

3 DISEÑO GEOMÉTRICO

3.1 ASPECTOS GENERALES

3.1.1 Significado del adjetivo ‘geométrico’

El proyecto de una obra vial es un proceso creativo por el cual se conciben los medios adecuados para satisfacer una necesidad, utilitaria o estética, relacionada con el transporte de bienes y/o personas. Es una etapa intermedia entre la intención y la concreción, entre el diseño y la realización, entre la planificación y la construcción; su esencia son las ideas y capacidades creativas del proyectista.

En apoyo de su cometido, el proyectista cuenta con diversos elementos, herramientas y técnicas auxiliares, entre las que se destacan las representaciones, imágenes sustitutas de la realidad futura.

El diseño “geométrico” comprende el diseño de todas las características visibles de un camino. La “geometría” es una herramienta más que permitirá la ubicación espacial de cada uno de los puntos de esas imágenes o representaciones gráficas del futuro camino.

La aplicación de la matemática en el diseño tiene el propósito de dar a conocer a otros por medio de relaciones numéricas y representaciones cuál es la idea del proyectista. No hay que pensar que el diseño geométrico vial es sólo el manejo matemático de curvas, aplicación de gráficos, fórmulas o procedimientos estereotipados.

El proyectista vial, aparte de sustentar su tarea en una sólida formación teórica y conocimiento de esos recursos tácticos, debe proponerse dar cauce a otras aptitudes personales más valiosas que lo distinguirán: creatividad, imaginación, sentido común. Hasta ahora, los programas viales en uso no proyectan, sino que ayudan al proyectista a estudiar múltiples opciones en mínimo tiempo, y a representarlas gráfica y numéricamente con superior precisión. Su uso sin capacitación previa ni juicio ingenieril apropiado pueden conducir a proyectar más rápido, pero peor.

Lamentablemente, el diseño “geométrico” tiene el lastre de este último adjetivo; a pesar del cual no consiste en resolver rutinariamente problemas de geometría elemental o analítica, o en atenerse estrictamente a un recetario de valores dados por las normas en tablas y gráficos, y aceptados sin discernir previamente su conveniencia según las condiciones específicas del lugar o tipo de camino a diseñar.

Por ejemplo, no tiene sentido diseñar una clotoide según el estricto valor de longitud mínima dado por un programa o gráfico, sino que el redondeo del valor hallado en metros (1 m p. ej.), es altamente recomendable; y si condiciones locales conducen a adoptar un valor menor que el mínimo deseable o incluso al mínimo absoluto, hacerlo sin complejo de culpa: ortodoxia no significa dogmatismo fanático.

3.1.2 Modelos matemáticos

El diseño geométrico usa formulaciones matemáticas -modelos matemáticos- aplicados a datos de fenómenos naturales y comportamientos humanos, basados en técnicas estadísticas. Su capacidad de prever resultados acordes con la realidad depende de numerosos factores; entre los principales: tamaño y calidad de la muestra de datos, y perspicacia y experiencia del analista. Así, las matemáticas ayudan a predecir cómo probablemente se comportará el objeto en diferentes condiciones; p. ej., la distancia necesaria para detener un vehículo con determinada velocidad inicial y condiciones del conductor y de fricción neumático-calzada se 'calcula' con un modelo de apariencia científica aplicando la respuesta humana ante la aparición de un obstáculo en la calzada, y el principio de conservación de la energía.

Por la sustitución del objeto real por el modelo correspondiente, aparece la posibilidad de formular su estudio como un problema matemático universal, que no depende de la naturaleza concreta del objeto.

Para resolver un problema matemático es importante indicar un sistema de reglas, algoritmo que dé una sucesión estricta de operaciones matemáticas que lleven al resultado buscado; p. ej. el cálculo de la distancia visual de detención. De la observación del modelo respecto de la realidad, se realizan los correspondientes ajustes del modelo, generalmente mediante coeficientes, hasta llegar a resultados coherentes con la realidad.

3.2 DISTANCIAS VISUALES

3.2.1 Consideraciones generales

Una de las características que más contribuye a la circulación segura, libre de sorpresas y tensiones es contar continuamente con la debida visibilidad para poder anticipar cómo de manera distinta las maniobras a realizar. La trayectoria y velocidad de los vehículos sobre los caminos están sujetas al control de los conductores cuya pericia, entrenamiento, y experiencia son muy variadas.



Distancia visual es la longitud continua, medida sobre la trayectoria normal de marcha de una calzada, hasta donde el conductor de un vehículo ve la superficie de la calzada o un objeto de una altura especificada por encima de la calzada, cuando la visibilidad no esté obstruida por el tránsito. (HCM)

Por seguridad, el proyectista debe proveer distancia visual de suficiente longitud para que los conductores controlen la operación de sus vehículos y así disminuir la tasa de accidentes al menor valor posible. Por ejemplo, frenar y no chocar contra un objeto que se encuentre en la calzada húmeda o en sus costados, o adelantarse a otro vehículo, o tomar una decisión adecuada ante varias opciones complejas.

Los criterios para proveer estas distancias visuales mínimas y proyectar alineamientos para caminos rurales con la mínima visibilidad se describen en este capítulo. Las condiciones especiales relativas a las distancias visuales en las intersecciones se tratan en el Capítulo Intersecciones.

Las distancias visuales mínimas que define esta norma son:

- Distancia visual de detención (DVD)
- Distancia visual de adelantamiento (DVA)
- Distancia visual de decisión (DVDE)

3.2.2 Distancia visual de detención (DVD)

Es la distancia que requiere un conductor de habilidad media manejando a la velocidad directriz un vehículo en condiciones mecánicas aceptables sobre calzada húmeda, desde el instante en que observa un obstáculo imprevisto en el camino hasta el momento en que se detiene completamente delante del obstáculo por aplicación de los frenos. (HCM)

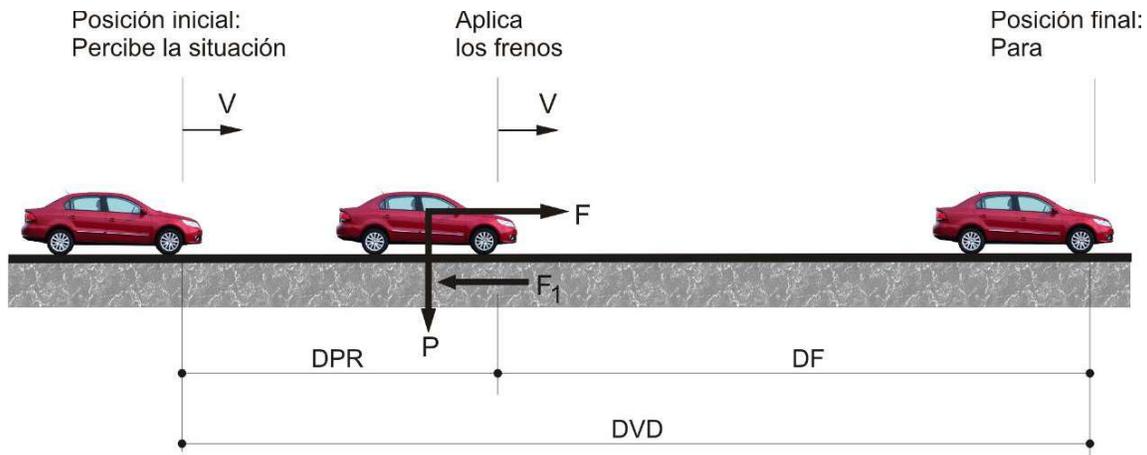


Figura 3.1 Distancia visual de detención (DVD)

Modelo de AASHTO

La DVD comprende dos componentes relacionados con operaciones del conductor:

- *La distancia de percepción y reacción (DPR)*: distancia recorrida a velocidad uniforme, velocidad directriz V , durante el lapso en que el conductor advierte el peligro y reacciona para aplicar los frenos (concepto cinemático).
- *La distancia de frenado (DF)*: distancia recorrida en movimiento uniformemente desacelerado, durante el frenado en calzada húmeda hasta la detención frente al obstáculo (concepto dinámico)

La expresión general es:

$$DVD = DPR + DF$$

Distancia de percepción y reacción (DPR)

Se adopta un lapso de 2,5 segundos como TPR, según modelo de AASHTO. La distancia recorrida durante el TPR es la $DPR = V \times TPR$

Distancia de frenado (DF)

- **Coefficiente de fricción longitudinal húmeda (fl)**

El coeficiente fl es una resultante del modelo adoptado, y se lo supone constante durante el frenado, pero variable con la velocidad inicial del frenado. Es un valor representativo de la fricción entre neumáticos y calzada, y engloba las resistencias del aire, rodamiento, e interna del motor y engranajes.

La Tabla 3.1 muestra los valores de fl adoptados; según se observa a mayor velocidad, la fricción longitudinal disminuye.

Al solo efecto de incluirla en un programa, por regresión se obtiene una función entre fl y V:

$$fl = \frac{1,021}{V^{0,274}}$$

Tabla 3.1
fl función de V

V km/h	fl -
25	0,42
30	0,40
40	0,37
50	0,35
60	0,33
70	0,32
80	0,31
90	0,30
100	0,29
110	0,28
120	0,27
130	0,27
140	0,26

- **Cálculo de la DF**

Igualando la energía cinética del vehículo que circula a la velocidad directriz, con el trabajo de fricción longitudinal entre neumático y calzada, suponiendo fl constante durante el frenado, se obtiene:

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{V^2}{2g \times 3,6^2} = DF \times fl$$

Donde:

v: velocidad directriz en m/s

V: velocidad directriz en km/h

g: aceleración de la gravedad 9,8 m/s²

TPR: tiempo de percepción y reacción, 2,5 s

$$\Rightarrow DF = \frac{V^2}{254 \times fl}$$

DVD en horizontal

La DVD es la suma de la distancia de percepción y reacción (DPR) y la distancia de frenado (DF):

$$DVD = \frac{V \times 2,5}{3,6} + \frac{V^2}{254 \times fl}$$

DVD en pendiente longitudinal

La expresión de la distancia visual mínima de detención es:

$$DVD = \frac{V}{1,44} + \frac{V^2}{254 \times (f \pm i)}$$

Donde:

i: pendiente longitudinal, formato decimal

En calzadas de un solo sentido se considera subidas con valor positivo y bajadas con valor negativo. En calzadas de dos sentidos, se considera la situación más desfavorable, siempre negativa, para subida y para bajada.

En la Tabla 3.2 se indican las DVD para distintas velocidades directrices considerando pendiente nula; para pendientes positivas, subidas, y negativas, bajadas, se indican los coeficientes que deben aplicarse a la DVD de pendiente nula:

Tabla 3.2 Distancias visuales mínima de detención (DVD), en función de V y de la pendiente

V km/h	Calzada de dos o un sentido										Calzada de un sentido										
	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
25	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	24	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
30	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	30	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9
40	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	45	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
50	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	63	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
60	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	85	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
70	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	110	1,0	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
80	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	138	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
90	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	170	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
100	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0	206	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8
110	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	246	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
120	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	290	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8
130	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	339	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8
140	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	391	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8

DVD para conductores ancianos

Estadísticamente, la expectativa de vida aumenta y consecuentemente la población de conductores envejece, lo cual justifica nuevas pautas de diseño. Es normal que los conductores ancianos tengan problemas de conducción, dadas las conocidas alteraciones en las áreas relacionadas con lo perceptivo, cognitivo, y psicomotor, lo cual presenta muchos desafíos a los proyectistas, quienes deben garantizar la seguridad del sistema mientras aumentan la eficiencia operativa. Por ejemplo, el valor de Tiempo de Percepción y Reacción de 2,5 segundos, propuesto por AASHTO y adoptado por esta norma colabora en ese sentido. AASHTO pronostica que en el futuro este tiempo aumentará por el envejecimiento natural de la población.

DVD en bajadas

Algunas situaciones deben ser analizadas con precaución. En bajadas, las velocidades de camiones pueden tener valores superiores respecto a la de los vehículos de pasajeros por lo cual debería intentarse dar una DVD superior al mínimo valor. En especial cuando las restricciones se producen especialmente en los extremos de las bajadas.

3.2.3 Distancia visual de adelantamiento (DVA)

Distancia visual de adelantamiento. En caminos indivisos de dos carriles y dos sentidos, es la mínima distancia visual suficiente y necesaria que, invadiendo el carril de sentido contrario, permita al conductor de un vehículo adelantarse a otro que circula más lentamente por su mismo carril, sin interferir la velocidad y trayectoria de un tercer vehículo que avance en sentido contrario, si apareciera a la vista una vez iniciada la maniobra.

La DVA para usar en el diseño de caminos indivisos de dos-carriles debería determinarse sobre la base de la longitud necesaria para completar seguramente las maniobras normales de adelantamiento. Las maniobras extraordinarias se ignoran y las distancias de adelantamiento se desarrollan usando velocidades y tiempos observados que se ajustan a las prácticas de un alto porcentaje de conductores.

Hay ocasiones para considerar múltiples adelantamientos, donde dos o más vehículos se adelantan o son adelantados, pero no es práctico suponer tales condiciones en el desarrollo de los criterios mínimos de diseño. La distancia visual se determina para un solo vehículo que se adelanta a un solo vehículo. En el diseño se producen distancias visuales más largas, y ellas pueden acomodar un ocasional adelantamiento múltiple.

Para la determinación de las DVA mínimas el modelo (Figura 3.2) supone que:

- El vehículo adelantado viaja a la VMM
- El tiempo de percepción, evaluación de las posibilidades de adelantamiento, reacción y comienzo de la aceleración del vehículo que se adelanta (A) se estima en 4 s
- Durante el período anterior se acepta que el vehículo que se adelanta (A) circula a la misma velocidad que el vehículo que tiene adelante circulando en sentido contrario (B)
- Durante el período anterior se acepta que, además de circular ambos vehículos (A y B) a la velocidad del que va a ser adelantado (VMM), lo hacen separados por una distancia d_0 , en m
- El promedio de velocidad del vehículo que se adelanta (A), desde que inicia su desplazamiento hacia el carril izquierdo hasta que retoma el derecho, supera en 15 km/h al del vehículo adelantado (B)

- El carril izquierdo debe quedar libre en una longitud adicional d_3 tal, que permita que un tercer vehículo (C) que se aproxima en sentido contrario a igual velocidad V_2 que el vehículo que se adelanta (A), la recorra en el mismo tiempo que tarda este último en desplazarse al carril izquierdo, adelantar al vehículo más lento y retomar el carril derecho.

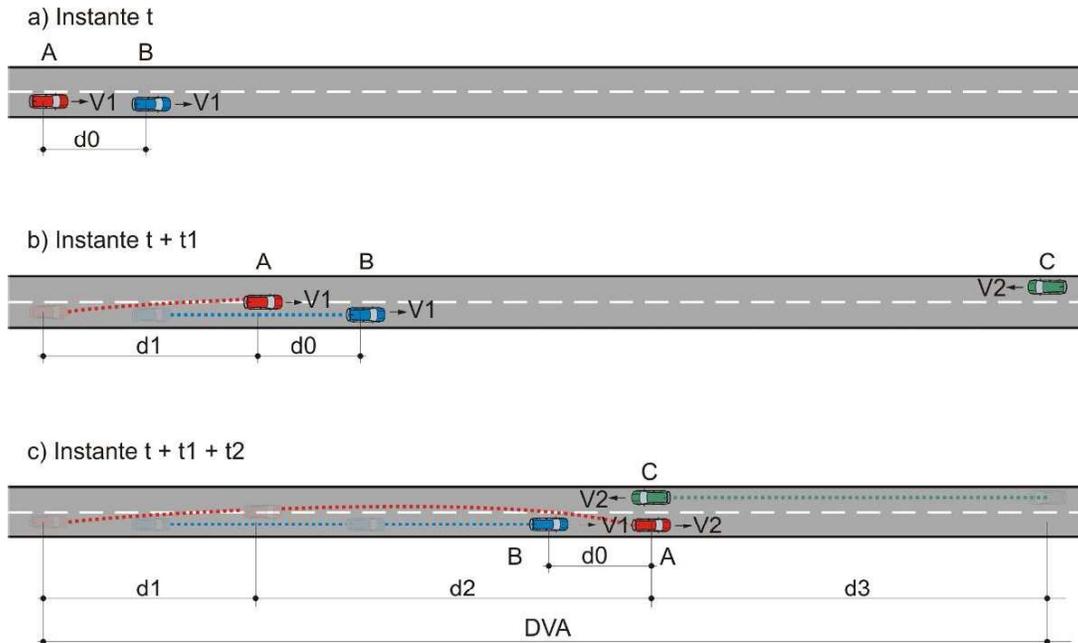


Figura 3.2 Esquema del modelo para el cálculo de la DVA

Los rangos de velocidades de los vehículos adelantados y los que se adelantan están afectados por el volumen de tránsito. Cuando el volumen de tránsito es bajo (NS A), hay pocos vehículos que necesiten ser adelantados; a medida que el volumen crece (NS D o más bajo) las oportunidades de adelantamiento disminuyen. Se supuso que la velocidad del vehículo adelantado es la VMM a un volumen cercano a la capacidad.

Estas hipótesis implican admitir que para bajas velocidades directrices el vehículo que se adelanta (A) podrá circular a velocidades algo superiores a las directrices; lo que es aceptable ya que, en general, las secciones con adelantamiento poseen características geométricas planialtimétricas que permiten la circulación a mayor velocidad.

La DVA mínima para caminos indivisos de dos carriles se determina como la suma de tres distancias, Figura 3.2. Las magnitudes que intervienen son:

V_1 : velocidad del vehículo que es adelantado (B) en km/h (VMM)

d_0 : distancia mínima entre vehículos que circulan en la misma dirección, en m

V_2 : velocidad del vehículo que se adelanta (A) en km/h (VMM + 15 km/h)

d_1 : distancia recorrida por el vehículo que se adelanta (A) durante el tiempo de percepción, decisión, reacción y comienzo de la maniobra de adelantamiento, en m

t_1 : tiempo que tarda el vehículo que se adelanta (A) en recorrer la distancia d_1 , en s

- d2: distancia recorrida por el vehículo que se adelanta (A) desde que se desplaza al carril izquierdo hasta que retoma el derecho, en m
 t2: tiempo que tarda el vehículo que se adelanta (A) en recorrer la distancia d2, en s
 d3: distancia recorrida por un vehículo que circula en sentido contrario (C) al que se adelanta, en m, durante el lapso t2

Las expresiones para el cálculo de la DVA son:

$V1 = VMM$ (km/h)	$t2 = \frac{2d0 \times 3,6}{V2 - V1}$ (s)
$V2 = VMM + 15$ (km/h)	$d1 = \frac{V1 \times t1}{3,6}$ (m)
$d0 = 0,2 V1 + 8$ (m)	$d2 = \frac{V2 \times t2}{3,6}$ (m)
$t1 = 4$ segundos (s)	$d3 = d2$ (m)

$$DVA = d1 + d2 + d3$$

Si bien los conductores, individualmente, actúan con ligeras variantes respecto al esquema de la Figura 3.2, las distancias obtenidas permiten el adelantamiento en la gran mayoría de los casos, según las experiencias de AASHTO. En la Tabla 3.3 se resumen los valores de DVA en función de la V

Tabla 3.3 DVA en función de la V

V km/h	Velocidad del vehículo adelantado (B) VMM km/h	Velocidad del vehículo que se adelanta (A) VMM + 15 km/h	DVA m
25	24	39	160
30	29	44	190
40	37	52	260
50	46	61	330
60	53	68	400
70	60	75	470
80	67	82	540
90	73	88	610
100	79	94	680
110	84	99	740
120	88	103	800



Usualmente, las distancias de la Tabla 3.3 permiten que un conductor se adelante con seguridad; sin embargo se recomienda proyectar longitudes mayores:

- Donde haya significativo porcentaje de vehículos pesados que requieren DVA mayores
- Para permitir el adelantamiento simultáneo de dos o más vehículos
- En subidas fuertes para realizar una maniobra de adelantamiento segura

La maniobra de adelantamiento es una de las tareas de conducción más compleja y peligrosa en un camino rural de dos carriles y dos sentidos, por lo cual es aconsejable dar tantos tramos de adelantamiento como sea factible. No es posible establecer criterios rígidos para determinar la frecuencia y longitud de los tramos de adelantamiento que debe tener un camino de dos carriles, pues depende de variables diversas:



- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Volumen de tránsito • Nivel de servicio deseado • Trazado • Configuración topográfica • Velocidad directriz | <ul style="list-style-type: none"> • Factores humanos • Longitud necesaria • Potencia vehicular • Clima |
|---|---|

Es recomendable que, en secciones de caminos indivisos de dos carriles de 3 km de largo, se proyecte el siguiente porcentaje mínimo de longitud con DVA:

- Zona llana..... 80 %
- Zona ondulada:..... 50 %
- Zona montañosa:..... 30 %
- Zona muy montañosa..... 20 %



Cuando no sea factible proveer suficientes tramos con DVA, es recomendable proyectar carriles auxiliares de adelantamiento [SS3.8.2].

