



Ing. Julio Tapia Cabezas

# Refuerzos de puentes metálicos en los Ferrocarriles del Estado

(Continuación)

## CAPITULO VII

### REFUERZO TIPO D.

El refuerzo tipo D consiste en agregar a la viga un tercer cordón en forma de arco parabólico. La viga va unida al tercer cordón por la prolongación de los montantes que llamaremos péndolas. Es condición importante para poder aplicar este refuerzo que las vigas sean de cabezas o cordones paralelos. En vigas con cabezas parabólicas su aplicación es dudosa. El tercer cordón puede ser inferior o superior. Es más económico el inferior, por lo cual se debe aplicar de preferencia y siempre que lo permita la altura del tramo sobre el lecho del río o el nivel de aguas máximas. En caso contrario, habrá que usar el cordón superior que siempre se puede colocar cuando los tramos son de vía inferior, y si el galibo lo permite, en los de vía superior o intermedia.

Esta solución tiene la ventaja de que el refuerzo directo se reduce generalmente a reforzar al flambaje unas pocas diagonales comprimidas. El total del refuerzo consiste en el tercer cordón y las péndolas, que se puede ejecutar en el taller y sólo armarlo en el terreno lo que disminuye considerablemente los jornales y evita el peligro y las dificultades del trabajo que debe hacerse bajo tráfico. En general, es un refuerzo económico, no sólo en cuanto al gasto de material, sino también a su costo colocado.

El tercer cordón inferior trabaja a la tracción y las péndolas a la compresión. El empuje desarrollado en el arco se trasmite como esfuerzo de compresión a la cabeza inferior que resiste también al esfuerzo de tracción producido por la flexión de la viga. En los paños centrales estos dos esfuerzos generalmente se anulan. La sollicitación máxima se verifica en el primer paño donde el cordón inferior tiene que resistir casi la totalidad del empuje, de tal manera que puede decirse fija un límite de éste, más allá del cual habría necesidad de reforzar directamente este cordón, perdiéndose la principal ventaja del tipo de refuerzo que es el de evitar el refuerzo directo.

En el caso de arco superior, éste queda comprimido y las péndolas traccionadas. La cabeza superior sufre un esfuerzo de compresión producido por la flexión de la viga y otro de tracción debido al empuje desarrollado por el tercer cordón. Igual que en el caso anterior, el esfuerzo máximo en la cabeza superior se verifica en el primer paño y es producido por el empuje. En los paños centrales la suma de los esfuerzos casi se anula.



El esfuerzo de corte en la viga queda disminuído por la componente vertical del esfuerzo en el tercer cordón, que es máxima en los primeros paños en que es mayor la tangente del ángulo que forma el tercer cordón con la horizontal. Esta componente va disminuyendo hasta anularse en el centro. El esfuerzo de corte total puede ser resistido por las diagonales sin necesidad de refuerzo, aunque es frecuente en el caso de enrejados dobles o múltiples, que son los que más se han usado en nuestros puentes, sea necesario reforzar al pando las diagonales comprimidas.

La colocación simple, bajo tráfico, del refuerzo formado por el tercer cordón hace que éste sólo trabaje al paso de la carga móvil, absorbiendo más o menos un 60% de ella y que la viga resista el 40% restante más el peso propio del tramo con el refuerzo. Si aumentamos la flecha  $f$  o la sección  $\Omega$  del tercer cordón, éste absorbe mayor proporción de la carga móvil; pero como también con esto se incrementa el empuje  $H$ , se corre el peligro, como lo explicamos anteriormente, de tener que reforzar directamente en los primeros paños la cabeza o cordón que lo va a resistir. Para evitarlo, conviene tomar como flecha el 13 al 14% de la luz y un  $\Omega$  más o menos igual a la sección media de las cabezas de la viga.

También se puede conseguir que el arco tome parte del peso propio del tramo dando a éste una tensión inicial. No conviene hacerlo, porque esta tensión se va a sumar al empuje, produciendo la situación que explicamos anteriormente.

Además, es difícil dar esta tensión. En el caso de un arco inferior no es tanto. Se puede hacer, aumentando la temperatura al tercer cordón, ya colocado, para producir un alargamiento, previamente calculado, y unirlo en una sección en que se ha dejado cortado, siendo preferible en el centro. La tensión puede teóricamente determinarse, pero en la práctica queda la incertidumbre sobre el valor exacto de ella.

