

Influencias de las variaciones de temperatura en las deformaciones de los tramos metálicos¹

II

Procedimiento analítico.—Conocidos estos fenómenos de un modo experimental, estimaba insuficiente este conocimiento para deducir consecuencias de carácter positivo y que *a priori* permitiesen calcular los efectos que en las vigas habían de producir estas variaciones de temperatura para, a su vez, conocer los esfuerzos suplementarios, siempre importantes, que habían de sobrecargar a las piezas para la deducción de la sección resistente precisa.

No he de ocultar a mis lectores mi más completo fracaso, por lo menos hasta ahora, para deducir fórmulas analíticas que se ajusten exactamente a las condiciones del problema, dada su enorme complicación teórica; se trata de alcanzar fórmulas matemáticas que relacionen la verdadera situación de las estructuras con la realidad, en las varias temperaturas que han de soportar, teniendo en cuenta los enlaces rígidos o articulados, según los casos más complejos, las consecuencias en ellos, influencia de las diversas temperaturas en cada pieza, las que se registran en cada momento, partiendo del supuesto de una temperatura general y única para toda la estructura en determinados momentos del día, casi siempre en su madrugada, influencia de las diversas disposiciones constructivas de cada pieza, que hace que estas varias temperaturas que cada una alcanza sean distintas.

Consecuencias derivadas de la posición del piso y otros elementos, justifican que la acción de los rayos solares llega de modo muy diverso a unos y otros elementos y que, dada su naturaleza, queden afectados más o menos.

Mejor o peor conservación de los aparatos de dilatación de las estructuras que influye en las deformaciones de todos sus componentes, existencia o no de arriostramientos múltiples que al unir las vigas solidarizan éstas y los efectos que cada una de ellas independientemente alcanzarán, cambian al tener que considerar el conjunto de ambas.

El sistema de las vigas principales influye notoriamente, según sean de celosía simple, doble o múltiple de grandes mallas, de alma llena, etc., con cabezas rectas, poligonales o curvas.

Todas estas múltiples circunstancias que hay que tener en cuenta al implantar las fórmulas que matemáticamente señalarán las deformaciones verticales o flechas de las vigas en cada uno de sus nudos daría tal complicación al problema, que he de confesar vacilé y me detuve en este camino con verdadero sentimiento, confesando mi incapacidad para continuar.

Por todo ello, cuando pude comprobar entre otros trabajos, muy interesantes todos ellos, que se presentaron en el último Congreso de Puentes Metálicos, celebrado en Viena en el pasado año de 1928, apa-

rece uno referente al tema objeto de estas líneas, redactado por dos conocidos ingenieros rusos: Patton y Dunajeff, le leí con verdadera fruición y mi alegría fué grande al ver que en él aparecían fórmulas para deducir los valores de las deformaciones observadas.

Sin embargo, algo de decepción experimenté al leer esta parte del trabajo, de todos modos muy interesante, por comprobar que no expresaba el modo como prácticamente deducía las fórmulas propuestas; y estimo que éstas son completamente empíricas y no científicas; de todos modos, muy meritorias, y si los resultados que ofrecen son exactos o suficientemente aproximados, de gran utilidad.

Ante todo, en ellas aparecen determinados signos convencionales, que a continuación se detallan y explican:

f_a	Flecha en cada nudo.
$\alpha = 0,0000118$..	Coefficiente de dilatación del material metálico
Y	Relación, con su subíndice correspondiente, entre las flechas, en cada nudo y en el centro de la viga.
K	Coefficiente variable de corrección, que oscila entre 0,64 y 0,74, entre los valores calculados y medidos.
t_0	Temperatura inicial, supuesta uniforme en toda la estructura.
t_1, t_2, t_3	Temperatura en las cabezas superiores e inferiores y alma.
$A-B$	Coefficientes variables según los tipos de las vigas estudiadas.
l	Luz teórica de las vigas principales.
$h-h_0$	Altura teórica de las vigas principales en su centro y extremos.
h_x	Altura teórica en el nudo x .

