

A N A L E S

DEL INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Calle San Martín N.º 352 - Casilla 487 - Teléf. 88841 - Santiago - Chile

AÑO LVIII ⁽¹⁾

MARZO DE 1945

N.º 3

(1) Año LVIII desde la fecha de su primera publicación en 1888 como "Anales del Instituto de Ingenieros"
Año XLV desde la fecha de su primera publicación, Enero de 1901, como "Anales del Instituto de Ingenieros de Chile"

Ing. Julio Tapia Cabezas

Refuerzos de puentes metálicos en los Ferrocarriles del Estado

(Continuación)

CAPITULO VIII

ENSAMBLES

En este tipo de refuerzo las uniones o ensambles principales son tres:

- a) Unión del tercer cordón con la viga de rigidez:
- b) Unión de las péndolas con la viga de rigidez;
- c) Unión de las péndolas con el tercer cordón.

Como en todo ensamble, debe evitarse que los remaches trabajen al descabezamiento y en el caso *a* no debe aceptarse en ninguna forma.

La disposición de las uniones varía según el perfil de la sección de las cabezas de la viga de rigidez y del tercer cordón según sea el refuerzo tipo D_a o D_b , es decir, con tercer cordón superior o inferior. Estudiaremos estos dos casos por separado y supondremos que el perfil de las cabezas de las vigas es T compuesto, que es el que generalmente tienen y el "T" o "U" para el tercer cordón. Daremos también un ejemplo para cada uno de los casos que se presentan con mayor frecuencia.

TERCER CORDÓN SUPERIOR ENSAMBLE "a".

Para un tercer cordón de perfil "T" el ensamble no presenta gran dificultad. Como ejemplo tenemos el del puente Chimbarongo, lámina 21. El número de remaches de unión del gousset del ensamble a la cabeza superior se calcula para resistir el empuje máximo H , de tal modo que la prolongación de las suelas del tercer cordón y su unión a la cabeza no se toma en cuenta sino como un coeficiente de seguridad.

En el caso del puente Quepe, lámina 21, tenemos un tercer cordón en forma de cajón; la dificultad de la unión está en poder disponer la remachadura de modo que trabaje al cizalle y que se pueda ejecutar; esto se consigue haciendo sobresalir los dos goussets sobre las suelas del tercer cordón y colocando encima de ellas los ángulos de unión, de tal manera que se forma una U o canal. La transmisión del esfuerzo vertical V a los bordes de las suelas de la cabeza tiene el peligro de que és-

tas se doblen; para evitarlo hay que colocar atiezadores, dos en este caso. También, conviene, a veces, colocar otra suela en la cabeza, en la parte correspondiente al ensamble.

ENSAMBLE "b".

En este caso, las péndolas trabajan a la tracción, pero como generalmente el tercer cordón lleva contraventación superior estos son los montantes de los pórticos que se forman, por lo que es necesario darles mayor rigidez. A pesar de que la sección exigida por el cálculo es pequeña, hay que aumentarla y en cierto modo continuar los montantes de la viga.

Como las péndolas tienen una sección doble T, su unión al tercer cordón de doble alma no tiene ninguna dificultad y es sólo un poco más complicado en el caso de un alma.

En la lámina 22 tenemos un ejemplo del primer caso en el puente Colilelfu y en el Angostura del segundo.

ENSAMBLE "c".

Este ensamble es igual para los dos tipos D_a y D_c y muy sencillo; el esfuerzo se transmite por dos plats que van remachados a las péndolas y a los montantes. La unión del alma de las péndolas a la cabeza no se toma en cuenta para el cálculo.

Hay casos especiales cuando el alto de la sección de las péndolas es menor que el de la sección de los montantes; en la lámina 23 tenemos un ejemplo de caso normal, puente Paine, y dos irregulares, puentes Ñuble y Donguil.

TERCER CORDÓN INFERIOR ENSAMBLE "a".

Como al tercer cordón se le da en general una sección T de poca altura en el alma, para su ensamble a la cabeza de la viga hay que colocar dos goussets que forman una U con las suelas de él y unirlas por medio de ángulos a los bordes de la suela de la cabeza colocando éstos encima de ella. Así se consigue que los remaches trabajen al cizalle y no al descabezamiento; pero hay que colocar atiezadores para impedir el doblamiento de la suela, la que a veces se refuerza agregándole otra en la parte del ensamble. Un ejemplo tenemos en la lámina 24, corresponde al puente Lipingüe

ENSAMBLE "b" y "c"

Como las péndolas trabajan a la compresión y el perfil de su sección está formado por 2 ó 4 ángulos ó 2 perfiles U, su ensamble a la cabeza o al tercer cordón es muy sencillo, tal como se ve en la lámina 25 detalles que corresponden al puente Chanco.

