

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

FUNDADA Y SOSTENIDA POR EL CUERPO NACIONAL DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

Redactor-Presidente.... Excmo. Sr. D. Eduardo López Navarro, Inspector general del Cuerpo.
Redactores..... Los Sres. Presidentes de las Comisiones regionales de Ingenieros.
 D. Antonio Sonier, Profesor de la Escuela de Caminos.
 D. Enrique Latre, Ingeniero de Caminos (Sección de Información).
 D. Manuel Maluquer, Ingeniero de Caminos del mismo Cuerpo, *Secretario*.
Colaboradores..... Todos los Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

SE PUBLICA LOS JUEVES

Redacción y Administración: Puerta del Sol, 9, pral.

REVISTA EXTRANJERA

Pruebas de los puentes metálicos (1).

El Sr. Rabut, Ingeniero Jefe de puentes y calzadas de Francia, dió en el Congreso de mecánica aplicada, que se celebró en París durante la última Exposición, una conferencia sobre las pruebas de los puentes metálicos, la cual merece ser conocida.

Debiéndose proceder en Francia, en virtud del reglamento de 1891, á la comprobación de la estabilidad de todos los tramos metálicos en carreteras y ferrocarriles, el Sr. Rabut hizo esta comprobación en los ferrocarriles del Oeste, determinando con el cálculo, para sobrecargas dadas, las deformaciones teóricas y midiendo después las deformaciones efectivas.

Estas mediciones permitieron deducir, á veces en oposición con los resultados, del cálculo la conveniencia de conservar ó de demoler las obras examinadas. Para aquéllas que se debían reforzar se determinó preventivamente la eficacia del refuerzo propuesto, aplicándolo, como ensayo, á una sola obra, si se trataba de una serie de puentes pequeños iguales, ó á una parte del tramo si se trataba de obras de arte de grandes dimensiones; con la medición de las deformaciones, hecha antes y después de la consolidación, se podía determinar la reducción obtenida en el esfuerzo unitario, y, por lo tanto, decidir sobre la conveniencia del sistema propuesto.

La deformación en un punto dado está caracterizada por seis elementos perfectamente distintos, las direcciones y las intensidades de las tres dilataciones ó contracciones principales. Pero como no se puede operar más que en la superficie, los elementos se reducen á tres; generalmente se determina la variación de distancia entre dos puntos próximos de la superficie dispuestos en la dirección de la mayor dimensión de la pieza.

Además de esta deformación lineal, en cada sección que se conside-

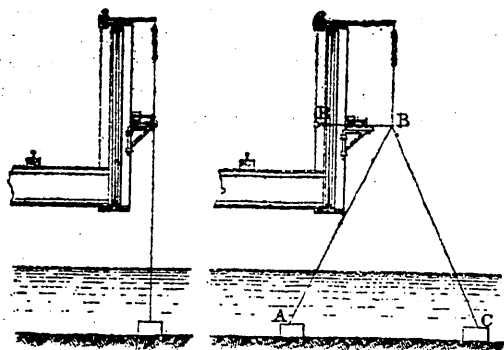


Fig. 1.ª

Fig. 2.ª

re se puede verificar un movimiento de conjunto que se puede descomponer en una traslación y una rotación.

Tres eran, pues, las mediciones de deformaciones que habían de hacerse, y para ellas se emplearon los conocidos aparatos registradores que dan una representación gráfica en los movimientos en función del tiempo.

El aparato para la medición de las flechas consiste, según el último modelo, en una punta trazadora, unida al extremo de una palanca, que obra sobre un cilindro movido uniformemente por un mecanismo de relojería. La palanca en su punto de apoyo está fija al tramo, y el otro extremo de la misma palanca está sujeto por un hilo que por un cabo se fija en tierra y por el otro se une á un resorte. Si se trata de una flecha vertical (fig. 1.ª), el resorte se fija al mismo tramo y el trazado se obtiene por movimiento relativo funcionando el hilo como si fuera una varilla fija. Si se trata de flechas horizontales (fig. 2.ª), se crea el punto fijo B estirando con el resorte R el hilo A B C y sirviéndose de este punto fijo para la maniobra del aparato.

