

# Refuerzos de puentes metálicos en los Ferrocarriles del Estado

(Continuación)

## CAPITULO IV

### REFUERZOS DE TABLEROS

El refuerzo de los tableros puede hacerse directa o indirectamente. En el primer caso se aumenta el momento resistente agregando suelas a las longuerinas y travesaños hasta conseguir el momento de inercia necesario. El segundo, o indirecto, es más usado, consiste en transformar las piezas del tablero en vigas armadas con tirantes y pendolones.

El sistema indirecto presenta sobre el primero grandes ventajas:

- 1) Ocupa menor cantidad de material; es un 30% más liviano que el directo;
- 2) Menor costo de elaboración, pues la mayor parte se hace en el taller;
- 3) Más fácil armadura. Se evita el tener que levantar la línea para la presentación y colocación de las suelas del refuerzo;
- 4) Ofrece mayor seguridad para el tráfico. En el refuerzo directo hay que agujerear las alas horizontales de los ángulos para remachar las suelas de refuerzo; esto hace disminuir el momento resistente en un 12%, o sea, que aumenta la fatiga en este porcentaje. Esto es de gran importancia ya que los tableros que se refuerzan soportan generalmente fatigas mayores de 18 Kgs/mm<sup>2</sup>, que en este caso pasarían a ser de 20,2 Kgs/mm<sup>2</sup>.
- 5) Se evita el tener que aumentar el diámetro o el número de los remaches horizontales en las zonas de los esfuerzos rasantes máximos, como pasa en los refuerzos directos, debido a la alta fatiga de aplastamiento que se desarrolla.
- 6) Se disminuye a un minimum la agujereadura en el material existente que por ser a veces quebradizo conviene perforar lo menos posible.

El ensamble de los tirantes a las longuerinas queda generalmente defectuoso debido a que los remaches trabajan al descabezamiento, lo que obliga a aumentar su número. Este inconveniente puede subsanarse en parte cuando el mismo gousset sirve para unir los pendolones al travesaño.

En los puentes de vía superior o intermedia se puede siempre ejecutar con ventaja el refuerzo indirecto, especialmente en los travesaños en que se aprovechan las diagonales de los contravientos verticales como tirantes del refuerzo.

En los puentes de vía inferior hay que ver si las creces máximas dejan la altura libre suficiente para la colocación de este refuerzo. Tanto en los ensambles de los tirantes de longuerinas como en los de los travesaños habrá que aceptar remaches que trabajen al descabezamiento; por eso estos ensambles conviene estudiarlos cuidadosamente.

Para determinar el número de pendolones en las longuerinas es conveniente hacer un tanteo previo; en general, basta un pendolón para luces menores de 3,80 m. En los travesaños a veces basta con uno; mas, es preferible colocar dos, a plomo de las longuerinas para favorecer el ensamble del tirante de éstas. En los puentes en curva en que la disposición de las longuerinas no es simétrica respecto del eje del puente, conviene colocar un sólo pendolón, aunque sea necesario reforzar la cabeza superior del travesaño con suelas.

La altura de los pendolones en el refuerzo de los travesaños queda fijada en los puentes de vía superior o intermedia por las diagonales de los contravientos verticales que van a servir de tirantes. En las de vía inferior puede tomarse, como para las longuerinas,  $\frac{1}{3}$  a  $\frac{1}{4}$  de la luz. A plomo de los pendolones hay que reforzar siempre el alma de la longuerina o travesaño correspondiente.

El peso del refuerzo depende principalmente del recargo de fatiga que sufre el tablero con el tren de cálculo. Influye, también, la mayor o menor facilidad de hacer los ensambles; los perfiles ángulos mínimos que se pueden aceptar, etc. Por esto no se puede relacionar el peso solo con el recargo de fatiga. Como término medio para anteproyectos se puede tomar 230 Kgs m. c. de puente.

En el cuadro que va a continuación damos los datos principales de los refuerzos de este tipo que se han hecho en nuestros puentes.

