

## INFORME

### SOBRE LA VERIFICACION ESPERIMENTAL DE LA ESTABILIDAD DE LOS PUENTES METÁLICOS

#### Oríjen de la esperimentacion - Su importancia

La mayor parte de los puentes de ferrocarriles construidos en Francia ántes de 1891 no satisfacian a las prescripciones del nuevo reglamento relativo a obras nuevas, pues habian sido calculados segun la antigua circular de 1877.

Con este motivo, varias compañías de ferrocarriles, entre las cuales se cuentan especialmente las del Oeste, del Este i de Orleans, procedieron a hacer la verificacion esperimental de los puentes metálicos de sus diversas líneas. Estas compañías, en la incertidumbre de hacer un puente nuevo o de reforzar los antiguos, cargando con las responsabilidades consiguientes, tuvieron que decidirse a esperimentar. Es decir que las indicaciones proporcionadas por el cálculo no bastan para pronunciarse definitivamente sobre la suerte que debe correr una obra discutible, esto es, para elegir entre el gasto de su reconstruccion i la responsabilidad de su conservacion.

Ademas, la verificacion esperimental ha llegado a hacerse indispensable por cuanto el cálculo no indica muchas cosas que sólo son dadas a conocer por la esperimentacion. Así, el cálculo no nos dice si convienen muchos contratistas pequeños o pocos grandes, si en una viga es preferible un enrejado tupido o separado (1). Igualmente, sólo la esperiencia ha dado a conocer la relacion que debe existir entre los diversos elementos de una viga, como ser el ancho de las suelas respecto a su altura, i la altura misma de las vigas con respecto a la luz.

A la falta de esperimentacion deben atribuirse los accidentes ocurridos a los puentes Mœnchenstein, Tardes i Tai. El accidente del puente Mœnchenstein, en Suiza, provino de un error en el enrejado de la viga principal; igualmente, a causa de una mala concep-

---

(1) M. Rabut hizo esperiencias concluyentes a este respecto en dos puentes sobre el Sena que se encontraban uno al lado del otro i en idénticas condiciones. Uno era antiguo de vigas de enrejado tupido i el otro nuevo con enrejado de grandes mallas. La esperiencia demostró que no hai duda que hai gran economía i gran ventaja en emplear *pequeñas mallas*. La esperiencia dió tasas de trabajo de 1 kg superiores al cálculo en el puente antiguo de pequeñas mallas calculado de acuerdo con la circular antigua, i en el nuevo el trabajo real fué de 3 kg mayor que el calculado; este último era calculado segun el reglamento de 1891.

cion del proyecto, se produjo el accidente del viaducto de Tardes, en Francia; i tambien fué por causa de un error teórico que tuvo lugar la catástrofe del puente de Tai, en Inglaterra, producida por el viento i movimiento de *lace* del tren.

La consecuencia de estos accidentes ha sido ser mas severo con los proyectos de puentes metálicos. La nueva circular francesa de 1891 no dice nada en cuanto a cálculo; lo importante es hacer la medida de las deformaciones cuando se hacen las pruebas, ademas, impone hacer visitas periódicas (cada 5 años) a las obras metálicas para ver cuáles son los efectos de la pasada de las cargas.

Otro motivo particular para el gran desarrollo que ha tomado la esperimentacion es la lucha que se ha establecido entre los dos sistemas: *viga ríjida*, casi esclusivamente usada en Europa, i *viga articulada*, que se emplea mucho en Estados Unidos.

El puente articulado cuesta mas barato que el remachado. Esto proviene de que la deformacion jeneral de los sistemas articulados es simple i bien conocida, haciéndose una reparticion ventajosa del trabajo; i entónces los partidarios de este sistema, libres de toda preocupacion, han podido concentrar sus esfuerzos al estudio de los diversos órganos, haciendo numerosas esperiencias sobre piezas aisladas. Así que estas obras han alcanzado en poco tiempo un grado de perfeccion que parece difícil sobrepasar.

Las construcciones ríjidas no han progresado tan rápidamente por cuanto las leyes de su deformacion jeneral son mas complejas i no han podido ser formuladas sino que groseramente. Así que este tipo de construcciones puede mejorarse o perfeccionarse notablemente, i como el análisis no basta, es la *esperimentacion* la que debe ayudarnos para su perfeccion.

