

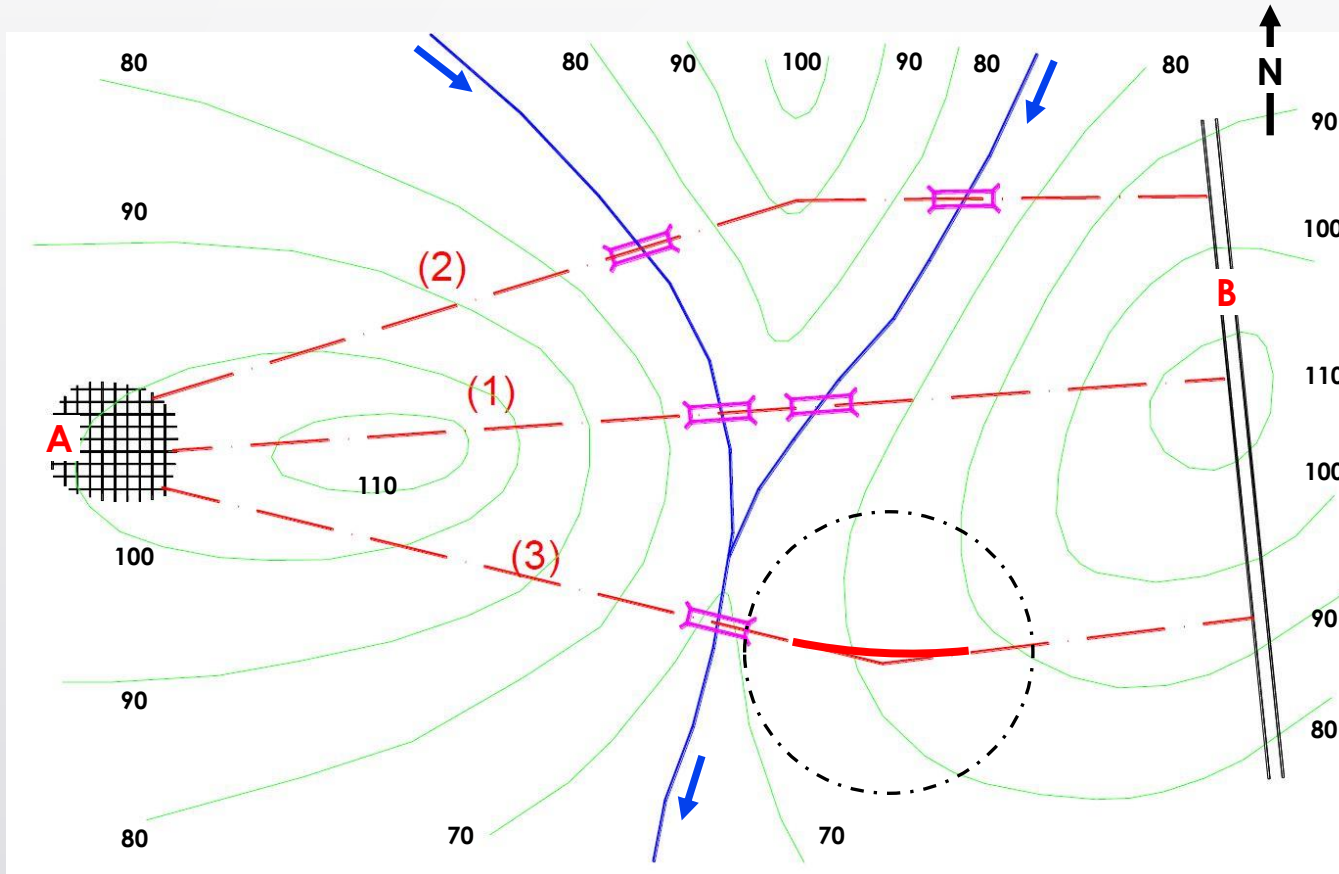


Caminos y Calles 1

PLANIMETRIA



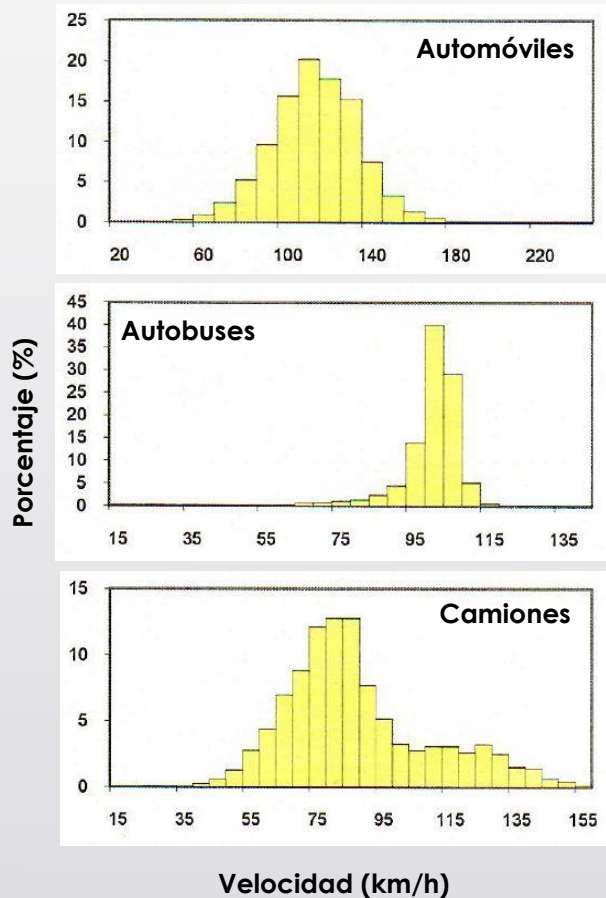
Primera aproximación



El trazado de un camino difícilmente sea una simple línea recta, sino una **sucesión de alineaciones rectas y curvas de acordamiento** entre ellas.

Esto responde a un principio básico del diseño de caminos interurbanos: el **diseño para velocidad uniforme y constante**.

Velocidad de Circulación Libre



Distintos sistemas se utilizan para medir la velocidad del tránsito en condición de **Flujo Libre** (sin restricciones).

Y como es de esperar se observan distintas realidades para automóviles, autobuses y vehículos de carga.

Veamos los registros en una ruta primaria de Uruguay (Ruta 3 - 2 carriles), expresados en estos gráficos.

Automóviles: velocidad muy dispersa; 5% circula a más de 140 km/h; velocidad media de 107 km/h.

Autobuses: velocidad poco dispersa; velocidad media de 97 km/h (apenas superior a la legal - 90 km/h)

Camiones: dos grupos marcados; vacíos y cargados



Velocidad Legal

Ley Nac. de Seguridad Vial y Tránsito (**2007**):

Art. 15 - De las Velocidades

*El conductor de un vehículo no podrá circular a una **velocidad superior a la permitida**. La velocidad de un vehículo deberá ser compatible con las circunstancias, en especial con las características del terreno, el estado de la vía y el vehículo, la carga a transportar, las condiciones meteorológicas y el volumen de tránsito.*

Artículo 11 - Disposiciones Generales

*Cada **Gobierno Departamental** adoptará las medidas adecuadas para asegurar el **cumplimiento en su territorio** de las disposiciones de la presente ley.*



Velocidad Legal

Reglamento Nac. de Circulación Vial (**2009**): Cap. XIII- De las Velocidades

En **carreteras y caminos, fuera de zonas urbanas y suburbanas**, la velocidad máxima, en condiciones óptimas de seguridad, será de:

- a) 90 km/h para vehículos livianos sin remolque y ómnibus específicamente habilitados por la Dirección Nacional de Transporte;
- b) 80 km/h en los restantes vehículos.

Esas velocidades se reducirán a 60 km/h:

- a) en las proximidades de señales de advertencia de peligro, sin indicación de velocidad máxima;
- b) cuando se circule con las luces bajas, de alcance medio, sin incluir cambio de luces.

....."letra muerta".....

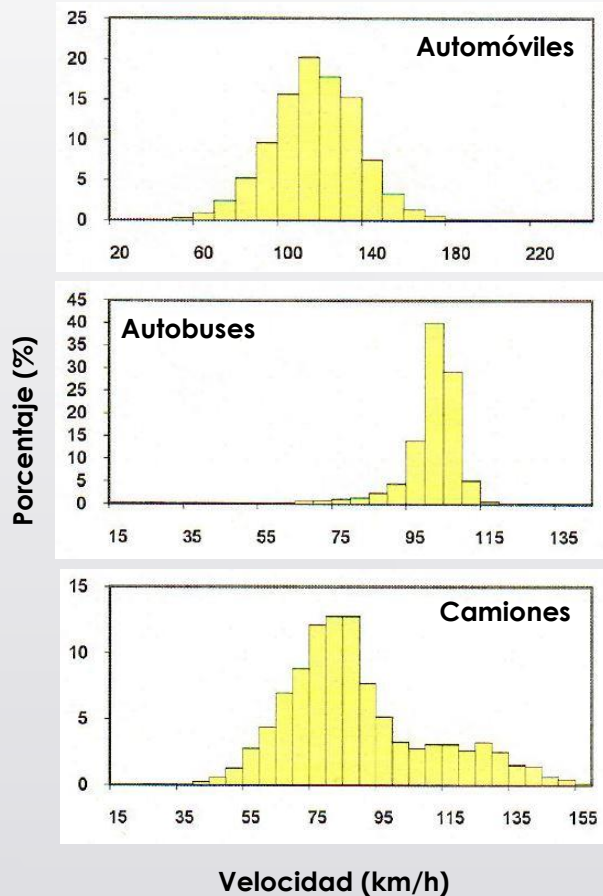


Velocidad Legal

Realidad

- 1) En vías de **jurisdicción municipal**, la velocidad máxima legal es la que cada Intendencia Municipal define en cada vía o camino. En ausencia de señalización específica, **vale lo que indica el Digesto Municipal** (en Montevideo 45 km/h).
- 2) En vías de **jurisdicción nacional**, la velocidad máxima legal es la que define la Dirección Nacional de Vialidad en cada camino o carretera. En ausencia de señalización específica, **vale lo que indica el Reglamento Nacional de Circulación Vial** (90 km/h para automóviles).

Velocidad de Diseño

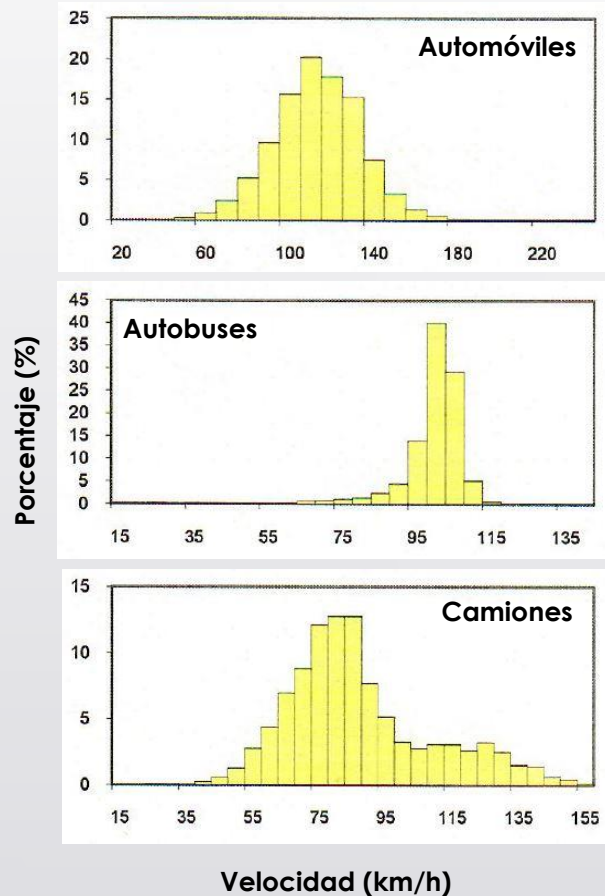


La **Velocidad de Diseño** (V o V_d) es el principal **parámetro de diseño** de un camino o carretera interurbano. A partir del mismo se imponen o deducen numerosas orientaciones o restricciones del diseño geométrico, la señalización, etc.

Para definir la Velocidad de Diseño se contempla la funcionalidad de la vía, el tipo y composición del tránsito, número de carriles, tipo de pavimento, posible evolución futura de la vía, etc.

Agencias viales bien organizadas tienen políticas definidas sobre la velocidad de diseño, que entonces se convierten en dato de base para el proyectista.

Velocidad de Diseño



Así, en distintos tramos de un camino podremos tener tres realidades bien distintas respecto la velocidad:

- **Velocidad de Circulación Libre:** velocidad registrada en el tramo, con Flujo Libre. Se analiza considerando valores medios y extremos (usualmente percentil 85).
- **Velocidad Legal:** velocidades máximas establecidas por la normativa y/o la señalización.
- **Velocidad de Diseño** (V o V_d): parámetro adoptado para el diseño, de modo tal que el proyecto resultante brinde, en condiciones de **flujo libre**, una circulación **confortable y segura** a dicha velocidad, para **todos los tipos de vehículos y usuarios** del camino.



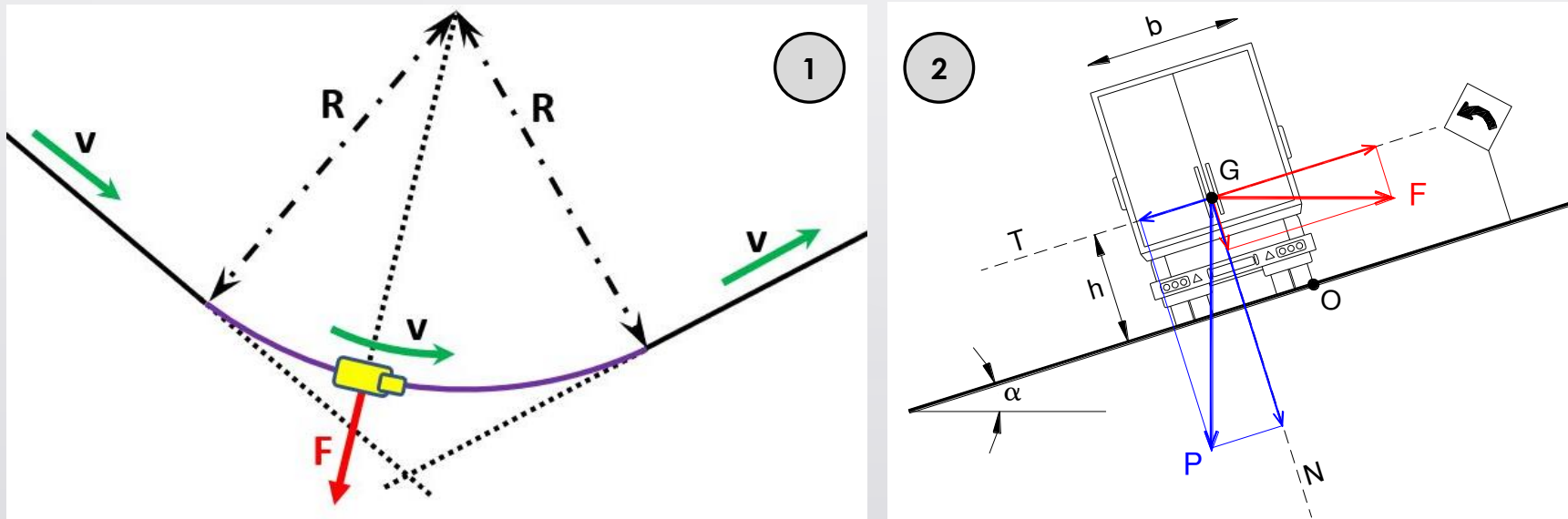
Alineaciones rectas

El primer elemento del diseño geométrico de un camino lo constituyen las **Alineaciones Rectas**, uniendo dos puntos en la menor distancia y donde se pueden desarrollar mayores velocidades. Sin embargo:

- Adecuándose a las características topográficas del terreno, los tramos rectos **no deben ser excesivamente largos**, ya que tener puntos de referencia fijos en la dirección de circulación provoca **hastío al conductor**, así como crea problemas de encandilamiento nocturno.
- Generalmente se recomienda que yendo a la velocidad de diseño la circulación en recta no se extienda más de 2 minutos. Si $V_d = 100$ km/k la **longitud máxima deseable** en recta sería del orden de **3,5 km**.
- En cualquier caso se debería respetar una **longitud máxima absoluta de 8 a 10 km** para trazados en recta.

