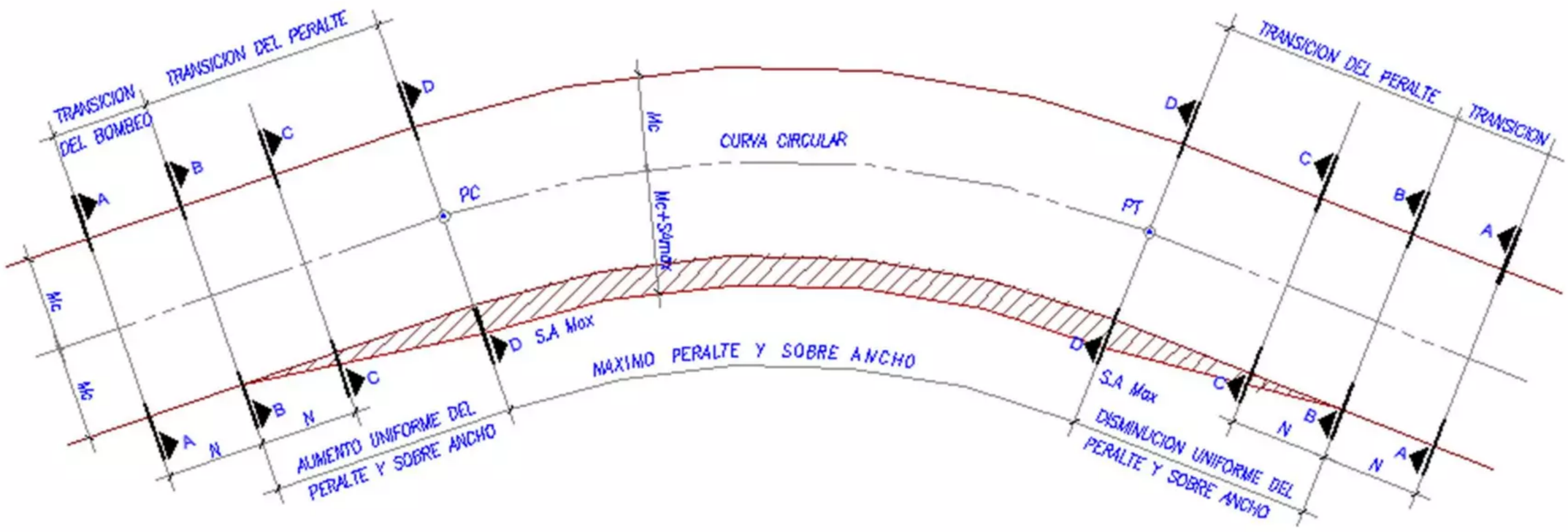
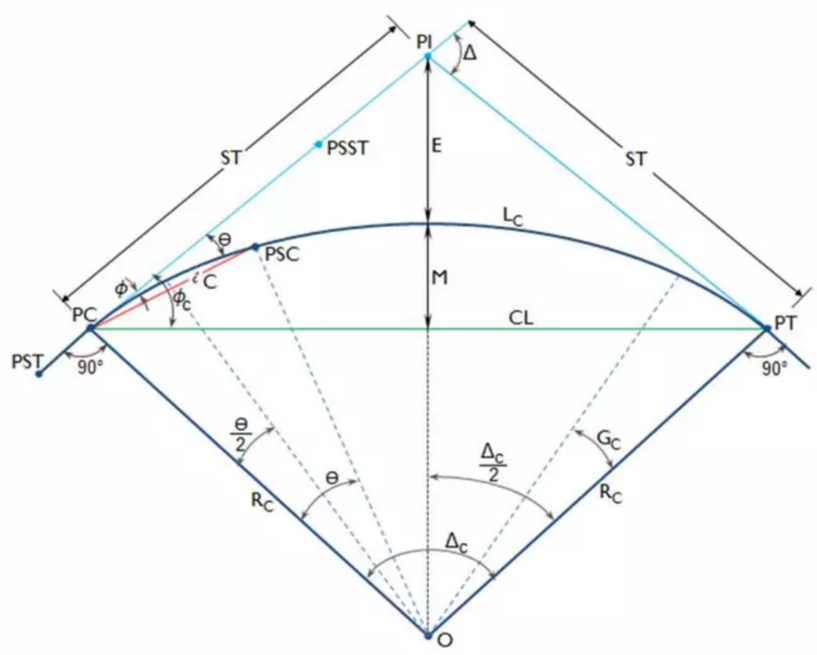
Universidad Nacional de Ingeniería
Recinto Universitario Augusto C. Sandino

Diseño y Cálculo Geométrico de Viales - Alineamiento Horizontal





Ing. Sergio Navarro Hudiel
Octubre 2011

ESTELÍ - NICARAGUA

Índice

Contenido Pág.

Generalidades 2
Curvas circulares Simples (CCS) 15
Elementos de las curvas circulares simples 17
Radios Mínimos y sus correspondientes Grados Máximos de Curva 24
Ejemplo de determinación de grado de curvatura. 25
Ejemplo calculo elementos de curva 26
Propuesto 27
Curvas Circulares Compuestas (CCC) 28
Ampliación o sobreancho 34
Ejemplo de sobreancho, radío mínimo peralte máx y de diseño 36
Elementos de Diseño para Curvas Horizontales y Velocidades de Diseño, e máx. 6% 38
Elementos de Diseño para Curvas Horizontales y Velocidades de Diseño, e máx. 8% 39
Elementos de Diseño para Curvas Horizontales y Velocidades de Diseño, e máx. 10% 40
Los sobreanchos recomendados en sección 4-51 por Normas Centroamericanas son: 43
Curvas de transición 49
Ventajas de uso de las Curvas Transición 51
Sobreelevación o peralte 52
Longitud de transición del peralte 56
Métodos de Desarrollo de peralte 57
Espiral de transición 68
Los valores recomendados por las normas centroamericanas son: 73
Elementos básicos de la espiral de transición. 77
Replanteo de Curva con espirales 81
Elementos básicos 82
Ecuaciones de Cálculo (Longitud de transición es en la espiral LT = Le) 83
Tips Recomendados para el trazado final 87
Ejemplo: 88
Ejemplo: 98
Bibliografía 110

Generalidades

El diseño geométrico de carreteras es el proceso de correlación entre sus elementos físicos y las características de operación de los vehículos, mediante el uso de las matemáticas, la física y la geometría. En ese sentido, la carretera queda geométricamente definida por el trazado de su eje en planta y en perfil y por el trazado de su sección transversal. Dichos elementos físicos básicamente comprenden las visibilidades, anchuras, pendientes, taludes, secciones transversales.

El alineamiento horizontal está constituido por una serie de líneas rectas, definidas por la línea preliminar, enlazados por curvas circulares o curvas de grado de curvatura variable de modo que permitan una transición suave y segura al pasar de tramos rectos a tramos curvos o viceversa. Los tramos rectos que permanecen luego de emplear las curvas de enlacen se denominan también tramos en tangente y pueden llegar a ser nulos, es decir, que una curva de enlace quede completamente unida a la siguiente. (OSPINA, 2002)

Al cambiar la dirección de un alineamiento horizontal se hace necesario, colocar curvas, con lo cual se modifica el rumbo de la vía y se acerca o se aleja este del rumbo general que se requiere para unir el punto inicial con el final. Este cambio de dirección es necesario realizarse por los siguientes factores:

- Topográfico: Con el fin de acomodar el alineamiento a la topografía y evitar cortes o llenos excesivos, minimizando costos y evitando inestabilidades en los cortes o en los llenos.

- Construcciones existentes y futuras: Para lograr salvar obstáculos derivados de la utilización que tienen los terrenos por donde pasa la vía.

- Hidráulico: Permitiendo cruzar una corriente de agua mediante una estructura (puente) de modo que quede construida en un buen sitio o ponteadero. Se llama ponteadero al lugar en el cual, tenidas en cuenta todas las variables hidráulicas, de cimentaciones, de diseño estructural, de los alineamientos de la vía, etc., resulta más económico y estable desde todo punto de vista la
- construcción del puente en referencia.

- Vial: Con la finalidad de hacer menos conflictivo para los usuarios el cruce con cualquier otra vía terrestre (carretera, ferrocarril, etc.) que atraviese la ruta que se está diseñando, sea a nivel o a desnivel.

- Técnico: Cuando se quiere evadir un área con problemas de tipo geológico o geotécnico, y cuya solución podría ser demasiado costosa o compleja.

El alineamiento horizontal es una proyección sobre un plano horizontal en el cual la vía está representada por su eje y por los bordes izquierdo y derecho. El eje es la línea imaginaria que

va por el centro de ella y que se dibuja con la convención general de los ejes. Los bordes izquierdo y derecho son las líneas que demarcan exteriormente la zona utilizable por los vehículos. Al hacer el trazado, generalmente se trabaja sobre el eje, ya que determinando un punto de este la ubicación de los bordes es obvia y sencilla, pues basta con medir sobre la normal al eje en ese punto el ancho de la vía a cada lado de este. (OSPINA, 2002)

Para enlazar dos rectas finitas con distinta dirección se pueden trazar un gran número de arcos circulares cuyo radio varía desde cero metros hasta un valor tal que dicho arco elimine el tramo en tangente correspondiente a la recta más corta. El valor del radio, escogido por el diseñador de la vía, depende de las condiciones topográficas del sitio y de las limitaciones que imponen las leyes de la mecánica del movimiento de los vehículos en una curva, para una determinada velocidad de diseño. (OSPINA, 2002)

Además de las condiciones topográficas y la velocidad de diseño, el radio de una curva está también condicionado por las tangentes disponibles ya que al aumentar el radio de una curva aumentan también sus tangentes.

Las tangentes son una serie de tramos rectos enlazados entre sí por curvas. La longitud máxima de una tangente está condicionada por la seguridad tangentes largas son causa potencial de accidentes, debido a la somnolencia que produce al conductor. 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 tangentes entre dos curvas consecutivas está definida por la longitud necesaria para dar la sobreelevación y ampliación en esas curvas se considera que esta longitud mínima es de 500 metros.

Las normas de servicios técnicos de la SCT (Secretaria de Comunicaciones y Transportes, México), en sección de proyecto geométrico de carreteras, indica las siguientes normas de cálculo para las curvas horizontales:

Las tangentes horizontales estarán definidas por su longitud y su azimut. (Sayago)

a.- Longitud mínima

1. Entre dos curvas circulares inversas con transición mixta deberá ser igual a la semisuma de las longitudes de dichas transiciones
2. Entre dos curvas circulares inversas con espirales de transición, podrá ser igual a cero
3. Entre dos curvas circulares inversas cuando una de ellas tiene espiral de transición y la otra tiene transición mixta, deberá ser igual a la mitad de la longitud de la transición mixta.
4. Entre dos curvas circulares del mismo sentido, la longitud mínima de tangente no tiene valor especificado.

b.- Longitud máxima.- la longitud máxima de tangentes no tiene limite especificado. Pero Burbano Recomienda que máxima de tangente (m) = 15 veces velocidad específica menor(km/h). Es preferible usar curvas de grandes radios (5000-10000) antes que

alineamientos rectos de más de 1.5 km a fin de mantener la atención del conductor. (BURBANO, 2011)

Otros valores recomendados son: (Perú)

$L_{min.s}$ = 1,39 V_d
$L_{min.o}$ = 2,78 V_d
$L_{máx}$ = 16,70 V_d

Siendo:

$L_{min.s}$ = Longitud mínima (m) para trazados en "S" (alineación recta entre alineaciones curvas con radios de curvatura de sentido contrario).
$L_{min.o}$ = Longitud mínima (m) para el resto de casos (alineación recta entre alineaciones curvas con radios de curvatura del mismo sentido).
$L_{máx}$ = Longitud máxima (m).
V_d = Velocidad de diseño (Km/h)

c.- Azimut.- el azimut definirá la dirección de las tangentes.

Otro criterio importante a tener en cuenta en el momento de definir el radio de una curva es el de la uniformidad ya que lo ideal es que el valor asumido no difiera demasiado de los ya especificados evitando cambios bruscos en la velocidades. Cuando se cambia de tipo de terreno esto obliga normalmente a un cambio en la velocidad de diseño y si el cambio es mayor de 20 Km/h es necesario especificar un tramo de transición que permita a los conductores adaptarse de manera segura al cambio de curvatura. (OSPINA, 2002)

Clasificación Funcional de las Carreteras Regionales, Volúmenes de Tránsito, Número de Carriles y Tipo de Superficie de Rodamiento

TPDA	>20,000		20,000-10,000		10,000-3,000		3,000-500	
Clasificación funcional	**No. C**	**Superf.**	**No.C**	**Superf.**	**No.C**	**Superf.**	**No.C**	**Superf.**
AR- Autopistas Regionales	6-8	Pav.	4-6	Pav.				
TS- Troncales Suburbanas	4	Pav.	2-4	Pav.	2	Pav.		
TR- Troncales Rurales	4	Pav.	2-4	Pav.	2	Pav.		
CS- Colectoras Suburbanas			2-4	Pav.	2	Pav.	2	Pav.
CR- Colectoras Rurales					2	Pav.	2	Pav.

No.C : Número de carriles; **Superf. :** Superficie de rodamiento; **Pav :** Pavimento asfáltico o de cemento Portland.

Un parámetro importante es seleccionar la velocidad de diseño, para ello las normas de diseño geométrico, SIECA en su versión 2004, sección 4-3, estipula:

VELOCIDADES DE DISEÑO EN KILÓMETROS POR HORA, EN FUNCIÓN DE LOS VOLÚMENES DE TRÁNSITO Y LA TOPOGRAFÍA DEL TERRENO

Tipo de Terreno	Volúmenes de tránsito Diario ó TPDA, en vpd			
	>20,000	20,000-10,000	10,000-3,000	3000-500
Plano	110	90	80	70
Ondulado	90	80	70	60
Montañoso	70	70	60	50

La pendiente influye sobre el costo del transporte, porque al aumentar ella se incrementa el tiempo de recorrido del vehículo y esto genera un mayor consumo de combustible, aceite y otros. Por otro lado disminuye la capacidad de la vía, esto cobra importancia cuando hay un alto porcentaje de camiones. Al tratar de disminuir las pendientes generalmente aumentan los volúmenes de excavación con un consecuente aumento en los costos. Para hacer una elección óptima de la pendiente a utilizar, hay que hacer un balance entre costos de construcción y explotación

Las normas Centroamericanas, en sección 4-63, establecen los siguientes criterios para clasificar el tipo de terreno en función de la pendiente.

Cuadro 4.17 Clasificación de los Terrenos en función de las Pendientes Naturales

Tipo de Terreno	Rangos de Pendientes (%)
Llano o plano	$G \leq 5$
Ondulado	$5 > G \leq 15$
Montañoso	$15 > G \geq 30$

G= Pendiente

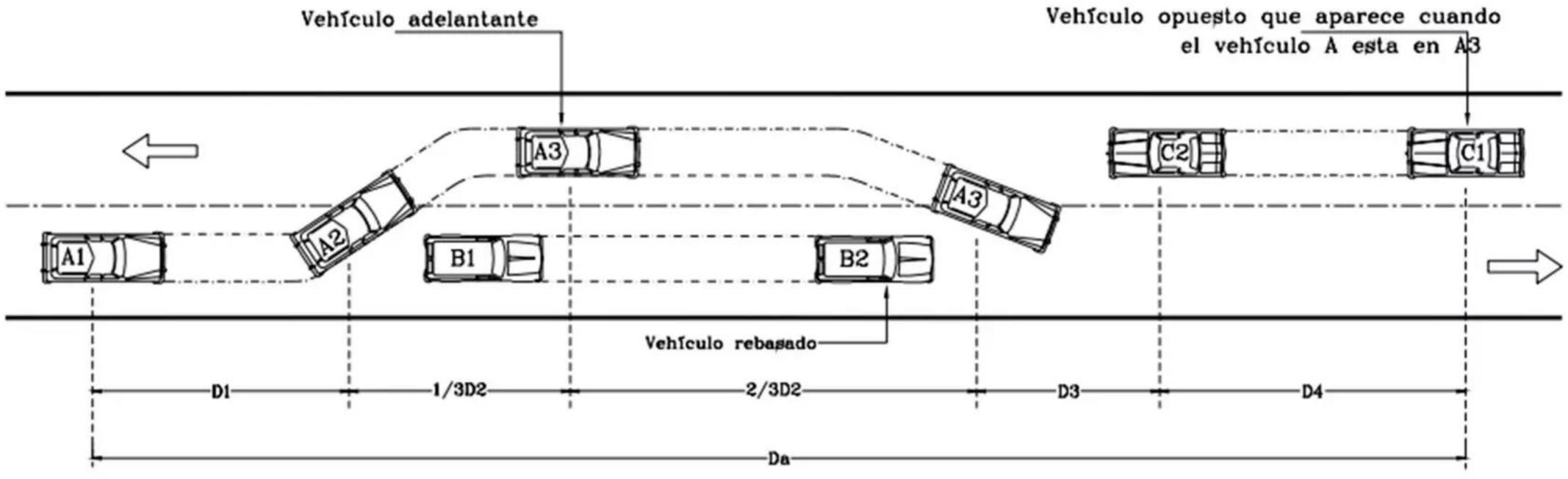
Clasificación Funcional	Tipo de Terreno	Velocidad de Diseño (Km/h) y Pendiente Máxima (%)						Pendiente Mínima (%)
		32	48	64	80	96	112	
AR Autopistas Regionales	Plano	-	-	-	4	3	3	0.5 con predominio del drenaje
	Ondulado	-	-	-	5	4	4	
	Montañoso	-	-	-	6	6	5	
TS Troncales Suburbanas	Plano	-	8	7	6	5	-	0.5 con predominio del drenaje
	Ondulado	-	9	8	7	6	-	
	Montañoso	-	11	10	9	8	-	
TR Troncales Rurales	Plano	-	-	5	4	3	3	0.5 con predominio del drenaje
	Ondulado	-	-	6	5	4	4	
	Montañoso	-	-	8	7	6	5	
CS Colectoras Suburbanas	Plano	9	9	9	7	6	5	0.3 – 0.5
	Ondulado	12	11	10	8	7	6	
	Montañoso	14	12	12	10	9	7	
CR Colectoras Rurales	Plano	-	7	7	6	5	-	0.5
	Ondulado	11	10	9	8	6	-	
	Montañoso	16	14	12	10	-	-	

Fuente: ITE, *Geometric Design and Operational Considerations for Trucks*,1992.

Según este manual, en las etapas iniciales del diseño de las carreteras, siempre es conveniente dar la debida consideración al uso de componentes de dimensiones normales o mejoradas en la sección transversal, por estar comprobado que con un bajo costo relativo, reducen sustancialmente los riesgos de accidentes o, inversamente, contribuyen al mejoramiento de los niveles de seguridad vial. Cualesquiera que sean estos elementos de la sección transversal, deben mantenerse a lo largo de todo el proceso de diseño de una carretera o de un segmento dado de dicha carretera.

Existe La distancia de visibilidad de adelantamiento. La cual se define como la mínima distancia de visibilidad requerida por el conductor de un vehículo para adelantar a otro vehículo que, a menor velocidad relativa, circula en su mismo carril y dirección, en condiciones cómodas y seguras, invadiendo para ello el carril contrario pero sin afectar la velocidad del otro vehículo que se le acerca, el cual es visto por el conductor inmediatamente después de iniciar la maniobra de adelantamiento.

Este proceso gráfico puede apreciarse en la siguiente figura tomada de (OSPINA, 2002), página 371, figura 85.



El conductor puede retornar a su carril si percibe, por la proximidad del vehículo opuesto, que no alcanza a realizar la maniobra completa de adelantamiento. El manual centroamericano de Normas de Diseño Geométrico en su sección 4-30 estipula los siguientes valores:

Cuadro 4.7

DISTANCIAS DE VISIBILIDAD DE ADELANTAMIENTO

A. Distancias Mínimas de Diseño para Carreteras Rurales de dos Carriles, en metros

Velocidad de Diseño	Velocidades Km/h		Distancia mínima de adelantamiento (m)
	Vehículo que es rebasado	Vehículo que rebasa	
30	29	44	220
40	36	51	285
50	44	59	345
60	51	66	410
70	59	74	480
80	65	80	540
90	73	88	605
100	79	94	670
110	85	100	730

Fuente: A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 1994, p. 134

El manual de Normas en su resumen ejectivo, indica los siguientes valores típicos para los elementos de diseño en las carreteras regional:

No.	DESCRIPCION	AUTOPISTAS REGIONALES	TRONCALES		COLECTORAS	
			Suburbanas	Rurales	Suburbanas	Rurales
1	TPDA, vehículos promedio diario	>20,000	20,000-10,000	10,000-3,000	3,000-500	3,000-500
2	VHD, vehículos por hora	>2,000	2,000-1,000	1,500-450	300-50	450-75
3	Factor de Hora Pico, FHP	0.92	0.92	0.95-0.91	0.92	0.85
4	Vehículo de Diseño	WB-20	WB-20	WB-20	WB-15	WB15
5	Tipo de Terreno	P O M	P O M	P O M	P O M	P O M
6	Velocidad de Diseño o Directriz, km/hora	110 90 70	90 80 70	80 70 60	70 60 50	70 60 50
7	Número de Carriles	4 a 8	2 a 4	2 a 4	2	2
8	Ancho de Carril, metros	3.6	3.6	3.6	3.3-3.6	3.3
9	Ancho de Hombros/Espaldones, metros	Int: 1.0 - 1.5 Ext:1.8 - 2.5	Int: 1.0 - 1-5 Ext. 1.8 - 2.5	Int: 0.5 - 1.0 Ext: 1.2 - 1.8	Ext: 1.2 - 1.5	Ext: 1.2 - 1.5
10	Tipo de Superficie de Rodamiento	Pav.	Pav.	Pav.	Pav.	Pav.-Grava
11	Dist.de Visibilidad de Parada, metros	110-245	110-170	85-140	65-110	65-110
12	Dist. de Visib. Adelantamiento, metros	480-670	480-600	410-540	350-480	350-480
13	Radio Mín. de Curva, Peralte 6%, metros	195-560	195-335	135-250	90-195	90-195
14	Maximo Grado de Curva	5°53´ - 2°03´	5°53´ - 3°25´	8°29´ - 4°35´	12°44´-5°53´	12°44´-5°53´
15	Pendiente Longitudinal Max, porcentaje	6	8	8	10	10
16	Sobreelevación, porcentaje	10	10	10	10	10
17	Pendiente Transversal de Calzada, %	1.5 - 3	1.5-3	1.5-3	1.5-3	1.5-3
18	Pendiente de Hombros, porcentaje	2-5	2-5	2-5	2-5	2-5
19	Ancho de Puentes entre bordillos, metros	Variable	Variable	Variable	7.8-8.7	7.8-8.1
20	Carga de Diseño de Puentes (AASHTO)	HS 20-44+25%	HS20-44+25%	HS20-44+25%	HS20-44	HS20-44
21	Ancho de Derecho de vía, metros	80-90	40-50	40-50	20-30	20-30
22	Ancho de Mediana, metros	4-12	4-10	2-6	-	-
23	Nivel de Servicio, según el HCM	B-C	C-D	C-D	C-D	C-D
24	Tipo de Control de Acceso	Control Total	Control Parcial	Sin Control	Sin Control	Sin Control
25	CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	AR-TS	AR-TS-TR	TR-CR	TS-CS	TR-CR

Notas: Pav: Pavimento asfáltico o de cemento Portland

P: Plano O: Ondulado M: Montañoso

AR:Autopista Regional, TS: Troncal Suburbana, TR: Troncal Rural, CS: Colectora Suburbana, CR: Colectora Rural

Partiendo de la clasificación regional en función del tipo de pavimento y volumen de tráfico,

Cuadro 3.1

Clasificación Funcional de las Carreteras Regionales, Volúmenes de Tránsito, Número de Carriles y Tipo de Superficie de Rodamiento

TPDA	>20,000		20,000-10,000		10,000-3,000		3,000-500	
Clasificación funcional	No. C	Superf.	No.C	Superf.	No.C	Superf.	No.C	Superf.
AR- Autopistas Regionales	6-8	Pav.	4-6	Pav.				
TS- Troncales Suburbanas	4	Pav.	2-4	Pav.	2	Pav.		
TR- Troncales Rurales	4	Pav.	2-4	Pav.	2	Pav.		
CS- Colectoras Suburbanas			2-4	Pav.	2	Pav.	2	Pav.
CR- Colectoras Rurales					2	Pav.	2	Pav.

No.C : Número de carriles; **Superf. :** Superficie de rodamiento; **Pav :** Pavimento asfáltico o de cemento Portland.

Estableciendo en su sección 2-17 el nivel de servicio para usar con fines de diseño:

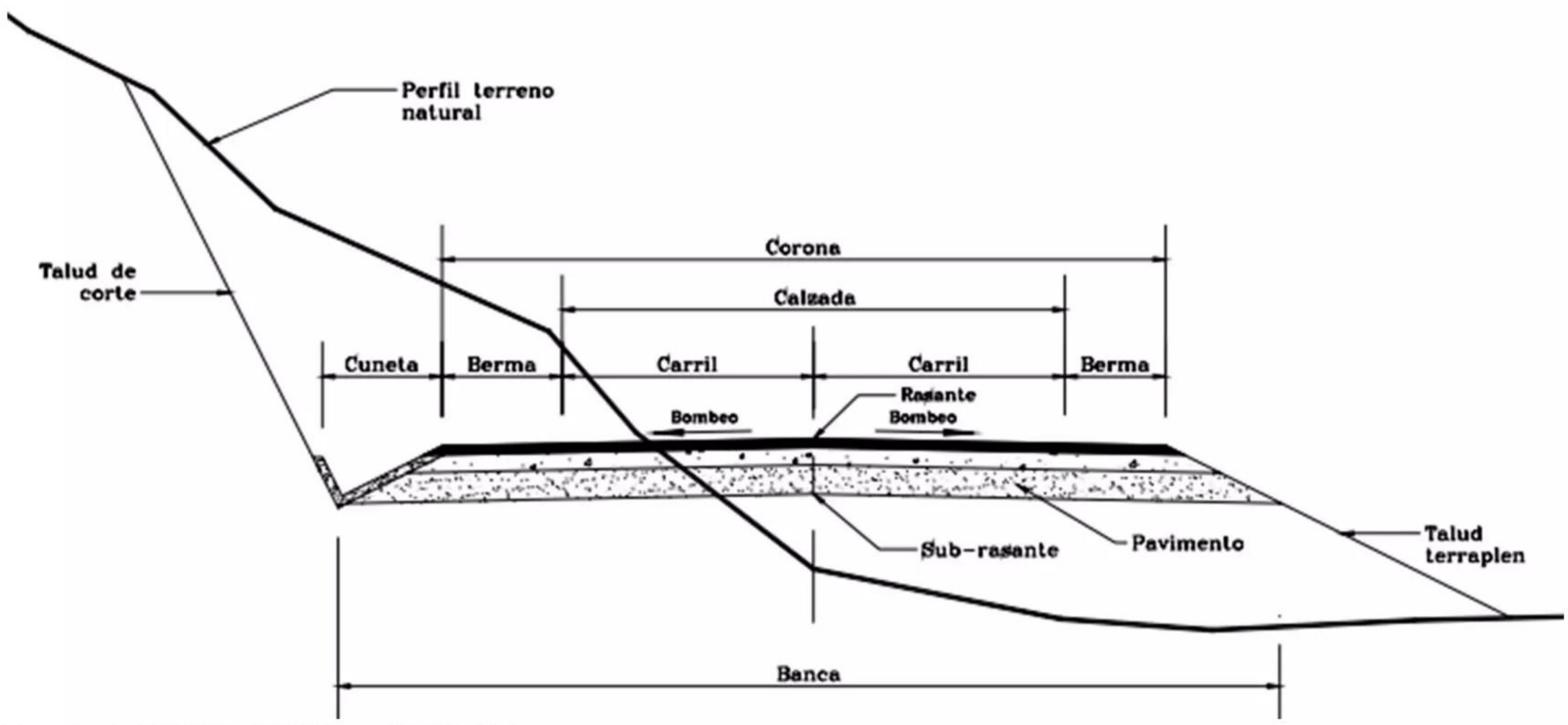
Cuadro 2.4 Guía para seleccionar el Nivel de Servicio para Diseño

Tipo de carretera	Tipo de Area y Nivel de Servicio Apropiado			
	Rural Plano	Rural Ondulado	Rural Montañoso	Urbano Suburbano
Autopista Especial	B	B	C	C
Troncales	B	B	C	C
Colectoras	C	C	D	D
Locales	D	D	D	D

Fuente: AASHTO, A Policy on Geometric Design of Rural Highways and Streets, 1994, p. 90

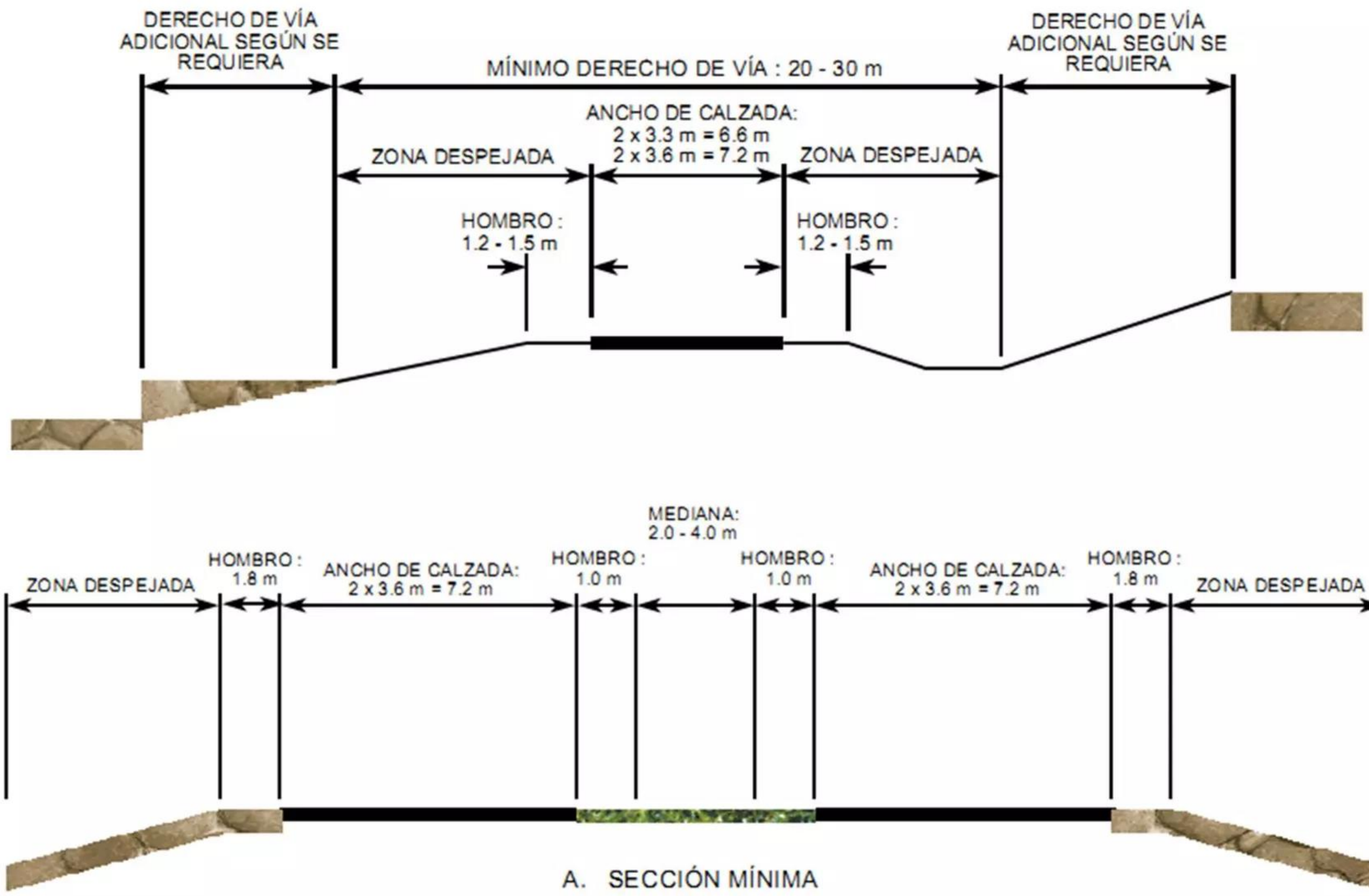
El vehículo de diseño con su relación peso/potencia, define características de operación que determinan la velocidad con que es capaz de recorrer una pendiente dada. El vehículo de diseño WB-19, que es el T3-S2 que conocemos.

Las secciones transversal también se diseñan en función de las condiciones de tráfico, de manera general la sección típica es:

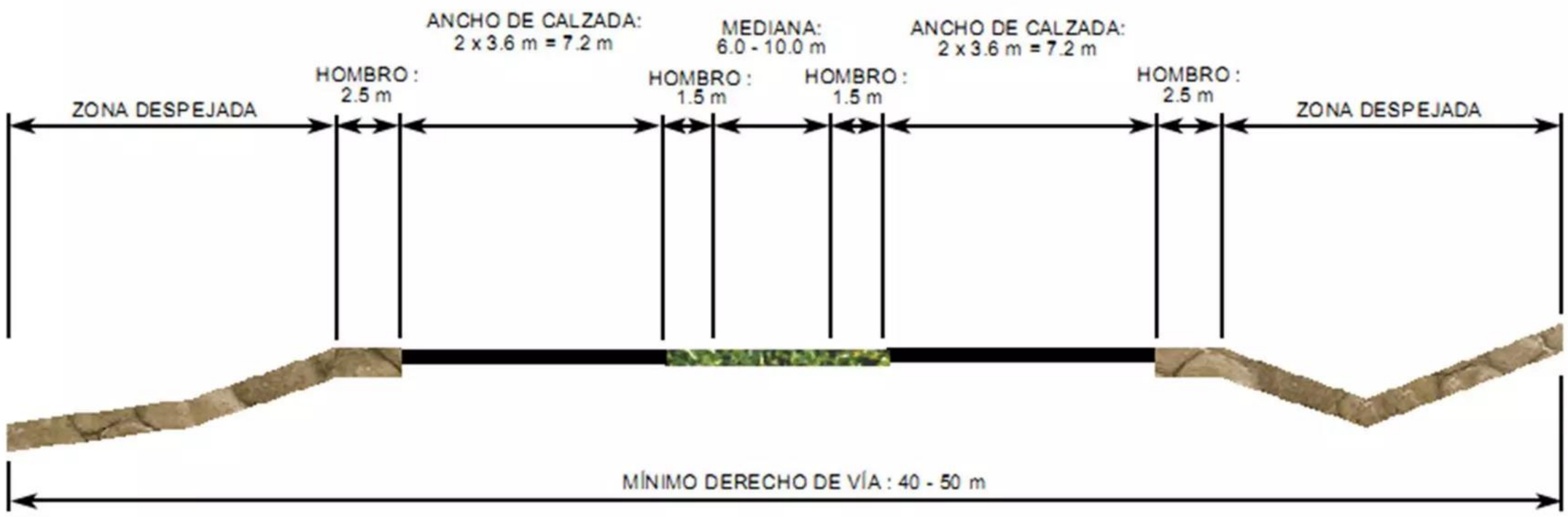


Tomado de (OSPINA, 2002) figura 55. Pág 261.

Las Normas en su sección de resumen ejecutivos páginas 14 y 15, muestran las secciones típicas de una colectora, así como la mínima y deseable de una troncal

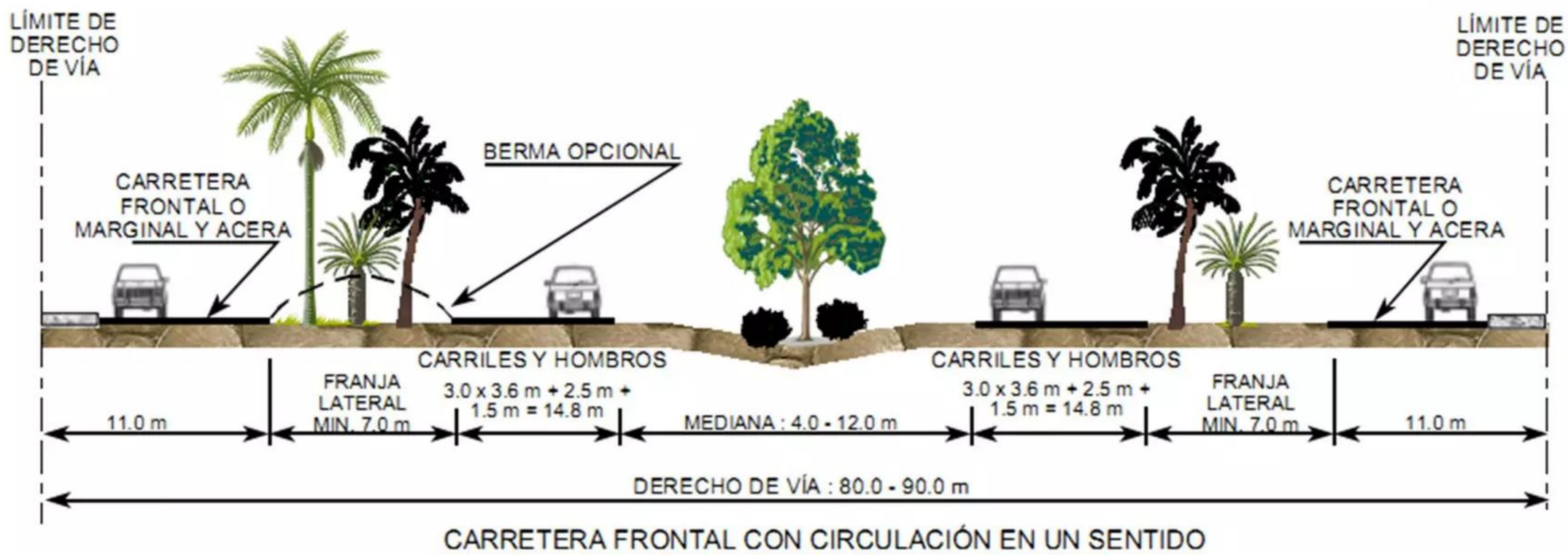


A. SECCIÓN MÍNIMA



B. SECCIÓN RECOMENDABLE

Para apreciar mejor los elementos de la sección podemos ver el siguiente gráfico tomado de SIECA:



CARRETERA FRONTAL CON CIRCULACIÓN EN UN SENTIDO

Los anchos mínimos de hombros, tomados de sección 4-9 y 4-15 de (SIECA, 2004)

Cuadro 4.3

ANCHOS MÍNIMOS DE HOMBROS Y ACERAS

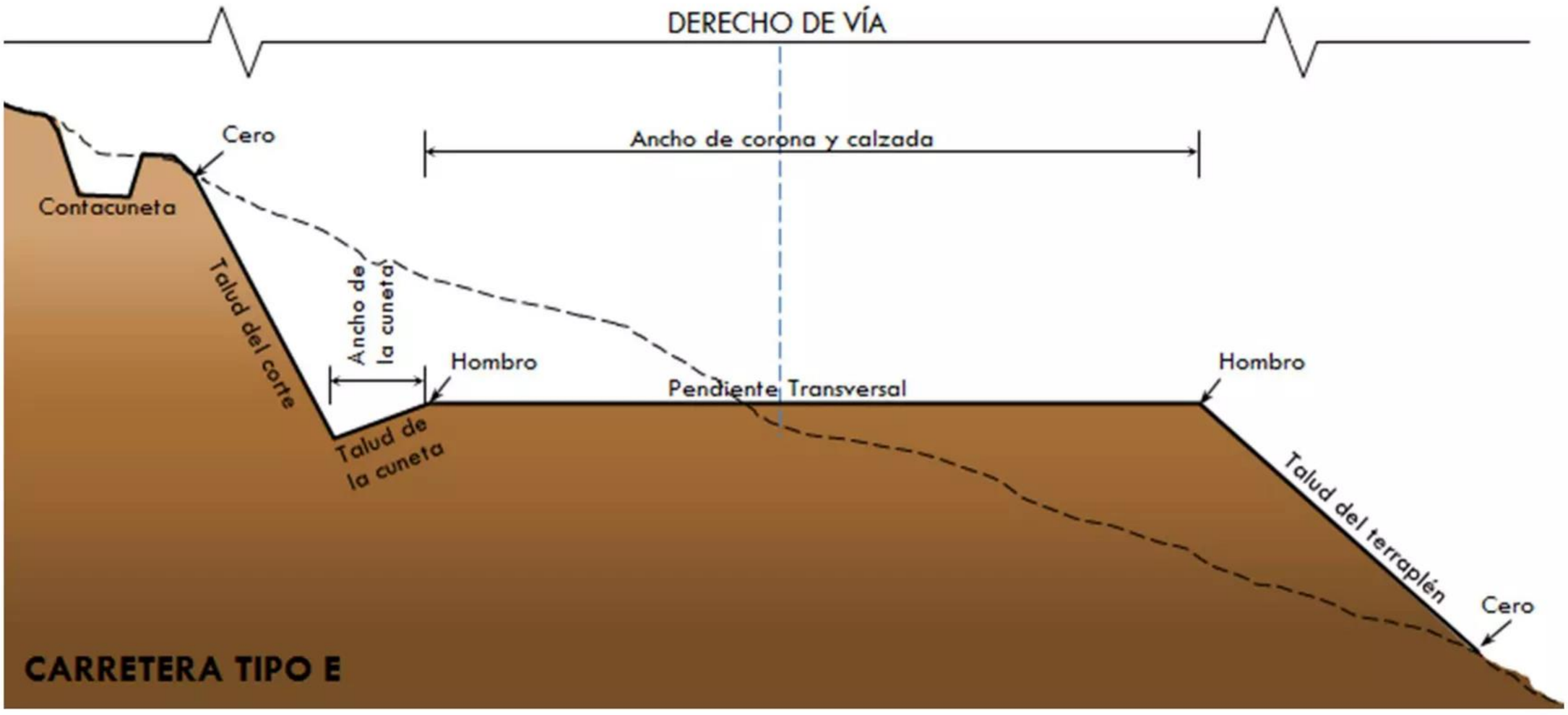
Tipo de Carretera		Acceso	Tipo de Superficie	Ancho de Hombros (m)		Ancho de Aceras (m)
				Internos	Externos	
AR	Autopistas Regionales	Controlado	Alto	1.0 - 1.5	1.8 – 2.5	
TS	Troncales Suburbanas	Controlado	Alto	1.0 -1.5	1.8 - 2.5	1.2 – 2.0
TR	Troncales Rurales	-	Alto	0.5 – 1.0*	1.2 - 1.8	1.2 – 1.5
CS	Colectoras Suburbanas	-	Intermedio	0.5*	1.2 - 1.5	1.0 – 1.2
CR	Colectoras Rurales	-	Intermedio	-	1.2 – 1.5	1.0 – 1.2

