de pequeñas dimensiones, atendiendo que el efecto del choque está en razon inversa de la masa que lo recibe. Elijió el viaducto de Méautis, de 4 m. Se colocaron en él los rieles de modo a tener una junta en el medio de la luz; se hizo variar la abertura de esa junta de 0 a 30 mm. i aun se la suprimió por completo empleando un riel sin interrupcion.

En tales condiciones, haciendo pasar la locomotora a 80 km. de velocidad se triplicó la flecha estática con la junta de abertura normal; reduciendo a cero la abertura, la flecha estática se duplicaba; i aumentando la separacion a 20 o 30 mm., se llegó a quintuplicar la flecha estática.

Hai, pues, ventaja en reducir i, si fuera posible, en suprimir las juntas de rieles.

Prácticamente se puede reducir a casi cero o a 1 mm. la separacion de los rieles en los puentes. La esperiencia ha manifestado, en efecto, que la dilatacion de los rieles i la del tablero se compensan sensiblemente en la realidad.

Debemos recordar que en Chile no se emplea, como en Francia, un dispositivo especial que facilite la dilatacion de los rieles a la entrada i salida de los puentes; i lo dicho anteriormente parece demostrar de nuevo la conveniencia de esos sistemas, principalmente para las luces importantes.

El efecto de las juntas de los rieles se hace sentir tanto en las vigas como en el tablero.

En las esperiencias practicadas en Holanda, el señor Kist observó tambien el efecto pronunciado que las juntas de rieles ejercen sobre el larguero, cuando la junta está apoyada en un durmiente (puente del Meusa en Rotterdam); pero cuando la junta cae entre dos durmientes (puente Dordrecht, Kuilenburg, Bommel) no ha notado aumento en el trabajo de los largueros como consecuencia de la junta de los rieles.

5. *Efectos dinámicos.*—En una via en perfecto estado, con juntas de 1 mm. i con ruedas bien torneadas, M. Rabut encontró que en los puentes la fatiga máxima debida al paso del tren a gran velocidad es igual a la fatiga producida por el tren sin velocidad, aumentándola en 59% para 4 m. de luz; en 20% para 8 m. i en 10% para 12 m.

El exámen de numerosísimos diagramas le ha dado

$$m = \frac{1}{1 + \left(\frac{l}{4}\right)^2}$$

como fórmula representativa de la tasa de aumento  $m$ , en funcion de la luz  $l$  de la pieza, como efecto de la accion dinámica.

6. *Remaches.*—Las acciones secundarias que experimentan los largueros repercuten en los remaches que lo ensamblan a los travesaños. Por ésto es que dicho ensamble es el punto por lo jeneral mas débil de un puente: el deterioro mas rápido se verifica casi siempre en los remaches que unen los largueros a los travesaños.

En el viaducto de Busseau d'Ahun, durante un mismo período, el número de remaches que hubo necesidad de renovar fué:

|   |       |
|---|-------|
| En el ensamble de los largueros con los travesaños..... | 152 % |
| En el ensamble del travesaño con las vigas.....         | 22 %  |

Para aliviar los remaches del ensamble del larguero se recomienda hacer efectiva la continuidad de esas piezas o de sus platabandas, dispositivo que se empleó en el puente de Kuilenburg con los mejores resultados: despues de treinta años una inspeccion minuciosa comprobó que el ensamble así constituido estaba en perfecto estado, siendo mui diferente el resultado obtenido en los otros puentes holandeses en que no se consultó la misma disposicion. Este sistema de ensamble para los largueros tiene, pues, positivas ventajas i tiende a jeneralizarse: se ha adoptado en la Compañía del Oeste; en los puentes sobre el Isle, en Cognac i sobre el Auvézère, en Mouney, de la Compañía de Orleans; en el viaducto des Fades, etc.

A menudo sólo bastará hacer efectiva la continuidad de la platabanda superior, principalmente cuando la deformacion secundaria mas importante del larguero es un alargamiento i su cabeza inferior va ensamblada al arriostamiento trasversal.

M. Lanna cree, sin embargo, que la continuidad de los largueros puede aumentar el trabajo de los remaches que ensamblan los travesaños a las vigas principales, particularmente cerca de los extremos de éstas. Estima preferible cubrir el tablero con chapas metálicas sólidamente unidas a las platabandas de las vigas, a los travesaños i a los largueros. Es interesante mencionar esta opinion, aun cuando entre nosotros esté mui léjos el día en que la construccion de puentes pueda hacerse cargo de ella.

