

REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACION TECNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

D. JUAN FATJÓ

El activo e inteligente ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, que llevó el peso de la Tesorería del Instituto de Ingenieros Civiles durante la celebración del Congreso y Exposición de Ingeniería, y que, como miembro de la Junta directiva, cooperó valiosamente al éxito de uno y otra, ha fallecido; su muerte, muy sentida por todos, ha sido una sorpresa para muchos que no sabrán era presa de fulminante enfermedad, que, en pocos días, le llevó al sepulcro.

Cumplidor sin tacha de sus deberes oficiales, ha sido, además, el alma de nuestra Asociación de Ingenieros de Caminos muchos años, y no perdonó sacrificio alguno para estar siempre en su puesto, atendiendo solícito a cuanto podía contribuir al prestigio de aquélla.

De carácter bondadoso y espíritu recto, su nombre no es posible olvidarlo. No podemos darnos cuenta de que no le hemos de ver más.

El relieve de su vida requiere debido artículo necrológico que hemos de publicar; hoy sólo trazamos apenados estas líneas para expresar nuestro más vivo dolor.

Interpretando el sentir de todos los compañeros, manifestamos la profunda pena que su muerte nos ha causado y la seguridad de que no le olvidaremos, que su recuerdo perdurará entre nosotros como ingeniero distinguido y como amigo verdadero que fué de todos.

¡Descanse en paz!

PUENTES ECONÓMICOS DE HORMIGÓN ARMADO PARA CAMINOS VECINALES ⁽¹⁾

DESCRIPCIÓN Y CÁLCULO DE LAS OBRAS

I

CÁLCULO EN GENERAL.

Aunque estrictamente debiéramos limitarnos a la justificación de las obras proyectadas, creemos útil detallar los procedimientos seguidos, que podrán servir de guía, ahorrando no poco trabajo, a los ingenieros que necesiten proyectar alguna obra especial, no comprendida en esta colección de modelos.

El tren de sobrecargas móviles aparece en la figura 2.^a: el cilindro compresor de 6 m de longitud, precedido y seguido por $400 \times 2,2 = 880 \text{ kg} : \text{m}$, que actúan en el firme, en toda la longitud restante del vano.

En los tramos de luz inferior a 3 m la única sobrecarga aislada que cabe considerar es la del eje posterior del cilindro. La máxima flexión en la abscisa absoluta a metros es $12\,000 \frac{a(l-a)}{l} \text{ mkg}$.

(1) Véase el número 2344.

En las luces de 4, 5 y 6 m caben ya los dos ejes, distantes $3,875 = d$. En la abscisa a la flexión, debida al eje posterior allí mismo situado, es $12\,000 \frac{a(l-a)}{l}$, y la correspondiente al otro eje en $(a+d)$, es $8\,000 \frac{a(l-a-d)}{l}$. En total, siempre que $a < l - 3,875$

$$\left(20\,000 \frac{a(l-a)}{l} - \frac{31\,000 a}{l}\right) \text{ mkg}$$

En las luces superiores a 6 m y cuando, situado en la abscisa a el eje de 12 000 kg, quepa admitir la sobrecarga uniforme desde 0 hasta $(a - 1,5)$ y desde $(a + 4,5)$ hasta l , como en general hemos supuesto, resulta un valor de la reacción izquierda,

$$\mathcal{V} = 880(a - 1,5) \frac{2l - a + 1,5}{2l} + 12\,000 \frac{l-a}{l} + 8\,000 \frac{l-a-3,875}{l} + 880 \frac{(l-a-4,5)^2}{2l} = \frac{14\,720(l-a) + 440l^2 - 23\,080}{l} \quad (1)$$

Y la máxima flexión bajo el eje de 12 000, o en la abscisa a , vale

$$\mathcal{M} = \mathcal{V}a - 880(a - 1,5) \frac{a+1,5}{2} = \mathcal{V}a - 440(a^2 - 2,25) \quad (2)$$

pero solamente mientras $a > 1,5$ y $a < l - 4,5$.