Curvas Horizontales - Dinámica del vehículo

El segundo elemento del diseño son los Acordamientos o **Curvas Horizontales**, que geométricamente son arcos de circunferencia tangentes a las alineaciones rectas de entrada y salida a la curva. La Fig. 1 representa en planta un vehículo dentro de una curva entre dos alineaciones rectas. La Fig. 2 representa una sección transversal al camino dentro de dicha de curva.



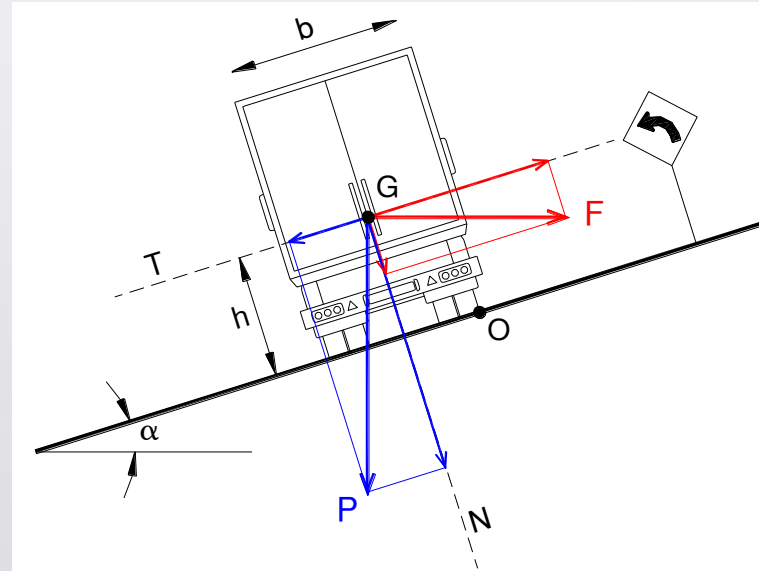
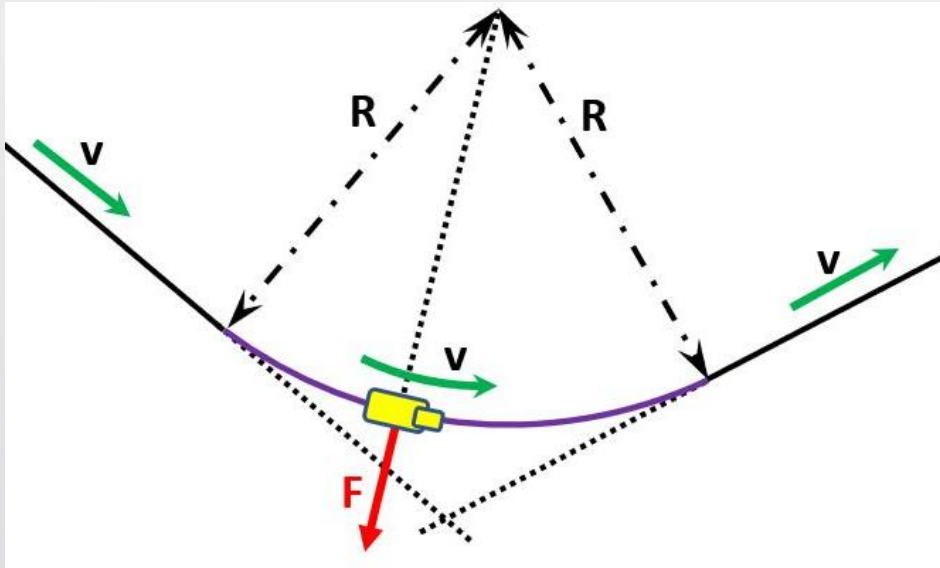
Curvas Horizontales - Dinámica del vehículo

Parámetros de curva en el **camino**:

- Circunferencia de radio **R**
- Inclinación **α** del pavimento hacia el lado interno de la curva

Parámetros del **vehículo**:

- Velocidad **v** (de diseño) y masa **m**
- Altura **h** del Centro de masa **G**
- Distancia **b** entre puntos de apoyo



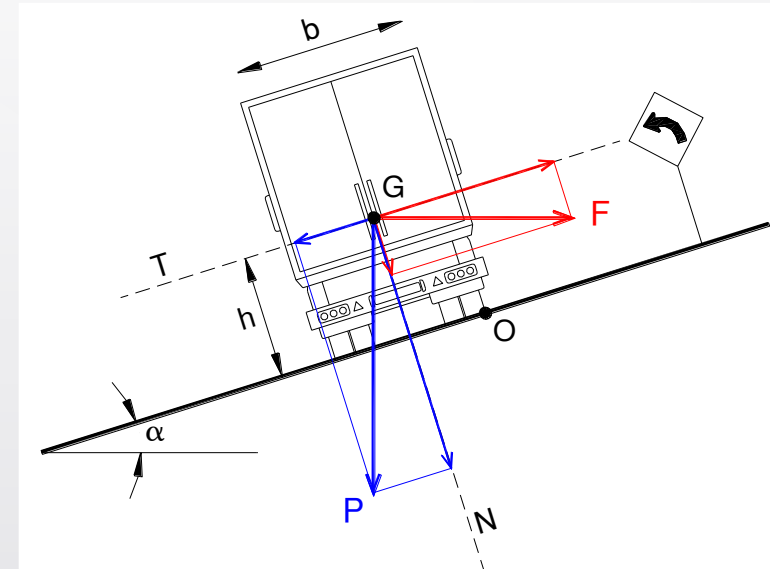
Interacción
camino-vehículo:

- Coeficiente de fricción **f** de los neumáticos con el pavimento

Curvas Horizontales - No deslizamiento

Fuerza deslizante:

- Hacia afuera de la curva, debido a la acción de la **Fuerza Centrífuga**
- Hacia adentro de la curva, debido a la acción del **Peso** combinado con la inclinación del pavimento (**peralte**)
- **Resultante**: suma de componentes paralelas al pavimento



$$P = mg$$

$$F = \frac{mv^2}{R}$$

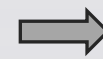
$$p = \operatorname{tg} \alpha$$



Fuerza deslizante Resultante

$$T = F \cos \alpha - P \operatorname{sen} \alpha \quad \text{ó}$$

$$T = \frac{mv^2}{R} \cos \alpha - mg \operatorname{sen} \alpha$$



Dirección de la Resultante

Alta velocidad = hacia afuera

Baja velocidad = hacia adentro



Curvas Horizontales - No deslizamiento

Fuerza antideslizante:

- La fricción neumático-pavimento se opone al deslizamiento en ambas direcciones (hacia afuera o adentro)
- **Resultante normal** al pavimento combinada con el **coeficiente de fricción f**

$$P = mg$$

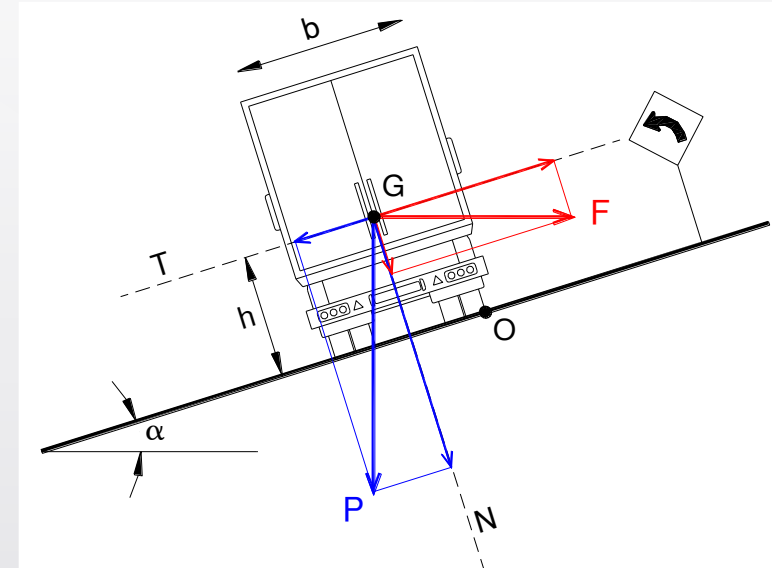
$$F = \frac{mv^2}{R}$$

$$p = \operatorname{tg} \alpha$$

Fuerza antideslizante

$$fN = f (F \operatorname{sen} \alpha + P \operatorname{cos} \alpha) \quad \text{ó}$$

$$fN = f \left[\frac{mv^2}{R} \operatorname{sen} \alpha + mg \operatorname{cos} \alpha \right]$$



Curvas Horizontales - No deslizamiento

Condición de no deslizamiento

$F_{\text{deslizamiento}} \leq F_{\text{no deslizamiento}}$

es decir

$$T \leq fN$$

sustituyendo resulta

$$\frac{mv^2 \cos \alpha - mg \sin \alpha}{R} \leq f \left(\frac{mv^2 \sin \alpha + mg \cos \alpha}{R} \right)$$

dividiendo entre $mg \cos \alpha$ resulta

$$\frac{v^2}{Rg} - \operatorname{tg} \alpha \leq f \frac{v^2}{Rg} \operatorname{tg} \alpha + f$$

sustituyendo $p = \operatorname{tg} \alpha$ (**peralte**) resulta

$$\frac{v^2}{Rg} (1 - p \cdot f) \leq p + f \quad \text{en la práctica } p \leq 0,08 \text{ y } f \leq 0,16 \Rightarrow p \cdot f \ll 1$$

y la ecuación se simplifica en $\frac{v^2}{Rg} \leq p + f$ o $\frac{v^2}{127R} \leq p + f$ con $[v] = \text{km/h}$; $[R] = \text{m}$

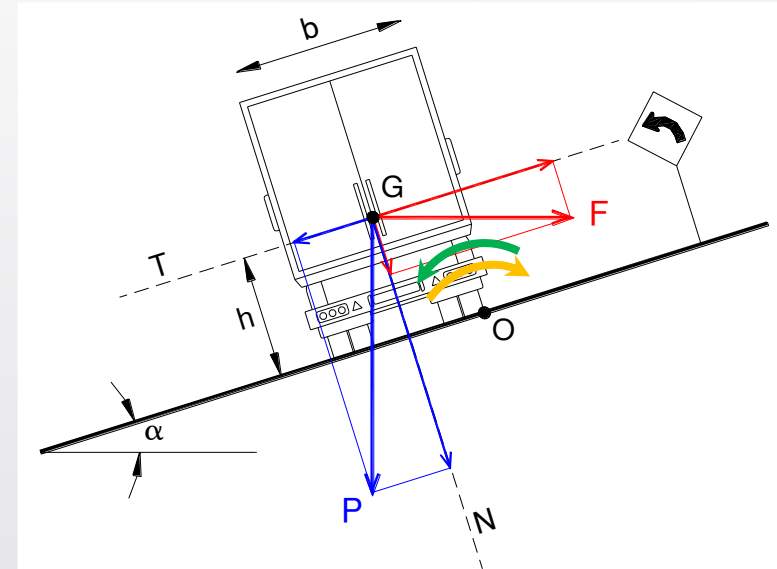
Curvas Horizontales - No vuelco

Momento de vuelco:

- Momento que genera la fuerza deslizante hacia afuera respecto el eje de giro en \odot (rueda exterior)

Momento estabilizador:

- Momento que generan las otras fuerzas respecto el eje de giro en \odot



$$P = mg$$

$$F = \frac{mv^2}{R} \quad \longrightarrow$$

$$p = tg\alpha$$

Momento de vuelco

$$M_v = F \cos \alpha \times h$$

Momento estabilizador

$$M_e = P \operatorname{sen} \alpha \times h + \left(F \operatorname{sen} \alpha + P \cos \alpha \right) \frac{b}{2}$$

Curvas Horizontales - No vuelco

Condición de no vuelco

$M_v \leq M_e$ es decir

$$F \cos \alpha \times h \leq P \operatorname{sen} \alpha \times h + \left(F \operatorname{sen} \alpha + P \cos \alpha \right) \frac{b}{2} \quad \text{sustituyendo resulta}$$

$$\frac{mv^2 \cos \alpha \times h}{R} \leq mg \operatorname{sen} \alpha \times h + \frac{mv^2 \operatorname{sen} \alpha \times \frac{b}{2}}{R} + mg \cos \alpha \times \frac{b}{2} \quad \text{dividiendo entre } m \cos \alpha$$

$$\frac{v^2}{R} \times h \leq g p h + \frac{v^2}{R} p \frac{b}{2} + g \frac{b}{2} \quad \text{ó} \quad \frac{v^2}{R} \left(h - \frac{pb}{2} \right) \leq g \left(p h + \frac{b}{2} \right) \quad \text{dividiendo entre } g \text{ y } h$$

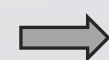
$$\frac{v^2}{Rg} \left(1 - \frac{pb}{2h} \right) \leq p + \frac{b}{2h} \quad \text{ó} \quad \boxed{\frac{v^2}{127R} \leq \frac{p+b/2h}{1-pb/2h}} \quad \text{con } [v] = \text{km/h} ; [b; h] = \text{m}$$