7. *Seccion disimétrica.*—Si se tiene presente que la cabeza superior de los largueros por lo jeneral trabaja mas; que en ella son mas pronunciados los efectos dinámicos; que la exentricidad del riel tiende a cerrar las escuadras provocando a veces rasgaduras en la arista de union de sus dos ramas; que el esfuerzo horizontal de *lacet* es tambien mas sensible en la cabeza superior, se hallará acertada la disposicion adoptada en algunos puentes de consultar una platabanda superior suficientemente ancha aun cuando sea necesario recurrir a una seccion disimétrica, con cabeza inferior bastante mas reducida que la superior.

B) *Travesaños*

1. *Cálculo.*—Suele admitirse a menudo en el cálculo ordinario de los travesaños que hai empotramiento mas o ménos imperfecto en el ensamble de esas piezas con las vigas. Sin embargo, en el caso de tablero inferior i vigas sin arriostamiento superior, M. Lanna no ha comprobado en ninguna ocasion el mencionado empotramiento: los aparatos indicadores han marcado siempre esfuerzos del mismo signo en todo el largo de las platabandas; no hai entónces inflexion en la curvatura del eje neutro.

En el caso indicado, en que no existe arriostamiento superior i el piso es inferior, al mismo tiempo que se flexionan los travesaños, las vigas se inclinan tambien hácia el interior sin oponer resistencia sensible a la deformacion de los travesaños.

Segun M. Lanna, cuando hai dos arriostamientos i los travesaños se ensamblan en montantes mui ríjidos, probablemente la deformacion del travesaño es resistida por las vigas, verificándose talvez un empotramiento que deberá ser tomado en cuenta, pero no tiene esperiencias al respecto.

Por su parte, los injerieros holandeses han encontrado que en los puentes de Bonmel, sobre el Wahal, i de Moedjijk, sobre el Hollandsk Diep, las tensiones principales están comprendidas entre las que resultan de las hipótesis del empotramiento i del simple apoyo.

2. *Deformaciones secundarias.*—La deformacion principal es una flexion vertical. Las deformaciones secundarias mas importantes son dos:

1.<sup>a</sup> Una flexion horizontal que es la consecuencia del alargamiento o acortamiento de las cabezas de las vigas. En efecto, en su deformacion estas cabezas tienden a arrastrar o desplazar consigo los extremos del travesaño; miéntras que los largueros se oponen a ese desplazamiento jeneral paralelo de los travesaños, reteniéndolos en dos puntos centrales.

Así se produce la flexion horizontal de los travesaños, que suele ser mui importante i que es máxima en los travesaños extremos.

Segun M. Rabut i otros esperimentadores, en esa flexion horizontal los travesaños dirijen su convexidad hácia el medio del tramo; pero en las esperiencias holandesas se ha observado que, por lo jeneral, esa convexidad se presenta hácia el extremo de los apoyos fijos, aumentando, de consiguiente, la flecha desde los apoyos fijos hácia el apoyo móvil.

Los injenieros holandeses espresan tambien que el sentido del movimiento de los trenes influye en la flexion horizontal de los travesaños: esta flexion aumentaria cuando el tren va del apoyo fijo hácia el apoyo móvil, i disminuiria para la marcha contraria, I aun consignan que para este último movimiento los travesaños vecinos al apoyo fijo se flexionan en sentido contrario.

Respecto a estas observaciones de los injenieros holandeses, no nos ha sido posible encontrar el detalle de las esperiencias en que se apoyan;

2.<sup>a</sup> La segunda deformacion secundaria es una torsion del travesaño, inclinándose la pieza hácia el larguero mas cargado.

3. *Proximidad de los largueros.* — A medida que la separación de los travesaños es menor, con mas eficacia se ayudan i alivian mutuamente esas piezas.

Las experiencias de M. Lanna hacen ver que para:

|                       |                                       |
|-----------------------|---------------------------------------|
| separación de 1,50 m. | el trabajo real es 0,45 del calculado |
| »      2,50    »      | »      »      0,60      »             |

Para la separación de 3,50 m. el trabajo real es sensiblemente igual al trabajo teórico

### *C) Cabezas*

1. La experimentación de los puentes Lathan (Lo Fleche a Saumur), Sully (Bourges a Boune-la-Rolande), Cosquer (Quimper a Pont l'Abbé), Arnou (Vierzon a Châteauroux), Lorient sobre el Scorff, etc., ha mostrado, sin escepciones, que en el caso de tablero inferior trabaja mas la cabeza superior que la inferior, lo que se explica por la intervencion de los largueros en el alargamiento de la cabeza inferior, a quien alivian.

La experimentación revela tambien que en la cabeza superior trabajan mas las fibras estremas exteriores que las interiores, cuando el piso es inferior, lo que se debe a que los travesaños al flexionarse provocan la inclinación de las vigas hácia el interior, aproximándose las cabezas superiores entre sí. Pero esta deformación de las cabezas superiores no es uniforme, por no ser igual la flexión en todos los travesaños i por la mayor resistencia que en los estremos opone la gran rijidez de esos montantes. Por esto, las cabezas superiores se aproximan mas la una a la otra en el centro de la luz

Para combatir esa deformación se recomienda remachar una escuadra suplementaria a lo largo de las platabandas superiores, hácia su borde exterior, cuando no existe arriostramiento superior.