Aquí podria decirsenos por qué no empleamos, entónces, los puentes articulados en vez de los ríjidos. Bastará, para contestar esta observacion, indicar los inconvenientes de la viga articulada, que, como se sabe, son:

1.º En los sistemas articulados cada ensamble depende de un solo perno, i si ese perno se rompe todo se destruye, miéntras que en los sistemas ríjidos, si se quiebra un remache, hai siempre varios otros, i no se ha visto ejemplo de que se hayan quebrado todos a la vez;

2.º Por mui bien hecho que sean los ensambles, siempre queda cierto juego en las articulaciones, i si cambia de signo el esfuerzo se producirán pequeños choques, que repitiéndose desgastarán la barra;

3.º Dificil suspension del tablero; i

4.º Contraviento mediocre, sobre todo en caso de puentes de tramo crítico (al rededor de 40 metros), en que los mismos americanos adoptan el tipo europeo de viga ríjida, conservando sólo la articulada para las grandes luces.

Como lo hemos dicho, trataremos mui sumariamente, i para dar solq una idea jeneral, primero los procedimientos de medida i despues veremos los resultados obtenidos con el método esperimental. Para detalles el artículo del señor Rabut (*Anales de Puentes i Calzadas* en Octubre de 1896).

#### I. PROCEDIMIENTO DE MEDIDA

A causa de la pasada de las cargas en un puente, se produce un desplazamiento de las piezas i ademas las diversas piezas esperimentan cierta fatiga.

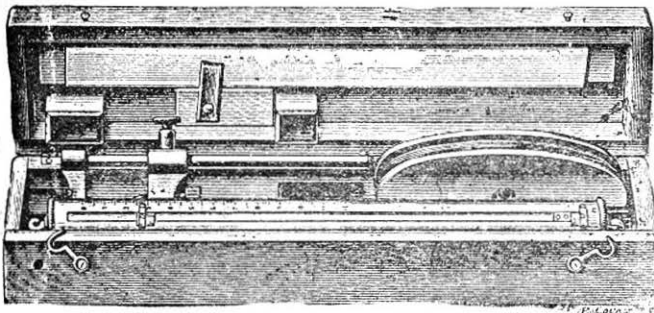
Todo desplazamiento (se entiende que en un plano) se reduce a una traslacion i a una rotacion.

De aquí tres categorías de instrumentos para medir las deformaciones que experimenta un puente:

- 1.º Unos para medir la traslacion o desplazamiento vertical u horizontal;
- 2.º Otros para medir la rotacion o deformaciones angulares; i
- 3.º Por fin, otros para medir la fatiga de la materia o sea las deformaciones locales.

1.º—*Medida de las flechas i en general de los desplazamientos lineales*

Cuando se quiere medir solamente en flecha de una pieza, puede servir el aparato Bosramier que emplean en la compañía de Orleans. Se compone de dos tubos de laton



que se mueven uno dentro del otro i mantenido entre sí por medio de un resorte; dos índices dan la flecha. Con un hilo o alambre tendido se fija al suelo i por la otra estremidad

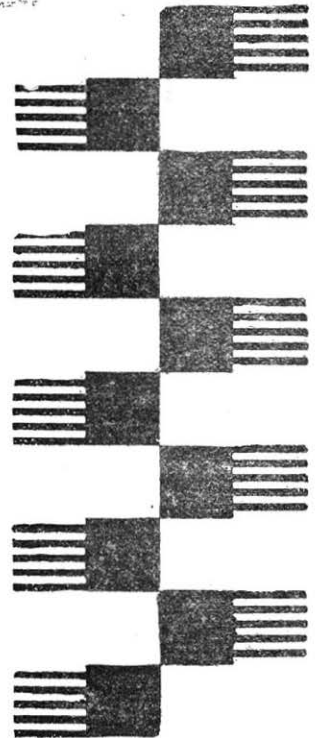
se fija a la viga o pieza cuya flecha se quiere medir; un índice nos da a conocer la posicion inicial i el otro nos da la deformacion.