3.2.4 Distancia visual de decisión (DVDE)

Usualmente, las DVD son suficientes para permitirles a los conductores razonablemente competentes y alertas llegar a una rápida detención bajo circunstancias ordinarias. Sin embargo, a menudo estas distancias son inadecuadas cuando los conductores deben tomar complejas o instantáneas decisiones, cuando la información es difícil de percibir, o cuando se requieren inesperadas o inusuales maniobras.

La limitación de las distancias visuales a las provistas para detención pueden también impedirle a los conductores ejecutar maniobras evasivas, que a menudo son menos peligrosas y preferibles a la detención.

Es decir, hay situaciones o lugares donde conviene dar distancias visuales más largas que la DVD. La DVDE provee una mayor longitud que los conductores necesitan. A veces llamada distancia visual anticipatoria, la DVDE es la distancia requerida para que:

- El conductor detecte una fuente de información difícil de percibir o condición peligrosa en la cercanía de la calzada y estime su potencial.
- Seleccione una nueva velocidad y trayectoria adecuadas e inicie y termine segura y eficientemente la maniobra requerida.

Los conductores necesitan una DVDE donde haya posibilidades de error para recibir información, para decidir o para maniobrar. Los lugares críticos son:

- Aproximaciones a intersecciones y distribuidores.
- Cambios en la sección transversal, tales como playas de peajes, principio y fin de carriles básicos y auxiliares,
- Variaciones en la velocidad directriz.
- Zonas de demanda concentrada de fuentes de información, que compiten por atención, elevando la “carga mental” del conductor como ser: elementos de calzada, tránsito opuesto, dispositivos de control de tránsito, señales de advertencia, zonas de desvío de tránsito por obras de construcción.

Los valores recomendados para la DVDE, Tabla 3.4, se obtuvieron del modelo de AASHTO 1994 maniobra de decisión C, cambio de velocidad/trayectoria/dirección en camino rural.

Tabla 3.4 Distancia visual de decisión (DVDE) en función de V

V km/h	DVDE m
25	60
30	80
40	110
50	150
60	180
70	200
80	230
90	280
100	320
110	340
120	380
130	410
140	450



3.3 ALINEAMIENTOS

Una vez fijado los criterios de diseño geométrico, se debe buscar una combinación de alineamientos rectos y curvos que se adapten al terreno, planimétrica y altimétricamente.

Para proyectar una obra vial se adopta una línea o eje de referencia que en general es el eje de la futura calzada. A este eje se refieren los demás elementos geométricos del proyecto (banquinas, taludes, obras de arte, cunetas, etcétera). El eje del camino, que a grandes rasgos va acompañando las ondulaciones del terreno, estará representado por una línea alabeada "3D" de componentes x, y, z.

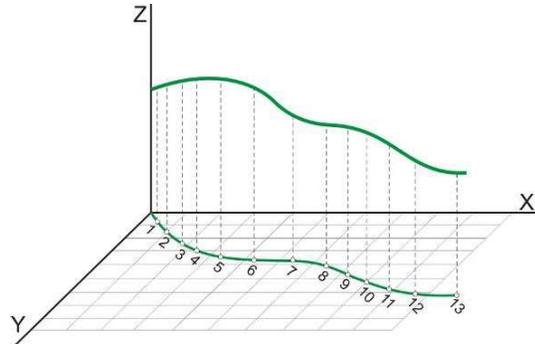


Figura 3.3 Representación tridimensional del eje de un camino

El camino es tridimensional, como una escultura labrada en la superficie de la corteza terrestre, y su representación en el proyecto tiene sus inconvenientes. Para representarlo en planos se adopta -por razones prácticas- un sistema compuesto de planimetría y altimetría, complementado con perfiles transversales.

Este sistema práctico de representación refiere en realidad a una solución integral: no hay una buena solución planimétrica si no está coordinada con una buena solución altimétrica.

La planimetría es la proyección de la línea de eje sobre el plano X Y. La progresiva de un punto del eje es la longitud de la proyección horizontal del eje, medida desde la proyección del origen del proyecto hasta la proyección del punto. La cota es la componente z.

Independientemente de la filosofía de diseño, el diseño final comprende dimensionar y conectar diferentes elementos. El diseño geométrico vial comprende:

- La selección de elementos a incorporar en el diseño
- El dimensionamiento de los elementos seleccionados
- La conexión de los elementos en armonía tridimensional

Los elementos seleccionados, dimensionados y conectados, representan el diseño final del camino que, una vez construido, deberá constituir una conexión de red que satisfaga los criterios de seguridad, estética y transporte conveniente y económico.

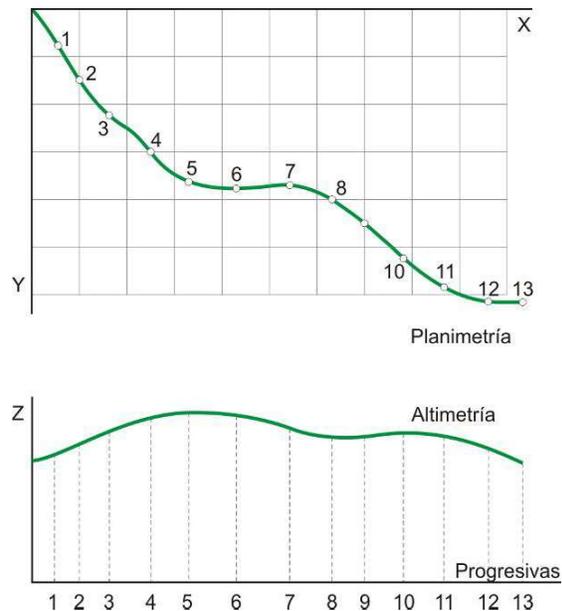


Figura 3.4 Planialtimetría

3.4 ALINEAMIENTO HORIZONTAL

El alineamiento horizontal comprende tres elementos básicos:

- Rectas
- Curvas circulares
- Transiciones

3.4.1 Rectas ($R = \text{infinito}$)

Tienen las propiedades de dirección-sentido y longitud. Proveen clara orientación, pero simultáneamente pueden ser visualmente poco atractivas. Al ser totalmente predecibles, con una vista que aparece estática, pueden causar monotonía en el manejo y alentar la indeseable combinación de fatiga y exceso de velocidad. Durante la noche, los faros del tránsito opuesto pueden originar encandilamiento.

Las rectas de longitud adecuada son deseables en caminos de dos carriles para facilitar las maniobras de adelantamiento, y deben proveerse tan frecuentemente como el terreno lo permita. Las rectas excesivamente largas deben evitarse pues alientan a los conductores a viajar a velocidades superiores a la velocidad directriz.

3.4.2 Curvas circulares ($R = \text{constante}$)

Tienen las propiedades de radio, ángulo de desviación y longitud de la curva. Desde los orígenes de la actividad vial en forma natural e instintiva, los prácticos la adoptaron para su empleo en caminos, con las rectas. En las rectas no actúa la aceleración centrífuga, en las curvas circulares sí y su magnitud es proporcional a la inversa del radio de la curva –curvatura horizontal [SS3.4.5] –. De ello se deduce que la aceleración centrífuga presentará una discontinuidad en el empalme recta-curva (aparición brusca de aceleración centrífuga), y en los empalmes entre curvas circulares de diferente radio (variación brusca de aceleración centrífuga). En altas velocidades este fenómeno resulta molesto y puede poner en peligro la seguridad de los pasajeros de los vehículos.

3.4.3 Transiciones ($R = \text{variable}$)

Cada vez que ocurre un cambio en la curvatura horizontal del camino [SS3.4.5] el conductor se las ingeniará para evitar el pasaje brusco de uno a otro elemento. Seguramente tratará de variar la velocidad y la trayectoria, parte en la recta y parte en la curva, para que el cambio de las acciones dinámicas sea gradual. Si la variación de velocidad no es suficiente, la variación de trayectoria puede significar la peligrosa invasión del carril contrario, con el “corte” de la curva para lograr la deseada transición dinámica.

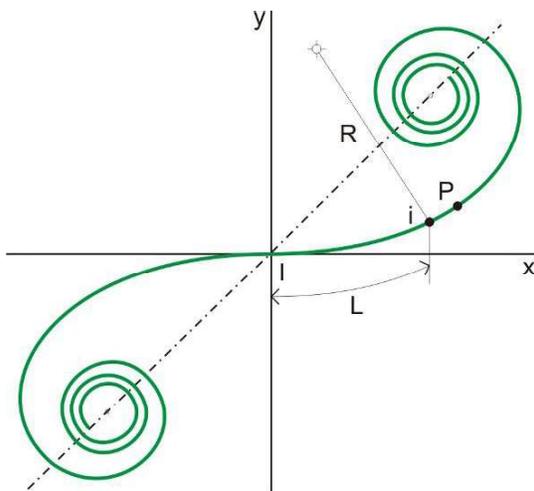
La transición dinámica gradual también puede obtenerse intercalando una curva que tenga un gradual cambio de curvatura a lo largo de su longitud. La espiral es una línea curva, plana y abierta, de radio de curvatura creciente. Es generada por un punto que, según cierta ley de variación, gira alrededor y se aleja de otro llamado polo. Cada vuelta es una espira.

Los distintos tipos de espirales se definen por la relación más simple que puede establecerse entre dos de sus variables características. Por ejemplo, radio vector en función del argumento o radio de curvatura R en función de la longitud L del arco. En el diseño planimétrico vial se emplean espirales para suavizar los cambios bruscos de radios de curva, y para variar anchuras de calzada o de mediana.

- **Clotoide ($R =$ linealmente variable)**

Gracias quizás a la aceptación que tuvieron desde los años 1940 las Tablas de Barnett, en la práctica vial argentina es generalizado el uso de la clotoide (hilandera), espiral también llamada radioide de arcos o espiral de Cornú o espiral de Euler.

Es una curva de dos ramas desde curvatura $-\infty$ hasta $+\infty$, y longitud L desde $-\infty$ hasta $+\infty$ con variación uniforme; es decir, curvatura [SS3.4.5] directamente proporcional a la longitud, o radio de curvatura inversamente proporcional a la longitud. Recorriéndola a velocidad constante, la variación de la aceleración centrífuga en función de la longitud o del tiempo es uniforme. El punto común de las dos ramas ($1/R=0$ y $L=0$), donde cambia el sentido de la curvatura, se denomina i , punto de inflexión. El punto i donde $L=R$ se denomina *punto paramétrico*, y el valor de R o L en ese punto se denomina *parámetro A* , para el cual el ángulo de desviación desde i vale $0,5$ rad. El valor del parámetro A define el *tamaño* de la clotoide; así como el radio define el tamaño de la circunferencia. La expresión $L \times R = \text{constante} = A^2$ es válida en todos los puntos P de la clotoide y el uso de la expresión paramétrica es habitual en la vialidad europea.



Así como todas las circunferencias son semejantes entre sí y la relación de semejanza es igual a la relación entre los radios, del mismo modo todas las clotoides son todas semejantes entre sí y la relación de semejanza es igual a la relación entre los parámetros. Esta propiedad facilita el manejo de la curva y la confección de tablas y plantillas. En cambio, y siguiendo a Barnett, en la vialidad americana se adoptan valores mínimos, enteros y redondeados de L en función de R y V , según distintos criterios de seguridad, apariencia y comodidad.

En comparación con otras curvas no-espirales que, en ciertos límites, podrían reemplazarla (lemniscata, curva de Leber, parábola cúbica, curva de Brauer-Ostwald), la espiral de transición es preferida por la mayoría de los proyectistas cuando se trata de acordar, con variación gradual de la curvatura, dos curvas circulares de igual velocidad directriz y radios muy distintos (la recta se considera una curva circular de radio infinito).

3.4.4 Tipos de curvas horizontales

Simple (R1)

Es un arco circular que une dos rectas. Figura 3.11

Simple con transición (R1, Le)

Normalmente, todo arco circular requiere de dos transiciones que lo comprenda: una de entrada y otra de salida. Estas curvas horizontales son simétricas con transiciones de longitudes iguales; $Le=Le1=Le2$. Figura 3.17

Simple con transiciones asimétricas (R1, Le1, Le2)

Estas curvas son similares a las anteriores pero poseen transiciones de entrada y salida de distinta longitud; $Le1 \neq Le2$.

Simple con clotoides de vértices (R1, Le1, Le2)

Es la curva horizontal con transiciones de entrada y salida, con longitud del arco circular nula; $L_{total} = Le1 + Le2$. Su empleo no es recomendado por la brusca variación de la aceleración centrífuga y peralte en un punto.

Compuesta reversa con transiciones. Inflexión (R1,-R2, Le1, Le2)

Una curva reversa está formada por dos curvas circulares de distinto sentido que se empalman en un punto de tangente común. Los centros están en distintos lados con respecto a la tangente común y alineada con el punto de empalme. Figura 3.18

Compuesta del mismo sentido con transiciones. Ovoide (R1, R2, Le1, Le2, Lo)

Una curva compuesta se compone de dos o más curvas circulares, del mismo sentido y distinto radio, que se empalman dos a dos en un punto de tangente común y alineados con el punto de empalme. En el caso de que el cociente de los radios sea mayor que dos, se recomienda separar las circunferencias, la menor en la mayor, e intercalar como transición un arco de clotoide, denominado ovoide (Lo).

Actualmente no se recomiendan las curvas compuestas dado que pueden violar las expectativas de los conductores; se recomienda su reemplazo por una curva simple con transiciones. Figura 3.19

3.4.5 Curvatura del alineamiento horizontal

Los cambios abruptos en la velocidad de operación originan accidentes; en gran parte tales cambios se deben a abruptos cambios en los alineamientos, particularmente en el horizontal. Los estudios estadísticos muestran que las variaciones de la velocidad de operación del 85 percentil en flujo libre son directamente proporcionales a la curvatura horizontal.



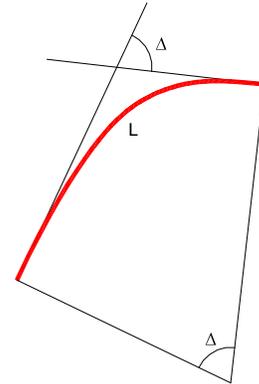
Curvatura de una línea plana

La forma de una línea plana (su cualidad de aguda, fuerte, cerrada o achatada, abierta, amplia) en un punto depende de la razón de variación de su dirección; es decir, la variación de la inclinación de la tangente en cada punto del arco. Esta razón se llama curvatura.

Curvatura media

La curvatura media de un arco es la razón entre el ángulo de desviación Δ formado por las tangentes extremas al arco (igual al ángulo al centro), y la longitud del arco:

$$C_m = \frac{\Delta}{L}$$



Si se mide Δ en radianes y la longitud del arco L en metros, resulta que la unidad de curvatura es radián por metro $(rad/m)^1$.

Si la línea está orientada, por convención el giro a la derecha es positivo y a la izquierda negativo.

Curvatura en un punto - Círculo de curvatura o círculo osculador

Aplicando el concepto de curvatura media a la circunferencia, cualquiera que sea la longitud del arco L, la curvatura es constante: $C = C_m = \frac{\Delta}{L} = \frac{L/R}{L} = \frac{1}{R} \left(\frac{rad}{m} \right)$

En una curva continua cualquiera, tres puntos infinitamente próximos no alineados determinan una circunferencia denominada círculo osculador o círculo de curvatura, cuya curvatura, $C = 1/R$ en rad/m, es la de la curva dada en ese punto.

Matemáticamente se define la curvatura en un punto como el límite de la curvatura media cuando el arco tiende a cero.

Factores de Conversión Fc

C	$\frac{rad}{m}$	$\frac{^\circ}{km}$	$\frac{gon}{km}$
Fc	1	$\frac{180}{\pi} \cdot 10^3 \cong 57300$	$\frac{200}{\pi} \cdot 10^3 \cong 63700$

¹ Radián:

Existe una proporcionalidad entre el arco subtendido por un ángulo y el ángulo:

Si la longitud del arco es igual al Radio, el ángulo unitario al centro se llama $\theta = \frac{L}{R}$ radián.

El ángulo completo α de una circunferencia de radio R, medido en radianes es:

$$\alpha_{circunferencia} = \frac{L_{circunferencia}}{R} = \frac{2\pi R}{R} = 2\pi \text{radianes}$$

Equivalencias: radianes [rad] = 180 grados sexagesimales [°] = 200 gonios [gon] = 200 grados modernos [g]



Ejemplo de curvaturas

- *Recta*: nula en todos sus puntos ($C = 0 \text{ rad/m}$)
- *Circunferencia*: uniforme ($C = 1/R \text{ rad/m}$)
- *Clotoide*: directamente proporcional (variación lineal) a la longitud medida desde el punto de inflexión ($C = c L \text{ rad/m}$)

Si la velocidad de un vehículo es constante, la aceleración centrífuga, el peralte y el giro del volante en cada punto son directamente proporcionales a la curvatura.

Gráfico de curvatura horizontal

En coordenadas cartesianas ortogonales se representa la curvatura C del eje planimétrico en ordenadas (+ o - según el sentido derecha o izquierda de la curva), en función de las progresivas en abscisas.

El gráfico de curvatura de:

- *Recta*: coincide con el eje de abscisas;
- *Circunferencia*: paralela al eje de abscisas
- *Clotoide*: recta inclinada.

