Ing. Carlos Concha Fernández

Curvas de enlace aplicadas a los caminos

La conveniencia de armonizar el trazado del eje de un ferrocarril o de un camino, con la trayectoria que debe seguir el vehículo para evitar cambios bruscos en su recorrido, ha inducido, primeramente en los ferrocarriles y últimamente en los caminos, a usar curvas de enlace entre las rectas y las curvas circulares.

En ferrocarriles es más necesario que en caminos el uso de las curvas de enlace, por cuanto su ausencia hace que los coches golpeen alternativamente sobre uno y otro riel, tanto a la entrada como a la salida de las curvas, produciendo un movimiento de vaivén transversal.

En caminos no existe este golpe y casi no existe el movimiento de vaivén, porque en la práctica este movimiento transversal es atenuado o anulado; en efecto el automóvil, mientras el piloto gira el volante, describe una trayectoria de enlace, que es una curva cuyo radio varía desde infinito hasta el radio de la curva del camino. Este sistema de realizar la curva de enlace, tiene el inconveniente de que el automóvil se separa en parte del eje de la pista que le corresponde, acercándose a la pista vecina, con peligro de chocar con otros vehículos. Por otra parte, esta trayectoria de enlace no es siempre la más perfecta.

Para evitar estos inconvenientes y al mismo tiempo para que el peralte en cada punto guarde armonía con el radio del eje del camino, es que se están empezando a usar en algunos países las curvas de enlace.

En Chile, el empleo de estas curvas no es completamente nuevo, al menos en teoría, pues ya en el año 1926 el distinguido ingeniero don Emiliano Jiménez hizo un estudio con curvas de enlace en el camino de Concepción a Bulnes, el que no fué llevado a la práctica debido a que el trazado del camino fué modificado y a que en ese tiempo las curvas de enlace no eran una exigencia de las normas del Departamento de Caminos.

En la actualidad se están aplicando curvas de enlace en el camino de Nos a Talca y en otros caminos en construcción.

La condición que deben llenar las curvas de enlace es que su radio varíe desde el infinito hasta el radio de la curva de que se trata, en razón inversa del largo del arco en cada punto, medido desde el principio de la curva de enlace.