## REFUERZOS DE TABLEROS CON TIRANTES Y PENDOLONES

PUENTES	Vía	LUCES		NUM. DE PENDOLONES		ALTURA DEL PENDOLON		Peso del refuerzo por M.C. de puente, Kgs	Tren de cálculo	OBSERVACIONES
		Long. m.	Trav. m.	Long.	Trav.	Long. m.	Trav. m.			
Chanco .....	Sup.	2,900	4,57	1	2	0,90	1,440	257	C	
Quino .....	»	4,070	4,65	2	2	1,00	1,420	234	C	
Salto .....	»	3,900	4,65	2	2	1,00	1,420	244	C	
Quillén .....	»	3,420	4,75	1	2	1,00	1,180	218	C	
Cajón .....	»	2,410	4,55	1	2	0,90	1,280	274	C	
Pichi-Quepe .....	»	1,430	4,55	1	2	0,40	0,960	318	B	
Quepe .....	»	3,420	4,75	1	2	1,00	1,100	246	B	
Toltén .....	»	4,070	4,65	2	2	1,00	—	222	B	
Lipingue .....	»	3,900	4,65	2	2	1,00	1,180	238	B	
Collilelfu.....	»	4,130	4,65	2	2	1,00	1,400	224	B	
Cuenco N.º 2.....	»	2,900	4,57	1	2	0,90	1,400	196	B	
Llollehue N.º 3.....	»	3,575	4,65	1	2	1,00	1,280	183	B	
Dumo.....	»	2,100	3,60	1	—	0,70	—	185	B	Refuerzo especial del travesaño.
Huequen.....	»	2,100	3,60	1	—	0,70	—	185	B	» » » » »
Llollehue N.º 1.....	Inf.	2,410	4,55	1	2	0,70	0,800	244	B	
Cautín.....	»	2,930	4,65	1	2	0,90	0,960	221	B	
Tapihue .....	»	3,200	4,60	1	2	0,85	0,900	202	C	
Demaihue.....	»	1,530	4,55	—	—	—	—	304	B	El travesaño se reforzó directamente; a la long. se le agregó
Llollehue N.º 2.....	Interm.	3,720	4,65	1	2	1,00	1,100	219	B	Se colocó contraviento secundario. [otra debajo.
Río Bueno N.º 1 .....	Inf.	3,380	4,65	—	2	—	0,900	298	B	La longuerina lleva refuerzo directo.
Pilmaiquén N.º 1 .....	»	3,380	4,65	—	2	—	0,900	298	B	» » » » »
Damas .....	Interm.	4,166	6,00	—	1	—	—	287	B	La long. se ref. direct. y se le agregó contrav. secund. Al trav. se agreg. 1 suela en parte superior. Puente en curva.
Huilquilco .....	Inf.	1,920	4,55	—	—	—	—	347	B	Se camb. las long.; se ref. direct. el trav.
Pelal .....	»	2,900	4,57	—	—	—	—	185	B	Refuerzo directo.
Huaquilpo .....	Sup.	2,670	4,57	1	1	0,90	2,250	256	B	En curva. El trav. lleva 1 suela de refzo. en la cabeza superior.
Calle-Calle N.º 1.....	Inf.	2,888	4,75	—	1	—	1,580	48	B	No se reforzó la longuerina.
Paine Poniente .....	»	2,790	4,75	—	2	—	0,800	90	C	» » » » »
Angostura Poniente .....	»	3,580	4,80	1	1	0,80	0,800	204	C	
Tinguiririca .....	»	3,437	4,69	—	1	—	1,000	112	C	No se reforzaron las longuerinas.
Quinta .....	»	3,800	5,01	—	2	—	0,900	172	C	Las longuerinas se reforzaron directamente.
Lontué .....	»	3,800	5,01	—	—	—	—	192	C	Refuerzo directo de longuerinas y trav.
Putagán .....	»	—	4,60	—	2	—	0,840	101	C	No se reforzó la longuerina.
Ancoa N.º 1 y 2 .....	»	—	5,00	—	2	—	0,900	110	C	» » » » »
Achibueno .....	»	—	5,00	—	2	—	0,890	120	C	» » » » »
Liguay, tramo 31 m. ....	»	3,200	4,60	—	2	—	0,850	303	C	Refuerzo directo de la longuerina.
Batros .....	»	3,100	5,00	—	2	—	0,900	143	C	» » » » »
Chillán, tramo 28,5 m....	»	3,655	5,10	—	—	—	—	181	C	» » » » » y travesaños.
Chillán, tramos 31 m. ...	»	3,200	4,60	—	2	—	0,850	303	C	» » » » »
Pal-Pal.....	»	—	4,75	—	2	—	0,845	104	C	No se reforzó la longuerina.
Claro .....	»	—	4,65	—	2	—	0,900	67	C	» » » » »

