CAPITULO V. ALINEAMIENTO HORIZONTAL

El alineamiento horizontal es la proyección del eje del camino sobre un plano horizontal. Los elementos que integran esta proyección son las tangentes y las curvas, sean estas circulares o de transición.

La proyección del eje en un tramo recto, define la tangente y el enlace de dos tangentes consecutivas de rumbos diferentes se efectúa por medio de una curva.

El establecimiento del alineamiento horizontal depende de: La topografía y características hidrológicas del terreno, las condiciones del drenaje, las características técnicas de la subrasante y el potencial de los materiales locales.

A. 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 lo llama PI y al ángulo de definición, formado por la prolongación de una tangente y la siguiente se lo denomina "α" (alfa)

Las tangentes van unidas entre sí por curvas y la distancia que existe entre el final de la curva anterior y el inicio de la siguiente se la denomina tangente intermedia. Su máxima longitud está condicionada por la seguridad.

Las tangentes intermedias largas 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 por que favorecen al encandilamiento durante la noche; por tal razón, conviene limitar la longitud de las tangentes intermedias, diseñando en su lugar alineaciones onduladas con curvas de mayor radio.

B. CURVAS CIRCULARES

Las curvas circulares son los arcos de circulo que forman la proyección horizontal de las curvas empleadas para unir dos tangentes consecutivas y pueden ser simples (ver Figura V.l) o compuestas. Entre sus elementos característicos principales se tienen los siguientes:

— Grado de curvatura: Es el ángulo formado por un arco de 20 metros. Su valor máximo es el que permite recorrer con seguridad la curva con el peralte máximo a la velocidad de diseño.

El grado de curvatura constituye un valor significante en el diseño del alineamiento. Se representa con la letra G_C y su fórmula es la siguiente:

$$\frac{G_C}{20} = \frac{360}{2\pi R} \quad \Rightarrow \quad G_C = \frac{1145{,}92}{R} \qquad (V\ .\ 1)$$

— Radio de curvatura: Es el radio de la curva circular y se identifica como "R" su fórmula en función del grado de curvatura es:

$$R = \frac{1145{,}92}{G_C} \qquad (V\ .\ 2)$$

1. Radio Mínimo de Curvatura Horizontal.

El radio mínimo de la curvatura horizontal es el valor más bajo que posibilita la seguridad en el tránsito a una velocidad de diseño dada en función del máximo peralte (e) adoptado y el coeficiente (f) de fricción lateral correspondiente. El empleo de curvas con Radios menores al mínimo establecido exigirá peraltes que sobrepasen los límites prácticos de operación de vehículos. Por lo tanto, la curvatura constituye un valor significante en el diseño del alineamiento. El radio mínimo (R) en condiciones de seguridad puede calcularse según la siguiente fórmula:

$$R = \frac{V^2}{127(e + f)} \qquad (V\ .\ 3)$$

Donde:

R = Radio mínimo de una curva horizontal, m.
V = Velocidad de diseño, Km/h.
f = Coeficiente de fricción lateral.
e = Peralte de la curva, m/m (metro por metro ancho de la calzada).

Criterios para adoptar los valores del radio mínimo:

— Cuando la topografía del terreno es montañosa escarpada.
— En las aproximaciones a los cruces de accidentes orográficos e hidrográficos.
— En intersecciones entre caminos entre sí.
— En vías urbanas.

A continuación, se incluye un cuadro con valores mínimos recomendables para el radio de la curva horizontal.