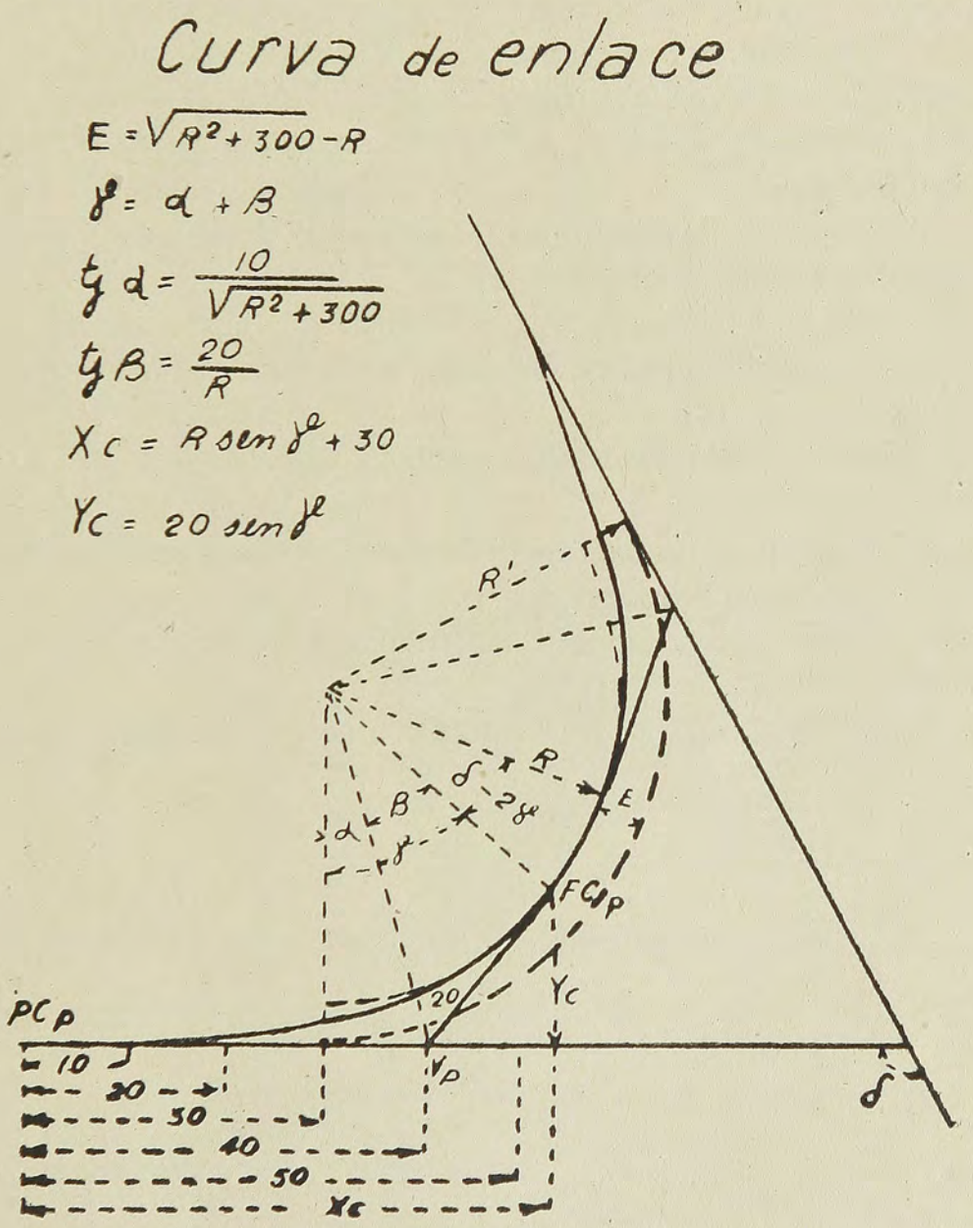
Teóricamente, la curva que satisface esta condición es una parábola de tercer grado de la fórmula $Y = \frac{X^3}{N}$. El divisor N es constante para cada curva, pero variable de una curva a otra, en función del radio de la curva circular.

También se usan como curvas de enlace la curva espiral y la lemniscata, que dan resultados cuyas diferencias con la primera son despreciables.

A nuestro juicio, no hay ningún inconveniente para usar la parábola de tercer grado

Longitud de las curvas de enlace.—Un punto de importancia en el estudio de estas curvas es su longitud. Algunos ingenieros hacen variar su longitud en razón directa del peralte, para evitar un aumento de pendiente, mayor de cierto límite, en el costado exterior del pavimento a lo largo de la transición del peralte. Pero esto conduce a curvas excesivamente largas.

A nuestro juicio esta condición no tiene importancia, y estimamos que el largo de la curva está impuesto por el largo de la trayectoria que prácticamente describe el automóvil. Este largo es más o menos 60 metros, variando poco con la velocidad. Podemos observar que una curva de enlace de gran desarrollo tiene en sus primeros



20 metros o más, ordenadas tan pequeñas, que su trayectoria no guarda armonía con la trayectoria que el volante, en manos de cualquier piloto, hace describir al automóvil.

Podríamos adoptar el desarrollo de 60 metros para todas las curvas de enlace; pero con el objeto de facilitar el estacado de las curvas, estimamos preferible elegir

tangentes constantes, que igualaremos a 20 y 40 metros respectivamente y además ubicación constante del vértice de la parábola. Elegidas así las tangentes, el desarrollo variará, en general, entre 59 y 60 metros.

Trazado de las curvas de enlace.—Para trazar la curva de enlace puede procederse de la siguiente manera:

Una vez elegido el radio R de la curva circular, de acuerdo con las condiciones técnicas y con la topografía del terreno, se aumentará este radio en la cantidad de metros E, cuyo valor da la tabla inserta. Con la suma, que llamaremos R', se determinará el largo de la tangente correspondiente, la que aplicada a partir del vértice que forman las dos alineaciones del trazado del camino, dará el principio de la curva de radio R' (ver figura).

Partiendo de este punto, hacia el vértice, se aplicará sobre la recta la distancia 10 metros y se obtendrá así el vértice de la curva de enlace.