En las secciones en que $a < 1,5$, sólo queda:

$$\mathcal{V} = \frac{20\,000(l-a) - 31\,000 + 440(l-a-4,5)^2}{l}; \quad \mathcal{M} = \mathcal{V}a \quad (3)$$

Y en aquellas en que $a > l - 4,5$

$$\mathcal{V} = \frac{20\,000(l-a) - 31\,000 + 440(a-1,5)(2l-a+1,5)}{l}; \quad \mathcal{M} = \mathcal{V}a - 440(a^2 - 2,25) \quad (4)$$

Las abscisas escogidas para definir bien la distribución de flexiones son las correspondientes a 0,15, 0,30, 0,37, 0,43, 0,47 y 0,50 de la luz. Sabido es que con sobrecargas concentradas el máximo momento no corresponde al centro del vano. Su valor, que en forma explícita es

$$\mathcal{M} = 440a(l-a) + 14\,720a \frac{l-a}{l} - 23\,080 \frac{a}{l} + 990$$

se hace máximo para

$$a_m = \frac{440l^2 + 14\,720l - 23\,080}{880l + 29\,440} = \frac{l}{2} - \frac{23\,080}{880l + 29\,440}$$

y su simétrico cuando se invierte la posición del cilindro. Para $l = 8,5, 10, 20, 36$ m, resultan $a_m = 0,425l, 0,440l, 0,475l, 0,490l$, valores que justifican los elegidos para definir bien la zona central.

Cuando al efecto del tren se suman los de la sobrecarga en las aceras y del peso muerto, cuyos valores son de la conocida forma parabólica $\frac{1}{2}pa(l-a)$ los puntos de máxima flexión total se acercan más al centro del vano, o coinciden con él.

Los mayores esfuerzos tangenciales se obtienen sobrecargando, todo lo posible, la parte de tramo comprendida entre la sección considerada, en la que debe actuar el eje más pesado y el apoyo más lejano.

Sus valores son los de la reacción izquierda $\mathcal{V}$, correspondiente a actuar en la abscisa a el eje de 12 000 kg, en la $(a + 3,875)$ el de 8 000 y en el resto, desde $(a + 4,500)$ hasta l , la sobrecarga de 880 kg : m en el firme. En las aceras hay que considerar su sobrecarga de $400 \times 2 \times 0,70 = 560$ kg : m, extendida desde a hasta l . Así resulta, según (3),

$$\mathcal{T}_s = \frac{20\,000(l-a) - 31\,000 + 440(l-a-4,5)^2}{l} + \frac{280(l-a)^2}{l} \quad (5)$$

desapareciendo el tercer término del primer quebrado cuando $a > l - 4,5$.

En las luces pequeñas y para valores de $a < 3,875$ m pueden resultar esfuerzos tangenciales mayores que (5), cuando situado en a el eje de 12 000 kg y sin entrar en el vano el de 8 000 (invirtiendo la posición del cilindro) reina la sobrecarga de 880 kg : m desde $(a + 1,50)$ hasta el estribo derecho. Entonces:

$$\mathcal{T}'_s = \frac{12\,000(l-a) + 440(l-a-1,5)^2}{l} + \frac{280(l-a)^2}{l} \quad (6)$$

Como estos esfuerzos tangenciales varían más rápidamente donde alcanzan mayores valores, los calculamos para las secciones de abscisas iguales a 0,00, 0,05, 0,10, 0,15, 0,25, 0,35 y 0,50 de la luz.

El efecto del peso muerto es $\mathcal{T}_p = 0,5 p (l - 2a)$, nulo en el centro ($a = 0,5 l$), mientras que el expresado por (5) dista mucho de serlo. Importa en los puentes de alma calada conocer la zona central, en la que la suma $\mathcal{T}_s + \mathcal{T}_p$ de esfuerzos tangenciales puede cambiar de signo. Como puede suponerse, con error favorable a la seguridad, que $\mathcal{T}_s$ varíe linealmente desde $a = 0,5 l$ hasta el extremo derecho (fig. 3.^a) la condición

$$\mathcal{T}'_p \frac{d}{0,5 l} = \mathcal{T}'_s \frac{0,5 l - d}{0,5 l}; \quad d = 0,5 l \frac{\mathcal{T}'_s + \mathcal{T}'_p}{\mathcal{T}'_s}$$

determina la distancia d que a uno y otro lado del centro del vano puede alcanzar la zona de inversión, según que las sobrecargas móviles avancen de derecha a izquierda (caso de la figura), produciendo los mayores $(\mathcal{T}_s + \mathcal{T}_p)$ positivos, desde 0 hasta $0,5 l + d$, o viceversa, negativos desde 0 hasta $0,5 l - d$. Y en un punto a la distancia $\delta < d$ del centro, el esfuerzo tangencial es $\pm \frac{d-\delta}{d} \mathcal{T}'_s$

II

OBRAS DE PEQUEÑA LUZ.