			1				7
			2				8
			3				9
			4				10
			5				11
			6				12

Figura 3.5 Gráficos de curvatura para curvas horizontales

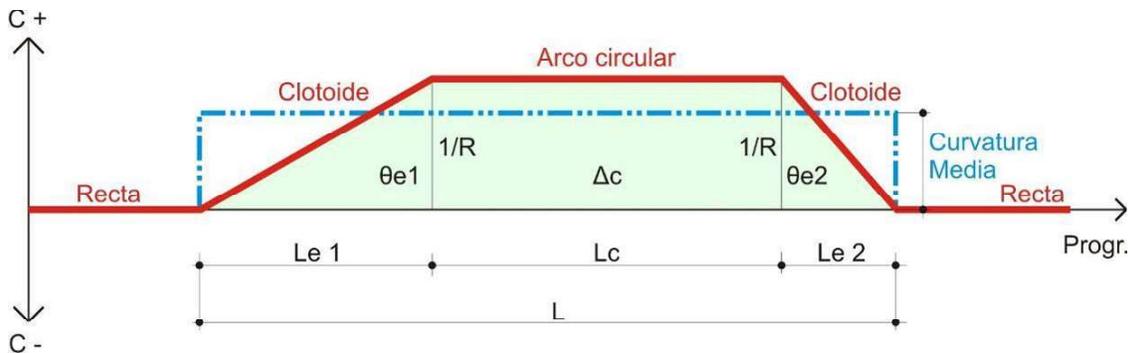


Figura 3.6 Gráfico de curvatura de curva circular con transiciones

En el gráfico de curvatura, el *área encerrada* por un segmento o poligonal de la línea de curvatura, las verticales extremas y el eje de las abscisas *representa el ángulo* de desviación entre los dos puntos dados. La escala de superficie es igual al producto de las escalas de abscisas (L) y de ordenadas (C). Si se divide esta área por la longitud L de la curva se obtiene la altura del rectángulo equivalente, expresión gráfica de la Curvatura Media. En la bibliografía vial europea (Lamm), la curvatura media se denomina Tasa de Cambio de la Curvatura, CCR.

Por ejemplo, para una curva circular L, de radio R y clotoides Le1 y Le2 (L = longitud total = Le1 + Lc + Le2) el ángulo de desviación total $\Delta = \theta e1 + \Delta c + \theta e2$ está representado por las áreas del triángulo 1, el rectángulo c y el triángulo 2. Resulta:

$$C_m = \frac{\Delta}{L} = \frac{\left(\frac{Le1}{2R} + \frac{Lc}{R} + \frac{Le2}{2R}\right)}{L} \left(\frac{\text{rad}}{\text{m}}\right)$$

Aplicación del gráfico de curvatura en alineamientos

El gráfico de curvatura es una herramienta útil para analizar la naturaleza curvilínea de un alineamiento, Figura 3.7 a Figura 3.10.

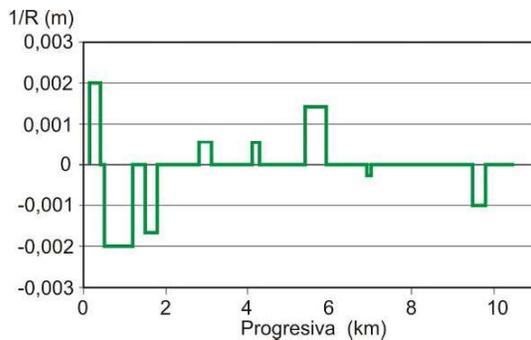


Figura 3.7

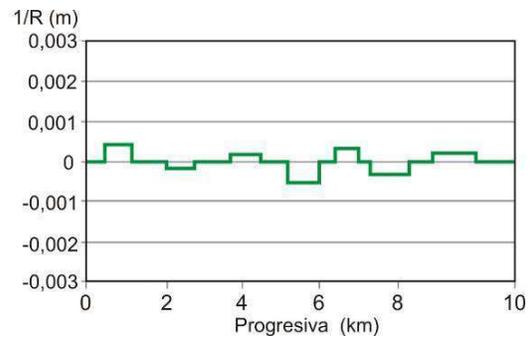


Figura 3.8

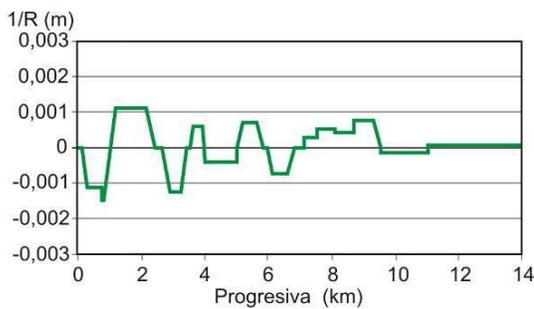
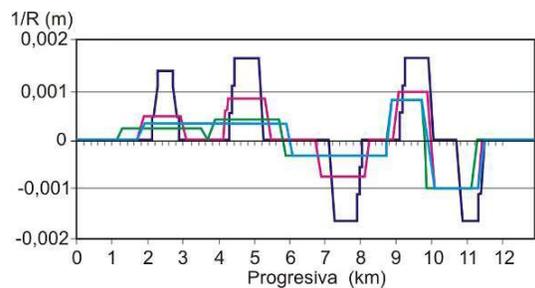


Figura 3.9



— Curvas cortas — Curvas medianas
— Curvas largas — Quita espalda-quebrada

Figura 3.10

En la Figura 3.7 se advierte la naturaleza desunida del alineamiento mostrado; las Figura 3.8 y Figura 3.9 muestran alineamientos con variaciones más suaves de la curvatura. La Figura 3.10 ilustra gráficos de curvaturas para alineamientos horizontales alternativos de un mismo proyecto:

- Curvas de radio mínimo
- Curvas de longitudes aproximadamente iguales a las rectas adyacentes
- Curvas largas con rectas intermedias
- Ilustra el efecto de eliminar una curva espalda-quebrada (dos curvas sucesivas en el mismo sentido)

Grado de curvatura horizontal

El grado de curvatura G° de una curva circular dada es el ángulo al centro en grados sexagesimales subtendido por un arco de 100 m de longitud. Por lo que resulta:

$$G^\circ = \frac{5730}{R(m)} (^\circ)$$

3.5 DISEÑO DEL ALINEAMIENTO HORIZONTAL

3.5.1 Rectas

En terreno plano se aceptan las rectas largas. Si para romper la monotonía se introducen curvas, deberían ser como para evitar la apariencia de quiebres. A menos que el cambio en el alineamiento sea notable, las luces de los faros del tránsito opuesto permanecen siendo molestas

Longitudes máximas ($L_{m\acute{a}x}$)

Se recomienda proyectar longitudes en rectas menores que:

$$L_{m\acute{a}x}(m) = 20 \times V \text{ (km/h)}$$

Diferente que en caminos de calzadas divididas, en los caminos de dos carriles y dos sentidos la conveniencia de proveer distancia visual de adelantamiento justifica utilizar rectas más largas.

Longitudes mínimas ($L_{m\acute{i}n}$)

Entre curvas circulares próximas, sucesivas y del mismo sentido conviene dejar un tramo recto de longitud mínima calculada con la fórmula empírica $L \text{ (m)} \geq 5 V \text{ (km/h)}$ para eliminar la insegura apariencia de espalda-quebrada y disipar la expectativa del conductor de prever curvas alternadamente a izquierda y derecha, y, si es posible, proveer DVA.

Bombeo normal o perfil transversal de la calzada (BN)

Pendiente desde un punto alto (típicamente en la línea central del camino) a través de los carriles de un camino. Usualmente el punto alto está en el centro (pendiente \pm) El perfil transversal a dos aguas de la calzada en recta o en curvas de gran radio (bombeo exterior adverso)

Bombeo removido (BR)

Sección plana peraltada de camino a través de toda la calzada con un valor igual al del bombeo normal. Por ejemplo, camino común de dos carriles y curva a la izquierda con $e = +2\%$, cuando en recta el BN es $\pm 2\%$.

3.5.2 Curvas circulares

Curva circular simple

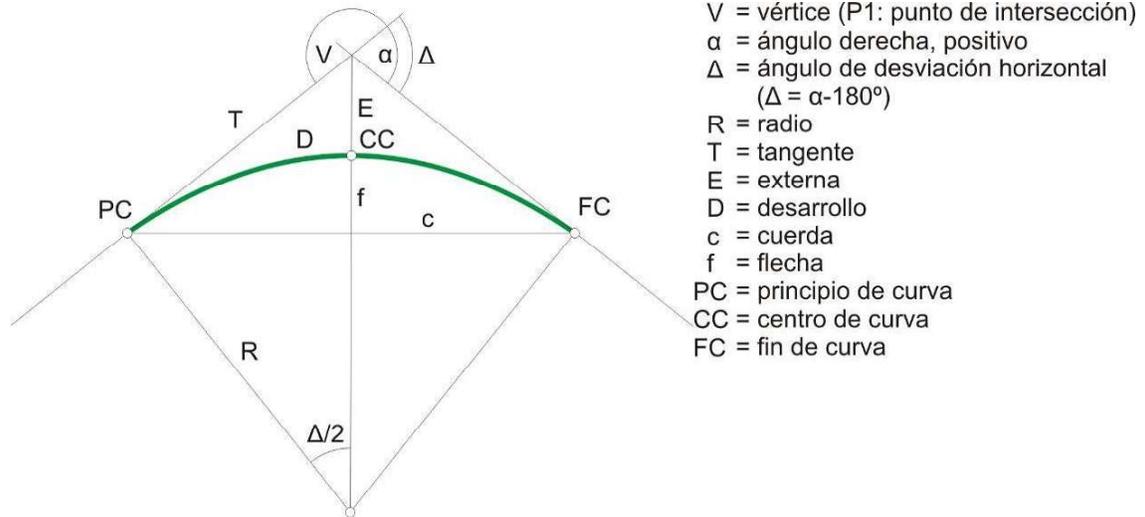


Figura 3.11 Elementos de la curva circular simple

Planteo dinámico

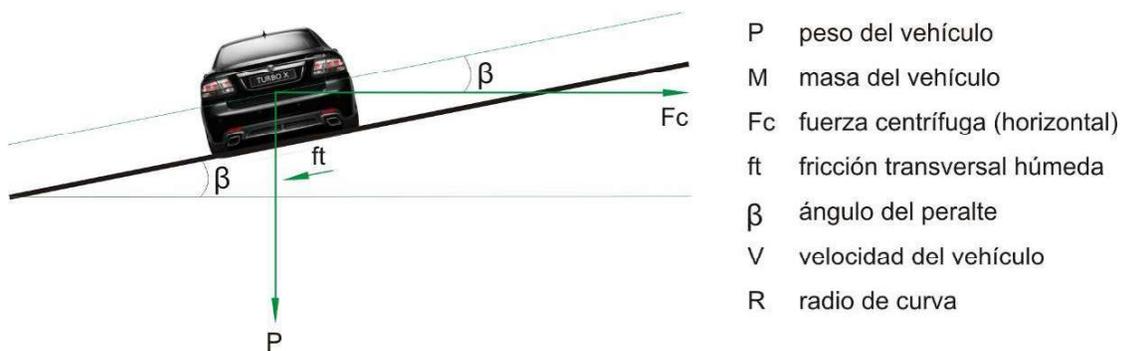


Figura 3.12 Fuerzas actuantes sobre un vehículo que circula por una curva horizontal

En la Figura 3.12 se observa, un vehículo circulando a velocidad directriz V en una curva horizontal de radio R , con su calzada inclinada respecto al plano horizontal un ángulo β , bajo las siguientes fuerzas:

- Fuerza centrífuga
- Fricción transversal húmeda
- Peso

El criterio de proyecto de una curva horizontal es la oposición a la fuerza centrífuga desarrollada cuando el vehículo se mueve en una trayectoria curva. Para este criterio el mínimo radio de curvatura puede obtenerse de las leyes de la mecánica como una función de la velocidad del vehículo (V), del peralte (e), y de un adecuado coeficiente de fricción transversal húmedo.

Coeficiente de fricción transversal húmeda, (ft)

El coeficiente de fricción transversal depende de una serie de factores: la velocidad del vehículo, el tipo, condición y peralte de la superficie del camino, y el tipo y estado de los neumáticos.

Coeficiente de fricción transversal húmeda máxima, ($ft_{m\acute{a}x}$)

El coeficiente de fricción transversal máximo húmeda, $ft_{m\acute{a}x}$, es el desarrollado en condiciones de inminente deslizamiento lateral del vehículo, con un razonable margen de seguridad. La expresión de $ft_{m\acute{a}x}$ en función de V es:

$$\begin{aligned} \text{Para } V \leq 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} & ; \quad ft_{m\acute{a}x} = 0,188 - \frac{3V}{5000} \\ \text{Para } V > 80 \frac{\text{km}}{\text{h}} & ; \quad ft_{m\acute{a}x} = 0,24 - \frac{V}{800} \end{aligned}$$

Tabla 3.5 Coeficiente de fricción transversal máxima

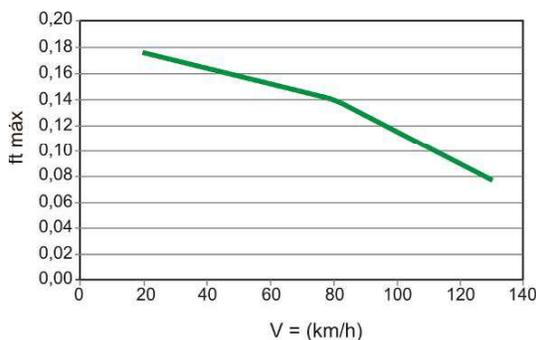


Figura 3.13 Coeficiente $ft_{m\acute{a}x}$ en función de V

V km/h	$ft_{m\acute{a}x}$
25	0,17
30	0,17
40	0,16
50	0,16
60	0,15
70	0,15
80	0,14
90	0,13
100	0,12
110	0,10
120	0,09
130	0,08
140	0,07

Modelo matemático de AASHTO

Transformado el problema dinámico en estático, se obtiene: $\frac{v^2}{R} = (e + ft)g = \alpha \times g$

Donde:

v : Velocidad directriz, m/s

R : Radio, m

e : Peralte, m/m

ft : Fricción transversal húmeda

g : Aceleración de la gravedad = $9,8 \text{ m/s}^2$

α : Coeficiente centrífugo = $(e+ft)$

V = velocidad directriz, km/h, resulta:

Expresando la velocidad en km/h y reemplazando el valor de g resulta:

$$R = \frac{V^2}{127(e + ft)}$$

3.5.3 Peralte (e) y radio (R)

Para colaborar con la condición de equilibrio dinámico, normalmente se inclina la calzada un determinado ángulo β , para disminuir la proyección de la fuerza centrífuga sobre la calzada.



El peralte e es el valor de la inclinación lateral dado a la calzada en curvas hori-

zontales para contrarrestar parte o toda la fuerza centrífuga desarrollada en el plano de la calzada; se expresa como la tangente del ángulo β , en tanto por ciento.

$$e(\%) = (\text{tangente}\beta) 100$$

Peralte máximo (emáx)

Se adoptan valores máximos de peralte según los siguientes factores:

- Condiciones topográficas (llanura o montaña)
- Condiciones climáticas (zonas de heladas y nevadas)
- Condiciones de operación de los vehículos (zonas de bajas velocidades, intersecciones frecuentes, zonas suburbanas o urbanas),

Sobre la base de la combinación de estos factores, se fijaron tres valores máximos del peralte, Tabla 3.6

Tabla 3.6 Peraltes máximos (emáx)

Peralte máximo	Condiciones en que se desarrolla la ruta
10%	En zonas rurales montañosas, con heladas o nevadas poco frecuentes
8%	En zonas rurales llanas, con heladas o nevadas poco frecuentes
6%	En zonas próximas a las urbanas, con vehículos que operan a bajas velocidades, o en zonas rurales, llanas o montañosas, sujetas a heladas o nevadas frecuentes

Estas limitaciones de orden práctico impuestas al aumento del peralte impiden compensar totalmente la fuerza centrífuga en las curvas cerradas. Es necesario recurrir a la fricción transversal para que sumada al efecto del peralte, impidan el deslizamiento lateral del vehículo hacia el exterior.

Radio mínimo absoluto (RmínAbs)

Para la velocidad directriz y peralte máximo dados, es el valor del radio correspondiente a la condición límite de seguridad contra el deslizamiento lateral: fricción transversal húmeda máxima.

$$R_{\text{mínAbs}} = \frac{v^2}{127(e_{\text{máx}} + f_{\text{máx}})}$$

V = Velocidad directriz (km/h)

emáx : Peralte máximo (%)

f_{máx} : Coeficiente de fricción lateral húmedo máximo

emáx + f_{máx} = amáx : Coeficiente centrífugo máximo

En esta condición de radio mínimo absoluto, ningún conductor se sentirá cómodo o seguro al viajar a la velocidad directriz. Esta condición se reserva para casos excepcionales donde el proyectista tiene la obligación de eludir tanto como sea posible y práctico.

Radio mínimo deseable (RmínDes)

Para la velocidad directriz y peralte máximo dados, es el valor del radio calculado con la velocidad media de marcha en flujo libre correspondiente a la velocidad directriz, para el cual el coeficiente de fricción transversal húmeda es nulo.

$$R_{\text{mínDes}} = \frac{V_{\text{MM}}^2}{127(e_{\text{máx}} + 0)}$$

V_{MM} = Velocidad media de marcha en flujo libre correspondiente a la velocidad directriz (km/h)

emáx : Peralte máximo (%)

Distribución de e y ft en función de R

La práctica internacional de distribución del peralte en función del radio respeta la comodidad y seguridad de la mayoría: el peralte se calcula para que a la velocidad de la mayoría resulte un andar cómodo y seguro: VMM en flujo libre y fricción transversal nula. Se adopta el método N° 3 de las normas DNV 67/80, similar al método N° 4 de AASHTO.

"El peralte contrarresta íntegramente la fuerza centrífuga de un vehículo que circule en flujo libre a la VMM correspondiente a la V, desde un radio RmínDes en que el peralte es máximo. Para radios menores hasta el RmínAbs, se mantiene el peralte máximo"

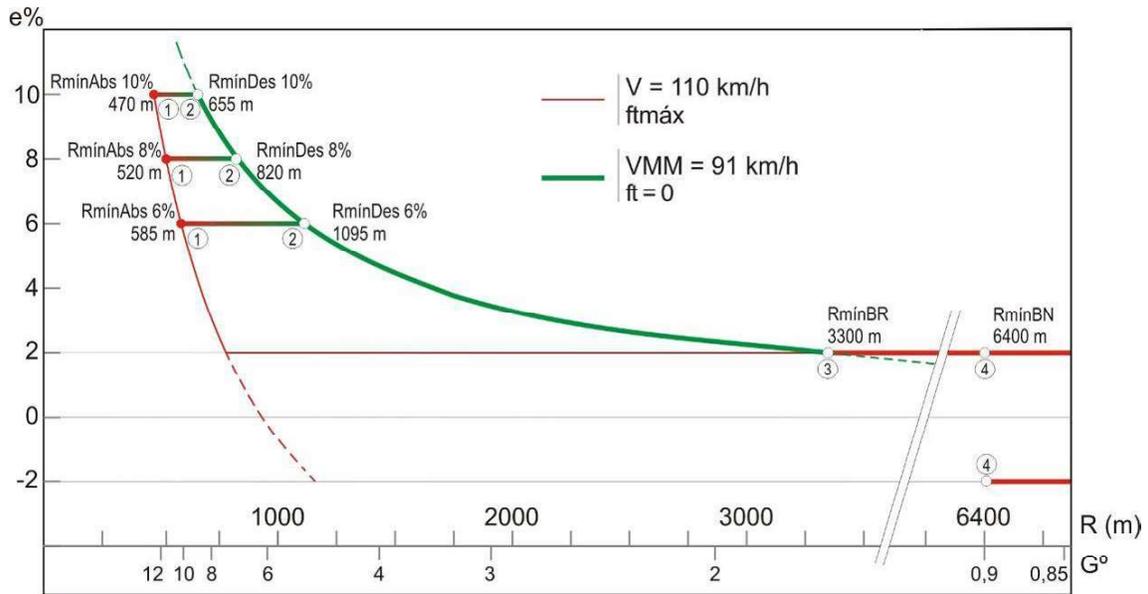


Figura 3.14 Ejemplo de distribución de peraltes en función de R para V= 110 km/h

En la curva de distribución de e en función del R para una determinada V, Figura 3.14, se distinguen cuatro puntos singulares:

Tabla 3.7 Puntos singulares

1	$R_{mínAbs} = \frac{v^2}{127(ft_{máx} + e_{máx})}$	$G^{\circ}_{máxAbs} = 728148 \frac{e_{máx} + ft_{máx}}{v^2}$
2	$R_{mínDes} = \frac{VMM^2}{127e_{máx}}$	$G^{\circ}_{mínDes} = 728148 \frac{e_{máx}}{VMM^2}$
3	$R_{mínBR} = \frac{VMM^2}{127 \times 0,02}$	$G^{\circ}_{mínBR} = 728148 \frac{0,02}{VMM^2}$
4	$R_{mínBN} = \frac{v^2}{127 \times 0,015}$	$G^{\circ}_{mínBN} = 728148 \frac{0,015}{v^2}$

La Tabla 3.8 resume la velocidad, el peralte y la fricción transversal, para los segmentos delimitados por los cuatro puntos singulares.