Hay también combinaciones de hilos que permiten registrar directamente la flecha propia de una pieza determinada de la obra, es decir, el movimiento de uno de sus puntos con relación á la recta que une los puntos extremos de la fibra media. La fig. 3 muestra esta disposición aplicada á una vigueta de puente; el hilo de transmisión

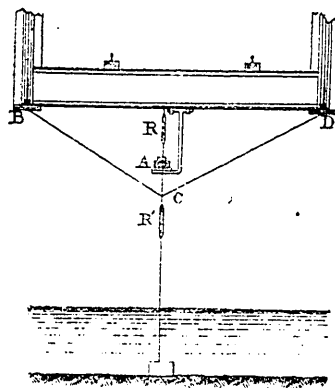


Fig. 3.ª

vertical está ligado al hierro por medio del resorte R, y al suelo mediante otro resorte R' más tenso que el otro, que atrae al hilo A B D', y hace que el punto A se fije con respecto á B D; el aparato A, fijo sobre un soporte solidario con la vigueta recibe la acción por movimiento relativo.

La sensibilidad y la precisión de este aparato registrador, permiten estudiar en el diagrama no sólo las variaciones de la flecha media, sino también las vibraciones que las acompañan.

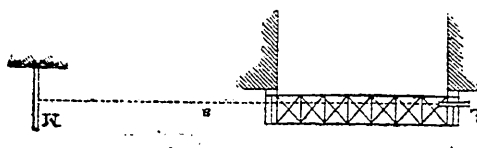


Fig. 4.ª

Para la medición de los ángulos de desviación, cuando el punto don-

(1) Giornale del Genio civile.

de la medición ha de hacerse corresponde á un apoyo, basta fijar en éste su anteojo y leer en una mira M (fig. 4), á la distancia D , la desviación H del rayo visual; el ángulo de desviación en el plano de la mira es $\frac{H}{D}$.

Cuando el punto que se estudia experimenta una traslación, se elimina su influencia, poniendo la mira perpendicularmente á la dirección de esa traslación, ó bien se emplean (fig. 5), dos miras M, M' , colocadas á las distancias respectivas D y D' ; se anotan las desviaciones H y H' , y el ángulo es $\frac{H-H'}{D-D'}$.

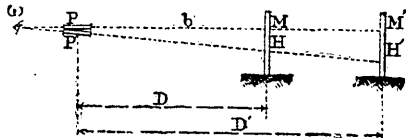


Fig. 5.

En estas mediciones se alcanza gran precisión por la ausencia de mecanismos de transmisión. Se puede, gracias á ellas, determinar la figura que toma la fibra media de una pieza deformada.

La medición de la deformación local es más delicada, puesto que, en general, se trata de centésimas de milímetro. El aparato que se usa se compone de dos partes que se fijan en la pieza que se va á examinar, á 20 centímetros una de otra, mediante tornillos de presión; á una de ellas se fija un vástago paralelo á la pieza, á la otra un cuadrante provisto de una esfera indicadora y de un sistema accionado por el dicho vástago, por medio del cual la deformación resulta multiplicada 400 ó 500 veces. Este instrumento puede llevar también aparato registrador.

El empleo simultáneo de varios aparatos de este género en la misma pieza, constituye un nuevo y utilísimo método de investigación. Aplicando, por ejemplo, un aparato á cada una de las cuatro alas de una barra de celosía en $+$, en una misma sección se obtienen variaciones iguales cuando la barra está uniformemente tendida ó comprimida según su eje y no está sujeta á flexión; en general, esta condición que se presupone en el cálculo, no se verifica; así que, además de estar la barra sujeta al esfuerzo debido á la tensión ó contracción longitudinal, lo está también á un esfuerzo secundario debido á la flexión y que puede ser mayor que el primero. Los procedimientos de cálculo que se usan no permiten determinar este esfuerzo secundario; por el contrario, su determinación es fácil experimentalmente.