## MÉTODO DE CÁLCULO

Sea A B una viga armada con dos pendolones C F y D C y un tirante E F G H (lámina 9). Sean  $\Omega$ , I, y E, la sección, el momento de inercia y el módulo de elasticidad de la viga;  $\Omega_2$ ,  $E_2$ ,  $T_2$  y  $\Omega_3$ ,  $E_3$ ,  $T_3$  las secciones, módulos de elasticidad y tensiones en el tirante y los pendolones respectivamente. Llamaremos X el empuje horizontal que se desarrolla en el tirante, M el momento total en la viga armada y m el momento en la viga simplemente apoyada A B.

Tenemos:

$$M = m - X y$$

El trabajo L de deformación es:

$$L = \int_0^l \frac{M^2}{2E_1 I_1} dx + 2 \frac{T_2^2}{2E_2 \Omega_2} \cdot \frac{a}{\cos a} + 2 \frac{X^2}{2E_2 \Omega_2} \cdot b + 2 \frac{T_3^2}{2E_3 \Omega_3} \cdot h$$

Se tiene:

$$T_2 = \frac{X}{\cos a} \dots \dots \dots \frac{d T_2}{d X} = \frac{1}{\cos a}$$

$$T_3 = X \operatorname{tg} a \dots \dots \dots \frac{d T_3}{d X} = \operatorname{tg} a$$

La derivada de L respecto de X es igual a 0.

$$\int_0^l \frac{M}{E_1 I_1} (-y) \cdot dx + 2 \frac{T_2}{E_2 \Omega_2} \cdot \frac{a}{\cos^2 a} + 2 \frac{X}{E_2 \Omega_2} \cdot b + 2 \frac{T_3}{E_3 \Omega_3} \cdot h \operatorname{tg} a$$

Reemplazando los valores de M,  $T_2$  y  $T_3$  y multiplicando toda la ecuación por  $E_1 I_1$  se tiene:

$$-\int_0^l m y dx + \int_0^l y^2 dx \cdot X + \frac{2E_1 I_1}{E_2 \Omega_2} \cdot \frac{a}{\cos^3 a} \cdot X + \frac{2E_1 I_1}{E_2 \Omega_2} \cdot b \cdot X + \\ + \frac{2E_1 I_1}{E_3 \Omega_3} \cdot h \operatorname{tg}^2 a \cdot X = 0$$

Haciendo:

$$K_2 = \frac{2E_1 I_1}{E_2 \Omega_2}$$

$$K_3 = \frac{2E_1 I_1}{E_3 \Omega_3}$$

y despejando X tenemos:

$$X = \frac{\int_0^l m y \, dx}{\int_0^l y^2 \, dx + K_2 \left( \frac{a}{\cos^3 a} + b \right) + K_3 h \operatorname{tg}^2 a}$$

Vamos a resolver con esta fórmula el caso II, 1 pendolón y una carga concentrada P en el centro.

Tenemos:  $y = c + x \operatorname{tga}$ , y

$$m = \frac{1}{2} P \cdot x$$

$$\int_0^l m y \, dx = 2 \cdot \frac{1}{2} P \int_0^l x \cdot (c + x \operatorname{tga}) \, dx$$

$$\int_0^l m y \, dx = P \cdot \left[ \frac{1}{2} c x^2 + \frac{1}{3} x^3 \operatorname{tga} \right]_0^l = P \left( c \frac{l^2}{8} + \frac{l^3}{24} \cdot \operatorname{tga} \right)$$

$$\int_0^l m y \, dx = \frac{1}{24} \cdot P \cdot l^2 (3c + l \operatorname{tga}) = \frac{1}{24} \cdot P \cdot l^2 \cdot (c + 2h)$$

$$\int_0^l y^2 \, dx = 2 \int_0^{\frac{l}{2}} (c x \cdot \operatorname{tga})^2 \cdot dx = 2 \int_0^{\frac{l}{2}} (c^2 + 2c x \cdot \operatorname{tga} + x^2 \operatorname{tg}^2 a) \, dx$$

$$= 2 \left( c^2 x + c x^2 \operatorname{tga} + \frac{1}{3} x^3 \operatorname{tg}^2 a \right) \Big|_0^{\frac{l}{2}}$$