La sola observación de estos signos marca la complicación de las fórmulas y su poca generalidad, como puede comprobarse.

Para vigas cuyo alzado y contorno se ajusta a la denominación genérica de semiparabólicas y a los

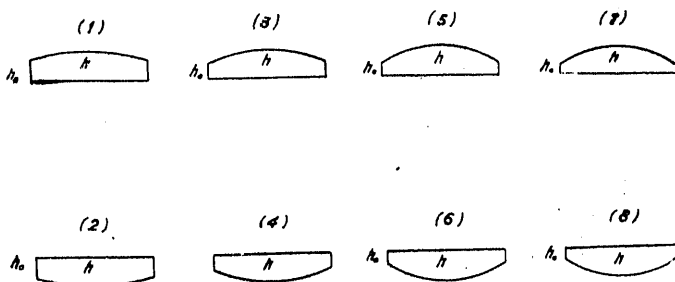


Fig. 11.

croquis de la figura 11, los coeficientes antes indicados valen:

	Cuadrática	Parabólica	Circular	Parabólica 2.º grado
$\frac{h_0}{h} =$	0,75	0,50	0,35	0,25
$A =$	0,131	0,138	0,141	0,149
$B =$	0,0232	0,107	0,200	0,292

¹ Véase el número anterior, página 319.

Las fórmulas siguientes se aplicarán a los croquis representados en la figura anterior y marcados con los números (1, 3, 5 y 7).

$$\Delta f_a = \alpha Y K \left[(t_1 - t_2) A \cdot \frac{l^2}{h} + (t_1 - t_3) B h \right]$$

y la que a continuación se copia, a los croquis 2, 4, 6 y 8 de la misma figura

$$\Delta f_a = \alpha Y K \left[(t_1 - t_2) A + (t_1 - t_3) B h \right]$$

Para vigas principales cuyo alzado y contorno corresponde a los croquis representados en la figura 12

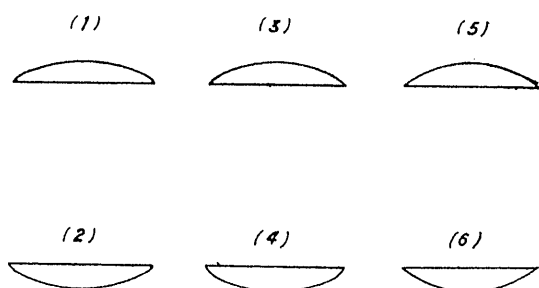


Fig. 12

con la denominación general de vigas parabólicas, los coeficientes tienen los valores que se marcan:

Disposición de las cabezas	$\frac{h_0}{h}$	1/20	2/20	3/20	4/20	5/20	6/20	7/20	8/20	9/20	1/2
Recta	1	0,19	0,36	0,51	0,64	0,75	0,84	0,91	0,96	0,99	1,0
Cuadrática	0,75	0,20	0,37	0,52	0,65	0,76	0,85	0,92	0,96	0,99	1,0
Parabólica	0,50	0,21	0,38	0,54	0,67	0,77	0,86	0,92	0,96	0,99	1,0
Circular	0,35	0,22	0,39	0,55	0,68	0,78	0,86	0,92	0,96	0,99	1,0
Parabólica de tercer grado	0	0,26	0,44	0,58	0,70	0,79	0,87	0,93	0,97	0,99	1,0
Parabólica de segundo grado	0	0,29	0,47	0,61	0,72	0,81	0,88	0,94	0,98	1,00	1,0

En las figuras 8.^a y 9.^a aparecen los resultados obtenidos en la realidad por mediciones directas y las calculadas con arreglo a estas fórmulas, pudiéndose comprobar la no coincidencia; aunque no demasiado grandes, las diferencias alcanzan promedios hasta del 38 por 100.