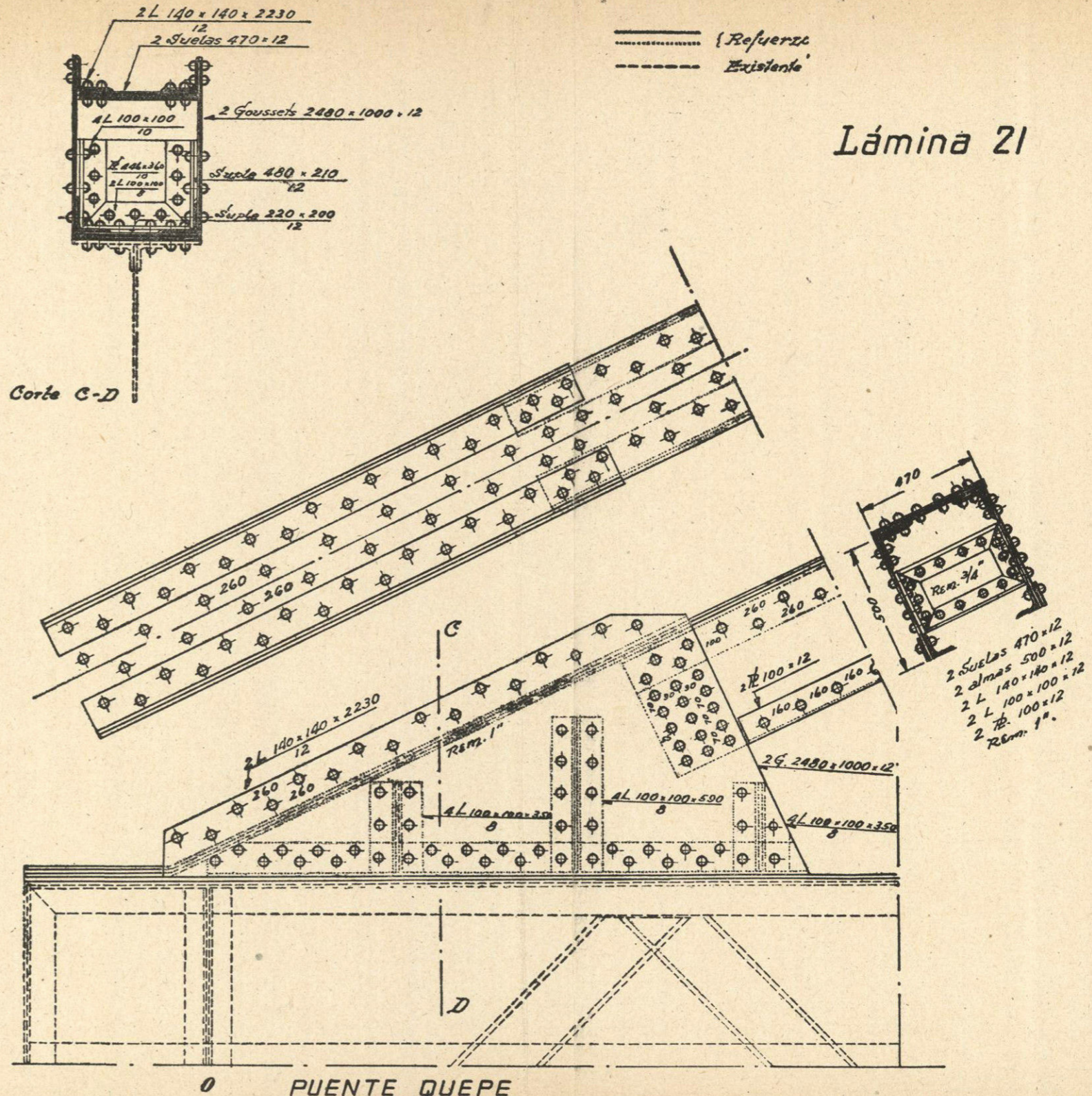
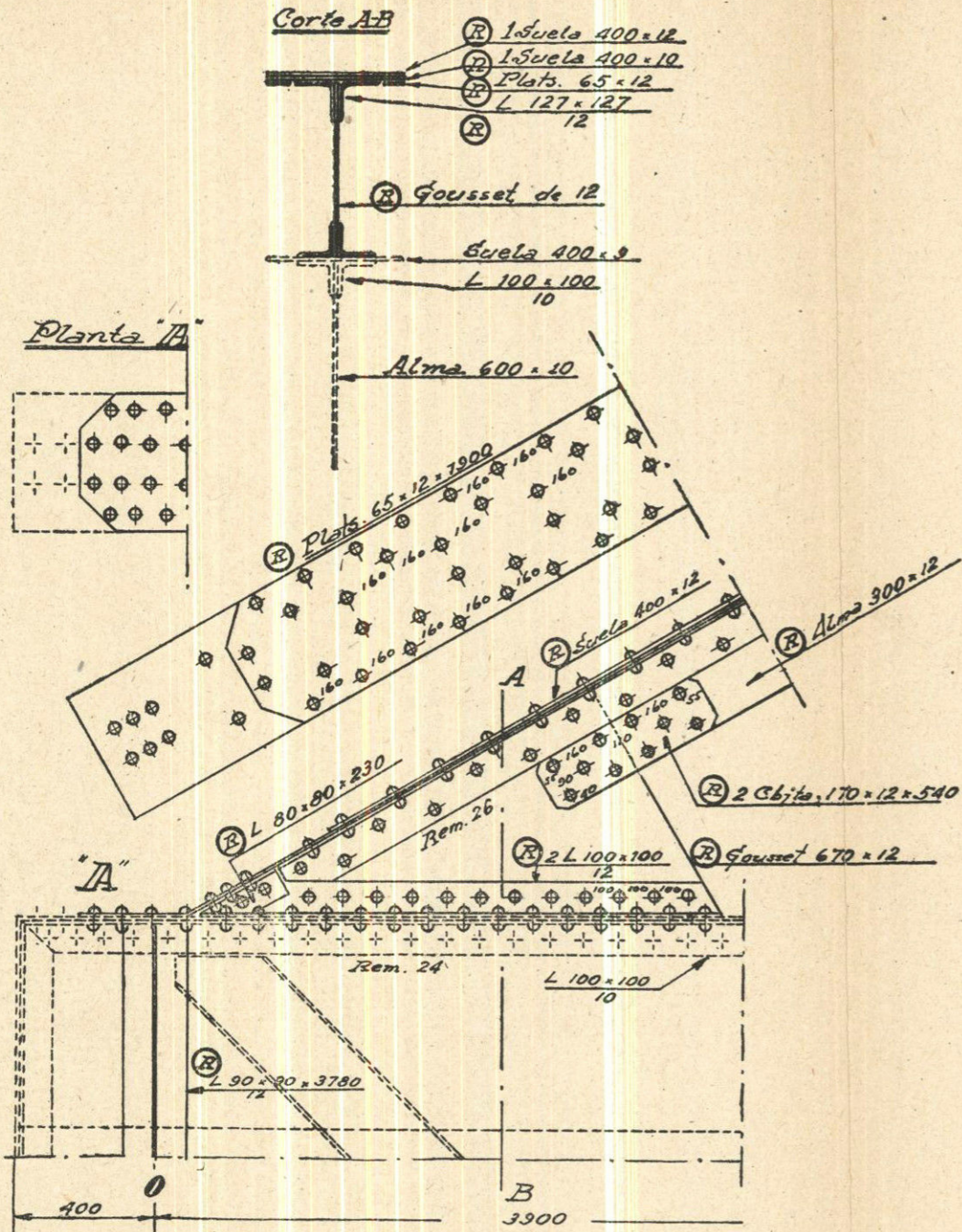
CONTRAVIENTOS

