
CAPÍTULO III

ALINEAMIENTO HORIZONTAL

3.1 DEFINICIÓN

El alineamiento horizontal es la proyección del eje de la subcorona del camino sobre un plano horizontal.

3.2 ELEMENTOS QUE LO INTEGRAN

Los elementos que integran el alineamiento horizontal son las tangentes, las curvas circulares y las curvas de transición.

3.2.1 Tangentes

Las tangentes son la proyección sobre un plano horizontal de las rectas que unen las curvas. Al punto de intersección de la prolongación de dos tangentes consecutivas se le representa como PI, y al ángulo de deflexión formado por la prolongación de una tangente y la siguiente se le representa por Δ . Como las tangentes van unidas entre sí por curvas, la longitud de una tangente es la distancia comprendida entre el fin de la curva anterior y el principio de la siguiente. A cualquier punto preciso del alineamiento horizontal localizado en el terreno sobre una tangente, se le denomina punto sobre tangente y se le representa por *PST*.

La longitud mínima de una tangente está condicionada por la seguridad. Las tangentes son causa potencial de accidentes, debido a la somnolencia que produce al conductor mantener concentrada su atención en puntos fijos del camino durante mucho tiempo, o bien, porque favorecen los deslumbramientos durante la noche; por tal razón, conviene limitar la longitud de las tangentes, proyectando en su lugar alineamientos ondulados con curvas de gran radio.

La longitud mínima de tangente entre dos curvas consecutivas está definida por la longitud necesaria para dar la sobreelevación y ampliación a esas curvas.

3.2.2 Curvas circulares

Las curvas circulares son los arcos de círculo que forman la proyección horizontal de las curvas empleadas para unir dos tangentes consecutivas; las curvas circulares pueden ser simples o compuestas, según se trate de un solo arco de círculo o de dos o más sucesivos, de diferente radio.

A) Curvas circulares simples. Cuando dos tangentes están unidas entre si por una sola curva circular, ésta se denomina curva simple. En el sentido del cadenamiento, las curvas simples pueden ser hacia la izquierda o hacia la derecha. Las curvas circulares simples tienen como elementos característicos los mostrados en la Figura 3.1, y se calculan como sigue:

1. *Grado de curvatura*. Es el ángulo subtendido por un arco de 20 m. Se representa con la letra G_c ;

$$\frac{G_c}{20} = \frac{360^\circ}{2\pi R_c} \therefore G_c = \frac{1145.92}{R_c} \quad (1)$$

El grado máximo de curvatura que puede tener una curva, es el que permite a un vehículo recorrer con seguridad la curva con la sobreelevación máxima a la velocidad de proyecto.

2. *Radio de la curva*. Es el radio de la curva circular. Se simboliza como R_c . De la expresión (1) se tiene:

$$R_c = \frac{1145.92}{G_c} \quad (2)$$

3. *Ángulo central*. Es el ángulo subtendido por la curva circular. Se simboliza Δc . En curvas circulares simples es igual a la deflexión.

4. *Longitud de curva*. Es la longitud del arco entre el PC y el PT . Se le representa L_c .

$$\frac{L_c}{2\pi R_c} = \frac{\Delta c}{360^\circ} \therefore L_c = \frac{\pi \Delta c}{180^\circ} R_c$$