Movimientos longitudinales.—Para añadir un dato más acerca de las irregularidades observadas, como consecuencia de los fenómenos derivados de la variación de temperatura que tan enormemente afecta a las estructuras, se insertan a continuación dos gráficos demostrativos de las diferencias que existen entre los alargamientos o dilataciones que experimentan las vigas principales calculadas y medidas sobre los estribos, donde se apoyan los extremos libres en dos momentos bien diferentes.

Aquéllos se deducen de la fórmula bien conocida

$$\delta = \alpha (t_1 - t_2) \cdot l$$

y éstos, directamente.

Se aprecian diferencias que, en ocasiones, para las máximas temperaturas llegan al 40 por 100, unas veces por exceso y otras por defecto (figuras 13 y 14).

Estas importantes diferencias debidas, aparte de posibles irregularidades e imperfecciones en los

Elipse	Parábola cúbica	Parábola cuadrática
$A = 0,143$	0,151	0,173
$B = 0,429$	0,722	0,773

Si, por el contrario, y dentro de este último croquis las curvas de las cabezas fueran circulares, las fórmulas aplicables a dicho croquis de la figura 12 son las siguientes. Para los croquis 1, 3 y 5:

$$\Delta f_a = \alpha Y K \left[(t_1 - t_2) A \cdot \frac{l^2}{h} + (t_1 - t_3) B h \right]$$

para los croquis 2, 4 y 6:

$$\Delta f_a = \alpha Y K \left[(t_1 - t_2) A \cdot \frac{l^2}{h^2} + (t_2 - t_3) B h \right]$$

No se copian más fórmulas, que corresponden a croquis menos usados y frecuentes, por ser posible, a quien le interese este caso especial, acudir al trabajo original de Patton y Dunajeff.

Los valores de todos los coeficientes y parámetros que entran en estas fórmulas son conocidos, con excepción de los de Y, que representan, como ya se ha indicado, la relación entre las flechas producidas en el centro del tramo por las causas conocidas y las que en cada nudo se deben producir.

Patton y Dunajeff han calculado, según aparece en el cuadro siguiente, estos valores, según la forma de las cabezas:

aparatos de apoyo, a la influencia de las anomalías

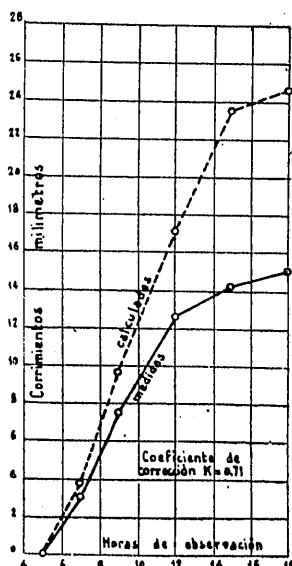


Fig. 13.

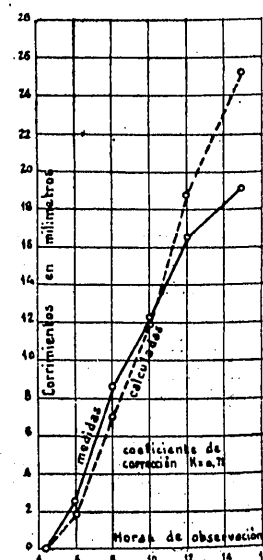


Fig. 14.

en los calentamientos desiguales de los diversos elementos que motivan todo este estudio, habiéndose

hasta ahora exclusivamente atribuido a defectos de instalación y funcionamiento.

Deformaciones laterales.—Ya se ha mencionado anteriormente que por las mismas causas que producen las flechas y deformaciones verticales se encuentran a veces éstas igualmente laterales.