Tabla 3.8 Velocidad, peralte y fricción transversal entre puntos singulares

Entre	Velocidad	e	ft
1 y 2	V a VMM	emáx	Variable entre: ftmáx y 0
2 y 3	VMM	Variable entre: emáx y + 2%	0
3 y 4	VMM	BR=+ 2%	0
más allá de 4	V	BN=± 2%	ft = 0,035

Tabla de radios mínimos deseables y absolutos

Tabla 3.9 Radios mínimos deseables y absolutos para peraltes máximos

Velocidad directriz	Peralte máximo 6%		Peralte máximo 8%		Peralte máximo 10%	
	Radios mínimos		Radios mínimos		Radios mínimos	
	Deseable	Absoluto	Deseable	Absoluto	Deseable	Absoluto
km/h	m	m	m	m	m	m
25	80	20	60	20	50	20
30	120	30	90	30	70	25
40	210	55	155	50	125	50
50	290	90	220	85	175	75
60	395	135	300	120	240	110
70	515	185	385	170	310	155
80	645	250	480	230	385	210
90	785	340	585	305	470	280
100	935	450	700	405	560	365
110	1095	585	820	520	655	470
120	1270	755	950	665	760	595
130	1450	970	1085	845	870	750
140	1640	1235	1230	1065	985	935

Nomograma para el cálculo de elementos de una curva horizontal

• Fórmulas:

a) $R = \frac{V^2}{127 (e+ft)}$

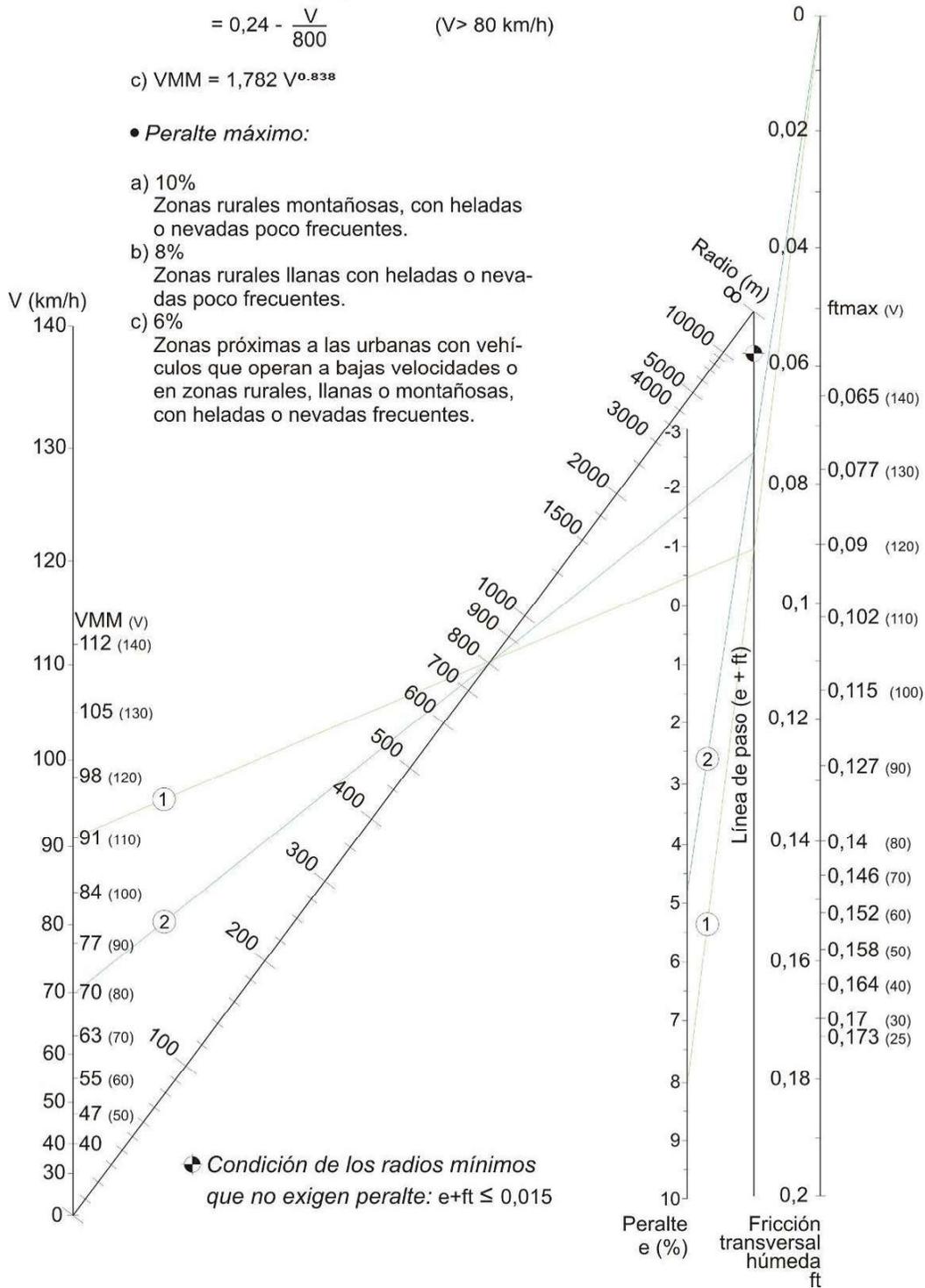
b) $ft_{\text{máx}} = 0,188 - \frac{3V}{5000}$ ($V \leq 80$ km/h)

$= 0,24 - \frac{V}{800}$ ($V > 80$ km/h)

c) $VMM = 1,782 V^{0,838}$

• Peralte máximo:

- a) 10%
Zonas rurales montañosas, con heladas o nevadas poco frecuentes.
- b) 8%
Zonas rurales llanas con heladas o nevadas poco frecuentes.
- c) 6%
Zonas próximas a las urbanas con vehículos que operan a bajas velocidades o en zonas rurales, llanas o montañosas, con heladas o nevadas frecuentes.



• Ejemplos

1. Datos: V= 110 km/h, y emáx= 8%; obtener RmínDes. Resultado: 815 m
2. Datos: V= 80 km/h y R = 800 m; obtener e. Resultado: 4,8%

Velocidad máxima segura (VMS)

Máxima velocidad que puede mantenerse a lo largo de una curva horizontal considerada aisladamente (R), en condiciones de seguridad cuando el pavimento está húmedo y los neumáticos en buen estado, el peralte es el diseñado (e), y la fricción transversal es la máxima (ftmáx):

$$VMS = \sqrt{127R(e + ftmáx)}$$

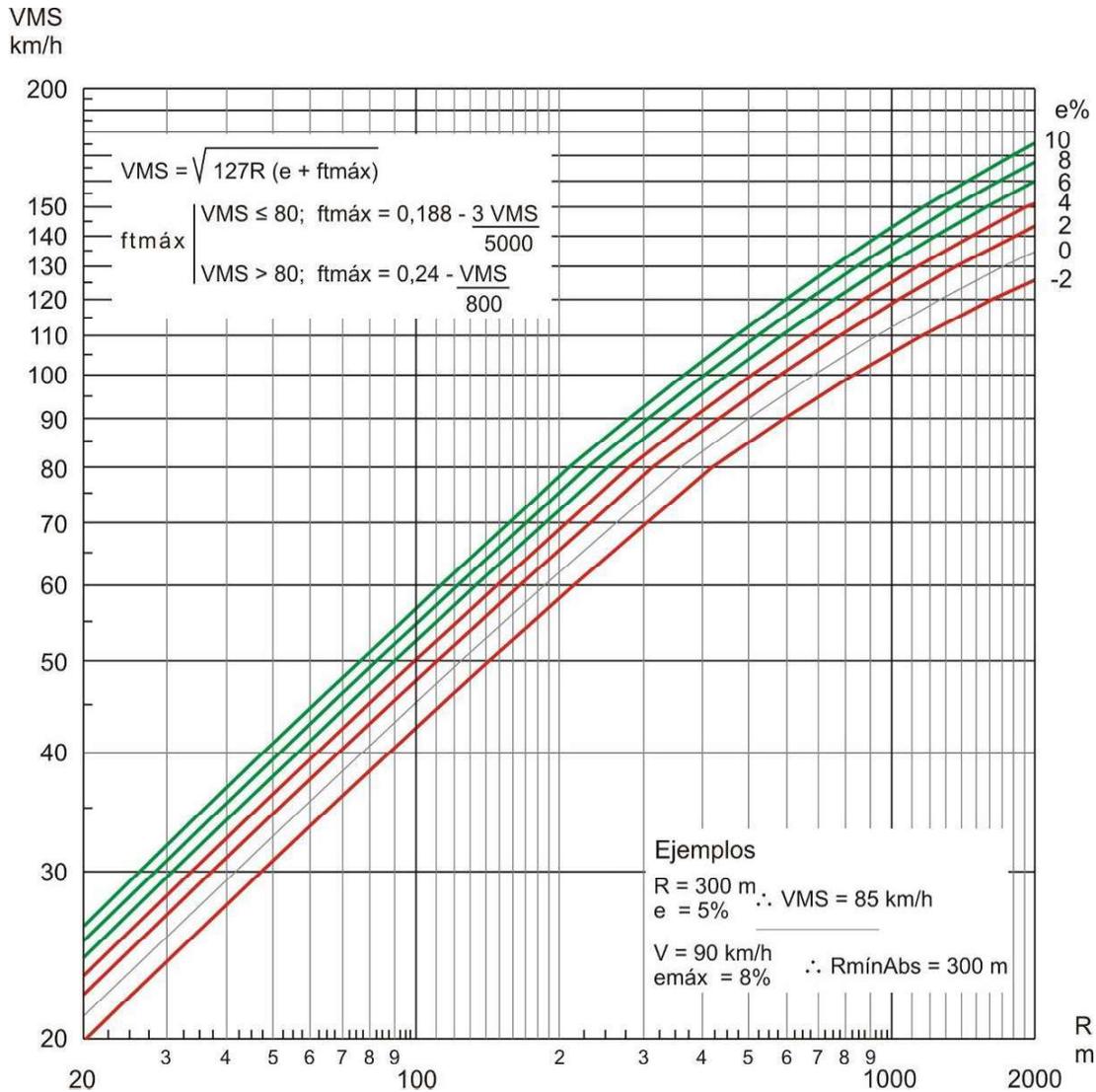


Figura 3.15 VMS en función de R y e

Radio mínimos para $\Delta < 6^\circ$

Para que parezcan curvas y no quiebres, para $\Delta < 6^\circ$ se calculan radios de modo tal que se tarde unos 10 a 20 segundos para recorrer la curva horizontal a la velocidad directriz.

- Caminos de importancia media $R(m) > 3V$ (km/h)/ Δ (rad)
- Caminos de importancia superior $R(m) > 6V$ (km/h)/ Δ (rad)

Radio máximos

Es deseable evitar longitudes excesivas de curvas horizontales. Aunque no pueden darse guías rígidas, para caminos de velocidades altas se adopta como radio máximo el que resulta en un desarrollo máximo del orden de los 3500 m.

Radio de curvas entrelazadas o consecutivas

La velocidad de operación está influida por varios factores relacionados con el conductor, camino y condiciones laterales, características del vehículo, condiciones del tránsito y del tiempo. El alineamiento vial es el factor simple más importante entre las características del camino que influyen en las velocidades de los conductores. Las variaciones de velocidad a lo largo de un camino impactan directamente a la seguridad vial; a la mayor y menor esperada de las variaciones, mayor probabilidad de choque.

Los caminos de altos estándares deben permitir a los conductores viajar con seguridad a una velocidad relativamente constante que satisfaga sus necesidades y expectativas. De otra forma, es probable que ocurran errores de conducción. Al principio de los setenta, investigadores alemanes desarrollaron reglas para ayudar a los proyectistas a elegir las secuencias del alineamiento horizontal que pudieran reducir las variaciones de la velocidad de operación a lo largo de la ruta. Se dibujaron gráficos para indicar la calidad de diseño de varias secuencias posibles de radios para el caso de curvas horizontales próximas.

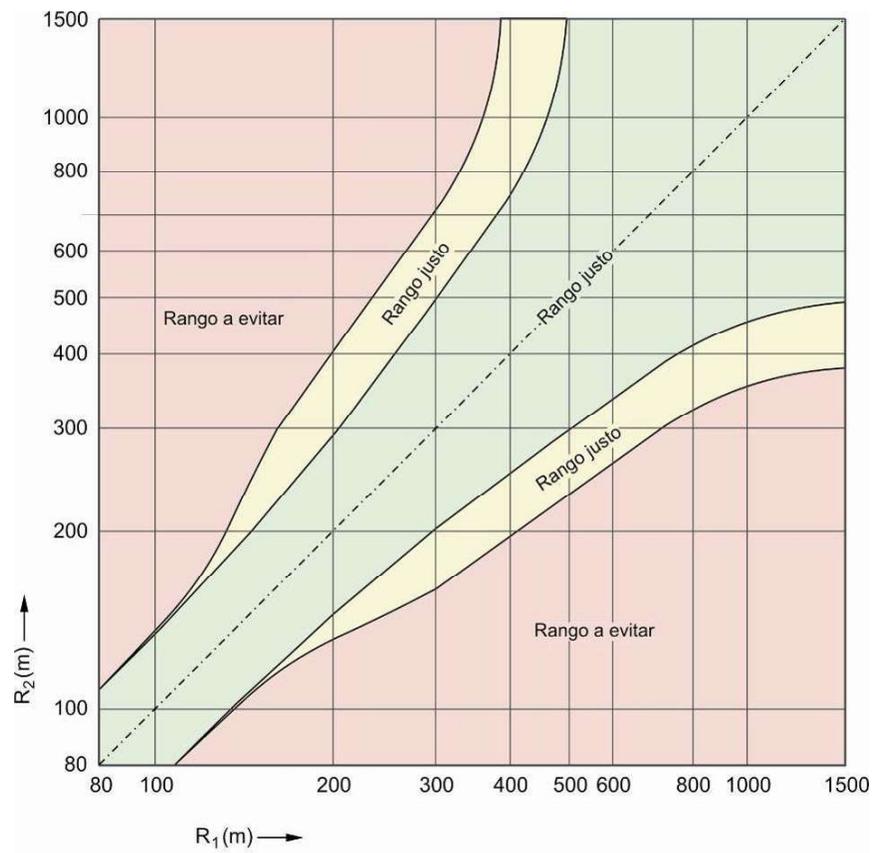
Conocido como diseño de relación, el método es visto como un mejoramiento importante sobre los métodos tradicionales de diseño, que meramente chequeaban el cumplimiento de los valores de los radios mínimos.

Las reglas de diseño de relación también pueden expresarse en términos de diferencias de velocidad. Lamm y otros (1999) recomiendan evaluar la calidad de diseño vial comparando la velocidad del 85° percentil de los vehículos de pasajeros (VO85) en dos sucesivos segmentos del camino.

Las curvas consecutivas o entrelazadas de distinto o mismo sentido poseen una relación intrínseca por las expectativas del conductor, y la necesaria coherencia de diseño, como se muestra en la Figura 3.16.

El color verde representa el rango de radios de relaciones “buenas”, el amarillo el rango de relaciones “justas”, y el rosa el rango de relaciones “malas”. Suponiendo dos curvas entrelazadas, cuya recta intermedia sea menor que 400 m, entonces si R_1 tiene un valor de 300 m, R_2 debería medir entre 200 m y 500 m.

En el caso de rectas de longitudes superiores a 400 m, la primera curva debería tener un radio superior a 400 m.



Radios de giro en secuencia de curvas

Figura 3.16 Fuente: Guías alemanas de diseño, de Lamm y otros (1999)



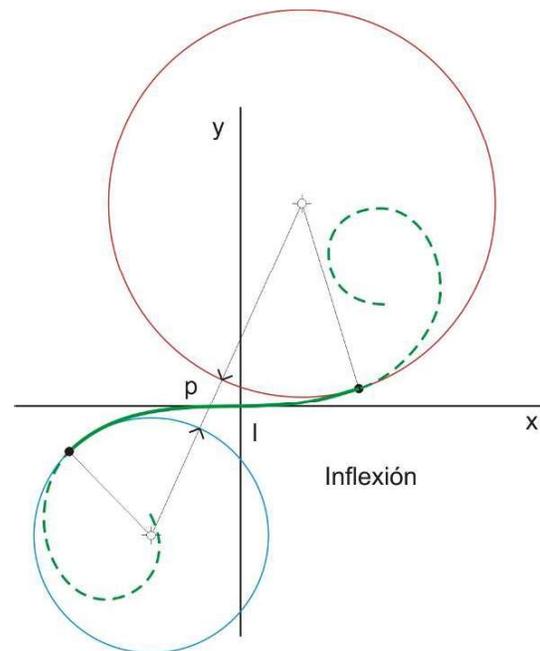
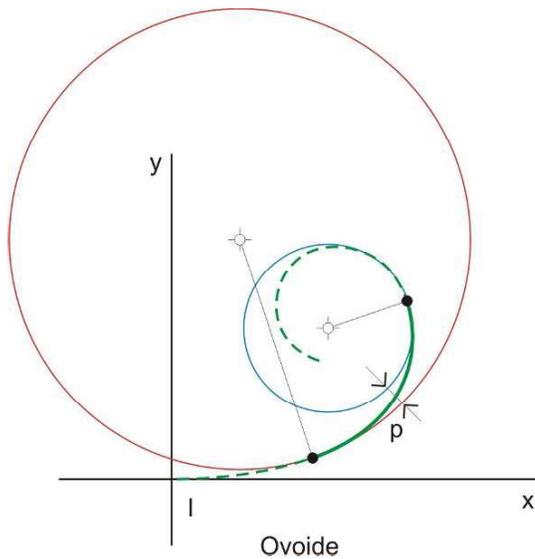
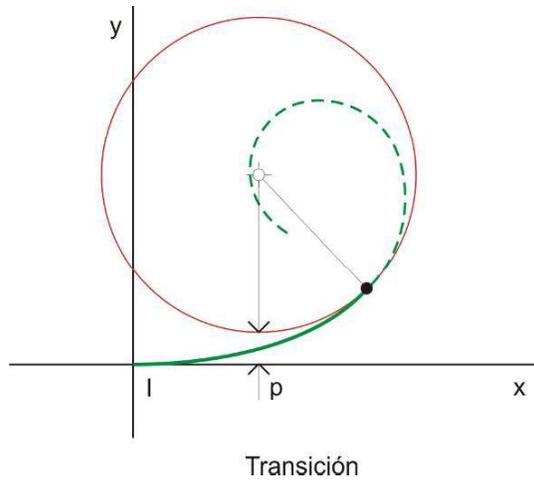
3.5.4 Clotoide

La clotoide [SS3.4.3] es una curva de transición tal que al recorrerla a velocidad constante origina una variación lineal de la aceleración centrífuga en función del tiempo (y del espacio), y un giro del volante a velocidad angular constante; es decir, la curvatura varía linealmente en función de la longitud.