En la Compañía de ferrocarriles del Este emplean un aparato parecido a este Bosramier, pero mas complicado. Pero me manifestaron que lo mas rápido i mas cómodo para ellos era el empleo de una pequeña mira de papel que pegaban en el punto del puente en que querian determinar la flecha, i con un anteojo (jeneralmente de un nivel) instalado en la orilla observaban la flecha, pudiendo apreciar aun los milímetros.

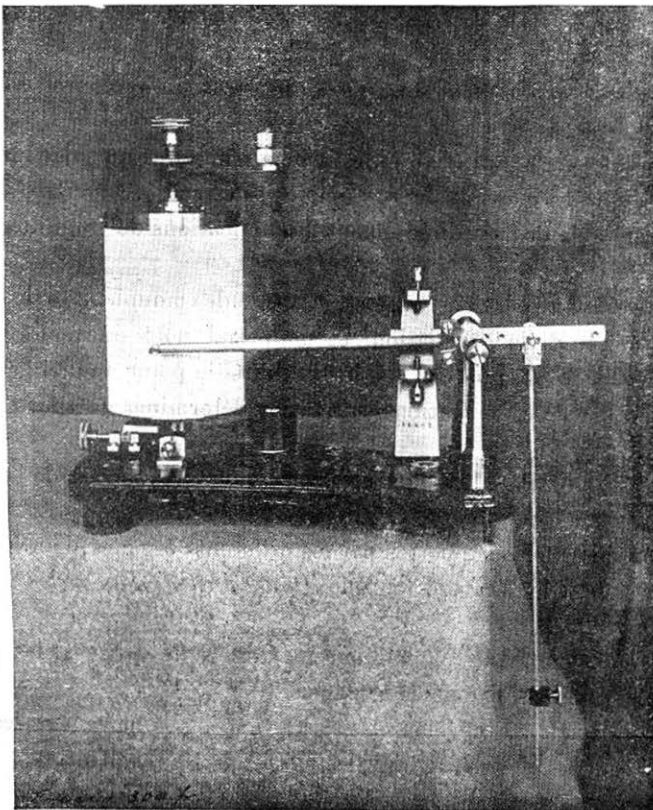
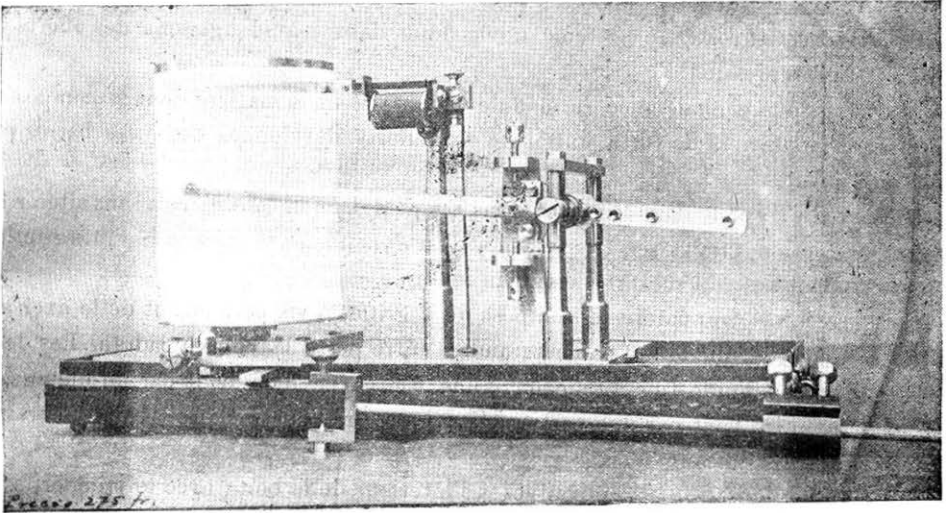
Pero en la jeneralidad de los casos es interesante enrejistrar la traslacion en funcion del tiempo.

Antes se hacian tablas para conseguir esto, pero se han reemplazado ahora ventajosamente por gráficos obtenidos con un enrejistrador Richard-Rabut. El enrejistramiento tiene la ventaja de poner a la vista todas las leyes, mientras que una fórmula aljebraica que diera la lei no seria clara.