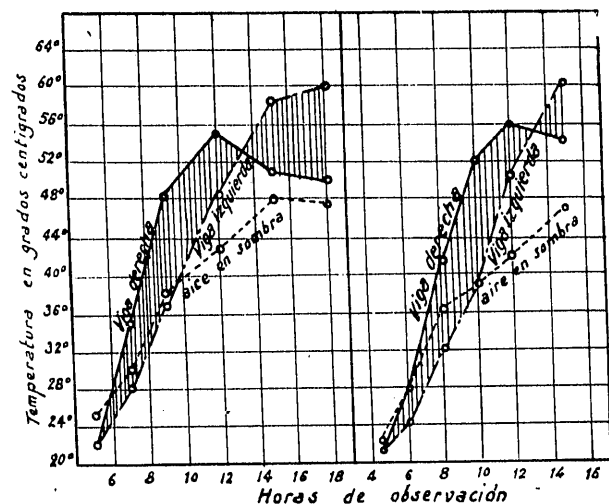


Fig. 15.

Las diferentes fases de calentamiento y enfriamiento de las vigas y sus elementos dan lugar a que se observen análogas consecuencias; es decir, que durante el amanecer el tramo tiene sus dos vigas principales rectas al salir el sol, y, en especial, la viga del Este, sobre todo si el eje del tramo tiene la direc-

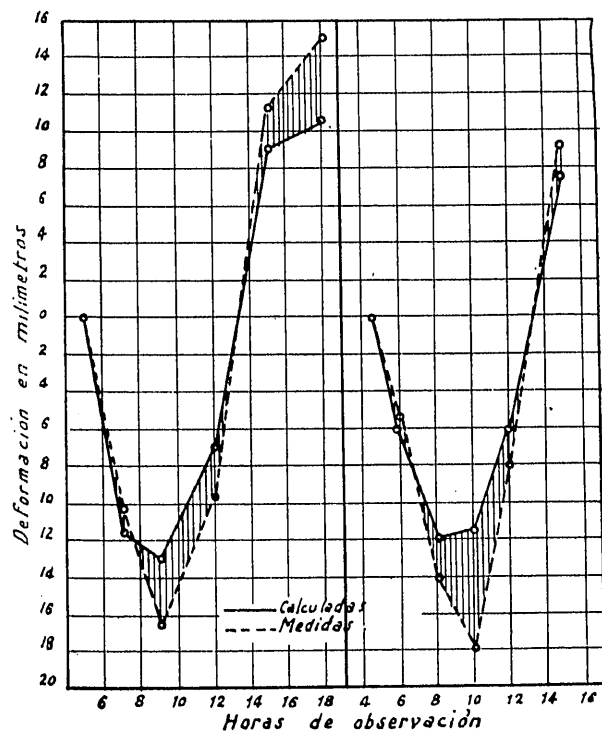


Fig. 16.

ción Norte-Sur, se deforma desigualmente que la viga Oeste, presentando su convexidad hacia el sol; cuando se calientan ambas vigas de un modo semejante, vuelve el paralelismo de las dos, que nuevamente se pierde por la tarde, flectando la viga del Oeste hacia el mismo astro.

En análogos días que se hicieron las experiencias

correspondientes a las deformaciones verticales se tomaron los datos precisos para el estudio de las laterales, y siguiendo análogas representaciones aparecen en la figura 15 dos diagramas en los que se marcan las temperaturas medias medidas en diversas horas en las dos vigas y en el ambiente, comprobándose las grandes irregularidades registradas que alcanzan diferencias entre las dos vigas de 13° y con el ambiente de 10°.

Idénticamente se hicieron observaciones con aparatos topográficos muy delicados de las deformacio-