Tipos de clotoide

La distancia mínima entre las dos curvas a enlazar se denomina 'retranqueo p'. Sin retranqueo p no puede haber enlace con espirales de transición: las curvas circulares no deben ser concéntricas, ni secantes, ni tangentes; deben ser exteriores:

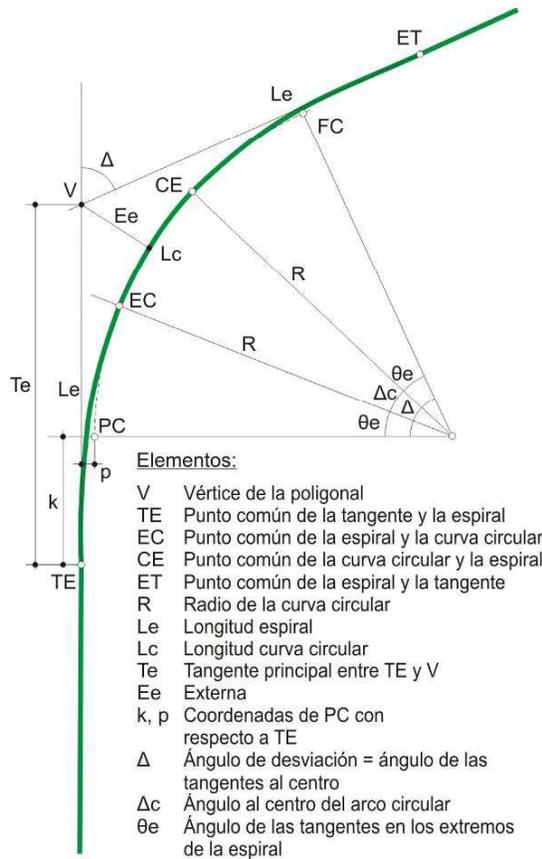
- transición
 - ovoide
- o interiores:
- inflexión



Transición: valores p y k

Al aplicar la espiral, para darle espacio entre la recta y la curva circular, ésta tiene que desplazarse hacia su centro. Así, la curva circular se ubica entre rectas tangentes paralelas a las originales, pero retranqueadas en una cantidad p. Con relación al origen de la transición, el centro de la curva circular retranqueada tiene las coordenadas k (abscisa) y R+p (ordenada), según notación de Barnett para la clotoide.

Los valores p y k resultan al sumar los infinitos términos n de las siguientes series fuertemente convergentes:



$$p = \frac{L^2}{4R} \sum_0^n (-1)^n \frac{\left(\frac{L}{R}\right)^{2n}}{(4n+3)2^{2n}(2n+2)!}$$

$$k = \frac{L}{2} \sum_0^n (-1)^n \frac{\left(\frac{L}{R}\right)^{2n}}{(4n+1)2^{2n}(2n+1)!}$$

Siendo

L=Le= longitud de la transición. Tomando sólo el primer término de cada serie resultan valores prácticos; para n=0, resultan:

$$p = \frac{L^2}{24R}$$

$$k = \frac{L}{2}$$

El punto inicial de la espiral (TE) se ubica a una distancia Te desde el Punto de Intersección o Vértice de las tangentes originales. Donde Δ = ángulo de desviación de la curva circular con transiciones:

$$Te = (R + p) \times \tan \frac{\Delta}{2} + k$$

Con los programas de computación y equipos topográficos actuales, la forma más conveniente de replantear la espiral (y cualquier otra curva) es por medio de coordenadas polares (radiación mediante ángulos y distancias).

Propiedades operativas de la clotoide:

- Normalmente, con combinaciones de alta velocidad y fuerte curvatura, la transición evita invadir el carril adyacente y mantiene la trayectoria en el propio carril con velocidad uniforme.
- Facilita a los conductores un andar seguro y cómodo de la curva, mantiene al vehículo en su carril sin que experimente la violenta aparición de la fuerza centrífuga.
- El radio disminuye gradualmente desde infinito en la recta que se conecta con la espiral (TE) hasta el radio de la curva circular (EC). Desde el fin del arco circular y comienzo de la espiral (CE) se invierte la variación hasta la unión de la espiral con la recta siguiente (ET).
- La longitud de la transición provee una longitud conveniente para desarrollar las variaciones de peralte y sobreebancho.
- Mejora la apariencia estética al evitar distorsiones visuales y quiebres al principio y final de las curvas horizontales sin transiciones.

Longitud mínima y máxima

- Longitud mínima:

Se adopta el mayor valor entre:

- Criterio de comodidad: La longitud mínima necesaria está dada por la función de Shortt (1909):

$$L_{\text{mín}} = \frac{0,0214 V^3}{R \times a}$$

Donde:

V=velocidad directriz (km/h)

R= radio de la curva (m)

a= variación de la aceleración centrífuga; alrededor de 0,6 m/s³

$$L_{\text{mín}} = \frac{V^3}{28R}$$

- Criterio de apariencia general:
La transición debe tener una longitud mínima tal que un vehículo marchando a la velocidad directriz, tarde 2 segundos aproximadamente en recorrerla.
La longitud mínima será de 30 m.

$$L_{\text{mín}} = \frac{V}{1,8} \geq 30$$

- Criterio de apariencia de borde:

La experiencia indica que las pendientes relativas máximas de 0,8 a 0,35% en función de la velocidad proveen desarrollos de peraltes con buena apariencia de borde para velocidades entre 20 y 130 km/h.

La longitud del desarrollo del peralte (Des) es:

$$\text{Des} = \frac{c \times e}{ib}$$

Donde:

Des = Longitud de desarrollo del peralte (m)

c = Ancho de carril (m)

e = Peralte (%)

ib = Pendiente relativa del borde respecto del eje de rotación,

$$ib(\%) = 0,85 - \frac{V}{253}$$

$$\text{Lemín} = \text{Des}$$

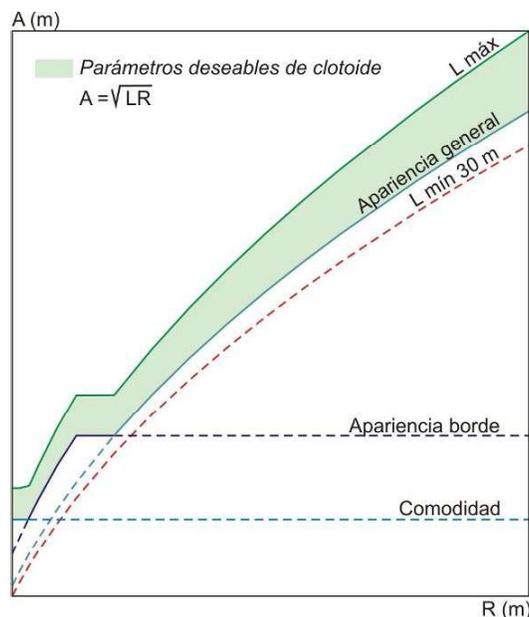
- Longitud máxima:

Según las investigaciones internacionales se comprobó que las expectativas de los conductores no son satisfechas por las longitudes largas de transición: inducen maniobras de zigzagueantes.

Por lo que se limita la longitud máxima de la clotoide a:

$$\text{Lemáx} = 1,25 \text{ Lemín}$$

Parámetros deseables de la clotoide



Ovoide e Inflexión: cálculo analítico de la longitud mínima

El procedimiento de cálculo es similar para enlazar dos curvas circulares interiores del mismo sentido (ovoide), o dos curvas circulares exteriores de distinto sentido (inflexión). Caso particular, curva circular y recta (curvatura nula, radio infinito). C_a , es la resta (ovoide) o suma (inflexión) de las curvaturas C_1 y C_2 , llamada por Barnett *curvatura de la espiral equivalente*; R_a , la inversa de C_a , es el radio de curvatura de la espiral equivalente.

- **Ovoide** $C_a = |C_1 - C_2|$

$$\frac{1}{R_a} = \left| \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right| \Rightarrow R_a = \frac{R_1 \times R_2}{(R_1 - R_2)}$$

- **Inflexión** $C_a = C_1 + C_2$

$$\frac{1}{R_a} = \left| \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right| \Rightarrow R_a = \frac{R_1 \times R_2}{(R_1 + R_2)}$$

- **Transición** $C_a = C_1 \pm 0$

$$\frac{1}{R_a} = \frac{1}{R_1} \Rightarrow R_a = R_1$$

Cálculo analítico de la clotoide (ovoide, inflexión, transición) parámetro A

- Retranqueo p en función de L y R_a

$$p = \sum_0^n (-1)^n \frac{(L)^{2n+2}}{R_a^{2n+1} (4n+3) 2^{2n+2} (2n+2)!}$$

$$\text{Para } n = 3 \text{ es: } p = \frac{L^2}{24R_a} - \frac{L^4}{2688R_a^3} + \frac{L^6}{506880R_a^5} - \frac{L^8}{154828800R_a^7}$$

- Longitud L en función de p y R_a

$$\frac{L^2}{24R_a} - \frac{L^4}{2688R_a^3} + \frac{L^6}{506880R_a^5} - \frac{L^8}{154828800R_a^7} - p = 0$$

$$\text{VALOR DE PRUEBA: } L = (24pR_a)^{1/2}$$

- Longitud L en función de V y R_a

$$L = \frac{V^3}{28R_a}; \text{ Donde } 28 = 3,6^3 \times 0,6$$

Cálculo analítico de la inflexión compuesta ($A_1 \neq A_2$)

$$\text{Retranqueo } p \text{ en función de } A_1 = \sqrt{L_1 \times R_1} \quad ; \quad A_2 = \sqrt{L_2 \times R_2}$$

Son dos *curvas de transición* unidas en el punto de inflexión; previamente se calculan p_1, k_1, p_2, k_2 con las expresiones generales:

$$k = \frac{L}{2} \sum_0^n (-1)^n \frac{\left(\frac{L}{R}\right)^{2n}}{(4n+1)2^{2n}(2n+1)!}$$

$$p = \frac{L^2}{4R} \sum_0^n (-1)^n \frac{\left(\frac{L}{R}\right)^{2n}}{(4n+3)2^{2n}(2n+2)!}$$

Para n = 3 es:

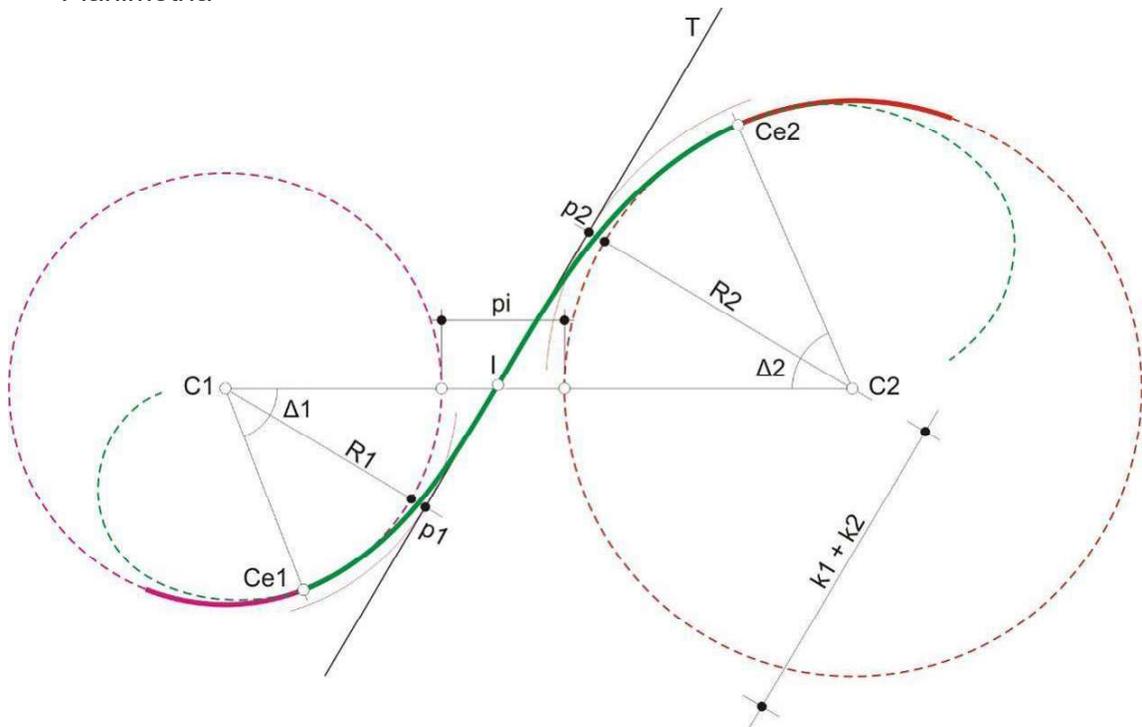
$$k = \frac{L}{2} - \frac{L^3}{240R^2} + \frac{L^5}{253440R^4} - \frac{L^7}{9676800R^6}$$

$$p = \frac{L^2}{24R} - \frac{L^4}{2688R^3} + \frac{L^6}{506880R^5} - \frac{L^8}{154828800R^7}$$

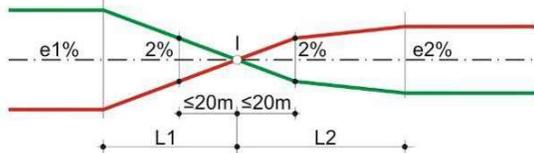
Aplicando Pitágoras y operando resulta:

$$p = \left[(R_1 + p_1 + R_2 + p_2)^2 + (k_1 + k_2)^2 \right]^{1/2} - (R_1 + R_2)$$

• Planimetría



• Peralte



• Sobrancho

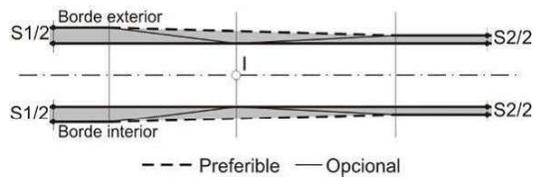
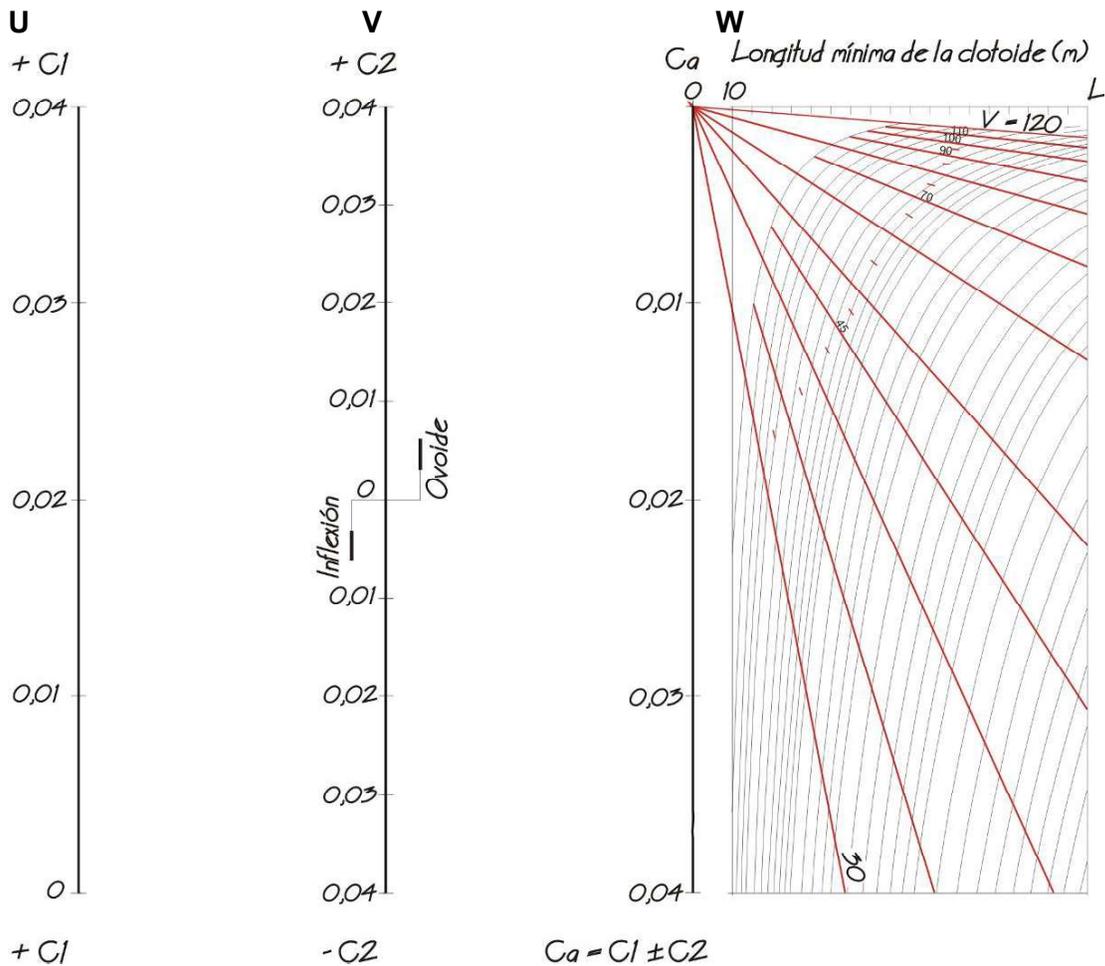


Figura 3.18 Planimetría peralte y sobrancho de la inflexión

Gráfico para el cálculo de Lemín deseable de la clotoide (ovoide, transición, inflexión)

El gráfico se compone de un nomograma y de un gráfico cartesiano ortogonal, unidos por un eje común: la curvatura C_a de la **espiral equivalente**. En el eje de abscisas se obtiene la longitud mínima deseable de la clotoide necesaria para acordar curvas circulares de distintas curvaturas, de igual o distinto sentido.

- **Nomograma para cálculo gráfico de Ra**
Es un nomograma a puntos alineados sobre sostenes paralelos tipo A, según la expresión canónica $U + V = W$.



- **Eje curvatura mayor + C1.** En el eje U (izquierda), a escala lineal uniforme se representa la curvatura C1 en radianes por metro, de la curva de mayor curvatura, con origen cero en el extremo inferior y sentido creciente de abajo arriba.
- **Eje curvatura menor ± C2.** En el eje V (medio), a escala lineal uniforme de módulo igual a la mitad del módulo del eje U se representa la curvatura ± C2, con origen cero común y sentido creciente hacia arriba (+) y hacia abajo (-).