El aparato Richard-Rabut, empleado para el caso



consiste esencialmente en una palanca amplificadora, movable al rededor de un eje horizontal; el brazo pequeño de la palanca recibe, por el intermedio de una trasmision, el movimiento por enrejistrar; la estremidad del gran brazo lleva una pluma especial que traza el diagrama sobre un cilindro en el cual está enrollado el papel, i que jira uniformemente en torno de un eje vertical con un movimiento de relojería.



## APPAREIL SYSTÈME MANET

PERFECTIONNÉ PAR M L'INGENIEUR RABUT

**BUT DE L'APPAREIL.**—L'appareil a pour but de mesurer les variations de longueur que prennent les barres d'un système quelconque dans lequel agissent des efforts de traction ou de compression.

Par suite de la connaissance du module d'élasticité de la matière dont se composent les barres, on appréciera de suite l'intensité des efforts développés dans ces barres par les charges qu'elles ont à supporter.

L'appareil s'emploie dans les mêmes cas que le dynamomètre et cela sans altérer en rien la construction, tandis que l'application d'un dynamomètre nécessite l'interruption des organes dont on veut mesurer le travail statique.

**DESCRIPTION.**—L'appareil se compose de 2 griffes à vis permettant de le fixer sur la barre à essayer. L'une forme palier taraudé, l'autre porte la boîte à cadran. Les deux griffes sont en communication au moyen d'une tige fixée d'un bout par un filetage, et maintenue à l'autre bout par une partie cylindrique, qui pénètre dans la boîte en traversant une garniture en caoutchouc.

L'extrémité de la tige est en contact, à l'intérieur de la boîte, avec le premier levier du mouvement qui actionne l'aiguille.

Sous un effort de traction, la barre essayée s'allonge et l'aiguille indicatrice tourne dans le sens de la flèche.

L'aiguille fait le mouvement inverse si la barre se raccourcit sous un effort de compression.

Le cadran n'est pas muni d'aiguilles à maxima, parce que, dans la pratique, on a constaté que ces aiguilles peuvent donner lieu à des erreurs. Pour faire des observations précises, il est préférable de lire directement les indications de l'aiguille unique, au moment même où elle se déplace.

Avant de faire une expérience, on tourne la tige de communication de façon à amener, l'aiguille vers le milieu de la graduation, et on prend note du point qu'elle indique. Lorsque la déformation se produit, on inscrit aussi le point auquel l'aiguille parvient. La différence entre les deux indications suffit pour déterminer le sens et l'intensité de l'effort mesuré.

**EMPLOI DE L'APPAREIL.**—Les applications les plus fréquentes de l'appareil sont les suivantes:

«Observation des efforts supportés par les différents organes d'un système sous son poids propre et pendant le décalage, tels que: *Ponts et charpents métalliques ou autres; barres de suspension;*

«Observation des efforts développés sur les différents organes des ponts pendant l'épreuve par poids mort ou par poids roulant;

«Observation des efforts développés par le vent ou la neige sur les ponts et les charpents, ainsi que les effets résultant des variations de température;

«Application aux viaducs métalliques pendant leur lançage, afin d'écartier toute chance de chute par suite de mauvaises dispositions;

«Application aux machines à essayer les métaux à la traction.»

Et en général, toutes les fois que les barres d'un système quelconque supportent des efforts de traction ou de compression.

#### L'APPAREIL MANET-RABUT COMPREND:

Une boîte circulaire, avec couvercle vitré, contenant le mouvement amplificateur à cadran gravé et aiguille au centre;

Deux griffes de fixation.....	} 0,200
Trois tiges de communication pour les écartements de.....	
Une petite clef de manœuvre.....	

PRIX: 200 FR

#### 2.º - *Medidas de las deformaciones angulares*

Las desviaciones angulares no se median ántes. En los tratados de resistencia no se mencionaba la desviacion angular sino como un intermediario algebraico inevitable para pasar de la expresion de la deformacion local a la del desplazamiento lineal. Ahora bien, la medida de los ángulos es aun mas fácil i mas exacta que la de las flechas.

Las variaciones angulares se miden por medio de un anteojo.