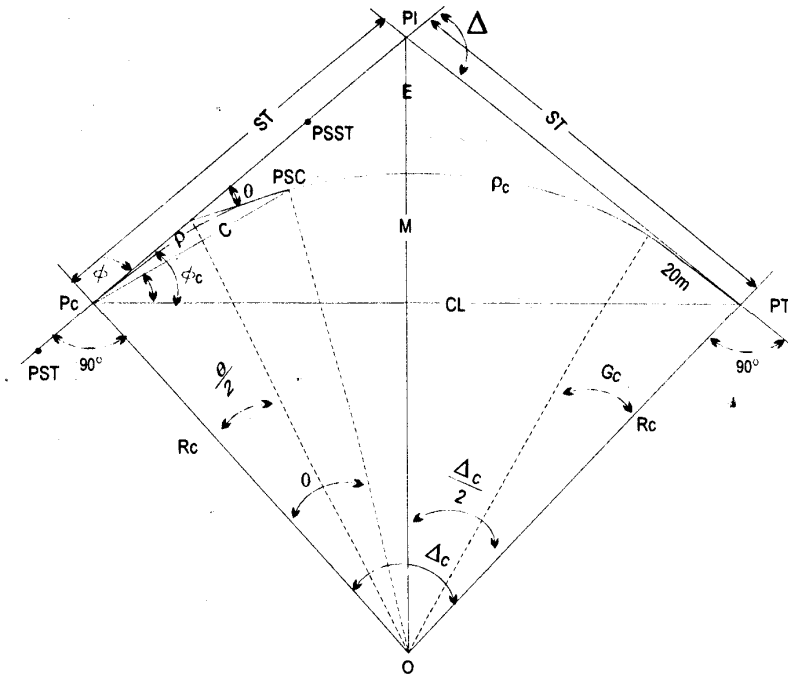
Considerando la expresión (2) :

$$L_c = 20 \frac{\Delta c}{G_c} \quad (3)$$

5. *Subtangente*. Es la distancia entre el PI y el PC o PT , medida sobre la prolongación de las tangentes. Se representa como ST . Del triángulo rectángulo $PI-0-PT$, se tiene:

$$ST = R_c \tan \frac{\Delta c}{2} \quad (4)$$

6. *Externa*. Es la distancia mínima entre el PI y la curva. Se representa por E . En el triángulo rectángulo $PI-0-PT$, se tiene:



PI	Punto de intersección de la prolongación de las tangentes
PC	Punto en donde comienza la curva circular simple
PT	Punto en donde termina la curva circular simple
PST	Punto sobre la tangente
PSST	Punto sobre la subtangente
PSC	Punto sobre la curva circular
O	Centro de la curva circular
Δ	Angulo de deflexión de las tangentes
Δ_c	Angulo central de la curva circular
θ	Angulo de deflexión a un PSC
ϕ	Angulo de una cuerda cualquiera
ϕ_c	Angulo de la cuerda larga
G_c	Grado de curvatura de la curva circular
R_c	Radio de la curva circular
ST	Subtangente
E	Externa
M	Ordenada media
C	Cuerda
CL	Cuerda larga
p	Longitud de un arco
p_c	Longitud de la curva circular

FIGURA 3.1 ELEMENTOS DE LA CURVA CIRCULAR SIMPLE

$$E = Rc \sec \frac{\Delta c}{2} - Rc = Rc \left(\sec \frac{\Delta c}{2} \right) - 1 \quad (5)$$

7. *Ordenada media.* Es la longitud de la flecha en el punto medio de la curva. Se simboliza con la letra M . Del triángulo rectángulo $PI-0-PT$, se tiene:

$$M = Rc - Rc \cos \frac{\Delta c}{2} = Rc \left(1 - \cos \frac{\Delta c}{2} \right) \quad (6)$$

8. *Deflexión a un punto cualquiera de la curva.* Es el Ángulo entre la prolongación de la tangente en PC y la tangente en el punto considerado. Se le representa como θ .

$$\frac{\theta}{l} = \frac{Gc}{20} \quad \therefore \quad \theta = \frac{Gcl}{20} \quad (7)$$

9. *Cuerda.* Es la recta comprendida entre dos puntos de la curva. Se le denomina C . Si esos puntos son el PC y el PT , a la cuerda resultante se le denomina cuerda larga. En el triángulo $PC-0-PSC$.

$$C = 2Rc \sin \frac{\theta}{2} \quad (8)$$

Para la cuerda larga:

$$CL = 2Rc \sin \frac{\Delta c}{2} \quad (8')$$

10. *Ángulo de la cuerda.* Es el ángulo comprendido entre la prolongación de la tangente y la cuerda considerada. Se representa como ϕ . En el triángulo $PC-0-PSC$.