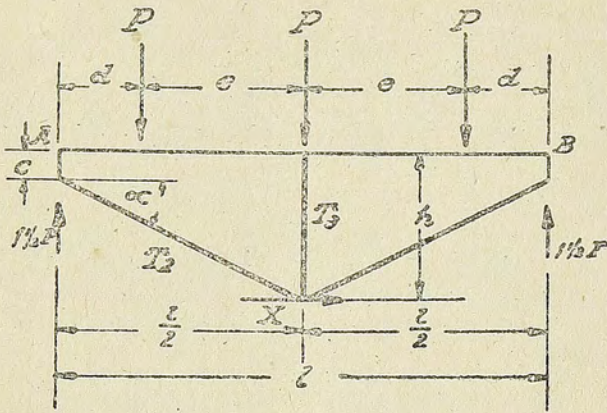
$$= 2 \left( c^2 \cdot \frac{l}{2} + c \frac{l^2}{4} \operatorname{tga} + \frac{1}{24} l^3 \operatorname{tg}^2 a \right)$$

$$= l \left( c \cdot h + \frac{1}{12} \cdot l^2 \operatorname{tg}^2 a \right)$$

Reemplazando tenemos:

$$X = \frac{\frac{1}{24} \cdot l^2 (c + 2h)}{l \left( c h + \frac{1}{12} \cdot l^2 \operatorname{tg}^2 a + \frac{K_2}{2 \cos^3 a} \right) + K_3 h \operatorname{tg}^2 a}$$

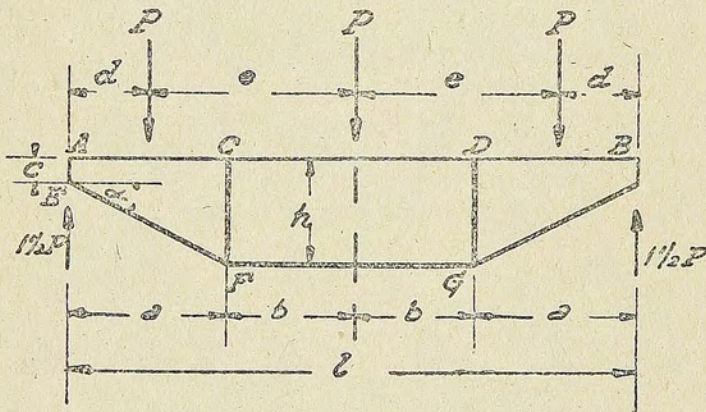
Refuerzo con un pendolón.



$$K_2 = \frac{2 E_2 I_2}{E_2 \Omega_2}$$

$$K_3 = \frac{4 E_3 I_3}{E_3 \Omega_3}$$

Refuerzo con dos pendolones.

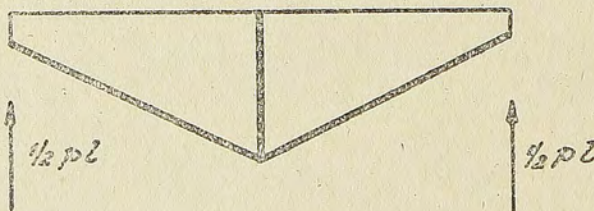
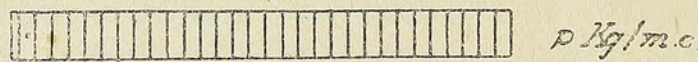


$$K_2 = \frac{2 E_2 I_2}{E_2 \Omega_2}$$

$$K_3 = \frac{2 E_3 I_3}{E_3 \Omega_3}$$

Caso I:

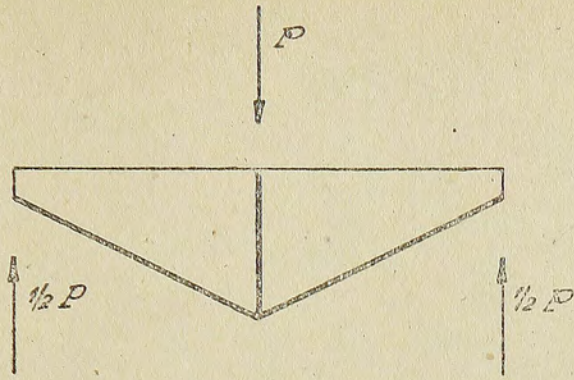
Un pendolón. Carga p uniformemente repartida.