Supongamos que se trate de determinar la inclinacion sobre el apoyo de una viga maestra del puente. Se fijará a la suela de la viga, en el punto considerado, un anteojo horizontal paralelo a la via, dirijiéndolo hácia una mira vertical colocada a distancia: la diferencia de lecturas sobre la mira, ántes i cuando obra la carga, dividida por la distancia de la mira al eje de rotacion, dará el valor del ángulo buscado (en realidad, así obtenemos la tanjente del ángulo, que difiere mui poco del seno i del arco mismo por tratarse de ángulos pequeños).

Fácilmente puede enrejistrarse esta deformacion en funcion del tiempo.

La medida de las inclinaciones de la fibra neutra de una pieza en cierto número de puntos puede servir para determinar la curva elástica para una posicion dada de la sobrecarga.

#### 3.º - *Medida de la deformacion local*

La deformacion local es la mas importante de conocer: es la que fatiga el metal i determina la ruptura; pero es al mismo tiempo la mas difícil de medir, pues, bajo la carga de prueba reglamentaria aquí en Francia, un puente carrilero de fierro de 20 m de luz, toma una flecha vertical de un centímetro mas o ménos, miéntras que el trabajo de las piezas no alcanza a mas de 2 kg por mm<sup>2</sup>, lo que corresponde para una base de 20 centímetros de largo a una variacion de  $\frac{1}{50}$  de mm. Por otra parte, no se ha llegado a enrejistrar todavía de una manera continua la deformacion local en funcion del tiempo,

problema que, al contrario, está resuelto para todos los jéneros de desplazamientos lineales.

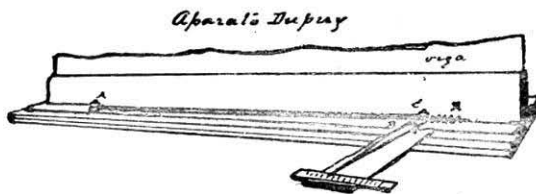
La deformacion local es para el esperimentador una trasformacion jeométrica infinitesimal, que corresponde al estado inicial i al modificado.

La deformacion local equivale a una dilatacion (o contraccion), segun tres ejes.

Pero en el estado actual de las cosas, el único método de que se puede disponer para el estudio aproximado de las deformaciones locales, se reduce a la medida de la variacion de distancia entre dos puntos situados sobre la superficie de una pieza i alejados el uno del otro de varios decímetros; en estas condiciones no se puede, en jeneral, operar útilmente sino que segun una direccion paralela a la mayor dimension de la pieza. Es probable que la esperimentacion quedará largo tiempo todavía confinada a este restringido dominio.

Dupuy fué el primero que ensayó i realizó la medida de la deformacion local. El aparato construido por él (Anales de Puentes i Calzadas, tomo XIV, páj. 381) se fija a la pieza estudiada por medio de dos pernos, que la atraviesan en los dos puntos entre los que se quiere medir la variacion de distancia: a uno de estos pernos está fijada una varilla de fierro, al otro el eje de una palanca acodada en la cual la pequeña rama topa contra la varilla, i la gran rama en forma de aguja marca el desplazamiento amplificado sobre una porcion de cuadrante. Un resorte mantiene el contacto entre la varilla i la palanca.

Este aparato ha sufrido varias modificaciones hechas por M. Manet i por M. Rabut especialmente, pero el principio en que se funda ha quedado el mismo.



La esplicacion detallada se encuentra en el artículo de M. Rabut, que acompaña mas adelante.

Dupuy daba a la barra o varilla un largo tal que la distancia entre los dos puntos fijos fuera de 1 metro; ahora esta distancia se reduce a 0,20 m jeneralmente.

Las principales mejoras introducidas por M. Rabut en los aparatos Dupuy han sido: 1.º La manera de afianzar los aparatos a las vigas o piezas del puente; 2.º La amplificacion del desplazamiento marcado por la aguja, obtenido por la interposicion de varias palancas; i 3.º La colocacion de un manguito de cautchouc en la parte en que la varilla penetra en la caja, lo que evita se produzcan rozamientos i se falseen las indicaciones.

## II. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MÉTODO ESPERIMENTAL

El método esperimental puede aplicarse:

- 1.º A obras existentes, ántes o despues de ser dadas al servicio;
- 2.º A modelos reducidos de obras en proyecto; i
- 3.º En fin, a piezas aisladas.