$$\phi = \frac{\theta}{2}$$

y teniendo en cuenta la expresión (7)

$$\phi = \frac{Gcl}{40} \quad (9)$$

Para la cuerda larga:

$$\phi c = \frac{Gclc}{40}$$

Para fines de trazo se considera que la cuerda C tiene la misma longitud que el arco 1. Para minimizar el error cometido al hacer esta consideración, se toman cuerdas de 20 m en curvas con $G \leq 8^\circ$; de 10 m en curvas con $8^\circ < G \leq 22^\circ$, y de 5 m para curvas con $22^\circ < G \leq 62^\circ$

B) Curvas circulares compuestas. Son aquellas que están formadas por dos o más curvas circulares simples del mismo sentido y de diferente radio, o de diferente sentido y cualquier radio, pero siempre con un punto de tangencia común entre dos consecutivas. Cuando son del mismo sentido se llaman compuestas directas y cuando son de sentido contrario, compuestas inversas. En caminos debe evitarse éste tipo de curvas, porque introducen cambios de curvatura peligrosos; sin embargo, en intersecciones pueden emplearse siempre y cuando la relación entre dos radios consecutivos no sobrepase la cantidad de 2.0 y se resuelva satisfactoriamente la transición de la sobreelevación.

3.2.3 Curvas de transición

Cuando un vehículo pasa de un tramo en tangente a otro en curva circular, requiere hacerlo en forma gradual, tanto por lo que se refiere al cambio de dirección como a la sobreelevación y a la ampliación necesarias. Para lograr este cambio gradual se usan las curvas de transición.

Se definirá aquí como curva de transición a la que liga una tangente con una curva circular, teniendo como característica principal, que en su longitud se efectúa, de manera continua, el cambio en el valor del radio de curvatura, desde infinito para la tangente hasta el que corresponde para la curva circular.

Se llama curvatura de una curva en un punto A , al límite de las curvaturas medias de los arcos de dicha curva que tienen el mismo extremo A , cuando el segundo extremo tiende a A ; siendo la curvatura media de un arco el cociente del ángulo de contingencia del arco y de su longitud. Asimismo, se llama radio de curvatura de una curva en un punto al valor recíproco de la curvatura en dicho punto.

La aceleración centrífuga de un vehículo que se mueve a velocidad uniforme V , vale V^2/R ; para este caso, la aceleración varía de manera continua desde cero para la tangente hasta V^2/R_c , para la curva circular de radio R_c . La curva de transición debe proyectarse de manera que la variación de la curvatura y, por lo tanto, la variación de la aceleración centrífuga, sean constantes a lo largo de ella. Si la longitud de la curva de transición es l_e , la variación de la aceleración centrífuga por unidad de longitud vale: $V^2/R \cdot l_e$; en un punto cualquiera de la curva, situado a una distancia l del origen de la transición, la aceleración centrífuga valdrá $V^2 l / R_c l_e$; por otra parte, si la curvatura en el punto considerado es $1/R$ la aceleración centrífuga en ese mismo punto valdrá V^2/R , por lo cual

$$\frac{V^2 l}{R_c l_e} = \frac{V^2}{R}$$

simplificando: $Rl = R_c l_e$

pero: $R_c l_e = K^2$

donde K es una magnitud constante, ya que Rc y l también lo son, entonces:

$$Rl = K^2 \quad (10)$$

La expresión anterior es la ecuación de la curva conocida como clotoide o espiral de Euler, que cumple con la condición de que el producto del radio y la longitud a un punto cualquiera es constante. Tiene la propiedad de que cuando aumenta o reduce su parámetro K , todas las medidas lineales cambian en la misma proporción, permaneciendo los elementos que determinan su forma sin cambio alguno; lo que significa que todas las clotoides tienen la misma forma, pero difieren entre sí por su longitud.