2. En el caso de vía inferior, por la intervencion de los largueros en el trabajo de las cabezas inferiores de las vigas, éstas trabajarán ménos i el larguero mas de lo supuesto en el cálculo. Segun esto, convendrá corregir el cálculo disminuyendo la cantidad de metal en la cabeza inferior de las vigas i aumentándola en los largueros.

Cuando el piso es superior, el fenómeno indicado se desarrolla en la cabeza superior en vez de la inferior.

### *D) Diagonales*

1. El cálculo ordinario supone a estas barras solicitadas por estension o compresion segun su eje de figura.

Las deformaciones secundarias mas importantes que en ellas se observan son dos: flexión en el plano longitudinal de la viga i flexión en sentido trasversal.

La flexión en el plano longitudinal proviene del alargamiento de la cabeza inferior, sortamiento de la superior, i rijidez de los ensambles que no permiten la variación de los ángulos.

La flexión transversal es debida a dos causas principales: 1.<sup>a</sup> a la excentricidad de los esfuerzos, que no actúan según el eje de las barras; 2.<sup>a</sup> a la flexión de los travesaños que hace inclinarse a las vigas. Estas dos causas pueden agregarse la una a la otra o actuar en sentido opuesto. Se verifica lo primero cuando las diagonales estendidas van al lado exterior del alma i las comprimidas al interior. Lo segundo sucede con la disposición inversa.

2. Tales esfuerzos secundarios suelen alcanzar valores excesivamente altos i a menudo son muy superiores a los esfuerzos principales, particularmente cuando el ancho de la barra es grande, puesto que esas piezas forzosamente deben obedecer a las deformaciones longitudinales de las cabezas i en consecuencia la fatiga que de tal deformación se deriva para las barras es proporcional a su ancho. Según esto, el aumentar el ancho de las diagonales, como se hace frecuentemente, produce un efecto contrario al que se persigue.

Para los esfuerzos en las diagonales M. Lanna ha medido los siguientes valores expresados en por ciento de la fatiga teórica:

a) Puente de 12,60 m. de luz, línea de la Flèche a Saumur; 1 vía inferior; altura entre platabandas: 1.887; tipo de la viga: montantes i cruces de San Andres; 8 paños.

En el paño quinto se obtuvo para el trabajo máximo observado en las diagonales:

Cerca del cruzamiento de las dos barras:  $137\%$  del trabajo teórico

Cerca del ensamble con las cabezas:  $168\%$  del id. id.

b) Puente sobre el canal del Loing: 1 vía inferior;  $l=26$  m.;  $h=2,60$  m.; 10 paños; montantes i cruces de San Andres.

En el tercer paño, la relación encontrada fué:  $156\%$

c) Puente sobre el canal de Orleans: 1 vía inferior;  $l=30$  m.; 10 paños; celosía cuádruple con montantes:

Para el trabajo máximo en una diagonal comprimida del cuarto paño se encontró:  $116\%$

d) Puente Sully sobre el Loira: 7 tramos continuos; para los dos tramos extremos:  $l=53,50$  m.; para los 5 tramos intermedios:  $l=60$  m.; celosía cuádruple sin montantes.

En el medio del segundo tramo, se encontró:  $124\%$

e) Puente en N.—M. Mesnager halló:  $300\%$

f) Puente Cosne, tipo en N;—M. Dupuy obtuvo:  $226\%$

En resumen, el trabajo máximo en las diagonales ha resultado ser:

1.º En los puentes con cruces de San Andres:  $156$  a  $168\%$  del trabajo teórico.

2.º En el caso de celosía cuádruple con montantes:  $116\%$  del id. id.

3.º En el » » » sin montantes:  $124\%$  del id. id.

4.º En el tipo en N:  $229$  a  $300\%$  del trabajo teórico.

Lo que indica que el tipo de viga recta más recomendable es el de celosía múltiple con montantes. Las experiencias sobre los viaductos de Bezons dieron conclusiones análogas.

Segun M. Rabut, se explica que los esfuerzos secundarios sean ménos fuertes en las diagonales de celosías múltiples por la menor rijidez de sus barras.

3. El tipo en N resulta ser el mas defectuoso i sin embargo es uno de los mas empleados, por ser mas lijero i presentar mayores facilidades en su armadura cuando ésta se ha de efectuar sobre puente de servicio.