RADIOS MINIMOS DE CURVAS EN FUNCION DEL PERALTE " e "
y DEL COEFICIENTE DE FRICCION LATERAL "f"

Velocidad de Diseño	"f"	RADIO MINIMO CALCULADO				RADIO MINIMO RECOMENDADO			
km/h	máximo	e=0.10	e=0.08	e=0.06	e=0.04	e=0.10	e=0.08	e=0.06	e=0.04
20	0.350		7.32	7.68	8.08		18	20	20
25	0.315		12.48	13.12	13.86		20	25	25
30	0.284		19.47	20.60	21.87		25	30	30
35	0.255		28.79	30.62	32.70		30	35	35
40	0.221		41.86	44.63	48.27		42	45	50
45	0.206		55.75	59.94	64.82		55	60	65
50	0.190		72.91	78.74	85.69		75	80	90
60	0.165	105.97	115.70	125.98	138.28	110	120	130	140
70	0.150	154.33	167.75	183.73	203.07	160	170	185	205
80	0.140	209.97	229.08	251.97	278.97	210	230	255	280
90	0.134	272.68	298.04	328.78	366.55	275	300	330	370
100	0.130	342.35	374.95	414.42	463.18	350	375	415	465
110	0.124	426.34	467.04	517.80	580.95	430	470	520	585
120	0.120	515.59	566.93	629.92	708.66	520	570	630	710

Nota: Se podrá utilizar un radio mínimo de 15m. siempre y cuando se trate de:
- Aprovechar infraestructuras existentes.
- Relieve difícil (escarpado).
- Caminos de bajo costo.

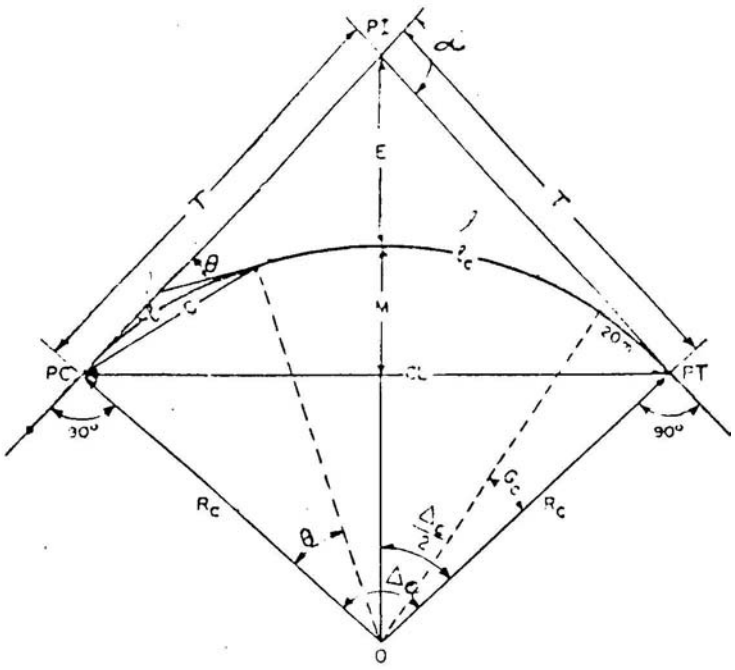


FIGURA V . 1 ELEMENTOS DE LA CURVA CIRCULAR SIMPLE

PI	Punto de intersección de la prolongación de las tangentes
PC	Punto en donde empieza la curva simple
PT	Punto en donde termina la curva simple
α	Angulo de deflexión de las tangentes
Δ_C	Angulo central de la curva circular
θ	Angulo de deflexión a un punto sobre la curva circular
G_C	Grado de curvatura de la curva circular
R_C	Radio de la curva circular
T	Tangente de la curva circular o subtangente
E	External
M	Ordenada media
C	Cuerda
CL	Cuerda larga
l	Longitud de un arco
l_e	Longitud de la curva circular

— Angulo central: Es el ángulo formado por la curva circular y se simboliza como "α" *(alfa)*. En curvas circulares simples es igual a la deflexión de las tangentes.

— Longitud de la curva: Es la longitud del arco entre el PC y el PT. Se lo representa como lc y su fórmula para el cálculo es la siguiente:

$$\frac{L_C}{2\pi R} = \frac{\alpha}{360} \quad \Rightarrow \quad l_C = \frac{\pi R \alpha}{180} \qquad \text{(V . 4)}$$

Independientemente de que a cada velocidad corresponde un radio mínimo, cuando el ángulo de deflexión es muy pequeño habrá que asumir valores de radio mayores tanto para satisfacer la longitud requerida para la transición del peralte, como para mejorar las condiciones estéticas del trazado.