Con camiones normales
Y en la práctica

$$b \approx 2,40 \quad h \approx 1,50$$
$$p \leq 0,08$$



$$\frac{pb}{2h} \ll 1$$



$$\boxed{\frac{v^2}{127R} \leq p + \frac{b}{2h}}$$

Curvas Horizontales - Condición de diseño

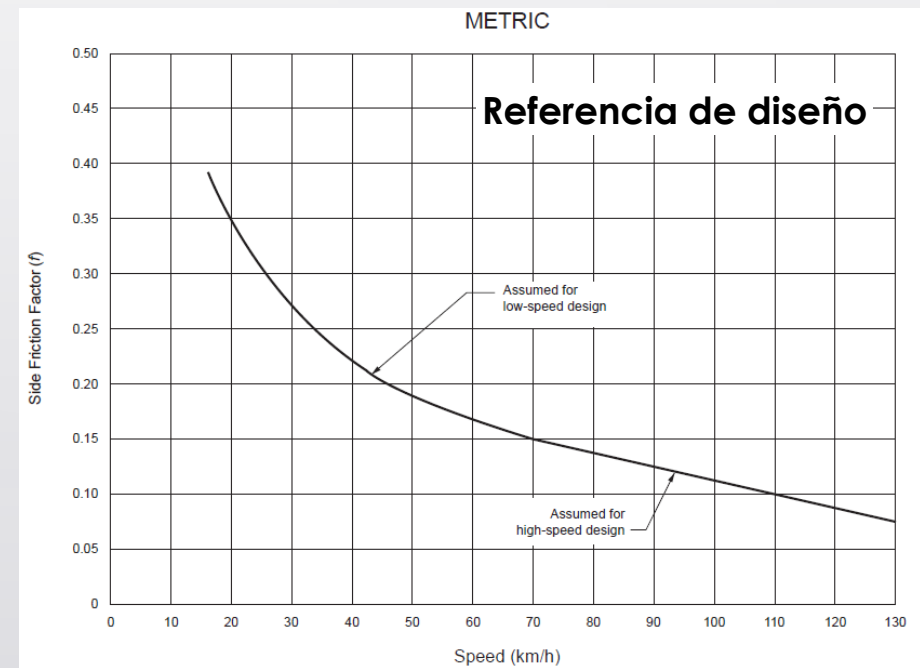
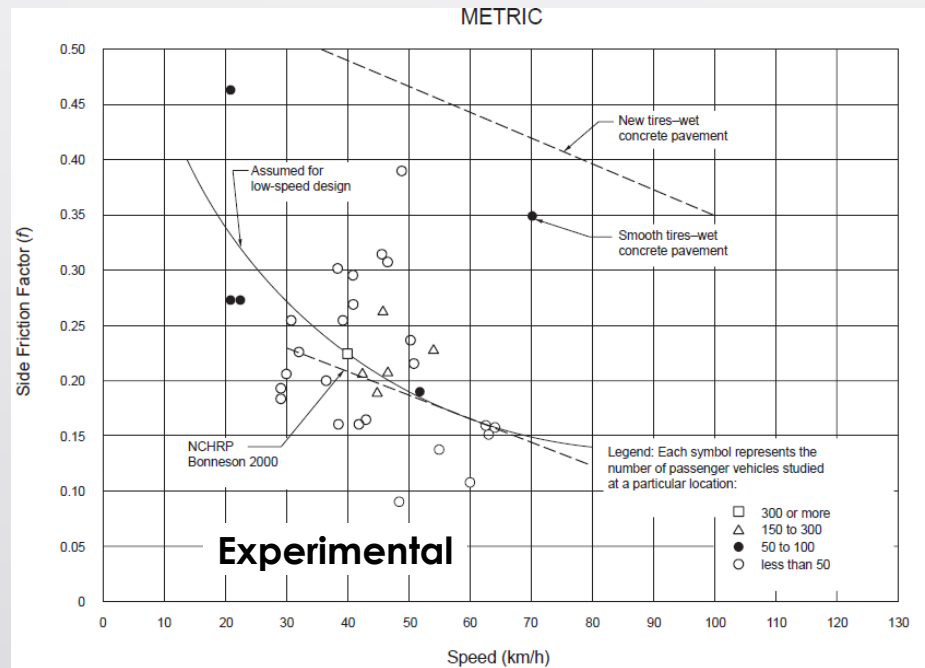
- Considerando la geometría normal de los vehículos estándar (b y h), la condición de *no deslizamiento* es más exigente que la de *no vuelco*.
- Queda entonces como **condición de diseño**

$$\frac{v^2}{127R} \leq p + f \quad \text{con } [v] = \text{km/h} ; [R] = \text{m}$$

- La Velocidad de Diseño **v** es un parámetro del proyecto. En condiciones ideales se utilizará el mismo valor para diseñar todas las curvas del proyecto. Solo si existe una restricción muy severa, se utilizará una velocidad menor (generando una *curva de velocidad restringida*).
- El peralte **p** sí suele ser diferente en las distintas curvas del proyecto, existiendo distintos criterios para su definición.

Curvas Horizontales - Fricción máxima

- La resistencia al deslizamiento depende del tipo y estado del pavimento, tipo y estado de los neumáticos, amortiguación y **velocidad de circulación**. Ensayos reales en distintas condiciones permiten establecer valores de referencia para el ***f máximo*** como parámetro del proyecto.



AASHTO GDHS 2011

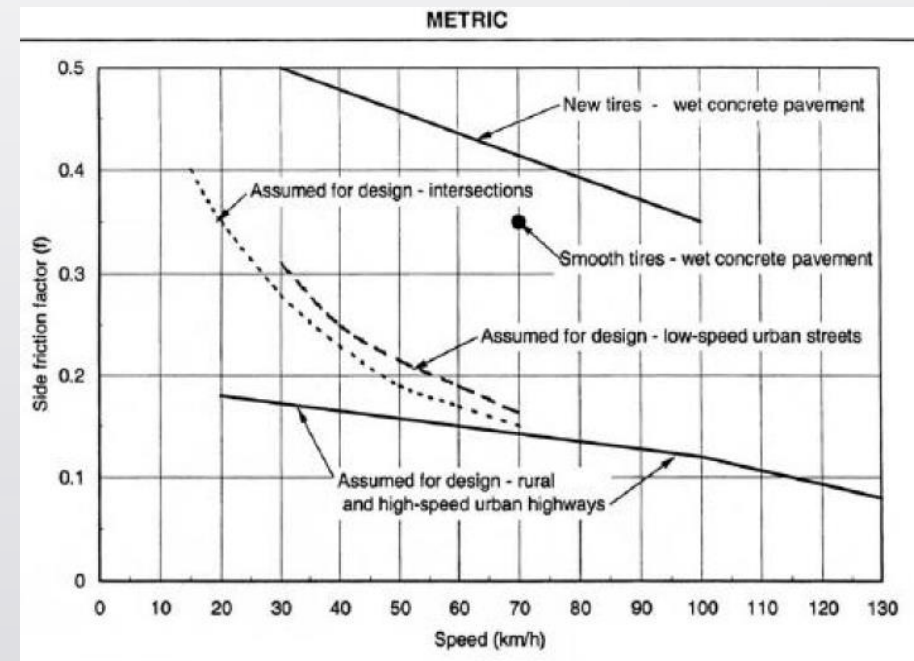
Curvas Horizontales - Fricción máxima

- Así, en función de la velocidad de diseño se adopta el coeficiente de fricción máximo para el proyecto, que para velocidades altas (mayores a 70 km/h) será:

$$f_{max} = 0,15 - \frac{5}{4.000} (v - 70) \quad \text{con } [v] = \text{km/h}$$

- Fórmula acorde a la versión 2011 de la guía de AASHTO.
- Recordar que las normas o guías de referencias suelen mantener los conceptos base pero actualizan los valores de referencia a medida que evoluciona la industria automotriz.

AASHTO GDHS 2001





Curvas Horizontales - Peralte máximo

- El **peralte máximo**, como parámetro del proyecto, se adopta para evitar que vehículos circulando a baja velocidad se vean forzados hacia el interior de la curva y/o evitar erosiones en el pavimento por escurrimiento transversal de lluvias a alta velocidad (en pavimentos sensibles a la erosión).
- Máximo deseable {
 - 6-8 % caminos o carreteras con pavimento firme
 - 5-6 % caminos o carreteras con pavimento erosionable
 - 4-6 % calles urbanas (limitado según las aceras)
- Máximo absoluto {
 - 10-12 % caminos de montaña - pavimento firme
(velocidad v muy baja – radio mínimo muy bajo)
 - 6-8 % cuando es posible la ocurrencia de nieve o hielo

Curvas Horizontales - Radio mínimo Absoluto

- Recordemos los parámetros de diseños propios del proyecto:
 - Velocidad de diseño v , definido por la agencia vial o el proyectista
 - Coeficiente de fricción máximo f_{max} , definido según la velocidad v
 - Peralte máximo p_{max} , definido según el tipo de camino y pavimento
- En función de estos se deduce el **Radio Mínimo Absoluto** del proyecto, es decir el mínimo R que podría utilizarse en cualquier curva horizontal del proyecto:

$$R_{min} = \frac{v^2}{127(p_{max} + f_{max})} \quad \text{con } [v]=km/h$$

- No olvidemos el objetivo de que el proyecto brinde, en condiciones de flujo libre, una **circulación confortable y segura a la velocidad de diseño, para todos los tipos de vehículos** y usuarios del camino. Por lo tanto, este radio R_{min} asegura este objetivo como un **mínimo absoluto**.

Curvas Horizontales - Radio mínimo Absoluto

- La siguiente tabla muestra la influencia la velocidad de diseño en los valores del R_{min} :

Con p_{max} **6%**

	Velocidad (km/h)							
	70	80	90	100	110	120	130	
f_{max}	0,150	0,138	0,125	0,113	0,100	0,088	0,075	
R_{min} (m)	184	255	345	455	595	766	986	Calculado
	190	260	350	460	600	770	990	Adoptado

Con p_{max} **8%**

	Velocidad (km/h)							
	70	80	90	100	110	120	130	
f_{max}	0,150	0,138	0,125	0,113	0,100	0,088	0,075	
R_{min} (m)	168	231	311	408	529	675	859	Calculado
	170	240	320	410	530	680	860	Adoptado

Curvas Horizontales - Radio vs Peralte

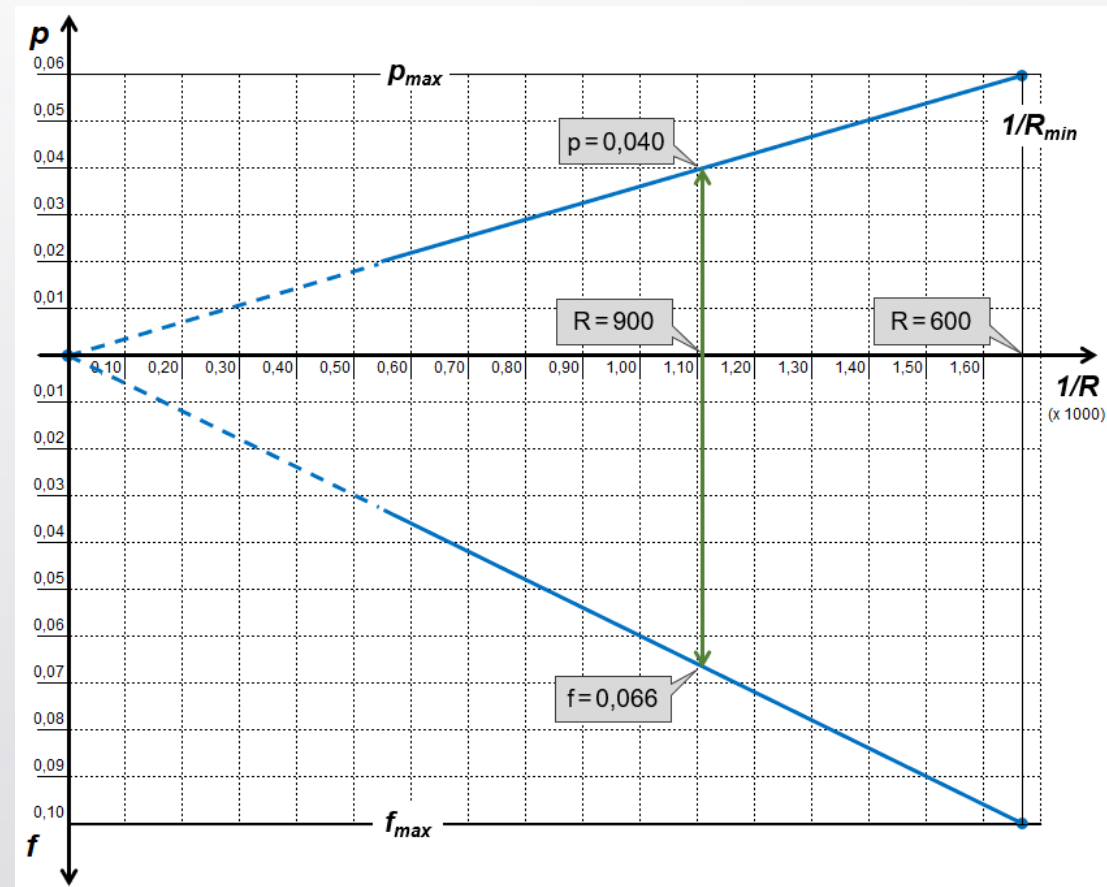
- Definido el R_{min} del proyecto, en cada curva el proyectista podrá adoptar un radio R diferente siempre que cumpla $R > R_{min}$.
- En consecuencia, cuando se adopte un radio R mayor al mínimo absoluto, habrá distintas maneras de satisfacer la triple restricción propia de la condición de diseño:

$$\frac{v^2}{127R} \leq p+f ; p \leq p_{max} ; f \leq f_{max}$$

- Existen distintas formas de cumplir estas restricciones, llamadas **criterios de peralte** o peraltado, ya que para una curva con determinado radio se adoptará un peralte diferente según el criterio que se trate .
- Existen 4 criterios siguiendo definiciones y objetivos bien diferenciados.

Curvas Horizontales - Criterio 1 de Peralte

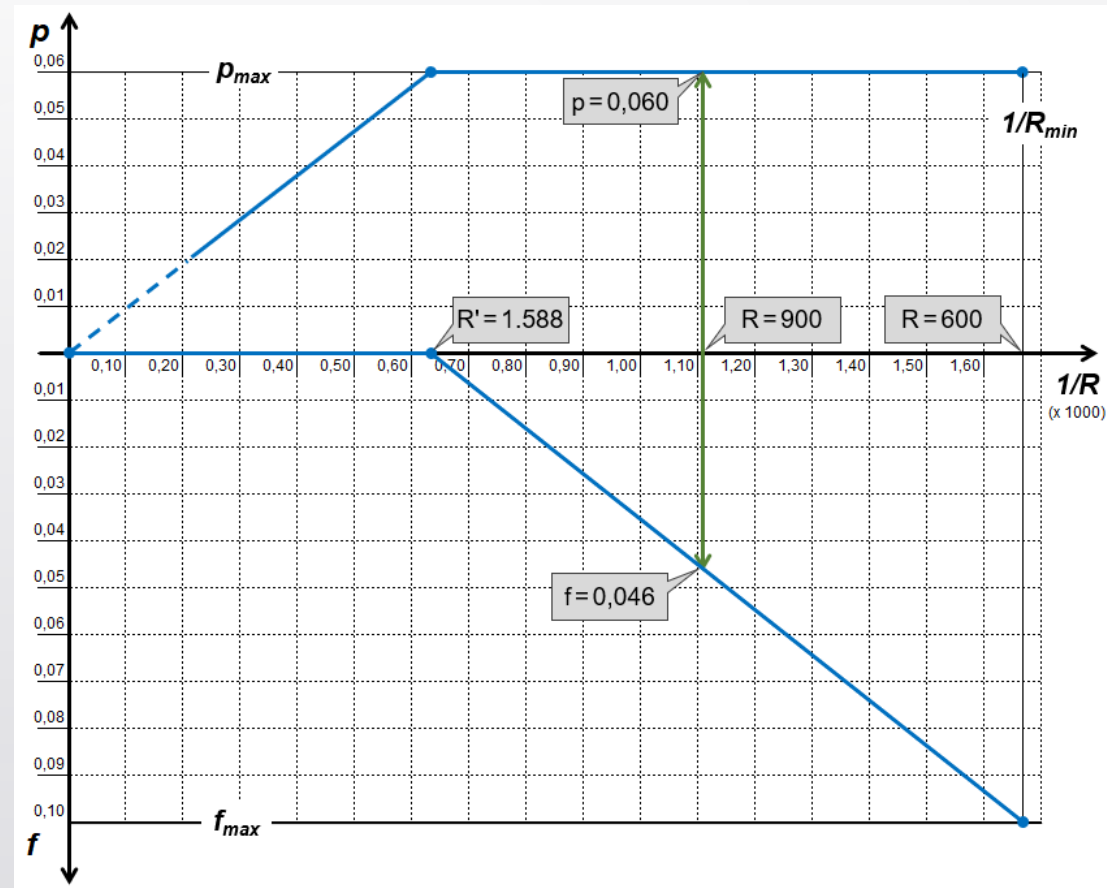
- El Criterio 1 supone reducir el peralte desde p_{max} hasta 0 , siguiendo una variación lineal con la curvatura ($1/R$).
- Como resultado, con cualquier $R > R_{min}$, a velocidad de diseño los vehículos “consumen” menos fricción para mantenerse en equilibrio no deslizante.
- El gráfico adjunto ejemplifica el criterio para el caso de:
 - $v = 110 \text{ km/h}$; $p_{max} = 0,06$
 - $R_{min} = 600 \text{ m}$; $f_{max} = 0,10$