#### *Causas de deformacion de un tablero de puente.— Enrejistramiento*

El estudio esperimental de una obra existente tiene en jeneral un objeto práctico e inmediato: controlar su estabilidad i reconocer si la obra puede ser puesta o mantenida en servicio. En todo caso, las esperiencias por hacer tienen por objeto determinar las deformaciones mas peligrosas.

La principal de las causas de deformacion es, casi siempre, la sobrecarga, i es a ella a la que implícitamente nos hemos referido al hacer la descripcion de los aparatos.

Como lo hemos dicho, las deformaciones locales no pueden ser enrejistradas i, por consiguiente, no son indicadas con bastante exactitud por los aparatos cuando los efectos dinámicos de la sobrecarga rodante llegan a tener cierta importancia. Se suple esta deficiencia por el enrejistramiento de las flechas i de las inclinaciones: la alteracion que sufre uno de estos elementos por la velocidad de la sobre-carga permite apreciar, por analogía, la que experimenta el trabajo de las piezas en las mismas condiciones. Todo estudio de reformaciones locales bajo cargas rodantes lleva consigo, pues, enrejistramientos.

Las deformaciones que no son debidas a la sobrecarga son: el efecto de la carga permanente, de las circunstancias que han acompañado el montaje del tablero, de su calaje sobre los apoyos, las variaciones de temperatura i, en fin, la accion del viento.

#### *Interpretacion de las esperiencias*

Se caeria en un error grave si se creyera poder juzgar de la estabilidad de una obra, segun la cifra de trabajo máximo observado. Importa saber que en todos los tableros, aun en los mas sólidos, se encuentran puntos que trabajan a una tasa superior a los límites reglamentarios. Esto es mui comprensible si se toma en cuenta que estos límites han sido determinados en vista de ser aplicados, no al trabajo *real*, sino al trabajo *calculado*, segun los métodos usuales. Si se tuviera una teoría exacta de la deformacion, es seguro que los límites actualmente admisibles podrian ser considerablemente elevados. Así, cuando se constata, por ejemplo, que cierta parte de una barra de enrejado trabaja a razon de 8 kilógramos en lugar de 5 o 6, bajo la accion combinada de la carga permanente i de la sobrecarga reglamentaria, no se tiene el derecho de concluir que el tablero no satisface al reglamento; a lo ménos seria preciso considerar, en lugar del trabajo local de una barra, el trabajo medio de todo el paño de enrejado, ya que es este trabajo medio el solo que el cálculo puede dar, admitiendo que él sea exacto.

No puede pronunciarse sobre la estabilidad de una obra sin haberla comparado con otras obras, ni sobre el valor de un tipo de tablero sin haberlo comparado con diferentes tipos.

#### *Puentes carreteros*

En los puentes carreteros el efecto de la pasada de las cargas depende de la natura-



leza de la calzada. Está, pues, contraindicado el adoquinado de piedra en que tendríamos la periodicidad de los choques. Debe recomendarse para los puentes carreteros el pavimento de madera o de asfalto, que dejan una superficie regular i suprimen las juntas, i por consiguiente los choques periódicos.

Ya que hablamos de la periodicidad de los choques, conviene citar un ejemplo que patentiza su efecto dañoso. Haciendo pasar M. Rabut un rodillo de los de la ciudad de Paris, de 30 toneladas de peso por un puente carretero, obtuvo como diagrama de las flechas una cierta curva. Con dos rodillos de 30 toneladas obtuvo una curva poco diferente de la anterior. Lo notable es que obtuvo curvas en que la flecha era doble a la obtenida en el primer caso, haciendo pasar solamente 16 hombres al paso. Así que el efecto de la periodicidad de los esfuerzos no sólo tiene grande influencia en los puentes colgantes sino tambien en los fijos.

### *Puentes de ferrocarril*

*Juntas de los rieles.*—La causa mas importante de las irregularidades bruscas que se notan en el diagrama de las flechas, son las juntas de los rieles, que vienen a ser los puntos en que se producen choques de las ruedas de los vehículos con los rieles.