Para un arco superior hay mayor dificultad. Puede ser dada por el peso propio del tramo; para esto habría que dejar sin unir el arco en el centro, dar a la viga una contra-flecha calculada y después de hacer la unión central, soltar el tramo. Para dar esta contra-flecha hay que hacer cepas provisionarias, que según la naturaleza del río pueden ser costosas, y es muy difícil debido a los sentamientos que van a sufrir, determinar si la flecha prácticamente dada es la que se había calculado.

Es conveniente, entonces, no dar estas tensiones, sobre todo que en el caso de nuestros puentes basta para el refuerzo que el arco sólo trabaje al paso de la carga rodante. Se ha hecho este refuerzo en 23 puentes diferentes y respetando las indicaciones que hemos dado anteriormente se ha obtenido siempre buen resultado.

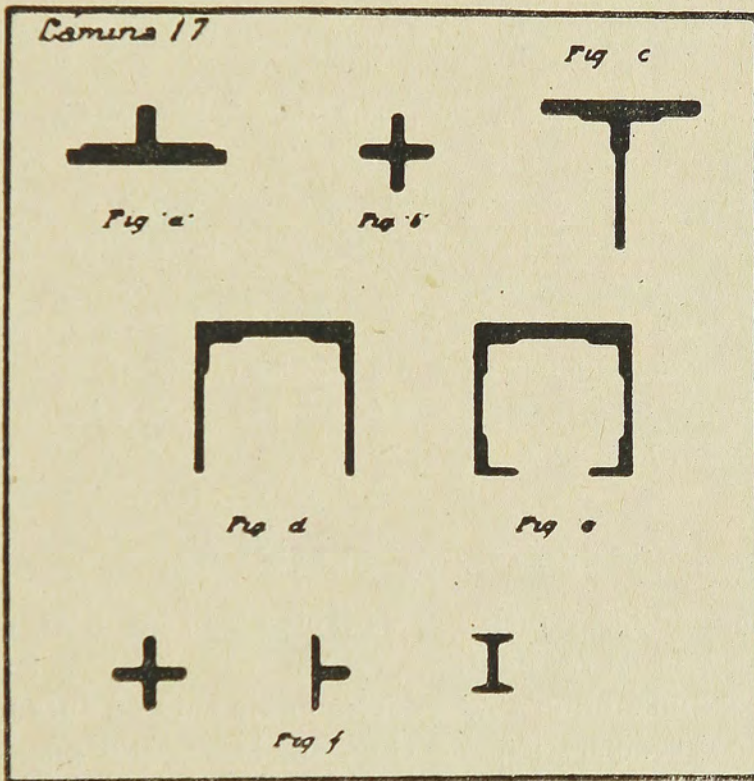
El refuerzo con un tercer cordón superior se aplicó por primera vez en el puente sobre el río Quepe, formado por un tramo metálico de 68,40 de m. luz, vía superior y enrejado múltiple. Se pensó primero, darle tensión inicial; pero como el costo de las cepas era muy grande, se hizo un nuevo estudio sin esta tensión que dió buen resultado y demostró la conveniencia que había en no darla.

Los puentes Diguillín e Itata, tramos metálicos de 37 m. de luz se reforzaron con un tercer cordón inferior con tensión inicial y no dieron buen resultado.

### SECCIONES DEL TERCER CORDON

Al tercer cordón inferior conviene darle una sección  $\perp$  (lámina 17, fig. a) de un alma de poca altura con la mayor parte del material acumulado en la parte horizontal, es decir, en las suelas; pero como trabaja sólo a la tracción desempeña el papel de una cinta o tirante plano. Conviene usar suelas del ancho de las de las cabezas y ángulos disimétricos con su ala mayor sobre las suelas. El alma puede reducirse a un suple del alto del ala menor de los ángulos y de espesor igual al de los







goussets en que van a ensamblar las péndolas. En realidad, la sección necesita mucho más rigidez respecto del eje vertical que del horizontal.

Las péndolas van a ser piezas comprimidas expuestas a sufrir pandeo, especialmente las centrales por su mayor longitud; la sección más conveniente es la formada por cuatro ángulos (Fig. b). Los ángulos mínimos aceptados para puentes son los de  $70 \times 70 \times 8$  mm., generalmente basta esta dimensión para el caso de nuestros puentes y aún quedan trabajando a fatigas bajas.