- Tangente de curva o subtangente: Es la distancia entre el PI y el PC ó entre el PI y el PT de la curva, medida sobre la prolongación de las tangentes. Se representa con la letra "T" y su fórmula de cálculo es:

$$T = R * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \qquad \text{(V . 5)}$$

- External: Es la distancia mínima entre el PI y la curva. Se representa con la letra "E" y su fórmula es:

$$E = R\left(\sec\frac{\alpha}{2} - 1\right) \qquad \text{(V . 6)}$$

- Ordenada media: Es la longitud de la flecha en el punto medio de la curva. Se representa con la letra "M" y su fórmula de cálculo es:

$$M = R - R\cos\frac{\alpha}{2} \qquad (V\ .\ 7)$$

- Deflexión en un punto cualquiera de la curva: Es el ángulo entre la prolongación de la tangente en el PC y la tangente en el punto considerado. Se lo representa como θ y su fórmula es:

$$\theta = \frac{G_C * l}{20} \qquad (V\ .\ 8)$$

- Cuerda: Es la recta comprendida entre 2 puntos de la curva. Se la representa con la letra "C" y su fórmula es:

$$C = 2 * R * \text{sen}\frac{\theta}{2} \qquad (V\ .\ 9)$$

Si los dos puntos de la curva son el PC y el PT, a la cuerda resultante se la llama CUERDA LARGA. Se la representa con las letras "CL" y su fórmula es:

$$CL = 2 * R * \text{sen}\frac{\alpha}{2} \qquad (V\ .\ 10)$$

— Angulo de la cuerda: Es el ángulo comprendido entre la prolongación de la tangente de la vía y la curva. Su representación es "Ø" y su fórmula para el cálculo es:

$$\phi = \frac{\theta}{2} \qquad (V.11)$$

En función del grado de curvatura:

$$\phi = \frac{G_C * 1}{40} \qquad (V.12)$$

El ángulo para la cuerda larga se calcula con la siguiente fórmula:

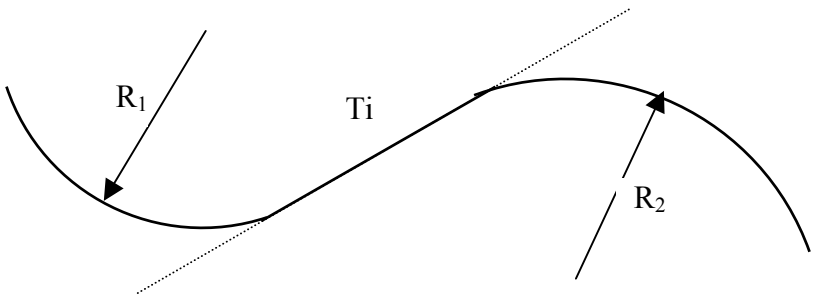
$$\phi = \frac{G * l_C}{40} \qquad (V.13)$$

C. CURVAS DE TRANSICION

Son las curvas que unen al tramo de tangente con la curva circular en forma gradual, tanto para el desarrollo del peralte como para el del sobreancho. La característica principal es que a lo largo de la curva de transición, se efectúa de manera continua, el cambio en el valor del radio de curvatura, desde infinito en la tangente hasta llegar al radio de la curva circular. Tanto la variación de la curvatura como la variación de la aceleración centrífuga son constantes a lo largo de la misma. Este cambio será función de la longitud de la espiral, siendo más repentino cuando su longitud sea más corta. Las curvas de transición empalman la alineación recta con la parte circular, aumentando la seguridad, al favorecer la maniobra de entrada en la curva y la permanencia de los vehículos en su propio carril.

La clotoide o espiral de Euler es la curva más apropiada para efectuar transiciones. Todas las clotoides tienen la misma forma, pero difieren en sí por su longitud.