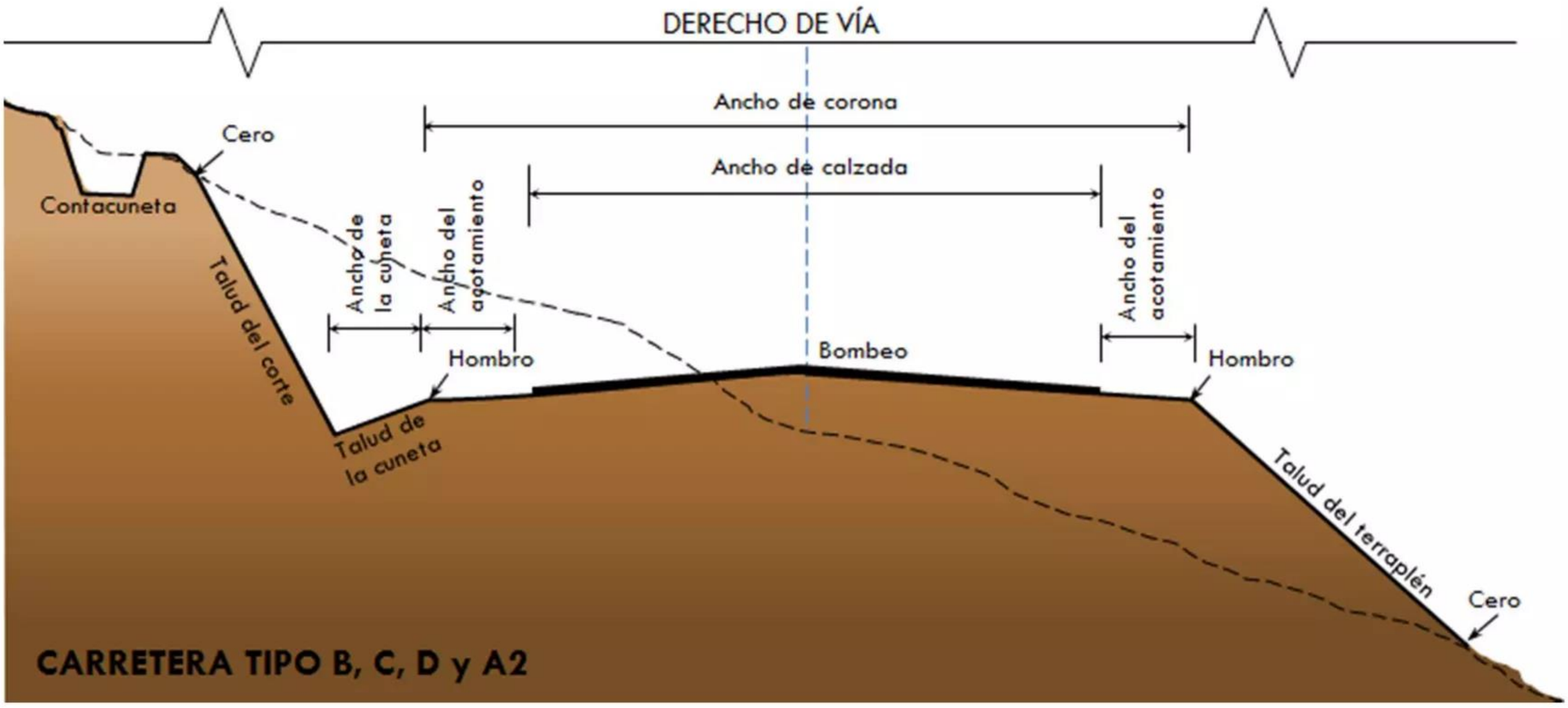
* Solamente con mediana

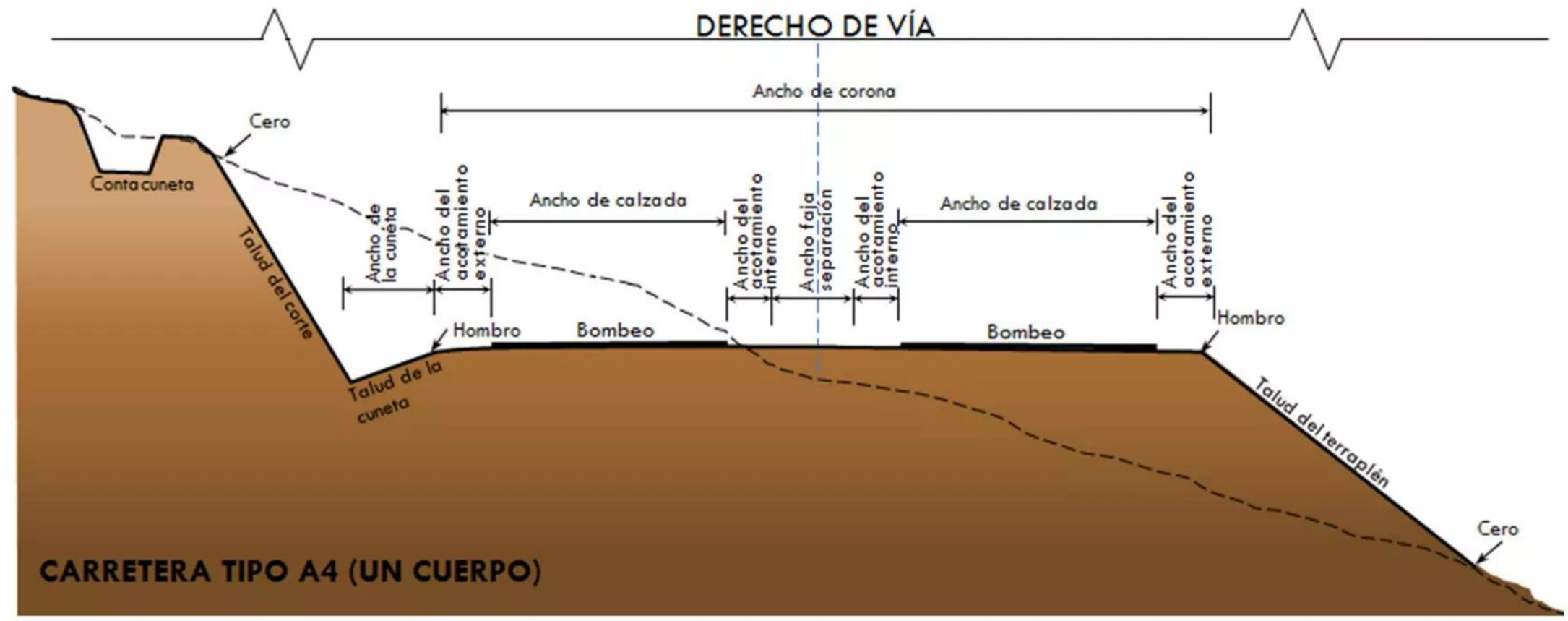
ANCHOS DE MEDIANAS RECOMENDABLES PARA LAS CARRETERAS DE LA RED VIAL REGIONAL

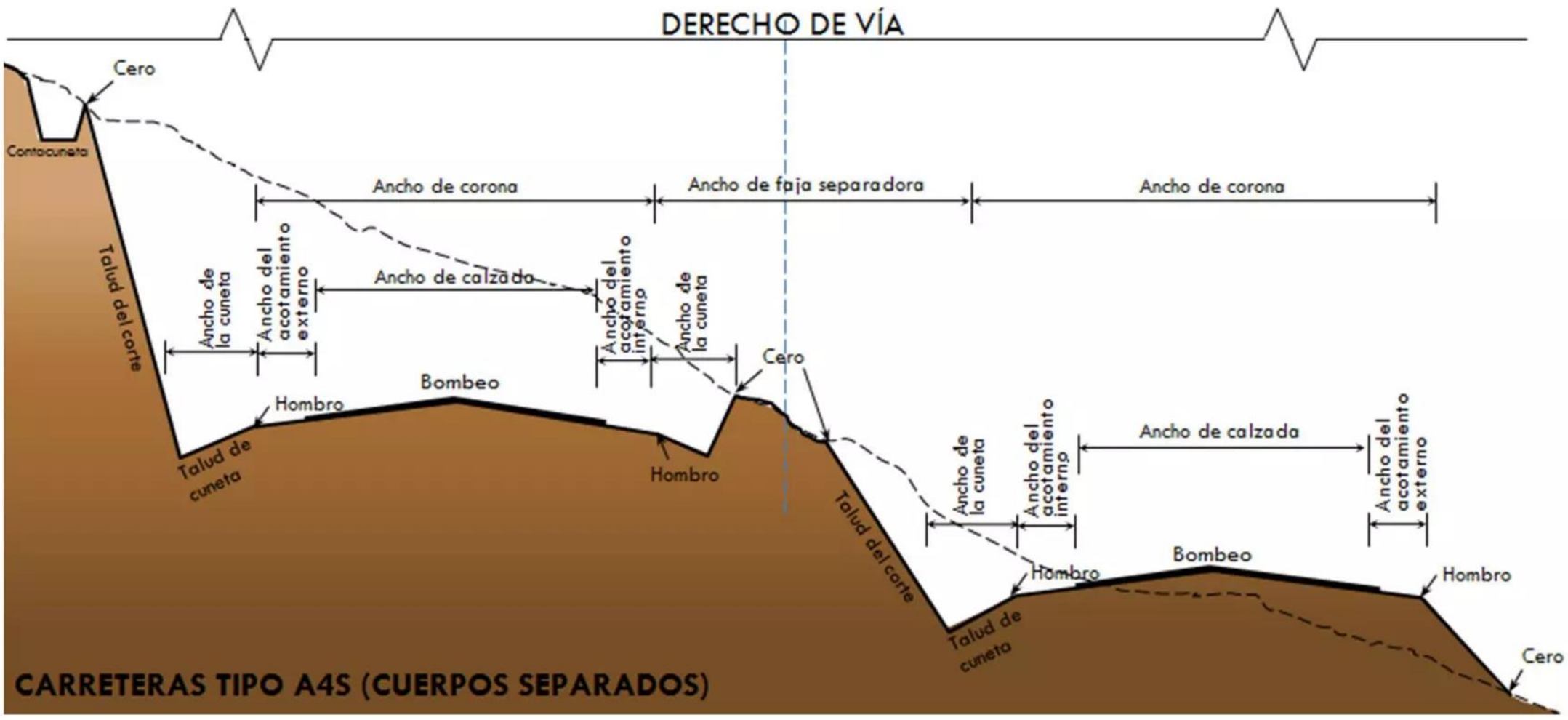
Tipo	Clasificación	Ancho de Mediana (m)
AR	Autopistas Regionales	4 –12
TS	Troncales Suburbanas	4-10
TR	Troncales Rurales	2 – 6
CS	Colectoras Suburbanas	Sin mediana
CR	Colectoras Rurales	Sin mediana

La SCT clasifica las carreteras en función del TPDA y estima las secciones en función de este. Los tipos básicos son:






DERECHO DE VÍA
Ancho de corona
Cero
Contacuneta
Talud del corte
Ancho de la cuneta
Ancho del acotamiento externo
Ancho de calzada
Ancho del acotamiento interno
Ancho faja separación
Ancho del acotamiento interno
Ancho de calzada
Ancho del acotamiento externo
Hombro
Bombeo
Bombeo
Hombro
Talud de la cuneta
Talud del terraplén
Cero
CARRETERA TIPO A4 (UN CUERPO)


DERECHO DE VÍA
Cero
Contacuneta
Ancho de corona
Ancho de faja separadora
Ancho de corona
Talud del corte
Ancho de la cuneta
Ancho del acotamiento externo
Ancho de calzada
Ancho del acotamiento interno
Ancho de la cuneta
Cero
Bombeo
Hombro
Hombro
Talud de cuneta
Ancho de la cuneta
Ancho del acotamiento interno
Ancho de calzada
Ancho del acotamiento externo
Talud del corte
Bombeo
Hombro
Hombro
Talud de cuneta
Cero
CARRETERAS TIPO A4S (CUERPOS SEPARADOS)

Tipo A2: TPDA entre 3000-5000
Tipo A4: TPDA entre 5000-20000
Tipo B: TPDA entre 1500-3000
Tipo C: TPDA entre 500-1500
Tipo D: TPDA entre 100-500
Tipo e: TPDA menor de 100

Basados en la revista de anuarios de tráfico del MTI, en su pág 37.

LISTADO DE ESTACIONES DE "CONTROL Y SUMARIAS" DE LA ESTACIÓN PERMANENTE 107

NIC	Nº ESTACION	TIPO	Pkm	NOMBRE DEL TRAMO	TPDA 98	TPDA 99	TPDA 2000	TPDA 2001	TPDA 2002	TPDA 2003	TPDA 2004	TPDA 2005	TPDA 2006	TPDA 2007	TPDA 2008
NIC-1	107	P	106.2	Sébaco - Emp. San Isidro	2421	2960	2905	3122	3,272	3,357	3,622	3,405	3,849	3,853	4088
NIC-1	108	C	119.5	Emp. San Isidro - La Trinidad		2222		2,561		2460		2976		3531	3586
NIC-1	109	C	129.1	La Trinidad - Santa Cruz		1981	2143	2,329		1827		2675			3046
NIC-1	142	C	140.0	Santa Cruz - Estelí			2252	2,329		1893		3182			3884
NIC-1	110	C	152.1	Estelí - Condega	2,218	2417		2,419			2195			2334	2508
NIC-32A	3211	S	160.0	La Sirena - Emp. El Regadio			201		125		128			164	
NIC-32A	3205	S	169.5	Emp. El Regadio - Emp.La Fraternidad			113		80		88			94	

Podemos ver que para el corredor principal del departamento de Estelí el TPDA anda por el orden de los 4500 Vehiculos/Día, por lo que una sección tipo A2 sería la adecuada. En la zona de Managua – San Benito sería una sección tipo A4.

Curvas circulares Simples (CCS)

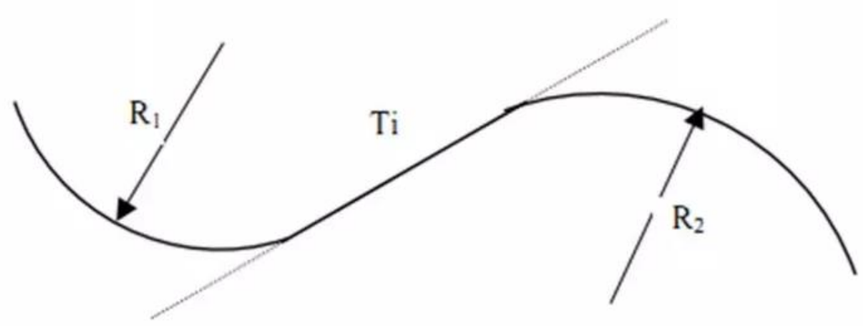
La curva circular es un arco de circunferencia que se emplea en las obras longitudinales, para lograr un cambio gradual en la dirección de las tangentes y que al mismo tiempo sirve de unión entre las mismas. En el sentido del cadenamiento, estas curvas pueden ser hacia la izquierda o a la derecha.

Para dar seguridad y economía a la operación del tránsito, se han introducido factores limitantes en los métodos de diseño del alineamiento horizontal, como el radio mínimo de curva o grado máximo de curva, la tasa de sobreelevación máxima o peralte máximo, los factores de fricción y las longitudes de transición mínima cuando se pasa de una tangente a una curva.

Las curvas circulares pueden ser

- Curvas Circulares simples: Están formadas por un sólo arco de circunferencia.
- Curvas Circulares compuestas: Se forman por la combinación de dos o más arcos de circunferencia uno a continuación del otro. Los radios de cada curva son de magnitud diferente y con tangentes comunes en el punto de unión.
- Curvas Inversas o reversas: Son aquellas compuestas de dos curvas circulares, de sentido contrario, contiguas y con tangente común en el punto de unión.

CURVA DE INFLEXION O CURVA REVERSA



A menos que las condiciones topográficas lo impongan, debe evitarse el uso de curvas del mismo sentido con una tangente corta entre ellas. Fuera de su desagradable apariencia, los conductores no esperan que se presenten curvas cortas y sucesivas en el mismo sentido. En estas condiciones, es preferible la introducción de una curva compuesta directa o la introducción de curvas de transición espiral. (SIECA, 2004)

VELOCIDAD DE DISEÑO (km/h)	MÍNIMA DISTANCIA RECOMENDABLE ENTRE CURVAS EN EL MISMO SENTIDO (m)
100	400
80	300
60	150
50	70
40	55
30	40

Según SIECA en su sección 4-62, la inversión en el alineamiento entre dos curvas reversas, debe incluir una longitud de tangente suficiente para la transición de las sobreelevaciones. Si no se logra incorporar una distancia suficiente, v. gr. de 100 metros, se presenta una sección considerable de la carretera donde la línea central y los bordes del pavimento están al mismo nivel, generando problemas para el drenaje transversal de la pista de rodamiento. De ser de utilización forzada esta solución por limitaciones del terreno, resulta aconsejable acelerar la transición de la sobreelevación, para que se recupera en algún punto intermedio, la sección transversal normal de la carretera

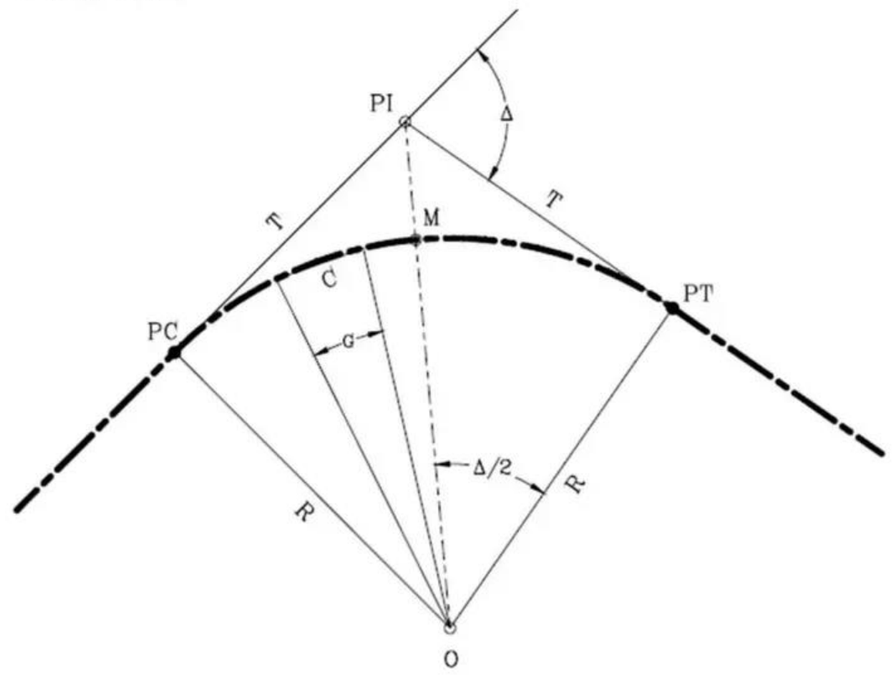
En el diseño de curvas horizontales se deben considerar dos casos:

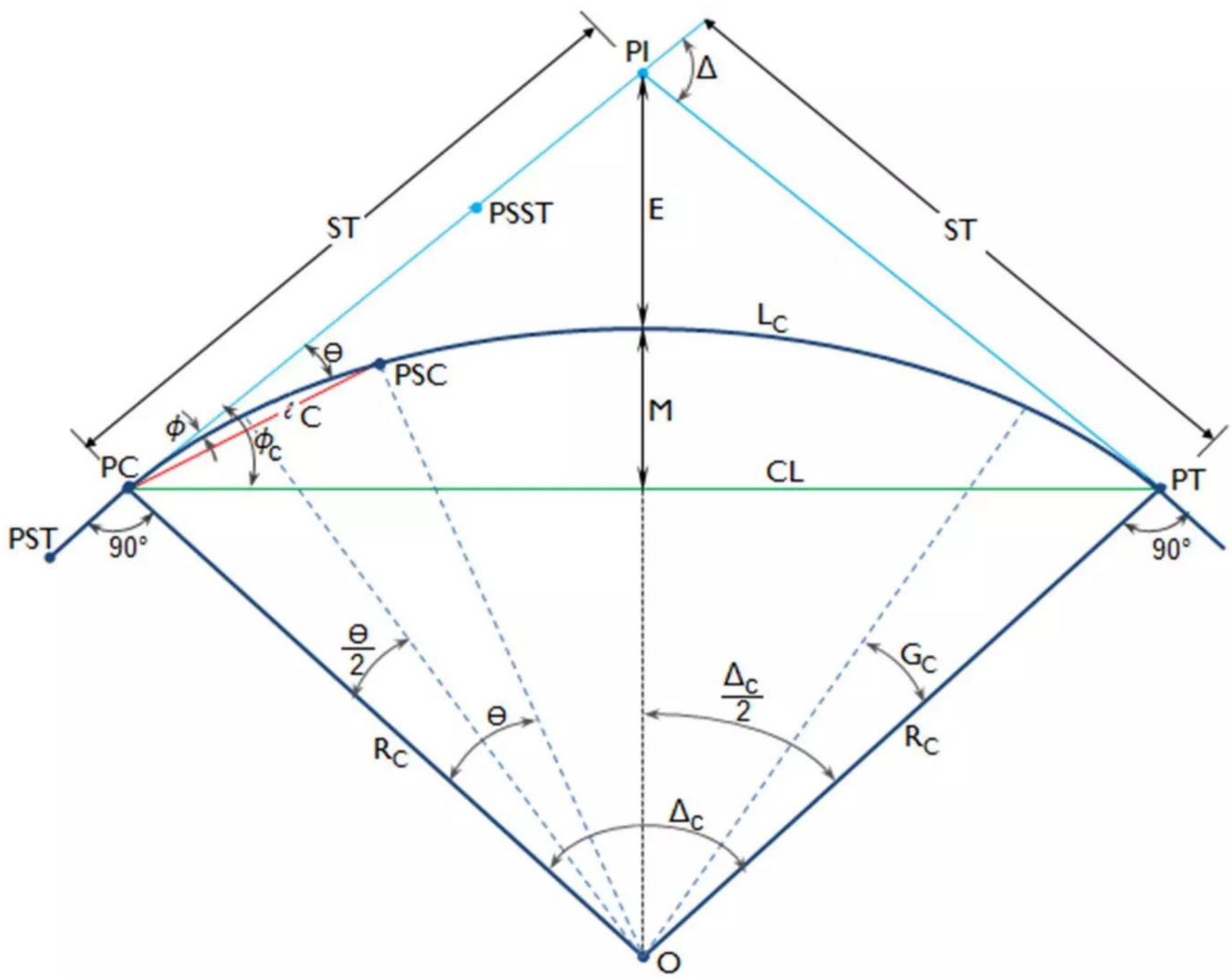
Tangente seguida por curva horizontal: En esta situación, las fuerzas centrífugas actúan en contra de la operación segura de los vehículos cuando entran y circulan por la curva.

Alineamiento compuesto de tangente y curva horizontal y vertical: Gobiernan el diseño factores como el efecto de las fuerzas centrípetas y centrífugas, el movimiento lento de los vehículos pesados cuando ascienden las pendientes y las altas velocidades cuando bajan. (SIECA, 2004)

Elementos de las curvas circulares simples

En general una curva es simple si el radio de curvatura es mayor que 1500 m, peralte e <3%, t < 30 cm





Los elementos de la curva son:

PI: Punto de Intersección de la prolongación de las tangentes.
PC: Punto comienzo
PT: Punto de Termino
PSC: Punto sobre la curva circular
PST: Punto sobre tangente
PSST: punto sobre subtangente
O: Centro de curva
Δ: Angulo de Deflexión de las tangentes
Δ_C: Angulo central de curva circular
Θ: Ángulo de deflexión a un PSC
Φ: Ángulo de una cuerda Cualquiera
Φ_C : Ángulo de la cuerda larga
G_C : Grado de curvatura
R_C : radio de la curva
ST: Subtangente
E: externa
M: ordenada media
C: Cuerda
CL: Cuerda larga
L: longitud del arco
L: longitud de la curva circular

Las fórmulas de cálculo en sistema métrico (m) son las siguientes:

Grado de curvatura (Gc): Es el ángulo subtendido por un arco de 20 metros expresado en grados.

$$\frac{Gc}{20} = \frac{360°}{2\pi Rc}; \quad Gc = \frac{1145.92}{Rc}$$

en donde:

Gc= Grado de curvatura de la curva circular
Rc= Radio de la curva circular

En función de las cuerdas el Grado de curvatura será: G° = 2 sen $^{-1}$(C/2R)

La SCT propone que $G\max = \frac{145{,}606(f + S\max)}{V^2}$

$$Para\ Nicaragua\ como\ Radio\ Minimo = \frac{V^2}{127(emax+f)}\ (SIECA\ Sección\ 4-39)$$

(De esta ecuación se derivan los valores de radio mínimo a usar en las curvas que se muestran en tablas de SIECA en su sección 4-41).

$Gmax > Rmin$

Sustituyendo el radio mínimo ($G = \frac{1145.92}{G}$) en la expresión anterior se obtine que el grado de curvatura máximo es de:

$Gmax = \frac{145692.26(emax+f)}{V^2}$ que es un valor similar al propuesto por SCT pudiendo utilizar este último y que es de donde se deducen los máximos valores de curvatura calculados y recomendados por SIECA.

Nota: (El valor de ecuación realmente es 127.15, pero esto no genera diferencias significativas)

Radio de la curva circular: (Rc) Está dado por la expresión:

$$Rc = \frac{1145.92}{Gc}$$

Ángulo Central (Δc) : Es el ángulo subtendido por la curva circular; se simboliza como Δc =Δ/2
Donde Δ: Angulo de Deflexión de las tangentes expresado en grados.

Si se tienen dos azimut de dos alineaciones que se intersectan para conformar el PI el valor de Δ es la diferencia de estos.

Longitud de Curva o desarrollo de curva (Lc): Es la longitud del arco entre el PC y el PT expresado en m.

$$\frac{Lc}{2\pi Rc} = \frac{\Delta c^\circ}{360^\circ}; \quad Lc = \frac{\pi \Delta c}{360^\circ} Rc$$

De acuerdo con la definición de Rc, se tiene también:

$$Lc = 20\frac{\Delta c}{Gc}$$

Como se verá después es necesario hacer tablas de replanteo y se aplica el criterio que si Lc> 200m se debe replantear del PC al PM y del PT al PM, si es menor de 200 m desde el PC hasta el PT (Finalizando en Δ/2)

Como regla de aplicación práctica, las curvas deben tener por lo menos 150 metros de largo cuando el ángulo de deflexión sea de 5 grados, incrementándose en 30 metros por cada reducción de un grado en el ángulo central. La longitud mínima de las curvas horizontales en las carreteras principales debe ser tres veces la velocidad de diseño, elevándose a seis veces dicha relación en las carreteras de alta velocidad con accesos controlados. (SIECA, 2004)

Subtangente (ST): Es la distancia entre el PI y el PC o PT, medida sobre la prolongación de las tangentes en una curva circular las dos subtangentes son iguales. Esta se expresa en m

$$ST = Rc * tan\frac{\Delta c}{2}$$

Externa: Es la distancia mínima entre el PI y la curva expresado en m.

$$E = Rc\left[\sec\frac{\Delta c}{2} - 1\right]$$ es decir, $$E = Rc\left[(1/\cos(\frac{\Delta c}{2})) - 1\right]$$

Ordenada media: Es la longitud de la flecha en el punto medio de la curva, expresado en m.

$$M = Rc - Rc * \cos\frac{\Delta c}{2} = Rc\left[1 - \cos\frac{\Delta c}{2}\right]$$

$$M = Rc * \operatorname{sen}\frac{\Delta c}{2}$$

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 expresado en grados.

$$\frac{\theta}{L} = \frac{Gc°}{20°}; \quad \theta = \frac{Gc * L}{20°}$$

Cuerda (C): Es la recta que une dos puntos dados de una curva circular; si estos puntos son el Pc y el PT, a la cuerda resultante se le denomina cuerda larga expresada en metros.

$$C = 2Rc * \operatorname{sen}\frac{\theta}{2}$$

En el caso de la cuerda larga:

$$CL = 2Rc * \operatorname{sen}\frac{\Delta c}{2}$$

Ángulo de la cuerda: Es el ángulo de la cuerda comprendido entre la prolongación de la tangente y la cuerda considerada expresado en grados.

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

De la definición de deflexión a un punto cualquiera de la curva se tiene:

$$\phi = \frac{GcL}{40}$$

Para la cuerda larga tenemos:

$$\phi_c = \frac{GcLc}{40}$$

Para fines de trazo de las curvas circulares, se considera que la cuerda tiene la misma longitud que el arco. Por lo tanto, la cuerda variará con el grado de curvatura, según los intervalos

siguientes:

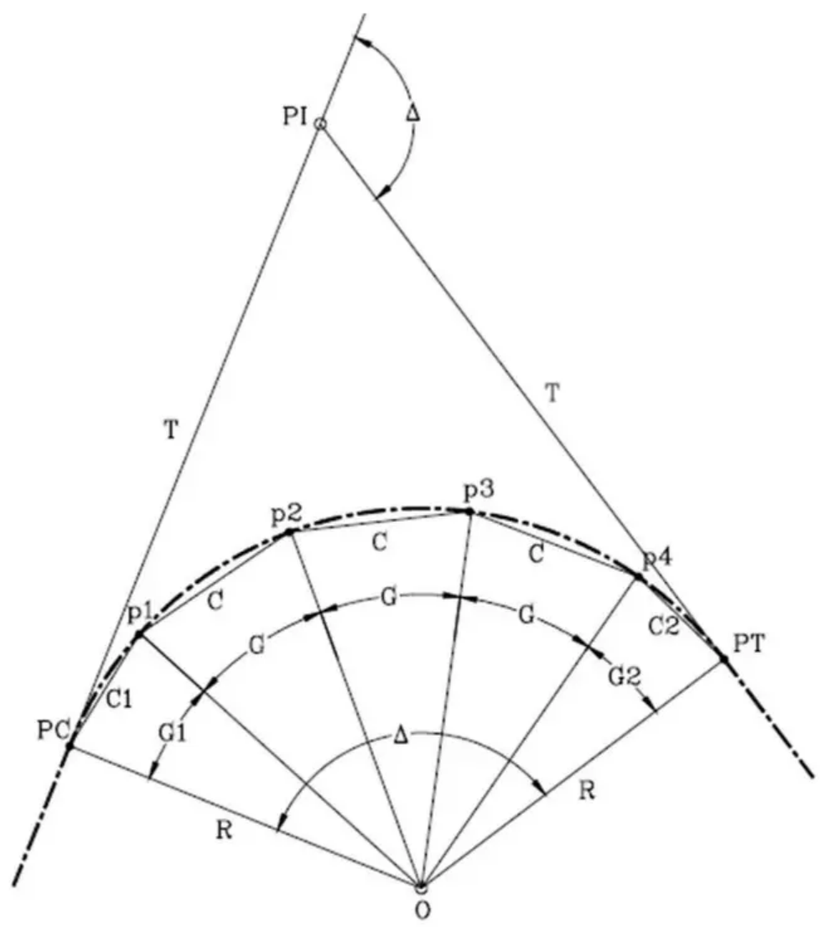
$$0° \leq Gc < 8° \rightarrow c = 20m$$
$$8° \leq Gc < 22° \rightarrow c = 10m$$
$$Gc \geq 22° \rightarrow c = 5m$$

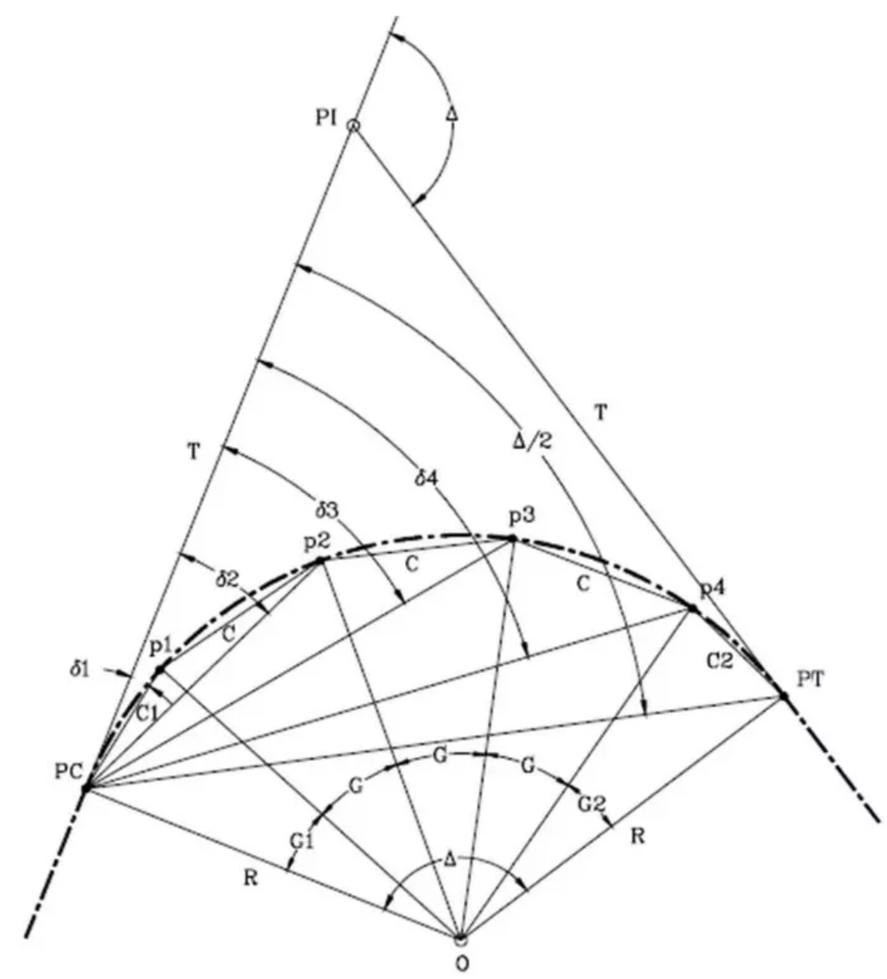
El valor de ϕ por metro y expresado en grados, se puede calcular a partir de la definición de ϕ:

$$\phi m = \frac{1.5Gc * C}{60}$$

en donde:

ϕm: Valor de ϕ por metro de cuerda expresado en grados y C es la cuerda o distancia entre estaciones.



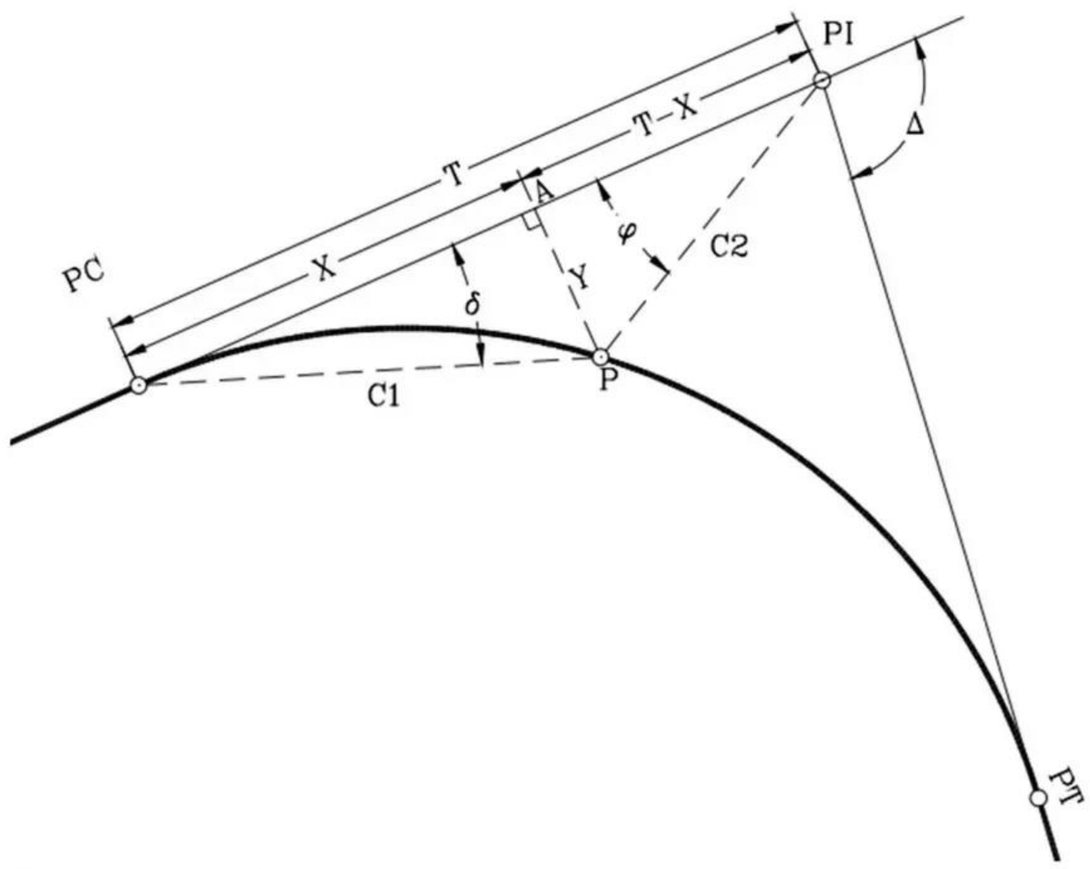


Cuando se realiza el cálculo de todas las deflexiones de una curva, existe entonces la manera de comprobar que estás son correctas, basta verificar que el valor acumulado de estas al llegar al *PT* es igual a *Δ/2.*

La tabla típica de deflexiones, para una curva de longitud menor que 200 m, que se usa para el replanteo en campo es:

ESTACIÓN	LONG O CUERDA (M)	DEFLEXIÓN	DEFLEXIÓN ACUMULADA
PC	0	0	0
p1	C1	δ1	G1/2
p2	C1+C	δ2	G1/2+G/2
p3	C1+C+C	δ3	G1/2+G/2+G2
p4	C1+C+C+C	δ4	G1/2+G2+G2+G2
PT	L	Δ/2	G1/2+G2+G2+G2+G2/2

Hoy en día con el uso de equipos modernos y calculadoras es posible replantear desde el PI sin tener que mover el equipo para ello el Ing. Agudelo, en su publicación de diseño geométrico pág. 73, establece las siguientes ecuaciones basados en la gráfica indicada:

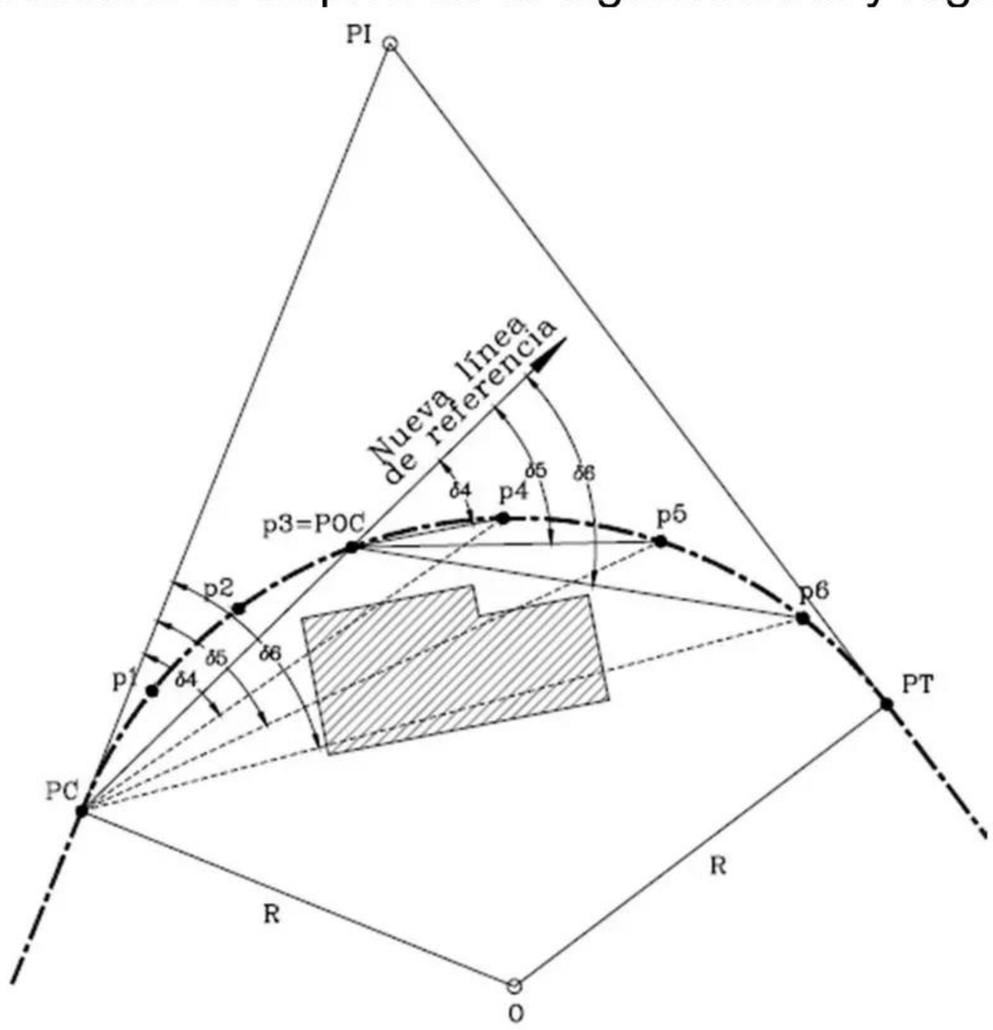


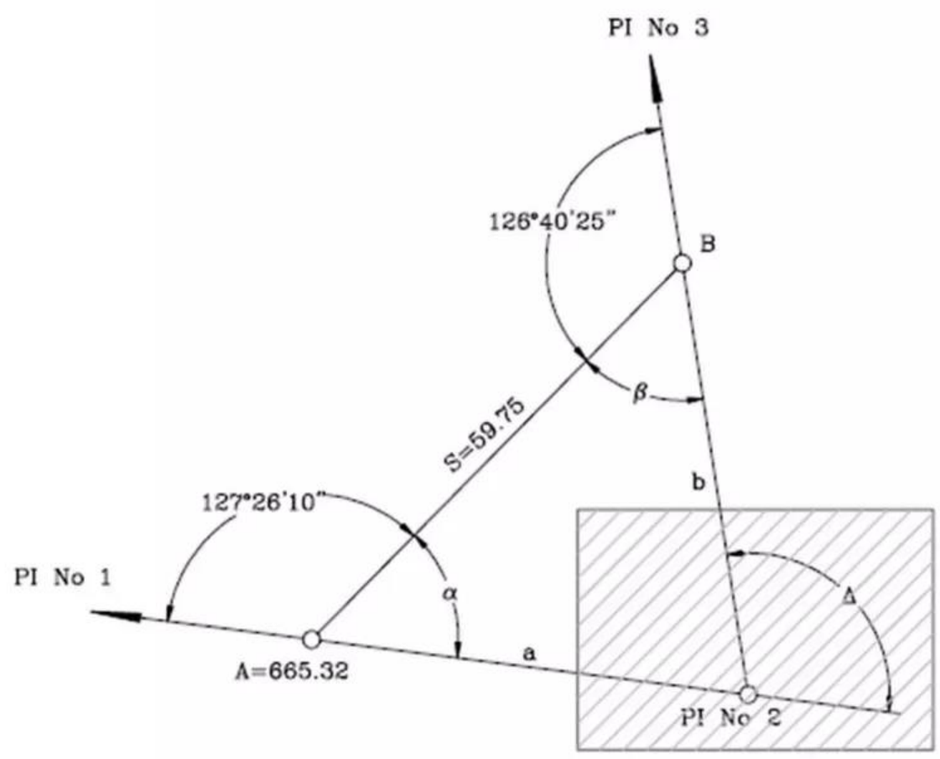
$$\varphi = Tan^{-1}\left(\frac{2Sen^2\delta}{Tan(\Delta/2) - Sen2\delta}\right)$$

$$C2 = R\sqrt{\left(Tan(\Delta/2) - Sen2\delta\right)^2 + 4Sen^4\delta}$$

Puede ver la demostración de estas ecuaciones en las pág. 173-174. (OSPINA, 2002)

Muchas veces el replanteo en campo no es tan fácil debido a obstáculos, para tal efectos es es necesario el empleo de la trigonometría y lógica matemática aplicado al campo de la topografía.





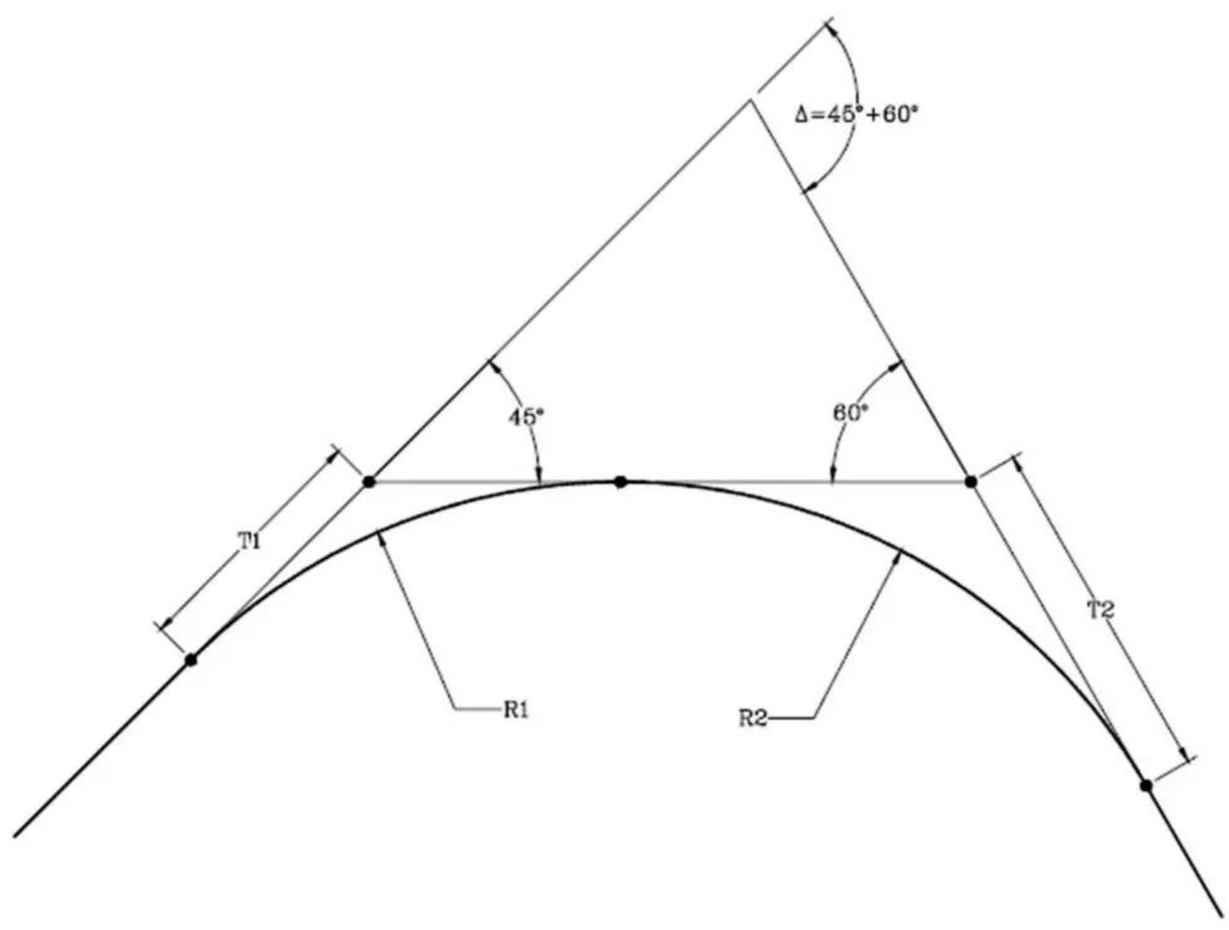
Graficas tomadas de (OSPINA, 2002). Por ejemplo note que en el primer grafico no se aprecia el punto 4 sobre la curva por lo que se puede establecer este como referencia, moviendo el instrumento a este punto y amarrándose con vuelta de campana en el PC y continuando el barrido normal.

Incluso para determinar valores de radios que sean tangentes a tres líneas se hacen con geometría básica.

T1 + T2 = 120.0
T1 = R1 Tan (Δ/2) = R1 x Tan (45º/ 2)
T2 = R2 Tan (Δ/2) = R2 x Tan (60º/ 2)

Pero como es una curva simple entonces R1 = R2 = R
R x Tan (45º/ 2) + R x Tan (60º/ 2)= 120.0

Resolviendo la ecuación se tiene que:
R= 121.02



Radios Mínimos y sus correspondientes Grados Máximos de Curva

Según las NORMAS PARA EL DISEÑO GEOMÉTICO DE LAS CARRETERAS REGIONALES, en su sección 4-39, los radios mínimos son los valores limites de la curvatura para una velocidad de diseño dada, que se relacionan con la sobreelevación máxima y la máxima fricción lateral escogida para diseño. Un vehículo se sale de control en una curva, ya sea porque el peralte o sobreelevación de la curva no es suficiente para contrarrestar la velocidad, o porque la fricción lateral entre las ruedas y el pavimento es insuficiente y se produce el deslizamiento del vehículo. Un vehículo derrapa en las curvas debido a la presencia de agua o arena sobre la superficie de rodamiento.