En el caso de tercer cordón superior, éste trabaja a la compresión y es, entonces, muy importante el poder contraventarlo superiormente para evitar el pandeo o flambaje. Es discutible la longitud que se debe tomar para el flambaje. En los cordones superiores algunos toman la longitud λ , es decir, la del paño y otros $\frac{3}{4}$ de ella. En general los pliegos de condiciones dejan al criterio del ingeniero proyec-

ENSAMBLE "a"

Lámina 21

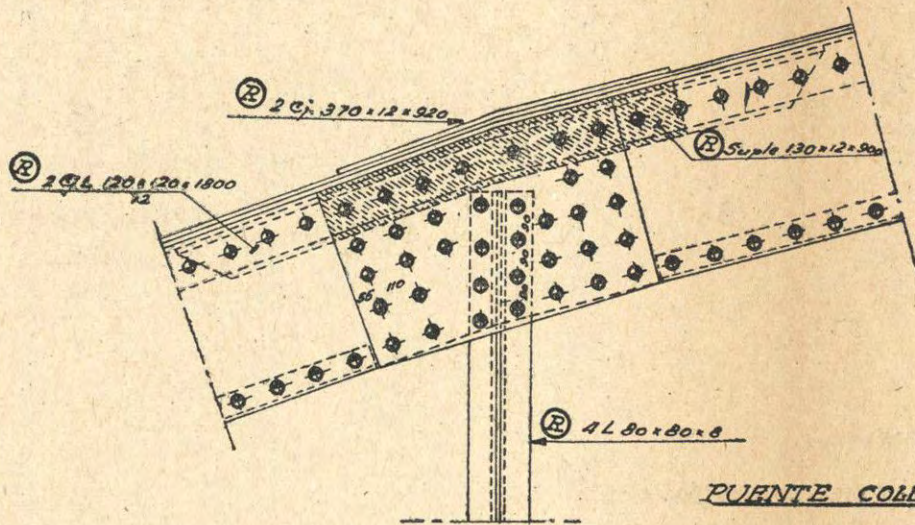
— (Refuerzo)
- - - - - (Existente)