Si la sección en cruz es simétrica, y las deformaciones medidas (fig. 6) son a, a' en dos alas opuestas y b, b' en las otras dos, es evidente

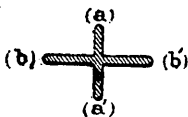


Fig. 6.

que el esfuerzo principal es $\frac{a + a' + b + b'}{4}$ y que los esfuerzos secundarios son respectivamente $\pm \frac{a - a'}{2}$ en las dos primeras alas y

$\pm \frac{b - b'}{2}$ en las segundas. Esta descomposición de la deformación total en sus elementos, permite reconstruir la figura de las piezas deformadas, de interpretar, por lo tanto, los resultados de la experiencia y de comprobar de una manera sencilla y exacta los mismos principios que sirven de base á la actual teoría de la resistencia de materiales.

La hipótesis fundamental de esta teoría es el postulado de Navier relativo á la invariabilidad de las secciones planas de una pieza deformada. Ahora, volviendo al ejemplo del hierro en cruz, hallamos que, si la figura que se forma uniendo los cuatro extremos de una sección recta permanece plana en la deformación, se deberá tener $a' + a = b + b'$. Si, pues, las cuatro mediciones hechas en las alas de la pieza hacen que se verifique esta relación, la deformación satisface al postulado de Navier; si no, este postulado falla, y se puede conocer no sólo el sentido, pero

también el valor del error que se comete admitiéndolo; indicación preciosa, porque si nadie se hace ilusiones sobre la exactitud del principio, ¿quién podría, por otra parte, conocer *a priori* el valor y el sentido del error á que da lugar?

Lo que se ha dicho para una barra de celosía de sección simétrica, se aplica también á piezas de cualquiera otra forma. Un elemento cualquiera de un puente, además de la flexión vertical, que es la deformación principal, puede experimentar una flexión, tensión ó compresión horizontal; fórmulas bastante sencillas, debidas á la generalización de las precedentemente indicadas, permiten, en todos los casos, la análisis completa de los esfuerzos totales y la comprobación del postulado fundamental.

Para el estudio de una sección dada se aplican los aparatos á todas las partes salientes; pero puede ser útil adaptarlos también á las partes planas, como, por ejemplo, á la parte dorsal de los hierros en U , para apreciar la importancia de una flexión secundaria del dicho hierro en un plano paralelo á las alas. El aparato en este caso se monta en dos trozos de hierro en ángulo, sujetos con pasadores en el dorso de la barra.

En una misma pieza hay, en general, varias secciones que estudiar; las más veces presentan las exteriores un máximo de deformación, pero se pueden encontrar también máximos en puntos intermedios, como, en el caso de un puente, en correspondencia con las juntas de los carriles.

Estas son, en suma, las reglas para el estudio de las deformaciones, haciendo abstracción de las causas que las producen. Estas causas son múltiples; pero sólo la principal de ellas, que es la sobrecarga, puede producirse á voluntad; las demás, como son: la carga permanente, las variaciones de temperatura, la acción del viento, no son susceptibles de medición directa á pesar de que su influencia puede, á veces, superar á la de la sobrecarga.

Los efectos de la carga permanente se pueden medir de dos modos diferentes. El primero es el llamado por Rabut *método del tren de prueba proporcional*. Supongamos que cargue sobre el tramo un tren cuya carga esté repartida de modo que, por ejemplo, corresponda por metro lineal al doble del peso propio de una longitud igual de tramo; evidentemente, la deformación registrada durante el experimento por un aparato montado en un punto del tramo será doble de la debida al peso propio. En la práctica, los trenes para las pruebas están compuestos de vagones uniformemente cargados, y se multiplican las deformaciones medidas por la relación entre el peso, por metro lineal, del puente y el del tren.

El otro sistema, llamado por el autor *método de las líneas de influencia experimentales*, consiste en determinar primeramente la línea de influencia de cada una de las deformaciones que hay que medir, haciendo correr sobre el puente una máquina de tipo tal que su peso se pueda equiparar á una carga concentrada. De la línea de influencia se deduce la deformación debida á la carga permanente, haciendo la suma de los pesos de los trozos sucesivos del tramo, multiplicados por las ordenadas correspondientes.