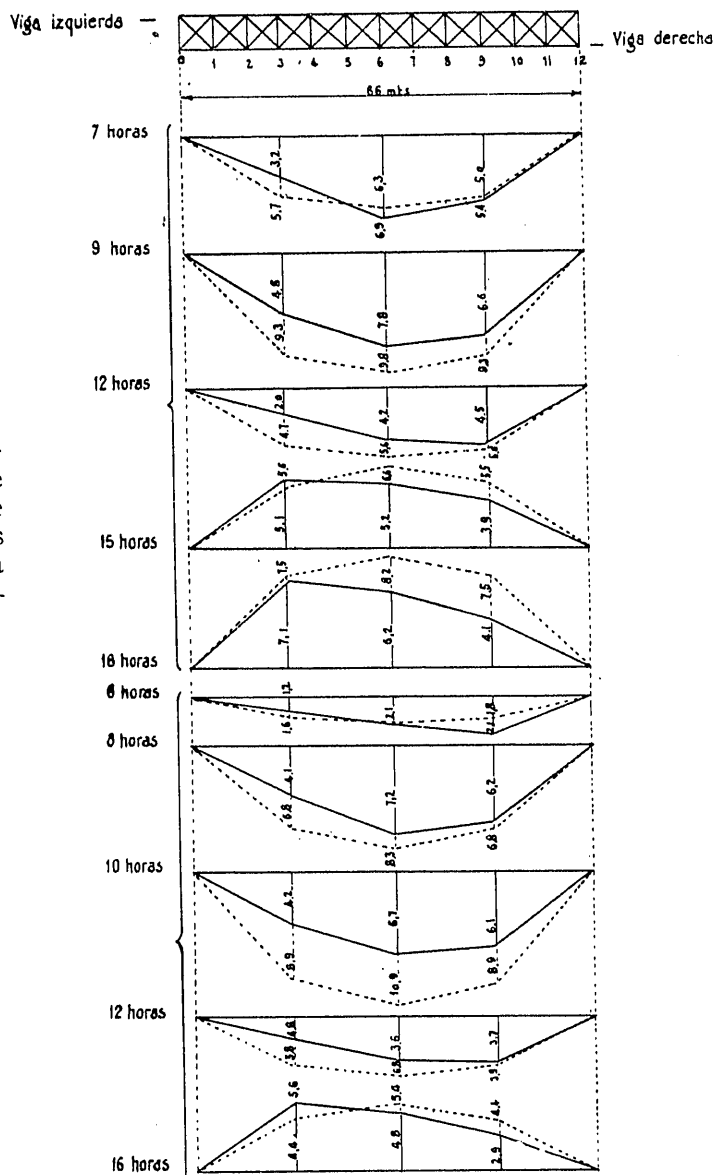


Fig. 17.

nes laterales, apareciendo en el gráfico de la figura 16, en las curvas en que se representan las máximas observadas en diversas horas con línea de trazos y su comparación con las deducidas por medio de las fórmulas y procedimientos empíricos de que más adelante se hablará.

Se ve se llega a deformaciones en uno y otro sentido en relación con la disposición normal de las vigas, variando como ya se había anunciado, en función de las horas y rectificándose al variar la posición relativa del sol, llegándose a valores absolutos de 16,5 mm en un caso, y 18,0 mm en otro.

En la figura 17 aparecen gráficos en las diversas

horas que se señalan de las deformaciones laterales de otros tramos de 66 m. de luz teórica, en días distintos a aquellos en que se hicieron las otras observaciones, apareciendo igualmente de líneas llenas las deformaciones calculadas y con trazos, las medidas; aquéllas, determinadas con las fórmulas que a continuación se detallan, apareciendo en el primer grupo, o sea el correspondiente al primer día, tres flechas en un sentido y dos en el contrario, según las horas de observación, y en los siguientes cuatro en uno y otra en cada sentido.

Las diferencias entre lo medido y calculado muestra no existe, como es muy difícil ocurra, coincidencia entre ambos valores; pero no son demasiado grandes dichas discordancias, y esto marca la necesidad de aplicar coeficientes de corrección evidentemente derivados de la realidad, comparando así las fórmulas establecidas sobre varios casos demasiado teóricos y empíricos.

