

Esfuerzos secundarios¹

III

En los artículos anteriores hemos esbozado el estado actual de los estudios sobre los esfuerzos secundarios y los dos métodos que más se aplican para su cálculo. En este último vamos a indicar la manera de apreciar aproximadamente su valor, a estudiar los distintos tipos de vigas desde este punto de vista, a indicar la manera de reducirlos y, finalmente, esbozaremos unas a modo de conclusiones.

* * *

Como resultado de sus estudios dió el profesor Patton, de Moscou, en 1902, unas curvas que dan

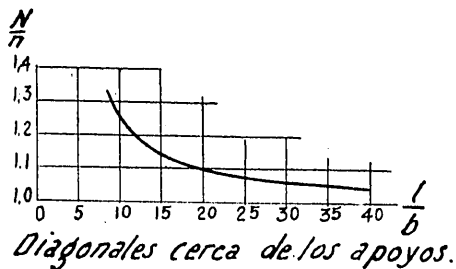


Fig. 1.a

una primera aproximación del esfuerzo secundario, pues no se considera en ellas ni el efecto del tipo de viga, ni de la distribución de la carga.

Las figuras 1.^a, 2.^a, 3.^a y 4.^a las indican, siendo N = el esfuerzo total; n = el esfuerzo secundario; l = la longitud; b = el ancho, y e = la distancia entre el eje neutro y la fibra extrema.

La figura 5.^a indica otra curva, debida a las ex-

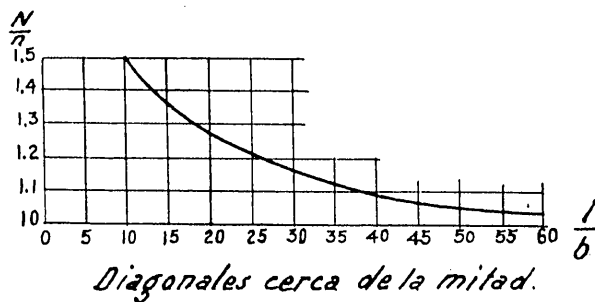


Fig. 2.a

periencias llevadas a cabo en los Caminos de hierro Federales Suizos.

* * *

De los estudios hechos por Jonhson Bryan y Turueare, de los realizados por la American Railway Engineering Association y por Grimm, podemos apreciar el modo de comportarse cada tipo de viga.

VIGAS SENCILLAS

Viga Pratt.—Los máximos esfuerzos secundarios ocurren cuando las cabezas y celosía resisten su es-

fuerzo máximo. El esfuerzo secundario para un esfuerzo máximo en las cabezas y mínimo en la celosía, es pequeño.

Si aumentamos las inercias de la celosía, los esfuer-

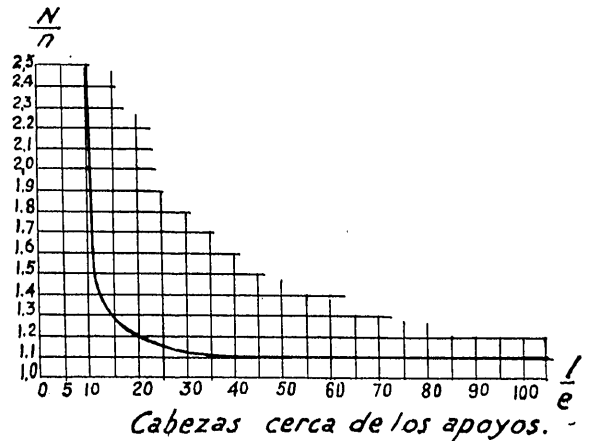


Fig. 3.a

zos disminuyen, y si lo hacemos en las cabezas, aumentan; teniendo en cuenta la relación de inercias