Se puede disminuir el efecto del choque, ya sea disminuyendo el peso en los ejes o reduciendo la velocidad, pero con esto no se puede ganar mucho; i por consiguiente la única solución práctica es suprimir las juntas. Por este motivo es que, habiéndose empleado al principio rieles de sólo 5 o 6 metros de largo, se han adoptado despues de 12, 18 i aun 24 metros de largo, como se usan hoy dia en ciertos puntos especiales; esto, a pesar de las sujeciones del transporte de rieles de ese largo. Es, pues, escusado decir que en toda obra de arte de luz inferior al largo de los rieles disponibles, no debe existir junta de rieles.

En los puentes metálicos se ha ido mas léjos aun, se ha llegado a soldar los rieles. En los puentes metálicos no hai razon para dejar juntas de 6 mm, pues la viga se alarga i se acorta junto con el riel. M. Rabut hizo experiencias en un viaducto hasta de 300 metros de largo, durante todo un verano, i a pesar de haber tenido grandes diferencias de temperatura, no observó abertura de las juntas. Así que podría no dejarse abertura en las juntas de los rieles sobre puentes metálicos; basta en la práctica dejar unos 2 milímetros.

*Material rodante.*—La eleccion entre dos tipos de locomotoras no interesa ménos al ingeniero encargado de la conservacion de las obras que la eleccion entre dos tipos de tableros.

Ejerce una grande influencia en el diagrama de las flechas el estado de la llanta de las ruedas del material rodante: el menor aplastamiento en la zona de la llanta de las ruedas se traduce en el diagrama por una brusca variacion de la flecha. Este fenómeno es frecuente al pasaje de algunos ténders i furgones con fierro.

Se puede decir que en los ferrocarriles la dinámica de las cargas rodantes se resume en dos cuestiones: la de los aplastamientos de las ruedas i la de las juntas de los rieles.

*Rol de la velocidad.* — La velocidad, considerada como causa propia de deformacion parece ser un sujeto de estudio mas bien teórico que práctico; pero las deformaciones de toda naturaleza crecen mas o ménos rápidamente con ella. Así, las flechas de las vigas principales en las pequeñas obras i la de las piezas de puentes i longuerinas, crecen rápidamente en la velocidad.

*Variaciones bruscas de velocidad sobre el tablero.* — Lo que sí tiene una grande influencia en la deformaciones, son las variaciones bruscas de la velocidad provocadas mientras el tren recorre el puente. Son notables las deformaciones tanto verticales como horizontales que se producen por el cerraje de los frenos o la abertura repentina del regulador; estos hechos tienen lugar frecuentemente en servicio, a lo ménos en ciertas obras. Así, en el puente del Maipo, en la línea de Santiago al sur, continuamente se observan hechos de esta naturaleza, que son mui perjudiciales i que deberian darse órdenes terminantes de evitarlos.

Para terminar, diremos dos palabras sobre la aplicacion del método esperimental a modelos reducidos i a piezas aisladas.

*Esperimentacion sobre modelos reducidos de obras en proyecto i sobre piezas aisladas*

La esperimentacion puede no sólo hacerse en las obras mismas sino tambien en los gabinetes, sobre todo para el estudio de grandes proyectos, sea sobre *modelos reducidos*, sea sobre *piezas aisladas*.

La esperimentacion de *modelos reducidos* no es cosa nueva: ella ha sido la principal guía de los ingenieros que han proyectado i ejecutado, en Inglaterra, hace 60 años, las primeras obras metálicas. I esto que Stephenson i Brunel no disponian sino de medios groseros de esperimentacion: no podian hacer otra medida que la de la flecha, i sobre todo la de la carga de ruptura, que les servia de base para determinar empíricamente los espesores que debian dar a sus vigas.

En cuanto a la esperimentación de *piezas aisladas*, en tamaño de ejecucion, que tiene la ventaja de ser mas precisa i ménos costosa, parece sobre todo llamada a completar o corregir las fórmulas usuales relativas a las deformaciones de las piezas prismáticas.