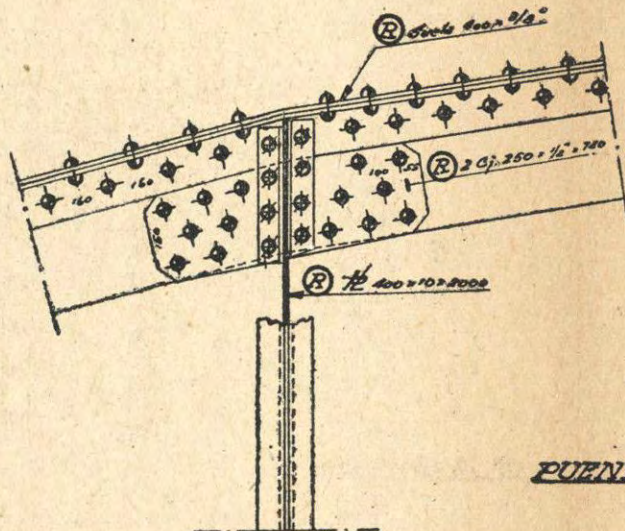
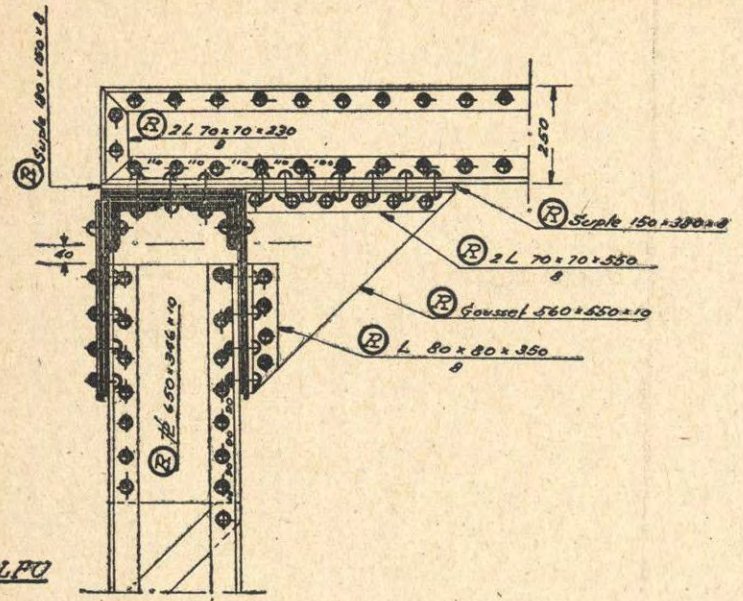
PUENTE CHIMBARONGO

PUENTE QUEPE

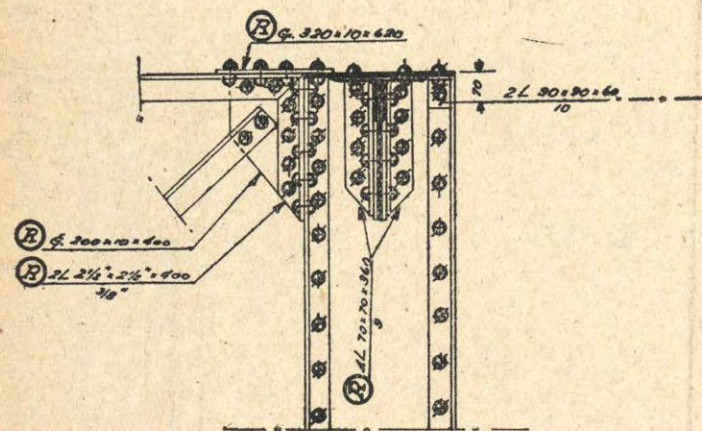
Ensamble "C"



PUENTE COLLIELFO



PUENTE ANGOSTURA



tista la forma de tomar en cuenta el peligro de pandeo del tercer cordón o arco en la parte en que no lleva contraventación superior. Si asimilamos esta situación a la de un cordón superior corriente, deberíamos tomar como longitud máxima λ ; pero como no hay diagonales se disminuye la rigidez de los nudos y por esto es prudente tomar los $\frac{3}{4}$ de la longitud total, es decir, de la suma de los λ de los paños no contraventados en esta parte y λ en los contraventados.

En todo caso se debe tratar de colocar contravientos, aunque sea uno al centro en forma de pórtico si la altura no permite más, y si es necesario, hacerlo en arco, con el objeto de disminuir las vibraciones.

A veces no hay necesidad de colocar diagonales, basta sólo con los pórticos de unión; el primero debido a la poca altura hay que proyectarlo en forma de doble T compuesta y los otros enrejados. El perfil más conveniente para estos últimos es el ángulo de 70 x 70 x 8. En la lámina 26 se ven los diferentes tipos de pórticos que se han usado en esta clase de refuerzos.

En el caso de tercer cordón inferior también es necesario proyectar contravientos que pueden ser sólo verticales cuando el tramo por reforzar tiene dos planos de contravientos. Estas amarras verticales, que son muy fáciles de colocar, afirman lateralmente las péndolas y evitan las vibraciones del arco de refuerzo.

El perfil más usado, como en el caso anterior, es el ángulo de 70 x 70 x 8. En la lámina 27 se ven detalles de los contravientos del tercer cordón inferior del puente Lipingüe.

APLICACIÓN DEL REFUERZO TIPO "D" A TRAMOS CONTINUOS

Como habíamos visto antes, el tipo de refuerzo más usado para el caso de vigas continuas es el "E", a pesar de que tiene dos inconvenientes: exige mucho material y no se puede hacer prácticamente un cálculo exacto de la sollicitación de las diagonales nuevas.

El refuerzo "D" es sin duda ninguna, el más conveniente por las ventajas que presenta aplicado a tramos separados; su comportamiento cuando actúa en vigas continuas parece a la simple vista que no fuera eficaz en el sentido de que el material del refuerzo no queda bien aprovechado; mas si se hace un análisis más detenido se ve que no es así y que hay probabilidades de que obtenga un resultado que permita compararlo, aún en cuanto a su economía con el tipo "E".