Curvas Horizontales - Criterio 2 de Peralte

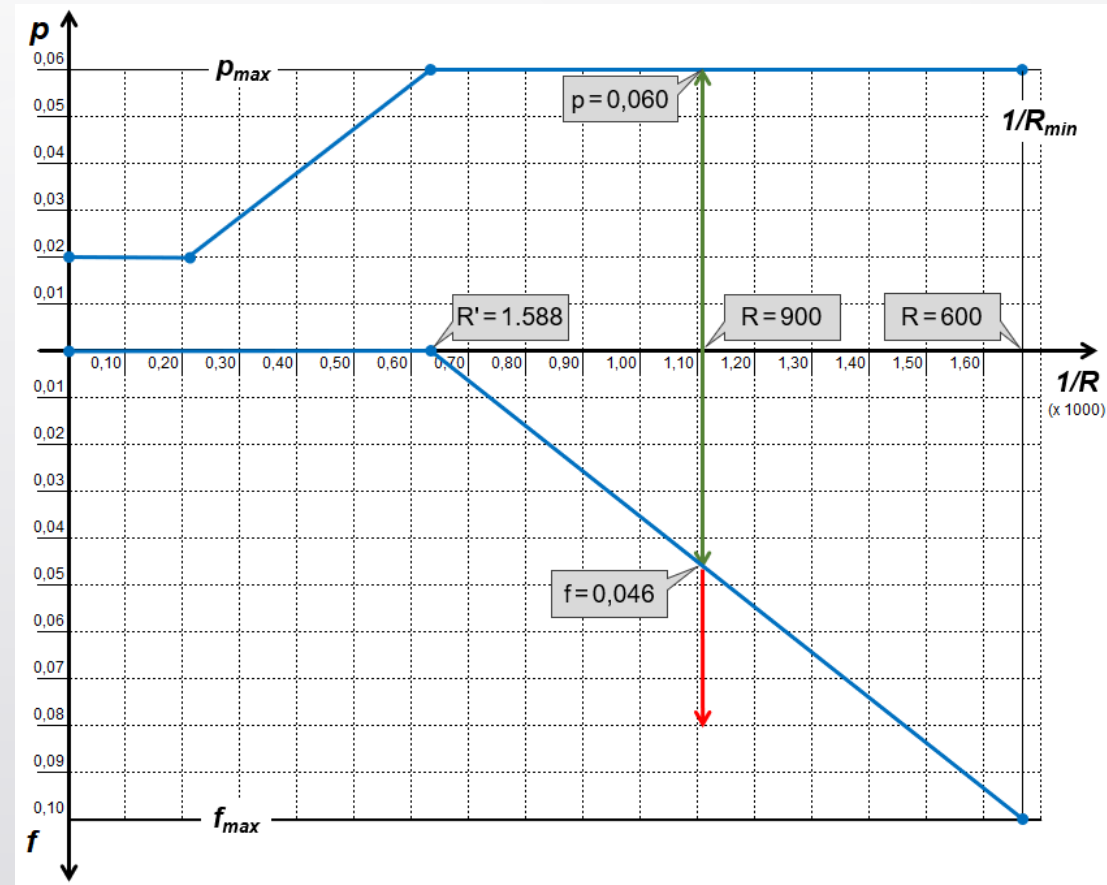
- El Criterio 2 implica usar máximo peralte en las curvas con radio bajo, comenzando a reducirlo cuando no se requiere fricción para evitar el deslizamiento.
- El gráfico adjunto ejemplifica el criterio para el caso de:
 - $v = 110 \text{ km/h}$; $p_{max} = 0,06$
 - $R_{min} = 600 \text{ m}$; $f_{max} = 0,10$
- El peralte comienza a reducirse cuando

$$R \geq R' = \frac{v^2}{127 p_{max}}$$



Curvas Horizontales - Criterio 2 de Peralte

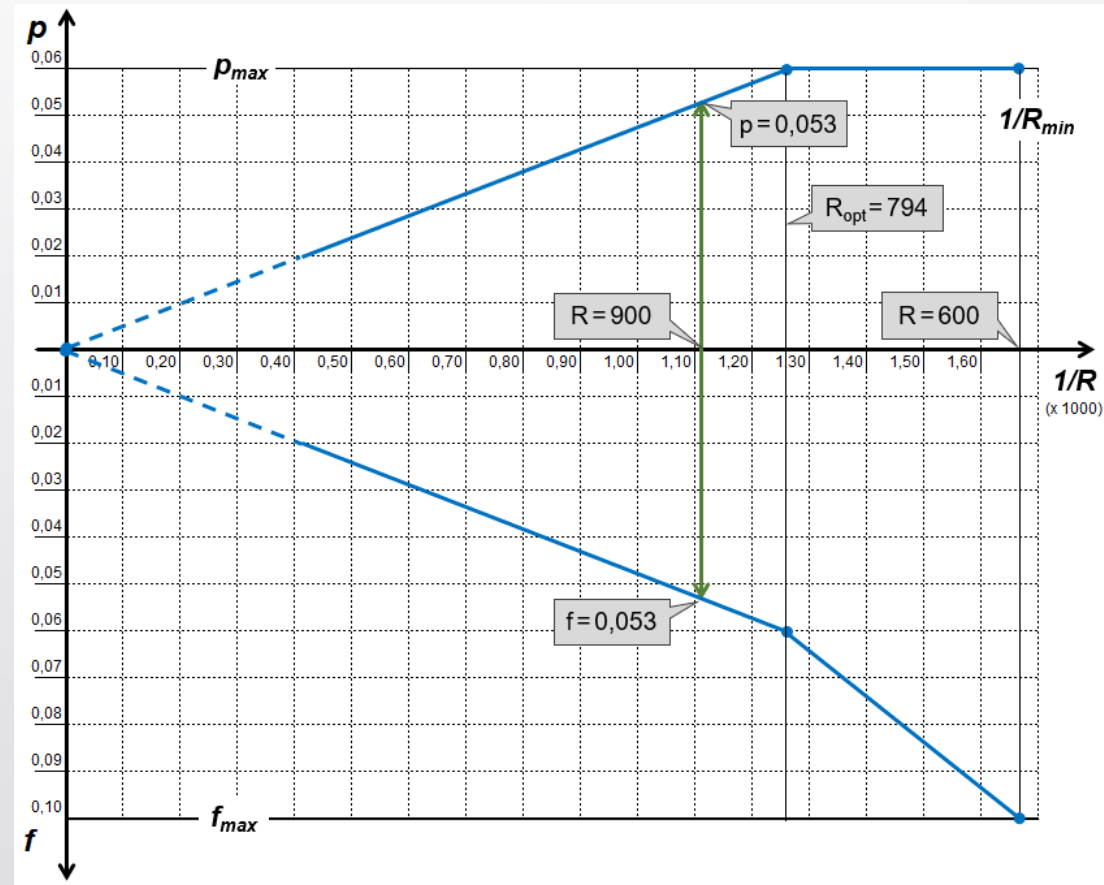
- Comentarios al Criterio 2
 - Este criterio favorece el confort de vehículos con velocidad de diseño, ya que utilizarán la fricción mínima imprescindible para mantenerse en equilibrio.
 - Vehículos que superen dicho límite alcanzarán una velocidad superior al utilizar su máxima fricción (126 km/h con $R = 900$)
 - No obstante, vehículos a menor velocidad (pesados) pueden incomodarse en curvas con radios bajos y peralte máximo.



Curvas Horizontales - Criterio 3 de Peralte

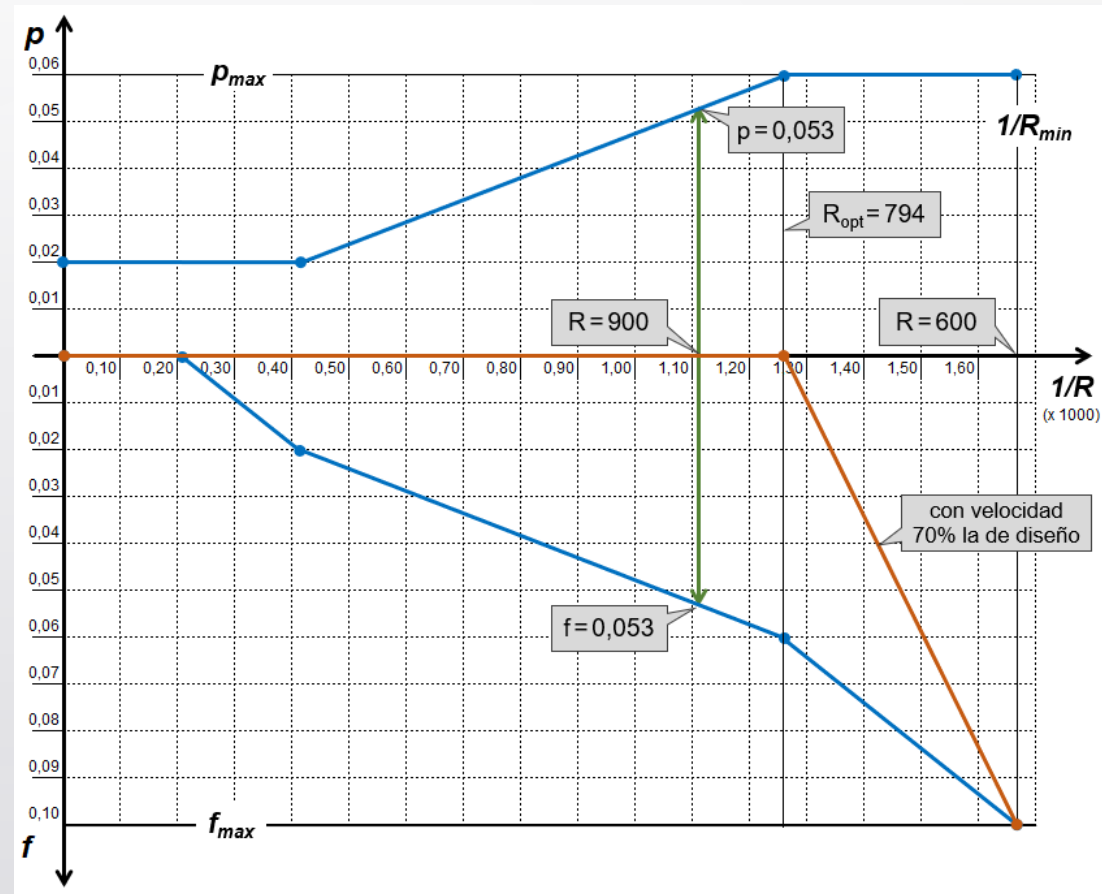
- El Criterio 3 implica atender el confort de los vehículos pero con velocidad promedio v_p , suponiendo que dicho promedio es un 70% de la velocidad de diseño.
- El gráfico adjunto ejemplifica el criterio para el caso de:
 - $v = 110 \text{ km/h}$; $p_{max} = 0,06$
 - $R_{min} = 600 \text{ m}$; $f_{max} = 0,10$
- Ahora siendo

$$R_{mín\ optimo} = \frac{0,5 v^2}{127 p_{max}} = \frac{v^2}{254 p_{max}}$$



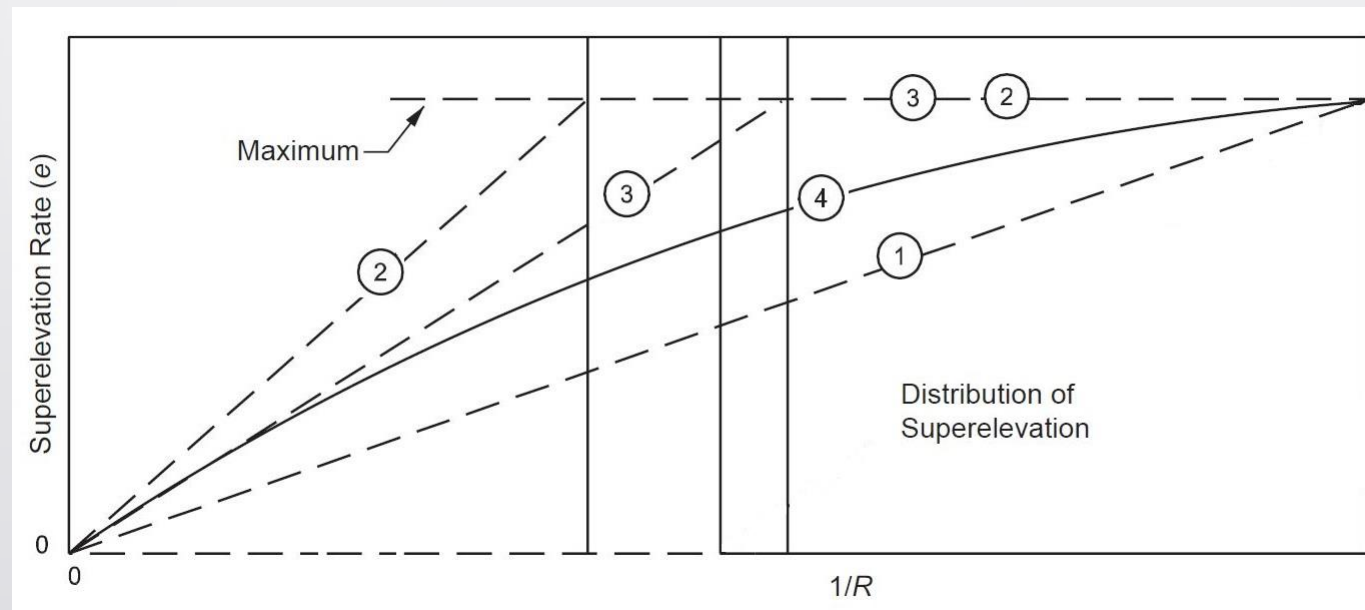
Curvas Horizontales - Criterio 3 de Peralte

- Comentarios al Criterio 3
 - Con este criterio, en las curvas con $R \geq R_{opt}$ los vehículos con velocidad promedio se equilibran sin necesidad de fricción (equivale al Criterio 2 para v_p).
 - En estas mismas curvas, vehículos a la velocidad de diseño se equilibran utilizando un balance equitativo de peralte y fricción. Por ello la denominación de Radio mínimo óptimo.
 - En curvas de radio menor, se adoptará el peralte máximo.