Igualmente Patton y Dunajeff han propuesto fórmulas para estas deformaciones laterales, en las cuales las letras que en ellas aparecen tienen los siguientes significados:

l	Luz teórica de las vigas principales.
b	Separación de los ejes de las vigas principales.
t_1 y t_2	Diferencia entre las temperaturas de ambas vigas principales.
d	Longitud del recuadro.
m	Número de recuadros.
$\alpha = 0,0000118$..	Coefficiente de dilatación del material.
Y	Relación entre las deformaciones laterales de las vigas principales en cualquier punto y en el centro de las mismas.
K	Coefficiente de corrección del cálculo para obtener la medida.

Proponen ellos dos fórmulas, que son las siguientes:
La primera, o sea

$$\Delta\delta = K\alpha(t_1 - t_2) \cdot 0,125 \frac{l^2}{b}$$

cuando existen arriostramientos eficaces que solidaricen ambas vigas principales; por el contrario, cuando no existen o son muy débiles, la fórmula que debe aplicarse será

$$\Delta\delta = K\alpha(t_1 - t_2) \left[Y \cdot 0,125 \frac{l^2}{b} - \frac{md^2}{b} \right]$$

Resumen.—Puede comprobarse, después de cuanto se ha indicado, que existen indiscutiblemente deformaciones verticales y laterales que alcanzan verdadera importancia, derivadas de las variaciones de temperatura, y sus valores, bien teóricamente, mediante las fórmulas anotadas, se pueden determinar con suficiente aproximación, o prácticamente; es decir, que en definitiva su cuantía puede determinarse.

Conocida ésta y la disposición de las estructuras se puede hallar su valor con coeficientes aproximados, y valiéndose de los medios corrientes que la mecánica proporciona, los trabajos suplementarios que en cada pieza existen por esta causa, los que deben sumarse a los determinados por todos los demás, bien conocidos, pudiéndose así determinar la sección adecuada para cada barra.

D. MENDIZÁBAL

Ingeniero profesor de la E. de C., C. y P.

Saltos del Duero¹

Aprovechamiento de aguas del río Esla

Proyecto e instalación de los grandes medios auxiliares para la construcción del salto del Esla

Entre los trabajos que actualmente tiene en marcha la Empresa Saltos del Duero, S. A., creo que el de instalación de los grandes medios auxiliares que se van a utilizar para la construcción de la presa, central, etc., del aprovechamiento del Esla, es uno de los que puede resultar interesante para los lectores de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS.

Esta consideración me decide a dedicar algunas cuartillas a la descripción del proyecto que redactamos para la instalación de aquellos elementos de construcción, cuyo funcionamiento comenzará a fines del presente verano.

Me referiré, especialmente, a los medios auxiliares destinados a la obtención, transporte y manipulación de los materiales componentes del hormigón y a la puesta en obra del hormigón mismo.

Los referentes a excavaciones y demás obras son también de importancia, y han sido descritos anteriormente por mi compañero D. Manuel Echánove en

otro artículo de esta REVISTA, que dedicó a dar cuenta de los trabajos que Saltos del Duero realizó el verano de 1929. Por esto, en lo relativo a esos elementos, me limitaré a hacer las referencias suficientes para recordar sus características y su situación en obra, a fin de que así resulte más clara y más completa la visión de conjunto de la instalación total.

Dividiré la exposición en tres apartados: dedicaré el primero al criterio fundamental en que nos hemos inspirado al proyectar el plan de construcción; en el apartado segundo expondré datos relativos a la capacidad de conjunto, o sea al trabajo de que es capaz la instalación, y en el tercero haré una descripción general y esquemática de esta última, sin entrar en detalles respecto a las instalaciones parciales que integran la total, con la sola finalidad de que el lector pueda, rápidamente, formarse idea del trayecto que recorren los materiales desde el punto de su origen hasta su colocación definitiva en obra y de las partes del recorrido donde son objeto de alguna modificación o manipulación característica.

Más adelante, cuando esté terminado el montaje de la instalación y pongamos ésta en marcha, a fines del actual verano, dedicaré otro artículo a la descripción

¹ Véase la REVISTA del 15 de abril último, página 167.