Un defecto se nota luego al considerar que el máximo del refuerzo actúa en el centro de la viga cuando el momento mayor se produce a plomo de los apoyos intermedios, donde no hay refuerzo, o a 0,4 l en los tramos extremos; pero si se considera que al aumentar fuertemente el momento de inercia en la parte central de la viga con el tercer cordón se desvían hacia ese centro los puntos fijos y que por lo tanto se disminuyen los momentos negativos y se aumentan los positivos, se ve que se ha conseguido un refuerzo completamente indirecto en la zona adyacente a los apoyos intermedios y que hay, entonces, la posibilidad de evitar el refuerzo directo de ésta, que sobre todo es un trabajo caro y difícil en la cabeza inferior.

En cuanto al refuerzo de las diagonales es fácil ver que el tercer cordón disminuye la sollicitación de las diagonales y que esta disminución va siendo menor hasta anularse en el centro de la viga, es decir, actúa igual que en el caso de tramos aislados. Como la componente vertical V del empuje H es proporcional a éste, la eficacia del refuerzo en las diagonales sólo se ve trazando las líneas H para ambos casos.

En resumen, no se puede deducir claramente la conveniencia de colocar este tipo de refuerzo a tramos continuos sin haberlo estudiado detenidamente aplicán-

dolo a casos reales. Por desgracia tenemos muy poca experiencia; para poder deducir una conclusión general deberíamos haber estudiado su aplicación a vigas continuas de diferentes luces y de diferente número de tramos. Hasta ahora sólo lo hemos aplicado al caso del puente Chimbarongo, viga continua de dos tramos de 39,50 m. de luz c/u. y de aquí hemos deducido lo siguiente: Ver lámina 28.

1) La superficie formada por la línea de empuje H es 2,7 veces mayor para los tramos aislados que para los continuos;

2) El tercer cordón aplicado a vigas continuas obliga a reforzar directamente las vigas aumentando su material en un 29%; en tramos separados no exige refuerzo;

3) En el primer caso las diagonales necesitan un refuerzo equivalente al 28% de su material y en el segundo 4%.

4) El peso del refuerzo, tomando en cuenta sólo la parte que varía entre una y otra solución es:

<i>Primera solución</i>	(tramos continuos)
3.er cordón	565 Kgs.
Refuerzo directo	158 "
	723 Kgs./m. c.
 <i>Segunda solución</i>	 (tramos separados)
3.er cordón	565 Kgs.
Refuerzo directo	16
	581 Kgs./m. c.

Es decir, cortando los tramos se economiza un 20% de material.

Volvemos a repetir que en estas cifras sólo se ha considerado el refuerzo de las cabezas y diagonales; no se ha tomado en cuenta todo aquel refuerzo que habría que hacer igualmente en una u otra solución.

También hemos considerado que el peso del tercer cordón fuera igual para ambas soluciones, lo que en realidad no es así, ya que debido al menor empuje que se desarrolla en la primera se puede seguramente disminuir su sección sobre todo en el caso de tercer cordón superior en que el flambaje que se puede producir en los primeros paños debido a la falta de contraventación obliga a aumentar considerablemente la sección.

El viaducto "El Salto", compuesto por 5 tramos continuos de 40 m. de luz cada uno, fué reforzado según el tipo "E". El peso comparable del refuerzo por m. c. fué:

Refuerzo indirecto	553 Kgs.
Id. directo	230 "
	783 Kgs/m. c.

Si lo comparamos con el del Chimbarongo, puede decirse de igual luz, tenemos:

Refuerzo tipo E	783 Kgs./m. c.
Id. tipo D	723 Kgs./m. c.

Lámina
24

ENSAMBLE "2"