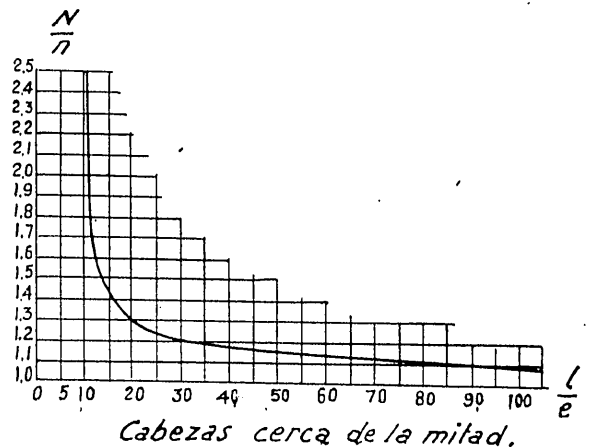


Fig. 4.a

de las cabezas, cuando son iguales, los esfuerzos secundarios, son casi iguales; pero si decrece la inferior,

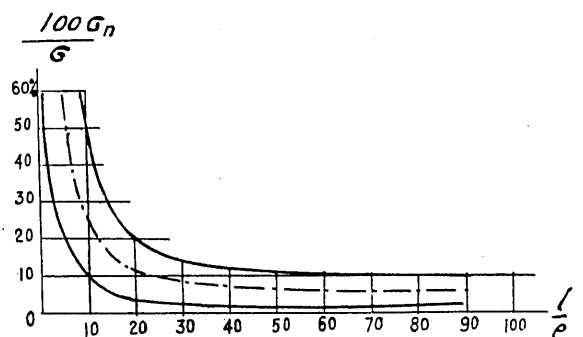


Fig. 5.a

aumenta considerablemente su esfuerzo secundario.

Los esfuerzos secundarios son menores en vigas cuya relación $\frac{h}{l} = 0,75$ que en vigas cuya relación

¹ Véase el número anterior, página 63.

$\frac{h}{l} = 1$, siendo h la altura de la viga y l el ancho del panel. Aproximadamente su valor es de $300 \frac{b}{l}$ por 100 en barras a tracción y de $200 \frac{b}{l}$ en barras a compresión, siendo b la distancia de la fibra neutra a la extrema y variará en las cabezas del 15 al 22 por 100 y en la celosía del 20 al 30 por 100.

Viga Warren.—Los esfuerzos secundarios crecen en las cabezas desde el centro a los extremos, mientras que en la celosía crecen en sentido contrario, seguramente debido al exceso de material en la celosía en el centro del vano y en las cabezas en los extremos.

Su valor es, aproximadamente, el mismo que en la Pratt $300 \frac{b}{l}$ en barras a tracción y $200 \frac{b}{l}$ en barras a compresión, o algo superiores en ambas vigas.

Comparando una viga Pratt de $\frac{h}{l} = \frac{4}{3}$ con una Warren de $\frac{h}{l} = \frac{4}{6}$ se ve que los esfuerzos secundarios en las cabezas son casi los mismos, pero en la celosía son mucho más pequeños en las Warren.

De la anchura y rigidez de las barras depende la flexión de los nudos. Una reducción del momento de inercia de una barra tiende a aumentar la flexión en ella y disminuye la de las otras. Para mantenerse en el medio es necesario hacer corresponder el ancho con su momento de inercia. Barras anchas de pequeño momento de inercia tienen fuertes esfuerzos secundarios.

VIGAS CON ELEMENTOS SUPERABUNDANTES

Los elementos superabundantes causan siempre gran distorsión y hacen aumentar enormemente los esfuerzos secundarios en los elementos de la viga sencilla que unen, siendo el incremento muy variable y pudiendo ser del orden de 4 a 5 veces el esfuerzo secundario primitivo en la viga sencilla. Puede suponerse en este caso que su valor en los elementos superabundantes y en los que enlazan éstos es de $5 \frac{b}{l}$. Merece estudio aparte la viga Warren con montantes.

Viga Warren con montantes.—Nacen los montantes al intentar disminuir la importancia de los elementos del piso; según que el tramo sea de piso superior o inferior, trabajan a compresión o a tracción; si hay cargas concentradas fuertes se deforman mucho, y estas deformaciones hacen nacer fuertes esfuerzos secundarios en la cabeza que refieren. Para disminuirlos se debe aumentar la sección de estos montantes, para que las deformaciones de los mismos sean pequeñas. Los esfuerzos secundarios en las diagonales son casi los mismos que cuando no existen; lo mismo en la cabeza libre.

Esta consideración de los montantes debe extenderse a cualquier viga superabundante que los tenga.