- *Eje curvatura equivalente Ca.* En el eje W (derecha), a escala lineal uniforme, de módulo igual al del eje U, con origen en el extremo superior y sentido creciente de arriba abajo se representa la curvatura $Ca = C1 \pm C2$. Cualquier recta que corte los tres ejes resuelve esta igualdad.
 - *Cambio de escala.* Si en los tres ejes se cambia la escala lineal de la curvatura reemplazándola por su expresión equivalente $1/R$, y se representan los valores de R correspondientes, se obtienen escalas lineales inversas con extremos $\pm \infty$ según el eje, con las cuales se resuelve $1/Ra = 1/R1 \pm 1/R2$. Los ejes verticales se limitan a valores prácticos de los radios, entre $\pm \infty$ m y 25 m (C entre 0 rad/m y 0,04 rad/m). Es aconsejable pensar los segmentos de recta como arcos de circunferencia de radio infinito).
 - *Velocidad máxima segura V.* Como guía, al eje +R1 se le aparea el eje de velocidad máxima segura V para +R1 mínimo absoluto (máximos peralte y fricción lateral); es un eje auxiliar que no forma parte del nomograma.
 - Para curvas compuestas de distinto sentido, en el diseño de caminos siempre conviene intercalar una transición tipo inflexión, cualquiera que sea la velocidad V o la relación de los radios.
- Gráfico cartesiano para cálculo gráfico de Lemín deseable
Los ejes son R_a en ordenadas y la *longitud mínima deseable Le* de la clotoide en abscisas.
 - *Polo O.* Al limitar $L \geq 10$ m, el origen de coordenadas ($L = 0$, $Ca = 0$; o $L = 0$, $R_a = \infty$) queda fuera de la grilla, por lo que se lo indica con un punto (\dagger), designado *polo O*.
 - *Velocidad V.* Según resulta de la fórmula de Shortt es $Ca = 28 L/V^3$ por lo que las líneas de velocidad constante son rectas que pasan por el polo O. Se representan las líneas correspondientes a velocidades múltiplos de 10 km/h entre 30 y 120 km/h. Mediante cortos tics alineados con el polo O se indican valores intermedios. Con esta disposición, el gráfico estaría listo para cumplir con su función esencial. Hallada R_a con el nomograma o la calculadora, se traza una horizontal hasta cortar la recta V y se baja una vertical hasta el eje L para hallar la longitud mínima deseable de la clotoide. El gráfico se completa con representaciones de las curvas de nivel del retranqueo p, y la línea de separación entre ovoide e inflexión. También se representan el parámetro A según la modalidad europea y el grado de curvatura G° .
 - *Retranqueo p.* A partir de 0,1 m, los retranqueos p (separaciones mínimas entre las circunferencias de radios R1 y R2) se indican por medio de curvas de nivel con intervalos prácticos que no atiborran el dibujo.

Gráfico cartesiano y ejemplos de cálculo analítico en [3 ANEXO]

- **Diseño de la ovoide**
 - Planimetría

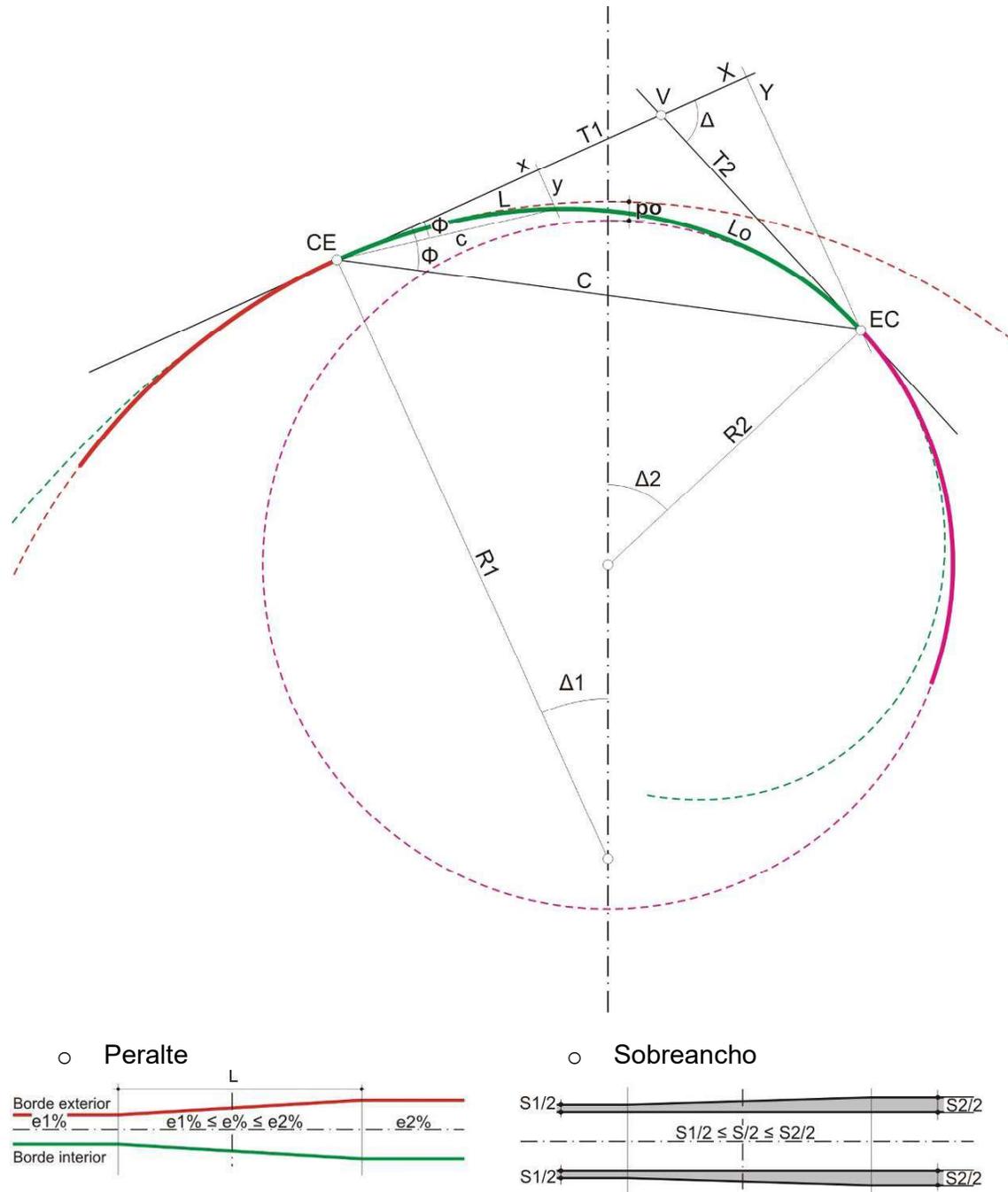


Figura 3.19 Planimetría, peralte y sobrecancho de la ovoide

- Longitud mínima deseable de la ovoide para $a = 0,6 \text{ m/s}^3$

$$L = \frac{V^3}{28R1} - \frac{V^3}{28R2} = \frac{V^3}{28Ra}$$

- Replanteo

El radio común divide en dos arcos de igual longitud a la ovoide, de manera que su ángulo al centro Δ puede obtenerse sumando los ángulos al centro de cada uno de los arcos, supuestos de circunferencia. En radianes resulta:

$$\Delta_1 = \frac{L}{2R1} \quad \Delta_2 = \frac{L}{2R2} \quad \Delta = \frac{L}{2R1} + \frac{L}{2R2} = \frac{L(R2 + R1)}{2R1 \times R2}$$

Donde:

$\Delta_{1,2}$: Ángulos al centro formados por las direcciones radiales en CE y EC y la línea de los centros

L_o : Longitud de la ovoide entre CE y EC.

$R1$ y $R2$: Radios de las curvas circulares

V : Punto de intersección de las tangentes en CE y EC

$T1$ y $T2$: Longitud de las tangentes en CE y EC

Definida $L_o \geq L_{\text{mínDes}}$, se obtiene po con:

$$po = \frac{L^2}{24Ra} - \frac{L^4}{2688Ra^3} + \frac{L^6}{506880Ra^5} - \frac{L^8}{154828800Ra^7}$$

Donde:

$$Ra = \frac{R1 \times R2}{(R1 - R2)}$$

Se ubican los arcos de circunferencias interiores de radios $R1$ y $R2$ separados la distancia po , y se determina la línea de los centros.

Con Δ_1 y Δ_2 se ubican los extremos de la ovoide: CE y EC.

Con un sistema local de coordenadas de ejes tangente y radial en el punto CE se aplica el programa CLALL en notación RPN [3 ANEXO] y se replantea la ovoide.

Datos:

A

$R1$

$L \leq L_o$

Resultados:

C, ϕ

x, y

Para $L = L_o$

X, Y

$T1, T2$

3.5.5 Transición del peralte

Es el proceso para modificar el perfil de la sección transversal desde el BN (bombeo normal) en recta al perfil peraltado en curva, y viceversa, Figura 3.20. Toda curva que requiera peralte debe tener transiciones en la entrada y en la salida, para favorecer la variación de la curvatura en correspondencia con la variación del peralte y del sobreebancho.

La transición del peralte está compuesta de dos partes: el desarrollo en recta extendida (Rex) y el desarrollo del peralte (Des).

- **Desarrollo en recta extendida (Rex):** se refiere a la rotación del carril exterior desde el bombeo normal (A) hasta su posición horizontal (B).
- **Desarrollo del peralte (Des):** se refiere a la rotación del carril exterior desde su posición horizontal (B) hasta revertir el bombeo (C) y desde allí la rotación de ambos carriles hasta el peralte total (E).

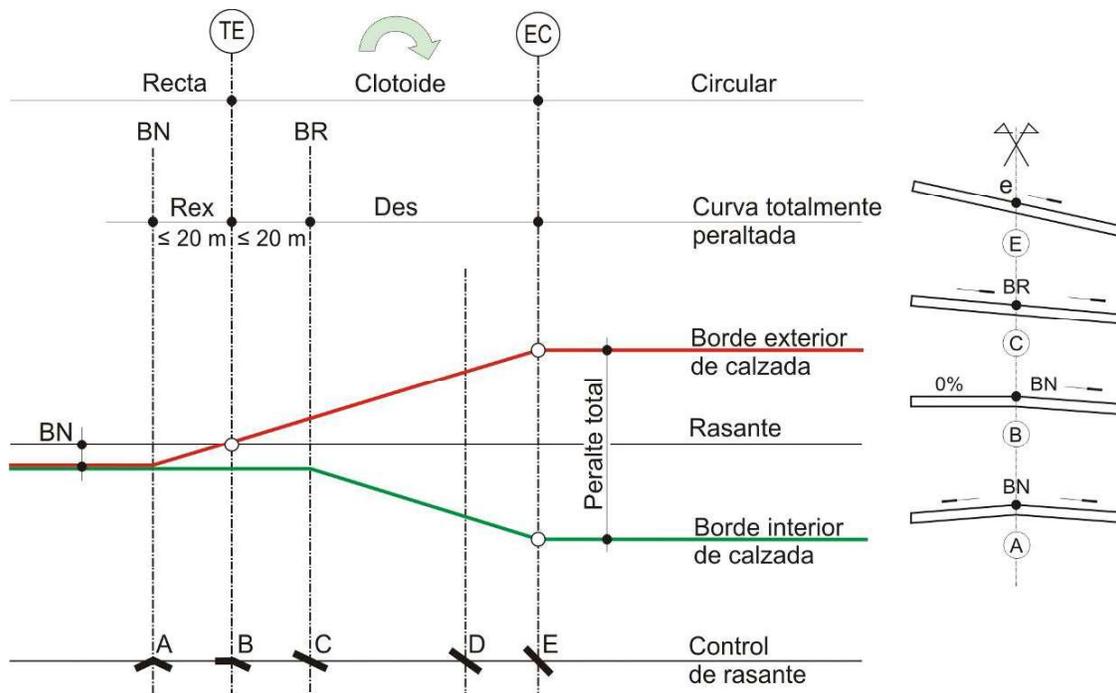


Figura 3.20 Transición del peralte

Para evitar problemas de drenaje, la longitud de los tramos con pendiente transversal menor que 2% se limita a 40 m. Una profundidad de agua de 1,5 cm es suficiente para producir hidroplaneo; si los neumáticos estuvieran desgastados, una profundidad menor sería suficiente.

La pendiente del desarrollo en recta extendida (Rex) es igual que la del desarrollo del peralte (Des), siempre que se verifique que la longitud con pendiente transversal inferior a 2% no supera los 40 m. En caso contrario la transición del peralte se realiza según el diagrama de peralte de la lámina modelo incluida en el [Atlas].

Métodos de transición del peralte

Se distinguen según sea la línea elegida como eje de giro: eje central, borde interior, borde exterior. En la mayoría de los casos se emplea el giro del peralte alrededor del eje central. Restricciones tales como accesos a propiedad o drenaje en ambiente urbano pueden requerir la rotación alrededor del borde interior o exterior; en estos casos y cuando la rasante está aplicada en el eje de la calzada, estas opciones distorsionan la rasante de la línea central que se ve afectada por el peralte. Para evitar los cálculos de ajuste de la rasante, lo más práctico es trasladar el punto de aplicación de la rasante en toda la curva y hacia el borde elegido como eje de giro.

- **Alrededor del eje central**

Generalmente para peraltar un camino de dos carriles se gira el pavimento alrededor de su eje central.

Curva con transición

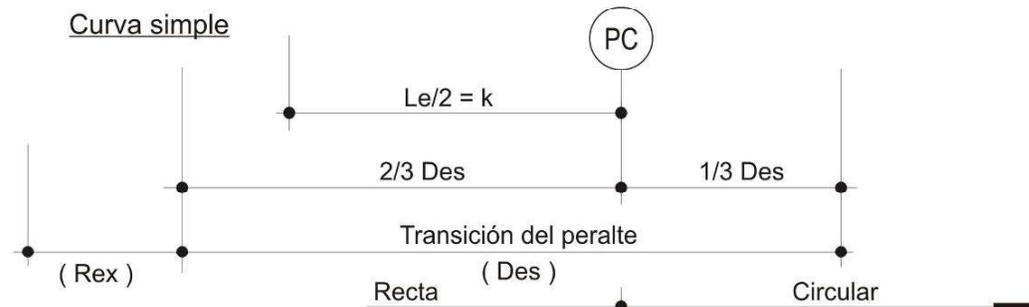
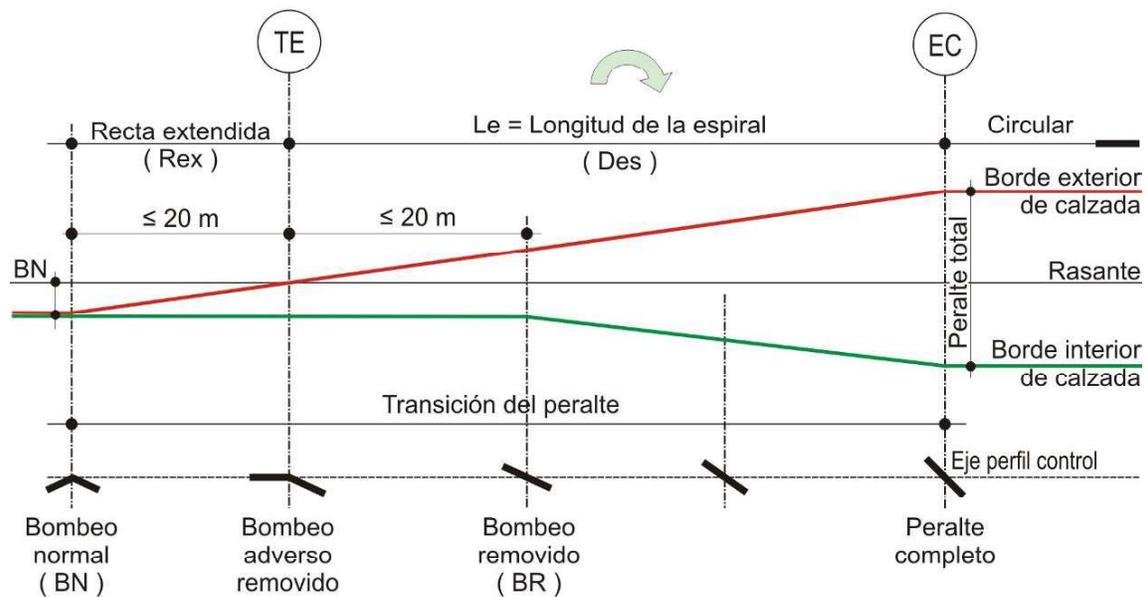


Figura 3.21 Método I: giro del peralte alrededor del eje central

• **Alrededor del borde interior**

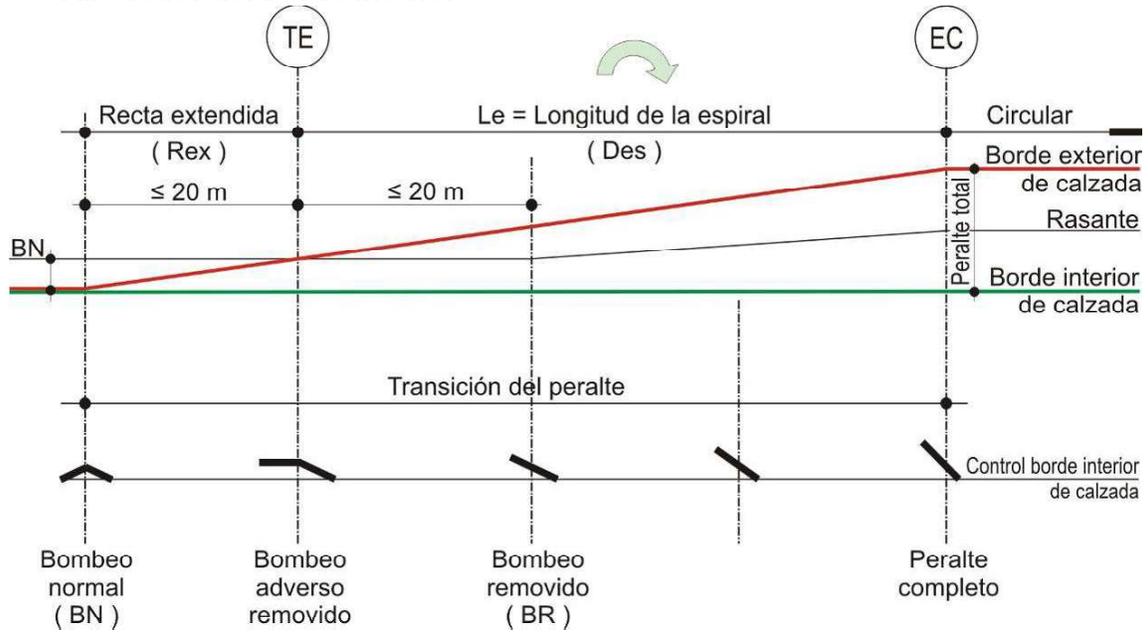


Figura 3.22 Método II: giro del peralte alrededor del borde interior

El segundo método se utilizara como excepción en los casos en que el pavimento se encuentre a la altura mínima sobre las cunetas o napa freática, o la curva se encuentre en correspondencia con obras de arte con tapada mínima.