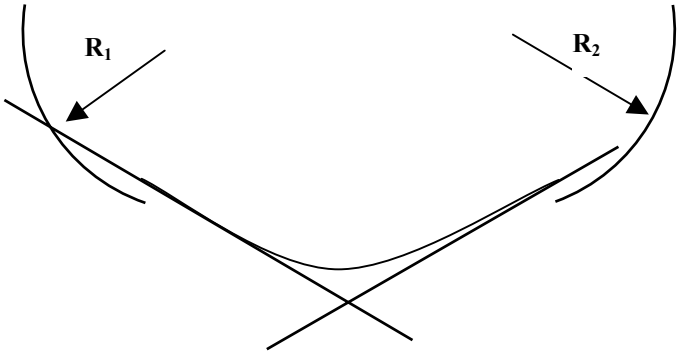
CURVA DE INFLEXION O CURVA REVERSA



Es una curva en “S” que une dos puntos de curvatura opuesta. En algunos casos puede permitirse que Ti = 0, o sea sin tangente intermedia

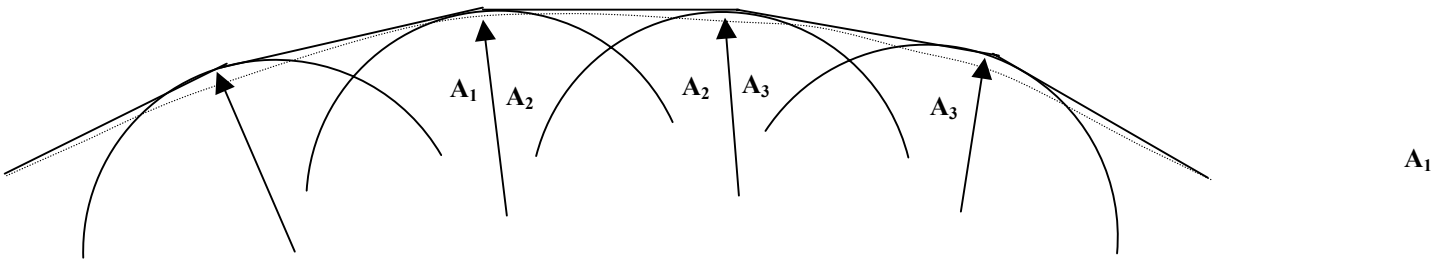
OVOIDE

Es la sucesión en la misma dirección de arcos de círculo – espiral – círculo. El arco intermedio de curva espiral, tiene en los dos puntos de contacto con los arcos circulares, tangentes comunes y radios iguales.



SERIE DE ESPIRALES, O SERIE DE CLOTOIDES

Es una sucesión de arcos con parámetros distintos, curvaturas dirigidas y crecientes en el mismo sentido, tangentes comunes y la misma curvatura para cada dos arcos sucesivos



Parámetro = $\sqrt{R * Le}$

1. Principales Ventajas Que Ofrecen las Curvas de Transición.

a. Las curvas de transición diseñadas adecuadamente ofrecen al conductor una trayectoria fácil de seguir, de manera que la fuerza centrífuga se incremente y decrezca gradualmente conforme el vehículo entra en la curva circular y sale de ella. La fuerza centrífuga pasa de un valor cero, en el comienzo de la curva espiral, al valor máximo al final de la misma en una forma gradual.

b. Como consecuencia de lo anterior, resulta fácil para un conductor mantenerse en su carril sin disminuir la velocidad.

e. La longitud de la curva de transición permite un adecuado desarrollo del peralte cumpliéndose aproximadamente la relación velocidad-radio para el vehículo circulante. Si no se intercala una curva de transición, el peralte debe iniciarse en la parte recta y en consecuencia el vehículo tiende a deslizarse hacia la parte interior de la curva, siendo necesaria una maniobra forzada para mantenerlo en su carril cuando el vehículo aún va en la parte recta.