El uso de radios más reducidos solamente puede lograrse a costas de incómodas tasas de sobreelevación o apostando a coeficientes de fricción lateral que pueden no estar garantizados por la adherencia de las llantas (calidad, grado de desgaste del grabado, presión, etc.) con la superficie de rodamiento de la carretera.
Una vez establecido el máximo factor de sobreelevación (e), los radios mínimos de curvatura horizontal se pueden calcular utilizando la fórmula presentada al inicio del acápite 4.5.1, que es la siguiente:

$R = V^2 / (127\ (e+f))$

donde:
R = Radio mínimo de curva, en metros
e= Tasa de sobreelevación en fracción decimal
f = Factor de fricción lateral, que es la fuerza de fricción dividida por la masa perpendicular al pavimento.
V = Velocidad de diseño, en kilómetros por hora

Estas normas en su sección 4-41, definen los siguientes valores de Radios mínimos

Cuadro 4.10 Radios mínimos y grados máximos de Curvas Horizontales para distintas Velocidades de Diseño

Velocidad de Diseño(Km/h)	Factor de Fricción Máxima	Paralte máximo 4%			Peralte máximo 6%		
		Radio (m)		Grado de	Radio (m)		Grado de
		Calculado	Recomendado	Curva	Calculado	Recomendado	Curva
30	0.17	33.7	35	32° 44`	30.8	30	38° 12`
40	0.17	60.0	60	19° 06`	54.8	55	20° 50`
50	0.16	98.4	100	11° 28`	89.5	90	12° 44`
60	0.15	149.2	150	7° 24`	135.0	135	8° 29`
70	0.14	214.3	215	5° 20`	192.9	195	5° 53``
80	0.14	280.0	280	4° 05`	252.0	250	4° 35`
90	0.13	375.2	375	3° 04`	335.7	335	3° 25`
100	0.12	492.1	490	2° 20`	437.4	435	2° 38`
110	0.11	635.2	635	1° 48`	560.4	560	2° 03`
120	0.09	872.2	870	1° 19`	755.9	775	1° 29`

Velocidad de Diseño(Km/h)	Factor de Fricción Máxima	Peralte máximo 8%			Peralte máximo 10%		
		Radio (m)		Grado de Curva	Radio (m)		Grado de Curva
		Calculado	Recomendado		Calculado	Recomendado	
30	0.17	28.3	30	38° 12`	26.2	25	45° 50`
40	0.17	50.4	50	22° 55`	46.7	45	25° 28`
50	0.16	82.0	80	14° 19`	75.7	75	15° 17`
60	0.15	123.2	120	9° 33`	113.4	115	9° 58`
70	0.14	175.4	175	6° 33`	160.8	160	7° 10`
80	0.14	229.1	230	4° 59`	210.0	210	5° 27`
90	0.13	303.7	305	3° 46`	277.3	275	4° 10`
100	0.12	393.7	395	2° 54`	357.9	360	3° 11`
110	0.11	501.5	500	2° 17`	453.7	455	2° 31`
120	0.09	667.0	665	1° 43`	596.8	595	1° 56`

Fuente: A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 1994, p. 156
Nota: Cifras redondeadas para radios y grados recomendados

Ejemplo de determinación de grado de curvatura.

Δ= 9°
PI = 8+300
VD = 65 Kph
Zona suburbana

Considerando En general G = Δ/10 si Δ>5°
Gcal= 9°/10 = 0.9° Grec = ½ Gcal = 0.4, este valor se redondea al grado siguiente por múltiplo de 0.5 grados por tanto Grec = 0.5°

$$G\max = \frac{145{,}606\left(f + S\max\right)}{V^2}$$

Δ= 9.5°

Velocidad de Diseño(Km/h)	Factor de Fricción Máxima
30	0.17
40	0.17
50	0.16
60	0.15
70	0.14
80	0.14
90	0.13
100	0.12
110	0.11
120	0.09

Tasa de Sobreelevación, "e" en (%)	Tipo de Area
10	Rural montañosa
8	Rural plana
6	Suburbana
4	Urbana

El factor de fricción máximo es de f= 0.145
La tasa de sobre elevación máximo e = Smax = 6 %

$$G\max = \frac{145{,}606(0.145 + 0.06)}{65^2} = 7.06$$

El valor de grado de curvatura de diseño se obtiene al comparar el Grec con Gmax, tomando el menor siempre y cuando no existan limitaciones topográficas, geológicas, uso de suelo, entre otras. Por tanto tomaremos 1°.

Ejemplo calculo elementos de curva

Calcule los elementos de la cuva para datos siguientes:

Δ= 9°
PI = 8+300
G= 0.5
Los resultados son:

R= 2292.84 m
T = 180.45 m
Lc = 360, por tanto se replantea del PC-PM y del PT al PM, recuerde que si Lc < 200 metros se replantea del PC-PT
PC = 8+199.55
PT = 8+479.55
PM = 8+299.55
Deflexión por metro para cuerdas de 20 m= 0°15´00 "
Deflexión por metro para cuerdas de 19.55 = 0°14´39.75 "

Calcule los elementos de la cuva para datos siguientes:

△I=16º31`02``
R=225
PI=0+752.40

$$Gc = \frac{1145.92}{Rc} = 5.0930 \approx 5º5`34.72``$$

$$M = 225.Sen\left(\frac{16º31`02``}{2}\right) = 32.3193\ m$$

$$E = Rc\left[sec\frac{\Delta\ c}{2} - 1\right] = 2.3577m$$

$$CL = 2(225) * Sen\left(\frac{16º31`02``}{2}\right) = 64.64m$$

$$ST = R * Tan\frac{\Delta\, c}{2} = 225 * tan\left(\frac{16^{o}31`02``}{2}\right)$$

$$ST = 32.66m$$

$$Lc = 20\frac{\Delta\, c}{Gc} = 20\left(\frac{16^{o}31`02``}{5^{o}5`34.72`}\right) = 64.86m$$

Propuesto

Calcule los elementos de la curva para datos siguientes:

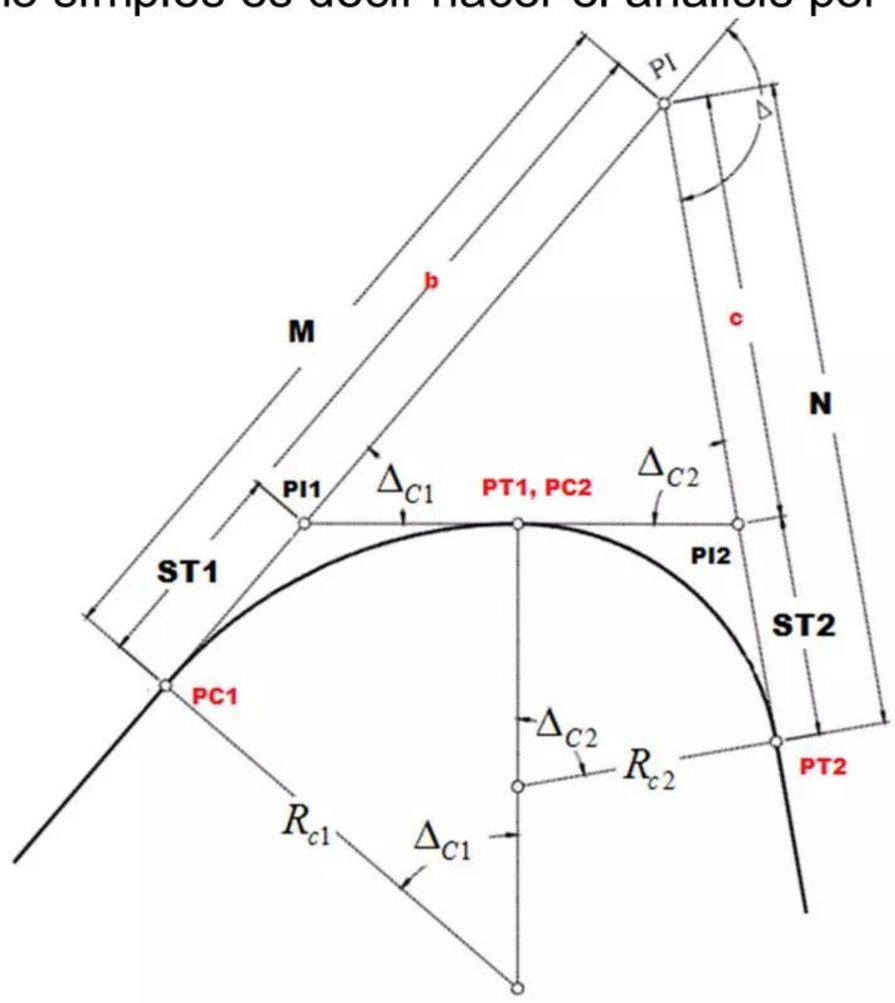
Δ= 9.5°
PI = 3+200
G= 0.5
Vd = 65 KPH

Curvas Circulares Compuestas (CCC)

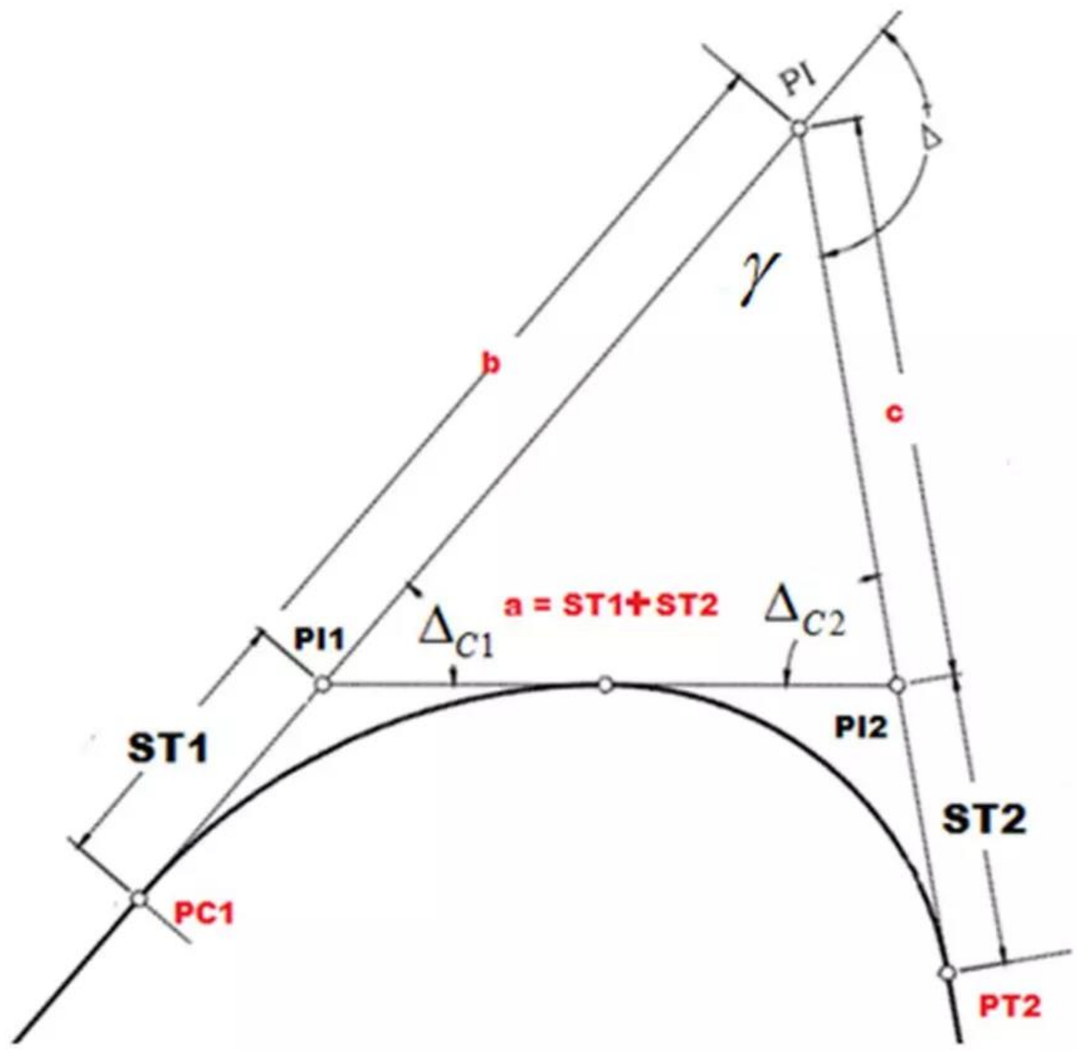
Las curvas compuestas son las que están formadas por dos o más radios, es decir por dos o más curvas circulares simples. Aunque no son muy comunes y además son indeseables, muchas veces se hacen necesarias para adaptarse de una mejor forma a las condiciones topográficas o cuando se presenta un control en los diseños como por ejemplo el acceso a un puente. El uso de estas curvas se presenta principalmente en vías urbanas, más concretamente en intercambios viales por ejemplo cuando se debe reducir de forma gradual la velocidad al abandonar una vía rápida y tomar otra más lenta. (OSPINA, 2002)

Las curvas circulares no son mas que la sucesión de curvas circulares simples del mismo sentido sin entretangencia coincidiendo el PT de la primera con el PC de la siguientes y así sucesivamente. Los elementos de cada curva se calculan de igual manera que para una curva simple, (es decir para una curva C1, curva 1 y para C2 o curva 2) la única diferencia es que deben de calcularse los valores de M y N correspondientes a las tangentes entrada y de salida que permiten determinar a partir del PI los valores de PC para curva 1. Para efectos prácticos veamos el caso de una curva compuesta de dos simples.

Ospina recomienda no usarse en lo posible estas curvas compuestas, debiendo de tratarse como simples es decir hacer el análisis por curva individual.



Ampliando la gráfica



Es obvio que el valor de Δ =Δ1+Δ2

Para el caso de las curvas compuestas existe un análisis de tipo geométrico que permite calcular estas como un solo elemento. Dicho análisis permite hallar las tangentes que comprenden la totalidad de la curva llamadas Tangente de Entrada-TE (en la gráfica representanda como M) y Tangente de Salida TS (en la grafica representada como N), mientras que todos los demás elementos propios de la curva circular simple se calculan de forma independiente utilizando las expresiones antes descritas. Para evitar estos casos cada curva puede tratarse por separado y así evitar calcular TS y TE.

Por proporción de triángulos y ley de senos se determina que para una curva de dos radios las ecuaciones de cálculo son la siguientes:

$$ST_{c1} = R_{c1} * tan\frac{\Delta c_1}{2}; \quad ST_{c2} = R_{c2} * tan\frac{\Delta c_2}{2}$$

$$a = ST_{c1} + ST_{c2};$$

$$\frac{b}{\operatorname{sen}\Delta_{c2}} = \frac{a}{\operatorname{sen}\gamma}; \quad \therefore b = \frac{a * \operatorname{sen}\Delta_{c2}}{\operatorname{sen}\gamma}$$

$$\frac{c}{\operatorname{sen}\Delta_{c1}} = \frac{a}{\operatorname{sen}\gamma}; \quad \therefore c = \frac{a * \operatorname{sen}\Delta_{c1}}{\operatorname{sen}\gamma}$$

$$M = b + ST_{c1}; \quad N = c + ST_{c2}$$

$$L_{C1} = \frac{20\Delta_{C1}}{G_1}; \quad L_{C2} = \frac{20\Delta_{C2}}{G_2}$$

Las estaciones serán:

$$PIconocido - M = PC_1$$
$$PC_1 + L_{C1} = PT_1 = PC_2$$
$$PC_2 + L_{C2} = PT_2$$

El uso de curvas compuestas con grandes diferencias en los radios, produce casi el mismo efecto que la combinación de una curva cerrada con tangentes de gran longitud. Cuando la topografía o el derecho de vía haga necesario su utilización, el radio de la curva circular mayor no debe exceder el 50 por ciento de la curva de menor radio. El manual mexicano propone que en las intersecciones se utilicen curvas compuestas, siempre y cuando la relación entre dos radios consecutivos no sobrepase la cifra de 2.0 y se resuelva satisfactoriamente la transición de la sobreelevación. (SIECA, 2004)

Una ecuación recomendada por (BURBANO, 2011) para encontrar los valores de M (tangente corta -TC) y de N (Tangente Larga)

$$T_C = \frac{R_1 - R_2 \cos\Delta - (R_1 - R_2)\cos\Delta_1}{sen\,\Delta}$$

$$T_L = \frac{R_2 - R_1 \cos\Delta + (R_1 - R_2)\cos\Delta_2}{sen\,\Delta}$$

Si fuera de tres radios este autor indica que:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3$$

$$T_C = \frac{R_1 - R_3 \cos\Delta - (R_1 - R_2)\cos\Delta_1 - (R_2 - R_3)\cos(\Delta_1 + \Delta_2)}{sen\,\Delta}$$

$$T_L = \frac{R_3 - R_1 \cos\Delta + (R_1 - R_2)\cos(\Delta_2 + \Delta_3) + (R_2 - R_3)\cos\Delta_3}{sen\,\Delta}$$

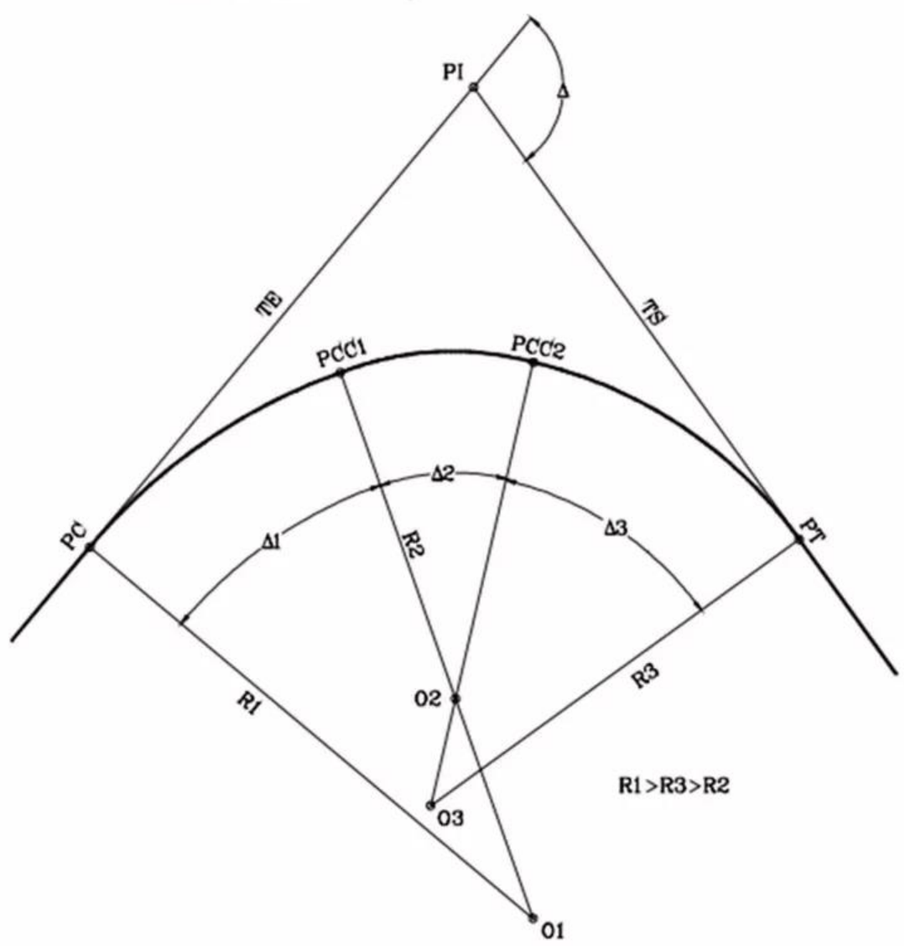
O bien que de forma general la Tangente de entrada y la tangente de salida

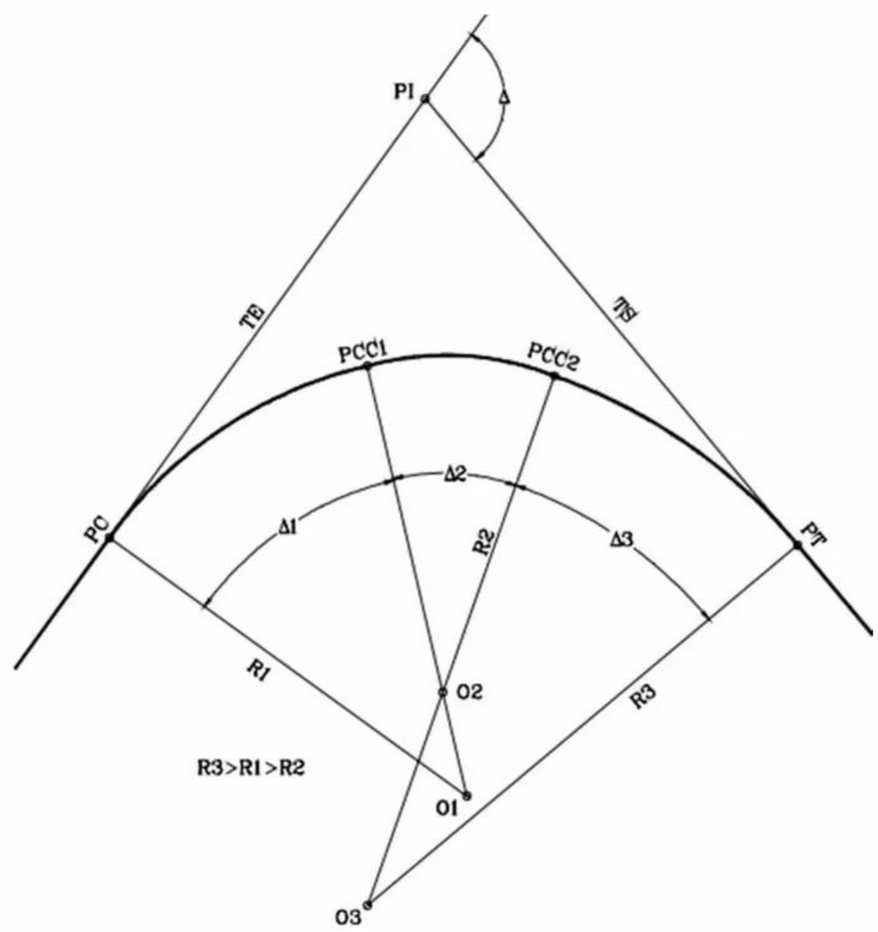
$$\rho = 180^\circ - (\Delta_2 + \Delta_3) \qquad \alpha = (\Delta_2 + \Delta_3) \qquad \beta = 180^\circ - \Delta$$

$$T_E = T_1 + \left[T_1 + T_2 + \frac{(T_2 + T_3)sen\,\Delta_3}{sen(\Delta_2 + \Delta_3)}\right]\left[\frac{sen(\Delta_2 + \Delta_3)}{sen\,\Delta}\right]$$

$$T_S = T_3 + \left[T_1 + T_2 + \frac{(T_2 + T_3)sen\,\Delta_3}{sen(\Delta_2 + \Delta_3)}\right]\left(\frac{sen\,\Delta_1}{sen\,\Delta}\right) + \frac{(T_2 + T_3)sen\,\Delta_2}{sen(\Delta_2 + \Delta_3)}$$

Las de tres radios son





Tomados de (OSPINA, 2002) pág. 183.

Por ejemplo:

4. Calcule los elementos de La Curva Circular Compuesta (CCC) si se sabe que:

PI = 2+319.50

Δ_1 = 38°15'15"

Δ_2 = 31°22'06"
$G°_1$ = 3°10'
$G°_2$ = 2°40'

Encuentre PC_1, PC_2, PT_1, PT_2 y los elementos de la curva 2.

$$Rc_1 = \frac{1145.92}{G°_1} = \frac{1145.92}{3°10'} = 361.87m$$

$$Rc_2 = \frac{1145.92}{G°_2} = \frac{1145.92}{2°40'} = 429.72m$$

$$ST_1 = Rc_1\left(\tan\frac{\Delta_1}{2}\right) = 361.87m\left(\tan\frac{38°15'15''}{2}\right) = 125.5m$$

$$ST_2 = Rc_2\left(\tan\frac{\Delta_2}{2}\right) = 429.72m\left(\tan\frac{31°22'06''}{2}\right) = 120.66m$$

$$a = ST_1 + ST_2 = 125.5m + 120.66m = 246.16m$$

$$b = \frac{a(\sin\Delta_2)}{\sin\gamma} = \frac{a(\sin\Delta_2)}{\sin[180-(\Delta_1+\Delta_2)]} = \frac{246.16m(\sin 31°22'06'')}{\sin[180-(38°15'15''+31°22'06'')]}$$
$$b = 136.69m$$

$$c = \frac{a(sin\,\Delta_1)}{sin\,\gamma} = \frac{a(sin\,\Delta_1)}{sin[180-(\Delta_1+\Delta_2)]} = \frac{246.16m(sin\,38°15'15'')}{sin[180-(38°15'15''+31°22'06'')]}$$
$$c = 162.585m$$

$$M_1 = b + ST_1 = 136.69m + 125.5m = 262.19m \approx 0.26219km$$

$$M_2 = b + ST_2 = 136.69m + 120.66m = 257.35m \approx 0.25735km$$

$$Lc_1 = \frac{20(\Delta_1)}{G°_1} = \frac{20(38°15'15'')}{3°10'} = 241.6m$$

$$Lc_2 = \frac{20(\Delta_2)}{G°_2} = \frac{20(31°22'06'')}{2°40'} = 235.2625m$$

$$PC_1 = PI - M_1 = 2319.5 - 262.19m = 2 + 057.31$$

$$PC_2 = PT_1 = PC_1 + Lc_1 = 2057.31 + 241.6m = 2 + 298.91$$

$$PT_2 = PC_2 + Lc_2 = 2298.91 + 235.2625m = 2 + 534.1725$$

Elementos de la curva 2:

$$Lc_2 = \frac{20(\Delta_2)}{G°_2} = \frac{20(31°22'06")}{2°40'} = 235.2625m$$

$$Rc_2 = \frac{1145.92}{G°_2} = \frac{1145.92}{2°40'} = 429.72m$$

$$E = Rc_2\left[\sec\frac{\Delta_2}{2} - 1\right] = 429.72m\left[\sec\frac{31°22'06"}{2} - 1\right] = 429.72m$$

$$M = Rc_2\left(\sin\frac{\Delta_2}{2}\right) = 429.72m\left(\sin\frac{31°22'06"}{2}\right) = 116.17m$$

$$\theta = \frac{(G°_2)(Lc_2)}{20°} = \frac{(2°40')(235.2625m)}{20°} = 31.37°$$

$$ST_2 = Rc_2\left(\tan\frac{\Delta_2}{2}\right) = 429.72m\left(\tan\frac{31°22'06"}{2}\right) = 120.66m$$

$$CL_2 = 2Rc_2\left(\sin\frac{\Delta_2}{2}\right) = 2(429.72m)\left(\sin\frac{31°22'06"}{2}\right) = 232.34m$$

$$PC = PI + ST = 2319.5 + 120.66m = 2 + 440.16$$

$$PT = PC + Lc_2 = 2319.5 + 235.2625m = 2 + 675.4525$$

Ampliación o sobreancho

Cuando un vehículo circula por una curva, ocupa un ancho de camino mayor que en una tangente, debido a esta situación y a que es difícil para el conductor mantener el vehículo en el centro del carril, es necesario proporcionar un ancho adicional en las curvas, en relación con el ancho en tangente. Este también permite que los vehículos puedan circular adecuadamete sobre el carril. A este sobreancho se le denomina normalmente ampliación.

Es aconsejable dar este sobreancho a la calzada por dos razones:

1. Las ruedas traseras de un vehículo que recorre una curva, describen una trayectoria de radio más corto que las delanteras, necesitando más espacio lateralmente.

2. Hay una necesidad psicológica de más espacio para evitar colisionar con el vehículo de sentido contrario. (Campos, 2009)

Según las normas centroamericanas en su sección 4-45, Los sobreanchos se diseñan siempre en las curvas horizontales de radios pequeños, combinadas con carriles angostos, para facilitar las maniobras de los vehículos en forma eficiente, segura, cómoda y económica. Los sobreanchos son necesarios para acomodar la mayor curva que describe el eje trasero de un vehículo pesado y para compensar la dificultad que enfrenta el conductor al tratar de ubicarse en el centro de su carril de circulación.

En las carreteras modernas con carriles de 3.6 metros y buen alineamiento, la necesidad de sobreanchos en curvas se ha disminuido a pesar de las velocidades, aunque tal necesidad se mantiene para otras condiciones de la vía. (SIECA, 2004)

Para establecer el sobreancho en curvas deben tomarse en cuenta las siguientes consideraciones:

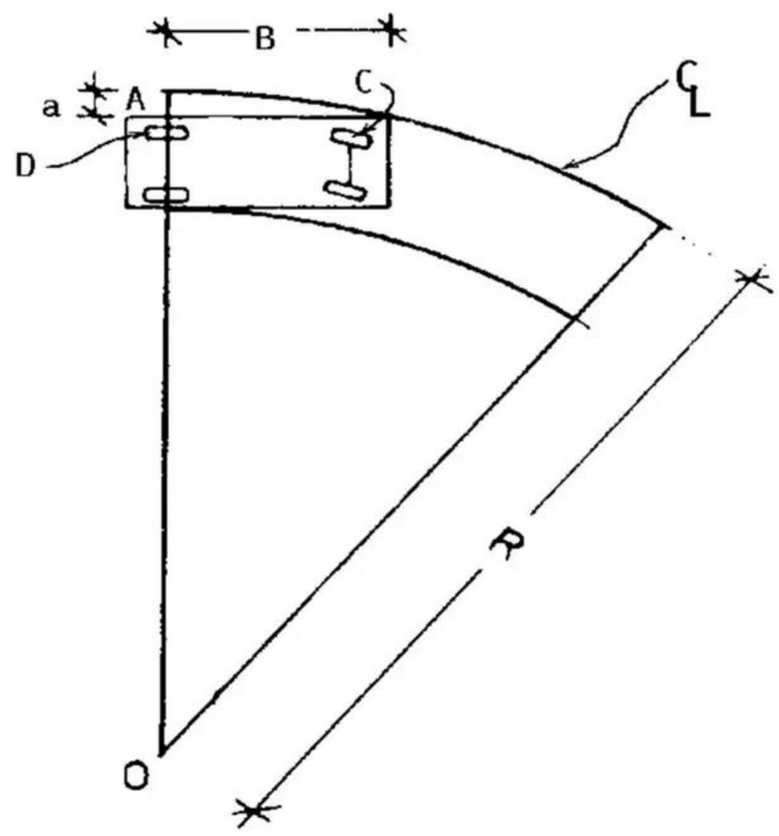
a) En curvas circulares sin transición, el sobreancho total debe aplicarse en la parte interior de la calzada. El borde externo y la línea central deben mantenerse como arcos concéntricos.

b) Cuando existen curvas de transición, el sobreancho se divide igualmente entre el borde interno y externo de la curva, aunque también se puede aplicar totalmente en la parte interna de la calzada. En ambos casos, la marca de la línea central debe colocarse entre los bordes de la sección de la carretera ensanchada.

c) El ancho extra debe efectuarse sobre la longitud total de transición y siempre debe desarrollarse en proporción uniforme, nunca abruptamente, para asegurarse que todo el ancho de los carriles modificados sean efectivamente utilizados. Los cambios en el ancho normalmente pueden efectuarse en longitudes comprendidas entre 30 y 60 m.

d) Los bordes del pavimento siempre deben tener un desarrollo suave y curveado atractivamente, para inducir su uso por el conductor.

e) Los sobreanchos deben ser detallados minuciosamente en los planos constructivos y por medio de controles durante el proceso de construcción de la carretera o, alternativamente, dejar los detalles finales al Ingeniero residente de campo.



$$a = \overline{AD} = \text{ampliación}$$
$$\overline{OC} : \text{radio de la curva}$$
$$\overline{OA} = R$$
$$\overline{OD}^2 = \overline{OC}^2 - \overline{CD}^2$$
$$\overline{OD} = \sqrt{\overline{OC}^2 - \overline{CD}^2} = \sqrt{R^2 - B^2}$$
$$a = \overline{OA} - \overline{OD}$$
$$a = R - \overline{OD}$$
$$a = R - \sqrt{R^2 - B^2} \rightarrow \text{ para un solo carril}$$

Barnett modificó esta fórmula básica y la generalizó para una sección transversal con n carriles:

$$a = n * \left(R - \sqrt{R^2 - B^2}\right) + \frac{V}{10\sqrt{R}}$$

en donde:
a= Ampliación de la sección transversal o Sobreancho (S) expresado en m.
n= Número de carriles.
R= Radio de la curva (m).
B= Distancia entre ejes del vehículo de proyecto (m) esta es de 8 metros según SIECA en sección 4-50. (Este valor se refleja como L en SIECA)

V= Velocidad de proyecto (km/h).

Esta ecuación también es recomendada por las normas de diseño geométrico SIECA en su sección 4-50. De acuerdo a la experiencia se ha demostrado que una tasa de sobreelevación de 0.12 no debe ser excedida, debido al control combinado que ejercen los procesos constructivos, las dificultades para el mantenimiento y el efecto de incomodidad para el movimiento de vehículos lentos. Donde se limite la velocidad permisible por la congestión del tránsito o el extenso desarrollo marginal a lo largo de la carretera, la tasa de sobreelevación no debe exceder entre 4 y 6 por ciento. (SIECA, 2004)

Según sección 4-50 Cando el Radio de curvatura es mayor a 300mt, no es necesario aplicar sobreancho. O cuando éste es menor a 0.60 mt. (Pag 4-50 SIECA)

Ejemplo de sobreancho, radío mínimo peralte máx y de diseño

Determine los valores de emax, ediseño, sobreancho , R min y Gmax para los siguientes datos:
Δ= 21° Vd = 70 Kph Zona urbana

De las tablas sabemos que el factor de fricción lateral para las velocidades de 70 KPH es de 0.14 así como que para las zonas urbanas el emax es de 4%

Rmin = V^2/ (127 (e+f))
Rmin = $(70)^2$/ (127 (0.04+0.14))
Rmin = 214.3482 m

$$G\max = \frac{145{,}606(f + S\max)}{V^2}$$

$$G\max = \frac{145{,}606(0.14 + 0.04)}{70^2} = 5°20'45''$$

Gcal =Δ/10= 21°/10= 2.1° Grec = 2°

$e_D = e_{máx} - (e_{máx}\,(e_{máx} - G_D/E_{máx})^2)$

$e_D = 0.04 - (0.04\,(0.04 - 2/0.04)^2)$
$e_D = 0.0243 = 2.43\ \%$

Sobreancho

$$a = n * \left(R - \sqrt{R^2 - B^2}\right) + \frac{V}{10\sqrt{R}}$$

En esta ecuación el valor de a corresponde al valor de sobreancho

$$S = n * \left(R - \sqrt{R^2 - B^2}\right) + \frac{V}{10\sqrt{R}}$$

El radio de este curva será = R = 1145.92/G° = 1145.9272 = 572.96 m

$$S = 2 * \left(572.93 - \sqrt{572.96^2 - 8^2}\right) + \frac{70}{10\sqrt{572.96}} = 0.4041m$$

*El valor 2, refiere a dos carriles por sentido de circulación.

Los cuadros siguientes, extraídos de sección 4-46 a 4-48, muestran el conteniendo para carreteras de dos y cuatro carriles, las longitudes mínimas de transición en función del radio de curva, la sobreelevación con valores máximos de 6, 8, 10 y 12 por ciento, y la velocidad de diseño.

Elementos de Diseño para Curvas Horizontales y Velocidades de Diseño, e máx. 6%

	Vd=30km/h			Vd=40km/h			Vd=50km/h			Vd=60km/h			Vd=70km/h			Vd=80km/h			Vd=90km/h			Vd=100km/h			Vd=110km/h		
		L (m)			L (m)			L (m)			L (m)			L (m)			L (m)			L (m)			L (m)			L (m)	
R (m)	e (%)	2 Crs	4 Crs	e (%)	2 Crs	4 Crs	e (%)	2 Crs	4 Crs	e (%)	2 Crs	4 Crs	e (%)	2 Crs	4 Crs	e (%)	2 Crs	4 Crs	e (%)	2 Crs	4 Crs	e (%)	2 Crs	4 Crs	e (%)	2 Crs	4 Crs
7000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0
5000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0
3000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	56	84	SI	61	92
2500	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	50	75	SI	56	84	2.3	61	92
2000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	44	66	2.1	50	75	2.5	56	84	2.8	61	92
1500	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	39	59	2.2	44	66	2.7	50	75	3.1	56	84	3.6	61	92
1400	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	39	59	2.4	44	66	2.8	50	75	3.3	56	84	3.8	61	92
1300	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	33	50	2.1	39	59	2.5	44	66	3.0	50	75	3.5	56	84	4.0	61	92
1200	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	33	50	2.2	39	59	2.7	44	66	3.2	50	75	3.7	56	84	4.2	61	92
1000	SN	0	0	SN	0	0	SI	28	42	2.1	33	50	2.6	39	59	3.1	44	66	3.6	50	75	4.2	56	84	4.8	61	92
900	SN	0	0	SN	0	0	SI	28	42	2.3	33	50	2.8	39	59	3.4	44	66	3.9	50	75	4.5	56	84	5.1	61	92
800	SN	0	0	SN	0	0	SI	28	42	2.5	33	50	3.1	39	59	3.6	44	66	4.2	50	75	4.9	56	84	5.4	61	92
700	SN	0	0	SI	22	33	2.1	28	42	2.8	33	50	3.4	39	59	4.0	44	66	4.6	50	75	5.2	56	84	5.7	61	92
600	SN	0	0	SI	22	33	2.4	28	42	3.1	33	50	3.8	39	59	4.3	44	66	5.0	50	75	5.6	56	84	6.0	61	92
500	SN	0	0	2.1	22	33	2.8	28	42	3.5	33	50	4.2	39	59	4.8	44	66	5.4	50	75	5.9	56	84	Rmin = 560		
400	SI	17	26	2.5	22	33	3.3	28	42	4.0	33	50	4.7	39	59	5.3	44	66	5.9	50	75	Rmin = 435					
300	SI	17	26	3.1	22	33	3.9	28	42	4.6	33	50	5.4	39	59	5.9	44	66	Rmin = 335								
250	2.3	17	26	3.5	22	33	4.2	28	42	5.0	33	50	5.7	39	59	6.0	44	66									
200	2.8	17	26	3.9	22	33	4.7	28	42	5.5	33	50	6.0	39	59	Rmin = 250											
175	3.0	17	26	4.1	22	33	5.0	28	42	5.8	35	52	Rmin = 195														
150	3.3	17	26	4.4	23	34	5.3	29	43	5.9	35	53															
140	3.5	17	26	4.5	23	35	5.4	29	44	6.0	36	54															
130	3.6	17	26	4.6	24	36	5.6	30	45	Rmin = 135																	
120	3.8	18	27	4.8	25	37	5.7	31	46																		
110	3.9	19	28	5.0	26	39	5.8	31	47																		
100	4.1	20	29	5.2	27	40	5.9	32	48																		
90	4.2	20	30	5.4	28	42	6.0	32	49																		
80	4.5	22	32	5.6	29	43	Rmin = 90																				
70	4.7	23	34	5.8	30	45																					
60	5.0	24	36	6.0	31	46																					
50	5.4	26	39	Rmin = 55																							
40	5.8	28	42																								
30	6.0	29	43																								
	Rmin = 30																										

emax = 6.0%
R = Radio de curva
V = Velocidad de diseño
e = Tasa de sobreelevación
L = Longitud mínima de transición
SN = Sección Norma
SI = Sección Invertida, peralte similar a la pendiente normal
Crs = Carriles
CIFRAS REDONDEADAS

Elementos de Diseño para Curvas Horizontales y Velocidades de Diseño, e máx. 8%

R (m)	V_d=30km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	V_d=40km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	V_d=50km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	V_d=60km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	V_d=70km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	V_d=80km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	V_d=90km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	V_d=100km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	V_d=110km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs
7000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0
5000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0
3000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	56	84	2.1	61	92
2500	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	50	75	2.1	56	84	2.4	61	92
2000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	44	66	2.2	50	75	2.6	56	84	3.0	61	92
1500	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	39	59	2.4	44	66	2.8	50	75	3.4	56	84	3.9	61	92
1400	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	33	50	2.1	39	59	2.5	44	66	3.0	50	75	3.6	56	84	4.1	61	92
1300	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	33	50	2.2	39	59	2.7	44	66	3.2	50	75	3.8	56	84	4.4	61	92
1200	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	33	50	2.4	39	59	2.9	44	66	3.4	50	75	4.1	56	84	4.7	61	92
1000	SN	0	0	SN	0	0	SI	28	42	2.2	33	50	2.8	39	59	3.4	44	66	4.0	50	75	4.8	56	84	5.5	61	92
900	SN	0	0	SN	0	0	SI	28	42	2.4	33	50	3.1	39	59	3.7	44	66	4.4	50	75	5.2	56	84	6.0	61	92
800	SN	0	0	SN	0	0	SI	28	42	2.7	33	50	3.4	39	59	4.1	44	66	4.8	50	75	5.7	56	84	6.5	61	92
700	SN	0	0	SI	22	33	2.2	28	42	3.0	33	50	3.8	39	59	4.5	44	66	5.3	50	75	6.3	56	84	7.2	62	93
600	SN	0	0	SI	22	33	2.6	28	42	3.4	33	50	4.3	39	59	5.1	44	66	6.0	50	75	6.9	56	84	7.7	66	99
500	SN	0	0	2.2	22	33	3.0	28	42	3.9	33	50	4.9	39	59	5.8	44	66	6.7	51	76	7.6	61	91	8.0	69	103
400	SI	17	26	2.7	22	33	3.6	28	42	4.7	33	50	5.7	39	59	6.6	48	71	7.5	57	85	8.0	64	96	R_{min} = 500		
300	2.1	17	26	3.4	22	33	4.5	28	42	5.6	34	51	6.7	44	66	7.6	55		R_{min} = 305			R_{min} = 395					
250	2.5	17	26	4.0	22	33	5.1	28	42	6.2	37	56	7.3	48	72	7.9	57	85									
200	3.0	17	26	4.6	24	36	5.8	31	47	7.0	42	63	7.9	52	78	R_{min} = 230											
175	3.4	17	26	5.0	26	39	6.2	33	50	7.4	44	67	8.0	52	79.0												
150	3.8	18	27	5.4	28	42	6.7	36	54	7.8	47	70	R_{min} = 175														
140	4.0	19	29	5.6	29	43	6.9	37	56	7.9	47	71															
130	4.2	20	30	5.8	30	45	7.1	38	58	80	48	72															
120	4.4	21	32	6.0	31	46	7.3	39	59	R_{min} = 125																	
110	4.7	23	34	6.3	32	49	7.6	41	62																		
100	4.9	23	35	6.5	33	50	7.8	42	63																		
90	5.2	25	37	6.9	36	53	7.9	43	64																		
80	5.5	26	40	7.2	37	56	8.0	43	65																		
70	5.9	28	42	7.5	39	58	R_{min} = 80																				
60	6.4	31	46	7.8	40	60																					
50	6.9	33	50	8.0	41	62																					
40	7.5	36	54	R_{min} = 50																							
30	8.0	38	57																								
	R_{min} = 30																										

e_{max} = 8.0%
R = Radio de curva
V = Velocidad de diseño
e = Tasa de superelevación
L = Longitud mínima de transición
SN = Sección Normal
SI = Sección Invertida, peralte similar a la pendiente normal
Crs = Carriles
CIFRAS REDONDEADAS

Elementos de Diseño para Curvas Horizontales y Velocidades de Diseño, e máx. 10%

R (m)	Vd=30km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	Vd=40km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	Vd=50km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	Vd=60km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	Vd=70km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	Vd=80km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	Vd=90km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	Vd=100km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs	Vd=110km/h e (%)	L (m) 2 Crs	L (m) 4 Crs
7000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0
5000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0
3000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	56	84	2.1	61	92
2500	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	50	75	2.2	56	84	2.5	61	92
2000	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	44	66	2.2	50	75	2.7	56	84	3.1	61	92
1500	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	39	59	2.4	44	66	2.9	50	75	3.5	56	84	4.1	61	92
1400	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	33	50	2.1	39	59	2.6	44	66	3.1	50	75	3.8	56	84	4.3	61	92
1300	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	33	50	2.3	39	59	2.8	44	66	3.3	50	75	4.0	56	84	4.6	61	92
1200	SN	0	0	SN	0	0	SN	0	0	SI	33	50	2.4	39	59	3.0	44	66	3.6	50	75	4.3	56	84	5.0	61	92
1000	SN	0	0	SN	0	0	SI	28	42	2.2	33	50	2.9	39	59	3.5	44	66	4.2	50	75	5.1	56	84	5.9	61	92
900	SN	0	0	SN	0	0	SI	28	42	2.5	33	50	3.2	39	59	3.9	44	66	4.6	50	75	5.6	56	84	6.4	61	92
800	SN	0	0	SN	0	0	SI	28	42	2.7	33	50	3.5	39	59	4.3	44	66	5.1	50	75	6.2	56	84	7.1	61	92
700	SN	0	0	SI	22	33	2.3	28	42	3.1	33	50	4.0	39	59	4.8	44	66	5.8	50	75	6.9	56	84	8.0	69	103
600	SN	0	0	SI	22	33	2.7	28	42	3.6	33	50	4.5	39	59	5.5	44	66	6.5	50	75	7.8	62	94	9.0	77	116
500	SN	0	0	2.3	22	33	3.1	28	42	4.2	33	50	5.3	39	59	6.4	46	69	7.6	57	86	8.9	71	107	9.9	85	127
400	SI	17	26	2.8	22	33	3.8	28	42	5.0	33	50	6.3	41	62	7.5	54	81	8.8	67	100	9.8	78	117	Rmin = 455		
300	2.2	17	26	3.6	22	33	4.8	28	42	6.3	38	57	7.8	51	77	9.0	65	97	99	75	112	Rmin = 360					
250	2.6	17	26	4.2	22	33	5.6	30	45	7.1	43	64	8.7	57	86	9.7	70	105	Rmin = 275								
200	3.1	17	26	5.0	26	39	6.6	36	53	8.2	49	74	9.6	63	94	Rmin = 210											
175	3.5	17	26	5.6	29	43	7.1	38	58	8.8	53	79	9.9	65	97.0												
150	4.0	19	29	6.2	32	48	7.8	42	63	9.4	57	85	Rmin = 160														
140	4.3	21	31	6.4	33	49	8.1	44	66	9.6	58	87															
130	4.5	22	32	6.7	34	52	8.5	46	69	9.8	59	88															
120	4.8	23	34	7.0	36	54	8.8	48	71	10.0	60	90															
110	5.1	24	37	7.4	38	57	9.1	49	74	Rmin = 115																	
100	5.5	26	40	7.7	40	59	9.5	51	77																		
90	5.9	28	42	8.2	42	63	9.8	53	79																		
80	6.4	31	46	8.6	44	66	10.0	54	81																		
70	6.9	33	50	9.1	47	70	Rmin = 75																				
60	7.5	36	54	9.6	49	74																					
50	8.2	39	59	10.0	51	77																					
40	9.1	44	65	Rrmin = 45																							
30	9.9	47	71																								
	Rmin = 25																										

emax = 10.0%
R = Radio de curva
V = Velocidad de diseño
e = Tasa de superelevación
L = Longitudmínima de transición
SN = Sección Normal
SI = Sección Invertida, peralte similar a la pendiente normal
C: = Carriles
CIFRAS REDONDEADAS

Para otros tipos de vehículos de diseño puede emplearse la tabla de AASHTO de sección 3.52 (Exhibit 3-52. Adjustments for Traveled Way Widening Values on Open Highway Curves (Two-Lane Highways, One -Way or Two-Way)

Metric								US Customary							
Radius of curve (m)	Design vehicle							Radius of curve (ft)	Design vehicle						
	SU	WB-12	WB-19	WB-20	WB-20D	WB-30T	WB-33D		SU	WB-40	WB-62	WB-65	WB-67D	WB-100T	WB-109D
3000	-0.3	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	7000	-1.1	-1.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3
2500	-0.3	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	6500	-1.1	-1.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3
2000	-0.3	-0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	6000	-1.2	-1.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.3
1500	-0.4	-0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	5500	-1.2	-1.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.4
1000	-0.4	-0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	5000	-1.2	-1.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.4
900	-0.4	-0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	4500	-1.2	-1.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.5
800	-0.4	-0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	4000	-1.2	-1.2	0.2	0.2	-0.1	0.1	0.5
700	-0.4	-0.4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.3	3500	-1.3	-1.2	0.2	0.3	-0.1	0.1	0.6
600	-0.5	-0.4	0.1	0.1	0.0	0.1	0.3	3000	-1.3	-1.2	0.2	0.3	-0.1	0.1	0.7
500	-0.5	-0.4	0.1	0.2	0.0	0.1	0.4	2500	-1.4	-1.2	0.3	0.4	-0.1	0.1	0.8
400	-0.5	-0.4	0.2	0.2	0.0	0.1	0.5	2000	-1.5	-1.3	0.3	0.5	-0.1	0.2	1.0
300	-0.6	-0.5	0.2	0.3	-0.1	0.1	0.6	1800	-1.5	-1.3	0.4	0.5	-0.1	0.2	1.1
250	-0.7	-0.5	0.2	0.3	-0.1	0.1	0.8	1600	-1.6	-1.4	0.4	0.6	-0.1	0.2	1.3
200	-0.8	-0.6	0.3	0.4	-0.1	0.2	1.0	1400	-1.7	-1.4	0.5	0.6	-0.2	0.2	1.5
150	-0.9	-0.7	0.4	0.6	-0.1	0.2	1.3	1200	-1.8	-1.5	0.5	0.8	-0.2	0.3	1.7
140	-0.9	-0.7	0.4	0.6	-0.1	0.2	1.4	1000	-2.0	-1.6	0.6	0.9	-0.2	0.3	2.0
130	-1.0	-0.7	0.5	0.6	-0.2	0.2	1.5	900	-2.1	-1.7	0.7	1.0	-0.2	0.4	2.3
120	-1.1	-0.8	0.5	0.7	-0.2	0.3	1.6	800	-2.2	-1.8	0.8	1.1	-0.3	0.4	2.6
110	-1.1	-0.8	0.6	0.8	-0.2	0.3	1.7	700	-2.4	-1.9	0.9	1.3	-0.3	0.5	2.9
100	-1.2	-0.9	0.6	0.8	-0.2	0.3	1.9	600	-2.6	-2.0	1.1	1.5	-0.4	0.6	3.4
90	-1.3	-0.9	0.7	0.9	-0.2	0.3	2.1	500	-2.9	-2.2	1.3	1.8	-0.4	0.7	4.1
80	-1.4	-1.0	0.8	1.1	-0.2	0.4	2.4	450	-3.2	-2.4	1.4	2.0	-0.5	0.7	4.6
70	-1.6	-1.1	0.9	1.2	-0.3	0.5	2.8	400	-3.4	-2.5	1.6	2.3	-0.5	0.8	5.1
								350	-3.8	-2.8	1.9	2.6	-0.6	1.0	5.9
								300	-4.3	-3.0	2.2	3.0	-0.7	1.1	6.9
								250	-4.9	-3.5	2.6	3.7	-0.9	1.4	8.3
								200	-5.9	-4.1	3.3	4.6	-1.1	1.7	10.5

Notes: Adjustments are applied by adding to or subtracting from the values in Exhibit 3-51.
Adjustments depend only on radius and design vehicle; they are independent of roadway width and design speed.
For 3-lane roadways, multiply above values by 1.5.
For 4-lane roadways, multiply above values by 2.0.