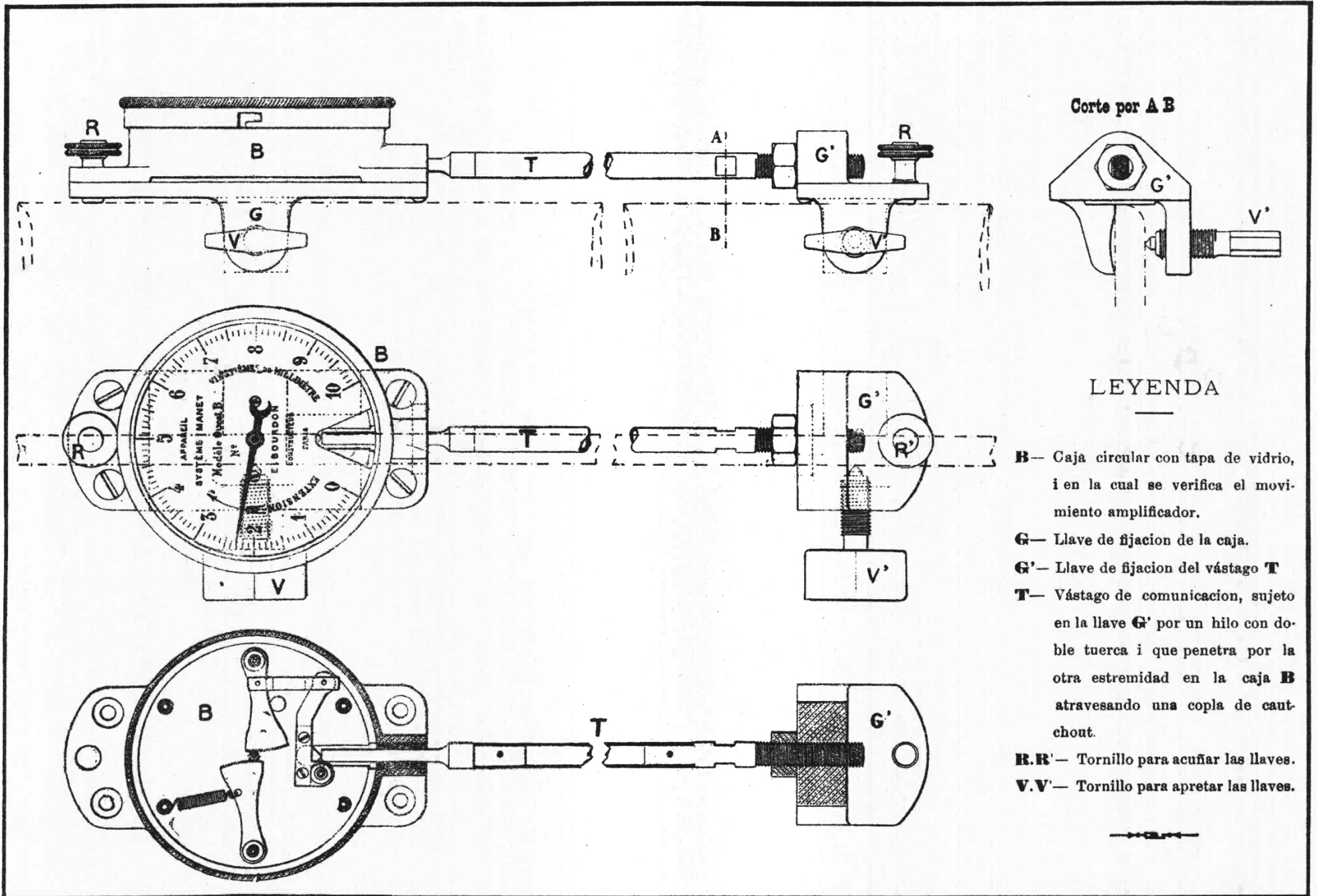
Paris, 1.º de Julio de 1903.

ELEAZAR LEZAETA A.,  
Ingeniero Civil.



# APARATO MANET-RABUT

ESCALA 1/2



## LEYENDA

- B**— Caja circular con tapa de vidrio, i en la cual se verifica el movimiento amplificador.
- G**— Llave de fijacion de la caja.
- G'**— Llave de fijacion del vástago **T**
- T**— Vástago de comunicacion, sujeto en la llave **G'** por un hilo con doble tuerca i que penetra por la otra estremidad en la caja **B** atravesando una copla de caoutchout.
- R.R'**— Tornillo para acufiar las llaves.
- V.V'**— Tornillo para apretar las llaves.