Para las luces hasta 5 m inclusive, la forma de losa plana da la mano de obra más sencilla y el mínimo gasto en moldes. Las obras proyectadas, cinco para simple y otras tantas para doble vía, se reducen a forjados de espesor uniforme en cada tipo, armados todos con 10 barras de 6 mm de diámetro por metro de luz, que les prestan rigidez en sentido transversal; otras tantas barras por metro de anchura, de los diámetros adecuados, les dan la debida resistencia en sentido longitudinal.

Un regreso de 8 cm en dos fajas laterales de 30 de ancho, protegidas las aristas del hormigón con cantoneras metálicas, forma la caja del firme. Los anchos de 3,10 y 4,40 m engloban en simple y doble vía los ya fijados de 2,20 y 3,40 centímetros, con parte de los destinados a andenes, que ahora no están separados por bordillos; y, por no existir limitación material para las posiciones extremas de las ruedas de vehículos, aumentamos 0,10 y 0,20, respectivamente, sus zonas de circulación.

Las sobrecargas concentradas son las de influencia decisiva en estas losas. Las ruedas traseras del cilindro de 20 000 kg dan presiones de 6 000 en fajas de contacto de 40 cm de longitud, que transmitidas por un espesor medio de 10 de firme interesan directamente una zona de 60 cm. La faja de hormigón armado que colabora en la resistencia se extiende por uno y otro extremo de dicha zona, tanto más cuanto mayores son la luz salvada y la rigidez transversal de la losa. Es práctica ya antigua, aceptada como norma oficial en las últimas Instrucciones alemanas, contar los dos tercios de la luz como ancho eficaz relativo a sobrecargas concentradas en un punto, lo que da para este caso $(0,60 + 0,67 l)$ m. La losa de 1 m ofrece, simplemente por su gran espesor, 15 cm, una rigidez transversal mucho mayor, relativamente a la luz, que la ordinaria. Por excepción admitimos, basados en los datos experimentales de que se deriva la regla citada, que el ancho eficaz alcance en ella a $(0,60 + l)$ ó 1,60 m.

Así, pues, la máxima flexión producida por la rueda de 6 000 kg, es $\frac{6\,000 \times 1}{4 \times 1,60} = 925$ mkg en metro de anchura; la debida al peso muerto de hormigón y firme $(0,15 \times 2\,400 + 0,10 \times 2\,000) = 560$ kg : m², es 70 y la total 995 mkg. A la armadura de 10 barras de 12 mm ($a = 11,3$ cm²) y al canto útil de 12 cm corresponden:

$$50 x^3 = 15 \times 11,3 (12 - x); \quad x = 4,9 \text{ cm}$$

$$\mathcal{J} = \frac{100 \times 4,9^3}{3} + 15 \times 11,3 (12 - 4,9)^2 = 12\,490 \text{ cm}^4$$

como profundidad de la fibra neutra y momento de inercia. De ahí resultan las cargas máximas

$$\mathcal{H}' = \frac{99\,500 \text{ cm kg} \times 4,9 \text{ cm}}{12\,490 \text{ cm}^4} = 38,8 \text{ kg : cm}^2$$

$$\mathcal{A} = \frac{15 \times 99\,500 \times 7,1}{12\,490} = 847,7 \text{ kg : cm}^2$$

en el hormigón y armadura, respectivamente.

El mayor esfuerzo tangencial por metro de anchura se compone de 280 kg por peso muerto y de $3\,000 : 1,6 = 1\,875$, por la sobrecarga, en suma 2 155 kg; el brazo de palanca entre la armadura y centro de presión es $b = 12 - 4,9 : 3 = 10,4 \text{ cm}$ y la máxima carga principal vale $1\,875 : 1\,040 = 1,8 \text{ kg : cm}^2$