Curvas Horizontales - Criterio 4 de Peralte

- El Criterio 4 establecido por ASSHTO, muy poco práctico, es una curva parabólica que resulta intermedia entre los Criterios 1 y 3.
- **En Uruguay normalmente se utiliza el Criterio 3.** Opcionalmente se utilizará el **Criterio 2** cuando exista la presunción de velocidades promedio altas.



Curvas Horizontales - Radio máximo

- Si adoptamos como valor mínimo del peralte (p_{min}) la pendiente transversal correspondiente a la sección en recta, podemos considerar como un posible **radio máximo** ($R_{máx}$) aquel a partir del cual ya no reduciríamos el peralte según el Criterio 3:

$$R_{máx} = \frac{v^2}{254 p_{min}}$$

En el ejemplo visto anteriormente, con $p_{min} = 2\%$ resulta $R_{max} = 2.382 \text{ m}$

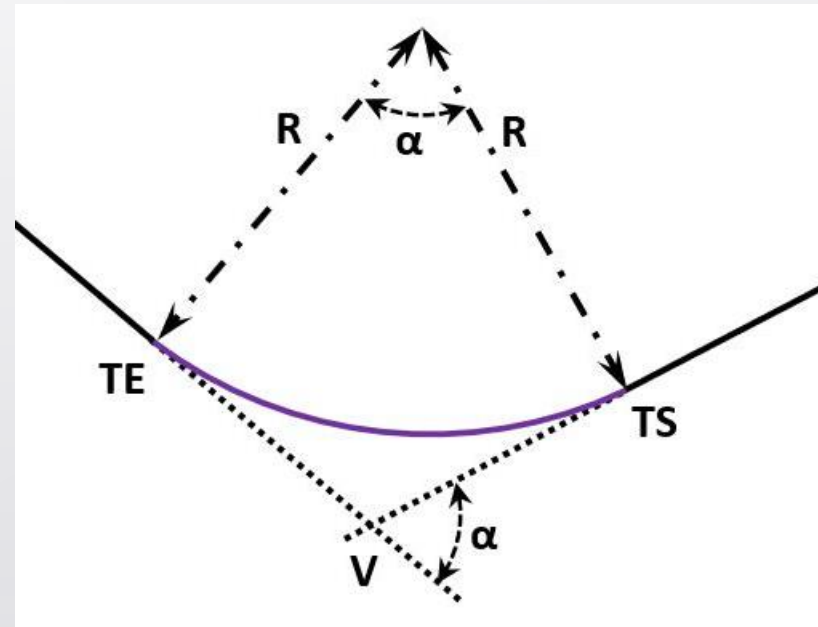
- No obstante, al adoptar radios amplios, también debe analizarse la longitud de la curva resultante, atendiendo la posible restricción al sobrepaso al circular por ella y su eventual superposición con algún acordamiento vertical (coordinación plani-altimétrica).

Curvas Horizontales - Desarrollo

- Así, además de definir el radio y peralte apropiado para una curva, en general se intenta evitar que las curvas tengan un desarrollo (longitud del arco) muy extenso.
- El desarrollo se calcula con:

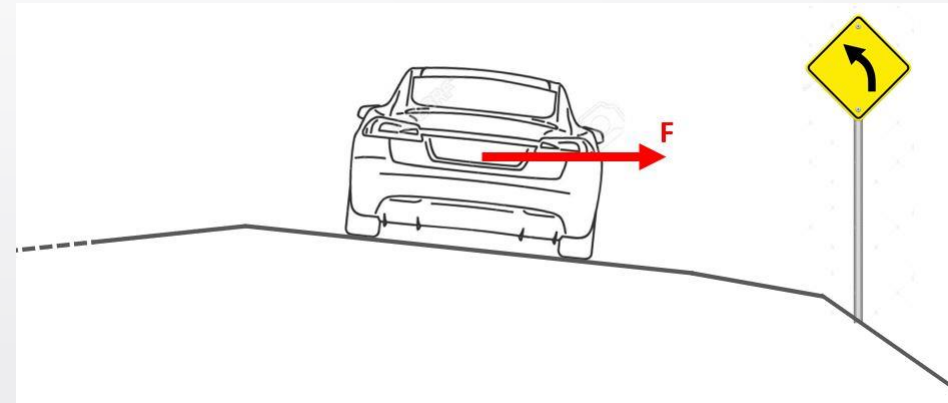
$$L_c = \frac{\pi R \alpha^\circ}{180^\circ}$$

- Teniendo un ángulo de desviación importante, un radio amplio generará una curva de gran desarrollo.
- De otro modo, con un ángulo pequeño, podemos obtener un desarrollo aceptable aún con radios muy amplios.



Curvas Horizontales - Radio singular

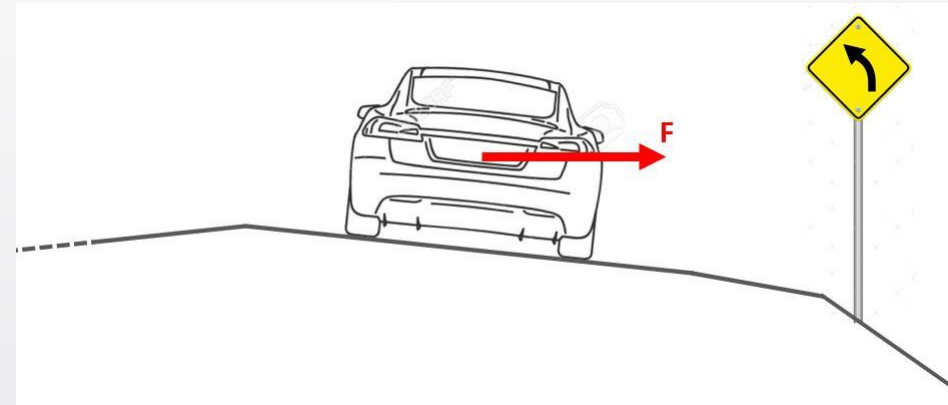
- Atendiendo el último comentario, podemos analizar las condiciones necesarias para considerar una curva donde logremos mantener incambiada la sección transversal de la recta.



- Para ello debemos ampliar el radio hasta un valor singularmente alto, para así poder controlar el deslizamiento solo en base a la fricción neumático-pavimento, aún sosteniendo el efecto desfavorable generado por aplicar una sección transversal con el peralte “invertido”.

Curvas Horizontales - Radio singular

- Una situación así es “antinatural” y solo será admisible en curvas con un mínimo ángulo de desviación y un desarrollo apropiado.
- Además, en una situación así el proyectista debe ser conservador, adoptando para el cálculo una velocidad superior a la de diseño.
- Por ejemplo, adoptando una velocidad de cálculo de 150 km/h, con un peralte invertido de 2%, resulta necesario un R de 5.900 m.



$$V = 150 \text{ km/h} \Rightarrow f = 0,05$$

$$R = \frac{v^2}{127(-p+f)} = \frac{150^2}{127(-0,02+0,05)} = 5.905 \text{ m}$$

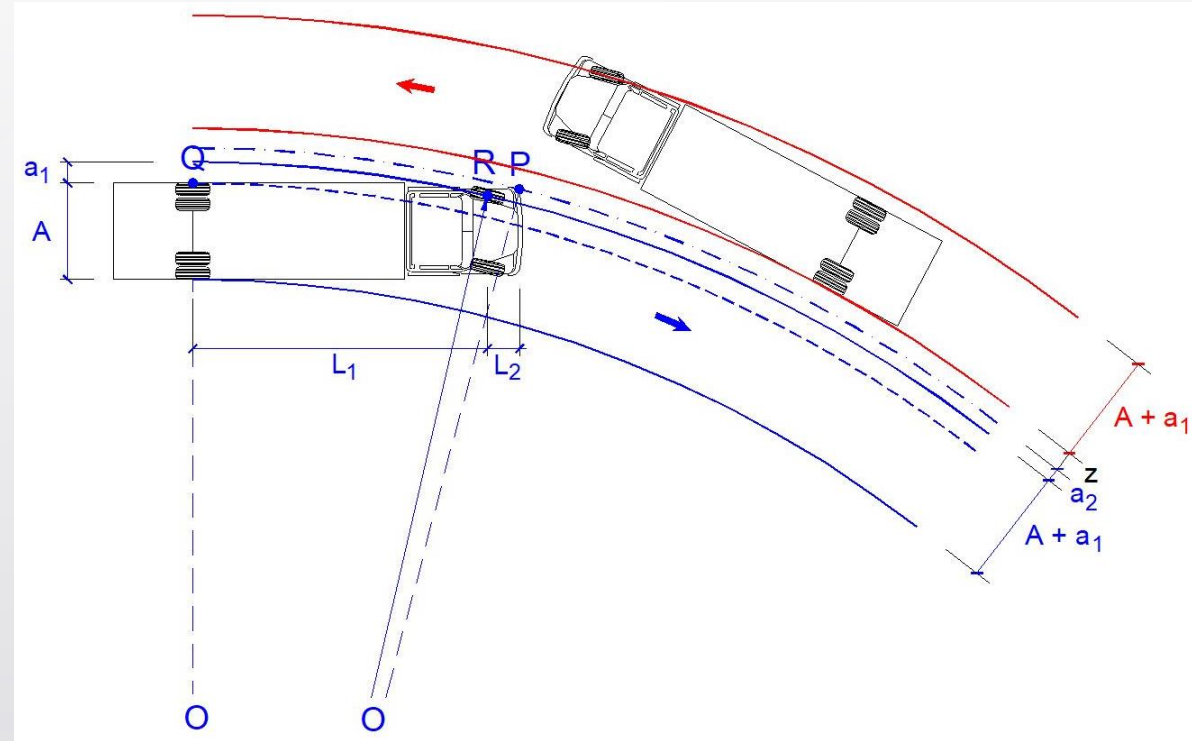
Curvas Horizontales - Opciones de trazado

- Ruta 15 entre Rocha y la Paloma
- Curva con 900 m de radio y desarrollo entre 1.500 y 1.600 m.
- Tiempo de recorrido mayor a 1 min.
- Es posible disminuir el radio o también generar dos curvas.
- Para un mismo radio las dos curvas tendrán menor ángulo de desviación y menor desarrollo.
- Mientras sea posible, es deseable que dos curvas sucesivas estén separadas un mínimo de 500 m.



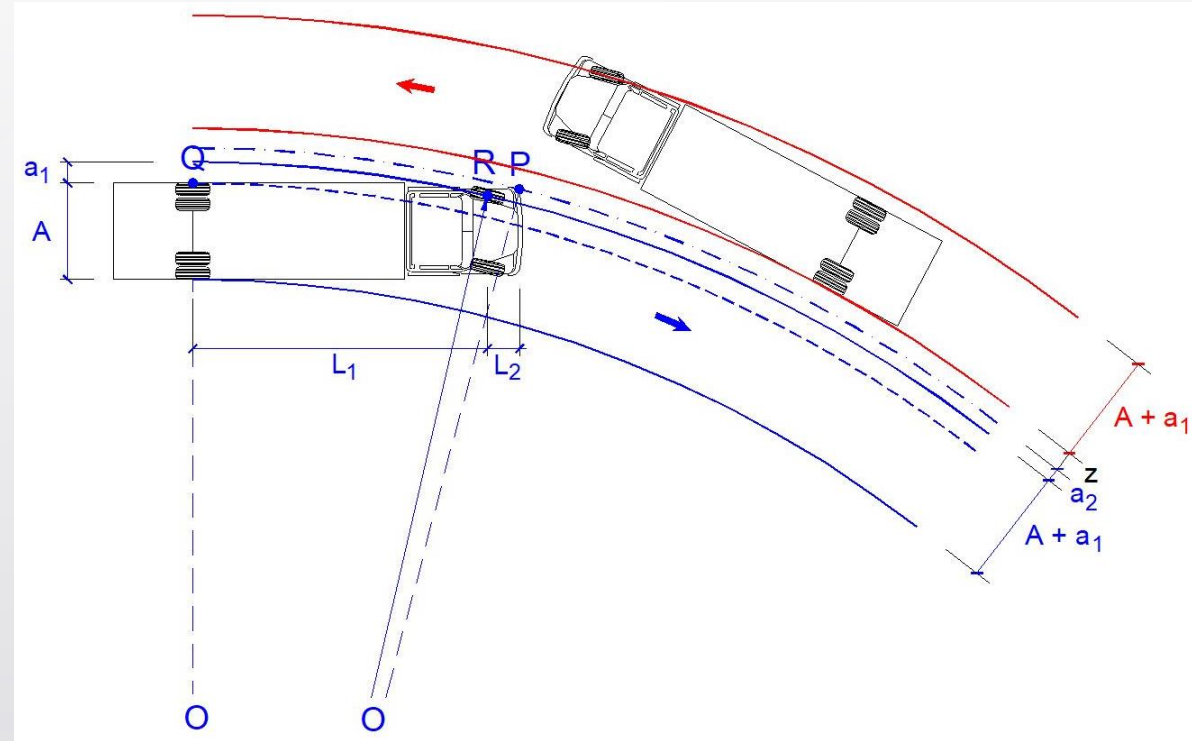
Curvas Horizontales - Sobreancho

- El sobreancho es necesario en curvas pronunciadas (radio < 500 m) para brindar a los vehículos pesados una conducción similar a la conducción en alineación recta (velocidad constante).
- El sobreancho tiene tres componentes que dependen del radio de la curva, las dimensiones del vehículo de diseño y la velocidad de operación.