Partiendo del mismo punto en sentido opuesto al vértice, se aplicará la distancia 30 metros y se obtendrá así el principio de la curva de enlace.

Aplicando desde este último punto, hacia el vértice las abscisas 10 m., 20 m., etc. hasta la abscisa X_c que da la tabla, y las ordenadas correspondientes Y_{10} Y_{20}, etcétera, se obtendrán puntos de la curva de enlace. La ubicación del final de la curva de enlace se puede confirmar con la aplicación de la tangente de 20 metros.

La tabla da, además, el desarrollo de la parábola.

Desde el final de la curva de enlace se iniciará la curva circular, cuyo ángulo al centro, será igual al ángulo de deflexión, medido en el vértice, menos 2γ, cuyo valor da la tabla.

Se terminará la curva con la segunda curva de enlace que será igual a la primera.

Para la formación de la tabla se han calculado los elementos de la curva de enlace, cuyos valores son funciones del radio R de la curva circular. de acuerdo con las fórmulas indicadas en la figura. Las fórmulas suponen que las medidas lineales se hacen en metros.

Para radios que no figuran en la tabla se puede hacer interpolación.

TABLA DE ELEMENTOS DE LAS CURVAS DE ENLACE

R	E	X_c	Y_{10}	Y_{20}	Y_{30}	Y_{40}	Y_{50}	Y_c	D	2γ Sexsag	2γ Centesim.
50	2.92	56.87	.06	.47	1.58	3.74	7.31	10.75	58.70	65°00′20″	72.228
60	2.45	57.74	.05	.38	1.30	3.07	6.00	9.24	59.05	55°03′40″	61.179
70	2.11	58.29	.04	.32	1.10	2.61	5.10	8.08	59.28	47°40′40″	52.975
80	1.85	58.67	.04	.28	0.96	2.27	4.44	7.17	59.46	42°00′20″	46.673
90	1.65	58.94	.03	.25	0.85	2 01	3.92	6.43	59.58	37°30′40″	41.679
100	1.49	59.14	.03	.23	0.76	1.80	3.52	5.83	59.64	33°52′40″	37.642
120	1.24	59.39	.02	.19	0.63	1.50	2.92	4.90	59.75	28°21′00″	31.500
150	1.00	59.61	.02	.15	0.50	1.19	2.33	3.95	59.84	22°46′00″	25.296
180	0.83	59.72	.02	.12	0,42	0.99	1.94	3.30	59.89	19°00′20″	21.117
200	0.75	59.78	.01	.11	0.38	0.89	1.74	2.98	59.92	17°07′40″	19.031
220	0.68	59,82	.01	.10	0.34	0.81	1.58	2.71	59.93	15°34′40″	17.309
250	0.60	59.85	.01	.08	0.30	0.71	1.39	2.39	59.94	13°42′50″	15.238
300	0.50	59.90	.01	.07	0.25	0.59	1.16	1.99	59.95	11°26′20″	12.710
350	0.43	59.93	.01	.06	0.21	0.51	0.99	1.71	59.96	9°48′40″	10.905
400	0.38	59.94	.01	.05	0.19	0.45	0.87	1.50	59.97	8°35′10″	9.540
500	0.30	59.95	.01	.04	0.15	0.36	0.70	1.20	59.98	6°52′10″	7.634
600	0.25	59.96	.00	.04	0.12	0.30	0.58	1.00	59.99	5°43′20″	6.358
700	0.21	59.96	.00	.03	0.11	0.25	0.50	0.86	59.99	4°54′20″	5.451

En el caso de no disponer de tabla se puede, sin error de importancia, emplear, en vez de la curva parabólica de tercer grado, un elemento recto de 10 metros seguido de una curva parabólica de segundo grado con su vértice en el mismo punto y con tangentes de 20 y 30 metros respectivamente. Esta parábola es fácil de estacar en el terreno. Cabe observar que para una abscisa igual a 10 metros, cuando el radio de la curva circular es 200 metros, la ordenada de la curva de tercer grado es igual a 14 milímetros.