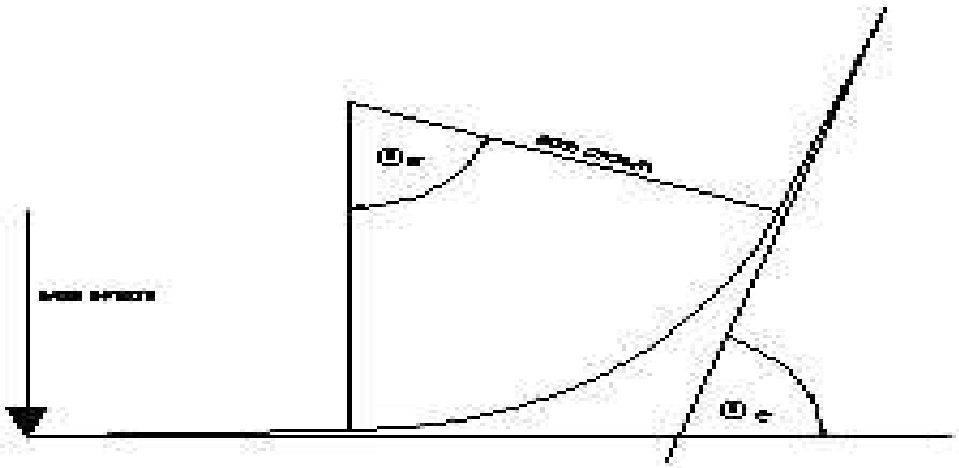
d. Cuando la sección transversal necesita ser ensanchada a lo largo de una curva circular, la curva de transición también facilita la transición del ancho.

e. El aspecto de la curva resulta agradable.

2. Posibilidades de aplicación de la curva espiral o clotoide

2.1. Curva de transición.-

Es un arco de curva espiral desde el radio **α = infinito** (en tangente), hasta el radio del arco circular siguiente:



A fin de obtener un trazado equilibrado, se recomienda que en lo posible la longitud del arco circular, se aproxime al valor de la longitud de la curva espiral.

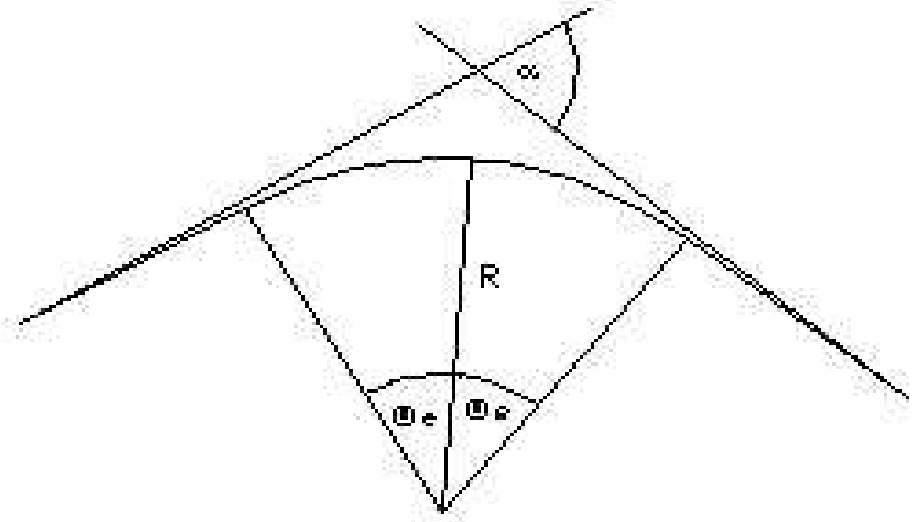
2.2. Clotoide de vértice o espiral de punta

Representa la transición entre dos rectas de distinta dirección. Se compone de dos arcos de espiral con un mismo radio de curvatura y tangente común en el punto de contacto. En este caso, el valor de $\theta_e = \alpha/_2$.