En la losa de 2 m de luz, con espesor y canto útil de 20 y 17 cm, el ancho interesado por cada rueda vale, según la regla citada, 1,93 m, es decir, que la totalidad de la losa de 3,70 m de ancho (simple vía) resiste eficazmente. Al peso muerto de 720 kg : m^2 que da una flexión de 360 mkg, hay que agregar en la faja de 1 m de ancho $\frac{12\,000 + 2}{4 + 3,70} = 1\,622$, en total 1 982 mkg. Con la armadura de 10 barras de 14 mm ($15,4 \text{ cm}^2$) resultan $x = 6,8 \text{ cm}$; $\mathcal{I} = 34\,500 \text{ cm}^4$, $\mathcal{H}' = 39,0$ y $\mathcal{A} = 878 \text{ kg : cm}^2$. Al mayor esfuerzo tangencial, $720 + 6\,000 : 3,7 = 2\,340$ corresponde ($b = 14,7 \text{ cm}$) la máxima carga principal de $1,6 \text{ kg : cm}^2$

Análogamente, resultan para la losa de 3 m, con 10 barras de 16 ($20,1 \text{ cm}^2$), espesor y canto de 25 y 22 cm, peso muerto de 840 kg : m^2 , flexiones de 945 y 2 434, en total 3 380 mkg; $x = 8,9 \text{ cm}$, $\mathcal{I} = 75\,050 \text{ cm}^4$, $\mathcal{H}' = 40,0$ y $\mathcal{A} = 886 \text{ kg : cm}^2$. Al esfuerzo de 2 882 kg corresponde ($b = 19 \text{ cm}$), carga principal de $1,5 \text{ kg : cm}^2$.

De igual modo en la de 4 m, con 10 barras de 18 ($25,5 \text{ cm}^2$), espesor y canto de 30 y 27 cm, peso muerto de 960 kg : m^2 , valen las flexiones $1\,920 + 3\,244 = 5\,164 \text{ mkg}$; $x = 11 \text{ cm}$, $\mathcal{I} = 142\,160 \text{ cm}^4$, $\mathcal{H}' = 40,0$ y $\mathcal{A} = 872 \text{ kg : cm}^2$. La carga principal debida a $\mathcal{C} = 3\,542 \text{ kg}$ ($b = 23,4 \text{ cm}$) es $1,5 \text{ kg : cm}^2$.

Por último, en la losa de 5 m, armadura de 10 barras de 21 ($34,6 \text{ cm}^2$) espesor y canto de 35 y 32 cm, peso muerto $1\,080 \text{ kg : m}^2$, $\mathcal{M} = 3\,375 + 4\,055 = 7\,430 \text{ mkg}$, resultan: $x = 13,8 \text{ cm}$, $\mathcal{I} = 259\,390 \text{ cm}^4$, $\mathcal{H}' = 39,5$ y $\mathcal{A} = 784 \text{ kg : cm}^2$; $\mathcal{C} = 4\,322 \text{ kg}$ ($b = 27,4 \text{ cm}$) y carga principal $1,6 \text{ kg : cm}^2$.

Las losas para doble vía son idénticas a las descritas en espesores y armaduras y las cargas de trabajo resultan, evidentemente, más moderadas, aun suponiendo cubierto con sobrecarga de 400 kg : m^2 el ancho dejado libre por el cilindro compresor (sería absurdo considerar posible el cruce de dos cilindros y aun el de uno con un carro muy pesado).

Todas las barras terminan en ganchos de diámetro igual, cuando menos, al quintuplo del suyo propio, disposición que dispensa, con ventaja, de limitar el grueso de las armaduras para obtener la debida adherencia. Aunque las cargas principales en los extremos son tan reducidas, de 1,5 a $1,8 \text{ kg : m}^2$, que el hormigón sólo basta para soportarlas, introducimos en la mitad de los cruces de barras longitudinales y transversales lazos de alambre de 4 mm, siempre convenientes para el buen hormigonado y que constituyen armadura secundaria más que sobrada. Y, a medida que lo consienten las luces, proyectamos también doblar parte de las barras llevándolas suavemente hasta el trasdós, disposición que favorece mucho la resistencia y rigidez, según demuestra la experimentación.

Desde la luz de 3 m en adelante disponemos barandillas metálicas, cuyos detalles dan los planos, de un tipo que hemos empleado con éxito en nuestras obras y que reúne gran sencillez a una resistencia muy sobrada. Los elementos horizontales son redondos de 20 mm que excitan la codicia mucho menos que los tubos ordinariamente empleados.