Como la clotoide de curvatura $1/R$ es proporcional a su longitud se tiene en ella a la curva más apropiada para efectuar transiciones.

A) Curva circular simple con espirales de transición. Las curvas circulares con espirales de transición constan de una espiral de entrada, una curva circular simple y una espiral de salida. Cuando las espirales de entrada y salida tienen la misma longitud la curva es simétrica, en caso contrario es asimétrica. En la Figura 3.2, se muestran los elementos de una curva simétrica, los que se calculan como sigue:

1. *Grado de curvatura de la curva circular*. Es el ángulo que subtiende un arco de 20 m en la curva circular.

$$Gc = \frac{1145.92}{Rc} \quad (11)$$

En donde Rc es el radio de la curva circular.

2. *Longitud de la espiral*. Es la longitud medida sobre la curva entre TE y el EC , o del CE al ET . Su valor mínimo se determina en el apartado B) de este inciso.

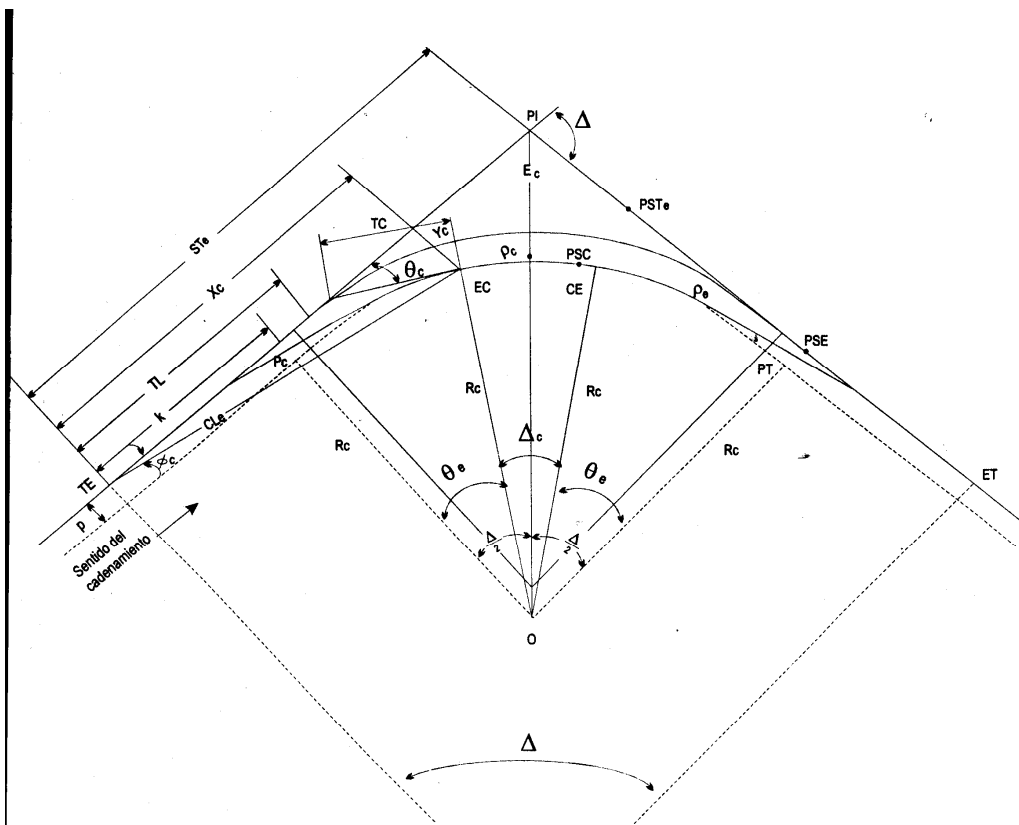
3. *Parámetro de la espiral*. Es la magnitud que define las dimensiones de la espiral

$$K = \sqrt{Rcle} \quad (12)$$

4. *Deflexión de la curva*. Es el ángulo comprendido entre las normales a las tangentes en TE y ET . Su valor es igual a la deflexión de las tangentes y se representa con Δ .