Como hemos dicho antes, cada parábola de tercer grado tiene la fórmula $Y = \frac{X^3}{N}$. El divisor N tiene un valor que se aproxima a 358 R. Como dato ilustrativo damos los valores de N para cada radio de la curva circular, deducidos de la fórmula $N = \frac{(R \operatorname{sen} \gamma + 30)^3}{20 \operatorname{sen} \gamma}$

R	N	R	N	R	N
50	17110	120	42751	300	108000
60	20833	150	53624	350	125870
70	24512	180	64542	400	143570
80	28166	200	71689	500	179550
90	31843	220	78990	600	215570
100	35479	250	89700	700	250790

Peralte.—A primera vista parece lógico que el peralte se haga variar desde cero en el principio de la curva de enlace, hasta el peralte de la curva circular en el final de la curva de enlace. Sin embargo, estimamos que da mejor resultado anticipar en 10 metros la transición del peralte. En efecto, el peralte en la curva circular es muy inferior al peralte teórico, y se ha fijado así para evitar molestia a los vehículos de marcha lenta. Pero en la curva de enlace, siendo el peralte en todo caso inferior al de la curva circular, no hay razón para no aproximarse al peralte teórico. Por ejemplo, supongamos una curva de radio de 200 metros, que puede considerarse como curva de radio pequeño cuando se aplica a curvas de un camino de importancia; el peralte de la curva circular será 8% de acuerdo con nuestras normas. La velocidad máxima admisible en la curva es de 76 km/hora. El peralte teórico es para este caso, 23%. Hay, por consiguiente, un déficit de peralte de 15%. Si en la curva de enlace variásemos el peralte uniformemente entre cero y 8% tendríamos, en el centro de ésta, un peralte de 4% con un radio de 400 metros. El peralte teórico en este punto sería 11%. El déficit de peralte sería de 7%. Estimamos que no llegando el peralte efectivo a 8% hay conveniencia en disminuir el déficit de peralte.

Si la transición del peralte lo empezamos 10 metros antes del principio de la curva de enlace, y le damos una longitud de 60 metros, tendremos que en el centro de esta curva el peralte será igual a dos tercios de ocho, o sea 5,3% con un déficit de peralte de 5,7% en vez de 7%.

Podría objetarse que en el principio de la curva hay cierto peralte en un punto con radio infinito; pero este resultado es sólo aparente, porque este avance del peralte tiene, en general, como único efecto, el de anular el bombeo de la mitad exterior de la calzada evitando así la existencia de un peralte negativo. La mitad interior de la calzada no variará en ese espacio.

A los diez metros del principio de la curva tendremos un peralte efectivo de 2.6% con un radio de 1200 metros y un peralte teórico de 3,8% que supera en 1,2% al efectivo. En el resto de la curva el déficit de peralte irá en aumento hasta alcanzar el valor de 15% en el principio de la curva circular.

La transición del peralte que recomendamos está en armonía con la transición que usamos en curvas circulares sin enlace, la que se ubica totalmente en la recta, y que da mejor resultado que la transición repartida por mitad entre la recta y la curva como se usa en algunos países. Este resultado se debe a que en los casos de

curvas sin enlace, hay trayectoria de enlace realizada por el movimiento del volante. La ubicación de la trayectoria de enlace es semejante a la de la curva de enlace y en ningún punto de ella, ni aun en el principio de la curva circular hay un peralte inferior al peralte teórico.

Estimamos que la transición del peralte en la curvas con enlace debe tener 60 metros y que debe empezar 10 metros antes del principio de la curva de enlace.

A nuestro juicio, las curvas de enlace deben aplicarse a las curvas de radio no mayor de 700 metros, pues el efecto para las curvas de mayor radio es muy pequeño.

Para completar este estudio damos a continuación la escala de peraltes de las curvas circulares empleada en el Departamento de Caminos.

Radios	Peralte	Radios	Peralte
0-50.....	12%	201-300.....	7%
51-75.....	11%	301-400.....	6%
76-100.....	10%	401-500.....	5%
101-150.....	9%	501-700.....	4%
151-200.....	8%	701-más.....	0%

Debemos observar finalmente que en todo el procedimiento que recomendamos para realizar la curva de enlace, hemos tratado, en lo posible, de simplificar su aplicación a los estudios de caminos y facilitar su estacado en el terreno.