Ni el uno, ni el otro de los dos métodos es aplicable á los tramos de luz pequeña, pero en estos casos el efecto del peso propio, aun no siendo despreciable, no ofrece el interés de que se compruebe.

El efecto de las variaciones de temperatura no se podría medir sino en el momento en que se produce; además, el esfuerzo que se trata de determinar, no es proporcional á la deformación real que se manifiesta, sino, hasta cierto punto, á la deformación latente obstruccionada por los enlaces externos. Se debe, entonces, situar junto al aparato que da la deformación local D , un termómetro de contacto que señalará la variación de la temperatura θ del metal en el mismo punto; si δ es el coeficiente de dilatación del metal, el esfuerzo debido á dicha variación será proporcional á $\delta \theta - D$, considerando las deformaciones como positivas en el sentido en que la variación de temperatura tiende á producir las.

Las variaciones de flecha debidas á los cambios de temperatura que se pueden producir, especialmente por irradiación, en algunas partes de la obra, tienen á veces una amplitud comparable con las flechas producidas por las sobrecargas. Esta es una causa de error frecuentemente olvidada, y que, llega á alcanzar importancia grande cuando las pruebas de los puentes, como siempre ocurre, duran algún tiempo. Por lo tanto, no tienen valor las comprobaciones periódicas de las flechas debidas á la carga permanente hechas por nivelación; esta comprobación, añade el autor, puede resultar inútil, bastando determinar, á intervalos de tiempos determinados, la flecha debida á una misma sobrecarga.

Para medir los efectos del viento, como no se puede esperar para hacer los experimentos á queople el viento, se puede recurrir á algu-

nos artificios que permitan igualmente alcanzar el objeto. El mejor sistema consiste en operar una tracción transversal en todos los montantes. Estas pruebas son muy importantes, especialmente para los puentes colgados, en los cuales los esfuerzos más peligrosos son precisamente los del viento.

Pasando al modo de apreciar los resultados de las mediciones y de compararlos con los del cálculo, Rabut hace notar que esta comparación tiene razón de ser solamente en dos casos: cuando se trata de buscar perfeccionamientos para los métodos de cálculo y cuando se quieren discutir los límites impuestos por los reglamentos al esfuerzo unitario interno de los materiales.

A propósito de tales límites se observa que, habiendo sido establecidos sobre la base de los métodos de cálculo conocidos, no es justo aplicarlos cuando se determina experimentalmente el trabajo real del metal, siempre superior al que resulta del cálculo que sólo tiene en cuenta los esfuerzos principales y prescinde de los secundarios que pueden llegar a tener grande importancia; el límite que se debería asignar a la deformación real es el de la elasticidad del material.

Esto podría parecer atrevido a los que, no teniendo práctica en los resultados de las pruebas, no conocen el orden de magnitud de las diferencias que se encuentran entre la deformación efectiva y la teórica que resulta del cálculo, y son inducidos a considerar estas diferencias más bien como anomalías o como consecuencia de vicios de construcción, y no como efecto de la disposición de las piezas y del juego regular de las fuerzas elásticas bajo la multiplicidad de las causas que las producen.

El gran número de estas causas, en comparación con las pocas que se pueden calcular, explica el gran margen que se deja entre el esfuerzo máximo reglamentario y el límite de elasticidad, margen que no tiene razón de ser cuando, con experimentos juiciosamente llevados a cabo, se llega a medir lo que puede muy bien llamarse la *deformación total*.

Los resultados de los experimentos dan el medio de deducir, de una lógica clasificación de hechos, algunas leyes tan importantes como imprevistas, aunque fáciles de explicar.

Se nota gran diferencia entre los diagramas de los puentes para carretera y los de puentes de ferrocarril.