5. *Deflexión a un punto cualquiera de la espiral*. Es el ángulo comprendido entre la tangente en TE o ET y la tangente en un punto cualquiera PSE .

$$\theta = \left(\frac{l^2}{2K^2} \right) \quad (13)$$



PI	Punto de intersección de las tangentes
TE	Punto donde termina la tangente y empieza la espiral
EC	Punto donde termina la espiral y empieza la curva circular
CE	Punto donde termina la curva circular y empieza la espiral
ET	Punto donde termina la espiral y empieza la tangente
PSC	Punto sobre la curva circular
PSE	Punto sobre la curva espiral
PSTe	Punto sobre la subtangente
Δ	Angulo de deflexión de las tangentes
Δ_c	Angulo central de la curva circular
θ_e	Deflexión de la espiral
ϕ_c	Angulo de la cuerda larga
STe	Subtangente
Xc, Yc	Coordenadas del EC o del CE
k, p	Coordenadas del PC o del PT (Desplazamiento)
TL	Tangente larga
TC	Tangente corta
CLe	Cuerda larga de la espiral
Ec	Externa
Rc	Radio de la curva circular
p_e	Longitud de la espiral de entrada o salida
p_c	Longitud de la curva circular

FIGURA 3.2 ELEMENTOS DE LA CURVA CIRCULAR CON ESPIRALES

$$\text{Si } l = le; \theta = \theta_e; \text{ y por tanto: } 2K^2 = \left(\frac{le^2}{\theta_e}\right)$$

$$\text{y substituyendo en (13): } \theta = \left(\frac{l}{le}\right)^2 \theta_e \quad (14)$$

6. *Deflexión de la espiral.* Es el ángulo comprendido entre las tangentes a la espiral en sus puntos extremos.

$$\theta_e = \frac{le}{2Rc} \quad (15)$$

Con la expresión anterior se obtiene θ_e en radianes; expresada en grados y substituyendo

$$Rc = \frac{1145.92}{Gc}, \text{ se tiene:}$$

$$\theta_e = \frac{Gcle}{40} \quad (16)$$

7. *Longitud total de la curva.* Es la suma de las longitudes de las dos espirales de transición y de la longitud de la curva circular. Para curvas simétricas, se tiene:

$$L = le + \frac{20\Delta}{Gc} \quad (17)$$

8. *Coordenadas del EC de la curva.*

1

Radianes	Grados	
$Xc = le \left(1 - \frac{\theta_e^2}{10}\right)$	$Xc = \frac{le}{100} (100 - 0.00305\theta_e^2)$	(18)

$Yc = le \left(\frac{\theta_e}{3} - \frac{\theta_e^3}{42}\right)$	$Yc = \frac{le}{100} (0.582\theta_e - 0.0000126\theta_e^3)$	(18')
---	---	-------

9. *Coordenadas del PC de la curva circular*

$$\begin{aligned} P &= Yc - Rc (1 - \cos \theta_e) \\ K &= Xc - Rc \sin \theta_e \end{aligned} \quad (19)$$

10. *Subtangente*. Es la distancia entre el *PI* y el *TE* o *ET* de la curva, medida sobre la prolongación de la tangente, y se denomina *Ste*.

$$STe = k + (Rc + P) \tan \frac{\Delta}{2} \quad (20)$$

11. *Externa*. Es la distancia entre el *PI* y la curva y se denomina *Ec*.

$$Ec = (Rc + P) \sec \frac{\Delta}{2} - Rc \quad (21)$$

12. *Cuerda larga*. Es la recta que une el *TE* y *EC* o el *ET* y el *CE* y se le llama *CLe*.

$$CLe = \sqrt{X^2c + Y^2c} \quad (22)$$

13. *Ángulo de la cuerda larga*. Es el ángulo comprendido entre la tangente en *TE* y la cuerda larga y se simboliza como $\varnothing'c$.

$$\varnothing'c = \frac{\theta e}{3} - Z \quad (23)$$

$$Z = 3.1 \cdot 10^{-3} \theta^3 e + 2.3 \cdot 10^{-8} \theta^5 e$$

Z es una corrección que debe tomarse en consideración cuando $\theta e > 16^\circ$, la corrección es positiva para puntos atrás y negativa para puntos adelante del considerado.