Las cifras que muestran los cuadros son las mínimas recomendables, por lo que siempre que las condiciones topográficas y económicas lo permitan, es aconsejable que estas longitudes sean aumentadas de acuerdo al criterio del diseñador. Las cifras de diseño incluidas en estos cuadros han sido calculados para carriles de 3.60 m, pero son recomendadas para su aplicación también en anchos menores. Bajo todas las condiciones, excepto en condiciones climáticas extremas, se considera que los vehículos operarán en condiciones seguras si se aplican las curvas horizontales con las longitudes de transición y las sobreelevaciones indicadas. Calculado con el método para distribuir sobreelevación y fricción lateral, donde se mantiene una relación curvilínea entre “e” y “f” y el radio de la curva, que asemeja una forma parabólica asimétrica, que ilustran en sección 4-37 de las normas centromericanas en donde gráficamente se aprecia.

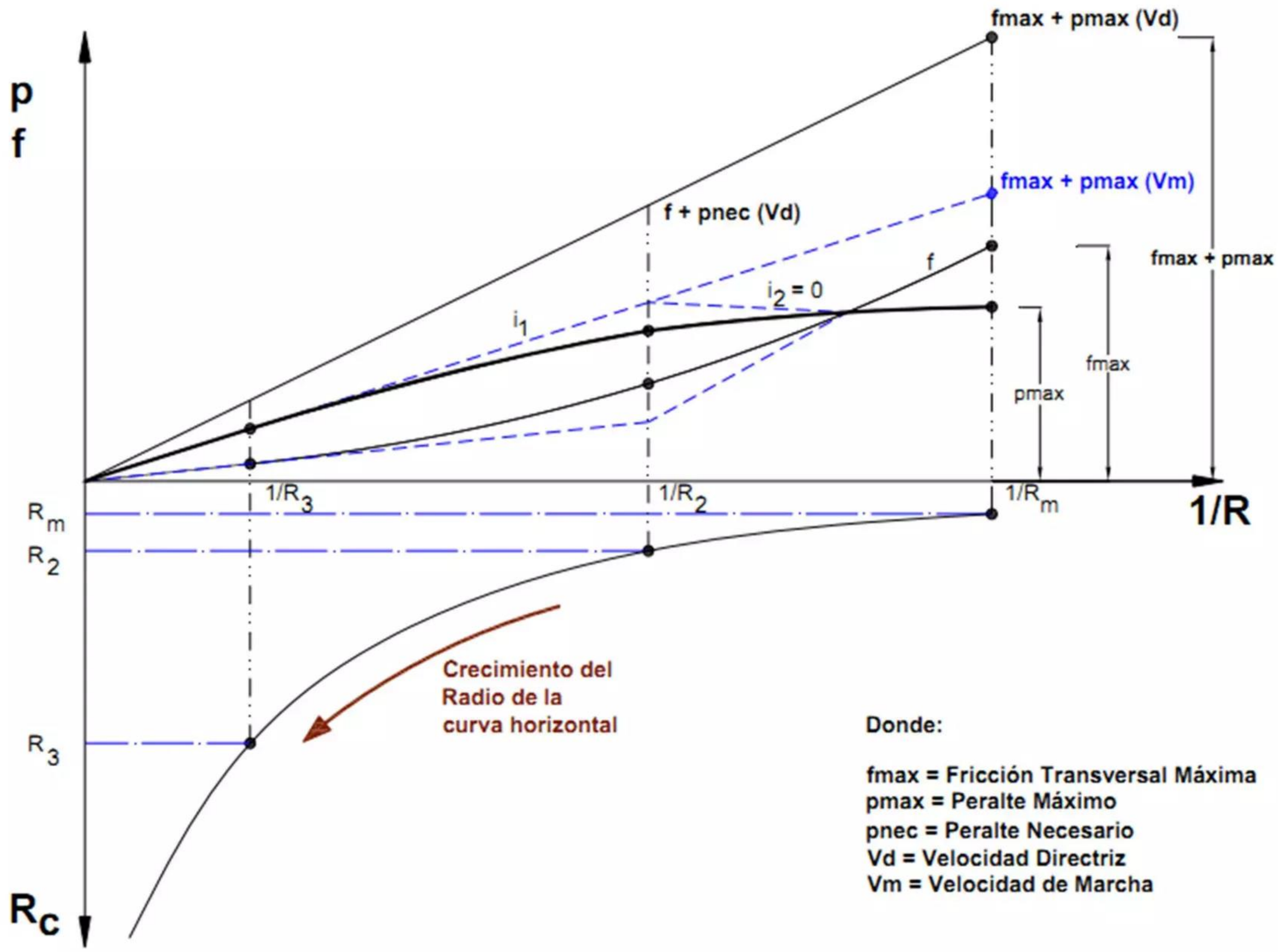


Grafico tomado de (Silvera, 2010) página 20.

Los sobreanchos recomendados en sección 4-51 por Normas Centroamericanas son:

Cuadro No. 4.16 Sobreancho en Curvas de Carreteras de dos Carriles

Ancho Calzada	7.2metros							6.6 metros							6.0 metros						
Radio de Curva	Velocidad de diseño (Km/h)							Velocidad de diseño (Km/h)							Velocidad de diseño (Km/h)						
(m)	50	60	70	80	90	100	110	50	60	70	80	90	100	110	50	60	70	80	90	100	110
1500	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.6
1000	0	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.5	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6
750	0	0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8
500	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1
400	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5		0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8		0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	
300	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5			0.6	0.7	0.7	0.8	0.8			0.9	1.0	1.0	1.1			
250	0.4	0.5	0.5	0.6				0.7	0.8	0.8	0.9				1.0	1.1	1.1	1.2			
200	0.6	0.7	0.8					0.9	1.0	1.1					1.2	1.3	1.3	1.4			
150	0.7	0.8						1.0	1.1						1.3	1.4					
140	0.7	0.8						1.0	1.1						1.3	1.4					
130	0.7	0.8						1.0	1.1						1.3	1.4					
120	0.7	0.8						1.0	1.1						1.3	1.4					
110	0.7							1.0							1.3						
100	0.8							1.1							1.4						
90	0.8							1.1							1.4						
80	1							1.3							1.6						
70	1.1							1.4							1.7						

Fuente: A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 1994, p. 217.

Basados en Vehículo de diseño WB-15

Metric																		
Radius of curve (m)	Roadway width = 7.2 m Design Speed (km/h)						Roadway width = 6.6 m Design Speed (km/h)						Roadway width = 6.0 m Design Speed (km/h)					
	50	60	70	80	90	100	50	60	70	80	90	100	50	60	70	80	90	100
3000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6
2500	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
2000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7
1500	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
1000	0.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8
900	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
800	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
700	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0
600	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0	1.0
500	0.3	0.3	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1
400	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.6	0.7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2	1.2
300	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4	1.4
250	0.6	0.7	0.8	0.8	0.9		0.9	1.0	1.1	1.1	1.2		1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	
200	0.8	0.9	1.0	1.0			1.1	1.2	1.3	1.3			1.4	1.5	1.6	1.6		
150	1.1	1.2	1.3	1.3			1.4	1.5	1.6	1.6			1.7	1.8	1.9	1.9		
140	1.2	1.3					1.5	1.6					1.8	1.9				
130	1.3	1.4					1.6	1.7					1.9	2.0				
120	1.4	1.5					1.7	1.8					2.0	2.1				
110	1.5	1.6					1.8	1.9					2.1	2.2				
100	1.6	1.7					1.9	2.0					2.2	2.3				
90	1.8						2.1						2.4					
80	2.0						2.3						2.6					
70	2.3						2.6						2.9					

Notes: Values shown are for WB-15 design vehicle and represent widening in meters. For other design vehicles, use adjustments in Exhibit 3-52.
Values less than 0.6 m may be disregarded.
For 3-lane roadways, multiply above values by 1.5.
For 4-lane roadways, multiply above values by 2.

Exhibit 3-51. Calculated and Design Values for Traveled Way Widening on Open Highway Curves (Two-Lane Highways, One-Way or Two-Way)

Elements of Design

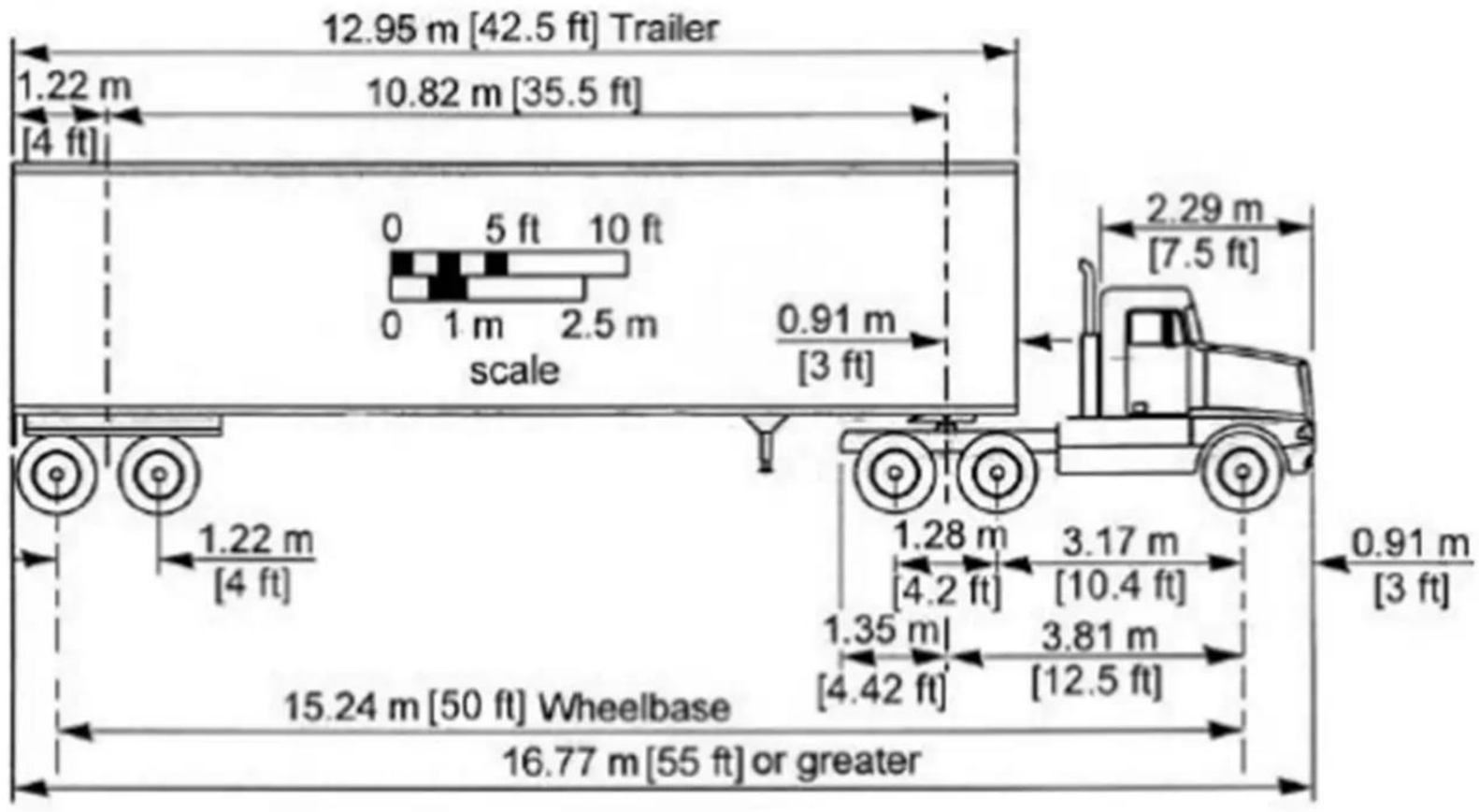
Finalmente, En la selección del sobreancho en curvas se debe tomar en consideración lo siguiente (SIECA, 2004):

✳ Sobreanchos menores de 0.60 metros, no son necesarios en las curvas.
✳ Los sobreanchos calculados que se muestran en el cuadro 4.16 son para carreteras de dos carriles.
✳ En carreteras de tres carriles los sobreanchos mostrados en el cuadro anterior deben afectarse por un factor de 1.5 y en carreteras de cuatro carriles multiplicar las cifras del cuadro por 2.
✳ La longitud L de la fórmula es igual a 8 metros.
✳ Los sobreanchos calculados por esta fórmula arrojan valores mayores que los de las tablas de la AASHTO, mostrados en el cuadro 4.16, por lo que deben tomarse como provistos de un margen de seguridad.
✳ Los datos del cuadro 4.16 deben incrementarse desde 0.2 metros para radios de 250 a 400 metros hasta 0.6 metros para radios menores de 80 metros, cuando el tránsito incluya volúmenes significativos de vehículos tipo WB-19.

Recuerde que según la guía AASHTO, en su página 32-33, las características del vehículo tipo WB-15-WB20 son: (AASHTO, 2001).

El vehículo tipo o de proyecto es aquel tipo de vehículo hipotético cuyo peso, dimensiones y características de operación son utilizados para establecer los lineamientos que guiaran el proyecto geométrico de la carretera. Este debe ser el que represente un porcentaje significativo del tránsito que circularé en la vía. (G., 2007)

Para el WB15 (T3-S2)



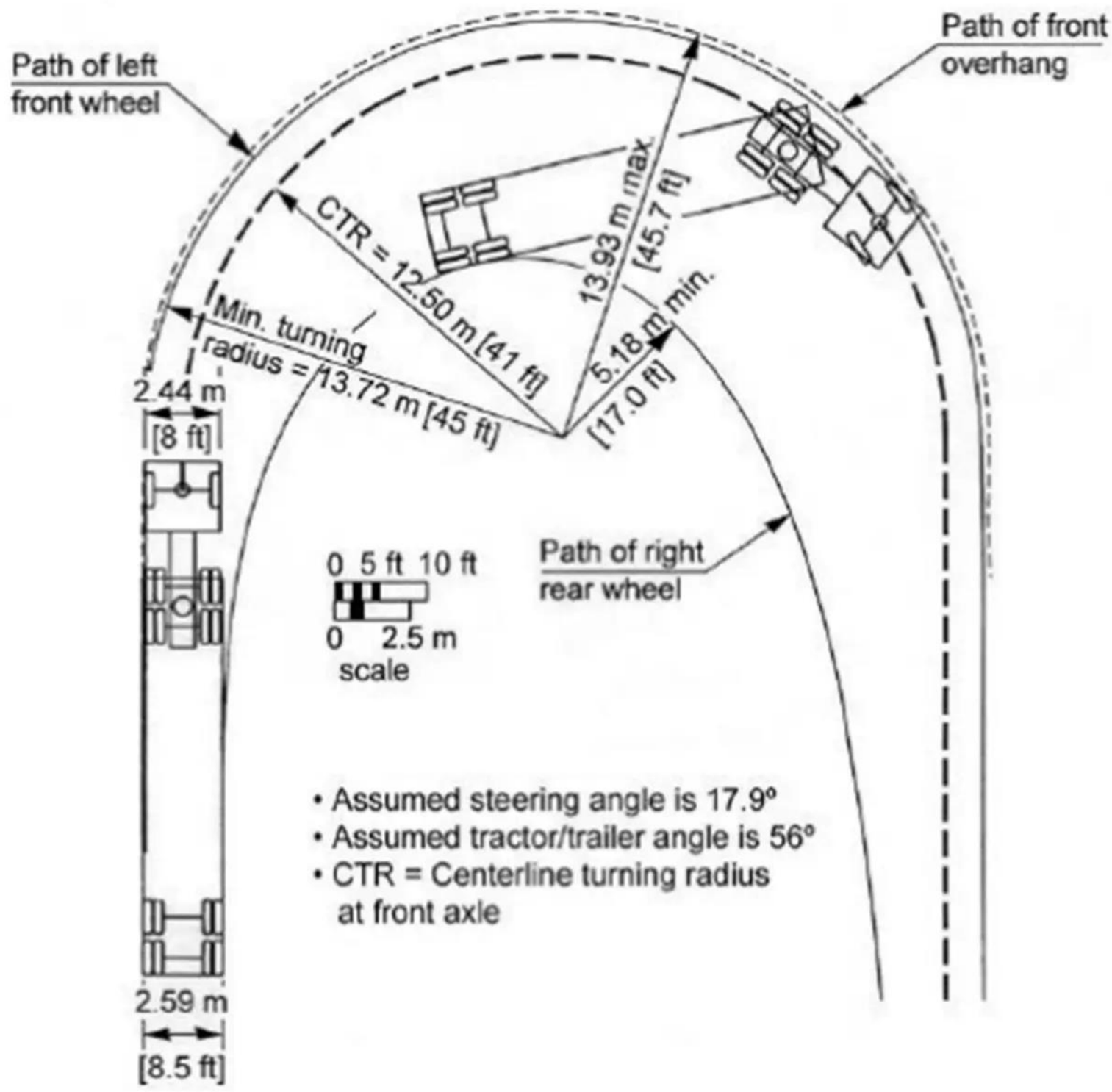
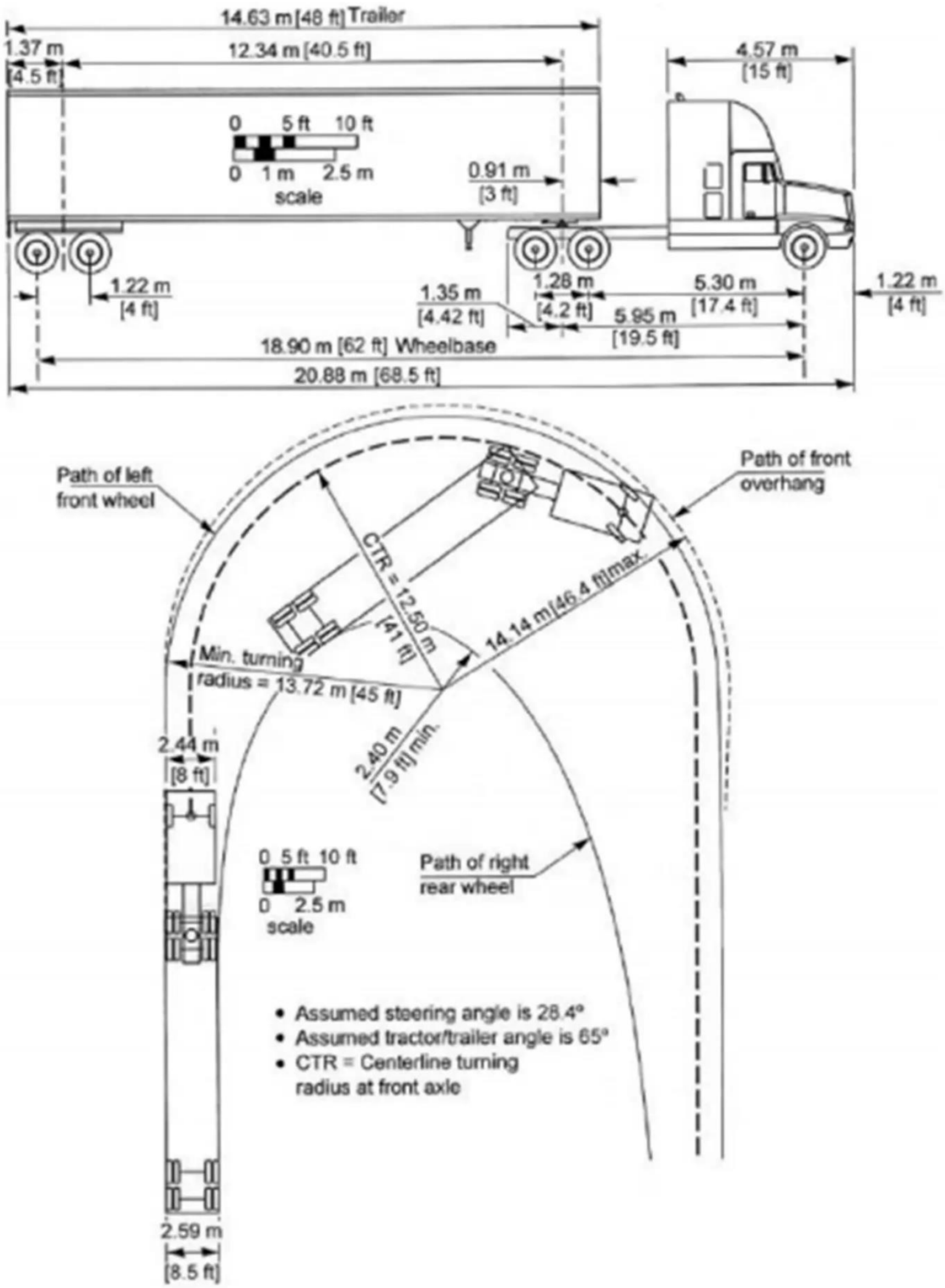


Exhibit 2-14. Minimum Turning Path for Intermediate Semitrailer (WB-15 [WB-50]) Design Vehicle


14.63 m [48 ft] Trailer
1.37 m [4.5 ft]
12.34 m [40.5 ft]
4.57 m [15 ft]
0 5 ft 10 ft
0 1 m 2.5 m
scale
0.91 m [3 ft]
1.22 m [4 ft]
1.35 m [4.42 ft]
1.28 m [4.2 ft]
5.30 m [17.4 ft]
5.85 m [19.5 ft]
1.22 m [4 ft]
18.90 m [62 ft] Wheelbase
20.88 m [68.5 ft]
Path of left front wheel
Path of front overhang
CTR = 12.50 m [41 ft]
14.14 m [46.4 ft] max.
Min. turning radius = 13.72 m [45 ft]
2.40 m [7.9 ft] min.
2.44 m [8 ft]
0 5 ft 10 ft
0 2.5 m
scale
Path of right rear wheel
• Assumed steering angle is 28.4°
• Assumed tractor/trailer angle is 65°
• CTR = Centerline turning radius at front axle
2.59 m [8.5 ft]

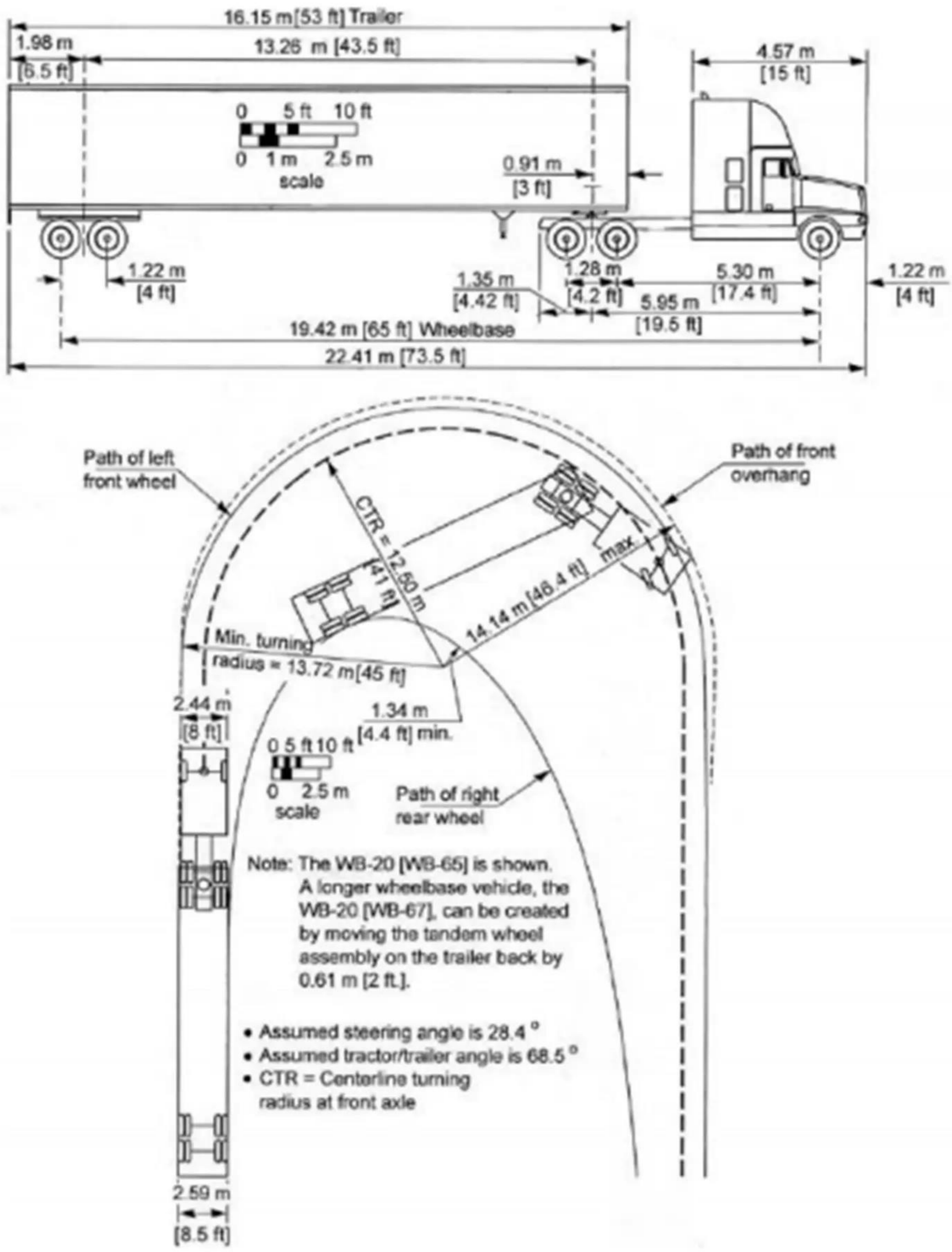


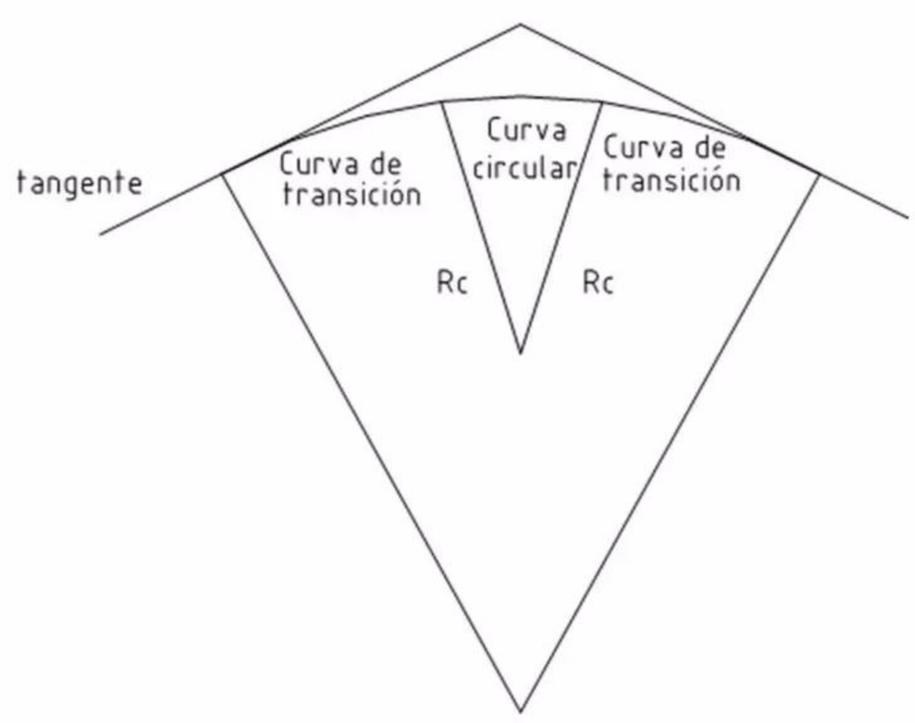
Exhibit 2-16. Minimum Turning Path for Interstate Semitrailer (WB-20 [WB-65 and WB-67]) Design Vehicle

Curvas de transición

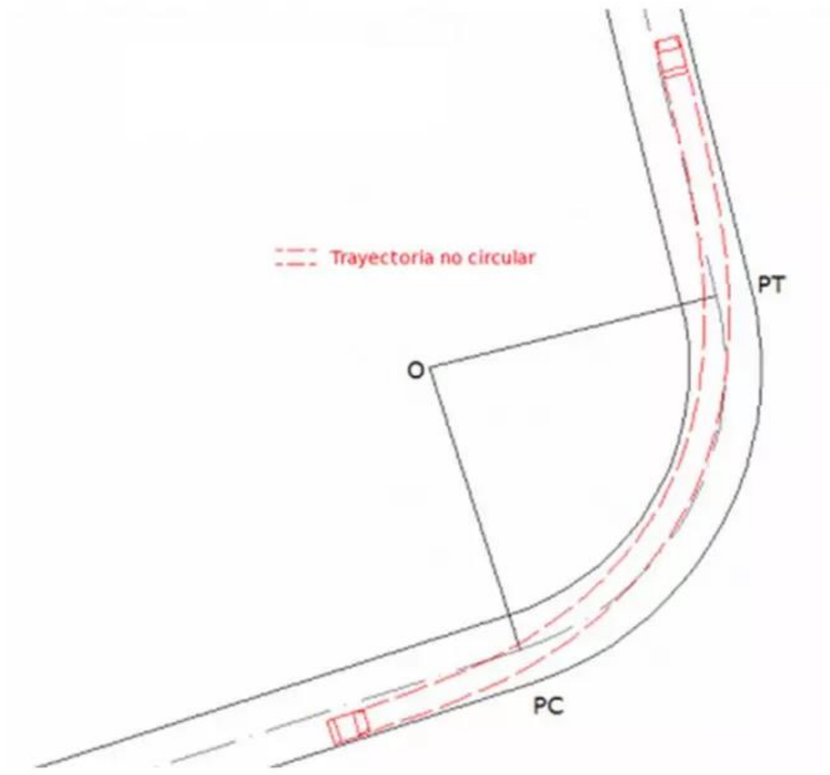
Las curvas de transición inicialmente se aplicaron en el trazado de líneas férreas a finales del siglo XIX mientras que para las carreteras su uso se inicia en la década de los treinta en el siglo pasado. Para dar seguridad al recorrido de los vehículos desde una sección en recta ó tangente de una carretera a una determinada curva horizontal circular, los conductores desarrollan a su manera y en ocasiones invadiendo el carril vecino, una curva que podría denominarse de transición. (SIECA, 2004)

El alineamiento horizontal con curvas circulares simples está compuesto por tramos rectos enlazados por arcos circulares. Un tramo recto, o en tangente, presenta un radio de curvatura infinito mientras que un arco circular presenta una radio de curvatura constante lo que significa que en el PC y PT de una curva circular se presenta un cambio brusco y puntual de curvatura, ocasionando a su vez un cambio inmediato en la fuerza centrífuga. Lo anterior obliga a los conductores a desarrollar una trayectoria errónea durante un tramo de vía, principalmente a la entrada y salida de las curvas, mientras se asimila el cambio en dicha fuerza centrífuga. (OSPINA, 2002)

Cuando un vehículo requiere pasar de un tramo en tangente a otro en curva circular, se procura que sea en forma gradual, tanto en el cambio de dirección como en la sobreeelevación y la ampliación que se mantienen en la curva circular. Para lograr este cambio gradual, se utilizan comúnmente las curvas de transición.

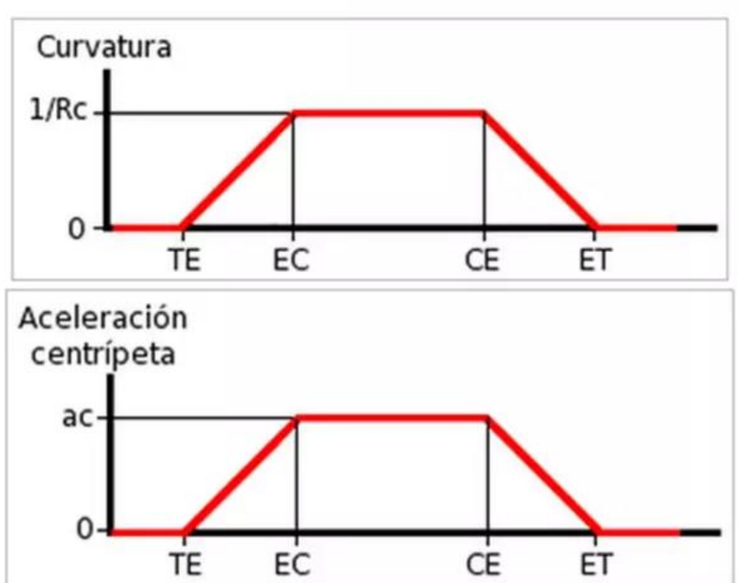


Tenemos certeza de una cosa: cuando uno conduce el vehículo siente que se va a salir de la curva (especialmente si la velocidad que trae es más alta que la que permite la curva) y reacciona aplicando la dirección hacia adentro de la curva con mayor vigor, provocando que la trayectoria que sigue el auto no describa en realidad una curva circular, causando además una situación potencial de accidente porque invade el carril en el que circulan los vehículos en sentido contrario (en una carretera de dos carriles y dos sentidos). Para remediar esto se han venido utilizando curvas de transición entre la recta y la curva circular que apaciguan la sensación causada por la curvatura y por la aceleración centrípeta. (doblevia.wordpress.com)



Una curva de transición es básicamente la que liga una tangente con una curva circular, que permita un cambio gradual de curvatura entre una recta y una curva circular mejorando de manera sostenible la comodidad, seguridad y estética en una vía. A lo largo de ésta se efectúa un cambio gradual en el valor del radio de curvatura, desde infinito (en la tangente) hasta el correspondiente a la curva circular. Por tanto su uso conduce a una mayor seguridad, o rodadura más suave y a una alineación más elegante en la carretera.

Estas curvas de transición deben cumplir un objetivo claro: La transición de la curvatura y la de la aceleración centrípeta debe ser constante a lo largo del desarrollo de la curva de transición. Es decir, el radio debe disminuir en una proporción constante a medida que se avanza en la curva, al tiempo que la aceleración centrípeta aumenta. (doblevia.wordpress.com)



El diseño de curvas de transición está determinada por el Radio y la Velocidad de Proyecto, ya que cuánto menor es el radio de la curva circular y mayor la velocidad es necesario hacer uso de estas curvas.

- *Cuando la velocidad de proyecto sea mayor a los 60 km/hr.*
- *Cuando el radio sea mayor a los 1500 mts, no se necesitan curvas de transición. Las normas SIECA establecen en su sección 4-45 literalmente que "En curvas con radio circular de 1,500 metros o más, no se necesitan transiciones, se pasa directamente de la tangente a la alineación circular. En esta situación se recomienda que el peralte se*

desarrolle 2/3 en la tangente y 1/3 al principio de curva circular.

Se pueden usar varios tipos de curvas para la transición, tales como: Curvas circulares de radio mayor al de la curva central, la curva elástica, lemniscata de Bernoulli, espiral cúbica, Espiral de Searles, Curva de transición de óvalos de Cassini o curva elástica (radioide a las abscisas), Curva de transición de Schram (parábola de cuarto grado), la parábola cúbica y Clotoide o espiral de Euler (radioide a los arcos); que es la que más se utiliza, ya que tiene mejores características que las anteriores.

Ventajas de uso de las Curvas Transición

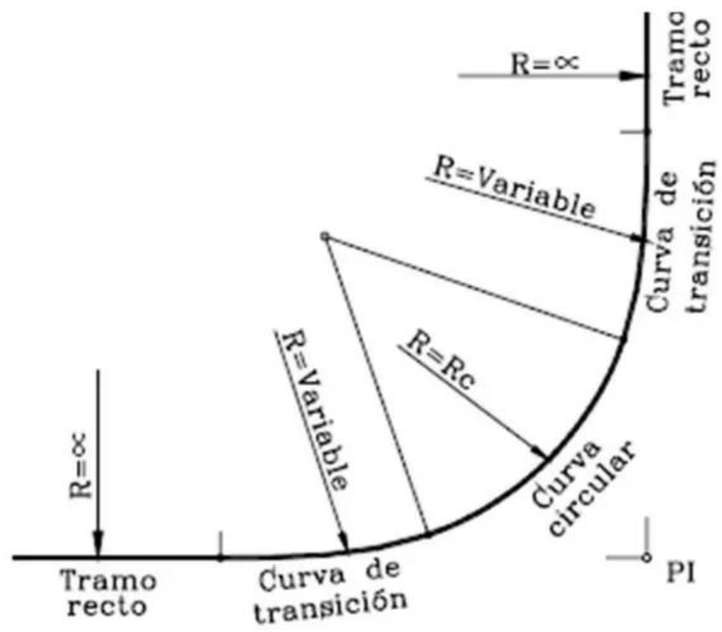
1. Se obtiene un cambio gradual de curvatura desde cero, en el punto de unión de las tangentes con las curvas de transición a G° en la unión de la curva de transición con la curva circular correspondiente.

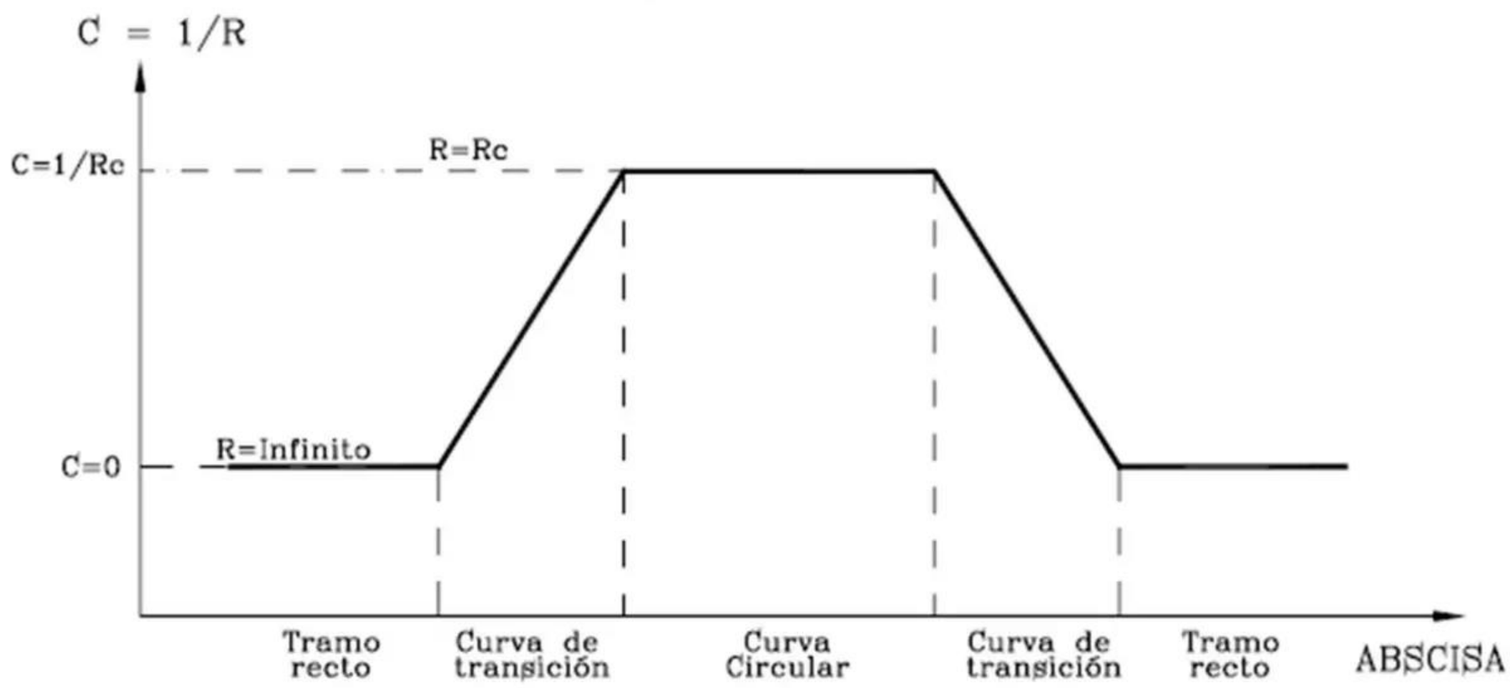
2. Prevé suficiente longitud para efectuar la transición del peralte y del sobreancho y para que en cada punto el peralte esté de acuerdo con el grado de curvatura.

3. Permite que los vehículos puedan circular a mayores velocidades, con la seguridad y comodidad debida y que los conductores de éstos puedan y estén animados a mantenerse dentro del carril por donde circulan.

4. Su uso tiende a aminorar el efecto de las fuerzas centrífugas y por tanto a disminuir la incomodidad y el peligro en las curvas.

5. Permitirá conducir a una velocidad uniforme en todo el recorrido de la vía.





Permiten desarrollar la transición del peralte de forma que el valor de este en cualquier punto corresponda al requerido por la curvatura en dicho punto.

Cuando se tienen alineamientos sólo con líneas y arcos circulares se tiene que en el punto de tangencia entre estos dos elementos se debe pasar de un peralte de cero a un peralte requerido para la curva de acuerdo al valor del radio y fuerza centrifuga. Lo anterior obliga a que este cambio de peralte, que debe ser gradual, se desarrolle ya sea en la recta, en el arco circular o en ambos elementos. Cualquiera que sea la solución genera problemas tanto de incomodidad como de inseguridad. Si la transición del peralte se realiza en su totalidad en la recta entonces se está generando cierto grado de incomodidad ya que no se requiere peralte en una recta.

Si se desarrolla la transición en la curva circular entonces se está generando inseguridad ya que tanto a la entrada como a la salida de la curva se esta suministrando un valor de peralte inferior al requerido. Además esta solución no es posible en muchas ocasiones debido a que la longitud de la curva circular es relativamente corta.