M. Mesnager ha procurado disminuir los esfuerzos secundarios del enrejado en N para aprovechar sus ventajas. Con ese fin, conserva a las diagonales su seccion máxima en la parte central; pero cerca de sus ensambles extremos la reduce a una simple chapa con una flexibilidad conveniente, dispositivo que sometió a ensayos directos en el laboratorio de la Escuela de Puentes i Calzadas i que dió buenos resultados, lo que determinó a la Compañía de Orleans a construir segun ese sistema el puente sobre el Beuvron, línea de Saint Aignan a Blois, de 40 m. de luz, para via estrecha de 1 m.

Los travesaños eran articulados en el eje de las vigas.

En las pruebas reglamentarias de la recepcion de dicho puente, se le sometió a una minuciosa esperimentacion con aparatos Rabut.

La Comision que practicó esas experiencias era compuesta de los señores: Legay, ingeniero de los puentes i calzadas encargado del control; Olivier, ingeniero a cargo de la construccion de la línea, i Lanna, inspector del material fijo en la Compañía de Orleans.

Las conclusiones fueron:

1.ª Las fatigas observadas fueron siempre del mismo signo que las calculadas;

2.ª Las fatigas reales son absolutamente comparables a las teóricas.

I se agrega: «esos resultado no han sido jamas obtenidos en las experiencias hechas sobre puentes remachados del tipo ordinario: parece, pues, que el sistema de M. Mesnager hace desaparecer la casi totalidad de los esfuerzos secundarios:

En ningun punto de las diagonales el trabajo observado en las mencionadas experiencias se ha alejado en mas de un 25% del trabajo teórico.

4. En vista de los resultados obtenidos, M. Lanna recomienda el tipo en N, sistema Mesnager, para tramos discontinuos; i en los demas casos la celosía múltiple con montantes.

Con los ensambles rijidos, la viga no puede flexionarse sin que se flexionen las diagonales: éstas cederian, pues, a las cabezas a costa de un trabajo suplementario para el enrejado mismo. Ese esfuerzo suplementario es tanto mas importante cuanto mas rijidas sean las diagonales.

Por esto, con ensambles rijidos i diagonales rijidas tambien se obtiene corrientemente una reduccion de 25% en las flechas de las vigas.

Segun M. Rabut, los hechos observados demuestran que «el atribuir exclusivamente, como se hace en el cálculo, el trabajo de flexion a las cabezas, i el de cizalle al alma o a las diagonales, es una gran exajeracion: en realidad esas dos partes de la viga se auxilian i alivian mutuamente: los refuerzos relativos que se dan a las cabezas en el medio de la luz i a las diagonales en los extremos, son excesivos i conviene atenuarlos. La discusion de los resultados obtenidos en puentes de luces diversas, me ha conducido a admitir para tramos aislados que hasta la luz de 20 a 25 m. o de 40 a 50 m. para

vigas continuas, toda variacion en las secciones de las cabezas o de las diagonales es contraria a la estabilidad o a la economía bien entendidas.»

### *T) Contravientos*

1. Las experiencias de M. Lanna, practicadas sobre diversos puentes, principalmente en el de Puy l'Evêque i en el de Sully sobre el Loira, han demostrado que la fatiga máxima en el arriostramiento horizontal se produce bajo la accion de las sobrecargas verticales, sollicitacion para la cual, sin embargo, no se los calcula.

Así, por ejemplo, para una barra de contraviento situada en el paño medio de uno de los tramos del primero de esos puentes, el trabajo calculado bajo la accion del viento era insignificante, mientras que bajo la accion de las sobrecargas se obtuvo experimentalmente un trabajo de  $4,04 \text{ k|mm.}^2$ , lo que se explica por la participacion que toman los arriostramientos en el alargamiento de la cabeza inferior de las vigas. Hai, pues, necesidad de calcular estos arriostramientos—i mui principalmente sus remaches—tomando en cuenta la deformacion de la cabeza de la viga bajo la accion de las sobrecargas.

Como dice M. Rabut, las diagonales del contraviento horizontal se fatigan mas, puesto que alivian a la cabeza inferior: se debe quitar metal a esa cabeza i agregarlo a esas riostras: así se hace una distribucion mas equitativa i se evita que haya partes de la construccion que trabajen desproporcionadamente con las demas.

### *F) Puentes oblicuos*

La experimentacion del puente sobre el Aurance, oblicuo a  $50^\circ$  ha hecho ver que la oblicuidad cuando es considerable produce una torsion de las vigas principales que llega a cambiar el signo de las tensiones desarrolladas en la arista exterior de la cabeza superior. Los esfuerzos secundarios debidos a la oblicuidad son fuertes i escapan al cálculo ordinario. Es necesario, dice M. Lanna, evitar en lo posible los puentes oblicuos metálicos.