En el diagrama (fig. 7) tomado en un puente durante la circula-

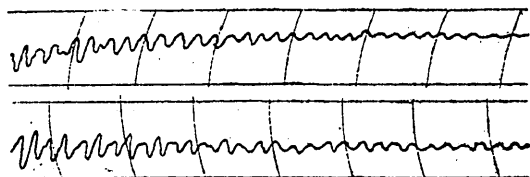


Fig. 7.ª

ción ordinaria de peatones y carruajes, se observa, además de la variación lenta de la flecha, una serie de oscilaciones que, por otra parte, se perciben pasando por el puente. Son éstas perfectamente isócronas, cuatro por segundo; su forma es regular, sinusoidal y su amplitud varía como la de la flecha, según las interferencias de la sobrecarga. Todos los puentes de caminos ordinarios tienen análogos diagramas que no difieren esencialmente, y no están caracterizados más que por el período de las oscilaciones y por la amplitud máxima de la flecha.

El diagrama de un puente ferroviario al paso de un tren directo (fig. 8.ª) muestra una serie de saltos muy bruscos que se suceden

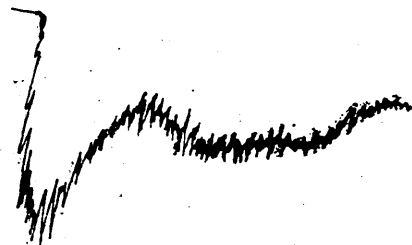


Fig. 8.ª

sin periodicidad; la flecha, propiamente dicha, va primeramente aumentando constantemente, después disminuyendo constantemente, y

termina el diagrama con algunas oscilaciones que se extinguen rápidamente.

Fácil es la explicación de estas diferencias. En el puente de un camino ordinario la sobrecarga, pequeña comparada con la carga permanente, se mueve con velocidad pequeña, y, por lo tanto, sin choques sensibles; el tramo cambia lentamente su posición media oscilando elásticamente según el período que le es propio (el de su sonido fundamental); la amplitud de las vibraciones depende sobre todo de las interferencias. En el puente ferroviario, por el contrario, la sobrecarga es siempre importante, y su velocidad grande determina choques violentos, que producen la alteración brusca de la flecha, en el momento en que ocurren, sin una verdadera periodicidad. En los puentes ordinarios la viga es la que da carácter al diagrama; en los de ferrocarril es el tren.

Estas observaciones, sencillísimas y absolutamente intuitivas, enseñan mucho, porque permiten precisar la causa que puede en cada caso producir aumento más o menos sensible en el trabajo del metal. En el puente ferroviario es la intensidad de los choques; en el puente de carretera es su periodicidad, su ritmo. Aquí la marcha acompasada de un caballo, el paso de las ruedas sobre filas regulares de losas, hechos que en sí no tienen importancia, pueden llegar a ser peligrosos si crean un ritmo y si éste está en concordancia, ó, mejor dicho, en consonancia con el ritmo del puente porque en tal caso las vibraciones del puente resultan reforzadas.

Varios experimentos confirmaron estas explicaciones. Haciendo circular por un puente un carruaje vacío a cierta velocidad, determinada por tanteos, las oscilaciones dieron una flecha muy superior a la obtenida en las pruebas reglamentarias. En otro puente, de 40 m de luz y de 15 m de anchura, con bevedillas de ladrillo, se hizo pasar un rodillo compresor de 30 ton. La figura 9 representa el diagrama obtenido.

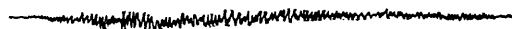


Fig. 9.ª

En seguida se hicieron pasar por el mismo puente, a paso gimnástico, 16 hombres con un peso total de una tonelada próximamente, y la flecha máxima debida a las vibraciones resultó superior a la producida por el paso del rodillo (fig. 10). Con algunos hombres más y con una



Fig. 10.ª

velocidad de marcha determinada, la flecha hubiera llegado a ser peligrosa. Hay, pues, peligro en los puentes ordinarios, cualquiera que sea su robustez, en provocar esfuerzos rítmicos aun con sobrecargas ligeras.

En los puentes ferroviarios se debe temer la intensidad del choque, que es proporcional al peso de la parte que choca, ó sea al par de ruedas con la correspondiente parte del peso del vehículo y al cuadrado de la velocidad.

Importa, pues, estudiar los medios que sirven para eliminar la causa de los choques.