Se recomienda su utilización cuando el valor de la deflexión **α (Alfa)** se aproxima al doble del valor de θ_e. En este caso, la longitud del arco circular está en el orden de $\pm 10m$ y se puede calcular el radio en función de la longitud de la espiral y el valor de la deflexión **α (Alfa)**, aplicando la fórmula:

$$R = \frac{180 \times L_e}{\pi \times \alpha}$$

R en metros
L_e en metros
α en grados



Conocidos α, R

$$\text{Le} = \frac{\pi \times \text{R} \times \alpha}{180}$$

Conocidos α, R, L_{e1} (curva asimétrica)

$\Theta_{e2} = \alpha - \theta_{e1}$

$$L_{e2} = \frac{\pi \times R \times \theta_{e2}}{90}$$

3. Elementos Característicos Principales.

- Longitud de la espiral: Es la longitud medida sobre la curva entre el TE y el EC o del CE al ET. Su longitud mínima está expresada por la siguiente fórmula:

$$L_e = 0.072 \frac{V^3}{R\,C} \qquad (V\ .\ 14)$$

Donde:

Le	=	Longitud mínima de la espiral, m.
V	=	Velocidad de diseño, Km/h.
R	=	Radio de la curva circular, m.
C	=	Coeficiente de comodidad y seguridad. Varía entre 1 y 3. (1 para mayor seguridad y confort)

En todo caso el criterio más práctico para determinar la longitud de la espiral es el de asumir la distancia necesaria para el desarrollo del peralte, la cual podría lograrse en función de la siguiente fórmula:

$$L_e = \frac{a * e}{P} = a * e * m \qquad (V\ .\ 15)$$

Donde:

a = Semiancho de la calzada en tangente para caminos de dos carriles.
e = Peralte de la curva circular, en valor absoluto.

P = Pendiente longitudinal de la orilla de la calzada con respecto al eje del camino, en valor absoluto.
m = Talud de la orilla de la calzada respecto al eje del camino.

$$m = 1.5627 * V + 75 \qquad (V.16)$$

Empíricamente la ASSHTO establece, que para caminos de más de dos carriles, la longitud mínima de la espiral debe ser la siguiente:

- **Caminos de tres carriles**: 1, 2 veces la longitud calculada para un camino de dos carriles.
- **Camino de cuatro carriles**: 1, 5 veces la longitud calculada para un camino de dos carriles.
- **Camino de seis carriles**: 2, 0 veces la longitud calculada para un camino de dos carriles.

En el cuadro adjunto (V.l) se indican las longitudes de las espirales en función de la velocidad de diseño, del radio de la curva circular y del coeficiente C = 2.

Por razones prácticas, la longitud mínima aceptable de transición debe ser tal, que un vehículo que circule a la velocidad de diseño tarde cuando menos 2 segundos en recorrerla, para un camino de dos vías con ancho de carril de 3,65 m y peralte del 7%; *** la longitud mínima absoluta de transición será:**

$$Le = 0.56\ V \qquad (V.17)$$

Donde:

V = Velocidad de diseño Km/h.

La longitud así obtenida se recomienda para cualquier semiancho de calzada.

Deflexión de la espiral: Es el ángulo comprendido entre las tangentes a la espiral en sus puntos extremos. Su fórmula es:

$$\theta_e = \frac{L_e}{2R}, \quad \text{Radianes} \qquad (V\ .\ 18)$$

en grados:

CUADRO V.1

VALORES MINIMOS RECOMENDABLES DE LA LONGITUD DE LA ESPIRAL (Le = 0.036 V^3/R)														
Vd (Km/h)	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	110	120
Rmin, m.	18	20	25	30	42	56	75	110	160	210	275	350	430	520
Le min, m	30	30	40	52	55	59	60	70	80	90	95	100	110	120

$$\theta_e = \frac{G_C * L_e}{40} \quad o \quad \theta_e = \frac{L_e * 90}{\pi * R} \qquad (V\ .\ 19)$$