Sobreelevación o peralte

Cuando un vehículo se desplaza a lo largo de una trayectoria circular, la fuerza centrífuga tiende a moverlo hacia fuera, lo que ocasiona una situación potencial de inestabilidad. La fuerza centrífuga es contrarrestada por la componente del peso del vehículo en relación con la

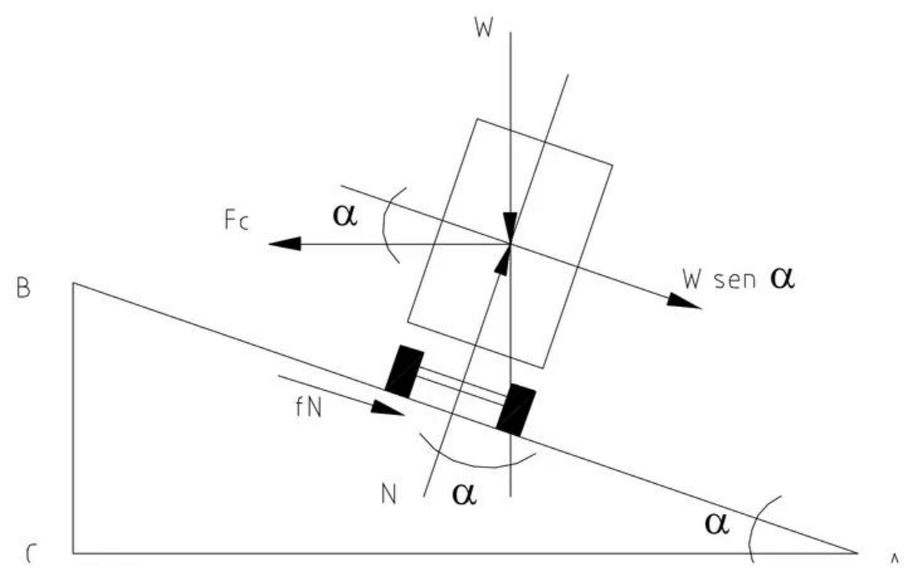
sobreelevación del camino o la fricción lateral generada entre las llantas y la superficie de rodamiento, o una combinación de ambos factores. (Fonseca Rodríguez, 2010)

El peralte, sobreelevación o superelevación es la pendiente que se da a la corona hacia el centro de la curva para contrarrestar parcialmente el efecto de la fuerza centrífuga que actúa sobre un vehículo al recorrer una curva horizontal.

La inestabilidad debida a la fuerza centrífuga puede manifestarse de dos maneras: por deslizamiento o por volteo. Precisamente, las fórmulas tradicionales para calcular la sobreelevación se basan en el equilibrio de fuerzas para que un vehículo no deslice o gire sobre su eje longitudinal al transitar por una curva.

Para que las fuerzas estén en equilibrio:

$$W * sen\alpha + f * N = Fc * \cos\alpha \; ; \qquad (1)$$



en donde:
W= Peso del vehículo
α= Ángulo de la sobreelevación
f= Coeficiente de fricción lateral
N= W*cos α
Fc= Fuerza centrífuga

Si utilizamos las siguientes relaciones de dinámica:

$$Fc = m * a; \quad a = \frac{V^2}{R}; \quad m = \frac{W}{g}$$

Substituyendo en la ecuación (1):

$$W * \text{sen}\,\alpha + f * W * \cos\alpha = \frac{WV^2}{gR}\cos\alpha \; ; \qquad (2)$$

Dividiendo entre **Wcos** α queda la siguiente expresión:

$$tan\alpha + f = \frac{V^2}{gR} \quad \text{o} \quad tan\alpha = \frac{V^2}{gR} - f \; ; \qquad (3)$$

Si se substituye el valor de g en la ecuación (3) y V se considera en km/h resulta la expresión:

$$tan\alpha = 0.00787\frac{V^2}{R} - f\ ; \qquad (4)$$

tanα se conoce como la sobreelevación, en m/m y se denota como S en el proyecto geométrico.

El coeficiente de fricción con el cual se produce el deslizamiento del vehículo sobre la superficie depende de varios factores, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- La velocidad del vehículo.
- El tipo de superficie de rodamiento.
- La condición de la superficie de rodamiento.
- El tipo de llantas.
- La condición llantas.

En Nicaragua los valores de sobreelación máximos, tomado de manual centroaméricano. SIECA. Sección 4-36, son:

Tasa de Sobreelevación, "e" en (%)	Tipo de Area
10	Rural montañosa
8	Rural plana
6	Suburbana
4	Urbana

La ecuación que es usada ampliamente para determinar el peralte de diseño es es:

$$e = \frac{e_{máx}}{{G_{máx}}^2} * (2G_{máx} - G) * G$$

Donde:

e: Peralte que corresponde a la curva de Grado G. (Peralte de diseño)
e máx: Peralte máximo (PAG 4.36 SIECA)
G máx: Grado de curvatura máximo por estabilidad que puede dársela a las curvas en la carretera.
G: Grado de diseño de la curva objeto en estudio

Otra forma de ver la ecuación es

$e_D = e_{máx} - (e_{máx}\ (e_{máx} - G_D/E_{máx})^2)$

Donde $e_{máx}$ es el peralte máximo
Gd: grado de curvatura de diseño

En general si Si $e_D < 3\%$ ES UNA CURVA CIRCULAR SIMPLE

Este igual se redondea a múltiplos de medio grado.

Una vez fijada la sobreelevación máxima, el grado máximo de curvatura queda definido para cada velocidad por medio de la siguiente expresión:

$$G\max = \frac{145{,}606\left(f + S\max\right)}{V^2}$$

F: coeficiente de fricción lateral.
Smax: peralte o tasa de sobreelevación máximo.

En México, la SCT especifica que la sobreelevación deberá ser calculada proporcionalmente al grado de curvatura:

$$\frac{S\max}{G\max} = \frac{S}{G}$$

Por lo tanto, para un grado G cualquiera:

$$S = \frac{Smax}{Gmax} G$$

Las normas centroamericanas en su sección 4-41 establecen las siguientes longitudes de desarrollo de sobreelevaciones.

Cuadro 4.11

Longitudes de Desarrollo de la Sobreelevación en Carreteras de dos Carriles, en metros

Peralte	Longitud de Transición y Velocidades de Diseño Km/h							
	40	50	60	70	80	90	100	110
	Carriles de 3.60 metros							
0.02	25	30	35	40	50	55	60	65
0.04	25	30	35	40	50	55	60	65
0.06	35	35	40	40	50	55	60	65
0.08	45	45	50	55	60	60	65	70
0.10	55	55	60	65	75	75	80	85
0.12	65	65	75	80	90	90	95	105
	Carriles de 3.00 metros							
0.02	25	30	35	40	50	55	60	65
0.04	25	30	35	40	50	55	60	65
0.06	30	30	35	40	50	55	60	65
0.08	35	40	40	45	50	55	60	65
0.10	45	45	50	55	60	65	70	75
0.12	55	55	60	65	75	75	80	85

Fuente: AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 1994, p. 179

Según SIECA en sección 5-22, en intersecciones a nivel, la sobreelevación máxima de las curvas debe ser del 10 por ciento, recordando que en carretera abierta y condiciones favorables del clima la sobreelevación alcanza hasta un máximo tolerable de 12 por ciento.

Sobreelevación en Curvas de Intersecciones

Radio (m)	Rangos de Sobreelevación, %					
	Velocidades de Diseño Curvas, km/h					
	20	30	40	50	60	70
15	2-10	-	-	-	-	-
25	2-7	2-10	-	-	-	-
50	2-5	2-8	4-10	-	-	-
70	2-4	2-6	3-8	6-10	-	-
100	2-3	2-4	3-6	5-9	8-10	-
150	2-3	2-3	3-5	4-7	6-9	9-10
200	2	2-3	2-4	3-5	5-7	7-9
300	2	2-3	2-3	3-4	4-5	5-6
500	2	2	2	2-3	3-4	4-5
700	2	2	2	2	2-3	3-4
1000	2	2	2	2	2	2-3

Fuente: AASHTO, A Policy on Geometric Desig of Highways and Streets, 1994, p, 730

Longitud de transición del peralte

Según (OSPINA, 2002), para llevar a cabo el cambio de la sección transversal de una vía en tangente, cuya inclinación se denomina bombeo, a la sección transversal con el peralte requerido en una curva, se necesita establecer o diseñar una transición entre estas dos.

Se llama longitud de transición, o simplemente transición, a la distancia en que se efectúa el cambio de la sección normal en tangente a la sección con peralte pleno en la curva. Dicha transición está compuesta por dos distancias.

La primera distancia es la transición del bombeo, o sea la distancia requerida para eliminar el peralte adverso, correspondiente al bombeo de sentido contrario al del peralte de la curva. A lo largo de esta transición la pendiente del carril y la de la berma de la parte exterior de la curva pasa de la pendiente del bombeo, usualmente 2.0%, a una pendiente de 0.0%. Esta longitud la llamaremos N. Se conoce también como longitud de aplanamiento.

La segunda distancia es la transición del peralte propiamente dicha, que es la distancia en la cual adquiere el peralte total requerido por la curva. Inicialmente se eleva de forma constante el borde exterior de la vía a partir de la sección con peralte 0.0% hasta el punto donde adquiere la pendiente del bombeo pero con valor positivo, mientras que el borde interno permanece fijo. A partir de este punto comienza a bajar el borde interior mientras que el exterior continúa subiendo, ambos a la misma rata y formando un solo plano, hasta el punto donde dicho plano adquiere la pendiente correspondiente al peralte necesario para la curva.

LT: Es la distancia comprendida entre el punto correspondiente al peralte máximo de la curva y el punto de intersección de los perfiles longitudinales del borde exterior y del eje del camino.

*LT= m*a*e*

N: Se define como la longitud necesaria para la transición del hombro exterior de la curva, desde –b a 0%.
*N= m*a*b*

El valor del bombeo típico en Nicaragua es 3%.

Métodos de Desarrollo de peralte

Una vez calculado el valor del peralte que deberá tener la curva circular es necesario proporcionarlo de una forma gradual, es decir convertir la forma de la sección transversal de la calzada bombeada del centro hacia los bordes, en una sección con inclinación única del peralte del borde exterior hacia el interior de la curva.

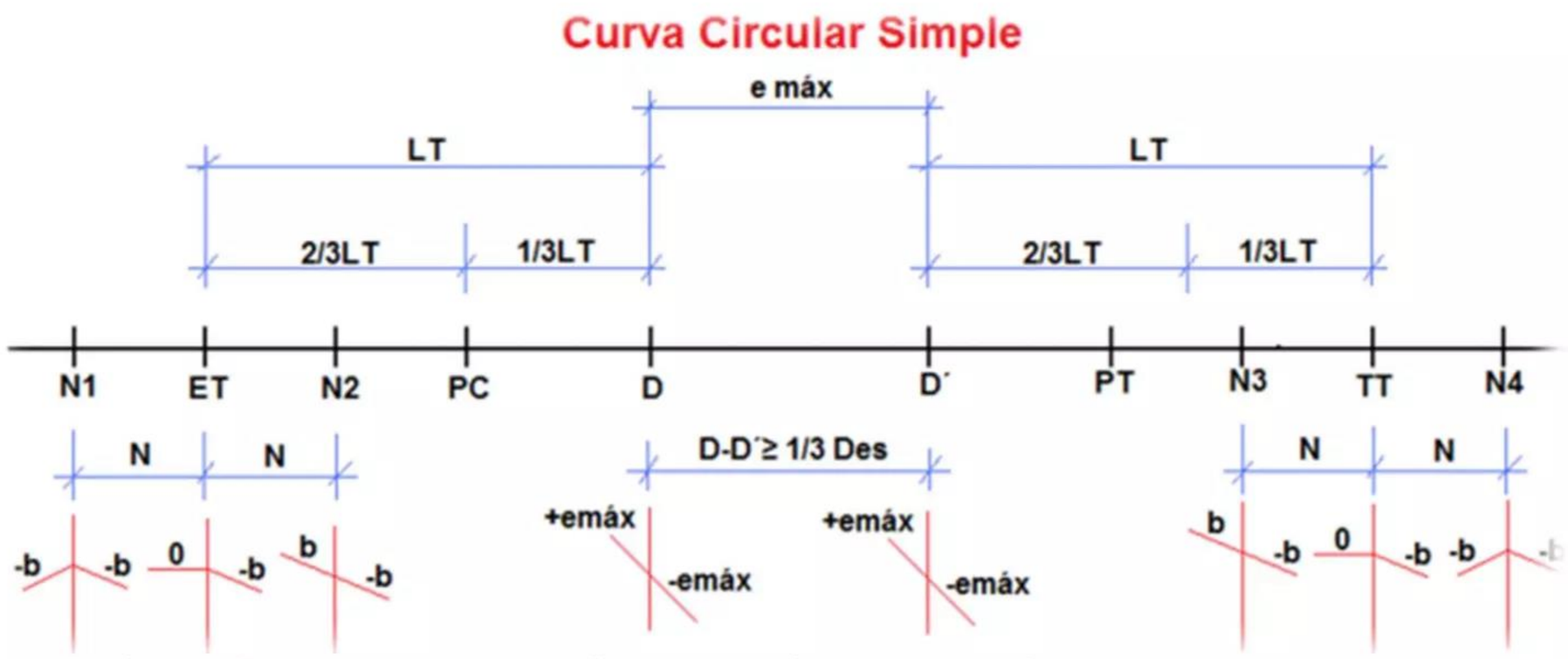
Son tres las formas de desarrollo del peralte.

Desarrollo del peralte por el eje de la vía*:* Este procedimiento es el más conveniente, ya que requiere menor longitud de transición y los desniveles relativos de los hombros son uniformes, en general es el procedimiento más utilizado ya que su simetría brinda una mayor comprensión y facilidad para el cálculo. Es conveniente en terraplenes donde se compensa lo que asciende en un borde con lo que baja en el borde opuesto. *Es decir que el eje de la vía o eje central de la carretera es la línea base alrededor de la cual va girando la sección transversal de la calzada, o parte de ella hasta alcanzar la inclinación necesaria.*

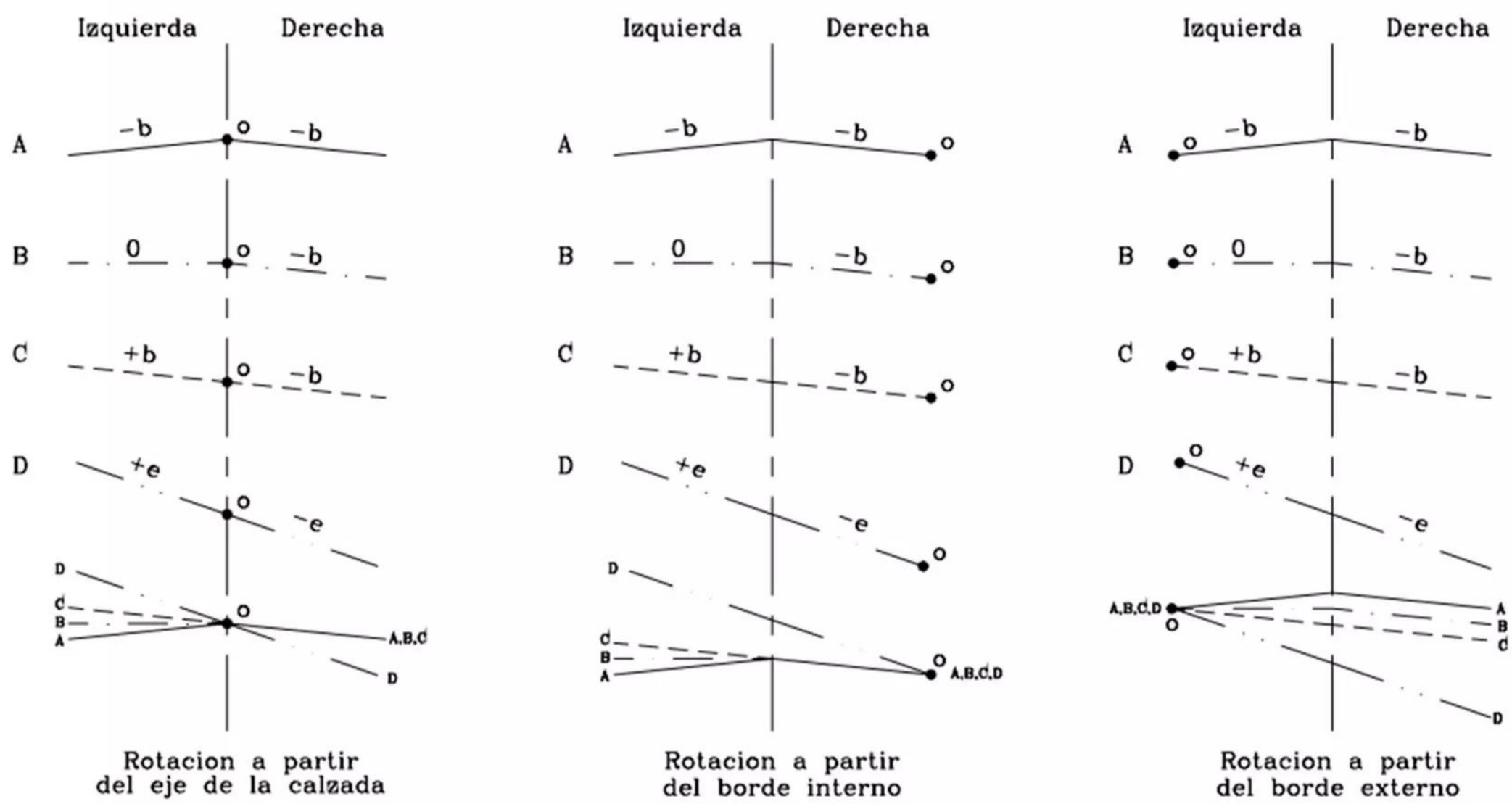
Desarrollo del peralte por el borde interior: Es el segundo más utilizado, en este caso la línea base alrededor de la cual gira la sección transversal de la calzada es el borde interior.

Desarrollo del peralte por el borde exterior. Transición del bombeo a la sobreelevació. El cambio gradual de bombeo a sobreelevación se realiza a lo largo de las espirales de transición.

Pero cuando la curva circular no tiene espirales de transición, la transición de la sobreelevación puede efectuarse sobre la tangente contiguas a la curva; sin embargo esta solución tiene el defecto que obliga al conductor a mover el volante de su vehículo en sentido contrario a la curva para no salirse del camino, esta maniobra puede ser molesta y peligrosa, por lo cual se recomienda dar parte de la transición en las tangentes y parte sobre la curva circular. Se ha determinado que las transiciones pueden introducirse en la curva hasta un 50%. (Campos, 2009)



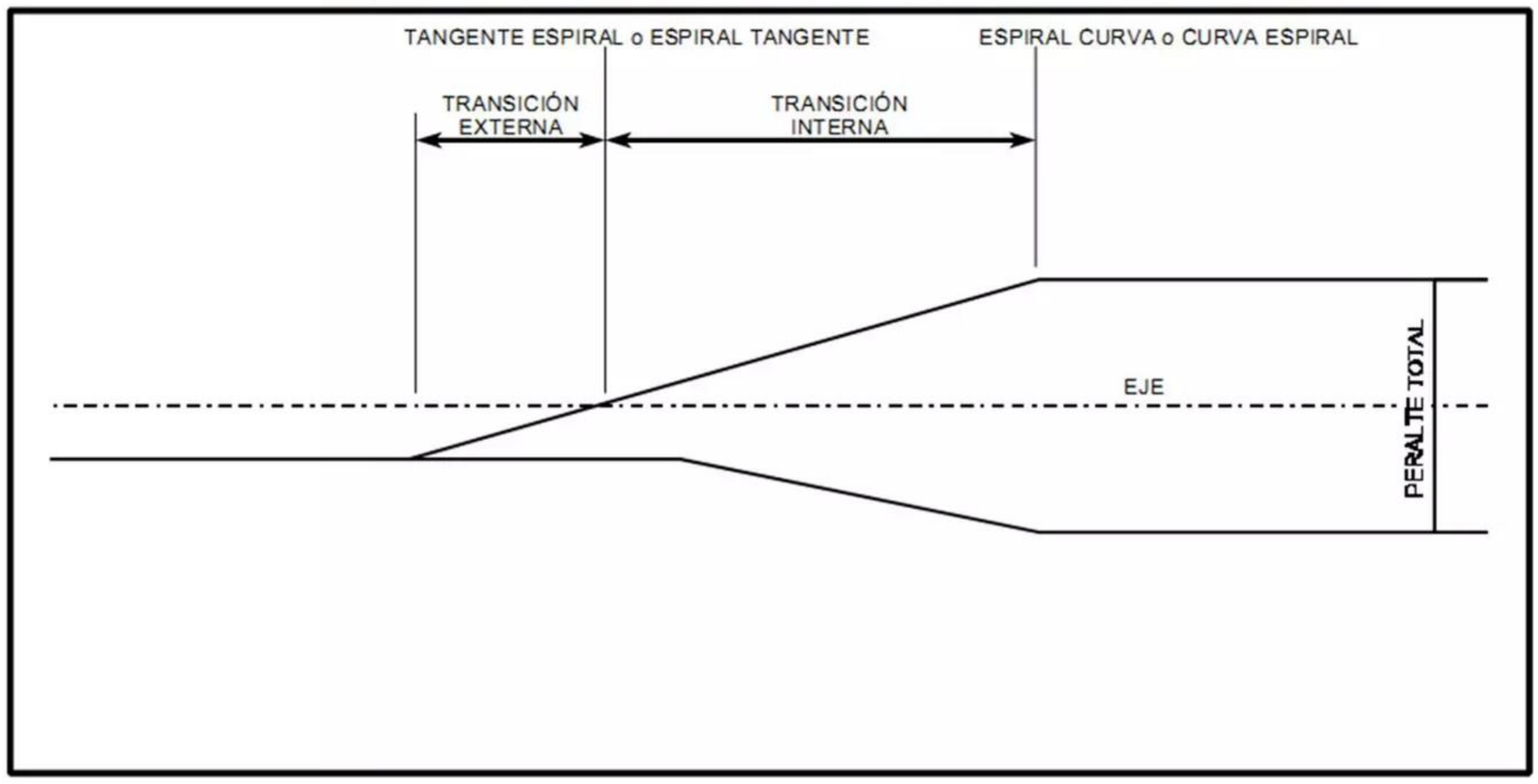
Gráficamente los métodos de desarrollo de peralte en sección se muestran a continuación:



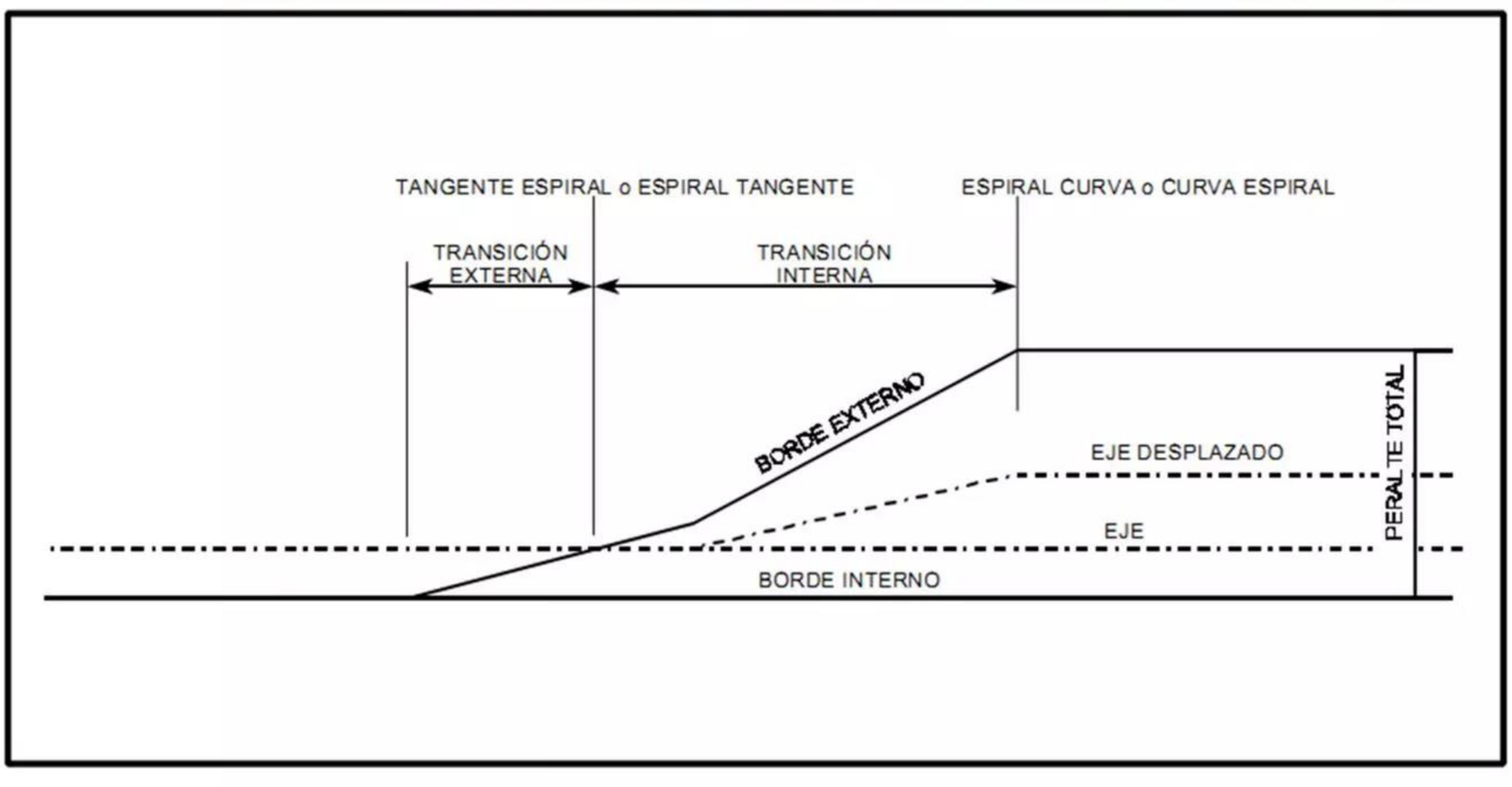
*Tomado de (OSPINA, 2002)

En perfil serán, tomado de (SIECA, 2004)

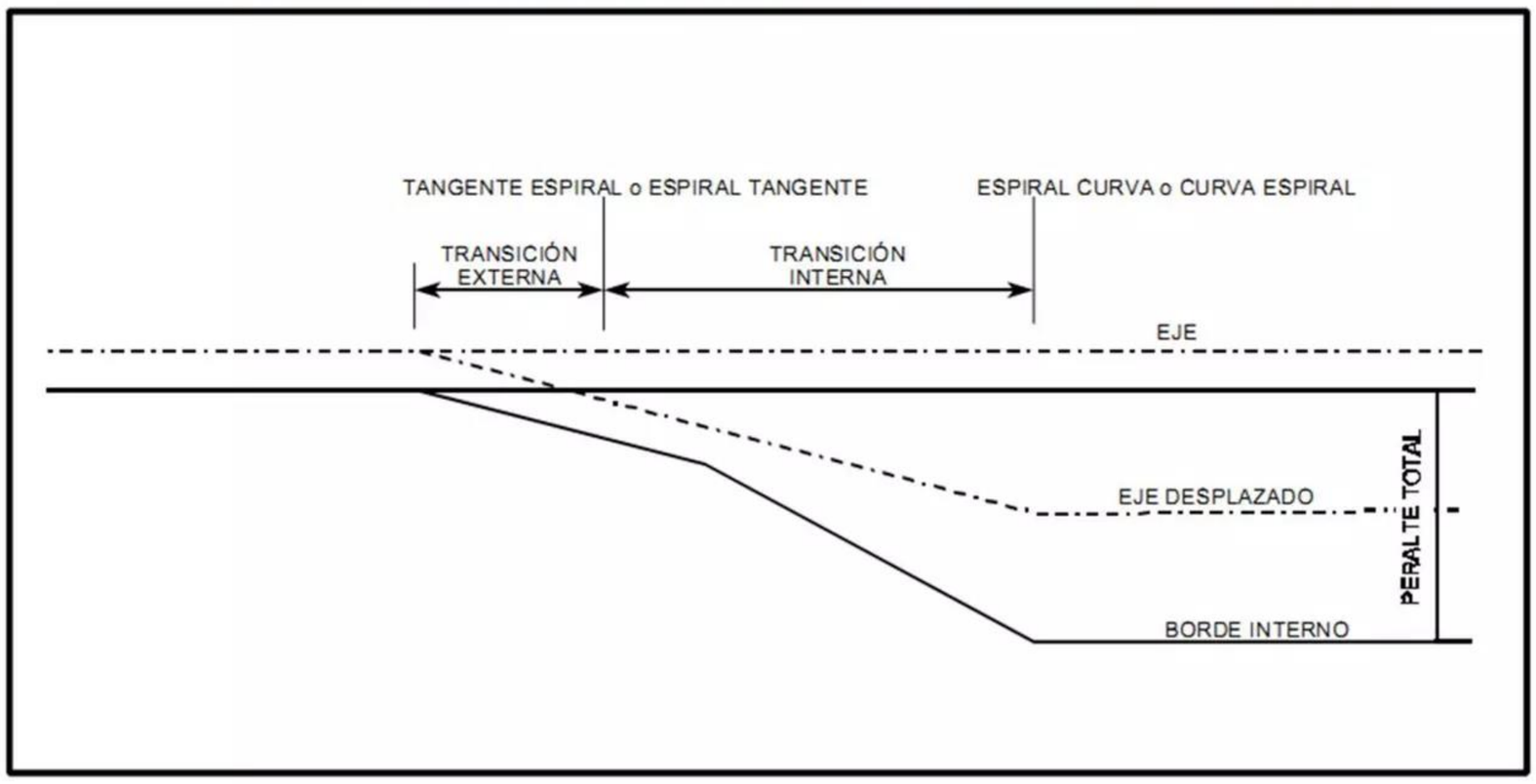
GIRO DEL PERALTE PARA TRANSICIÓN ESPIRAL - GIRO ALREDEDOR DEL EJE

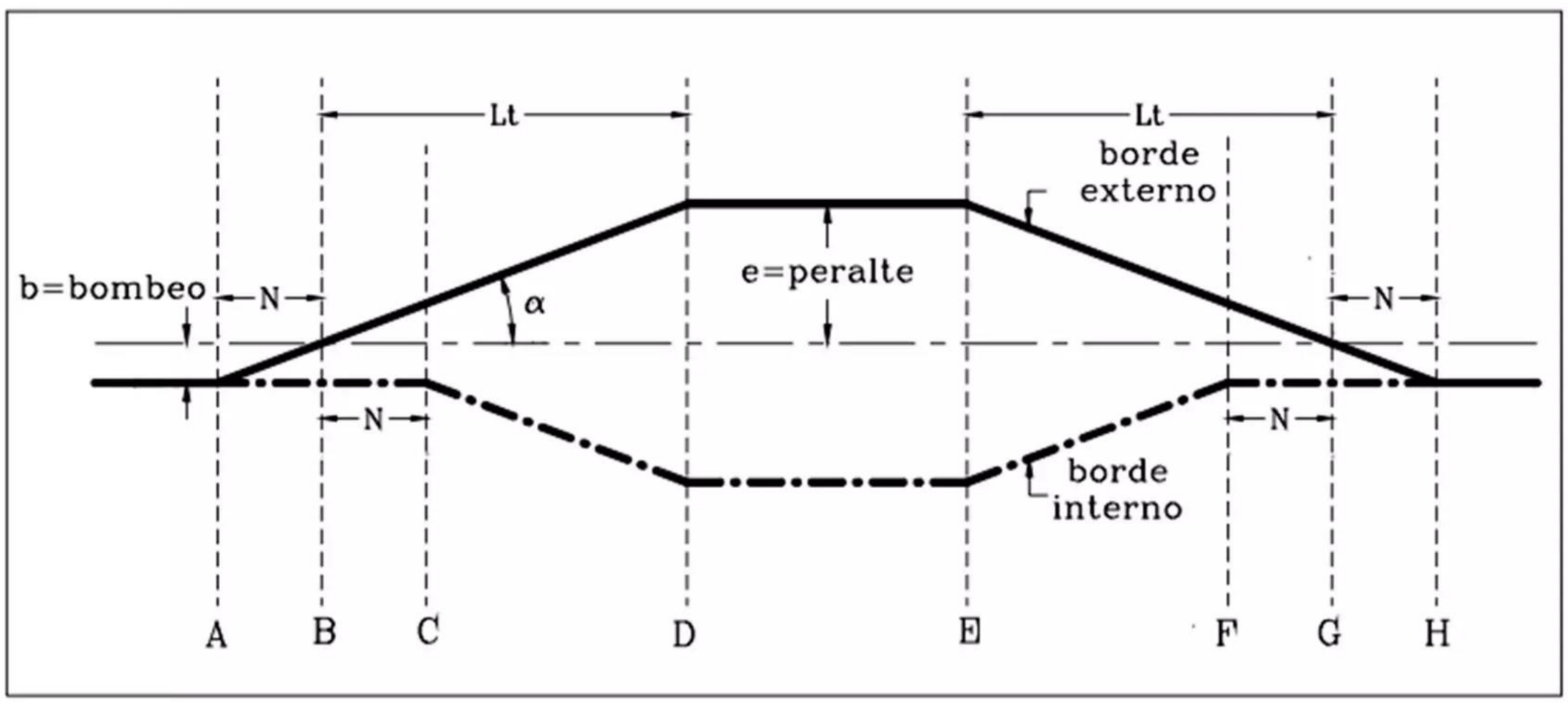


GIRO DEL PERALTE PARA TRANSICIÓN ESPIRAL - GIRO ALREDEDOR DEL BORDE INTERNO



GIRO DEL PERALTE PARA TRANSICIÓN ESPIRAL - GIRO ALREDEDOR DEL BORDE EXTERNO

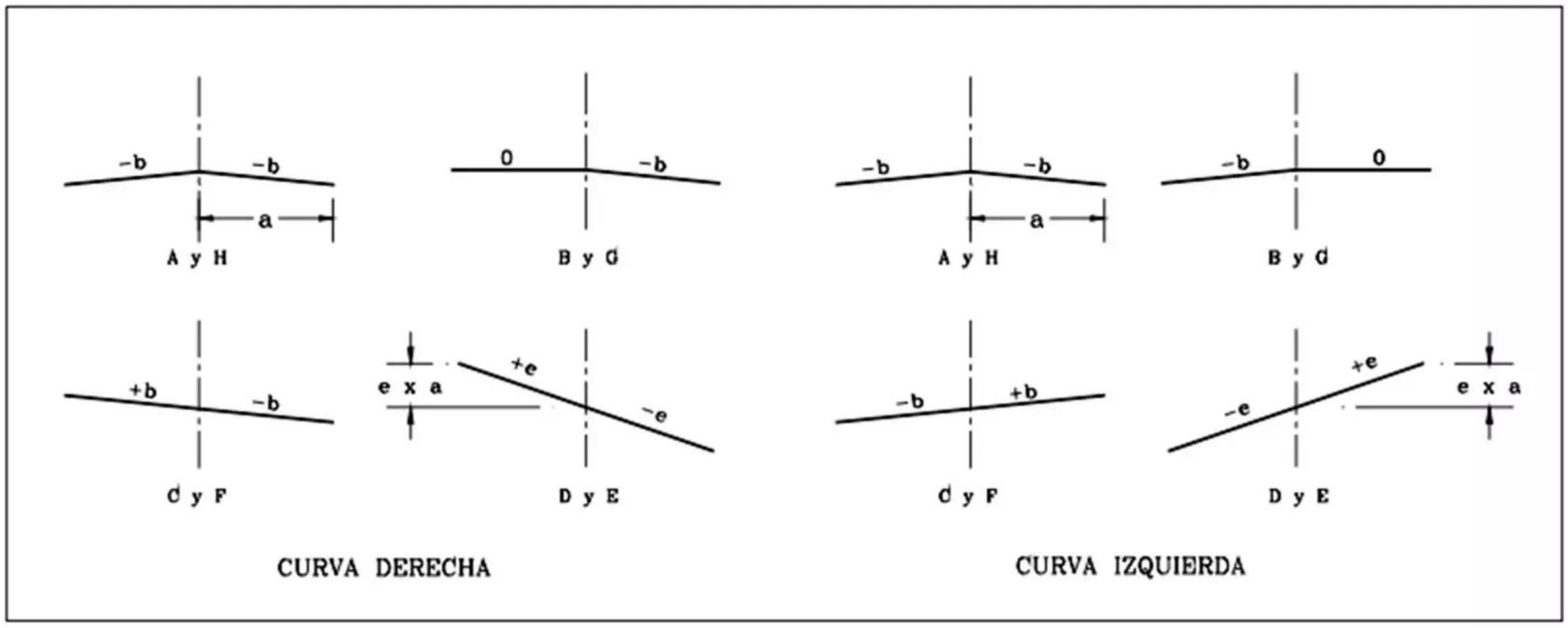




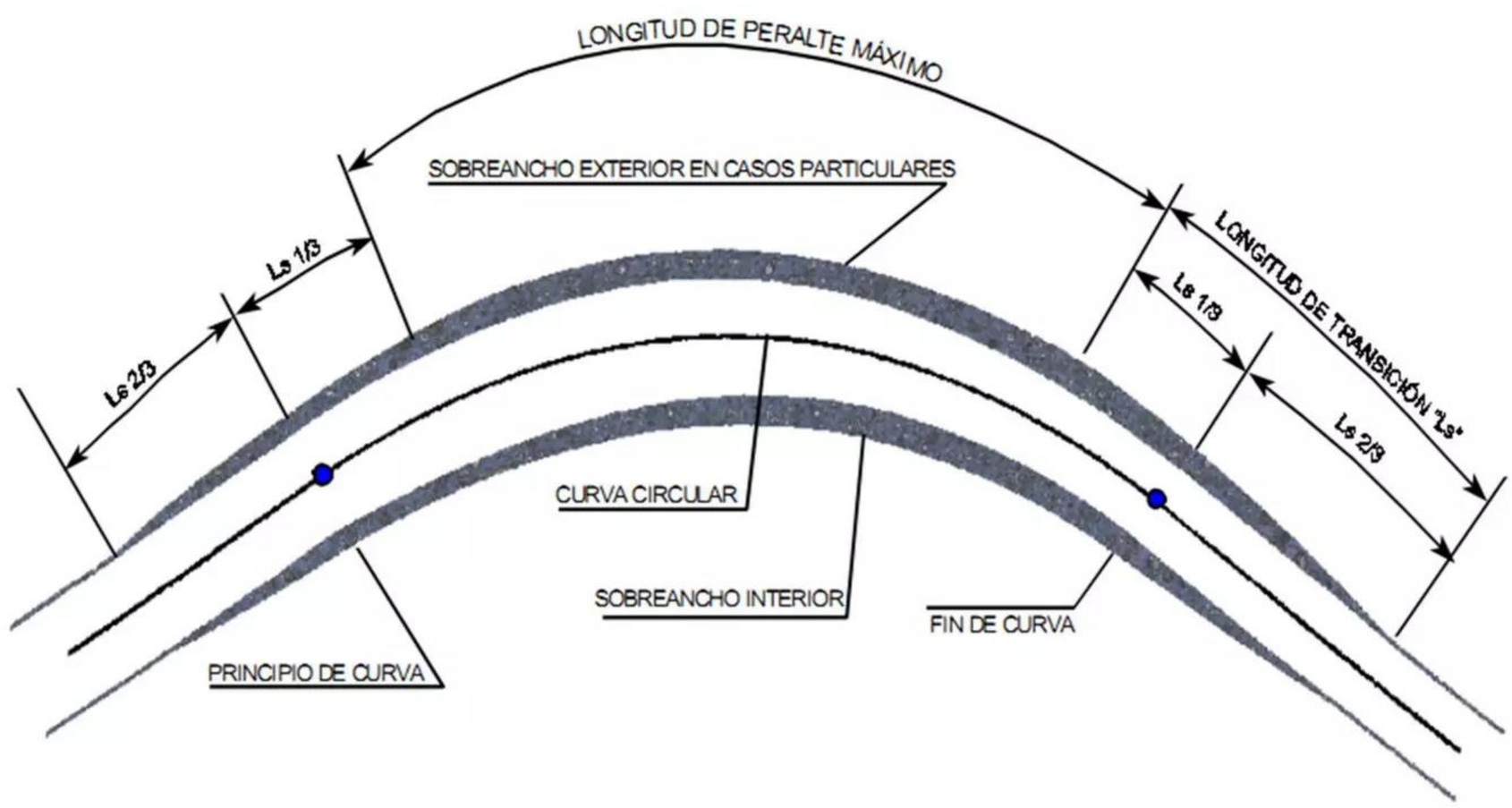
Se puede observar además, que la distancia B - C y F – G son iguales y equivalentes a N, ya que el cambio absoluto de peralte también es igual al bombeo. Al efectuar la transición, los bordes de la vía adquieren una pendiente diferente a a del eje, pendiente que debe permanecer constante a lo largo de toda la transición, tanto en la del bombeo como en la del peralte. (OSPINA, 2002)

* Gráficas tomadas de figura 67-68. Pág 294- 295. (OSPINA, 2002)

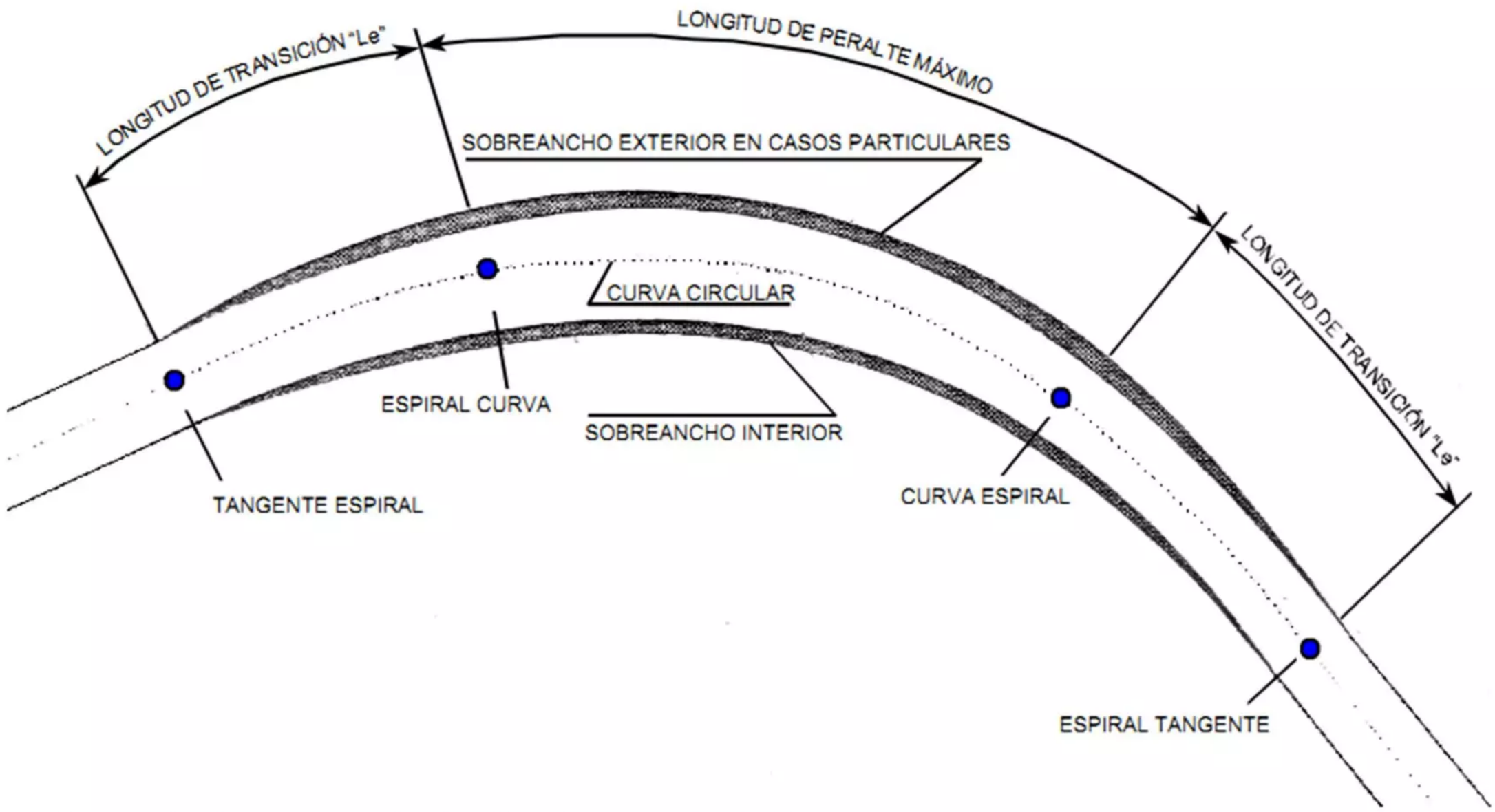
La sección transversal de la vía para cada uno de los puntos definidos en el esquema anterior y considerando si es una curva izquierda o derecha.