Puente Lipingie

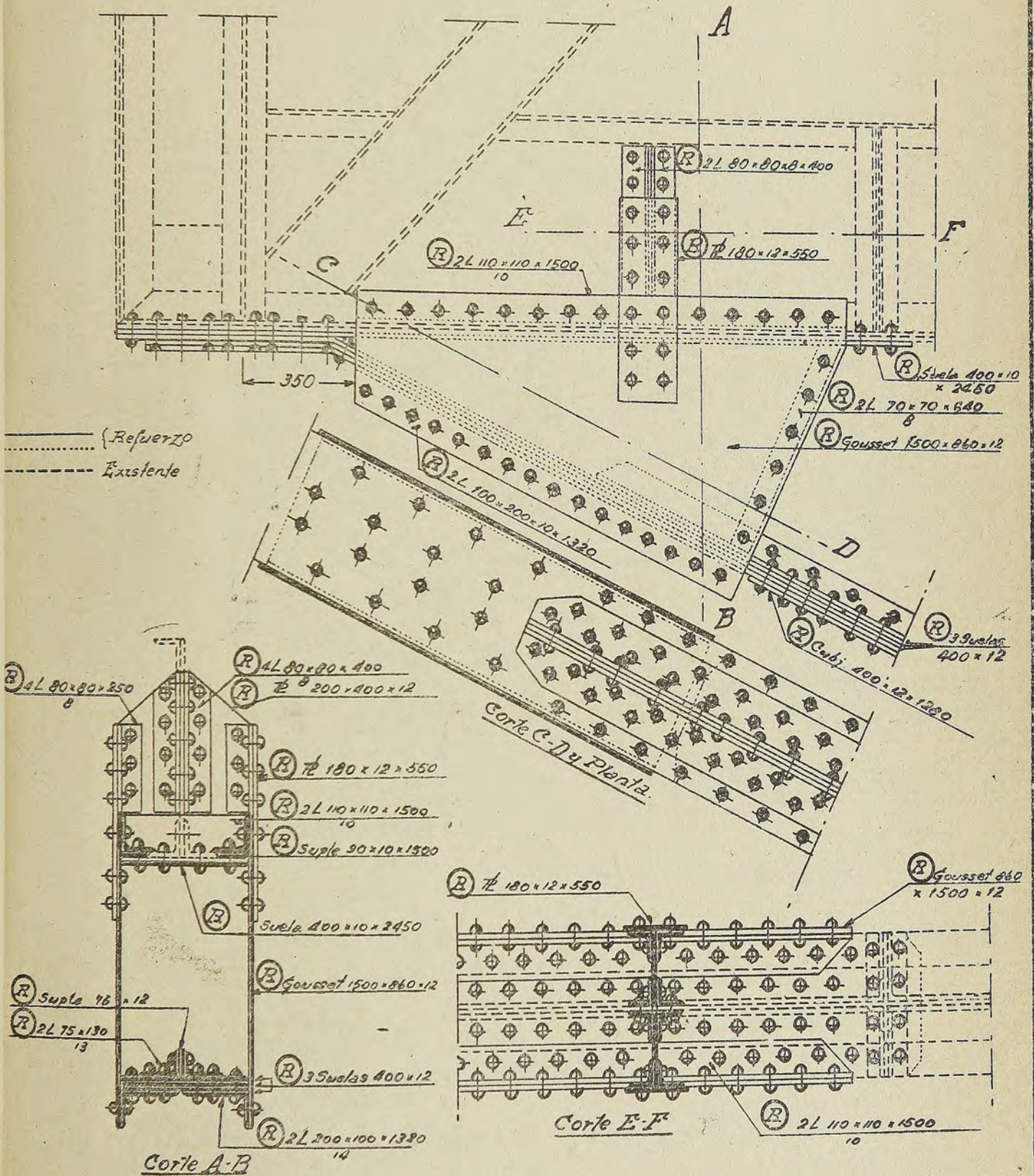

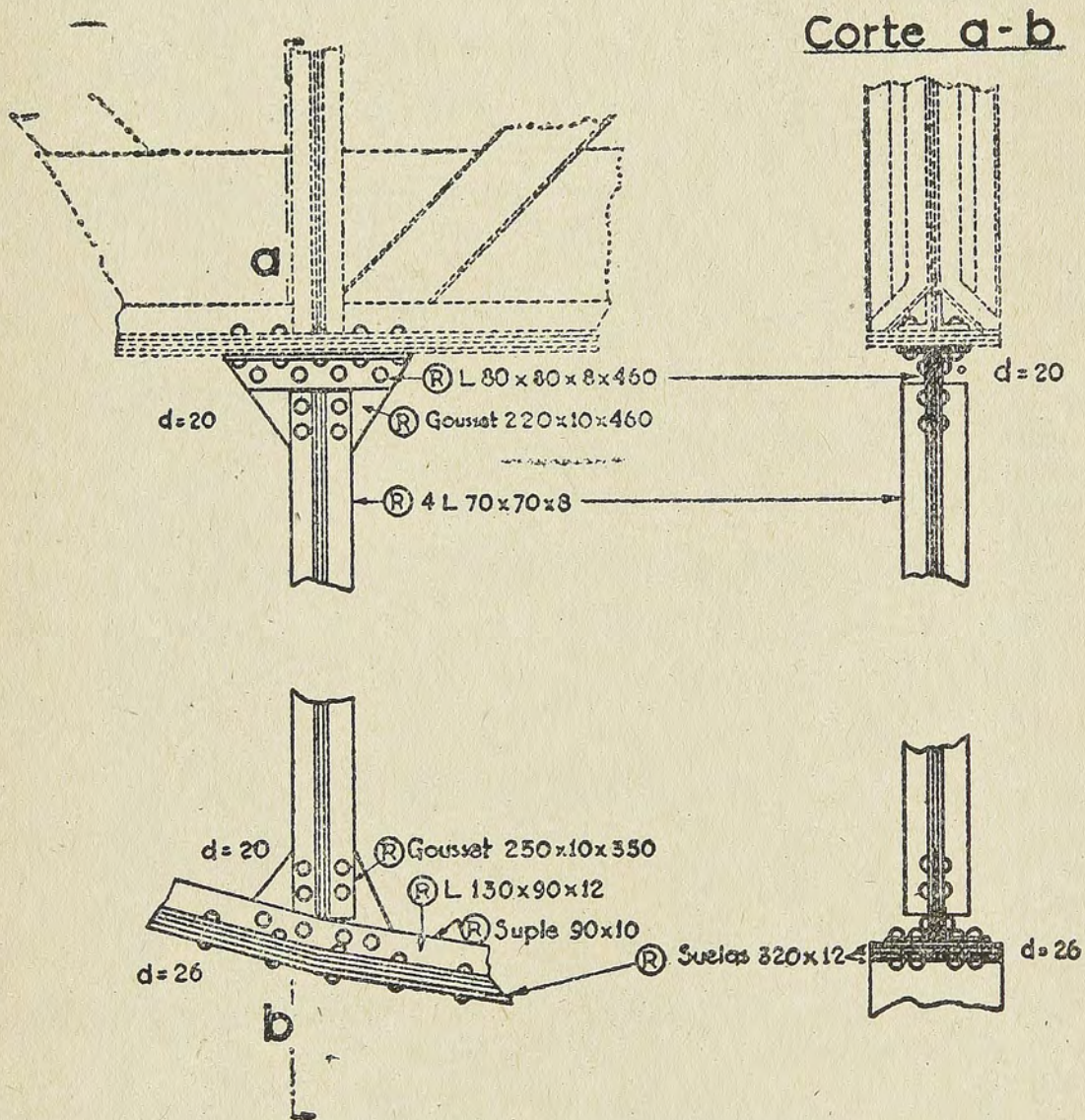


Lámina 25.

Ensamblajes b y C

ESC:  1m

Puente Chanco



—————	Refuerzo
- - - - -	Parte existente

Se ve que el tipo D resulta 8% más económico que el E; porcentaje que aumenta si se toma en cuenta que el puente Chimbarongo necesitaba más refuerzo que "El Salto" por ser más débil y que el tercer cordón del primero podía tener menor sección.

Se deduce de todo esto que el refuerzo tipo D es posiblemente más económico que el E y que aún en el caso en que exigiera un poco más de material es preferible aceptarlo por tener la ventaja de la determinación de su cálculo.

Siempre, entonces, que se trate de reforzar tramos continuos, debe estudiarse primero la posibilidad de poder separar los tramos, lo que se puede hacer si los machones tienen un ancho tal que permita la colocación de dos apoyos, en caso contrario debe estudiarse la aplicación del tipo D a los tramos continuos y compararlo con el E.

REFUERZO DEL PUENTE CHIMBARONGO

El puente Chimbarongo ubicado en el kilómetro 41.304 del ramal a Pichilemu, consta de una viga continua de dos tramos de 39,50 m. de luz cada uno y un tramo libre de 39,00 m.

Excesivamente débil para el tráfico actual era urgente su refuerzo que debía calcularse para el tren C. No era posible hacer un refuerzo directo por la gran cantidad de material nuevo que había que agregar y que no iba a trabajar en buenas condiciones. Era posible aplicar el tipo A, es decir, colocar un apoyo intermedio o el tipo D, 3.er cordón, cordón superior en este caso, la solución más lógica y económica para el tramo aislado. En cuanto a los tramos continuos no convenía el tipo de refuerzo E por ser poco económico; antes de ir a dos apoyos intermedios era conveniente tantear la aplicación del tercer cordón a los tramos continuos, lo que daba una solución simétrica al refuerzo de todo el puente.