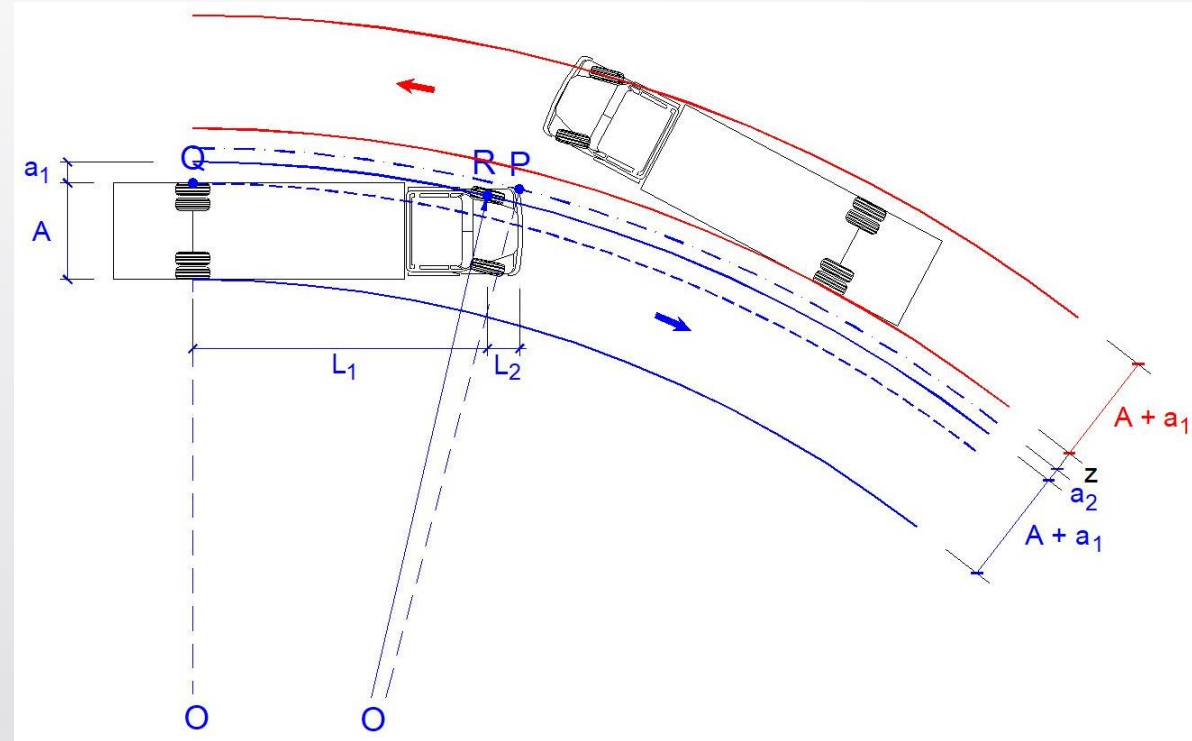
Curvas Horizontales - Sobreancho

- a_1 es el adicional al ancho normal A del vehículo, necesario por el giro de las ruedas del eje delantero.
- a_2 es el adicional necesario por el sobrevuelo del frente de la carrocería.
- z es el adicional necesario para compensar la dificultad de maniobra de vehículos pesados en curvas de radio reducido (experimental).



Curvas Horizontales - Sobreancho

- Se requiere un a_1 por cada carril, en cualquier sentido de circulación.
- Se requiere un a_2 por cada carril de circulación menos uno (innecesario del lado de la banquina).
- Se requiere un z en caminos con ambos sentidos de circulación.
- El sobreancho entonces es:



$$S_o = n a_1 + (n-1) a_2 + z \quad \text{siendo } n \text{ el número de carriles}$$

Curvas Horizontales - Sobreancho

- Matemáticamente se deducen los componentes a_1 y a_2 :

$$a_1 = R - OQ = R - \sqrt{R^2 - L_1^2}$$

$$a_2 = OP - R = \sqrt{(L_1 + L_2)^2 + OQ^2} - R = \sqrt{(L_1 + L_2)^2 + R^2 - L_1^2} - R = \sqrt{L_2(2L_1 + L_2) + R^2} - R$$

- En cambio, z tiene una expresión con base experimental.
- Así se puede calcular el sobreancho S_o necesario, que dependerá de la combinación de todos los parámetros.
- Por razones prácticas S_o solo se aplica cuando el cálculo resulta mayor o igual a 0,60 m (AASHTO 2013).

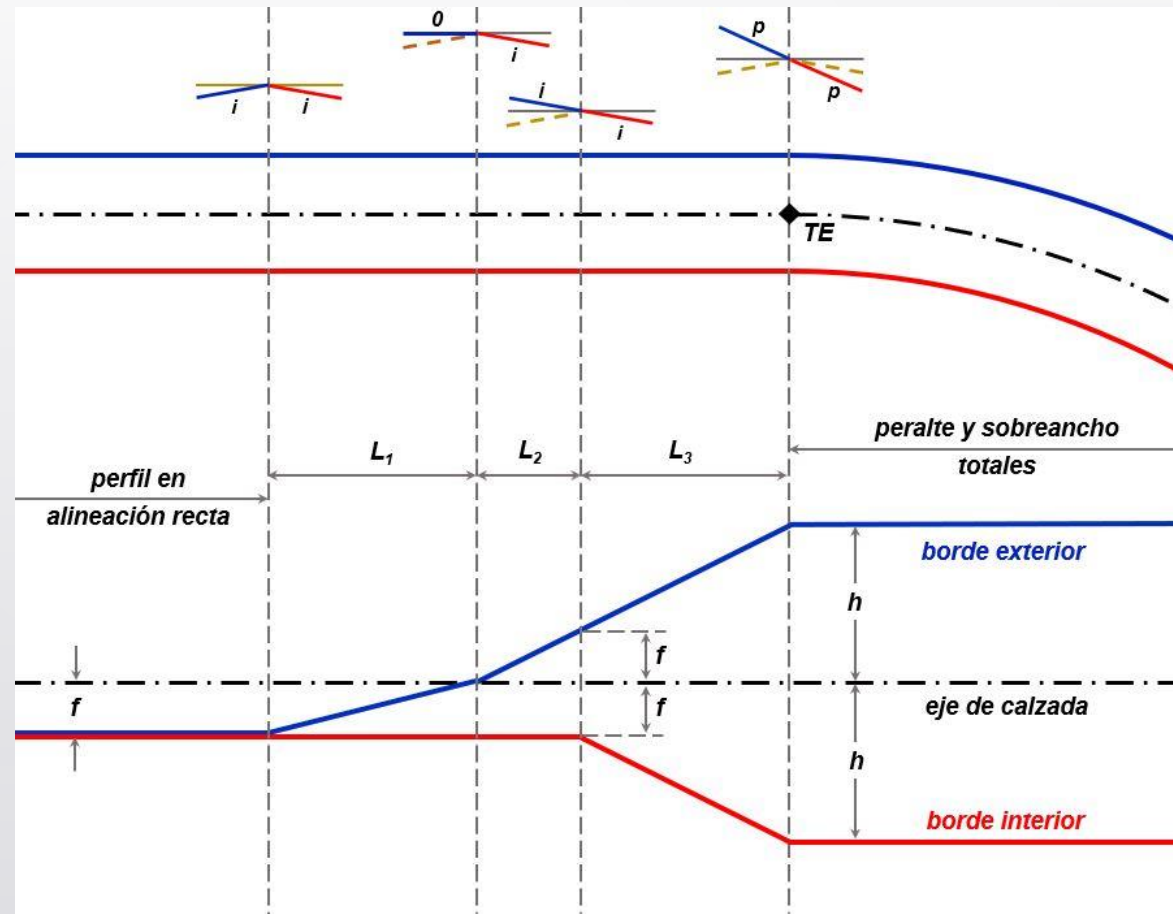
$$z = \frac{v}{10\sqrt{R}} \quad \text{con } [v]=\text{km/h} ; [R]=\text{m}$$

S_o con $n=2$; $L_1=6,10$ m ; $L_2=1,20$ m

R (m)	Velocidad (km/h)				
	70	80	90	100	110
150	0,87				
200	0,72	0,79	0,86		
300	0,55	0,61	0,67	0,73	
400	0,46	0,51	0,56	0,61	0,66
500		0,45	0,49	0,54	0,58
600				0,48	0,52

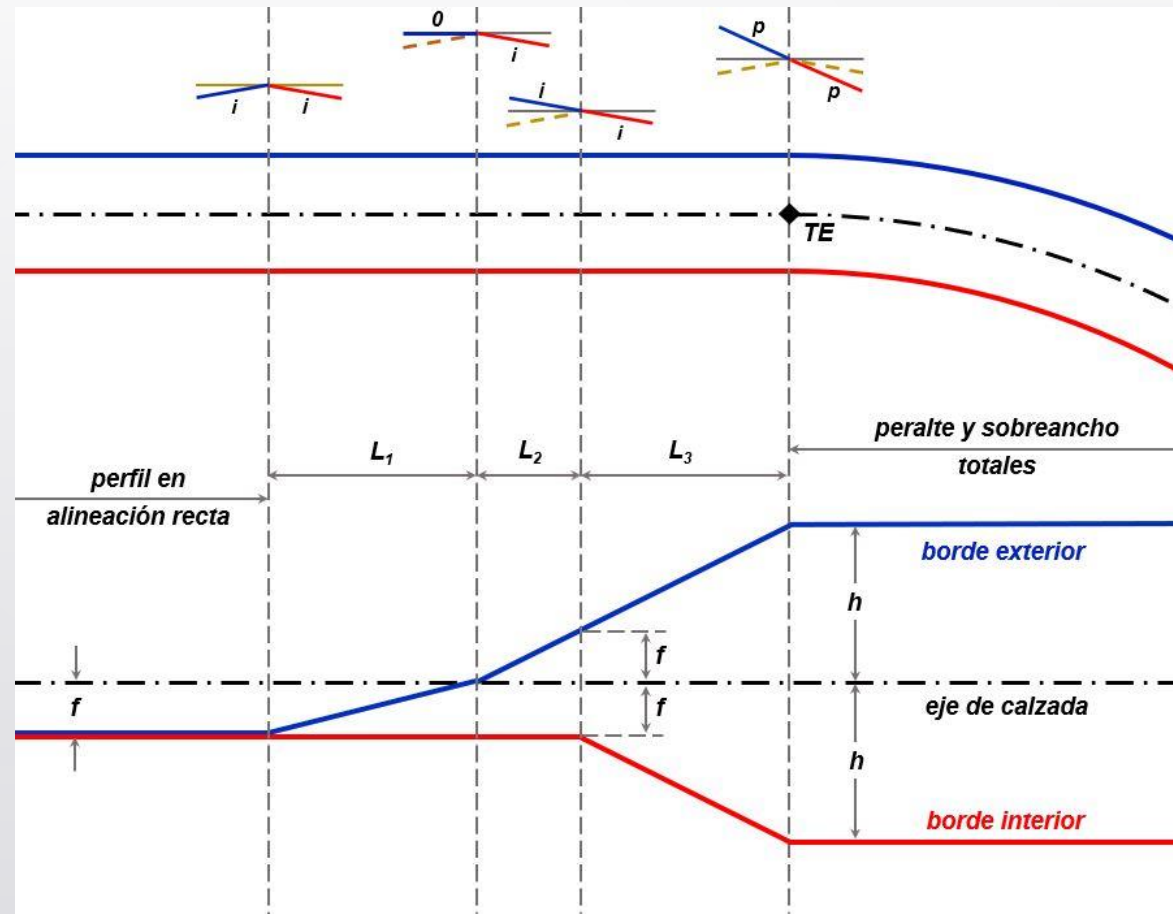
Curvas Horizontales - Transición de secciones

- Definidos los elementos de la curva (radio, desarrollo, peralte, sobreeancho en caso de corresponder) resta resolver la transición desde la sección transversal en la alineación recta hasta la sección transversal en plena curva.



Curvas Horizontales - Transición de secciones

- Al respecto se plantean tres **zonas de transición**:
 - 1**, desde la alineación recta pura hasta una sección con el carril externo horizontal.
 - 2**, siguiente zona hasta una sección con el carril externo con peralte i igual al carril interno.
 - 3**, siguiente zona donde ambos carriles varían su pendiente hasta alcanzar el peralte p en TE.

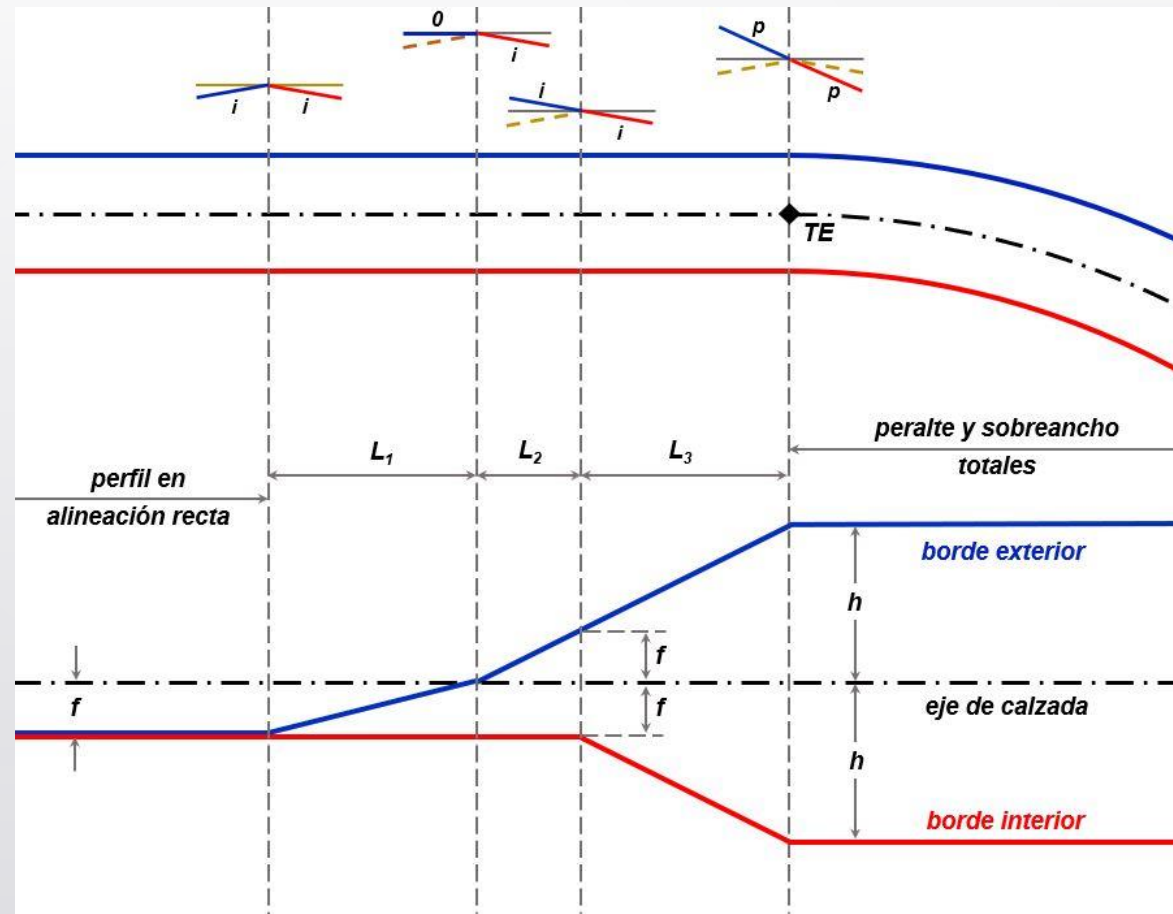
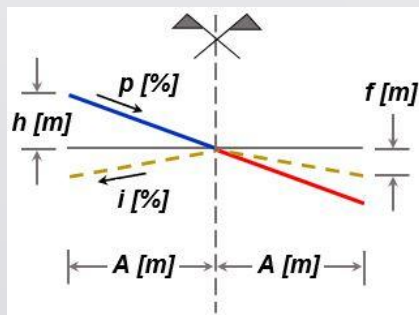


Curvas Horizontales - Transición de secciones

- La longitud de las zonas se calcula considerando la flecha f de los bordes de carriles en sección recta y la flecha h de los bordes en la curva.