$$x = \frac{1/36 l^3 (3c + 5h)}{2(c h + \frac{1}{12} l^2 \Omega_2 \cos^2 \alpha + \frac{h c^2}{\cos^2 \alpha}) + K_3 h \Omega_3 \cos^2 \alpha} \cdot p$$

Caso II:

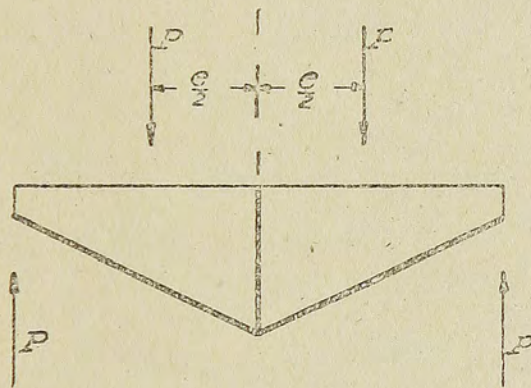
Un pendolon. 1 carga P



$$x = \frac{1/2 P l^2 (c + 2h)}{2(c h + 1/2 l^2 \tan^2 \alpha + \frac{K_2}{2 \cos \alpha}) + K_3 h \tan^2 \alpha} P$$

Caso III:

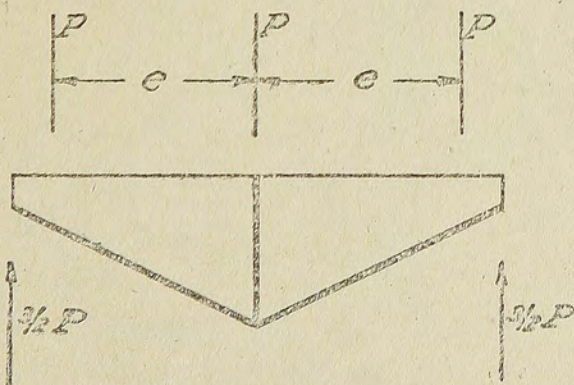
Un pendolon. 2 cargas P



$$x = \frac{d(c + 2/3 d \tan \alpha) + (l^2 - d^2) [(\frac{l}{2} + d) \tan \alpha + 2c]}{2(c h + 1/2 l^2 \tan^2 \alpha + \frac{K_2}{2 \cos \alpha}) + K_3 h \tan^2 \alpha} d P$$

Caso IV:

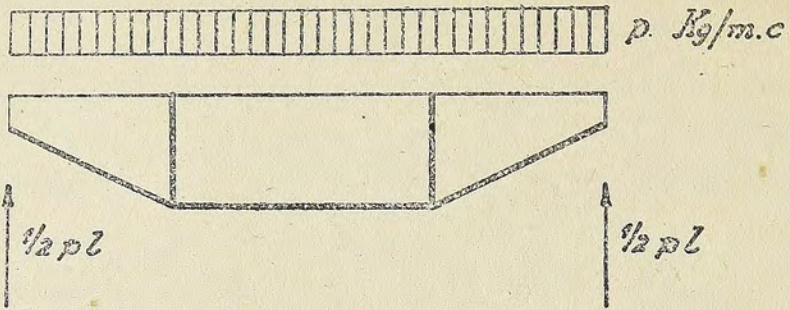
Un pendolon. 3 cargas P



$$x = \frac{d^2(3c + d \tan \alpha) + (l^2 - d^2) [(l/2 + d) (\frac{3c + d \tan \alpha}{2} + 2c) + \frac{3}{2} l \tan \alpha (l^2 - d^2)]}{2(c h + 1/2 l^2 \tan^2 \alpha + \frac{K_2}{2 \cos \alpha}) + K_3 h \tan^2 \alpha} P$$

Caso V:

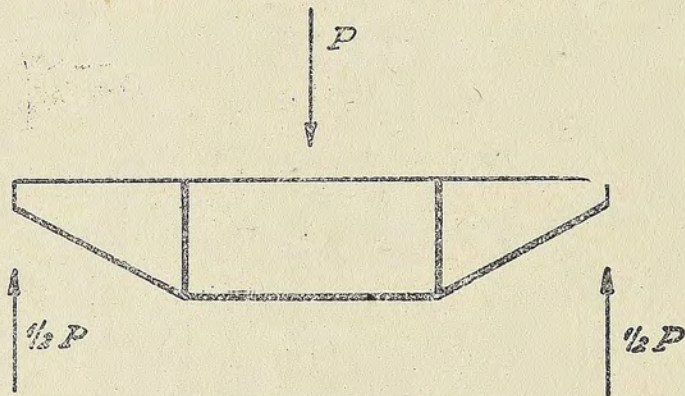
Dos pendolones. Carga p. uniformemente repartida.



$$X = \frac{\frac{1}{2} [ac^2(2L-a) + h(a^3 - 2aL + L^2)]}{2(a \cdot c \cdot h + \frac{1}{3} a^3 \sin^2 \alpha + bh^2) + K_2 \left( \frac{a^2}{\cos^2 \alpha} + b \right) + K_3 h \sin^2 \alpha} \cdot p$$

Caso VI:

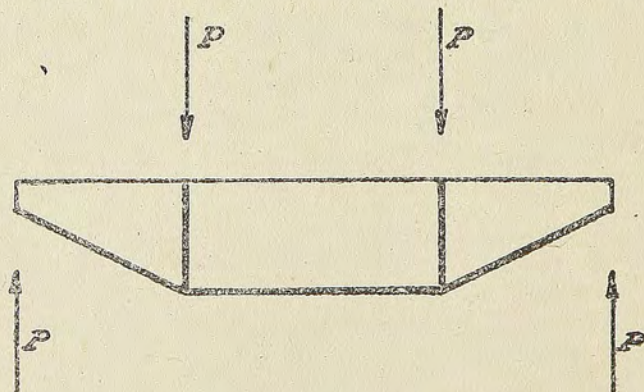
Dos pendolones. 1 carga P.



$$X = \frac{\frac{1}{3} a^2 (c + ah) + h \left( \frac{L^2}{3} - a^2 \right)}{2(a \cdot c \cdot h + \frac{1}{3} a^3 \sin^2 \alpha + bh^2) + K_2 \left( \frac{a^2}{\cos^2 \alpha} + b \right) + K_3 h \sin^2 \alpha} \cdot \frac{1}{2} P$$

Caso VII:

Dos pendolones. 2 cargas P.

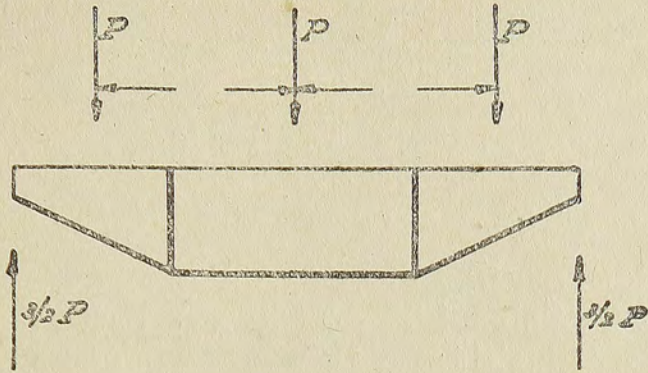


$$X = \frac{a \left[ \frac{1}{3} a (c + ah) + ah \right]}{2(a \cdot c \cdot h + \frac{1}{3} a^3 \sin^2 \alpha + bh^2) + K_2 \left( \frac{a^2}{\cos^2 \alpha} + b \right) + K_3 h \sin^2 \alpha} \cdot P$$



Caso VIII:

Dos pendolones. 3 cargas P.