En algunos casos, como en el puente Quepe, conviene colocar las péndolas saltando un montante; tiene la ventaja de aprovecharse mejor el material.

En los arcos superiores hay que tomar en cuenta si éstos se pueden o no contraventar. En los casos de vía inferior y a veces en los de intermedia se puede contraventar a menudo desde el primer paño; por lo tanto, la longitud de pandeo del arco se reduce a la de los paños; la sección más conveniente es la T (Fig. c) con las suelas de un ancho igual a las de la cabeza, alma y ángulos en tal forma, que los momentos de inercia según los dos ejes principales no sean muy distintos. Si las cabezas tienen suelas muy anchas, las hay hasta de 600 mm., conviene tomar las del arco algo más angostas.

En la mayor parte de los casos de vía superior no se puede contraventar el arco o a lo más, sólo se puede hacer en los paños centrales; por esto, la longitud de pandeo es muy grande y obliga a dar gran sección al arco con un fuerte momento de inercia. La sección más conveniente es la «cajón» (Fig. d), que algunas veces es necesario aún, reforzar con ángulos, (Fig. e).

Las péndolas trabajan a la tracción; su sección puede ser como las anteriores de 4 ángulos que puede reducirse a 2 o a 2 perfiles U (Fig. f).

Los contravientos no exigen perfiles ángulos mayores de  $80 \times 80$ ; lo más usado es el ángulo de  $70 \times 70 \times 8$  mm.

## PESO DEL REFUERZO

El peso de este tipo de refuerzo es variable según las luces, tipos de viga y porcentaje de aumento de resistencia.

No se puede dar una fórmula para determinarlo para un ante-proyecto; es preferible obtenerlo por comparación con el calculado en otros puentes parecidos ya hechos. Damos a continuación, los datos principales de los refuerzos de este tipo hechos en la Empresa. En todos ellos el arco sólo trabaja al paso de la carga rodante, es decir, al colocarlos no se les ha dado tensión inicial.



## REFUERZOS TIPO D

## TERCER CORDON SUPERIOR

PUENTES	Luz	N.º de paños	Altura de la viga m.	Flecha del arco m.	Sec. media de los cordones cm. <sup>2</sup>	Sec. del tercer cordón cm. <sup>2</sup>	Tren base calc.	PESO DEL REFUERZO POR M. C.	
								Vigas kgs mc	Puente kgs mc
Quepe.....	68,40	20	7,00	9,00	255,0	297,0	B.	1.000	1.280
Collilelfu. ....	53,69	13	4,92	7,50	180,0	299,0	B.	1.000	1.230
Damas .....	50,00	12	4,60	7,00	250,0	190,0	B.	694	981
Llollehue N.º 3.....	42,00	12	4,20	5,80	162,0	195,0	B.	740	895
Angostura Poniente .....	35,80	10	3,30	4,80	298,0	141,5	C.	610	772
Ancoa N.º 1 y 2 .....	31,00	10	3,10	4,00	189,0	156,5	C.	505	605
Batros .....	31,00	10	3,10	4,00	155,0	156,5	C.	504	609
Liguay .....	31,00	10	3,10	4,00	194,0	156,5	C.	500	610
Tapihue .....	31,00	10	3,10	4,00	152,9	156,5	C.	456	680
Pelal .....	29,00	10	2,80	4,00	118,0	147,0	B.	578	780
Paine.....	27,90	10	2,60	3,80	194,0	159,0	C.	580	670
Llollehue N.º 1.....	24,10	10	2,40	3,20	114,0	137,7	B.	587	830
Huilquilco . . . . .	19,20	10	1,80	2,60	96,0	100,0	B.	492	840

## TERCER CORDON INFERIOR

PUENTES	Luz	N.º de paños	Altura de la viga m.	Flecha del arco m.	Sec. media de los cordones cm. <sup>2</sup>	Sec. del tercer cordón cm. <sup>2</sup>	Tren base calc.	PESO DEL REFUERZO POR M. C.	
								Vigas kgs mc	Puente kgs mc
Lipingüe .....	39,00	10	3,80	5,00	154,0	193,0	B.	670	860
Huaquilpo .....	29,70	11	2,80	4,00	122,0	149,0	B.	665	940
Cuinco N.º 2.....	29,00	10	2,80	4,00	118,0	115,4	B.	536	750
Chanco .....	29,00	10	2,80	3,76	118,0	165,0	C.	576	804
Cajón .....	24,10	10	2,40	2,30	130,0	122,0	C.	512	786
Dumo.....	21,00	10	1,70	2,90	89,4	123,6	B.	470	665
Huequén.....	21,00	10	1,70	2,90	89,4	123,6	B.	470	665
Pichi-Quepe .....	14,30	10	1,45	2,00	79,0	83,0	B.	266	—



## METODO DE CALCULO

En la lámina 18 tenemos una viga reforzada con un tercer cordón inferior.