VIGAS DOBLES

Por superposición de dos vigas Warren o Pratt de caladas nace la viga Warren doble y la Linville; la viga Warren doble es la de celosía de primer grado.

Para una repartición desigual de la carga los esfuerzos en la cabeza aumentan enormemente y pueden ser del orden de cuatro veces los de la viga sencilla y alcanzar el 50 por 100 de los primarios, y aun para desequilibrios mayores hasta el 100 por 100 de los primarios.

Si no se unen en su cruce las diagonales, los esfuerzos secundarios en las mismas no son superiores a los de la viga sencilla.

Si las unimos, se aumentan en gran manera.

Se emplearán en vanos largos y pesados en donde sea grande la carga permanente y no sea, por lo tanto, de consideración un desequilibrio de la sobrecarga en los dos sistemas.

Vigas de Cruces de San Andrés.—Los esfuerzos son mucho menores que en la Warren doble sin montantes, y admite una comparación muy favorable con la Warren sencilla. Es, pues, este tipo de viga uno de los más satisfactorios con respecto a los esfuerzos secundarios.

Si las diagonales se unen en su cruce, los esfuerzos secundarios crecerán por esto; pero en las cabezas sufrirán poco cambio. El aumento es, sin embargo, menor que en la viga Warren doble sin montantes.

Viga tipo K.—Da pequeños valores para los esfuerzos secundarios, se adopta en grandes vanos y da paneles cortos sin inclinaciones grandes de la celosía. Tiene las ventajas de la Warren doble, sin sus desventajas.

* * *

Vamos ahora a indicar el modo de reducir o suprimir los esfuerzos secundarios. Se ha intentado reducirlos, provocando deformaciones previas durante el montaje.

En el puente de Scioto, sobre el Ohío, se encorvaron las barras para la carga permanente y mitad de la sobrecarga, pero uniéndolas y montándolas, de modo a conservar el ángulo entre barras contiguas correspondiente a la forma geométrica de la viga. De otro modo, bajo la carga $\left(d + \frac{1}{2}l\right)$ las vigas se supone tienen su verdadera forma geométrica y las barras son rectas y libres de esfuerzos secundarios.

Los debidos al peso propio son así eliminados y los de la sobrecarga son mitad, o mejor dicho, los esfuerzos secundarios por el peso propio son iguales y de signo contrario a los de la completa sobrecarga y mitad en valor absoluto a los debidos a la sobrecarga, si se hubiesen doblado las barras para el peso propio.

Como norma puede tomarse la indicación de Waddell: «Los esfuerzos secundarios en las estructuras rígidas deben atenuarse proyectando las barras más largas o más cortas de lo necesario en los valores de sus respectivas deformaciones longitudinales, debidas a la carga permanente y mitad de la sobrecarga, uniendo de un modo definitivo los elementos de la estructura cuando se sitúen en la posición adecuada, forzando si es preciso las piezas y escariando los orificios debidamente.»

* * *

Vamos a indicar las conclusiones que se desprenden del estudio, algunas de las cuales son reproducción íntegra de las de la American Railway Engineering

Association, publicadas en el *Boletín* 163, en enero de 1914:

1.º En una estructura la flexión producida en sus elementos es, en general, proporcional a la intensidad de los esfuerzos primarios; es decir, que a mayor valor absoluto de éstos, corresponde mayor deformación angular y longitudinal.

Como los esfuerzos derivados de estas flexiones, o sean los secundarios, son proporcionales a aquéllas, serían igualmente proporcionales a los esfuerzos primarios en un determinado tanto por ciento; conviene, pues, expresar estos esfuerzos en por 100 de los primarios.

2.º En igualdad de condiciones, estos esfuerzos son directamente proporcionales a la distancia de la fibra neutra a la extrema, e inversamente proporcionales a la longitud de la barra $\left(\frac{b}{l}\right)$. En las barras simétricas, proporcionales a la relación $\frac{\text{ancho}}{\text{longitud}}$.

3.º Cuando en dos vigas las dimensiones generales y los momentos de inercia de las barras son proporcionales, el por 100 de esfuerzo secundario variará con la relación $\frac{a}{l}$ de las barras, y esto, debido a que si los esfuerzos principales son los mismos en las dos vigas, las deformaciones angulares serán iguales, y por la igualdad de éstas, las tensiones en las fibras extremas son proporcionales a la relación $\frac{a}{l}$.