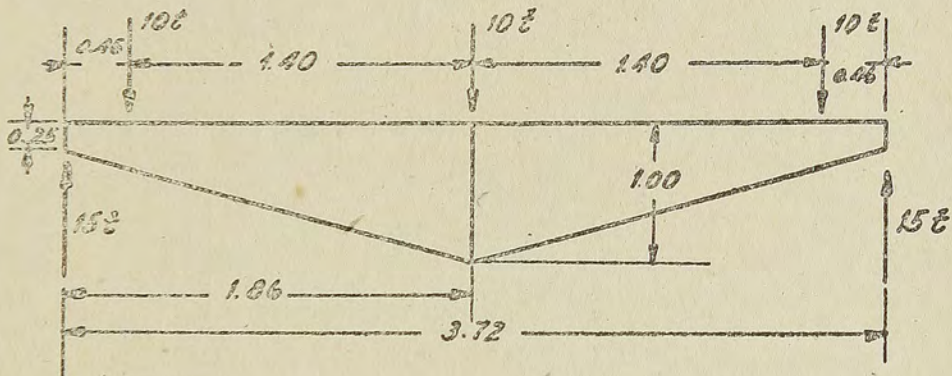
$$X = \frac{d^2 (\frac{1}{2}c + cdg) + (c^2 - d^2)(\frac{1}{2}c + cdg) + 2cd(c-d) + \frac{1}{2}hg(c^2 - d^2) + \frac{1}{2}h(\frac{1}{2}c^2 - d^2) + 2bdh \cdot p}{2(\frac{1}{2}ch + \frac{1}{2}c^2g + cdh + dh^2) + h_2(\frac{1}{2}c + d) + h_2hg^2}$$

PUENTE LLOLLELHUE N° 2

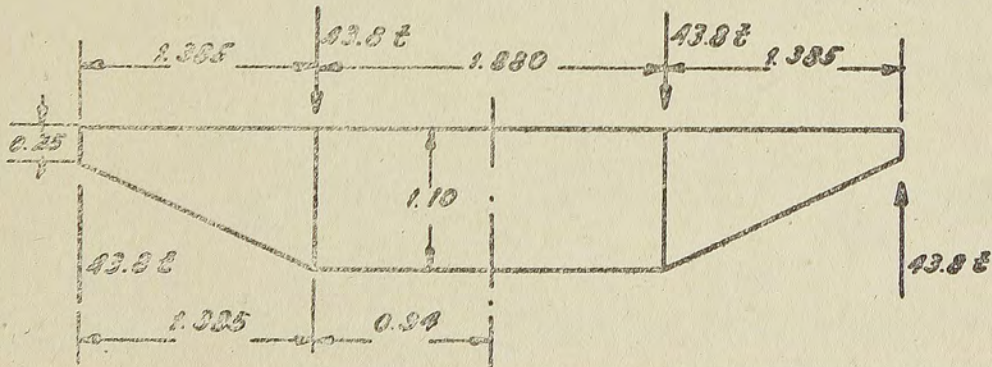
Base de cálculo:

Tren tipo B

Longuerina:



Travesaño:



En las láminas de 9-10-11 y 12 se encuentran los detalles y las fórmulas que deben aplicarse para resolver los ocho casos principales que pueden presentarse en los refuerzos de longuerinas y travesaños.

Para obtener los valores máximos  $X$  en las longuerinas debe colocarse una fuerza  $P$  al centro para  $l < 2e$ , siendo  $e$  la distancia entre las fuerzas  $P$  y para  $2e < l < 3e$ , tres fuerzas  $P$  simétricas respecto del centro. Esta regla es válida para el caso de refuerzos con el tren tipo en que  $e = 1,40$  m.

#### CÁLCULO DEL REFUERZO DEL TABLERO DEL PUENTE LLOLLEHUE N.º 2:

Base de cálculo: Tren tipo B.

Longuerina: ver lámina 12.

Coefficiente de dinamicidad = 1,61.

Sección: 1 alma de  $500 \times 7$  mm.; 4 ángulos de  $70 \times 70 \times 7$  mm. Remaches de 17 mm. Refuerzo con 1 pendolón.

$$\begin{array}{ll} l = 3,72 \text{ m} & W = 935 \text{ cm}^3 \\ h = 1,00 & \Omega_1 = 72,2 \text{ cm}^2 \\ c = 0,25 & \alpha = 22^\circ \\ I = 27,159 \text{ cm}^4 & \text{sen } \alpha = 0,375 \\ e = 1,4 & \text{cos } \alpha = 0,927 \\ d = 0,46 & \text{tg } \alpha = 0,403 \\ P = 10 \text{ Tons} & \Omega_2 = \Omega_3 = 21,2 \text{ cm}^2 \\ & K_2 = 0,255; K_3 = 0,510 \end{array}$$