Como no fuera económica se llegó a la conclusión que lo más acertado era separar los dos tramos continuos, lo que se podía hacer, pues el ancho del machón permitía la fácil colocación de dos apoyos; quedaba así el puente compuesto por tres tramos iguales de 39,00 m. de luz cada uno reforzados con tercer cordón superior.

CÁLCULO DEL TERCER CORDÓN PARA EL TRAMO AISLADO

Luz de la viga	l	=	39,00 m.
Luz de los paños	λ	=	3,90 m.
Número de los paños	n	=	10
Flecha del arco	f	=	entre 5,06 y 5,45 m.

Como se necesita un refuerzo muy grande tomaremos:

$$\begin{aligned}
 f &= 6,00 \text{ m.} \\
 y^2 &= 2 p x \\
 x &= 6,00 \\
 y &= 19,5 \\
 2p &= 63,375.
 \end{aligned}$$

Nudos	y	y ²	x	h
0	19,50	380,25	6,00	0,00
1	15,60	243,36	3,84	2,16
2	11,70	136,89	2,16	3,84
3	7,80	60,84	0,96	5,04
4	3,90	15,21	0,24	5,76
5	0,00	0,00	0,00	6,00

$$Q = \frac{8 + \lambda}{l^2} = \frac{8 \cdot 6 \cdot 3,9}{39^2} = 0,123$$

$$R = 4,5 \cdot 0,123 = 0,5535$$

$$\lambda R = 2,159$$

$$\lambda \cdot Q = 0,480$$

$$\frac{1}{6} \lambda = 0,650$$

$$M_1 = 2,159 = 2,159$$

$$M_2 = 4,318 - 0,480 = 3,838$$

$$M_3 = 6,477 - 1,440 = 5,037$$

$$M_4 = 8,636 - 2,880 = 5,756$$

$$M_5 = 10,795 - 4,800 = 5,995$$

$$W_1 = 0,65 (0,000 + 4 \cdot 2,159 + 3,838) = 8,1081$$

$$W_2 = 0,65 (2,159 + 4 \cdot 3,838 + 5,037) = 14,6562$$

$$W_3 = 0,65 (3,838 + 4 \cdot 5,037 + 5,756) = 19,3323$$

$$W_4 = 0,65 (5,037 + 4 \cdot 5,756 + 5,995) = 22,1364$$

$$W_5 = 0,65 (5,756 + 4 \cdot 5,995 + 5,756) = 23,0698$$

$$R_w = 75,7679$$

$$\frac{1}{\lambda} m_1 = 75,7679 = 75,8$$

$$\frac{1}{\lambda} m_2 = 151,5358 - 8,1081 = 143,2$$

$$\frac{1}{\lambda} m_3 = 227,3037 - 16,2162 - 14,6562 = 196,4$$

$$\frac{1}{\lambda} m_4 = 303,0716 - 24,3243 - 29,3124 - 19,3323 = 230,1$$

$$\frac{1}{\lambda} m_5 = 378,8395 - 32,4324 - 43,9686 - 38,6646 - 22,1364 = 241,6$$