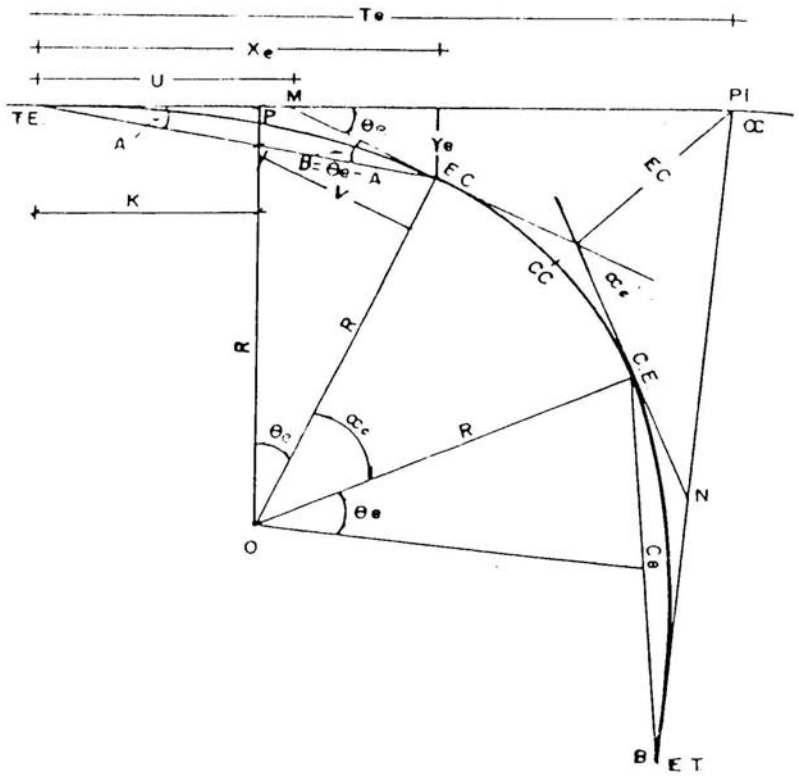
— Longitud total de la curva: Es la suma de las longitudes de las dos espirales de transición y de la longitud de la curva circular. Para curvas simétricas se tiene:

$$L_T = 2L_e + L_C \qquad (V\ .\ 20)$$

Por otro lado, existe un límite superior e inferior para la longitud de la curva.

El límite inferior absoluto está dado por la condición de qu*e* existan dos espirales de transición de longitud mínima absoluta, por lo que $L_1 = 2$ L = 1,12 V, sin que exista curva circular entre ellas.

El limite superior está dado por la longitud máxima de curva, que será aquella que se recorra en 20 segundos a la velocidad de diseño, por lo cual L_T = 5,56 V.



ELEMENTOS DE UNA CURVA CON ESPIRALES

Pi	=	Punto de intersección de las alineaciones.
TE	=	Punto de cambio de tangente a espiral.
EC	=	Punto de cambio del arco espiral a círculo.
CE	=	Punto de cambio del arco circular a espiral.
Le	=	Longitud del arco espiral.
L	=	Longitud desde el TE cualquier punto de la curva espiral.
θe	=	Angulo al centro de la espiralde longitud Le.
θ	=	Angulo al centro del arco de espiral de longitud L.
a	=	Angulo de desviación de la espiral en el TE, desde la tangente principal a un punto de la curva.
b	=	Angulo de desviación de la espiral en el EC, desde la tangente principal a un punto de la curva.
Re	=	Radio en cualquier punto de la espiral.
R	=	Radio de la curvatura del arco circular.
α	=	Angulo de deflexión de las tangentes principales.
αc	=	Angulo al centro del arco circular EC y CE.
X,Y	=	Coordenadas rectangulares de cualquier punto de la espiral, con origen en TE y eje de abscisas la tangente principal.
Xe,Ye	=	Coordenadas del EC.
Te	=	Longitud de la tangente principal = distancia entre Pi y ET y entre Pi y TE.
Ee	=	External del arco compuesto.
U	=	Tangente larga de la espiral.
V	=	Tangente corta de la espiral.
Ce	=	Cuerda larga de la espiral.
K	=	Abscisa del Pc desplazado medida desde TE.

Figura V-2

4. Cálculo de los Elementos la Curva Espiral.

La Ley de Curvatura de la clotoide es:

$$A = \sqrt{L_e \times R} \text{ = Parámetro de la Espiral}$$

O sea que para cada valor del parámetro A, el producto de L_e y el radio (R), se mantienen constantes en todos los puntos de la espiral o clotoide.

Todas las clotoides son semejantes entre sí, por lo que permiten aumentarse o disminuirse proporcionalmente.