Sea:

- l luz teórica de la viga.
- d altura teórica de la viga.
- f flecha del arco o tercer cordón.
- $h_n$  altura del arco en una sección n.
- H empuje horizontal en el arco.
- S esfuerzo en el arco.
- V componente vertical de S.
- $\alpha$  ángulo de inclinación del arco con la horizontal.
- m momento en la viga.
- M momento en la viga reforzada con el arco.
- T esfuerzo de corte en la viga.
- $T_t$  esfuerzo de corte en la viga reforzada con tercer cordón.

Tenemos las ecuaciones:

$$1) M = m - H h_n \text{ válida para un punto del cordón inferior.}$$

$$2) T_t = T - H \operatorname{tg} \alpha$$

Suponemos que a H le damos un valor igual a  $-1$  y llamemos q el esfuerzo por m. c. que se desarrolla en la viga con esta sollicitación,

$$3) H \cdot f = \frac{1}{8} q l^2$$

$$4) q = - \frac{8 f}{l^2}$$

La ecuación general de los trabajos virtuales es:

$$5) P_m \cdot \delta_m = H_m \left( \sum \frac{M'^2 dx}{E I} + \sum \frac{S'^2 s}{E \Omega} \right)$$

Esta ecuación la aplicamos para las fuerzas reales  $P_m$  y  $H_m$  y el sistema de desplazamientos imaginarios  $\delta_m$  producidos por el esfuerzo  $H = -1$  Tón.

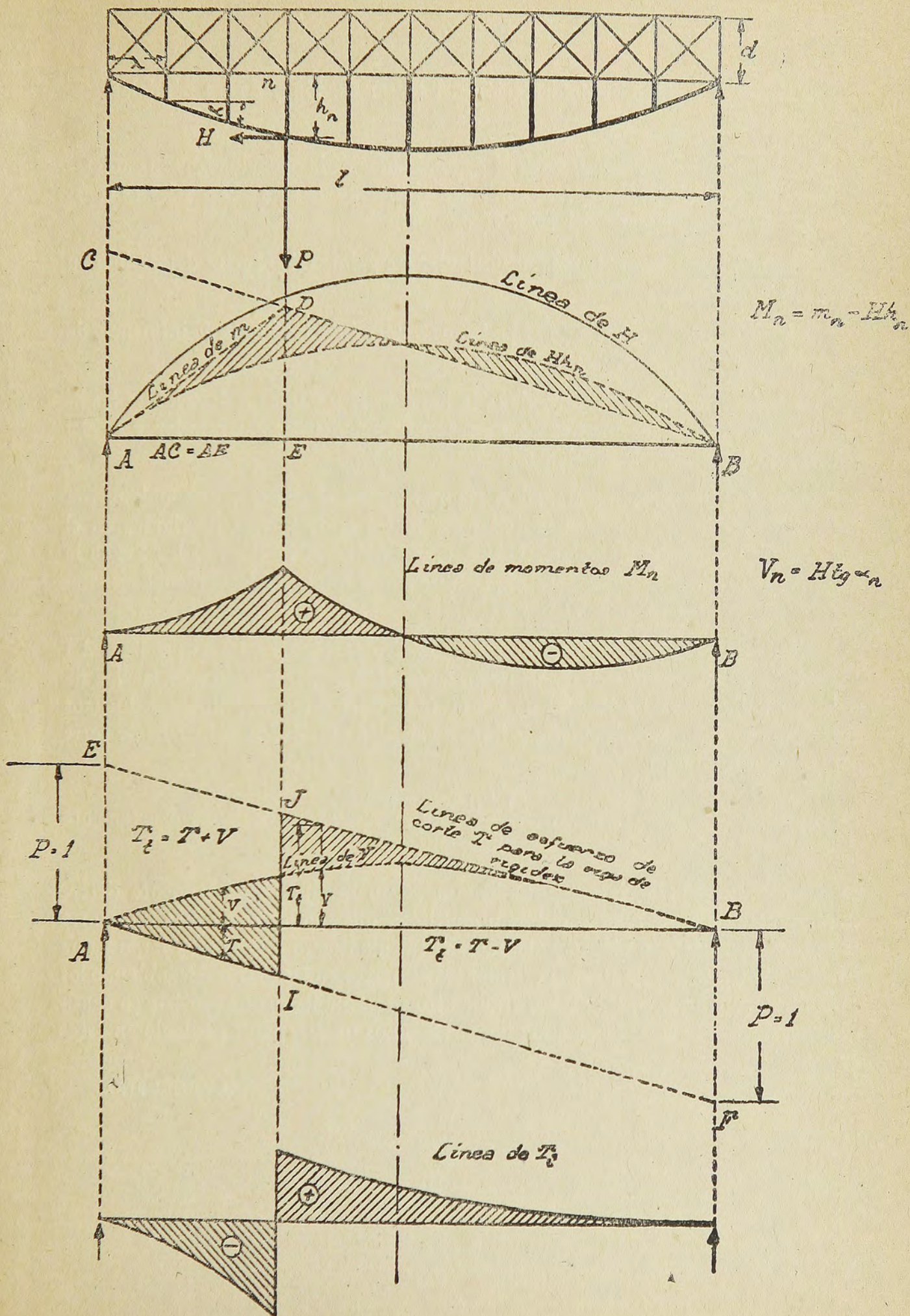
De la ecuación 5) deducimos:

$$6) H_m = P_m \frac{\delta_m}{\sum \frac{M'^2 dx}{E I} + \sum \frac{S'^2 s}{E \Omega}}$$

$\delta_m$  es el desplazamiento vertical de  $P_m$  producido por  $H = -1$ .



Lámina 18





$\Sigma \frac{M'^2 dx}{E I}$  es el trabajo de deformación debido a la flexión de la viga por

reforzar que llamaremos **viga de rigidez**.

$\Sigma \frac{S'^2 s}{E \Omega}$  es el trabajo de deformación del tercer cordón y de las péndolas.

Estos dos últimos valores, o sea el denominador de la ecuación 6), son características elásticas del sistema correspondiente al sistema de carga  $H = -1$  y es constante, es decir, no depende del valor  $P_m$ .

Haciendo ahora  $P_m = 1$  podemos calcular los valores de  $H$  para determinar su línea de influencia.

Con la línea de influencia de  $H$  podemos determinar las líneas de influencia de los momentos y de los esfuerzos de corte.

En la lámina 18 tenemos dibujada la línea de  $H$  y vamos a determinar las líneas de influencia de los momentos para el nudo  $n$  del cordón inferior y la del esfuerzo de corte para la sección  $n$ .

Sobre  $A A$  llevamos la distancia  $A E$  y obtenemos el punto  $C$  que unimos con  $B$ ,  $A D B$  es la línea de influencia de los momentos  $m$  de la viga de rigidez en el nudo  $n$ . Multiplicamos los valores  $H$  por  $h_n$  y dibujamos la línea  $H h_n$ . Según la ecuación 1) la línea de momentos  $M_n$  la obtenemos tomando las ordenadas comprendidas entre las líneas  $A D B$  y  $H h_n$ .

Dibujamos las líneas  $E B$  y  $A F$  tomando  $A E$  y  $B F$  igual a 1 Ton.; la línea  $A I J B$  es la línea de influencia de los esfuerzos de corte  $T$  para la sección  $n$  de la viga de rigidez. Dibujamos ahora la línea de  $V = H \operatorname{tg} \alpha_n$  y de estas dos líneas deducimos fácilmente, como se ve en la figura, la línea de los  $T_t$  o sea, de los esfuerzos de corte para la viga reforzada.

El cálculo de los valores  $\delta_m$ ,  $\Sigma \frac{M'^2 dx}{E I}$  y  $\Sigma \frac{S'^2 s}{E \Omega}$  se puede hacer exactamente

como en el caso de una viga de alma llena o de un enrejado estáticamente determinado; pero en los enrejados dobles o múltiples, que son los casos más frecuentes en nuestros puentes, no vale la pena hacer el cálculo exacto que es muy largo y que ya lleva un porcentaje de error al calcular los esfuerzos en las barras desdoblado los enrejados. Conviene, en este caso, seguir otro procedimiento que consiste en considerar la viga como si fuera de alma llena. Daremos un ejemplo de cálculo en estos dos casos.

(Continuará).