$$E = 21.000.000 \text{ Ton./m}^2$$

$$I_m = 0,0853 \text{ m}^4$$

$$E I_m = 1,7913$$

$$\frac{\lambda}{E I_m} = \frac{3,90}{1,7913} = 0,0000021772$$

$$\delta = \frac{1}{\lambda} \cdot M \frac{\lambda}{E I_m} = \frac{M}{E I_m}$$

$$\begin{aligned}\delta_1 &= 0,0000021772 \cdot 75,8 = 0,000165 \\ \delta_2 &= 0,0000021172 \cdot 143,2 = 0,000312 \\ \delta_3 &= 0,0000021772 \cdot 196,4 = 0,000428 \\ \delta_4 &= 0,0000021772 \cdot 230,1 = 0,000501 \\ \delta_5 &= 0,0000021772 \cdot 241,6 = 0,000526\end{aligned}$$

Cálculo de $\frac{M'^2 dx}{EI}$

$$K_n = \frac{1}{2} \lambda (M_{n-1} + M_n)$$

$$K_1 = \frac{1}{2} \cdot \lambda (0,000 + 2,159) = \frac{1}{2} \lambda \cdot 2,159$$

$$K_2 = \frac{1}{2} \cdot \lambda (2,159 + 3,838) = \frac{1}{2} \lambda \cdot 5,997$$

$$K_3 = \frac{1}{2} \cdot \lambda (3,838 + 5,037) = \frac{1}{2} \lambda \cdot 8,875$$

$$K_4 = \frac{1}{2} \cdot \lambda (5,037 + 5,756) = \frac{1}{2} \lambda \cdot 10,793$$

$$K_5 = \frac{1}{2} \cdot \lambda (5,756 + 5,995) = \frac{1}{2} \lambda \cdot 11,751$$

$$K_1^2 = \frac{1}{4} \lambda^2 \cdot 4,661$$

$$K_2^2 = \frac{1}{4} \lambda^2 \cdot 35,964$$

$$K_3^2 = \frac{1}{4} \lambda^2 \cdot 78,766$$

$$K_4^2 = \frac{1}{4} \lambda^2 \cdot 116,489$$

$$K_5^2 = \frac{1}{4} \lambda^2 \cdot 138,086$$

$$\Sigma K^2 = \frac{1}{2} \lambda^2 \cdot 373,966$$

$$\Sigma \frac{M'^2 dx}{EI} = \frac{1}{\lambda EI_m} \cdot \Sigma K^2 = \frac{3,9 \cdot 373,966}{2 \cdot 1.791.300} = 0,000407$$

Cálculo de $\Sigma S'^2 ds = \frac{\lambda}{E \Omega} \cdot \Sigma \frac{1}{\cos^3 \alpha}$

$$\Omega = 150 \text{ cm.}^2$$

$$E \Omega = 210.000.000 \cdot 0,0150 = 315.000$$

Paños	Tg α	α	Cos α	Cos ³ α	$\frac{1}{\cos^3 \alpha}$
1	0,554	29°	0,875	0,670	1,493
2	0,431	23° 20'	0,918	0,774	1,292
3	0,308	17° 10'	0,955	0,871	1,148
4	0,184	10° 30'	0,983	0,950	1,053
5	0,062	3° 40'	0,998	0,994	1,006
					5,992

$$\Sigma \frac{S'^2 d s}{E \Omega} = \frac{3,9 \cdot 2 \cdot 5,992}{315.000} = 0,000148$$

Péndolas.

$$\Omega = 40 \text{ cm.}$$

$$E \Omega = 2.100.000 \cdot 0,040 = 84.000$$

$$\frac{S'^2 d s}{E \Omega} = 0,123^2 \cdot \frac{39,6}{84.000} = 0,000071$$

Trabajo total de deformación:

Viga.....	0,000407
Arco.....	0,000148
Péndolas.....	0,000071
	<hr/>
	0,000626

$$H_1 = \frac{0,000165}{0,000626} = 0,264$$

$$H_2 = \frac{0,000312}{0,000626} = 0,496$$

$$H_3 = \frac{0,000428}{0,000626} = 0,684$$

$$H_4 = \frac{0,000501}{0,000626} = 0,800$$

$$H_5 = \frac{0,000526}{0,000626} = 0,840$$

Obtenidos los valores de H es fácil determinar las líneas de influencia para los momentos y esfuerzos de corte como ya lo hemos visto en el capítulo anterior

(Continuará)