14. *Tangente larga*. Es el tramo de Subtangente comprendido entre el *TE* o *ET* y la intersección con la tangente a *EC* o *CE*; se le llama *TL*.

$$TL = Xc - Yc \cot \theta e \quad (24)$$

15. *Tangente corta*. Es el tramo de la tangente a *CE* o *EC* comprendida entre uno de estos puntos y la intersección con la subtangente correspondiente; se representa como *TC*.

$$TC = Yc \csc \theta e \quad (25)$$

B) Longitud mínima de la espiral de transición. El cambio gradual de aceleración centrífuga del vehículo, y de la sobreelevación y sobreancho del camino, es la función de las curvas de transición. La longitud de estas curvas determina el ritmo del cambio.

Existen varios criterios para determinar esta longitud¹, en la tabla 3.1 se muestran comparativamente las longitudes de transición calculadas según varios criterios para caminos de 2 carriles y sobreelevación de 10%. En el apéndice A se incluyen tablas para la selección de la longitud de la espiral para una velocidad de proyecto y una curvatura dadas.

¹ Véase el Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras. SCT

VELOCIDAD DE PROYECTO km/h	SHORTT	SMIRNOFF	AASHO				SOP
	$Le = 0.035 \frac{V^2}{R}$	$le = 0.35V (V^2 / R + 127 S)$	$le = m a S$ $m = 1.5625 V + 75$				$le = 8 VS$
			a = 2.75	a = 3.05	a = 3.35	a = 3.65	
30	39	37	34	37	41	44	24
40	47	46	38	42	46	50	32
50	58	56	42	47	51	56	40
60	68	65	46	51	57	62	48
70	77	74	51	56	62	67	56
80	86	82	55	61	67	73	64
90	94	90	59	66	72	79	72
100	102	97	64	71	77	84	80
110	109	104	68	75	83	90	88

Tabla 3-1

Cuadro Comparativo de longitudes mínimas de transición según varios criterios

3.2.4 Curvatura máxima para una deflexión y velocidad dadas

Para determinados valores de la velocidad de proyecto, grado de curvatura y deflexión, ocurre que la suma de las deflexiones de la espiral sobrepasa a la deflexión entre las tangentes traslapándose entonces las espirales. Como es inadmisibles que se traslapen las espirales de transición, habrá un valor de deflexión, abajo del cual no se podrán insertar espirales para una curva de grado dado, o inversamente habrá un valor del grado arriba del cual no se podrán insertar espirales.

En el apéndice A se incluye la gráfica 3.1, donde quedan representadas las restricciones. Además, en esta gráfica la intersección del valor Δ de la deflexión con la línea V de la velocidad de proyecto correspondiente a una curva dada, define el grado de curvatura máximo para que no se traslapen las espirales.

3.2.5 Distancia de visibilidad en curvas de alineamiento horizontal

En las curvas del alineamiento horizontal que parcial o totalmente queden alojadas en corte o que tengan obstáculos en su parte interior que limiten la distancia de visibilidad, debe tenerse presente que esa distancia sea cuando menos equivalente a la distancia de visibilidad de parada. Si las curvas no cumplen con este requisito deberán tomarse las providencias necesarias para satisfacerlo, ya sea recortando o abatiendo el talud del lado interior de la curva o eliminando el obstáculo.

En el apéndice A se incluye la gráfica 3.2, donde se comparan las condiciones existentes en el proyecto con las recomendaciones.