$R_e = R \times L_e/L$; Radio en cualquier punto de la espiral

$\delta_e = \frac{L_e}{2R}$; Angulo al centro de la espiral, en radianes

$\theta_e = \frac{180 \times \delta_e}{\pi}$; Angulo al centro en grados, minutos y segundos

$$\theta_e = \frac{90 \times L_e}{\pi \times R}$$

$A_e = \frac{\theta_e}{3} - \theta_e \times 8.3 \times 10^{-7}$, Angulo de desviación de la tangente y la cuerda larga en TE

$B = \theta_e - A_e$; Angulo de desviación de la cuerda larga y tangente corta en CE

COORDENADAS DE EC

$$X_e = L_e(1 - \frac{\delta_e^2}{5 \times 2!} + \frac{\delta_e^4}{9 \times 4!} - \frac{\delta_e^6}{13 \times 6!} + \frac{\delta_e^8}{17 \times 8!}) = L_e(1 - \frac{\delta_e^2}{10} + \frac{\delta_e^4}{216} - \frac{\delta_e^6}{9360} + \frac{\delta_e^8}{685440})$$

$$Y_e = L_e(\frac{\delta_e}{3} - \frac{\delta_e^3}{7 \times 3!} + \frac{\delta_e^5}{11 \times 5!} - \frac{\delta_e^7}{15 \times 7!}) = L_e(\frac{\delta_e}{3} - \frac{\delta_e^3}{42} + \frac{\delta_e^5}{1320} - \frac{\delta_e^7}{75600})$$

$T_c = \frac{Y_e}{Sen\theta_e}$ (en gráfico V-2, “v”)

$T_L = X_e - \frac{Y_e}{Tan\theta_e}$ (en gráfico V-2, "u")

COORDENADAS DE PC

$P = Y_e - R(1 - Cos\theta_e)$; (Retranqueo)

$K = X_e - R \times Sen\theta_e$; (Abscisa del PC desplazado, medido desde TE)

CALCULO DE TANGENTES PRINCIPALES O SUBTANGETES: TE – PI; PI – ET; LONGITUD DEL ARCO CIRCULAR

1. **CASO 1.- CURVAS SIMÉTRICAS:**

Datos:

- α
- R
- Le
- Abscisas de TE ó PI

$$\mathbf{Te = (R + P) * Tg\frac{\alpha}{2} + K}$$

$$\alpha_c = \alpha - 2 * \theta e$$

$$L_c = \pi \times R \times \frac{\alpha_c}{180}$$

Longitud Total $L_T = L_c + 2L_e$

o también

$$\mathbf{L_T = \pi \times R \times \frac{\alpha}{180} + L_e}$$

Progresivas:

TE = PI - T_e (Excepto para curvas de retorno)
EC = TE + L_e
CE = EC + L_c
ET = CE + L_e
ET = TE + LT

2. CASO 2.- CURVAS ASIMETRICAS

Datos:

- α
- R
- L_{e1}
- L_{e2}
- Abscisas de TE ó PI

$$D = \frac{P_2 - P_1}{Sen\alpha}$$

$T_{e1} = Tan(\alpha/2)(R + P_1) + K_1 + D$

$T_{e2} = Tan(\alpha/2)(R + P_2) + K_2 - D$

$$\alpha_c = \alpha - \theta_{e1} - \theta_{e2} \quad = \alpha - (\theta_{e1} + \theta_{e2})$$

$$L_c = \frac{\pi \times R \times \alpha_c}{180}$$

$L_T = L_{e1} + L_c + L_{e2}$

Progresivas:

TE = PI - T_{e1}
EC = TE + L_{e1}
CE = EC + L_c
ET = CE + L_{e2}
ET = TE + L_T

D. PERALTE

Cuando un vehículo recorre una trayectoria circular es empujado hacia afuera por efecto de la fuerza centrífuga "F". Esta fuerza es contrarrestada por las fuerzas componentes del peso (P) del vehículo, debido al peralte, y por la fuerza de fricción desarrollada entre llantas y la calzada.