La figura siguiente tomada de SIECA, ilustra la transición simple del peralte y el sobreancho en una curva circular

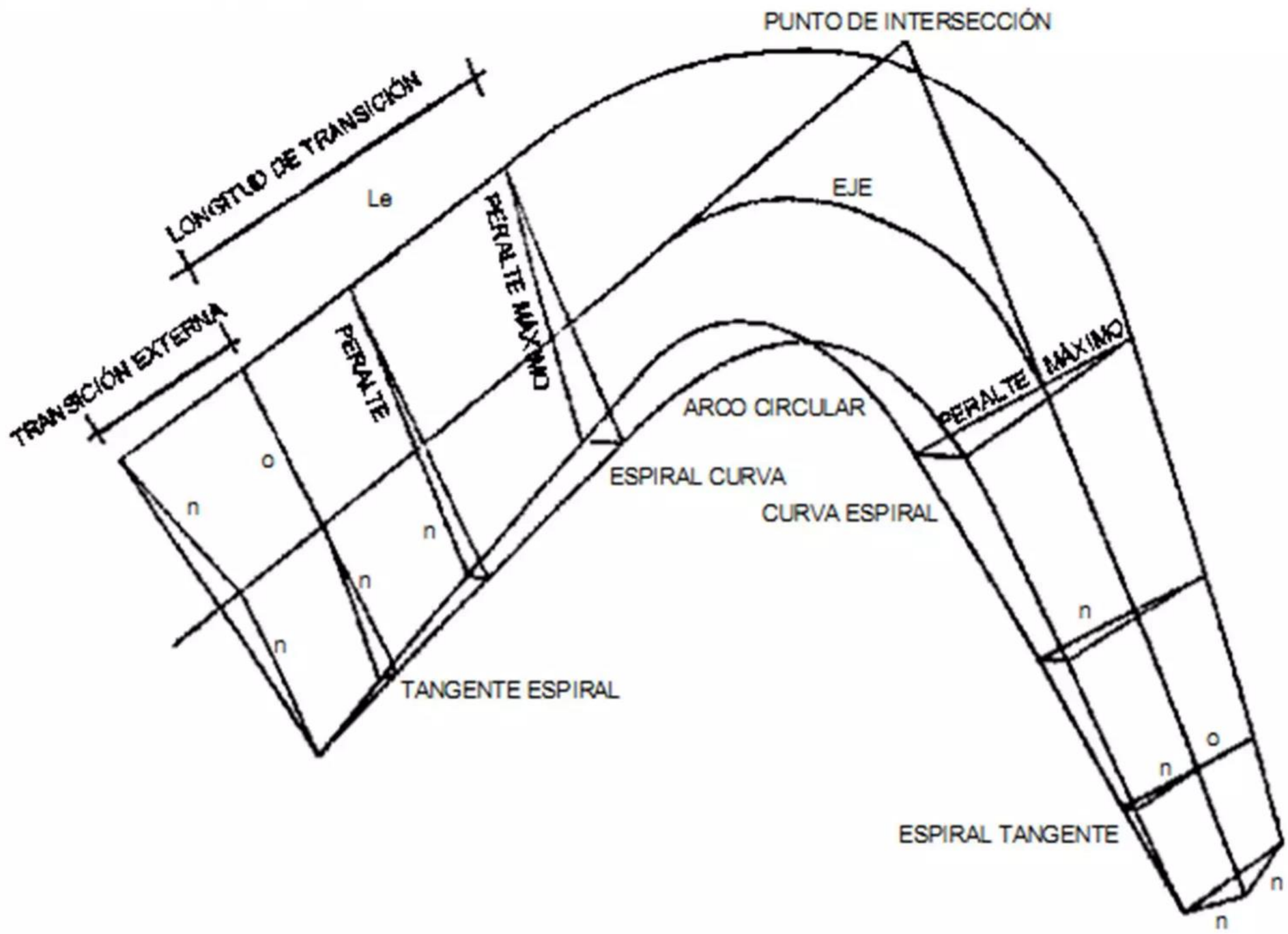


La figura siguiente tomada de SIECA, muestra la forma de proyectar la transición del peralte y el sobreancho cuando existe una longitud de transición en espiral, Le

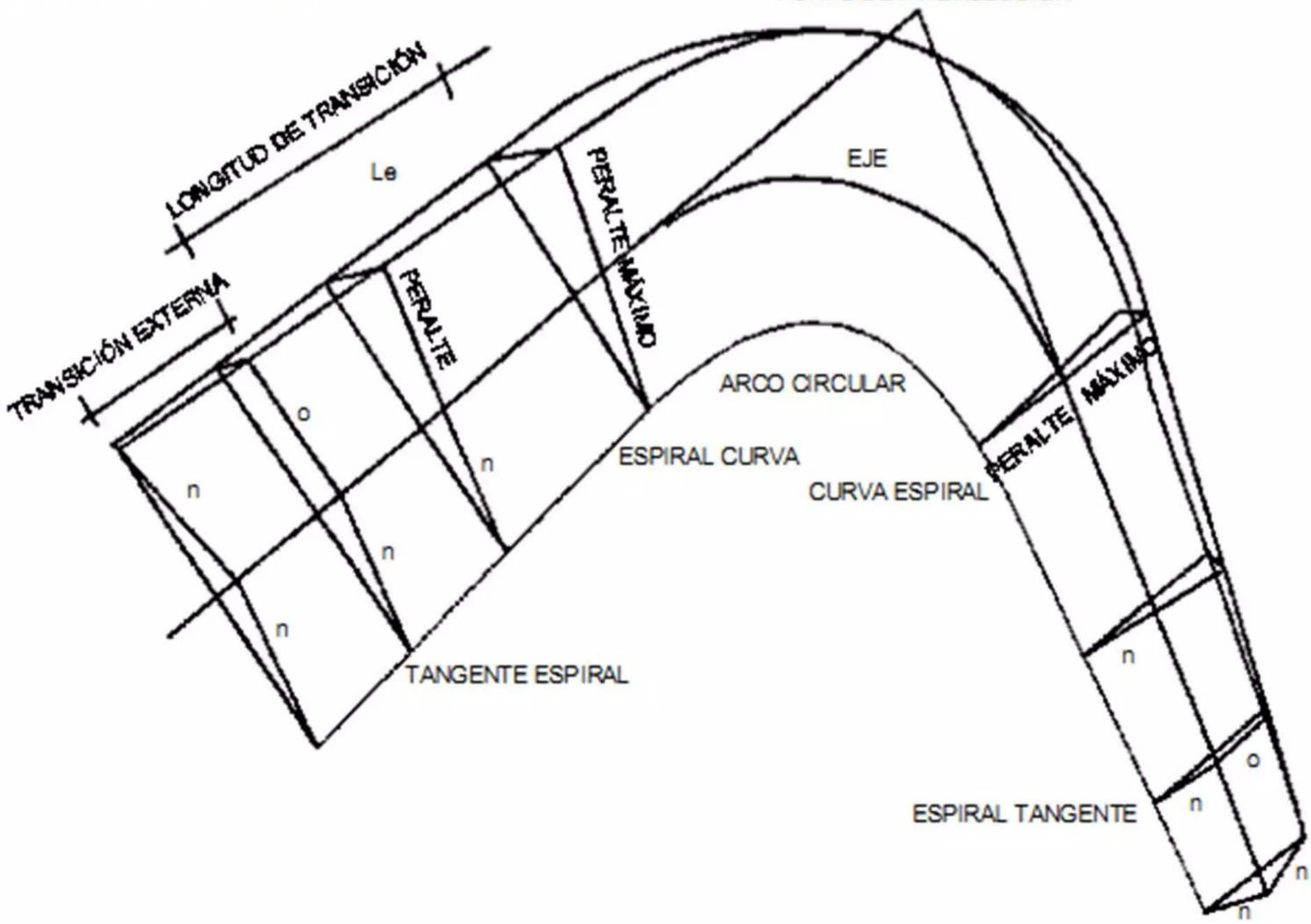


La figura siguiente tomada de SIECA, sección 4-52, muestra en planta como se mantiene inalterable la línea de la rasante longitudinal, mientras en la longitud de transición espiral se realiza el giro del peralte en relación al borde exterior o interior de la calzada.

(a) GIRO EN EL BORDE EXTERNO

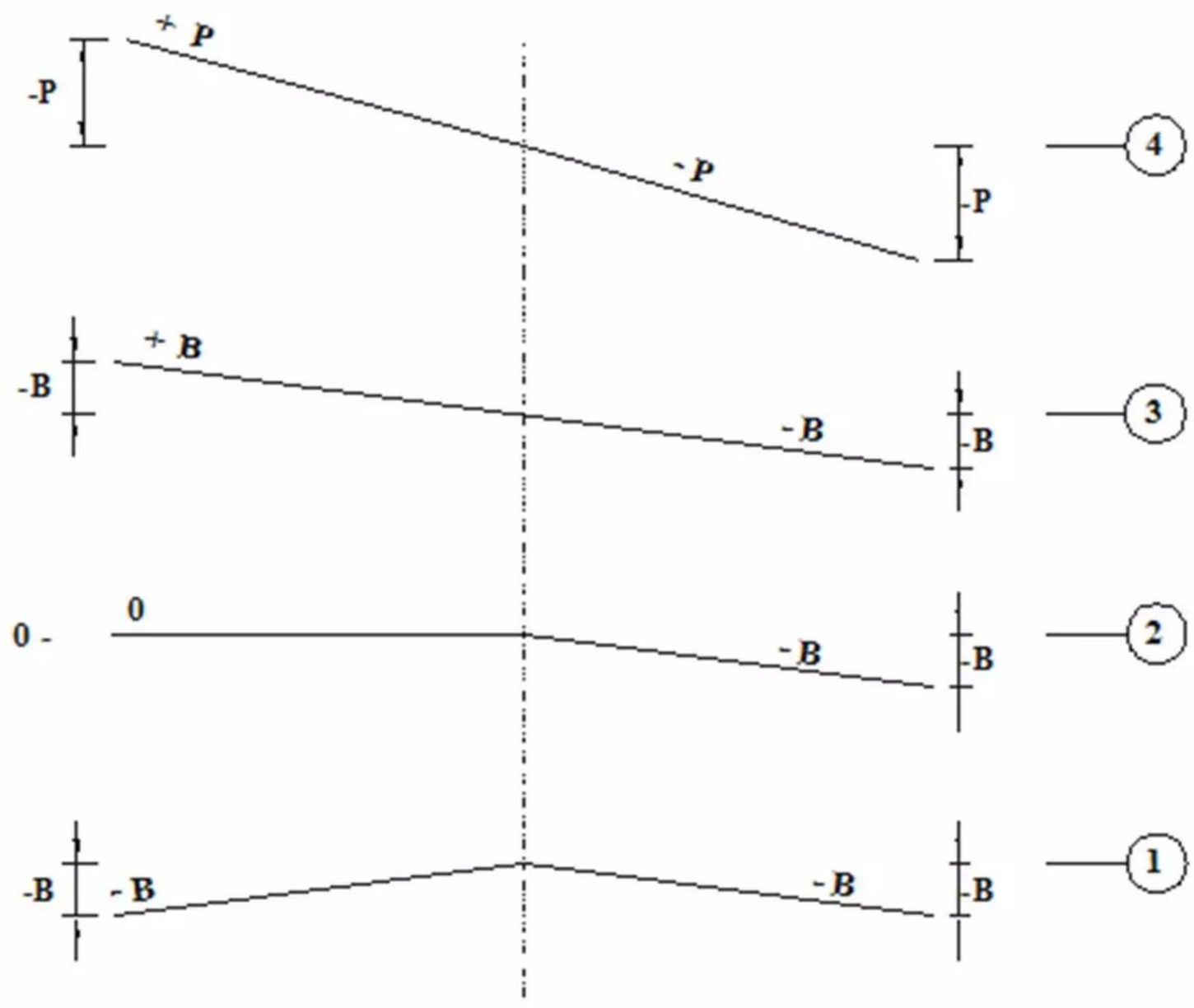


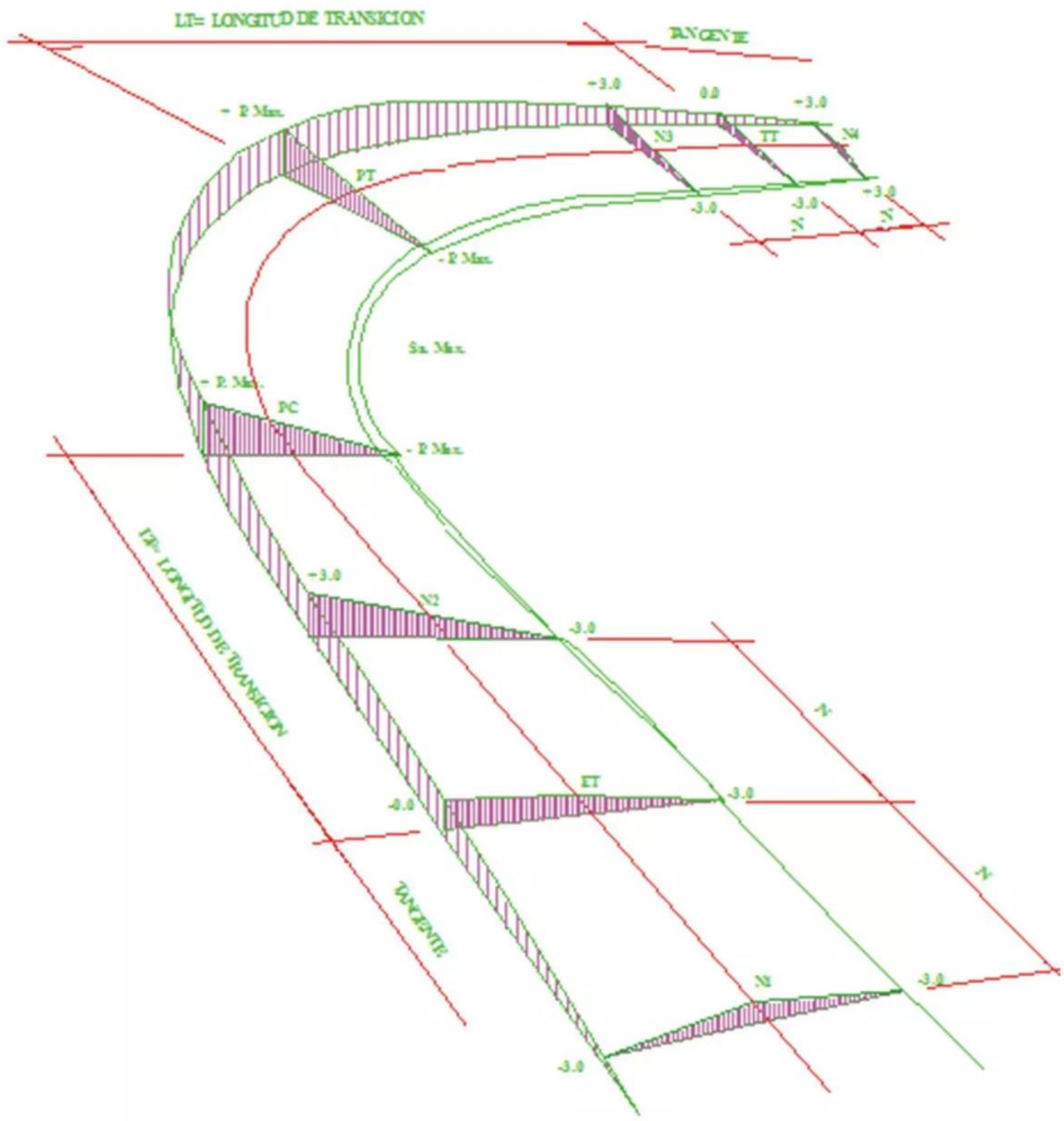
(b) GIRO EN EL BORDE INTERNO



Según el documento o curso de topografía aplicado el proceso de aplicación de los elementos transversales para la transición en la entrada y salida de las curvas.

ESQUEMA LONGITUDINAL PARA EL PROCESO DE TRANSICION DE LA SECCION EN TANGENTE A LA SECCION EN CURVA GIRANDO SOBRE EL EJE DE LA CURVA





Entre las secciones (2) y (3) el proceso de cálculo de los bordes se efectúa de manera similar a lo anterior, teniendo el cuidado de que al lado izquierdo, el valor calculado en (%), corresponderá al % que deberá subir el borde a partir de la horizontal (0%) hacia arriba. Para el cálculo de dicho % se utilizará la pendiente relativa (mr).

Entre las secciones (3) y (4), utilizando siempre la pendiente relativa, tomando como referencia la sección (4). Las secciones a calcular que estén ubicadas en este tramo, se calculará la distancia entre ésta y la (3) y se le aplicará la pendiente relativa. El resultado obtenido en %, al lado izquierdo se le sumará al % del Bombeo (B%), y al lado derecho, se le restará al valor del Bombeo en (%).

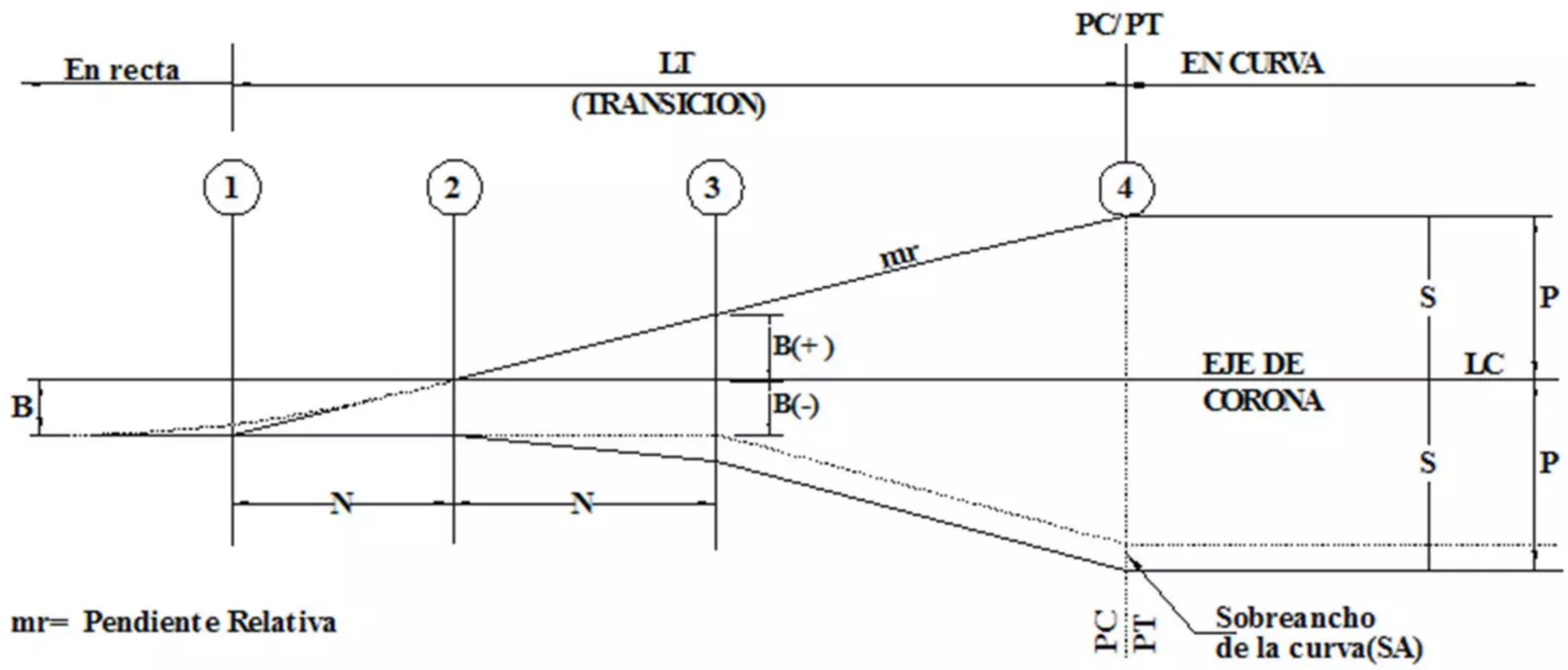
Dentro de la curva, de la sección (4) en adelante hasta el PT, se utilizará directamente el valor del Peralte; a la derecha en forma negativa, y a la izquierda en forma positiva (+).

Hacia el lado derecho se deberá controlar el sobreancho (parte interna de la curva), el cual se aplicará a partir de la sección (2), iniciando con cero (0), para posteriormente seguirlo aplicando conforme el esquema y de acuerdo a la determinación del sobreancho por metro.

Para la salida de la curva se aplicará el mismo mecanismo con la diferencia que se efectuará en sentido hacia atrás.

De esta manera se calcularán los bordes (Elev) de las secciones típicas en función de la rasante que corresponda en cada punto, lo cual se realizará sobre la sección transversal original previamente, graficada (dibujada) en papel

milimetrado: con lo cual se estará conformando la sección de construcción en cada estación del camino.



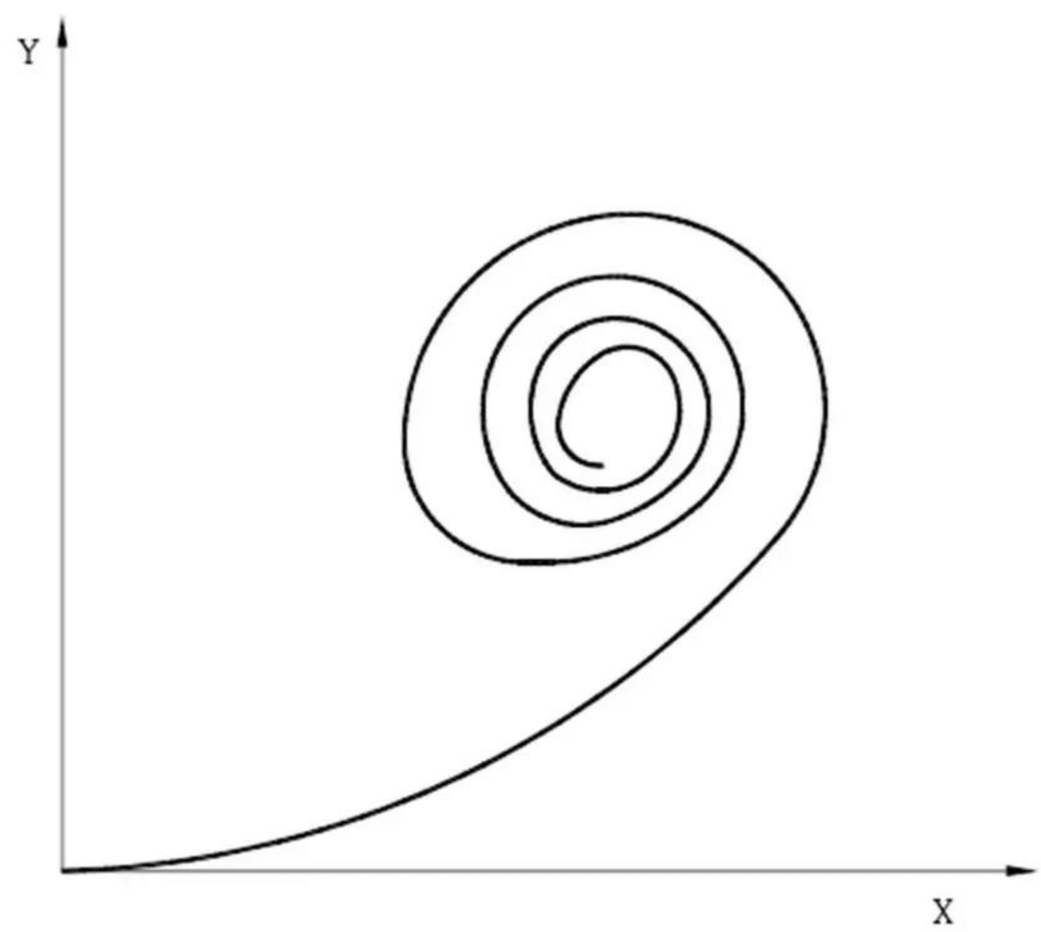
Espiral de transición

Tal como se indicó anteriormente, una curva o espiral de transición tiene por objeto permitir un cambio continuo en la aceleración centrífuga de un vehículo, así como en la sobreelevación y la ampliación de la sección transversal del camino. Este cambio es función de la longitud de la espiral, siendo más repentino a menores longitudes. 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. (ASTEC)

La introducción de una curva de transición implica el desplazamiento del centro de la curva circular original en una magnitud que está en función del desplazamiento DR y del ángulo de deflexión de las alineaciones. El radio de la curva circular permanece constante y el desarrollo de esta es parcialmente reemplazado por secciones de las clotoides de transición. (Perú)

Cuando se utiliza una espiral, se acostumbra que la transición de la sobreelevación se realice en la longitud de dicha espiral. (SIECA, 2004)

La Clotoide es también conocida como espiral de Cornu o espiral de Arquímedes y se trata de una curva plana que se desarrolla a partir de un punto dando vueltas, alejándose de él cada vez más y disminuyendo su radio. Para el diseño geométrico de vías se utiliza solo su parte inicial.



La Ley de curvatura de la espiral de Euler expresa que la aceleración centrífuga de un vehículo que circula a una velocidad uniforme V, equivale a V^2/R. En el caso de la espiral de transición, la aceleración varía de manera continua desde cero, para la tangente, hasta V^2/Rc para una curva circular de radio Rc. (Fonseca Rodríguez, 2010)

Si la longitud de la espiral de transición es Le y se desea una variación constante de la fuerza centrífuga a lo largo de la espiral, se tiene la siguiente relación:

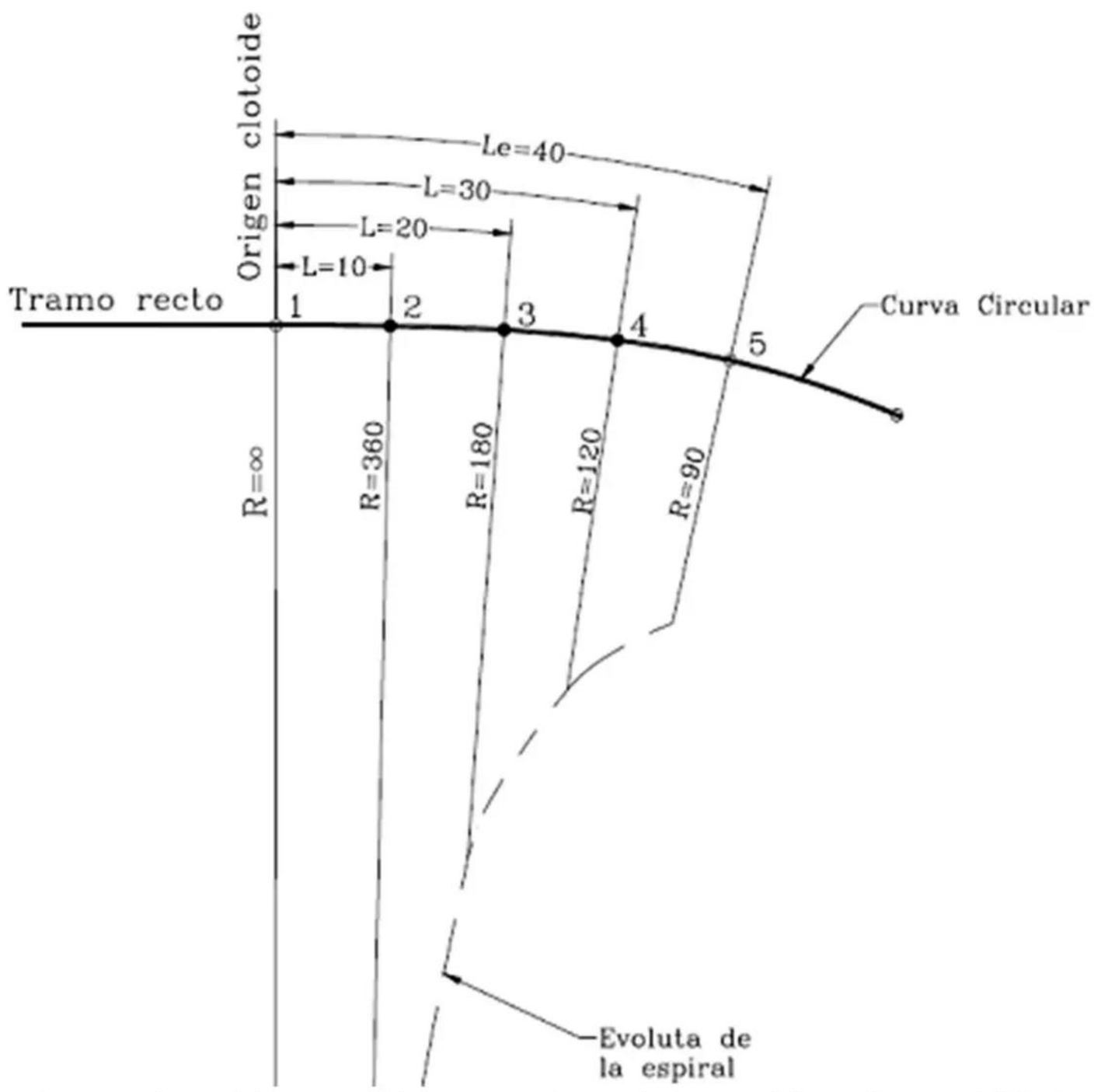
$$\text{Variación por unidad de longitud} = \frac{V^2}{RcLe}; \qquad (1)$$

En un punto cualquiera de la espiral, situado a una distancia L del origen de la transición, la aceleración centrífuga en ese punto tendrá el siguiente valor:

$$\frac{V^2 L}{RcLe} \qquad (2)$$

Lo anterior indica que el radio de curvatura R es inversamente proporcional a la distancia L recorrida a lo largo de la curva desde su origen. De otra manera, en un punto cualquiera de la

curva el producto del radio R y la distancia L es constante e igual a RcLe.



Por otra parte, si la curvatura en el punto considerado es 1/R, la aceleración centrífuga en ese mismo punto será igual a V^2/R.

Por lo tanto:

$$\frac{V^2 L}{RcLe} = \frac{V^2}{R} \qquad (3)$$

$$RL = RcLe \qquad (4)$$

Pero si:

$$RcLe = K^2 \qquad (5)$$

por lo tanto:

$$RL = K^2 \qquad (6)$$

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 cualquier punto es constante. (Fonseca Rodríguez, 2010)

Si se llama t al tiempo necesario para que un vehículo recorra la espiral a una velocidad constante V, en un punto cualquiera de la curva se tendrá que L = Vt. Si substituimos esta relación en la ecuación 2 obtenemos:

$$a = \frac{V^2 Vt}{RcLe} = \frac{V^3 t}{RcLe} \tag{7}$$

Por otra parte, la variación de la aceleración centrífuga debe ser constante, es decir:

$$\frac{da_c}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{V\ t}{RcLe}\right) = C \tag{8}$$

$$\frac{V^3 t}{RcLe} = C \tag{9}$$

$$\therefore Le = \frac{V^3}{C * Rc} \tag{10}$$

en donde:

C: Coeficiente de variación de la aceleración centrífuga, o coeficiente de comodidad, expresada en $m/s^2/s$

El coeficiente C es un valor empírico que indica el grado de comodidad que se desea proporcionar. Para ferrocarriles, normalmente se utiliza un valor de 0.305 m/s³. En caminos se pueden emplear coeficientes que varían entre 0.305 y 0.915 m/s³.

Barnett propuso un valor de 0.61 m/s³ el cual ha sido utilizado ampliamente. Substituyendo este valor en la ecuación 10 y para V en km/hr, se obtiene que:

$$Le = 0.0351\frac{V^3}{Rc} \qquad (11)$$

El reglamento de Normas centroamericano en su sección 4-43, propone que Le =

Donde: V = Velocidad en kilómetros por hora
R = Radio central de la curva, en metros
C = Tasa de incremento de la aceleración centrípeta, en m/seg³

Este último parámetro es una valor empírico igual a la unidad en el diseño de ferrocarriles, pero cuyos valores varían entre 1 y 3 para aplicaciones en carreteras En vista que existen varios métodos de cálculo de longitudes de transición cuyo resultados son diferentes, se ha considerado conveniente adoptar la recomendaciones de la AASHTO, para valores de este elemento de diseño en la carreteras regionales, dejando siempre a juicio del diseñador su propia elección de acuerdo a situaciones particulares. (SIECA, 2004)

Una observación muy valioso y de índole práctica, es que el control para el cálculo de la transición no depende de la exactitud de la aplicación de la fórmula, sino de la longitud requerida para el desarrollo de la sobreelevación máxima entre la tangente y la curva circular.

Las longitudes de espirales en intersecciones se calculan de la misma manera que en carretera abierta, excepto que las espirales pueden tener longitudes menores ya que en las carreteras se aplican valores de C comprendidos entre 0.3 y 1.0, en tanto que en las intersecciones dicho valor puede estar entre 0.75 para velocidades de 80 kilómetros por hora y 1.2 para velocidades de 30 kilómetros por hora. Las longitudes mínimas de espirales, para los radios mínimos que gobiernan la velocidad de diseño, van desde 20 metros para velocidades de 30 kilómetros por hora y radios mínimos de 25 metros, hasta 60 metros para velocidades de 70 kilómetros por hora y radios mínimos de 160 metros. (SIECA, 2004)

Los valores recomendados por las normas centroamericanas son:

Cuadro 4.11

Longitudes de Desarrollo de la Sobreelevación en Carreteras de dos Carriles, en metros

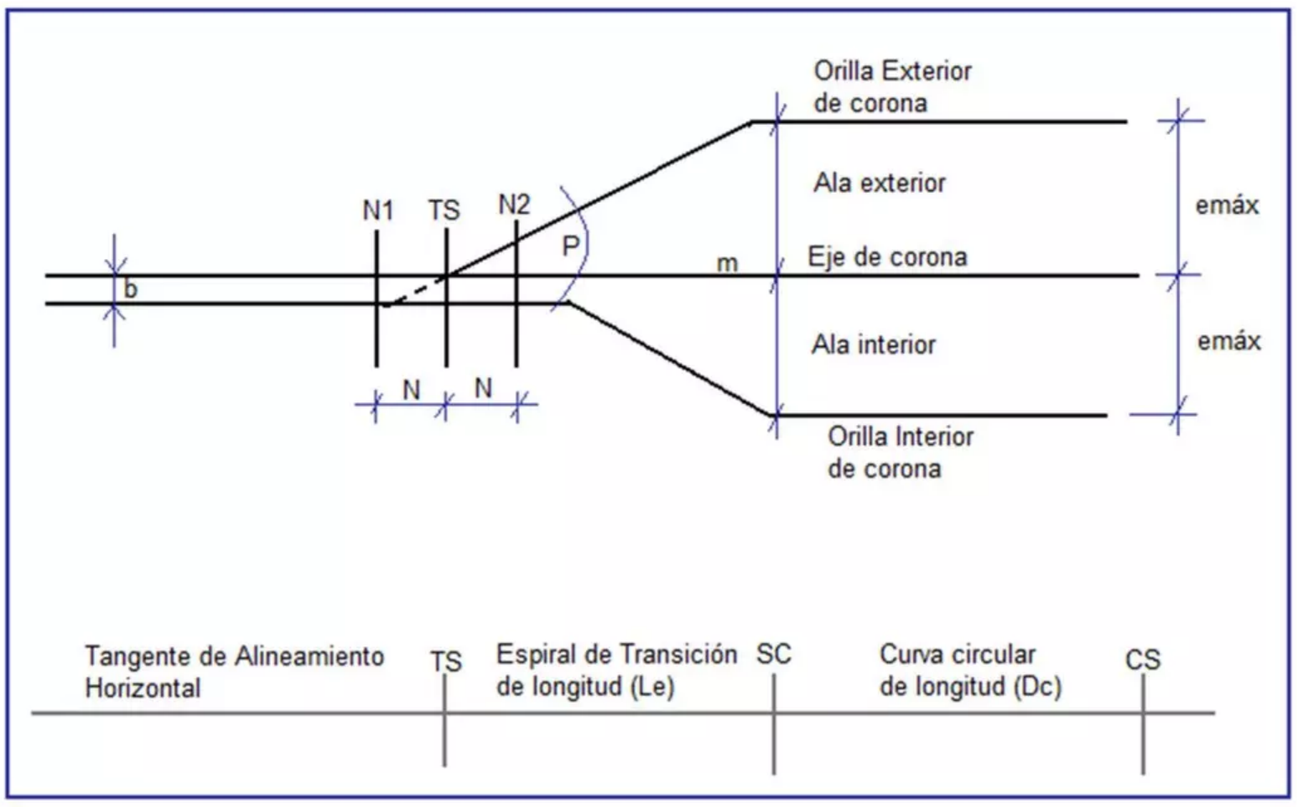
Peralte	Longitud de Transición y Velocidades de Diseño Km/h							
	40	50	60	70	80	90	100	110
	Carriles de 3.60 metros							
0.02	25	30	35	40	50	55	60	65
0.04	25	30	35	40	50	55	60	65
0.06	35	35	40	40	50	55	60	65
0.08	45	45	50	55	60	60	65	70
0.10	55	55	60	65	75	75	80	85
0.12	65	65	75	80	90	90	95	105
	Carriles de 3.00 metros							
0.02	25	30	35	40	50	55	60	65
0.04	25	30	35	40	50	55	60	65
0.06	30	30	35	40	50	55	60	65
0.08	35	40	40	45	50	55	60	65
0.10	45	45	50	55	60	65	70	75
0.12	55	55	60	65	75	75	80	85

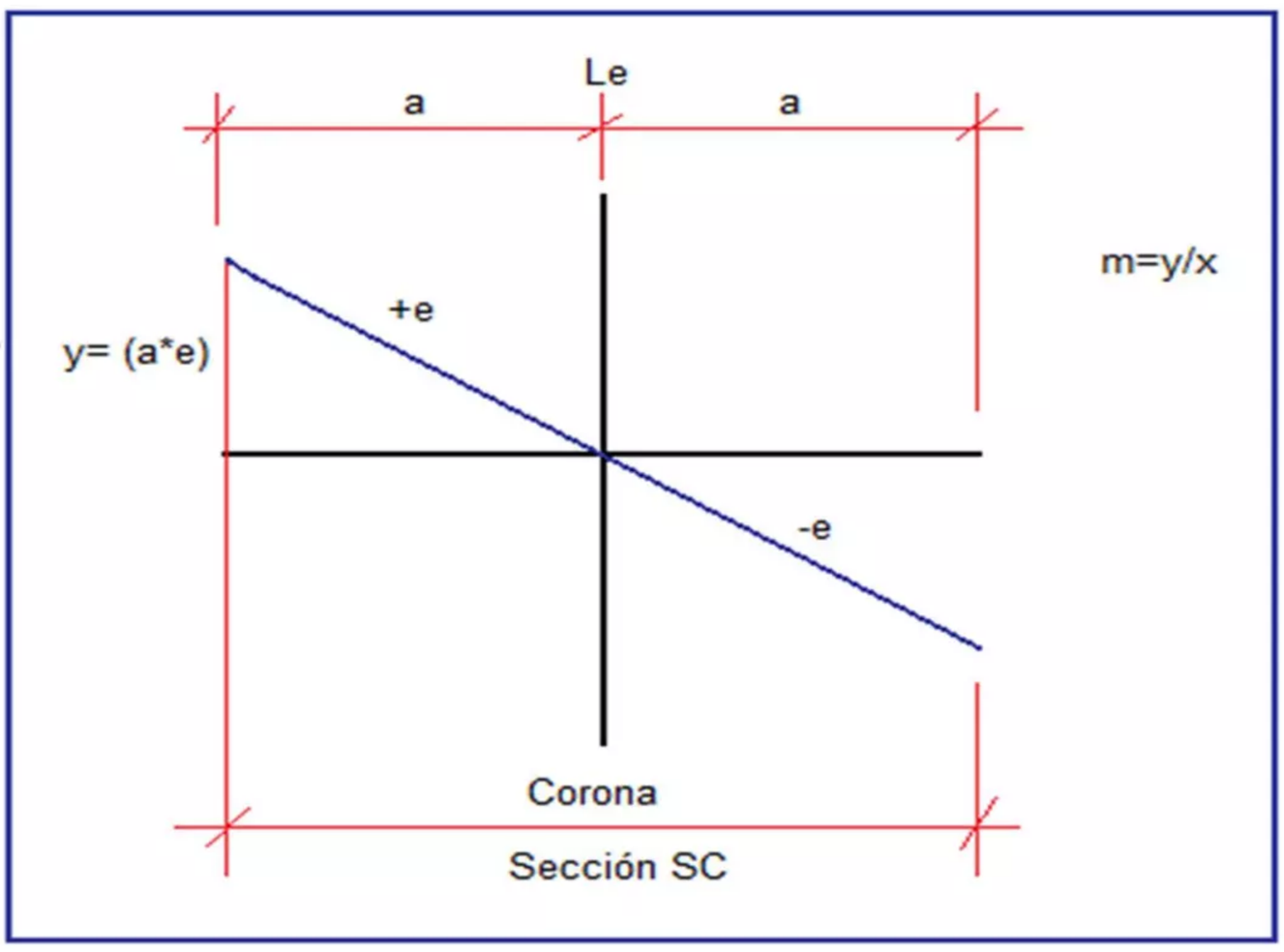
Fuente: AASHTO, A Policy on Geometric Design of Highways and Streets, 1994, p. 179

Estas cifras corresponden a carreteras de dos carriles. Cuando se trate de tres y cuatro carriles sin mediana, hay que multiplicar respectivamente las cifras por 1.2 y 1.5; si la carretera es de 6 carriles sin mediana, hay que duplicar los valores del cuadro anterior.

La AASHTO recomienda calcular la longitud de la espiral con base en el aspecto estético del camino, consiste en igualar la longitud de la espiral a la longitud necesaria para dar la sobreelevación correspondiente a la curva circular (Le=Lt). Se establece que la espiral tenga suficiente longitud para permitir que la pendiente longitudinal de la orilla de la calzada con respecto al eje del camino tenga un valor máximo P (Pendiente Longitudinal de la orilla de la calzada con respecto al eje del camino en valor absoluto.).

Se establece que para caminos de dos carriles y velocidades entre 48 y 112 Km/hr,el valor de esa pendiente será de 1/150 y 1/250 respectivamente. Es decir que el desnivel de la orilla de la calzada respecto al eje del camino será en 150 m en 1 mt. (Campos, 2009)





Considerando el desarrollo de transición por estética, (Lt = Le), la longitud de transición es:

$$Le = m * a * e$$

Donde m es el talud de la orilla de la calzada respecto al eje del camino, en valor absoluto. Pendiente Relativa, expresado por:
m= (1.5625 V)+75

a: ancho de carril (Semiancho de la calzada en tangente para caminos de dos carriles expresado en m)
V: velocidad de diseño.
e= Sobreelevación de la curva circular en valor absoluto.

Así por ejemplo:
$e = 4.523\%$
a= 3.60 m
Velocidad de diseño = 70 kph

La longitud de transición será:
$LT = m * a * e$

m= (1.5625 V)+75 $= (1.5625 * 70 + 75)$

$m = 184.375$
$LT = 184.375 * 3.6 * 0.045$
$LT = 29.869m \approx 30$

* Como se verá más adelante para una transición en espiral el valor a emplear para la transición será de 0.56 V, que al realizarse LT = 0.56 * 70 = 39.2 metros

La SCT establece el valor mínimo de la longitud de la espiral de transición al considerar una velocidad constante con la que el vehículo asciende o desciende por la espiral de transición, cuando circula por ella a la velocidad de proyecto. (SCT, 1984)

Si el conductor mantiene su vehículo en el centro de su carril, el desnivel que sube o baja el vehículo al circular por la transición es:

$$d = \frac{aS}{2} \qquad (12)$$

en donde:
d= Desnivel, en m
a= Semiancho de carpeta o ancho de carril, m
S= Sobreelevación, en valor absoluto.

Sí un vehículo recorre la espiral de transición de longitud Le a la velocidad de proyecto V, empleará un tiempo t de:

$$t = \frac{Le}{0.278V} \qquad (13)$$

en donde:
t= Tiempo expresado en segundos.
Le= Longitud de la espiral expresada en metros.
V= Velocidad de proyecto expresada en km/hr

La velocidad en el ascenso o descenso de la sección transversal del semiancho de la carpeta, a lo largo de la transición, se obtiene mediante la siguiente expresión:

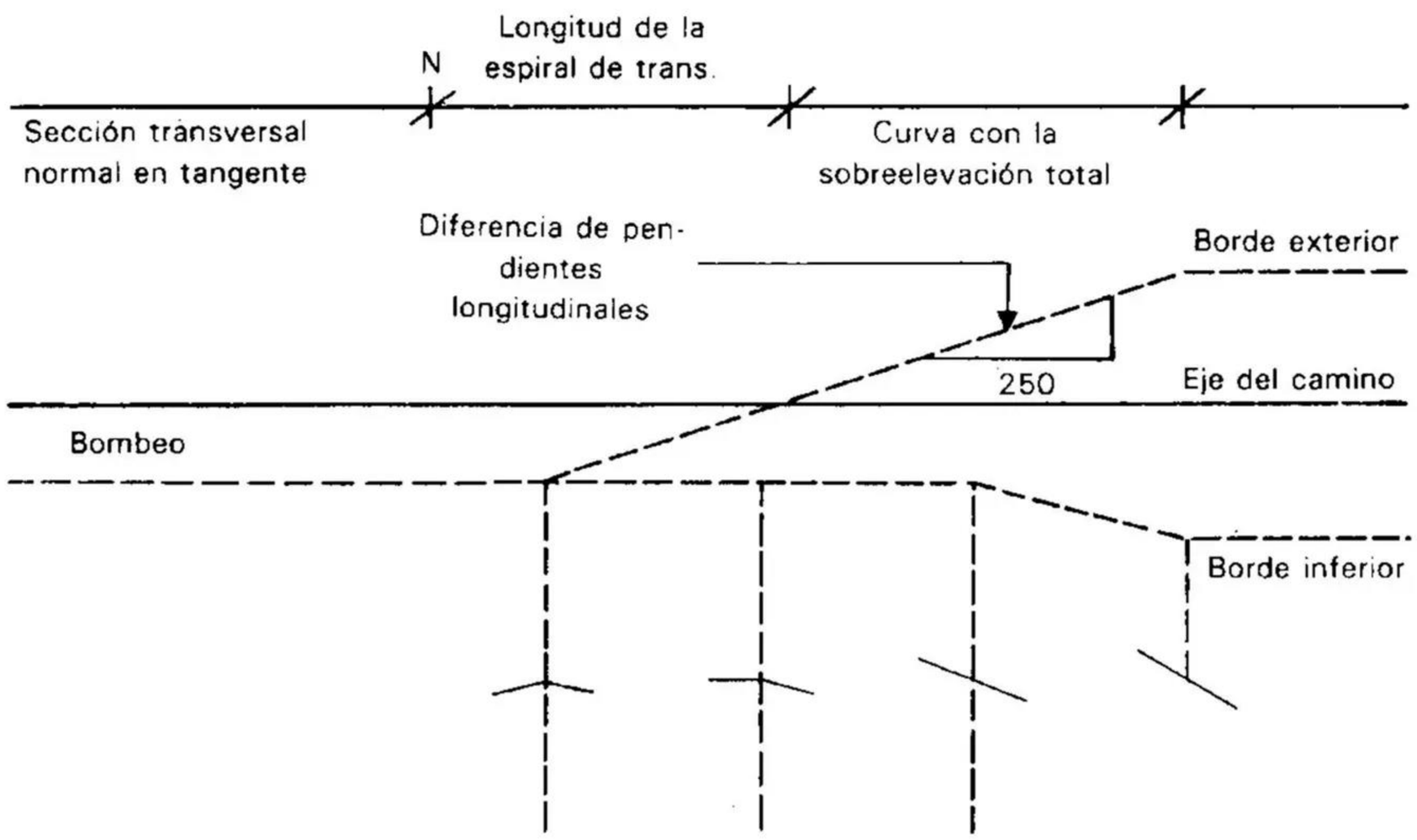
$$Ve = \frac{d}{t} = \frac{aS/2}{Le/0.278V} = \frac{0.139VaS}{Le} \qquad (14)$$

en donde:

Ve= Velocidad de ascenso o descenso de la sección transversal al ir cambiando su sobreelevación

Ve debe ser de una magnitud tal, que permita la circulación vehicular de una manera cómoda y segura. Al respecto, la SCT ha adoptado el criterio de la AASHTO, que establece una diferencia máxima en la pendiente longitudinal del eje del camino y la de la orilla del camino. Para una velocidad de 48 km/h (13.33 m/s), la AASHTO recomienda una diferencia de pendientes de 1/150, es decir, que en 150 metros se podrá dar un cambio en el desnivel de la orilla del camino, con respecto al eje de 1 metro.