Aplicamos la fórmula IV, 1 pendolón y 3 cargas  $P$  concentradas:

$$X = \frac{0,46^2 \left( \frac{3}{2} \cdot 0,25 + 0,46 \cdot 0,403 \right) + (1,86 - 0,46) \left[ (1,86 + 0,46) \left( \frac{1}{2} \cdot 3,72 \left( 0,25 \cdot 1 + \frac{1}{12} \cdot 3,72^2 \cdot 0,403^2 + \frac{0,255}{2 \cdot 0,927^3} \right) + 0,51 \cdot 1 \cdot 0,403^2 \right. \right. \\ \left. \left. \cdot 0,25 + 0,46 \cdot 0,403 \right) + 2 \cdot 0,25 \cdot 0,46 \right] + \frac{1}{3} \cdot 0,403 \left( \frac{3,72^3}{8} - 0,46^3 \right) \cdot 10}{\phantom{X =}}$$

$$X = 9,98 \text{ Tons.}$$

$$X_\varphi = 16,07 \text{ Tons.}$$

$$T_2 = \frac{X_\varphi}{\text{cos } \alpha} = \frac{16,07}{0,927} = 17,3$$

$$T_3 = X_\varphi \text{tg } \alpha = 16,07 \cdot 0,403 = 6,48$$

El momento máximo en la longuerina es:  $M = m - X_\varphi \cdot h = 22,6 - 16,07 \cdot 1 = 6,53$  Ton. m.

En el valor de  $m$  se ha tomado en cuenta el peso propio de la longuerina y el de la vía, en total 500 Kgs. m. c.

La fatiga máxima sería:

$$t = \frac{6,53}{935} \pm \frac{16070}{7220} = 7,1 \pm 2,23$$

$$t_1 = 9,33 \text{ Kgs./mm}^2.$$

$$t_2 = 8,16 \text{ » »}$$

$$t_3 = 6,11 \text{ » »}$$

Travesaño (Ver lámina 12)

$$\varphi = 1,6$$

Perfil: 1 alma de 600 × 7 mm.

4 ángulos de 80 × 80 × 7 mm.

Remaches de 20 mm.

l = 4,65 m.	I = 50230 cm <sup>4</sup> .
b = 0,940 m.	W <sub>n</sub> = 1460 cm <sup>3</sup> .
a = 1,385 m.	Ω <sub>1</sub> = 90,80 cm <sup>2</sup> .
c = 0,250	Ω <sub>2</sub> = 44,2 »
h = 1,100	Ω <sub>3</sub> = 21,3 »
a = 31° 30'	K <sub>2</sub> = 0,227
sen a = 0,523	K <sub>3</sub> = 0,472
cos a = 0,853	
tg a = 0,614	

Aplicamos la fórmula del caso VII:

$$1,385 \left[ \frac{1}{3} \cdot 1,385 (0,25 + 2 \cdot 1,1) + 2 \cdot 0,94 \cdot 1,1 \right]$$

$$X = \frac{\quad}{\quad} \cdot 43,8$$

$$2 (1,385 \cdot 0,25 \cdot 1,1 + \frac{1}{3} \cdot 1,385^3 \cdot 0,614^2 + 0,94 \cdot 1,1^2) + 0,251$$

sigue denominador  $\cdot \left( \frac{1,385}{0,853^3} + 0,94 \right) + 0,402 \cdot 1,1 \cdot 0,614^2$

$$X = 41,58 \text{ Tons.}$$

El valor P = 43,8 en este caso es la reacción del travesaño multiplicado por el coeficiente  $\varphi = 1,6$

$$T_2 = 48,74 \text{ Tons.}$$

$$T_3 = 25,53 \text{ ,,}$$

$$M = m - X h = 60,8 - 41,58 \cdot 1,1 = 15,06$$

$$t = \frac{15060}{1460} \pm \frac{41580}{9080} = 10,32 \pm 4,7$$

$$t_1 = 15,02 \text{ Kgs./mm}^2.$$

$$t_2 = 11,03 \text{ y } 11,61 \text{ Kgs./mm}^2.$$

$$t_3 = 11,99 \text{ Kgs./mm}^2.$$

En la lámina 13 están los detalles del refuerzo.

(Continuará).