• **Alrededor del borde exterior**

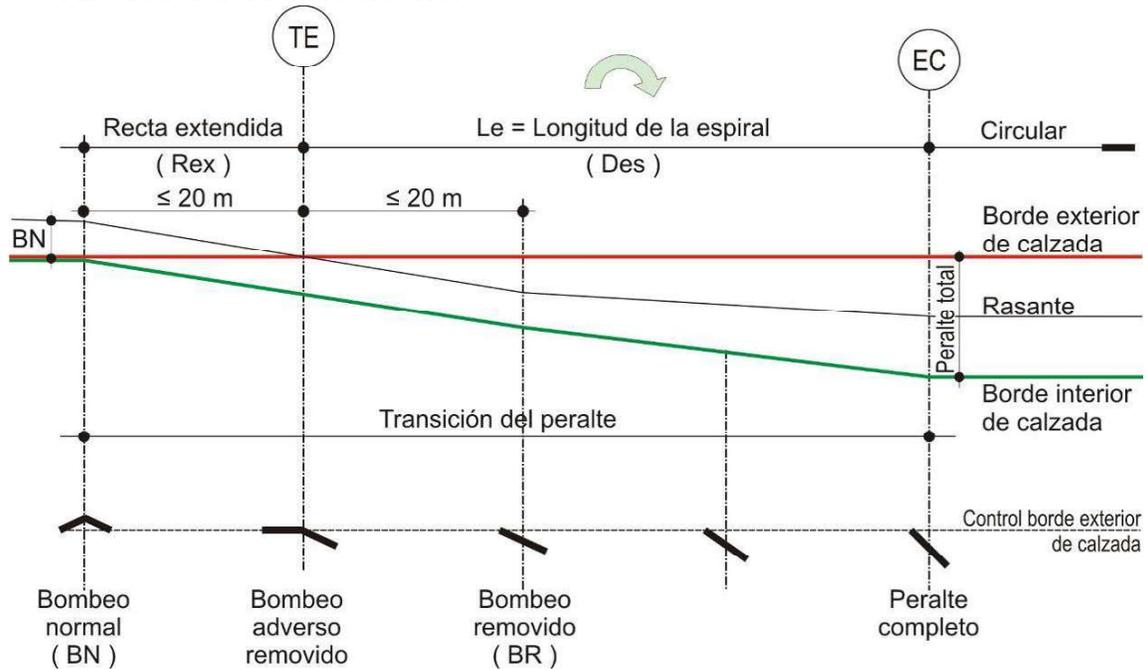


Figura 3.23 Método III: giro del peralte alrededor del borde exterior

Este método podrá utilizarse como excepción, cuando por razones estéticas no sea conveniente deformar el perfil externo, el cual es más notable para los conductores.

Casos especiales

En las Figura 3.24 y Figura 3.25 se muestran tratamientos especiales para la transición del peralte en curvas reversas y espalda-quebrada.

- En curvas reversas , conviene eliminar la pequeña recta intermedia

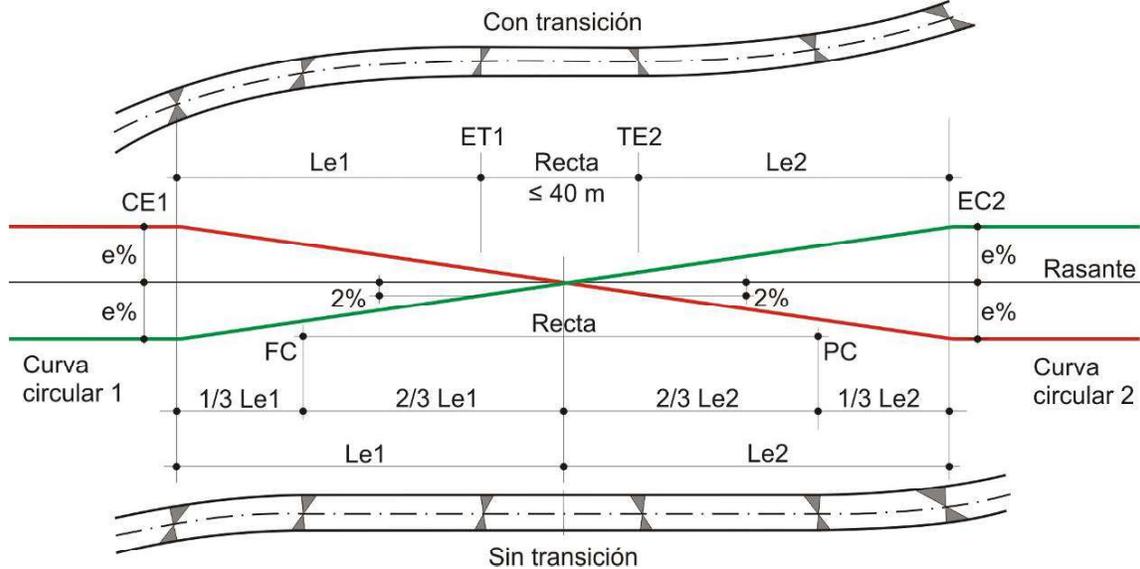


Figura 3.24 Desarrollo del peralte en curvas reversas

- En curvas espalda-quebrada, en el tramo recto, por razones prácticas conviene mantener el bombeo removido (BR), en lugar del bombeo normal (BN)

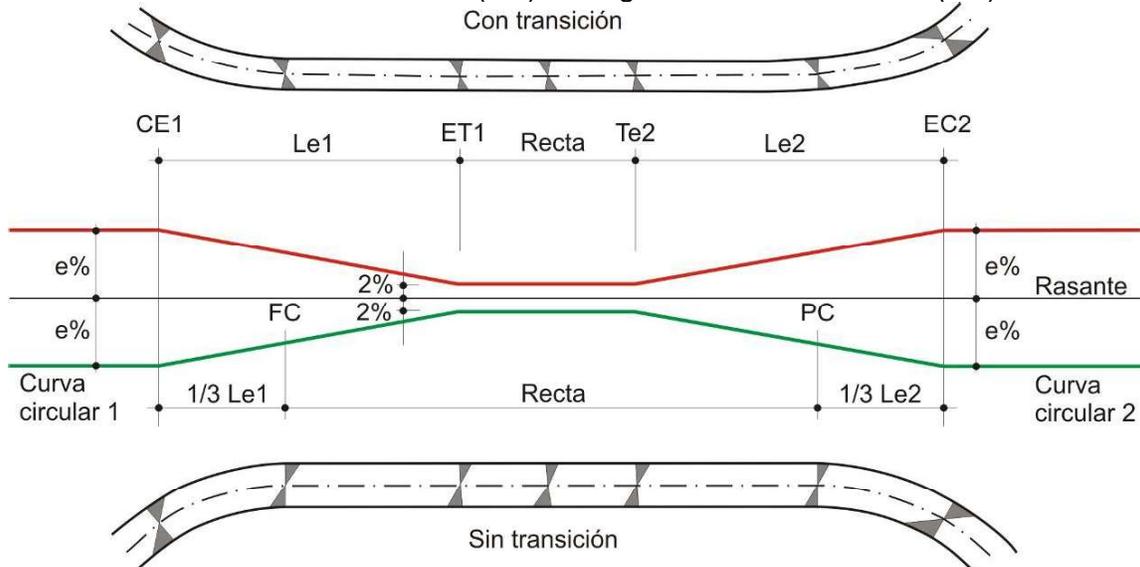


Figura 3.25 Desarrollo del peralte en curvas espalda-quebrada

3.5.6 Sobreanchos

Modelo de cálculo

Para que las curvas horizontales presenten las mismas condiciones de seguridad que las rectas, ante el cruce de vehículos con sentidos opuestos, es necesario introducirles sobreanchos por las siguientes razones:

- El vehículo al describir una curva, ocupa un mayor ancho, ya que sus ruedas traseras recorren una trayectoria ubicada en el interior de las descritas por las ruedas delanteras. Además, el extremo lateral delantero externo del vehículo, describe una trayectoria que resulta exterior a la de las ruedas delanteras.
- La dificultad que experimentan los conductores para mantenerse en el centro de su carril por la menor facilidad para apreciar la posición relativa de sus vehículos en la curva. Esta dificultad aumenta con la velocidad pero disminuye a medida que aumentan los radios de las curvas horizontales.

Para determinar la magnitud del sobreancho, debe elegirse un vehículo representativo del tránsito de la ruta. Dada la gran proporción de vehículos pesados que circulan, esta norma define como vehículo representativo o de control al camión semirremolque, según práctica de la DNV, que posee las siguientes dimensiones:

Distancia entre la parte frontal y eje delantero: $l_1 = 1,35$ m

Distancia entre el eje delantero y el eje trasero de la unidad tractora: $l_2 = 4,3$ m

Distancia entre el eje trasero de la unidad tractora y el eje del semirremolque: $l_3 = 9,35$ m

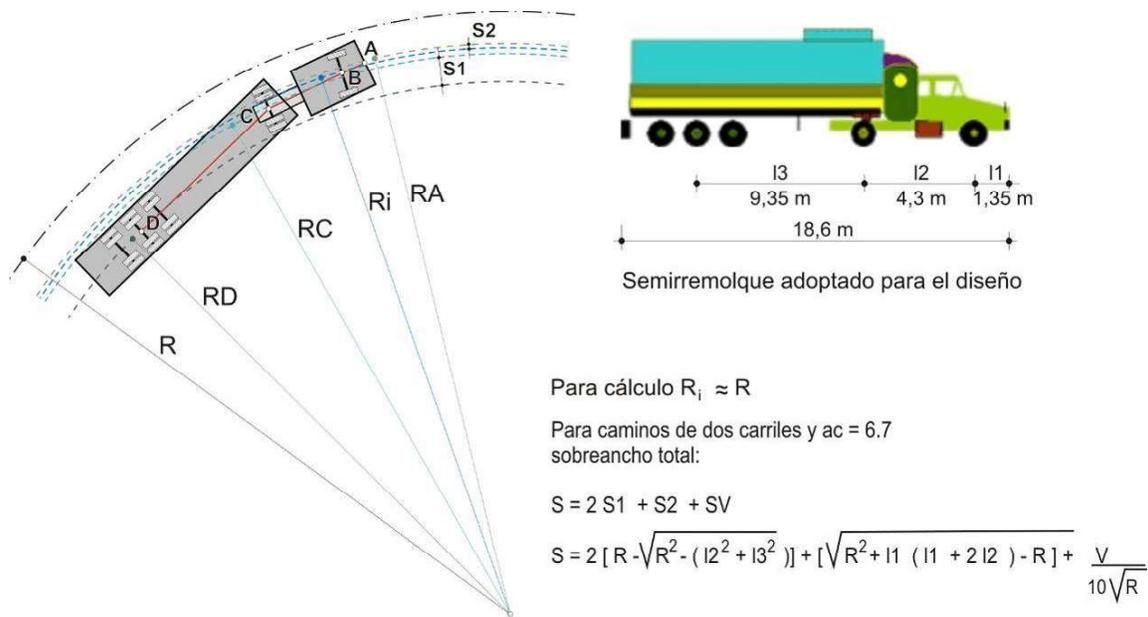


Figura 3.26 Trayectoria de giro del vehículo semirremolque (DNV)

El sobreancho S, en metros, de un camino de 2 carriles para calzadas de 6,7 y 7,3 m, siendo R el radio de la curva en metros, y V la velocidad directriz en km/h, es la siguiente expresión adoptada:

$$S(m) = 2 \left[R - \sqrt{R^2 - \left((4,3)^2 + (9,35)^2 \right)} \right] + \sqrt{R^2 + 1,35(1,35 + 8,6)} - R + \frac{V}{10\sqrt{R}}$$

$$S(m) = 2 \left[R - \sqrt{R^2 - 105,9} \right] + \sqrt{R^2 + 13,4} - R + \frac{V}{10\sqrt{R}}$$

Método de distribución

En curvas con transiciones, el sobreeancho se debe repartir por partes iguales a ambos lados del eje, sin modificar la posición del eje de simetría de la calzada respecto al eje de proyecto. La distribución deberá variar linealmente a lo largo de la longitud de las espirales, para obtener el valor total en todo el desarrollo del arco circular. En la parte externa de las curvas, el sobreeancho no debe sobrepasar las extensiones del borde exterior de las rectas tangentes por razones estéticas y de seguridad.

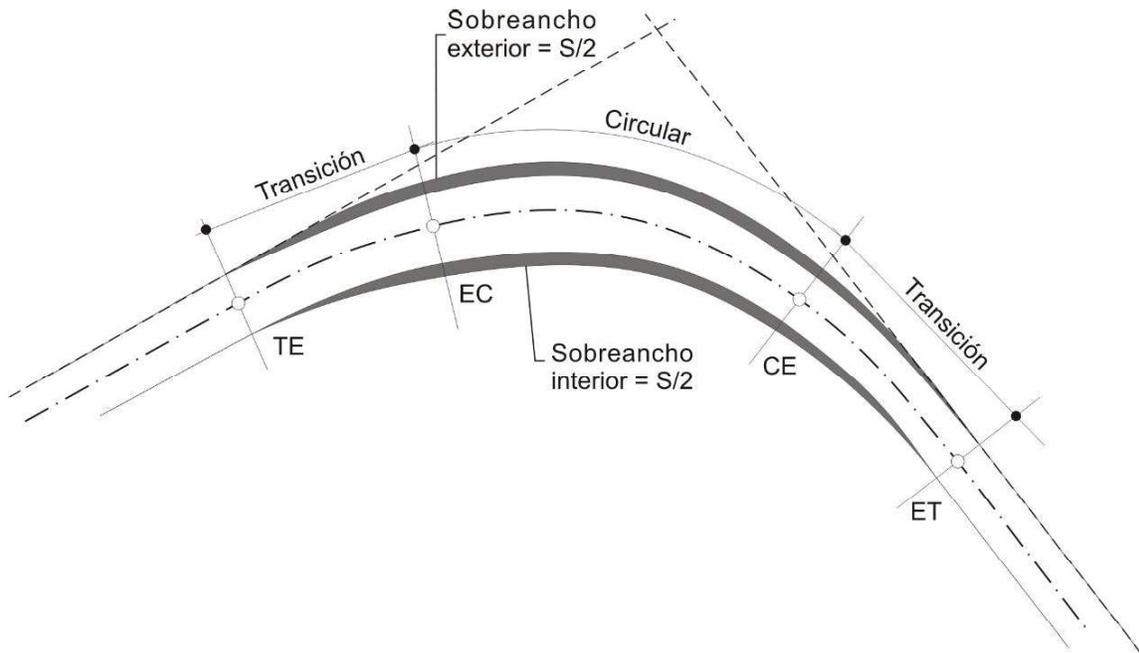


Figura 3.27 Variación del sobreeancho en curva horizontal con transiciones

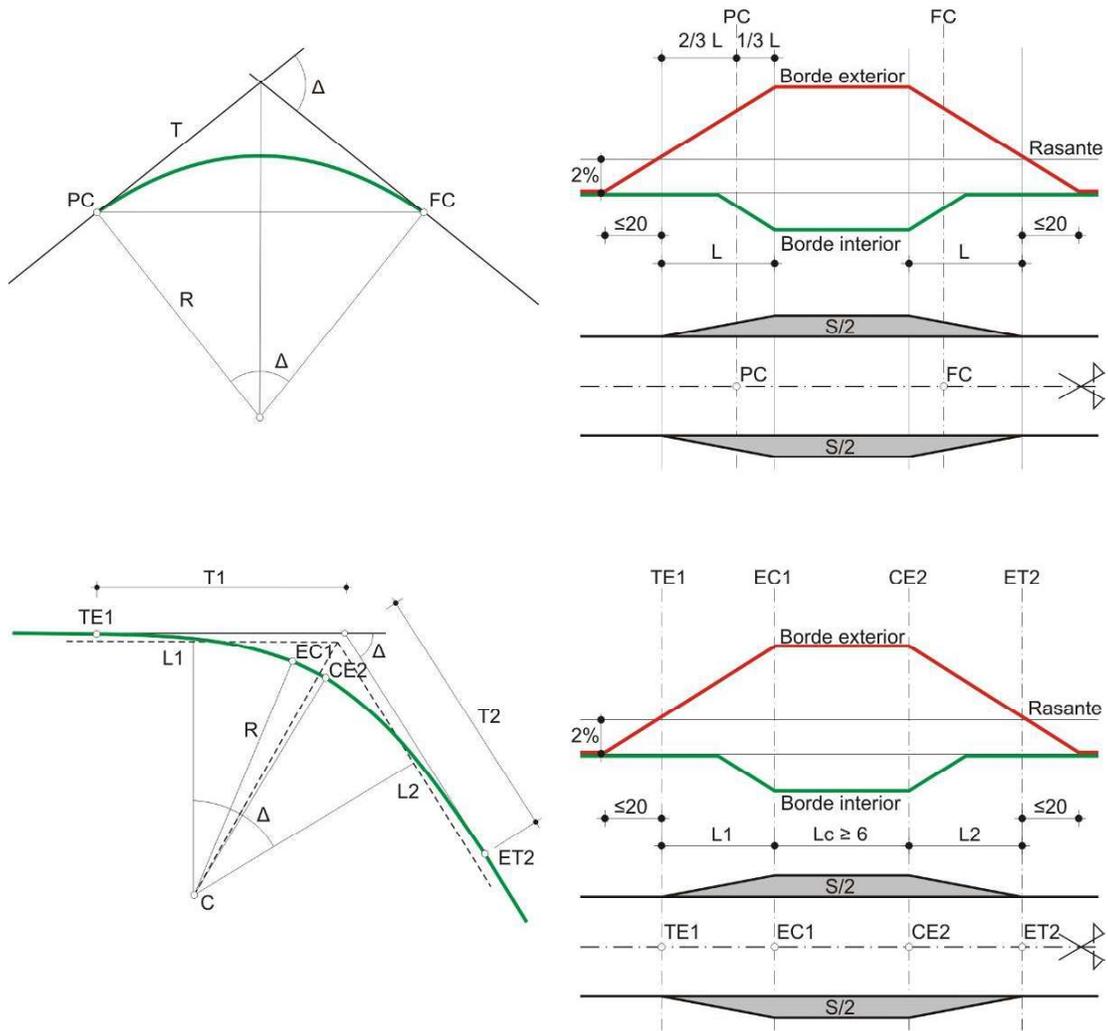


Figura 3.28 Diagramas de peralte y distribución de sobrancho en curvas simples ($R1$) y simples con transiciones asimétricas ($R1, Le1, Le2$)

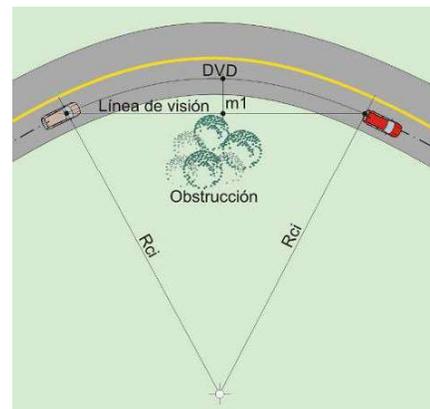
En las tablas de Curvas Horizontales al final de esta sección se expresan los valores de sobrancho, en función del radio y de la velocidad directriz, para el vehículo de control adoptado (vehículo semirremolque de la DVN) y $ac = 6,7$ m. Por razones prácticas constructivas no se proporciona sobrancho a las curvas horizontales, cuando por cálculo se obtiene un valor inferior a 0,5 m.