Los diagramas indican que entre las numerosas causas de los choques, producidos en los puentes por el paso de los trenes, las más importantes son las juntas de los carriles y las deformaciones producidas por los frenos en las llantas de las ruedas. Respecto a la primera de estas dos causas, he aquí lo que resultó de algunos experimentos hechos por el autor.

Con una junta de ancho normal situada en medio de la luz de un tramo de 4 m recorrido por una locomotora a la velocidad de 50 km, se obtenía una flecha triple de la estática; reduciendo a cero el ancho de la junta, todavía se obtuvo una flecha doble de la estática; aumentando el ancho de la junta hasta 2 ó 3 centímetros, se llegó a obtener una flecha quintuple de la estática.

Demuestran estos resultados el interés que hay en reducir y, si es posible, suprimir las juntas en los tramos metálicos.

Mientras no se haga la soldadura de las juntas, será útil adoptar para los puentes los carriles de mayor longitud posible y hacer, en los tramos pequeños, que las juntas queden fuera del puente, puesto que aun los choques a dos ó tres metros fuera del puente influyen en la flecha.

La supresión de las juntas no puede impedir la dilatación libre de los carriles; desde luego basta considerar que el conjunto de los carri-

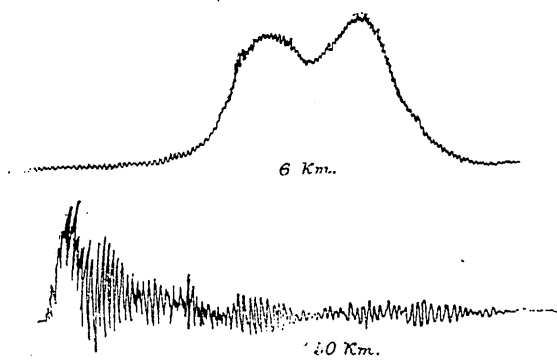


Fig. 11.

les se dilata juntamente con el puente que los sostiene. La dilatación del puente puede, en principio, no ser completa porque los carriles se calientan más fácilmente que las vigas; pero la experiencia ha demostrado que se puede reducir casi a cero, es decir, a un milímetro, la anchura de las juntas en los puentes y con esto la intensidad de los choques al paso de los trenes se reduce considerablemente.

Los cuatro diagramas de las figuras 11 y 12 ilustran los efectos del paso por las juntas.

El primero representa las variaciones de la flecha en una cabeza de viga recorrida por un tren remolcado por una locomotora eléctrica Heilmann con dos grupos de cuatro ejes muy próximos. Con la velocidad de 6 km se obtuvo la curva con dos jorobas que corresponden al paso de los dos grupos de ejes sobre una junta.

El segundo diagrama corresponde a una velocidad de 50 km. En lugar de oscilaciones insensibles, hallamos oscilaciones tan grandes como la misma flecha por efecto de las cuales el trabajo de la pieza se duplica.

Más significativos son los diagramas de la figura 12, tomados en un



Fig. 12.

larguero del mismo puente al paso de una máquina seguida de una serie de vagones. La flecha es casi nula, pero a intervalos casi regulares, correspondientes a un recorrido de 3 m (distancia entre los ejes) se ve una línea vertical que corta la horizontal y representa el choque de una rueda en la junta; había, pues, un aumento inmediato y enorme de los esfuerzos sobre el larguero.

Menos notada era la influencia de los defectos de la llanta; en el experimento a que se refieren los diagramas de las figuras 13 y 14, no

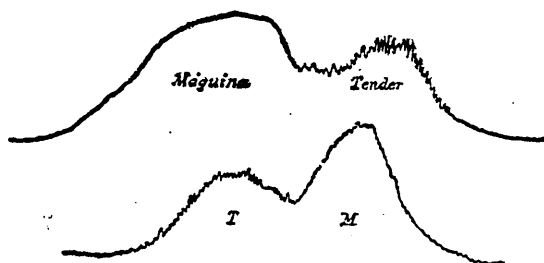


Fig. 13.