La SCT considera un valor de Ve de 0.062 m/s y un semiancho de carpeta de 3.65 metros para establecer la longitud mínima de transición. Este valor de Ve se obtiene a partir de una velocidad de proyecto de 112 km/h y una diferencia de pendientes de 1/250.



Substituyendo los valores considerados por la SCT en la ecuación 14:

$$0.062 = \frac{(0.139)(3.65)VS}{Le} \qquad (15)$$

Por lo tanto:

$$Le = 8.18VS \qquad (16)$$

Para fines prácticos, la SCT recomienda redondear a 8 el factor multiplicativo de la expresión anterior:

$$Le = 8VS \qquad (17)$$

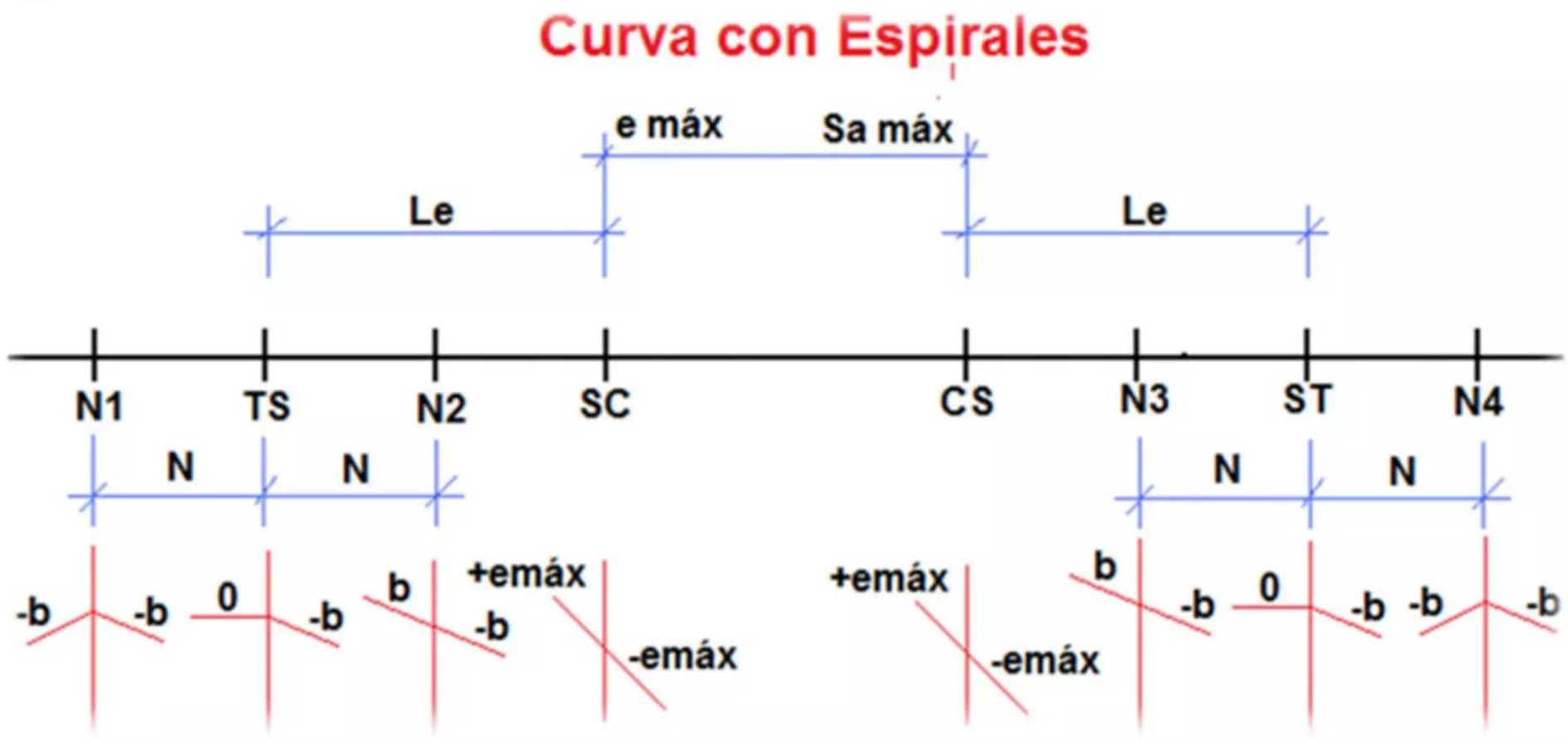
Por otra parte, la SCT especifica que la longitud mínima aceptable de transición debe ser tal que, un vehículo que circule a la velocidad de proyecto, tarde cuando menos dos segundos en recorrerla. A 112 km/hr, un vehículo recorre aproximadamente 62.2 metros; si con estos valores despejamos la variable **s**, se obtiene un valor de 0.07. Al substituir este valor en la ecuación 17, se determina la longitud mínima absoluta de transición:

$$Le = 0.56V \qquad (18)$$

Las longitudes de transición determinadas con las fórmulas anteriores corresponden a caminos de dos carriles. En el caso de caminos con más carriles, las longitudes de transición establecidas con las ecuaciones 11, 17 y 18 se deberán multiplicar por los siguientes factores:

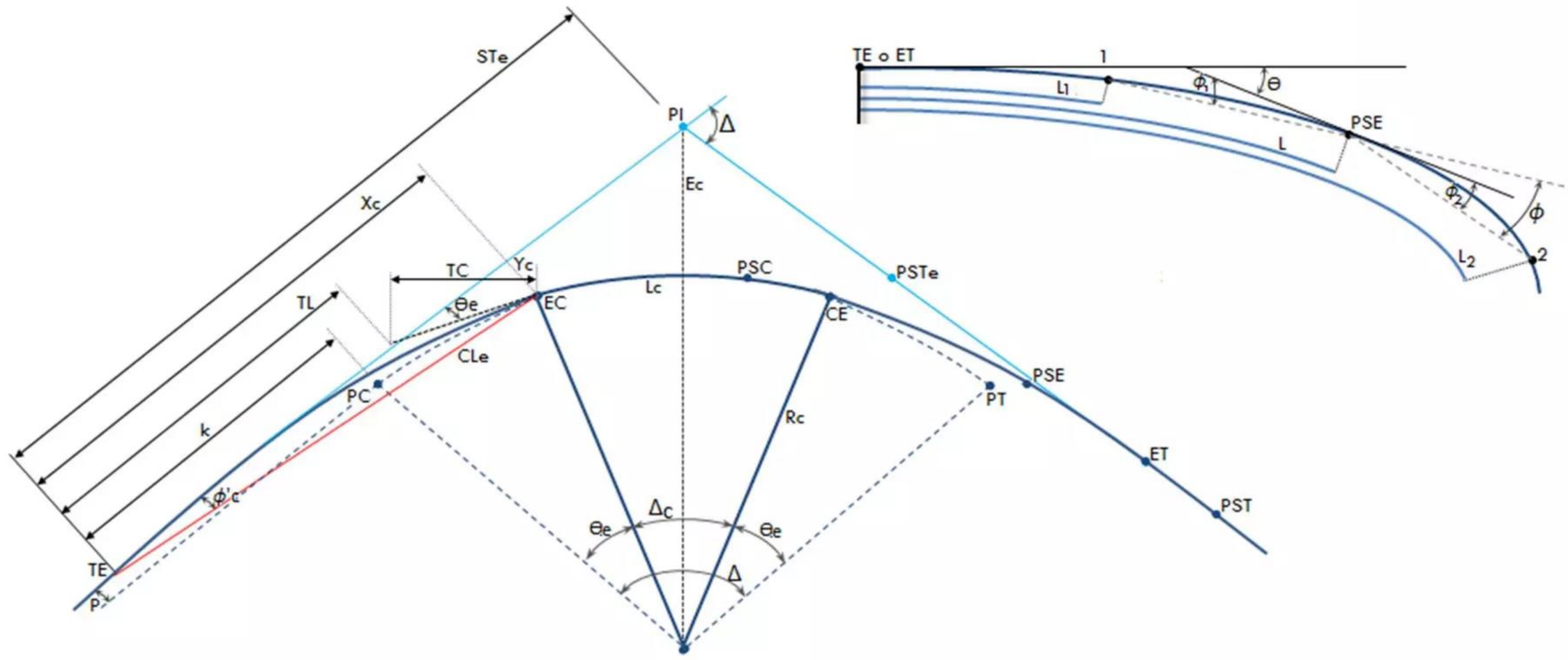
- Para carreteras de 4 carriles en un solo cuerpo: 1.5
- Para carreteras de 6 carriles en un solo cuerpo: 2.5

En un sólo gráfico la transición de un a curva con espiral puede ser:



■

Elementos básicos de la espiral de transición.



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 espiral
PST_e	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 de la espiral
ST_e	Subtangente
X_c, Y_c	Coordenadas del EC o del CE
k, p	Coordenadas del PC o del PT (Desplazamiento)
TL	Tangente larga
TC	Tangente corta
CL_e	Cuerda larga de la espiral
E_c	Externa
R_c	Radio de la curva circular
ℓ_e	Longitud de la espiral de entrada o salida
ℓ_c	Longitud de la curva circular

- **Parámetro de la espiral**: Es la magnitud que define las dimensiones de la espiral

$$K = \sqrt{RcLe} \tag{19}$$

- **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 sobre la espiral (PSE).

$$\theta = \frac{L^2}{2RcLe} \tag{20}$$

Por conveniencia, se define una constante:

$$M = \sqrt{2RcLe} \tag{21}$$

Substituyendo la ecuación 3 en 2:

$$\theta = \frac{L^2}{M^2} \tag{22}$$

Si L = Le, θ = θe, entonces:

$$M^2 = \frac{Le^2}{\theta e} \tag{23}$$

Substituyendo la ecuación 5 en 4:

$$\theta = \left(\frac{L}{Le}\right)^2 * \theta e \tag{24}$$

Deflexión de la espiral: Es el ángulo comprendido entre las tangentes a la espiral en sus puntos extremos. Si en la ecuación 2, L = Le , θ = θe:

$$\theta = \frac{Le^2}{2RcLe} = \frac{Le}{2Rc} \tag{25}$$

En la expresión anterior θe está expresado en radianes; sí θe se expresa en grados y se considera que *Rc = 1,145.92 / Gc*

$$\theta = \frac{Le}{2 * \frac{1145.92}{Gc}} * \frac{180}{\pi}$$

$$\theta e = \frac{GcLe}{40} \tag{26}$$

Coordenadas de un punto cualquiera sobre la espiral: Son las siguientes:

$$x = M\sqrt{\theta}\left(1 - \frac{\theta^2}{10}\right) \tag{27}$$

$$y = M\sqrt{\theta}\left(\frac{\theta}{3} - \frac{\theta^3}{42}\right) \tag{28}$$

En las ecuaciones 9 y 10, θ está en expresado en radianes.

Coordenadas del EC: Son las siguientes:

$$x_c = M\sqrt{\theta e}\left(1 - \frac{\theta e^2}{10}\right) \tag{29}$$

$$y_c = M\sqrt{\theta e}\left(\frac{\theta e}{3} - \frac{\theta e^3}{42}\right) \tag{30}$$

Coordenadas del PC de la curva circular:

$$p = y_c - Rc(1 - \cos\theta e) \tag{31}$$

$$k = x_c - Rc\,\mathrm{sen}\,\theta e \tag{32}$$

Subtangente: Es la distancia entre el PI y el TE o ET de la curva, medida sobre la prolongación de la tangente.

$$STe = k + (Rc + p)tan\frac{\Delta}{2} \tag{33}$$

Cuerda de la espiral desde el origen a un punto cualquiera:

$$C = \sqrt{(x^2 + y^2)} \tag{34}$$

Cuerda larga de la espiral:

$$CLe = \sqrt{(x_c{}^2 + y_c{}^2)} \tag{35}$$

Ángulo de la cuerda a un punto cualquiera sobre la espiral:

$$\phi' = arctan\frac{y}{x} \tag{36}$$

Ángulo de la cuerda larga de la espiral:

$$\phi' c = arctan\frac{y_c}{x_c} \tag{37}$$

Tangente larga: Es el tramo de la subtangente comprendido entre el TE o ET y la intersección con la tangente a EC o CE

$$TL = x_c - y_c\cot\theta e \tag{38}$$

Tangente corta: Es el tramo de la tangente a OE o EC comprendida entre uno de estos puntos y la intersección con la subtangente correspondiente.

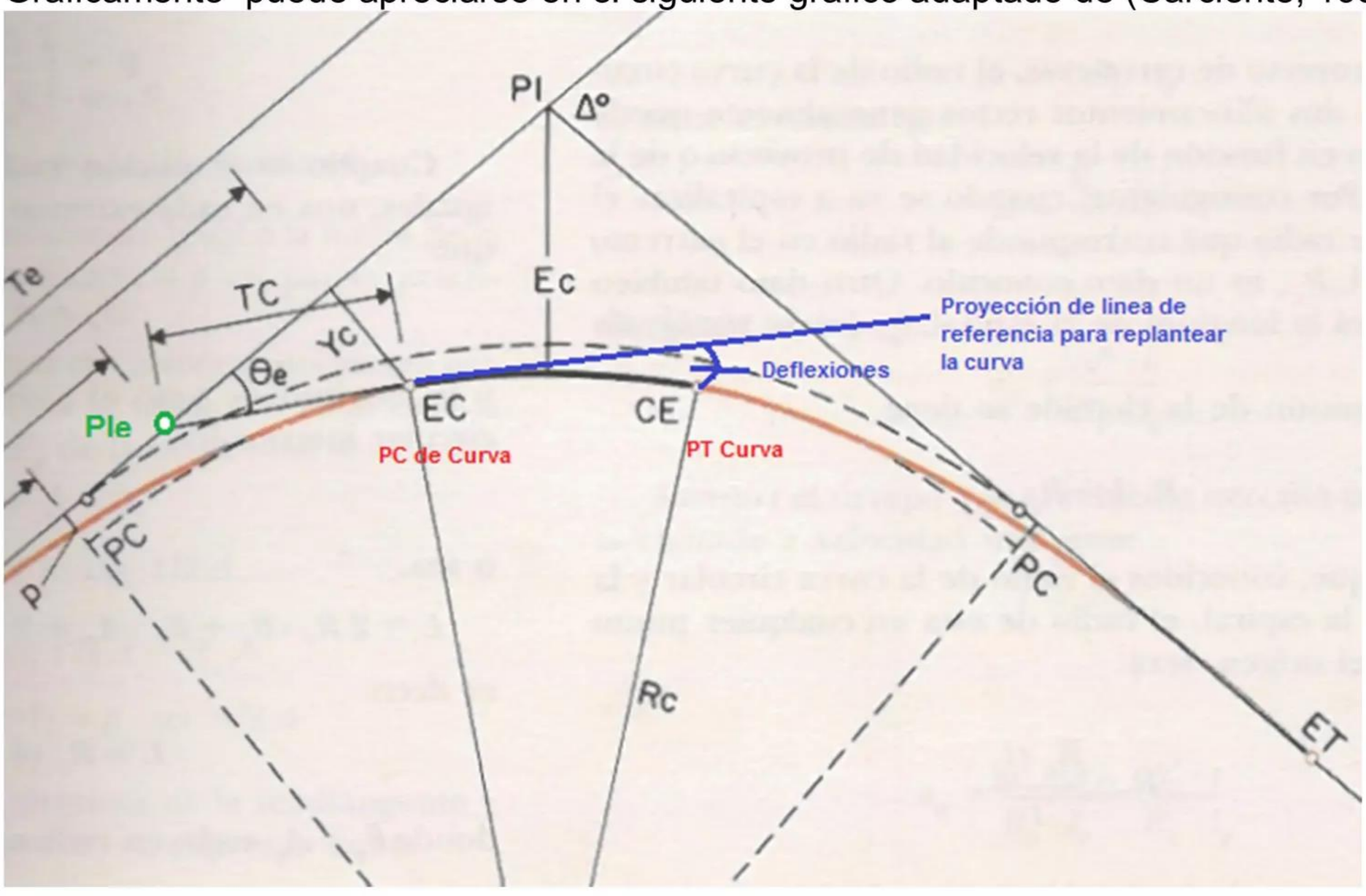
$$TC = y_c\csc\theta e \tag{39}$$

Replanteo de Curva con espirales

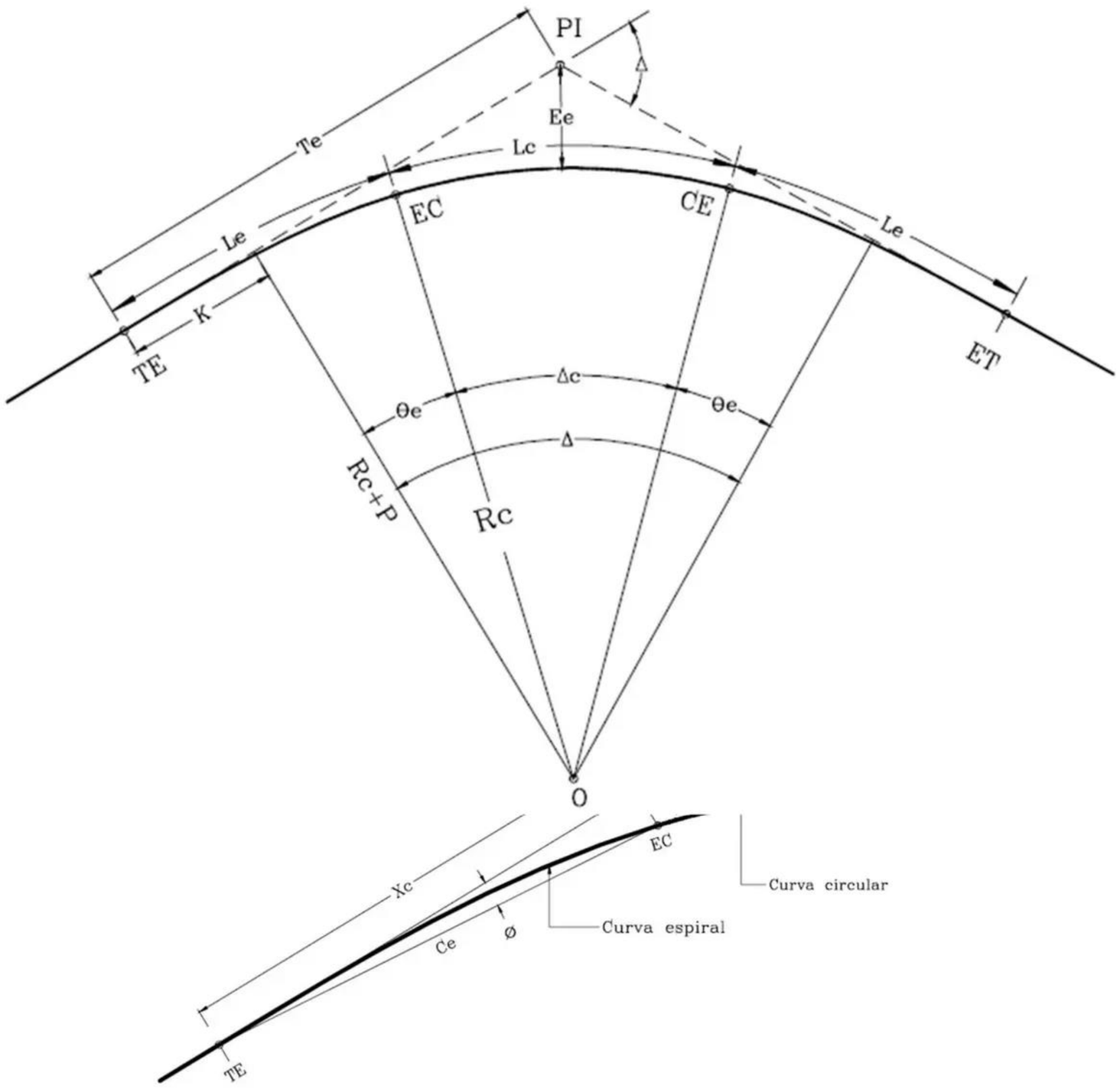
Según (OSPINA, 2002), en sus páginas 231-232 establece:

• Estando ubicado en el PI se mide el valor de la tangente, Te, en dirección de los dos alineamientos que definen dicho PI. Se obtiene así la ubicación del TE y el ET.
• Se traslada el equipo hacia el TE y con "ceros" en el PI se localizan todas las estaciones redondas de la primera espiral hasta llegar al EC. Esta localización se realiza con cuerdas y deflexiones, estas últimas calculadas previamente.
• Se mide sobre la tangente (línea TE – PI) el valor de la tangente larga TI determinando así la ubicación del PIe. Luego se chequea el valor de la tangente
corta Tc con el fin de verificar que la primera espiral ha sido bien localizada. La tangente corta es la distancia entre el PIe y el EC.
• Se ubica ahora el equipo en el EC y con el telescopio invertido y línea en el PIe se transita 180 grados determinando así la línea de referencia para medir las deflexiones de la curva circular llegando así hasta el CE.
• Finalmente se ubica el equipo en el ET y con línea en el PI se localiza la segunda espiral en sentido contrario al abscisado, es decir desde el ET al CE, obteniendo el error de cierre en este último.
El procedimiento anterior también puede realizarse de forma inversa, es decir, iniciando en el ET y localizando hasta el CE, luego la curva circular desde el CE hasta el EC y por último desde el TE cerrando en el EC.

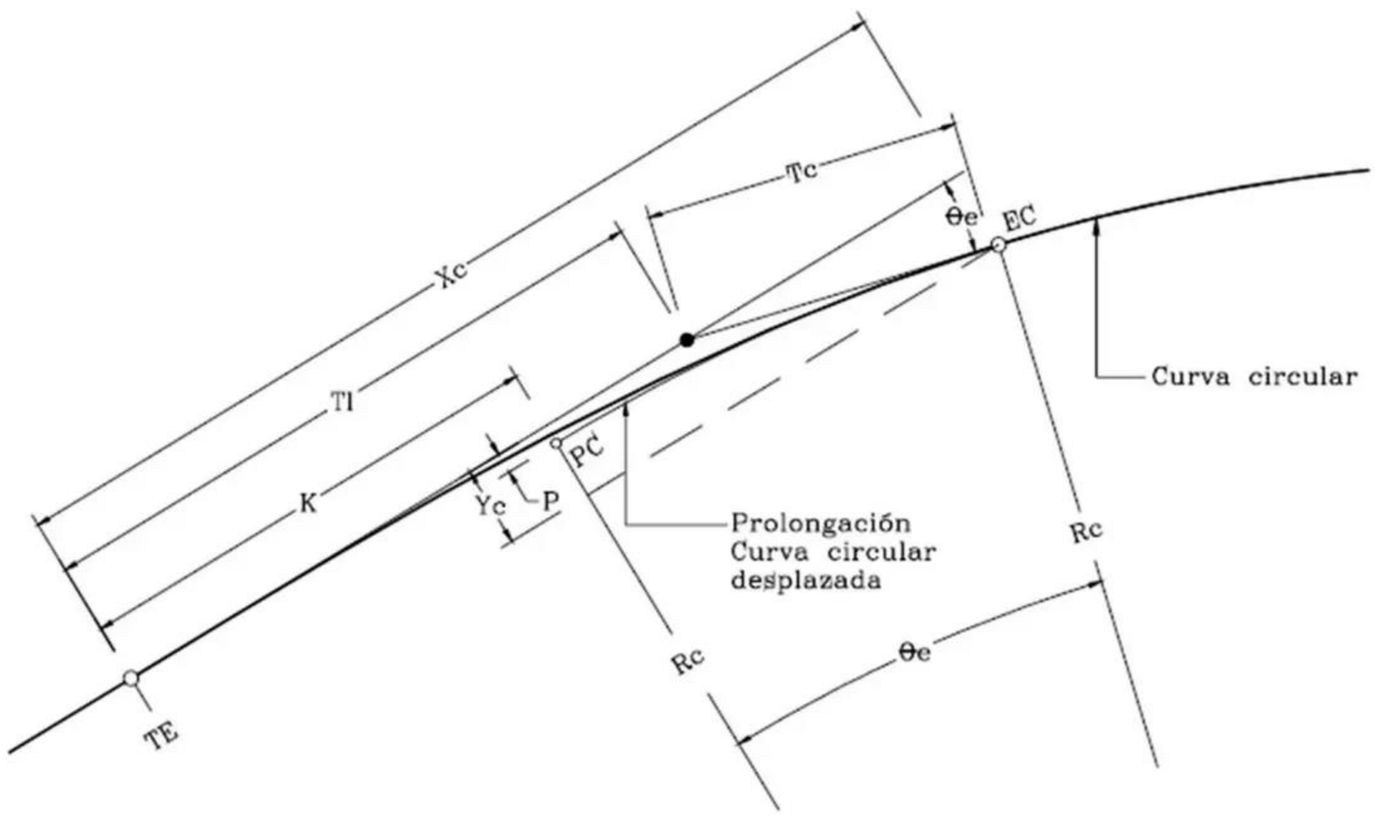
Gráficamente puede apreciarse en el siguiente gráfico adaptado de (Carciente, 1980)



Síntesis de Elementos básicos

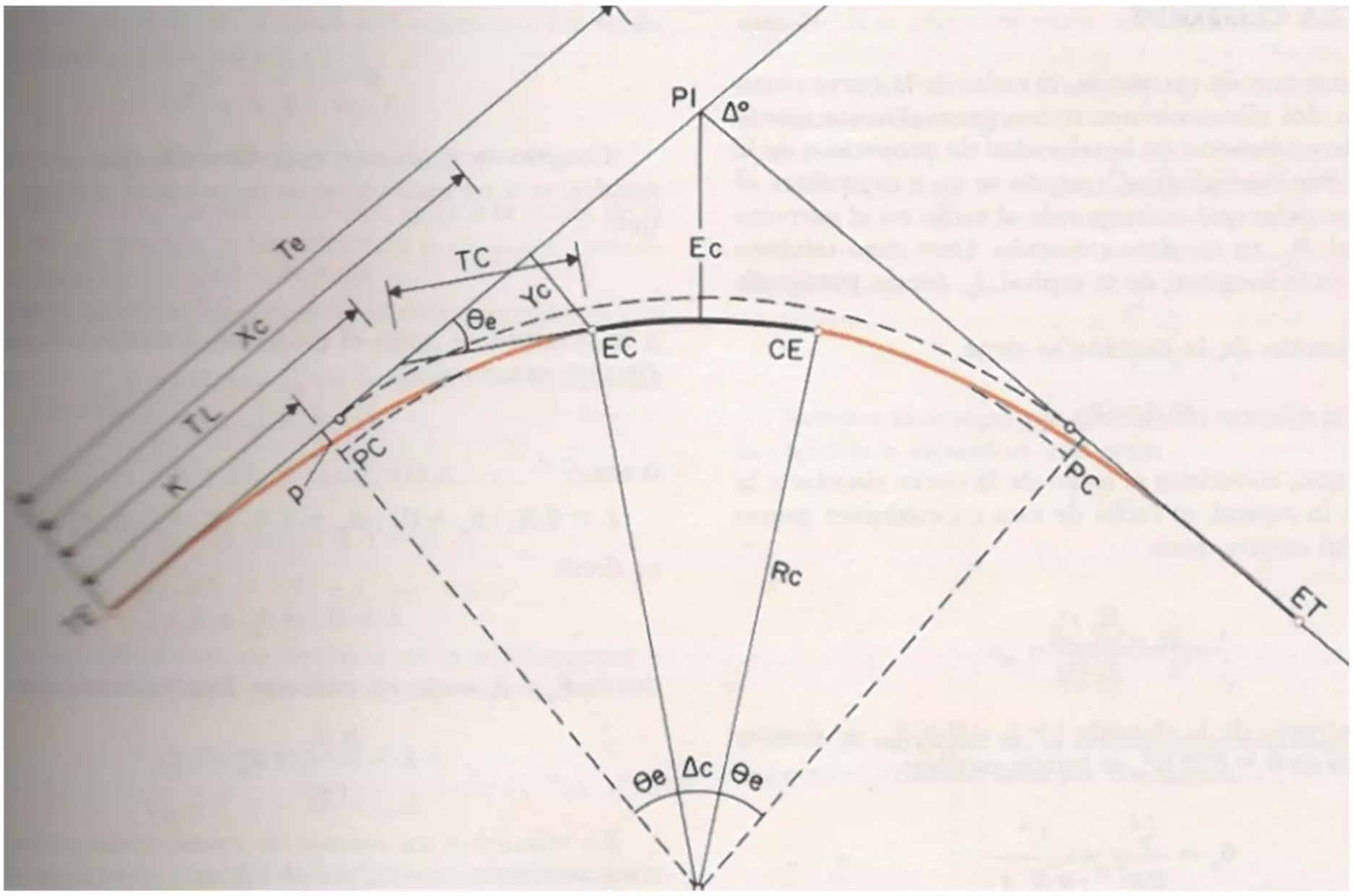


TE = Punto de empalme entre la recta y la espiral.
EC = Punto de empalme entre la espiral y el arco circular
CE = Punto de empalme entre el arco circular y la espiral
ET = Punto de empalme entre la espiral y la recta
Δ = Deflexión de la curva.
Rc = Radio curva circular
Le = Longitud curva espiral
θe= Delta o deflexión curva espiral
Xc = Coordenada X de la espiral en los puntos EC y CE
Yc = Coordenada Y de la espiral en los puntos EC y CE
P = Disloque = Desplazamiento del arco circular con respecto a la tangente
K = Abscisa Media. Distancia entre el TE y el punto donde se produce el disloque. (K es aproximadamente igual a la mitad de Le.)
Te = Tangente de la curva. Distancia TE – PI y PI – ET (STe)
Ee = Externa
Tl = Tangente larga. Distancia entre TE o ET y PIe
Tc = Tangente corta. Distancia entre PIe y EC o CE
Ce = Cuerda larga de la espiral. Línea que une TE con EC y CE con ET
Φ = Angulo de la cuerda larga de la espiral
Δc = Deflexión de la curva circular
G = Grado de curvatura circular
Lc = Longitud curva circular
Cc = Cuerda larga circular



- *Tomado de* (OSPINA, 2002)

Estos elementos de la curva pueden verse mejor en siguiente gráfica tomada de (Carciente, 1980) en pág 271. Donde se aprecia claramente el valor de p, Tc, TI y el punto PC del cual refieren las ecuaciones antes descritas.



Ecuaciones de Cálculo (Longitud de transición es en la espiral LT = Le)

La longitud de la espiral (Le) expresada en m esta dado por: $Le = 0.56V$
La longitud espiral se redondea normalmente a un valor múltiplo de 5

Longitud máxima de espiral $Le_{max} = \sqrt{24(f)(Rc)}$
donde f es la máxima equidistancia lateral entre la tangente y la curva cuyo valor recomendado es 1. Rc es el radio de la curva en m.

El radio de curva y el radio mínimo están dados por: $Rc = \frac{1{,}145.92}{Gc}$ $\qquad R\min = \frac{V^2}{127(e+f)}$

Longitud mínima de la espiral $Le_{min}=\frac{0.0214v^3}{Rc\ C}$

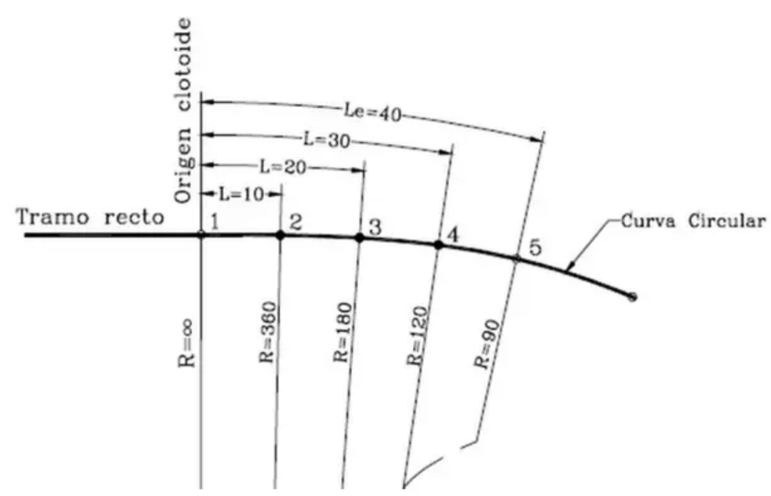
donde C es la máxima tasa de cambio de aceleración lateral equivalente 1.2 m/s^3.

Parámetro de la espiral: Es la magnitud que define las dimensiones de la espiral.

$K=\sqrt{RcLe}$ Este valor también puede ser denotado como A para diferenciar con el valor de k del inicio de la curva por tanto $A=\sqrt{RcLe}$

Esta ecuación es llamada Ley de Curvatura de la Espiral de Euler e indica que el radio de curvatura R es inversamente proporcional a la distancia L recorrida a lo largo de la curva desde su origen. Así por ejemplo si el valor de R fuera 90 m y el valor de L fuera 40, el valor de K será = 60, al contruir una tabla se verá que siempre es proporcional el Radio.

K	Rc	Le
60	90	40
60	120	30
60	180	20
60	360	10
60	Infinito	0



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

$$\theta e=\frac{GcLe}{40}$$

Coordenadas de un punto cualquiera sobre la espiral Son las siguientes:

$$x_c=M\sqrt{\theta e}\left(1-\frac{\theta e^2}{10}\right) \qquad y_c=M\sqrt{\theta e}\left(\frac{\theta e}{3}-\frac{\theta e^3}{42}\right) \qquad \text{donde} \quad M=\sqrt{\frac{Le^2}{\theta e}}$$

Estas ecuaciones de derivan de la utilización de series de McClaurin del seno y el coseno.

θ está en expresado en radianes (debe multiplicarlo en su ordenador por PI() /180). Tambien pueden calcularse por:

$$x_c=Le\left(1-\frac{\theta e^2}{10}\right) \quad y_c=Le\left(\frac{\theta e}{3}-\frac{\theta e^3}{42}\right)$$

Coordenadas del PC de la curva circular:

$$p=y_c-Rc(1-\cos\theta e)$$
$$k=x_c-Rc\,\mathrm{sen}\,\theta e$$

Subtangente: Es la distancia entre el PI y el TE o ET de la curva, medida sobre la prolongación de la tangente.

$$STe = k + (Rc + p)tan\frac{\Delta}{2}$$

Cuerda larga de la espiral: (Ce)

$$CLe = \sqrt{\left(x_c^{\ 2} + y_c^{\ 2}\right)}$$

Externa de la curva Ee

$$Ee = \frac{(P + Rc)}{Cos\,\Delta/2} - Rc$$

Ángulo o deflexión de la cuerda larga de la espiral

$\phi' c = arctan\frac{y_c}{x_c}$ es decir $\phi' = \tan^{-1}\frac{yc}{xc}$ O también: $\phi' = \frac{\theta e}{3}$

Tangente larga: Es el tramo de la subtangente comprendido entre el TE o ET y la intersección con la tangente a EC o CE.

$TL = x_c - y_c \cot\theta e$ es decir, $TL = x_c - \frac{y_c}{\tan\theta e}$

Tangente corta: Es el tramo de la tangente a OE o EC comprendida entre uno de estos puntos y la intersección con la subtangente correspondiente.

$TC = y_c \csc\theta e$ es decir, $TC = \frac{y_c}{sen\,\theta e}$

Por lo general el valor de la tangente corta, *Tc,* es levemente superior a la mitad de la tangente larga, *Tl*.

El abscisado de la curva es:
TE = PI - STe *EC = TE + Le* *CE = EC + Lc* ET = CE + Le

Los puntos son: TE (Tangente – Espiral), EC (Espiral – Circular), CE (Circular – Espiral) y ET (Espiral – Tangente).

Por lo tanto, TE – EC y CE –ET será igual a Le y aquí donde se desarrolla el sobreancho. Entre EC y CE se debe de desarrollar la sobreelevación máxima, para los demás puntos se interpolan los valores.

Para elaborar la tabla de replanteo se parte de los estacionamientos antes descritos (del TE-EC, EC-CE Y CE-ET) la ecuación a emplear para el cálculo de las deflexiones y estaciones:

Deflexión es $\phi' = \dfrac{l^2\phi}{le^2}$ o bien $\phi' = \tan^{-1}\dfrac{Y}{X}$

$\theta = l^2/2K^2$ $\quad x_c = L\left(1 - \dfrac{\theta e^2}{10}\right)$ $\quad y = L\left(\dfrac{\theta e}{3} - \dfrac{\theta e^3}{42}\right)$

Podemos generar una tabla con los siguientes valores:

Punto	Estación	Distancia Acum. (L)	Deflexión φ´	$\theta = l^2/2K^2$	X	Y
TE						
EC						
CE						
ET						

En una curva mixta

Los cadenamientos sobre la curva son: **PC – (LT / 2) – N, PT – (LT / 2), PC-LT/2+N, PC, PT + (LT/2)**

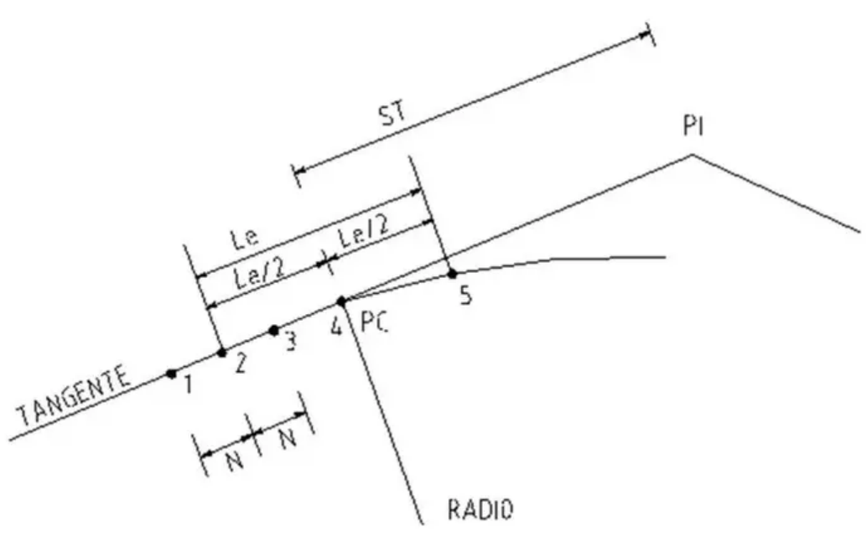
En la curva espiral **TE-N, TE, TE+N,EC**

Para determinar el desarrollo de las sobreelevaciones es necesario completar la tabla

Estación	d	Sobreelevación (%)		Ampliación	Ensanche (m)		Anchos de Proyecto (m)		Anchos Total Proyecto (m)
		Izquierda	Derecha	Ac (m)	Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha	
TE-N (1)		+b	-b	0		e2			
TE (2)	0	0	-b	A	e2	e2			
TE+N (3)		b	-b	A		e2			
EC (4)	Le	+Sc	-Sc	A	e1	e2			

Los puntos intermedios deben de desarrollarse
Ampliación se desarrollar desde TE al EC.
Entre EC y CE el Sc es el máximo calculado.
Ancho de proyecto = ancho carril + ancho hombro + ensanche + sobre ancho de construcción
Sobreancho de construcción es 0.20 m.

Los principales puntos a desarrollar en una curva en espriral son: TE, TE-N, TE+N, EC para la entrada y la salida.



Los principales valores están dado por siguientes fórmulas.

El sobreancho o ampliación $a = n*\left(R - \sqrt{R^2 - B^2}\right) + \frac{V}{10\sqrt{R}}$

Donde,
B es la distancia entre ejes del camión de diseño. SIECA recomienda un valor conservador de 8 m. Mismo que debe revisarse en función de los vehículos tipo.
N: es el número de carriles de circulación por sentido.
R: radio de curvatura.
V: velocidad de diseño.

Para pasar de calzada en tangente al ancho de calzada en curva se aprovecha la longitud de transición requerida para dar la sobre elevación de manera que la orilla interior de la calzada forme una curva suave sin quiebres bruscos a lo largo de ella. En curvas circulares con espirales la ampliación en la transición puede darse proporcionalmente a la longitud de la espiral.

$$A' = \frac{A}{Le} * L$$

Donde A´: ampliación en una sección que está a un metro del Ts y Le.
Le: Longitud espiral
A: ampliación total de la curva.

Procediendo de esta manera se obtendrá la ampliación nula en Ts. Ampliación total en el Sc y la orilla inferior de la calzada tendrá la forma de una espiral modificada.

Cadenamiento N = $N = \frac{b}{Sc} Le$ *donde b es el bombeo, Le la longitud de la espiral.*

$$S = \frac{e\max}{G\max} G$$

$$G\max = \frac{127*1145.92(f + S\max)}{V^2}$$

Tips Recomendados para el trazado final

VELOCIDAD DE DISEÑO (km/h)	NUMERO MÍNIMO DE POSIBILIDADES DE ADELANTAR POR CADA 5K
100	4
80	3
60	3

50	3
40	2
30	2

Ejemplo:

Diseño de una Sección Transversal en Curva
Datos de la Carretera y Curva:

- Alto tránsito de vehículos pesados
- Velocidad de proyecto = 110 km/hr
- Un carril de 3.66 metros por sentido.
- Sección A2
- Bombeo del -2% del centro hacia ambos lados
- Deflexión Δc = 27° 35' Derecha
- Cadenamiento del PI = 20 + 351.30
- Grado de Curvatura Gc = 2° 30 '

SOLUCIÓN:

1) Sobreelevación máxima: Según las especificaciones de la SCT y en función del % de vehículos pesados y de las condiciones climatológicas, se tiene:

$$Smax = 10\%$$

2) Coeficiente de Fricción lateral: Se obtiene de la gráfica correspondiente

$$f = 0.125$$

3) Grado de Curvatura Máximo:

$$Gmax = \frac{145{,}606(f + Smax)}{V^2} = \frac{145{,}606(0.125 + 0.1)}{(110)^2}$$

$$Gmax = 2.71°$$

4) Sobreelevación de la curva:

$$Sc = \frac{Smax}{Gmax} Gc = \frac{10}{2.71} 2.5 = 9.2\%$$

5) Ampliación de la curva: Si la longitud del vehículo de diseño es B=11m, se tiene:

$$Rc = \frac{1{,}145.92}{Gc} = \frac{1{,}145.92}{2.5°} = 458.37m$$

$$Ac = n\left(Rc - \sqrt{Rc^2 - B^2}\right) + \left(\frac{Vp}{10\sqrt{Rc}}\right)$$

$$Ac = 1\left(458.37 - \sqrt{458.37 \ -11^2}\right) + \left(\frac{110}{10\sqrt{458.37}}\right) = 0.65m$$

6) Longitud de espiral:

$$Le = 0.56Vp = 0.56(110) = 61.6m$$

para fines prácticos se utilizarán 65m de longitud de espiral.

7) Tanto los valores de sobreelevaciones de curva **Sc**, ampliación de curva **Ac** y longitud de espiral **Le**, se pueden obtener de tablas del Manual del Proyecto Geométrico de la SCT (ANEXO 1)

Comparando valores se obtiene, para:Gc=2° 30' = 2.5 ° y Vp=110 km/hr

Concepto	A2 (Tabla 004-7)	Cálculos
Sc (%)	9.8	9.2
Le (m)	86.0	65.0
Ac (m)	0.60	0.65

8) Longitud de curva:

$$LC = 20\left(\frac{\Delta c}{Gc}\right) = 20\left(\frac{27.58°}{2.5°}\right) = 220.67m$$

9) Subtangente:

$$ST = Rc * tan\left(\frac{\Delta c}{2}\right) = 458.37 * tan\left(\frac{27.58°}{2}\right) = 112.52m$$

10)Cadenamientos del *PC* y del *PT*:

$$CAD(PC)) = CAD(PI) - ST = (20 + 351.5) - 112.52 = 20 + 238.78$$
$$CAD(PT) = PC + LC = (20 + 238.78) + 220.67 = 20 + 459.45$$

11)Externa:

$$E = Rc\left[\sec\frac{\Delta}{2} - 1\right] = 458.37\left[\sec\frac{27.58°}{2} - 1\right] = 13.61m$$

12)Ordenada Media:

$$M = Rc\left[1 - \cos\frac{\Delta c}{2}\right] = 458.37\left[1 - \cos\frac{27.58°}{2}\right] = 13.61m$$

13)Cuerda larga:

$$CL = 2Rc * \text{sen}\frac{\Delta c}{2} = 2(458.37)\text{sen}\left(\frac{27.58°}{2}\right) = 218.54m$$

14)Deflexión por metro:

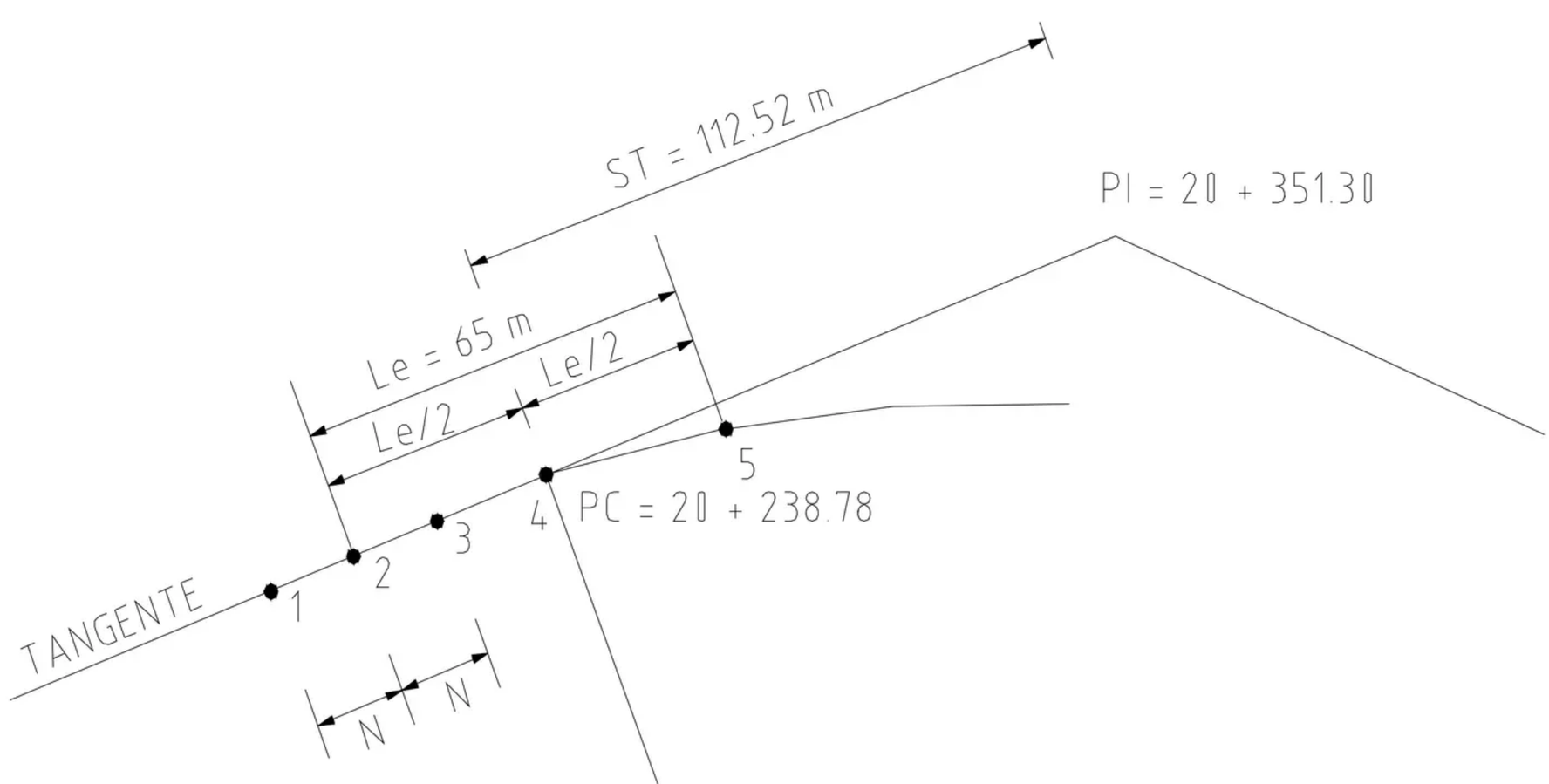
$$\phi m = 1.5Gc = 1.5(2.5°) = 3.75 \text{ min/m}$$

Con este valor se puede calcular la deflexión de cualquier punto sobre la curva teniendo como origen el punto *PC.*

15)Cadenamiento:

$$N = \frac{b}{Sc}Le = \left(\frac{2}{9.2}\right)65 = 14m$$

En el siguiente esquema se muestran la localización de los cinco (5) puntos importantes a definir (cadenamiento, sobreelevación y ancho de calzada) tanto en el PC, transición de entrada, como en el PT, transición de salida, cuando la longitud de transición de la curva es mixta. En el caso de una curva con longitud de transición en espiral los puntos a definir en el EC y CE son cuatro (4) ya que el PC y PT no existen dentro de la curva en espiral o de transición.