Realizados los cálculos para una serie de vigas tipo de celosía, es posible deducir con una exactitud suficiente el valor de los esfuerzos secundarios en otra viga, tomando por bases la relación $\frac{a}{l}$ de las barras.

4.º Los esfuerzos secundarios de un elemento cualquiera de la estructura dependen de las flexiones de los que forman aquélla, pero principalmente de las que constituyen las células de que forma parte e inmediatos al mismo.

5.º Cuanto más uniformes sean los elementos de una estructura y la estructura misma, menores serán los esfuerzos secundarios. Los cambios bruscos de longitud, anchura y momento de inercia hacen nacer fuertes esfuerzos secundarios.

6.º Las estructuras constituídas por triángulos equiláteros sin péndolas o montantes presentan gran uniformidad y tienen, en general, pequeños esfuerzos secundarios. Aumentan éstos cuando los triángulos son rectángulos y con la relación $\left(\frac{\text{altura}}{\text{longitud}}\right)$ de sus catetos.

Se deben evitar ángulos de unión de barras inferiores a 60º.

7.º En las vigas Warren dobles son muy importantes estos esfuerzos, reduciéndose cuando se emplean montantes formando las vigas de cruces de San Andrés.

8.º Cuando se usan montantes superabundantes en una viga Warren o Pratt formando los tipos Petit y Baltimore, los esfuerzos secundarios en la cabeza

que refieren a los nudos son considerablemente mayores que cuando no existen. La mejor disposición respecto a estos esfuerzos es que cada elemento de la celosía forme parte integral de la viga, de modo que el esfuerzo cambie gradualmente con la carga.

9.º Los esfuerzos secundarios más débiles se encuentran en las vigas formadas por triángulos equiláteros, en las Pratt y en las K sin elementos secundarios.

10. Como valor aproximado, se puede indicar para las vigas Pratt, Howe y Warren $3,5 \frac{b}{l}$ como relación entre los primarios y secundarios. En los tipos Baltimore y Petit la relación será $5 \frac{b}{l}$.

11. Las uniones excéntricas aumentan los esfuerzos secundarios y deben evitarse. Las uniones rígidas, por otro lado, actúan favorablemente, distribuyendo los momentos y reduciendo los esfuerzos de uniones excéntricas.

12. La influencia de la rigidez de las cabezas de una viga es muy apreciable, no sólo por disminuir la deformación general, sino por reducir los esfuerzos secundarios.

13. Los esfuerzos secundarios medidos concuerdan con los calculados bastante exactamente, cuando la viga es sencilla, sin elementos superabundantes.

14. Cuando el esfuerzo de una fibra extrema excede el límite de elasticidad, los esfuerzos secundarios decrecen rápidamente, es decir, dejan de crecer proporcionalmente al esfuerzo axial. No tienen, pues, éstos influencia marcada en la destrucción de la obra.

15. Se harán cortarse en un punto los ejes de inercia de las barras en donde no haya variación de la sección de las cabezas a uno y otro lado del nudo. Si la hay, los ejes de las barras de la celosía se cortarán en el borde inferior de la platabanda, si no se realiza un estudio más completo¹.

16. Se evitarán las disimetrías de las barras respecto al plano principal de la viga.

17. No se deben unir en su cruce las diagonales de una viga de celosía; esto hace aumentar en gran manera los esfuerzos secundarios.

18. Las vigas de celosía, nacidas de la superposición de sistemas sencillos, sólo se emplearán en grandes vanos en donde el peso propio tenga mucha importancia, ya que una repartición desigual de la carga entre sus sistemas sencillos produce fuertes momentos secundarios en sus cabezas. Estos disminuyen empleando montantes.

19. Los montantes o péndolas superabundantes deben tener secciones fuertes para disminuir sus deformaciones y con ello los esfuerzos secundarios en las cabezas que refieren.

Nada más. Si estas cuartillas logran ser de utilidad para alguien, cumplirán el fin que al escribirlas guió al autor.

José JUAN ARACIL
Ingeniero de Caminos

¹ REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS, 1 de julio 1923, pág. 77. «Sobre un detalle de las construcciones metálicas», por Gonzalo Torres Polanco.