Tabla 3.10 Sobranchos para el vehículo semirremolque de la DVN y $ac= 6,7$ m

R m	Velocidad Directriz (km/h)												
	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
20	6,6												
30	4,3	4,4											
40	3,3	3,3											
50	2,6	2,7	2,8										
60	2,2	2,3	2,4										
70	1,9	2	2,1										
80	1,7	1,7	1,9	2									
90	1,5	1,6	1,7	1,8									
100	1,4	1,4	1,5	1,6									
110	1,3	1,3	1,4	1,5	1,6								
120	1,2	1,2	1,3	1,4	1,5								
130	1,1	1,1	1,2	1,3	1,4								
140	1	1,1	1,1	1,2	1,3								
150	1	1	1,1	1,2	1,2								
175	0,8	0,9	0,9	1	1,1	1,2							
200	0,7	0,8	0,8	0,9	1	1,1							
250	0,6	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	1						
300	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9					
400	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,8				
500		0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7			
600			0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7		
700				0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6		
800					0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	
900						0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	
1000							0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6
1200								0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5
1300									0,4	0,4	0,4	0,4	0,5
1400										0,4	0,4	0,4	0,5
1500											0,4	0,4	0,4
2000												0,4	0,4

3.5.7 Distancia visual de detención (DVD) en curvas horizontales

Donde haya obstrucciones visuales sobre el lado interior de las curvas y no puedan removerse, tales como muros, taludes de corte, edificios y barreras de defensa, un diseño puede requerir ajustes en la sección transversal normal del camino, o cambios en el alineamiento, para dar adecuada visibilidad. Con las muchas variables en los alineamientos, las secciones transversales, y el tipo y ubicación de las posibles obstrucciones, normalmente son necesarios estudios específicos para cada condición.



En el diseño de una curva horizontal, la línea de visión es una cuerda de la curva, y la DVD aplicable se mide a lo largo del eje del carril interior de la curva.

$$m1 = Rci \times \left(1 - \cos \left(28,65 \frac{DVD}{Rci} \right) \right)$$

Rci: radio del eje del carril interior (m)

DVD: distancia visual de detención (m)

m1: ordenada media desde el obstáculo al eje del carril interior (m)

En la Figura 3.29 se expresa m1 en función del radio del carril interior y de la velocidad directriz.

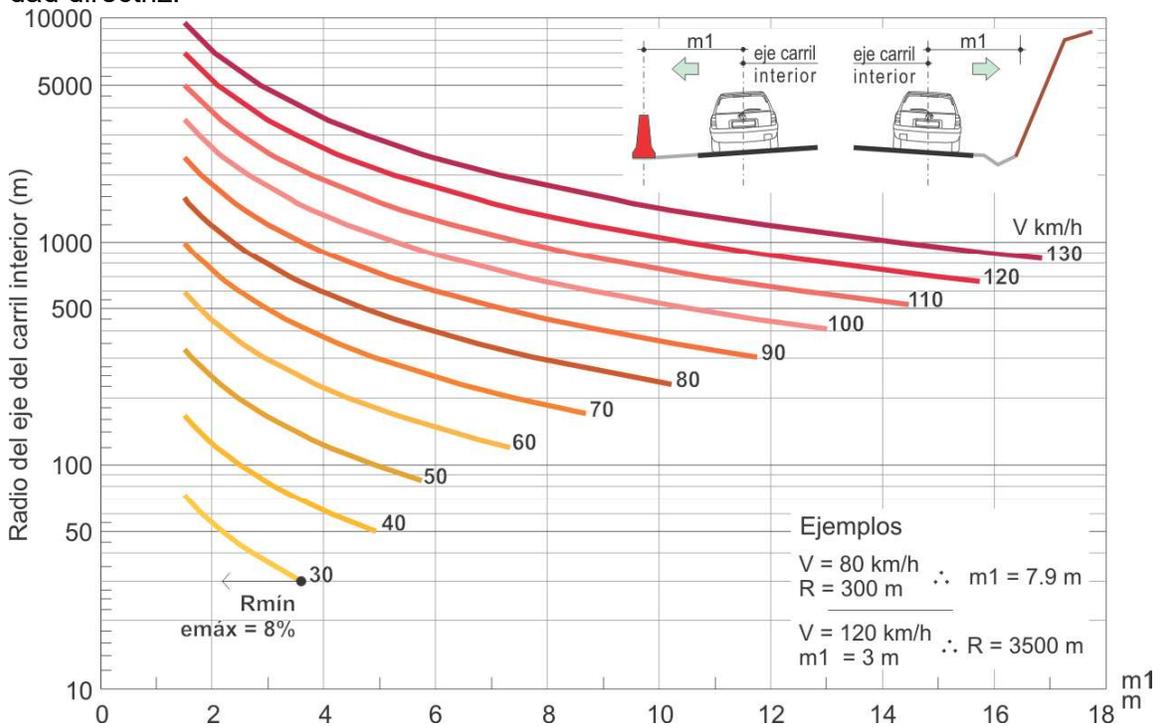


Figura 3.29 Ordenada media m1 necesaria para proveer DVD en curva horizontal



3.5.8 Recomendaciones generales

- En general, desde el punto de vista estético y económico es preferible un trazado que a grandes rasgos se adapte a los contornos naturales del terreno, que otro con largas rectas que lo corten de cualquier modo.
- El alineamiento debe ser tan directo como sea posible y coherente con la topografía. Entre los puntos de control por los que debe pasar el trazado, el alineamiento debe ser el más directo posible, según las condiciones topográficas del terreno.
- Si bien las cualidades estéticas del alineamiento curvilíneo son importantes, los requisitos de la DVA requieren largas tangentes para dar oportunidades de adelantamiento.
- Reservar en lo posible el uso de radios mínimos para lugares críticos al establecer un alineamiento sobre la base de la velocidad directriz. El empleo de un alineamiento sinuoso, compuesto de curvas cortas debe evitarse, ya que tiende a causar la operación irregular y accidentes.
- El alineamiento debe ser coherente. Las curvas cerradas no deben introducirse en los extremos de largas rectas, o donde se prevén altas velocidades de aproximación para evitar traicionar las expectativas de los conductores.
- El uso de los valores mínimos absolutos de los diversos elementos del diseño geométrico, tales como radios de curva, distancias visuales, debe restringirse a los casos de estricta necesidad, debiendo en lo posible adoptarse valores deseables mayores a los mínimos. Esto es aplicable especialmente a las curvas horizontales de escasa DVD.
- Las curvaturas de curvas entrelazadas o contiguas no deben ser muy diferentes entre sí.
- Desde el punto de vista estético, es preferible no usar curvas de transición total para evitar el aspecto de quiebre que presentarían sus bordes en el punto de unión de las transiciones espirales, sobre todo cuando tienen longitudes mínimas.
- Entre curvas circulares contiguas de distinto sentido con transiciones espirales no es necesario dejar una recta entre fin de una transición y comienzo de otra. Desde el punto de vista dinámico, el conductor pasaría de una transición a otra sin cambiar el sentido de rotación del volante. Desde el punto de vista estético tampoco es objetable ya que los bordes de ambas transiciones no presentarían quiebres en el punto unión.
- Desde el punto de vista estético debería evitarse cortar un bosque con un trazado recto. En cambio ofrece un aspecto agradable y natural entrar con una suave curva horizontal.
- La traza del proyecto debe permitir preservar los valores de la comunidad y el desarrollo económico local.

3.5.9 Tablas de curvas horizontales

Las Tablas 3.11 siguientes tienen expresados los radios mínimos deseables ($R_{mín-Des}$), radios mínimos absolutos ($R_{mínAbs}$), peraltes (e), longitudes de transiciones mínimas ($L_{mín}$) y sobrecanchos (S), para velocidades directrices (V) desde 25 km/h hasta 140 km/h, con peraltes máximos ($e_{máx}$) del 6, 8, y 10%.



ELEMENTOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CURVAS HORIZONTALES PARA CAMINOS RURALES
EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DIRECTRIZ PARA PERALTES MÁXIMOS DEL 6%

R m	V = 90 km/h VMM = 77 km/h			V = 100 km/h VMM = 84 km/h			V = 110 km/h VMM = 91 km/h			V = 120 km/h VMM = 98 km/h			V = 130 km/h VMM = 105 km/h			V = 140 km/h VMM = 112 km/h			R m	
	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m		
250																				250
300																				300
400																				400
500																				500
600																				600
700																				700
800																				800
900																				900
1000																				1000
1200																				1200
1300																				1300
1400																				1400
1500																				1500
2000																				2000
2500																				2500
3000																				3000
3500																				3500
4000																				4000
4500																				4500
5000																				5000
7000																				7000
9000																				9000
11000																				11000

Nota 1: V = Velocidad directriz, en km/h - R = Radio, en m - e = Peralte, en % - Lemin = Longitud mínima de transición para 2 carriles, en m
 Nota 2: S = Sobrealto para 2 carriles, en m (calculado con ac = 6,7 m según práctica recomendada por la DNV)
 Nota 3: BN: Sección de bombeo normal (2%) - BR: Sección de bombeo removido, peraltado a la pendiente transversal normal (2%)
 Nota 4: La longitud máxima de transición no será superior a 1,25 Lemin
 Nota 5: Los valores de S se obtuvieron para un vehículo tipo semirremolque (H=1,35 m; l2=4,3 m; l3=9,35 m)
 Nota 6: Los valores de S deben multiplicarse por 1,5 para calzadas de 3 carriles



ELEMENTOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CURVAS HORIZONTALES PARA CAMINOS RURALES
EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DIRECTRIZ PARA PERALTES MÁXIMOS DEL 8%

R m	V = 25 km/h VMM = 25 km/h			V = 30 km/h VMM = 30 km/h			V = 40 km/h VMM = 40 km/h			V = 50 km/h VMM = 47 km/h			V = 60 km/h VMM = 55 km/h			V = 70 km/h VMM = 63 km/h			V = 80 km/h VMM = 70 km/h			R m
	e %	Lemin m	S m																			
20	8	35	6,6																			20
30	8	35	4,3	8	35	4,4																30
40	8	35	3,3	8	35	3,3																40
50	8	35	2,6	8	35	2,7	8	45	2,8													50
60	8	35	2,2	8	35	2,3	8	40	2,4													60
70	7	30	1,9	8	35	2	8	40	2,1													70
80	6,2	30	1,7	8	35	1,7	8	40	1,9													80
90	5,5	30	1,5	7,9	35	1,6	8	40	1,7	8	50	1,8										90
100	4,9	30	1,4	7,1	30	1,4	8	40	1,5	8	45	1,6										100
110	4,5	30	1,3	6,4	30	1,3	8	40	1,4	8	40	1,5										110
120	4,1	30	1,2	5,9	30	1,2	8	40	1,3	8	40	1,4										120
130	3,8	30	1,1	5,5	30	1,1	8	40	1,2	8	40	1,3										130
140	3,5	30	1	5,1	30	1,1	8	40	1,1	8	40	1,2										140
150	3,3	30	1	4,7	30	1	8	40	1,1	8	40	1,2										150
175	2,8	30	0,8	4	30	0,9	7,2	35	0,9	8	40	1										175
200	2,5	30	0,7	3,5	30	0,8	6,3	30	0,8	8	40	0,9										200
250	BR	30	0,6	2,8	30	0,6	5	30	0,7	7	35	0,8										250
300	BR	30	0,5	2,4	30	0,5	4,2	30	0,6	5,8	30	0,7										300
400	BN	30	0,4	BR	30	0,4	3,1	30	0,5	4,4	30	0,5										400
500	BN	BN		BN	BN	0,4	2,5	30	0,4	3,5	30	0,4										500
600	BN	BN		BN	BN		2,1	30	0,4	2,9	30	0,4										600
700	BN	BN		BN	BN		BR	30		2,5	30											700
800	BN	BN		BN	BN		BR	30		2,2	30											800
900	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											900
1000	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											1000
1200	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											1200
1300	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											1300
1400	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											1400
1500	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											1500
2000	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											2000
2500	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											2500
3000	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											3000
3500	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											3500
4000	BN	BN		BN	BN		BR	30		BR	30											4000

RminAbs = 230
RminDes = 480

RminAbs = 170
RminDes = 385

RminAbs = 120
RminDes = 300

RminAbs = 85
RminDes = 220

RminAbs = 50
RminDes = 155

RminAbs = 30
RminDes = 90

RminAbs = 20
RminDes = 60



ELEMENTOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CURVAS HORIZONTALES PARA CAMINOS RURALES
EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DIRECTRIZ PARA PERALTES MÁXIMOS DEL 8%

R	V = 90 km/h VMM = 77 km/h		V = 100 km/h VMM = 84 km/h		V = 110 km/h VMM = 91 km/h		V = 120 km/h VMM = 98 km/h		V = 130 km/h VMM = 105 km/h		V = 140 km/h VMM = 112 km/h		R
m	e	S	e	S	e	S	e	S	e	S	e	S	m
	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	m
	RmínAbs = 305 RmínDes = 585		RmínAbs = 405 RmínDes = 700		RmínAbs = 520 RmínDes = 820		RmínAbs = 665 RmínDes = 950		RmínAbs = 845 RmínDes = 1085		RmínAbs = 1065 RmínDes = 1230		
250													250
300													300
400	8	65	8	70	8	80	8	90	8	85	8	80	400
500	8	55	8	60	8	70	8	75	8	80	8	80	500
600	7,8	55	8	60	8	70	8	75	8	80	8	80	600
700	6,7	50	8	60	8	65	8	70	8	75	8	80	700
800	5,9	50	7	55	8	65	8	70	8	75	8	80	800
900	5,2	50	6,2	55	7,3	60	7,6	60	7,6	60	8	80	900
1000	4,7	50	5,6	55	6,6	60	6,6	60	6,6	60	8	80	1000
1200	3,9	50	4,7	55	5,5	60	6,3	65	6,3	65	7,2	70	1200
1300	3,6	50	4,3	55	5,1	60	5,9	65	5,9	65	6,7	70	1300
1400	3,4	50	4	55	4,7	60	5,4	65	5,4	65	6,2	70	1400
1500	3,1	50	3,7	55	4,4	60	5,1	65	5,1	65	5,8	70	1500
2000	2,3	50	2,8	55	3,3	60	3,8	65	3,8	70	4,3	70	2000
2500	BR	50	2,2	55	2,6	60	3	65	3,5	70	3,5	80	2500
3000	BR	50	BR	55	2,2	60	2,5	65	2,9	70	3,3	80	3000
3500	BR	50	BR	55	BR	60	2,2	65	2,5	70	2,8	80	3500
4000	BR	50	BR	55	BR	60	BR	65	2,2	70	2,5	80	4000
4500	BN	50	BR	55	BR	60	BR	65	BR	70	2,2	80	4500
5000	BN	50	BR	55	BR	60	BR	65	BR	70	BR	80	5000
7000	BN	50	BR	55	BR	60	BR	65	BR	70	BR	80	7000
9000	BN	50	BR	55	BR	60	BR	65	BR	70	BR	80	9000
11000	BN	50	BR	55	BR	60	BR	65	BR	70	BR	80	11000

- Nota 1: V = Velocidad directriz, en km/h - R = Radio, en m - e = Peralte, en % - Lemín = Longitud mínima de transición para 2 carriles, en m
- Nota 2: S = Sobreancho para 2 carriles, en m (calculado con ac = 6,7 m según práctica recomendada por la DNV)
- Nota 3: BN: Sección de bombeo normal (2%) - BR: Sección de bombeo removido, perallado a la pendiente transversal normal (2%)
- Nota 4: La longitud máxima de transición no será superior a 1,25 Lemín
- Nota 5: Los valores de S se obtuvieron para un vehículo tipo semirremolque (l1=1,35 m; l2=4,3 m; l3=9,35 m)
- Nota 6: Los valores de S deben multiplicarse por 1,5 para calzadas de 3 carriles



**ELEMENTOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CURVAS HORIZONTALES PARA CAMINOS RURALES
EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DIRECTRIZ PARA PERALTES MÁXIMOS DEL 10%**

R m	V = 90 km/h VMM = 77 km/h			V = 100 km/h VMM = 84 km/h			V = 110 km/h VMM = 91 km/h			V = 120 km/h VMM = 98 km/h			V = 130 km/h VMM = 105 km/h			V = 140 km/h VMM = 112 km/h			R m	
	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m	e %	Lemin m	S m		
250																				250
300	10	85	0,9																	300
400	10	70	0,7	10	90	0,8														400
500	9,4	65	0,6	10	75	0,7	10	95	0,7											500
600	7,8	55	0,6	9,3	70	0,6	10	80	0,6	10	105	0,7								600
700	6,7	50	0,5	8	60	0,5	9,4	75	0,6	10	90	0,6	10	100	0,6					700
800	5,9	50	0,5	7	55	0,5	8,2	65	0,5	9,5	80	0,6	10	85	0,6					800
900	5,2	50	0,4	6,2	55	0,5	7,3	60	0,5	8,5	70	0,5	9,7	85	0,6					900
1000	4,7	50	0,4	5,6	55	0,4	6,6	60	0,5	7,6	65	0,5	8,7	80	0,5	9,8	100	0,6		1000
1200	3,9	50	0,4	4,7	55	0,4	5,5	60	0,4	6,3	65	0,4	7,2	70	0,5	8,2	80	0,5		1200
1300	3,6	50		4,3	55	0,4	5,1	60	0,4	5,9	65	0,4	6,7	70	0,4	7,6	80	0,5		1300
1400	3,4	50		4	55	0,4	4,7	60	0,4	5,4	65	0,4	6,2	70	0,4	7	80	0,5		1400
1500	3,1	50		3,7	55	0,4	4,4	60	0,4	5,1	65	0,4	5,8	70	0,4	6,6	80	0,4		1500
2000	2,3	50		2,8	55		3,3	60		3,8	65		4,3	70		4,9	80			2000
2500	BR	50		2,2	55		2,6	60		3	65		3,5	70		3,9	80			2500
3000	BR	50		BR	55		2,2	60		2,5	65		2,9	70		3,3	80			3000
3500	BR	50		BR	55		BR	60		2,2	65		2,5	70		2,8	80			3500
4000	BR	50		BR	55		BR	60		BR	65		2,2	70		2,5	80			4000
4500	BN			BR	55		BR	60		BR	65		BR	70		2,2	80			4500
5000	BN			BR	55		BR	60		BR	65		BR	70		BR	80			5000
7000	BN			BN	BN		BN	BN		BN	BN		BN	BN		BR	80			7000
9000	BN			BN	BN		BN	BN		BN	BN		BN	BN		BR	80			9000
11000	BN			BN	BN		BN	BN		BN	BN		BN	BN		BN	BN			11000

Nota 1: V = Velocidad directriz, en km/h - R = Radio, en m - e = Peralte, en % - Lemin = Longitud mínima de transición para 2 carriles, en m

Nota 2: S = Sobreebanco para 2 carriles, en m (calculado con ac = 6,7 m según práctica recomendada por la DNV)

Nota 3: BN: Sección de bombeo normal (2%) - BR: Sección de bombeo removido, peraltado a la pendiente transversal normal (2%)

Nota 4: La longitud máxima de transición no será superior a 1,25 Lemin

Nota 5: Los valores de S se obtuvieron para un vehículo tipo semirremolque (l1=1,35 m; l2=4,3 m; l3=9,35 m)

Nota 6: Los valores de S deben multiplicarse por 1,5 para calzadas de 3 carriles