se obtuvieron vibraciones al paso de la máquina, mientras que al pasar el tender las vibraciones fueron muy marcadas. Haciendo crecer la velocidad desde 3 ó 4 km por hora hasta 45 ó 50, el paso de la máquina producía flecha poco variable pero sin vibraciones; al pasar el tender, las vibraciones, por el contrario, aumentaron constantemente hasta el punto de que la flecha total debida al tender, comprendiendo las vibraciones, superó a la de la máquina, aunque ésta tenía un peso propio

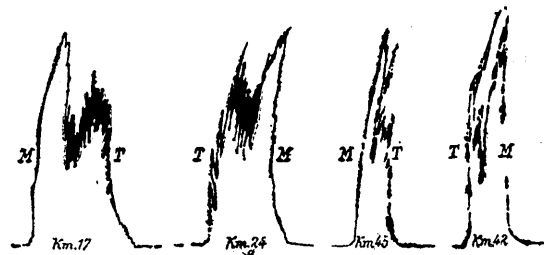


Fig. 14.

doble del del tender. La razón del fenómeno se encontró en que una rueda del tender presentaba un aplastamiento en la llanta.

Narra también Rabut que una locomotora, en el viaje de París a Limoges, rompió en una noche 100 carriles de una fila, y en el viaje de retorno al día siguiente rompió otros 50 en la otra fila; la causa fué un notable aplastamiento de la llanta de una rueda.

Conviene, pues, comprobar periódicamente el estado de las llantas y enviar al torno todas las ruedas en que se note alteración en el perfil de la llanta.

Hemos visto lo que respecto a las vibraciones ocurre en los puentes metálicos para carretera ó para ferrocarril; otra distinción importante es la de grandes y pequeños tramos. La experiencia ha confirmado lo que *a priori* se admitía, ó sea que los puentes grandes sufren mucho menos que los pequeños el efecto dinámico producido por la velocidad de la sobrecarga; a igualdad de circunstancias el esfuerzo debido a la sobrecarga, bajo una velocidad de 60 a 80 km, está en función inversa y rápidamente decreciente con la luz de la viga.

Supuesto que las condiciones de la línea sean regulares y no se presenten las anomalías cuyos efectos acabamos de estudiar, el esfuerzo máximo debido al paso del tren a gran velocidad es igual al debido a la marcha a paso de hombre-aumentado en 50 por 100 para 4 m de luz; en 20 por 100, en 8 m; en 10 por 100, en 12 m. Este aumento α se puede expresar con la fórmula empírica

$$\alpha = \frac{1}{1 + \left(\frac{L}{4}\right)^2}$$

siendo L la luz en metros.

Otra distinción consiste en que los puentes tengan ó no sobreestructura de fábrica (bovedilla de ladrillo), la cual influye grandemente sobre la resistencia de la obra; se ha encontrado que la presencia de las bovedillas reduce el esfuerzo del metal en un 50 y hasta en un 75 por 100.

También son importantes las distinciones entre tramos continuos y discontinuos; entre celosías con barras rígidas ó con barras articuladas, según el sistema americano; entre los puentes con arriostramientos sencillos ó dobles.

Rabut añade consideraciones importantes sobre la influencia de estos diversos caracteres; nos limitaremos aquí a señalar sus conclusiones referentes a la influencia de la disposición de los timpanos en los puentes metálicos de arco. En el cálculo usual no se tiene en cuenta el enlace entre el arco y el larguero, y esto es causa de notables diferencias entre los resultados teóricos y las deformaciones efectivamente medidas; sería más exacto considerar el arco como formando la cabeza inferior de una viga, de la cual formaría el larguero la cabeza superior; y por esta razón en algún caso, ateniéndose a mediciones experimentales, se han podido conservar puentes que habían sido condenados por el cálculo por resistencia insuficiente.

Rabut, finalmente, resume todos estos nuevos hechos, por él puestos en relieve, en una sola fórmula, en una sola palabra: *solidaridad*. El error que generalmente se comete en los cálculos es precisamente el de prescindir de la solidaridad entre las diversas partes de una obra, mientras la experiencia enseña que las diferentes partes de un conjunto metálico son como los miembros de un cuerpo viviente que funcionan prestándose mutua ayuda.