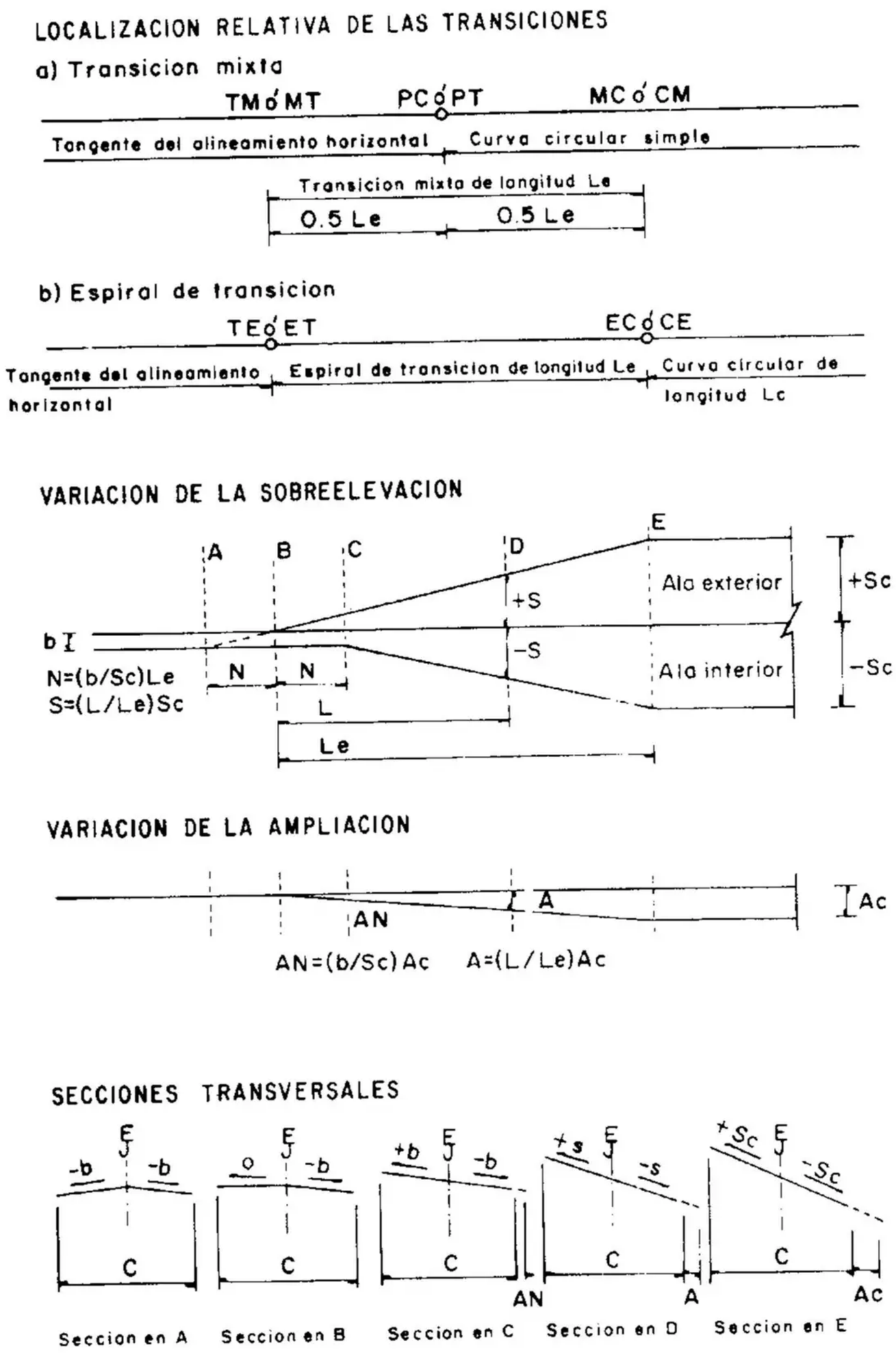
En la siguiente tabla se puede observar el nombre del punto en la primera columna y el cadenamiento dentro de la curva simple con longitudes de transición mixta a la entrada y salida de la misma.

PC – (Le / 2) – N	20 + 192.28
	20 + 200
PC – (Le / 2)	20 + 206.28
	20 + 220
PC – (Le / 2) + N	20 + 220.28
PC	20 + 238.78
	20 + 240
	20 + 260
PC + (Le / 2)	20 + 271.28
	20 +280
	...
	...
PT – (Le / 2)	20 + 426.95
	20 + 440
PT	20 + 459.45
	20 + 460
PT + (Le / 2) – N	20 + 477.95
	20 + 480
PT + (Le / 2)	20 + 491.95
	20 + 500
PT + (Le / 2) + N	20 + 505.95

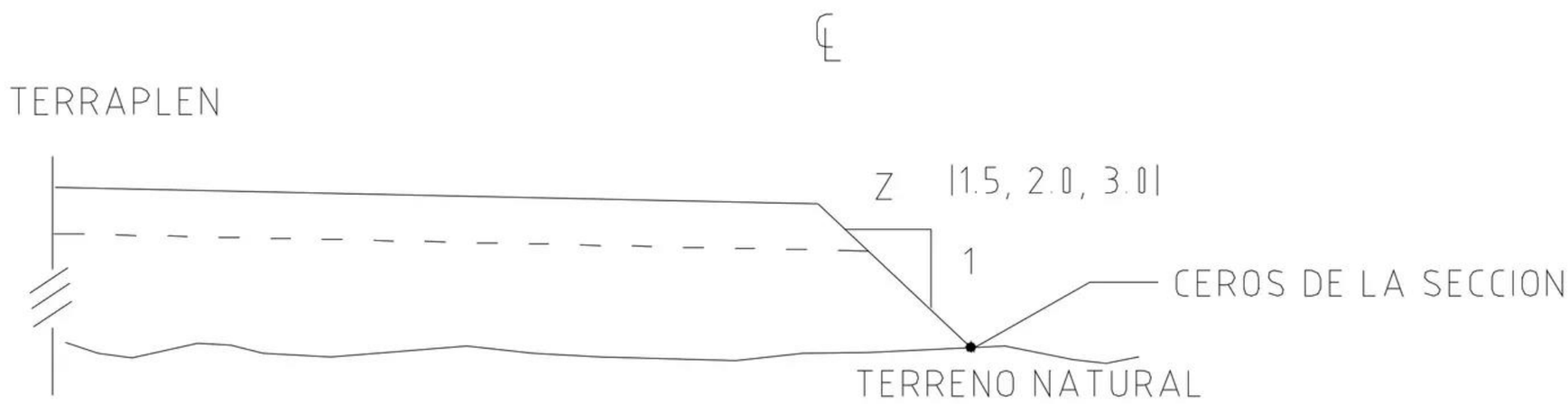
Parte de la curva con Sc completa y Ac total, cuya longitud debe ser mayor que LC/3
LC / 3 = 73.56 metros
Long = 155.67 metros → OK

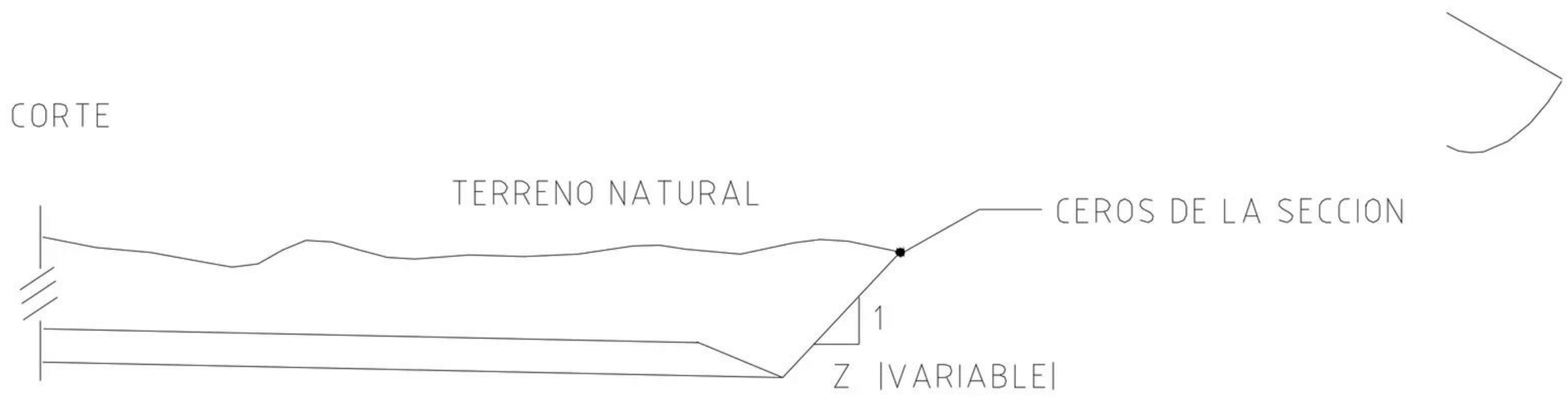
16)Localización relativa de la curva circular simple y de la curva con espiral de transición:

$$S = \frac{Sc}{Le} x$$



17) Sección transversal en tangente:





18)Cálculo de ensanches y ancho de subcorona:

Ensaches:

$$e = \frac{B}{\frac{1}{z} \pm s}$$

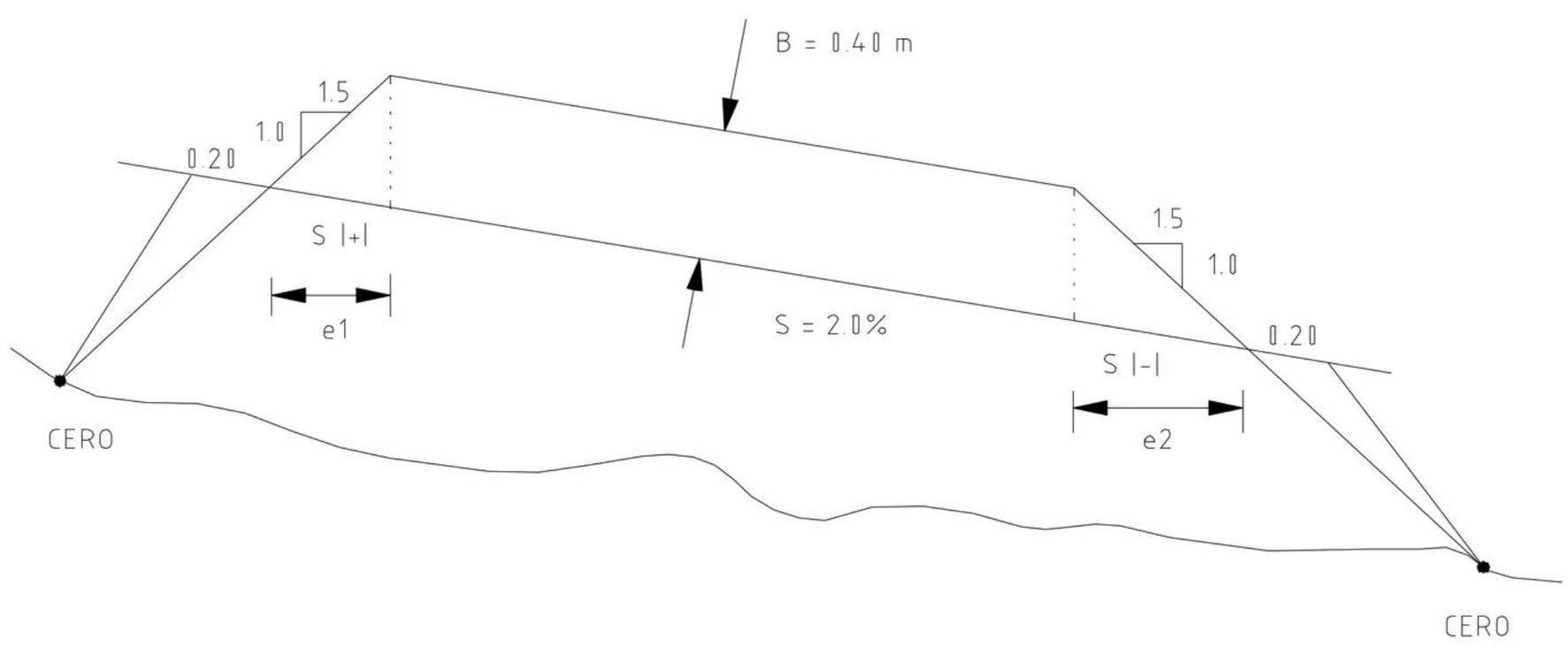
en donde:

e= Ensanche, expresado en metros

B= Espesor de la base más la subbase, expresado en metros

z= Inclinación del talud

s= Sobreelevación de la sección, expresada en metro/metro



$$e_1 = \frac{0.40}{\frac{1}{1.5} + 0.02} = 0.58m; \quad e_2 = \frac{0.40}{\frac{1}{1.5} - 0.02} = 0.62m$$

En el caso del ejemplo, se considerara dos veces el valor de e_2

Anchos de Subcorona en tangente:

	Ancho (m) Izquierda	Ancho (m) Derecha
Acotamiento	2.50	2.50
Calzada	3.66	3.66
Ensanche	0.62	0.62
	6.78	**6.78**

19)Variación de la ampliación para una sección dada:

$$Ai = \frac{Ac}{Le} x$$

20) Cálculos de anchos de proyecto de subcorona: Se obtuvieron los siguientes resultados:

Estación	d		Sobreelevación (%)		Ampliación Ac (m)	Ensanche (m)		Anchos de Proyecto (m)	
			Izquierda	Derecha		Izquierda	Derecha	Izquierda	Derecha
20+192.28	1	14.00	-2.0	-2.0	0.000	0.62	0.62	6.78	6.78
20+200		6.28	-0.9	-2.0	0.000	0.61	0.62	6.77	6.78
20+206.28	2	0.00	0	-2.0	0.000	0.60	0.62	6.76	6.78
20+220		13.72	+2.0	-2.0	0.14	0.58	0.62	6.74	6.78
20+220.28	3	14.00	+2.0	-2.0	0.14	0.58	0.62	6.74	6.78
20+238.78	4	32.50	+4.6	-4.6	0.33	0.56	0.64	6.72	6.80
20+240		33.72	+4.8	-4.8	0.34	0.56	0.64	6.72	6.80
20+260		53.72	+7.6	-7.6	0.54	0.54	0.68	6.70	6.84
20+271.28	5	65.00	+9.2	-9.2	0.65	0.53	0.70	6.69	6.86
20+280		65.00	+9.2	-9.2	0.65	0.53	0.70	6.69	6.86
...		65.00	+9.2	-9.2	0.65	0.53	0.70	6.69	6.86
...		65.00	+9.2	-9.2	0.65	0.53	0.70	6.69	6.86
20+420		65.00	+9.2	-9.2	0.65	0.53	0.70	6.69	6.86
20+426.95	5	65.00	+9.2	-9.2	0.65	0.53	0.70	6.69	6.86
20+440		51.95	+7.4	+7.4	0.52	0.54	0.67	6.70	6.83
20+459.45	4	32.50	+4.6	-4.6	0.33	0.56	0.64	6.72	6.80
20+460		31.95	+4.5	-4.5	0.32	0.56	0.64	6.72	6.80
20+477.95	3	14.00	+2.0	-2.0	0.14	0.58	0.62	6.74	6.78
20+480		11.95	+1.7	-2.0	0.12	0.59	0.62	6.75	6.78
20+491.95	2	0.00	0	-2.0	0.00	0.60	0.62	6.76	6.78
20+500		8.05	-1.1	-2.0	0.00	0.61	0.62	6.77	6.78
20+505.95	1	14.00	-2.0	-2.0	0.00	0.62	0.62	6.78	6.78

Dado los siguientes datos calcular los elementos principales de la curva horizontal

P.C.=1+000
D=50 m
∆ =46

D= 49.82 m
G.C.= 23° 00' 00"
T = 21.15 m
C.M. = 38.93 m
E=4.30 m
M=3.96 m
Est. PC = 1+000
Est. PT =1+040
Est. PI =1+021.15
δ= 1.5 G_C*Long. Cuerda/60
δ=(1.5)(23)(5)/(60)
δ=2°52'30"

PUNTO	ESTACION	CUERDA	DEFLEXION	DEFLEXION ACUMULADA
PC	1+000	---------	00°00'00"	00°00'00"
	1+005	5	2°52'30"	02°52'30"
	1+010	5	2°52'30"	05°45'00"
	1+015	5	2°52'30"	08°37'30"
	1+020	5	2°52'30"	11°30'00"
	1+025	5	2°52'30"	14°22'30"
	1+030	5	2°52'30"	17°15'00"
	1+035	5	2°52'30"	20°07'30"
PT	1+040	5	2°52'30"	23°00'00"

Usando el método de desarrollo de peralte por el eje de la vía:
∆i= $43^0 20'$
G= 3^0
Pi= 5+000
emax= 6%
f=0.14
L=8m

Tipo de carretera = Colectora suburbana
Tipo de terreno= Plano
=70 km/h

Ancho calzada= 7.2m
Ancho carril= 3.6 m

$$Gmax = \frac{145692.26(0.1 + 0.14)}{70^2}$$
$$Gmax = 5°56''47.84' > G$$
$$R = \frac{1145.92}{3} = 381.973\ m$$
$$Rmin = \frac{70^2}{127(0.06 + 0.14)} = 192.913\ m$$
$$e = \frac{0.06}{5°56''47.84'^2} 2 * (5°56'47.84'' - 3) * 3°$$
$$e = 0.045 = 4.523\%$$
$$Sa = 2\left(381.973 - \sqrt{381.973^2 - 8^2}\right) + \frac{70}{10\sqrt{381.973}}$$
$$Sa = 0.526m$$

$LT = m * a * e$
$m = (1.5625 * 70 + 75) = 184.375$
$LT = 184.375 * 3.6 * 0.045$
$LT = 29.869m \approx 30$
$T = Rtan\frac{\Delta}{2} = 381.973\ tan\frac{43°20´}{2}$
$T = 151.748m$
$D = \frac{\pi R\Delta}{180} = \frac{\pi(381.973) * 43°20´}{180°} = 288.890m$
$PC = Pi - T = 0 + 5000 - 151.748$
$PC = 4 + 848.252$
$PC = Pc + D = 4 + 848.252 + 288.890$
$PC = 5 + 137.142$
$PM = PC + \frac{D}{2} = 4 + 848.252 + \frac{288.890}{2}$
$PM = 4 + 992.697$

Ejemplo:

Curva Circular con Longitud de Transición en Espiral

1) Parámetro de la espiral:

$K = \sqrt{RcLe}$; Rc=458.37 m ; Le=65 m

$$K = \sqrt{458.37 * 65} = 172.61m$$

2) Deflexión de la espiral:

$$\theta e = \frac{GcLe}{40} = \frac{2.5 * 65}{40} = 4.0625°$$

3) Coordenadas del EC (θe debe ir en radianes):

$$x_c = M\sqrt{\theta e}\left(1 - \frac{\theta e^2}{10}\right) = 64.96m$$

$$y_c = M\sqrt{\theta e}\left(\frac{\theta e}{3} - \frac{\theta e^3}{42}\right) = 1.53m$$

$$M = \sqrt{2RcLe} = 244.11m$$

4) Coordenadas del PC:

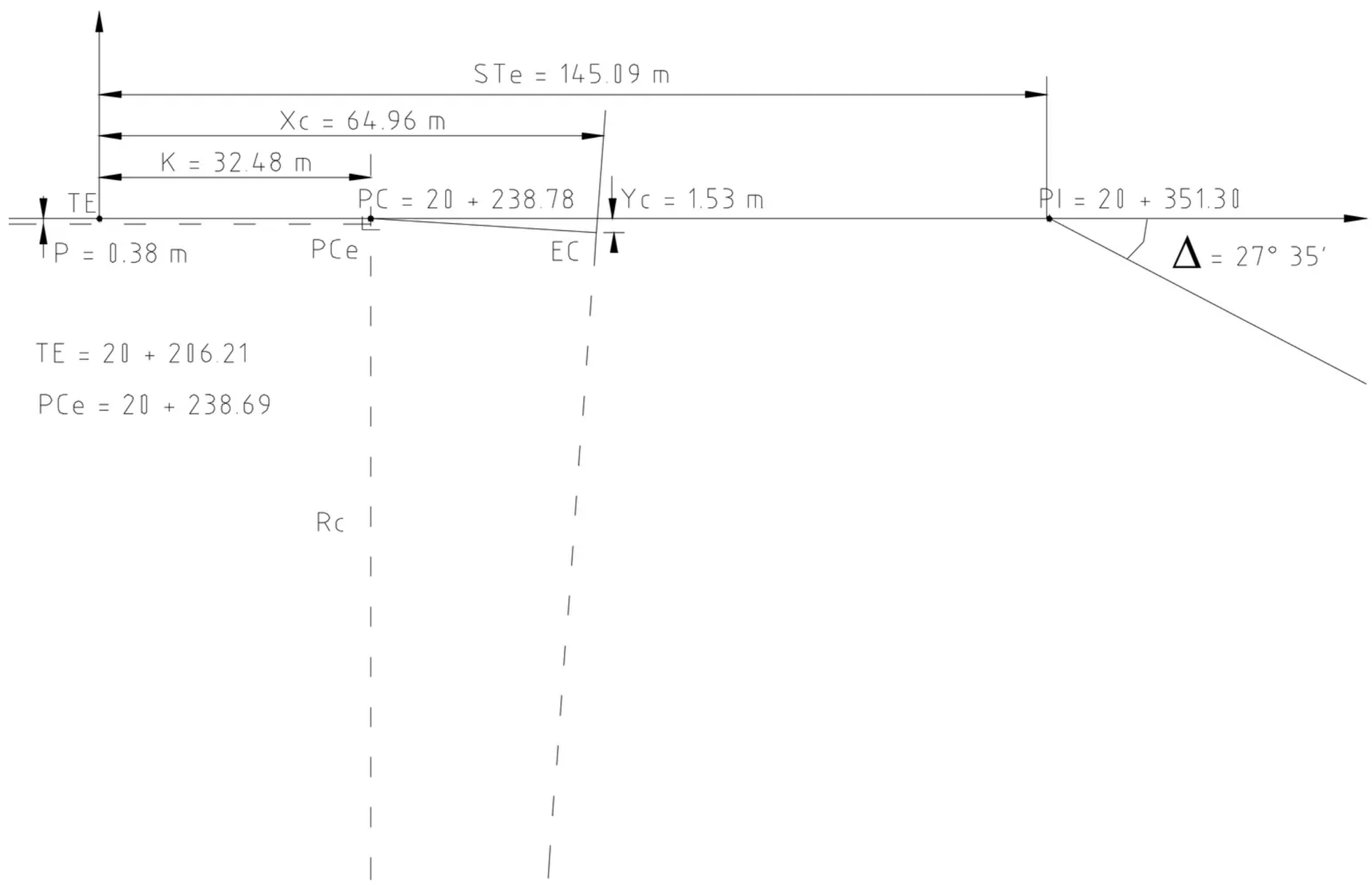
$$p = y_c - Rc(1 - \cos\theta e) = 0.38m$$

$$k = x_c - Rc \operatorname{sen} \theta e = 32.48m$$

5) Subtangente:

$$STe = k + (Rc + p)tan\frac{\Delta}{2} = 145.09m$$

$$\Delta = 27.583°$$



Al Determinar los elementos de la Curva Circular con Longitud de Transición en Espiral para los siguientes datos de la Carretera y Curva

- ✓ Velocidad de proyecto = 110 km/hr
- ✓ Un carril de 3.66 metros por sentido. Bombeo del 2%

- ✓ Deflexión Δc = 27° 35' Derecha. Estación del PI = 20 + 351.30
- ✓ Grado de Curvatura Gc = 2° 30 '
- ✓ Zona Rural Montañosa. Coeficiente de Fricción lateral (f)= 0.125
- ✓ Longitud del vehículo de diseño es B (m)= 11 m
- ✓ 1 Carril para sobreancho. Espesor de la base más la subbase (B) = 0.40 m
- ✓ Inclinación del talud (z) = 1.5 Sobreelevación de la sección s (m) = 2%
- ✓ Ancho de carril (m) = 3.66

Los resultados son:

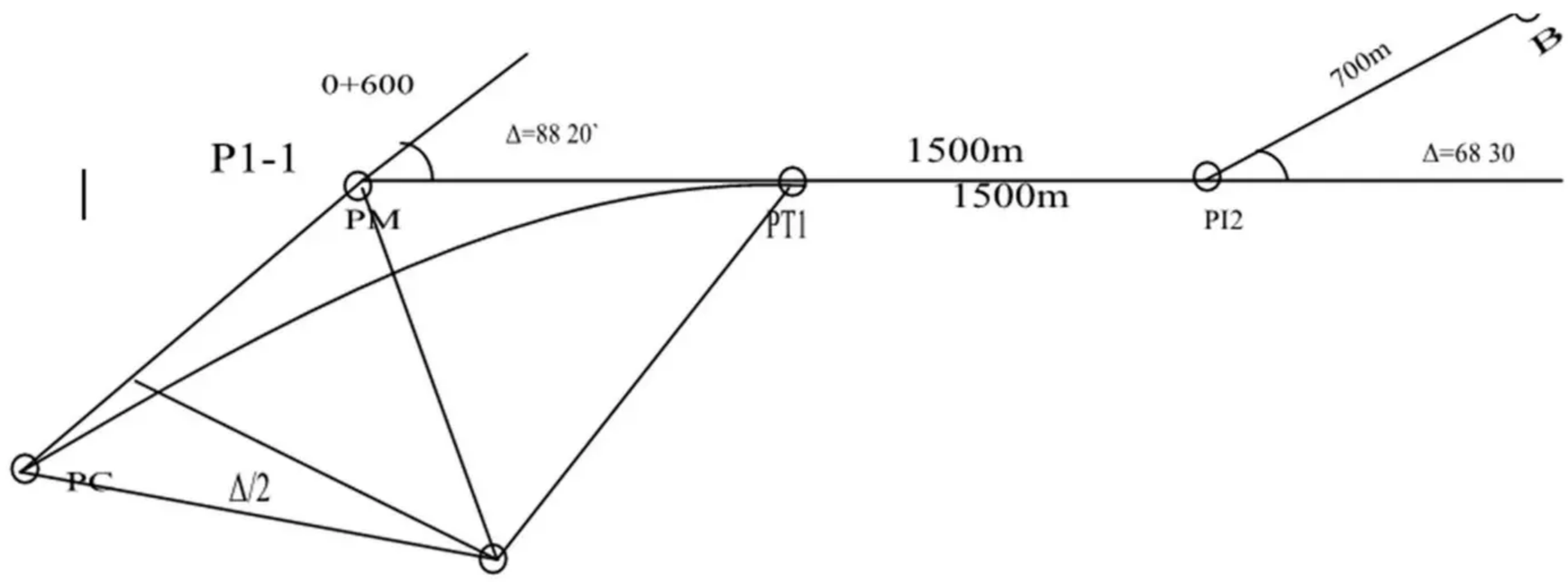
ELEMENTOS DE CURVA CON ESPIRAL					
Rc	458.368	Deflexión θe	4.0625	Cle =	64.98547002
Rmin =	423.447069	M=	32.249031	ϕ´c =	1.354166667
Le $_{Cal}$ =	61.6	Xc =	64.967322	Δc = Δ – 2θe	19.458
Le =	65	Yc =	1.53570169	Ee =	14.00259648
Le $_{Max}$ =	104.884851	Coord Pc (P)	0.38398987	Tl=	43.34474381
Le $_{Min}$ =	51.7840832	Coord Pc (K)	32.4944219	Tc=	21.67704475
Parámetro K	172.609154	STe =	145.102558		

Si esta fuera mixta podemos establecer los cadenamientos:

ELEMENTOS DE CURVA SIMPLE Y TRANSICIÓN DE PERALTE							
Gmax	2.706170579	**PT**	20+428.37	**PC – (Le / 2) + N**	20+254.21	**PT + (Le / 2) + N**	20+474.87
Sc	9.24%	**E**	6.68841216	**PC**	20+272.71	e1=	0.6185567
Ac	0.645798899	**M**	6.59221984	**PC + (Le / 2)**	20+305.21	e2=	0.58252427
Lc	155.664	**CL**	154.917628	**PT – (Le / 2)**	20+395.87		
ST	78.5890773	**N**	14.0	**PT**	20+428.37		
PC	20+272.71	**PC – (Le / 2) – N**	20+226.21	**PT + (Le / 2) – N**	20+446.87		
PM	20+350.54	**PC – (Le / 2)**	20+240.21	**PT + (Le / 2)**	20+460.87		

Ejemplo 2 curvas inversas

Diseñe las curvas horizontales respectivas en la poligonal mostrada, la cual presenta la línea central de un tramo de carretera tomando en cuenta las especificaciones de una Nac de 2da clase



V de proyecto = 65 km/h
Coeficiente de fricción= 0.15
Tipo de terreno = Lomerío
Peralte max = 10%

X: Se mide desde Pi sobre la tangente
Y: Se levanta una tangente al pto.

Curva 1
X= 122.61 m
Y= 22.97m
$\Delta = 88^0\ 20'$

Curva
$\Delta = 68^0\ 30'$

Se requiere que la curva pase a 40.05m del P_{i2} medio sobre la bisectriz.

$$d = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{122.61^2 + 22.97^2}$$
$$d = 124.743m$$
$$Gmax = \frac{145692.26(Gmax + f)}{Vd^2}$$
$$Gmax = \frac{145692.26(0.1 + 0.15)}{65^2} = 8°37'15'$$
$$\propto = tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) = tan^{-1}\left(\frac{22.97}{122.61}\right) = 10°36'39'$$
$$\beta = 90 - \left(\frac{\Delta}{2} + \alpha\right) = 90 - \left(\frac{8°20'}{2} + 10°36'39'\right) = 35°13'21'$$

$$\hat{2}' = sen^{-1}\frac{sen\beta}{cos\frac{\Delta}{2}}$$

$$\hat{2}' = sen^{-1}\frac{sen35°13'21'}{cos\frac{88°20''}{2}}$$

$$\hat{2}' = 53°3'05'$$

$$\hat{2} = 180° - \hat{2}' = 180° - 53°3'05'$$

$$\hat{2} = 126°68''55'$$

$$\hat{\Lambda} + \hat{2}' + \beta = 180°$$

$$\hat{\Lambda} = 180° - (\hat{2}' + \beta)$$

$$\hat{\Lambda} = 18°17''44'$$

$$R = \frac{d}{sen^{-1}} * sen\beta = \frac{124.74}{sen18°17''44'} * sen35°13'21'$$

$$R = 229.18m$$

$$Gc = \frac{1145.92}{R}$$

$$Gc = \frac{1145.92}{229.18} = 05°00'0.31'$$

$$Gc \leq Gmax \quad ok \surd$$

Calculo de los elementos de la curva No 1

$$T = R\,tan\frac{\Delta}{2} = 229.18\tan\frac{88°20´}{2}$$
$$T = 222.61m$$
$$Lc = \frac{\pi R\Delta}{180} = 353.33m$$
$$E = R\left(sec\frac{\Delta}{2}1\right) = 229.18\,(\sec\frac{88°20´}{2} - 1)$$
$$E = 90.32$$

$$M = R\left(1 - cos\frac{\Delta´}{2}\right) = 229.18\,(1 - \cos\frac{88°20´}{2})$$
$$M = 64.79$$
$$CM = 2Rsen\frac{\Delta´}{2} = 2 * 229.18(sen\,\frac{88°2´}{2})$$
$$CM = 319.36m$$

Calculo de los elementos Curva N°2

$$R = \frac{E}{\sec\left(\frac{\Delta}{2}\right) - 1} = \frac{40.05}{\sec\left(\frac{68°30´}{2}\right) - 1}$$
$$R = 190.91m$$

$$Gc = \frac{1145.92}{\mathrm{R}} = \frac{1145.92}{190.91} = G°$$
$$T = 190.91\tan\frac{68°30´}{2} = 129.99m$$
$$Lc = \frac{\pi * 190.91^2 * 68°30´}{180°} = 228.24m$$
$$E = 190.91(\sec\frac{68°20´}{2} - 1)$$
$$E = 39.82m$$

$$M = 190.91(1 - cos\frac{88°20´}{2})$$
$$M = 32.95m$$
$$CM = 2 * 190.91 * sen\frac{68°20´}{2})$$
$$CM = 214.43m$$

Calculo de las estaciones tramo
A= 0+000
P_{i1}= 0+600
PC1=PI1-T1 = 0+377.39
PM1= PC1 + D/2 = 0+5540.55
Pt1= PC1 + D= 0+730.72

Estaciones Pi2
PI2= PT1 + (1500-T1)= 2+008.11
PC2= Pi2 – T2= 1+878.12
PM2= PC2 + D_2/2 = 1+992.24
PT2= PC2 + D= 2+106.36
B = PT2 + (700-T2) = 2+676.37

Usando el método de desarrollo de peralte por el eje de la vía:
∆i= $43^0 20'$
G= 3^0
Pi= 5000
emax= 6%
f=0.14
L=8m

Tipo de carretera = Colectora suburbana
Tipo de terreno= Plano
Velocidad=70 km/h
Ancho calzada= 72m
Ancho carril= 3.6 m

$$Gmax = \frac{145692.26(0.1+0.14)}{70^2}$$
$$Gmax = 5°56''47.84' > G$$
$$R = \frac{1145.92}{3} = 381.973\ m$$
$$Rmin = \frac{70^2}{127(0.06+0.14)} = 192.913\ m$$
$$e = \frac{0.06}{5°56''47.84'^2} 2 * (5°56'47.84'' - 3) * 3°$$
$$e = 0.045 = 4.523\%$$
$$Sa = 2\left(381.973 - \sqrt{381.973^2 - 8^2}\right) + \frac{70}{10\sqrt{381.973}}$$
$$Sa = 0.526m$$

$LT = m * a * e$
$m = (1.5625 * 70 + 75) = 184.375$
$LT = 184.375 * 3.6 * 0.045$
$LT = 29.869m \approx 30$

$T = Rtan\frac{\Delta}{2} = 381.973\ tan\frac{43°20´}{2}$
$T = 151.748m$
$D = \frac{\pi R\Delta}{180} = \frac{\pi(381.973) * 43°20´}{180°} = 288.890m$
$PC = Pi - T = 0 + 5000 - 151.748$
$PC = 4 + 848.252$
$PC = Pc + D = 4 + 848.252 + 288.890$
$PC = 5 + 137.142$
$PM = PC + \frac{D}{2} = 4 + 848.252 + \frac{288.890}{2}$
$PM = 4 + 992.697$

Ejemplo Usando el método de desarrollo de peralte por el eje de la vía.

PC = 10+002.48
Gc= 4^0
F=0.14
PT= 10+202.48
VP=80km/h
emax= 10%
Tipo de carretera Nac 2da clace
N^0 carriles: 2
Ancho corona: 8.5m long: 6.10m
Ancho carpeta tangente: 6m

$R = \frac{1145.92}{Gc} = \frac{1145.92}{4} = 286.48m$
$Gmax = 5°27´\ 48.46´´$
$e = \frac{0.1}{5°27´48.46´´}(2 * 5°27´48.46´´ - 4°) * 4°$
$e = 0.093$
$Sa = 2 * \left(286.48 - \sqrt{286.48^2 - 6.1^2}\right) + \frac{80}{10\sqrt{286.48}}$
$Sa = 0.603m$
$LT = m * a * e$
$m = 1.5625 * 80 + 75 = 200$
$LT = 200 * \left(\frac{6}{2}\right) * 0.093$
$LT = 55.8m \approx 60$

$$T = 286.48 \tan \frac{39°59´59.45´´}{2} = 104.270m$$
$$Lc = \frac{\pi R \Delta}{180} = \Delta = \frac{180Lc}{\pi R}$$
$$Lc = PT - PC = 10202.48 - 10002.48$$
$$Lc = 200m$$
$$\Delta = \frac{180 * 200}{\pi * 286.48} = 39°59´59.45´´$$
$$M = R\left(1 - cos\frac{\Delta}{2}\right) = 286.48(1 - cos\frac{39°59´59.45´´}{2})$$
$$M = 17.278m$$
$$E = R\left(sec\frac{\Delta}{2} - 1\right) = 286.48(sec\frac{39°59´59.45´´}{2} - 1)$$
$$E = 18.386m$$

$$CM = 2Rsen\frac{\Delta}{2} - 1 = 286.48sen\frac{34°59´59.45´´}{2}$$
$$CM = 195.963m$$
$$PM = PC + \frac{D}{2} = 10 + 00248 + \frac{200}{2}$$
$$PM = 10 + 102.48$$
$$PI = PC + T$$
$$PI = 10 + 002.48 + 104.270$$
$$PI = 10 + 106.75$$

Diseñe la curva horizontal

Vp= 70km/h
F=0.14
E=6% =0.06
2carriles
Terreno lomerío
Δ1= 88°20´
Δ2= 64°50´
Pi PT= 222.61m
Estac.(800-T2)+PT2
Dist. Pi1 Λ Pi2 = (PT2-PT1)

Curva 1
T= 222.61
ΔT=88°20

Curva 2
T2= 176m

A2= 36°30´
A1= 28°20

$$Gmax = \frac{145692.26(0.14 + 0.06)}{70^2}$$
$$Gmax = 05°56´47.84´´$$

Curva 1

$$T = Rtan\frac{\Delta}{2}$$
$$R = \frac{T}{tan\frac{\Delta}{2}}$$
$$R = \frac{222.61}{\tan\left(\frac{88°20´}{2}\right)} = 229.182m$$
$$Gc = \frac{1145.92}{229.18} = 5°0´0.16´´$$

$Gc < Gmax$ **Se hace replanteo**

$$Lc = \frac{\pi R\Delta}{180} = \frac{\pi * 229.182 * 88°20´}{180}$$
$$Lc = 353.332m$$

$$E = R\left(sec\frac{\Delta}{2} - 1\right) = 229.182(sec\frac{88°20´}{2} - 1)$$
$$E = 90.317m$$
$$M = R\left(1 - cos\frac{\Delta}{2}\right) = 229.182(1 - cos\frac{88°20´}{2})$$
$$M = 64.786m$$
$$CM = 2Rsen\frac{\Delta}{2} = 2 * 229.182sen(\frac{88°20´}{2})$$
$$CM = 319.364m$$

Curva N° 2

ΔT= Δ1+Δ2
ΔT=28°20´+36°30´
ΔT=64°50´

$$\frac{d1}{sen\frac{\Delta 2}{2}} = \frac{\overline{12}}{sen(180 - \Delta)}$$
$$d1 = \frac{176 * sen36°30´}{sen(180 - 64°50´)} = 115.669$$

$$\frac{d2}{sen\frac{\Delta 1}{2}} = \frac{\overline{12}}{sen(180-\Delta)}$$

$$d2 = \frac{176 * sen\frac{28°28´}{2}}{sen(180-64°50´)} = 92.290m$$

$$R = \frac{\overline{12}}{tan\frac{\Delta 1}{2} + tan\frac{\Delta 2}{2}} = \frac{176}{tan\frac{28°20´}{2} + tan\frac{36°30´}{2}}$$

$$R = 302.317m$$

$$G1 = \frac{1145.92}{R} = \frac{1145.92}{302.317} = 3°47´25.65´´$$

$$D = \frac{20\Delta T}{Gc} = \frac{20°64´50´´}{3°47´25.65´´}$$

$$D = 342.087$$

$$L = \frac{\pi * 302.317 * 64°50´}{180°} = 342.088$$

$$E = R\left(sen\frac{\Delta}{2} - 1\right) = 302.317(sec\frac{64°50´}{2} - 1)$$

$$E = 55.806m$$

$$M = R\left(1 - cos\frac{\Delta}{2}\right) = 302.317(1 - cos\frac{64°50´}{2})$$

$$M = 47.109$$

$$CM = 2Rsen\frac{\Delta}{2} = 2 * 302.317sen(\frac{64°50´}{2})$$

$$CM = 324.128m$$

$$T = Rtan\frac{\Delta}{2} = 302.317\tan\left(\frac{64°50}{2}´\right)$$

$$T = 191.980m$$

A= 0+000 PI=0+600

PCi= Pi – T = 0+600 – 222.61
=0+377.39

PM1= PC1+ D/2= 0+377.39 + 353.332/2
=0+554.056

PT1= PC1 + D= 0+377.39 + 353.332
=0+730.722

Curva N 2

PT2= PT2 + (1600-T1)
=0+730.722 + (1600-222.61)

=2+108.112
PC2= PI2 – T2 = 2+108.112 – 191.980
=1+916.176
PM2= PC2 + D2/2= 1+916.132+342.088/2
=2+087.176
PT2= PC2 + D= 1+916.132 + 342.088
=2+258.220
B=PT2+ (800-T2)
B= 2+258.220+ (800-191.980)
= 2+866.240

Bibliografía

AASHTO. (2001). *A policy on Geometric Desing of Higways and streets.* Washington, D.C: www.transportation.org.

ASTEC, T. (s.f.). Normas de Diseño Geométrico de Carreteras y de caminos vecinales. En T.A.M.S., *Normas de Diseño Geométrico de Carreteras y de caminos vecinales* (págs. 42-90). Quito - Ecuador.

BURBANO, M. J. (21 de Septiembre de 2011). *es.escrib.com*. Recuperado el 21 de Septiembre de 2011, de http://es.scribd.com/doc/49567307/PI-Inaccesible-y-curvas-compuestas

Campos, I. M. (2009). *Apuntes de Diseño Geométrico*. Recuperado el 16 de Septiembre de 2001, de Diseño Geométrico de Viales: http://moisessuarez.files.wordpress.com/2009/08/unidad-ii-parte-dos.pdf

Carciente, J. (1980). *Carreteras Estudio y Proyecto.* Venezuela: Ediciones vega s.r.l.

doblevia.wordpress.com. (s.f.). *Doblevia.wordpress*. Recuperado el Jueves 13 de Octubre de 2011, de Curvas de transición: http://doblevia.wordpress.com/2007/09/03/curvas-espirales-de-transicion/

Fonseca Rodríguez, C. (2010). Maestría en Vías Terrestres. *Ingeniería de Carreteras* (pág. Presentación). Managua: Curso de Ingenieria de Carreteras.

G., R. C. (2007). *Ingeniería de Tránsito.* Mexico: Alfaomega.

OSPINA, J. J. (2002). *DISEÑO GEOMÉTRICO DE VÍAS.* COLOMBIA: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN.

Perú, M. d. (s.f.). *Ministerio de Transporte y Comunicaciones_Perú*. Recuperado el Miércoles de Octubre, 12 de 2011, de Ministerio de Transporte y Comunicaciones: http://www.mtc.gob.pe/portal/transportes/caminos_ferro/manual/DG-2001/volumen2/cap4/seccion402.htm

Sayago, E. C. (s.f.). *Construaprende*. Recuperado el Jueves de Septiembre de 2011, de Tesis Trazo y Construcción de una Carretera: http://caminos.construaprende.com/entrada/Tesis1/

SCT, S. d. (1984). *Proyecto Geométrico - Carreteras.* Mexico: Normas de Servicios Técnicos.

SIECA. (2004). Normas de Diseño Geométrico . En SIECA, *Normas de Diseño Geométrico* (pág. Sección 4). Centroamerica.

Silvera, M. (1 de 2010). *INGENIERÍA DE CARRETERAS UPC 2010* . Recuperado el 20 de Septiembre de 2011, de http://issuu.com/bertoni_salazar/docs/clase_parte_2