$$f = A \cdot i ; h = A \cdot p$$

con $[A]=m ; [f;h]=cm ; [p;i]=\%$

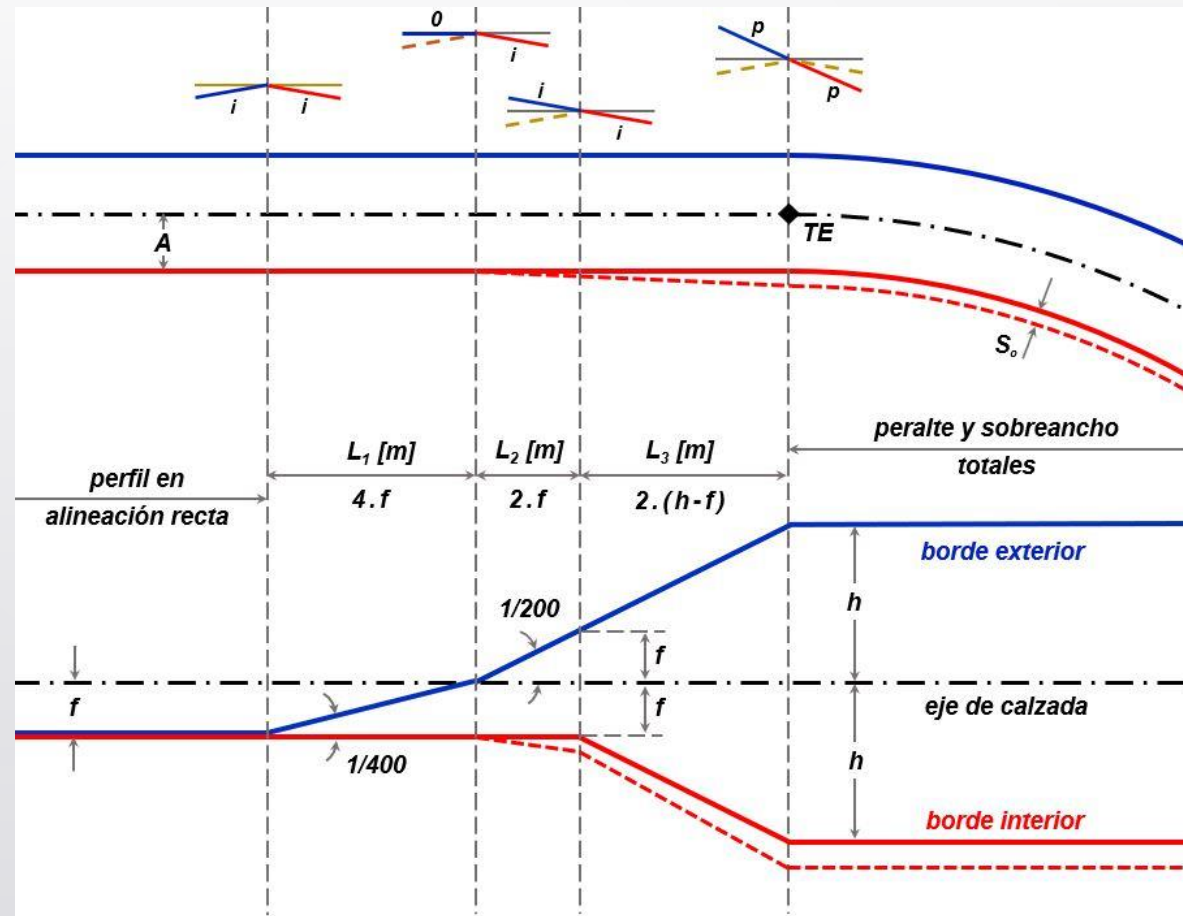


Curvas Horizontales - Transición de secciones

- Existen varios criterios para definir la longitud de las tres zonas, su ubicación relativa a TE y el eventual desarrollo del sobrecancho S_o .
- En el criterio expuesto todas las transiciones culminan en TE y la longitud de cada zona es:

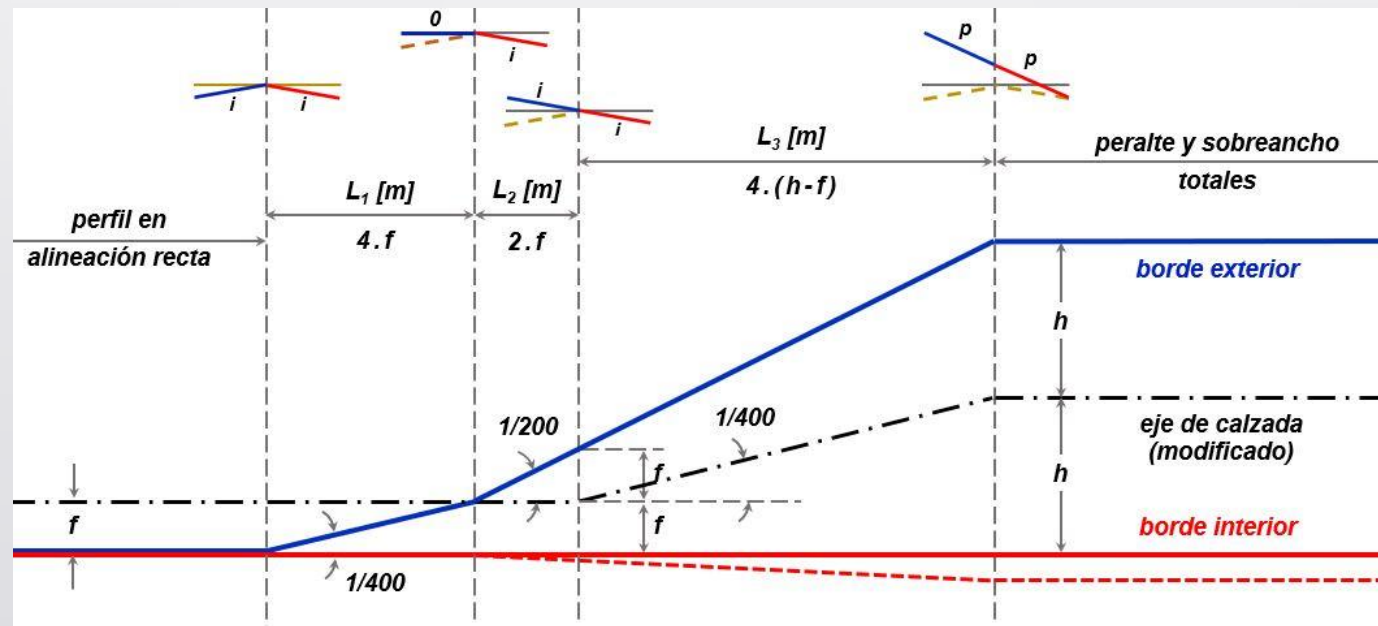
$$L_1 = 4f ; L_2 = 2f ; L_3 = 2(h-f)$$

con $[L_1; L_2; L_3] = m ; [f; h] = cm$



Curvas Horizontales - Transición de secciones

- Un eventual sobrecancho S_o se incorpora en las zonas 2 y 3.
- Usualmente la variación de pendientes se realiza “girando” la calzada sobre el eje del camino. También puede realizarse el “giro” sobre el borde interior si fuera necesario (por ejemplo para facilitar el drenaje urbano).



Transición de secciones - GDHS versión 2011

- En esta versión de la política del GDHS los criterios son algo diferentes:
 - El criterio principal establece la longitud $L_r = L_2 + L_3$ (superelevation runoff) cuyo mínimo se define atendiendo el confort de la transición y una agradable apariencia (tabla 3-15 y fórmula 3-23).
 - Luego L_1 y L_2 son proporcionales a L_r según la flecha f en la sección en recta versus la flecha h en plena curva circular (fórmula 3-24).
 - Y la innovación más radical consiste en culminar la transición dentro de la propia curva circular, en lugar de en su inicio en **TE**. Esto se establece definiendo la porción L_x de L_r a implantar antes del inicio de la curva en **TE** (tabla 3-18).

$$L_r \geq \frac{100 A \cdot p}{74 - 0,3 v} \quad L_r \geq \frac{100 A \cdot p}{90 - 0,5 v}$$

para $v \geq 80$ km/h

para $v < 80$ km/h

$$L_1 = L_2 = \frac{f}{h} L_r$$

$$L_x = 0,8 L_r$$

para $v \geq 80$ km/h

$$L_x = 0,7 L_r$$

para $v < 80$ km/h

Todas referencias para dos carriles de circulación



Curvas con Transición

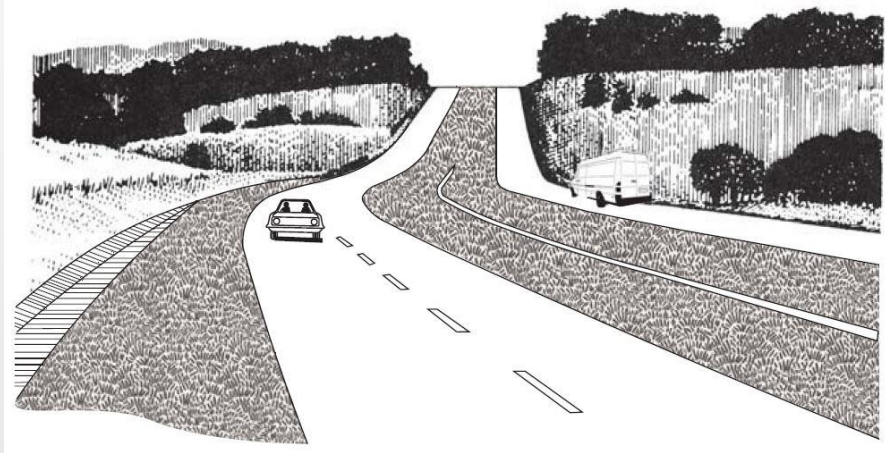
- Todo vehículo sigue una **trayectoria natural** cuando entra y sale de una curva. El giro del volante y la consecuente incorporación de la fuerza centrífuga no pueden ocurrir en un instante, como sucedería si el vehículo respetase estrictamente el pasaje desde la alineación recta a la curva.
- En la mayoría de las curvas el conductor promedio logrará esta trayectoria natural manteniéndose dentro del ancho de su carril de circulación. Sin embargo, en una situación de alta velocidad y curva de radio reducido, esta trayectoria **puede llevar al conductor hacia los bordes de su carril** e inclusive invadir el carril adyacente o la banquina.
- En una curva en estas condiciones resultará conveniente incorporar al trazado una **curva de transición** entre la alineación recta y la curva circular, que permita al conductor mantenerse dentro de su carril en condiciones de **seguridad y confort, manteniendo su velocidad.**



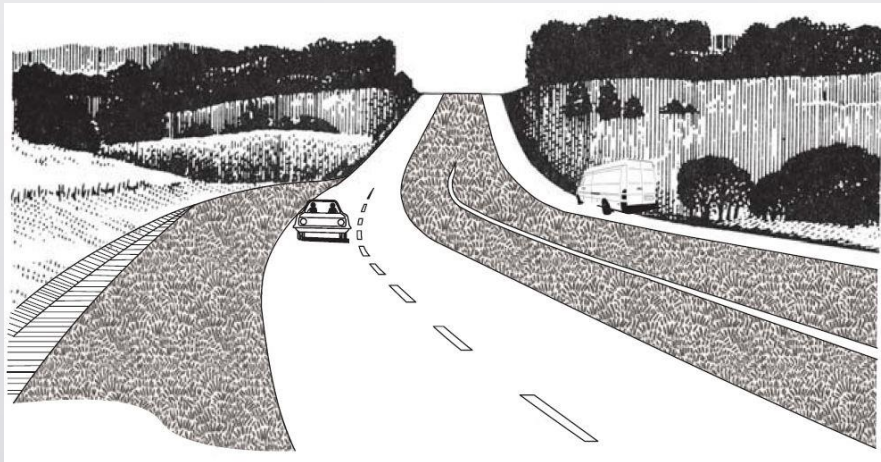
Curvas con Transición

- Las ventajas de incorporar este tipo de transición en el trazado son:
 - La transición simulará la **trayectoria natural** que adoptaría el conductor, volviéndole sencillo mantenerse en el eje del carril, sin reducir su velocidad.
 - El desarrollo de la transición se vuelve entonces una extensión apropiada para la **incorporación del peralte** en preparación al ingreso de la curva.
 - El desarrollo de la transición también es adecuado para la **incorporación del sobreebanco** que eventualmente necesite una curva de radio reducido.
 - Una curva con transición siempre tendrá una **apariencia visual mejorada**, al eliminarse el “quiebre” abrupto en las tangentes de entrada y salida.
- Aún con los avances del software de diseño y herramientas de replanteo en campo, una curva con transición sigue representando una dificultad adicional para el diseño y la construcción. Por ello, también debe haber un criterio para decidir cuando es **estrictamente necesaria**.

Curvas con Transición



Visual
sin
transición



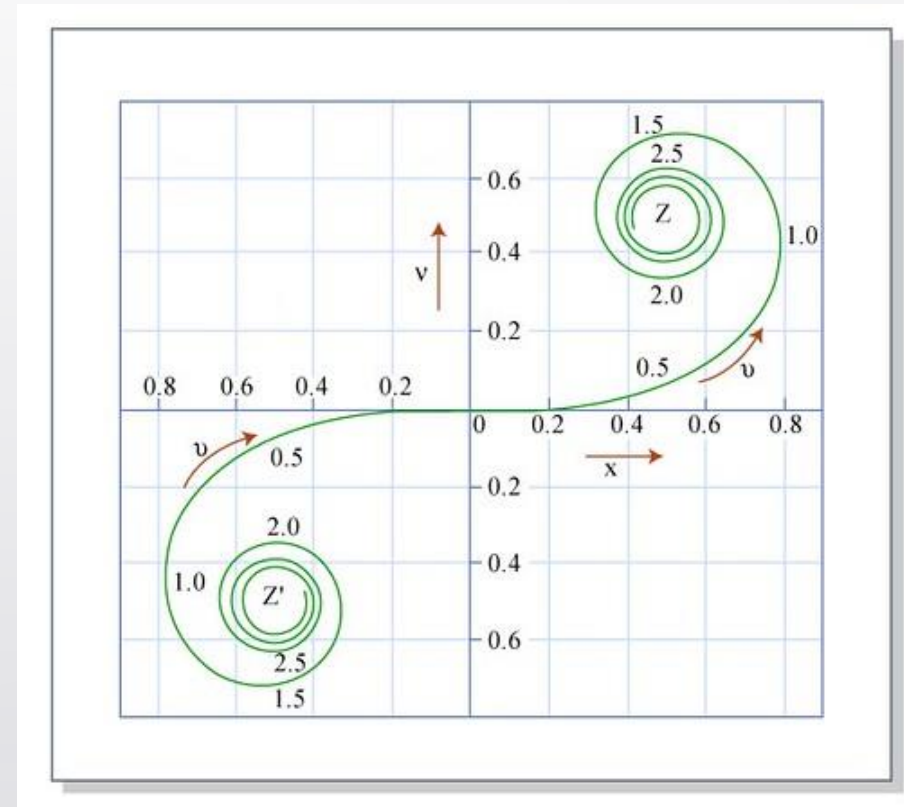
Visual
con
transición



Curvas con Transición - Espiral de Euler

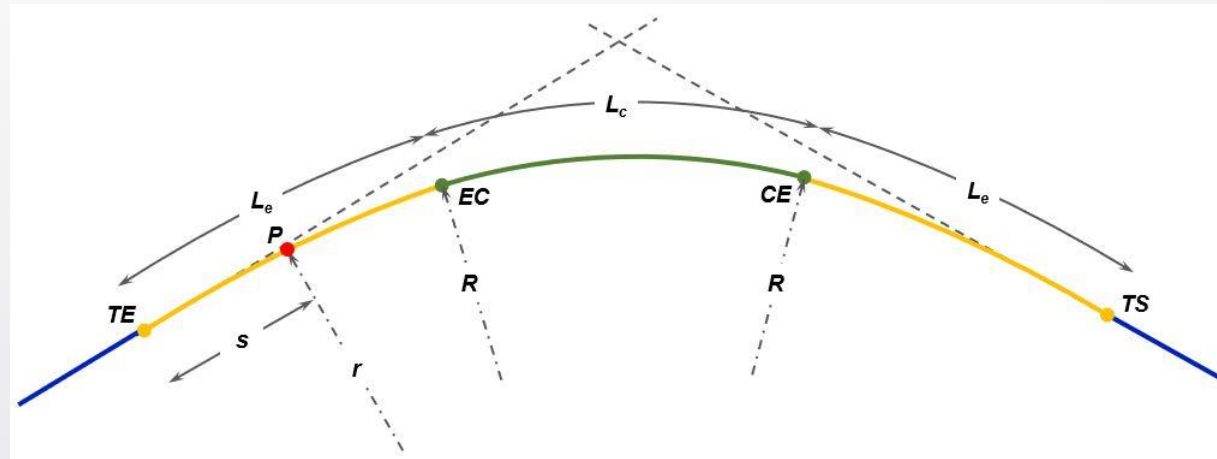
- La curva elegida para esta transición es la Clotoide o Espiral de Euler.
- La clotoide es una curva tangente a una recta en el origen y cuyo radio de curvatura disminuye de manera inversamente proporcional a la distancia recorrida sobre ella.
- Siendo s el desarrollo de la Clotoide desde su origen hasta un punto cualquiera y r el radio de curvatura en ese punto, se cumplirá:

$$s \cdot r = cte.$$



Curvas con Transición - Espiral de Euler

- En un punto genérico P de la espiral veamos la aceleración \mathbf{a}_c del vehículo y en especial la variación de \mathbf{a}_c .
- A P se llega luego de un tiempo Δt viajando a velocidad \mathbf{v} , entonces:



$$s = v \cdot \Delta t \quad \Rightarrow \quad s \cdot r = v \cdot \Delta t \cdot r = cte. = R \cdot L_e \quad \Rightarrow \quad r = \frac{R \cdot L_e}{v \cdot \Delta t} \quad \Rightarrow \quad a_c = \frac{v^2}{r} = \frac{v^3 \cdot \Delta t}{R \cdot L_e}$$

entonces $\frac{\partial a_c}{\partial t} = \frac{v^3}{R \cdot L_e} = cte. \Rightarrow$ **la variación de la aceleración es una constante C, lo que implica incorporar fuerza centrífuga en forma lineal.**

finalmente resulta $L_e = \frac{v^3}{46,7 R \cdot C}$ con $[v] = km/h ; [R] = m ; [C] = m/s^3$

Curvas con Transición - Longitud de la espiral

- Los criterios para definir la longitud de espiral **son diversos** y con el progreso del automóvil **han evolucionado**. Tradicionalmente **los más aceptados** son:

- **Confort:** la variación de a_c será menor a un valor de confort comprobado en la práctica. Actualmente se acepta un ratio de $1,2 \text{ m/s}^3$ atendiendo las prestaciones de los vehículos modernos. Según este criterio surge una primera longitud mínima de espiral.

$$L_e \geq \frac{v^3}{56 R}$$

- **Mínimo lapso en la espiral:** la maniobra de adaptación de la conducción al recorrer la espiral requiere un tiempo mínimo. En el presente se entiende suficiente un mínimo de 2,0 s, lo que define una segunda longitud mínima de espiral.

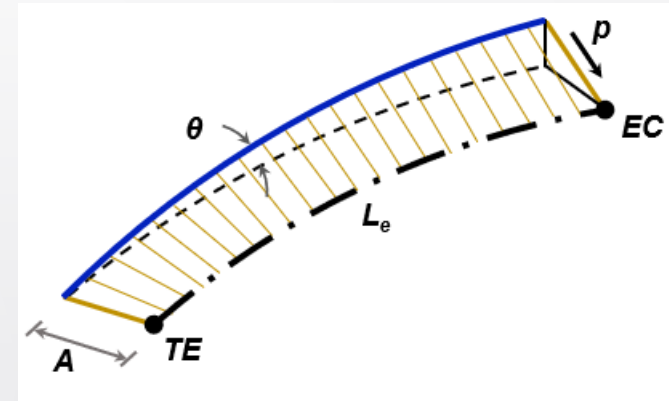
$$L_e \geq 0,56 v$$

- **Mínimo desvío lateral:** la espiral debe producir un desvío mínimo (δ) de 0,2 m respecto la trayectoria alternativa sin espiral, para representar de buen modo la trayectoria natural del conductor. Y con este criterio queda planteada un tercer mínimo para L_e .

$$L_e \geq 2,2\sqrt{R} = \sqrt{24 R \delta}$$

Curvas con Transición - Longitud de la espiral

- **Condición estética:** la variación de la sección transversal debe ser suave, agradable a la vista, limitando el gradiente θ del borde exterior de la en la espiral. Así queda definido otro mínimo para la longitud de espiral, siendo de aceptación general que el gradiente máximo disminuya según aumenta la velocidad de diseño.



$$\operatorname{tg} \theta = \frac{A \cdot p}{100 L_e} \leq f(v) \quad \text{usualmente se considera } f(v) = (80+1,5 v) \quad \text{resultando entonces}$$

$$L_e \geq \frac{A \cdot p}{100} (80+1,5 v) \quad \text{con } [L; A]=m ; [p]=\% ; [v]=\text{km/h}$$

- La longitud de espiral debe cumplir estos 4 mínimos.
- Y por razones prácticas también deber ser $L_e \geq 40$ m.

Curvas con Transición - Eliminación de la espiral

- Finalmente también existen criterios para determinar las condiciones en las que la **espiral ya no resulta necesaria**.
 - Esto ocurrirá cuando la curva horizontal sea lo suficientemente amplia como para generar una aceleración moderada y un desvío lateral en la trayectoria natural del vehículo que no comprometa su seguridad.
 - Usualmente se considera que un desvío de trayectoria menor a 0,20 m es aceptable y que una aceleración de 1,3 m/s² es bien tolerable como para que el conductor la incorpore confortablemente sin necesidad de una espiral.
 - Considerando este último criterio resulta

$$a_c = \frac{v^2}{R} \leq 1,3 \text{ m/s}^2 \text{ resultando } R \geq 0,059 v^2 \text{ con } [R]=m ; [v]=\text{km/h}$$

- Para velocidades altas los radios R mínimos para eliminar la espiral son:

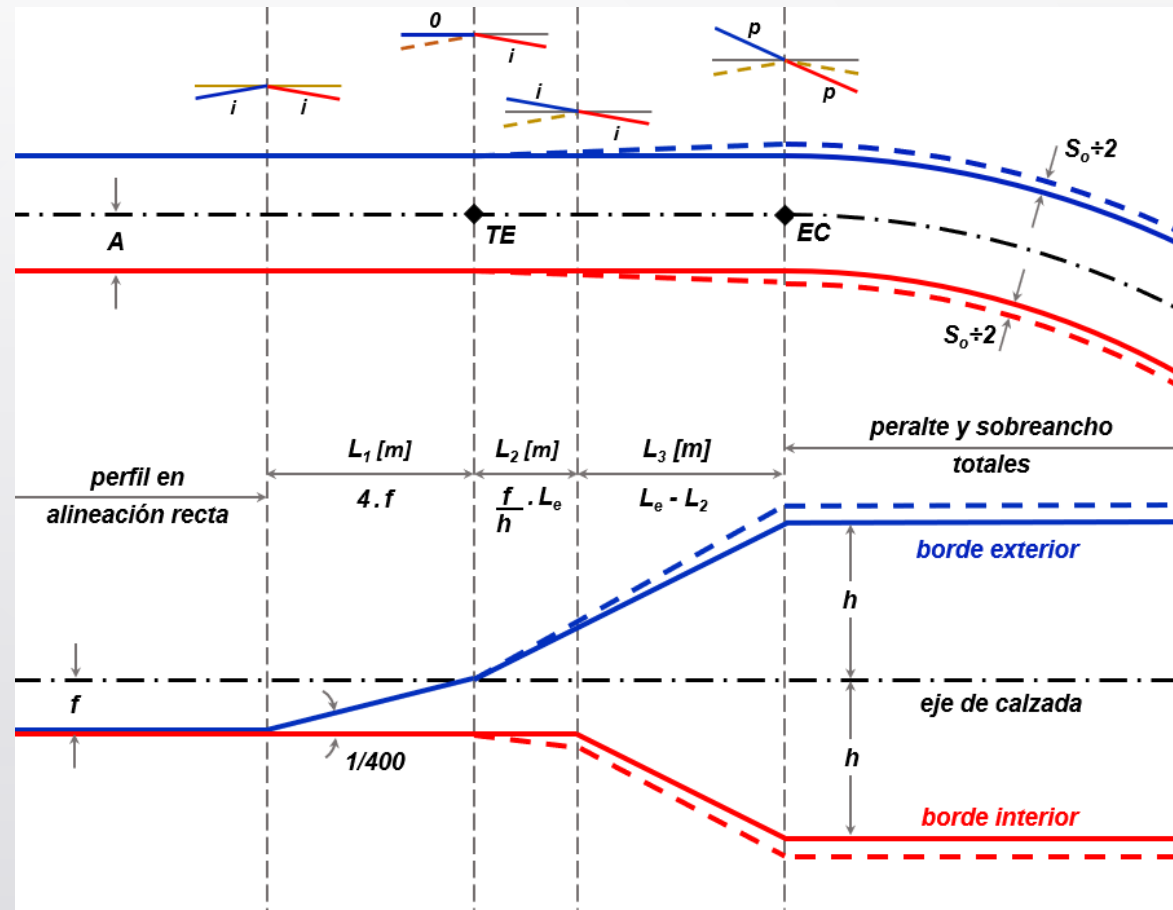
v (km/h)	80	90	100	110	120	130
R _{min} (m) sin L _e	378	478	590	714	850	997

Curvas Horizontales - Transición con espiral

- En una curva con espiral la transición de secciones transversales es similar.
- La longitud de espiral se distribuye linealmente entre las zonas 2 y 3.
- El eventual sobreebancho S_o se asigna en un 50% a cada lado del camino.

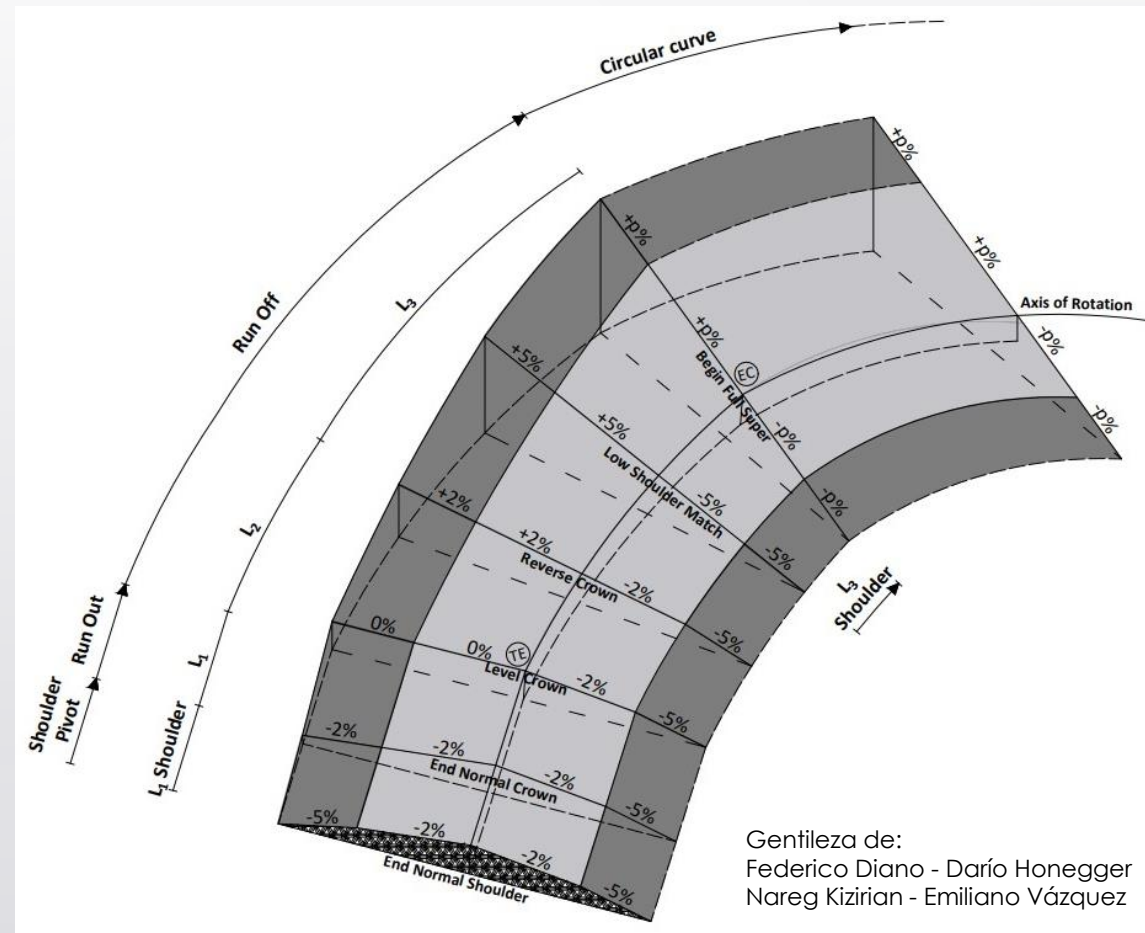
$$L_1 = 4f ; L_2 = \frac{f}{h} L_e ; L_3 = L_e - L_2$$

con $[L_1; L_2; L_3] = m ; [f; h] = cm$



Curvas Horizontales - Transición con espiral

- El mismo esquema anterior (sin sobrecancho y utilizando la terminología de AASHTO) podemos visualizarlo en 3 dimensiones en el gráfico adjunto, considerando $i=2\%$ y un peralte p mayor a 5%.
- En dicho esquema se representa también la transición de pendientes en las banquetas, para la cual no hay reglas estrictas definidas.



Curvas con Transición - GDHS versión 2011

- Los criterios para definir la longitud de espiral **evolucionan**. Veamos lo indicado en la versión 2011 de las directivas de AASHTO para el GDHS:

- **Longitud deseable:** aquella más semejante a la trayectoria natural del conductor, que experimentalmente se ha observado se desarrolla en unos 2,0 s (tabla 3-21).

$$L_{e \text{ des}} = 0,56 v$$

- **Mínimos por confort y desvío lateral:** dos mínimos que deben cumplirse simultáneamente, correspondientes a una variación de aceleración a_c máxima de $1,2 \text{ m/s}^3$ y un desvío lateral mínimo δ de 0,2 m (fórmulas 3-26 y 3-27).

$$L_e \geq \frac{v^3}{56 R}$$

$$L_e \geq 2,2\sqrt{R}$$

- **Máximo para evitar confusión:** una espiral muy larga generará una mala interpretación de la curvatura real de la sección circular. Para ello se define un δ máximo de 1,0 m (fórmula 3-28).

$$L_e \leq 4,9\sqrt{R}$$

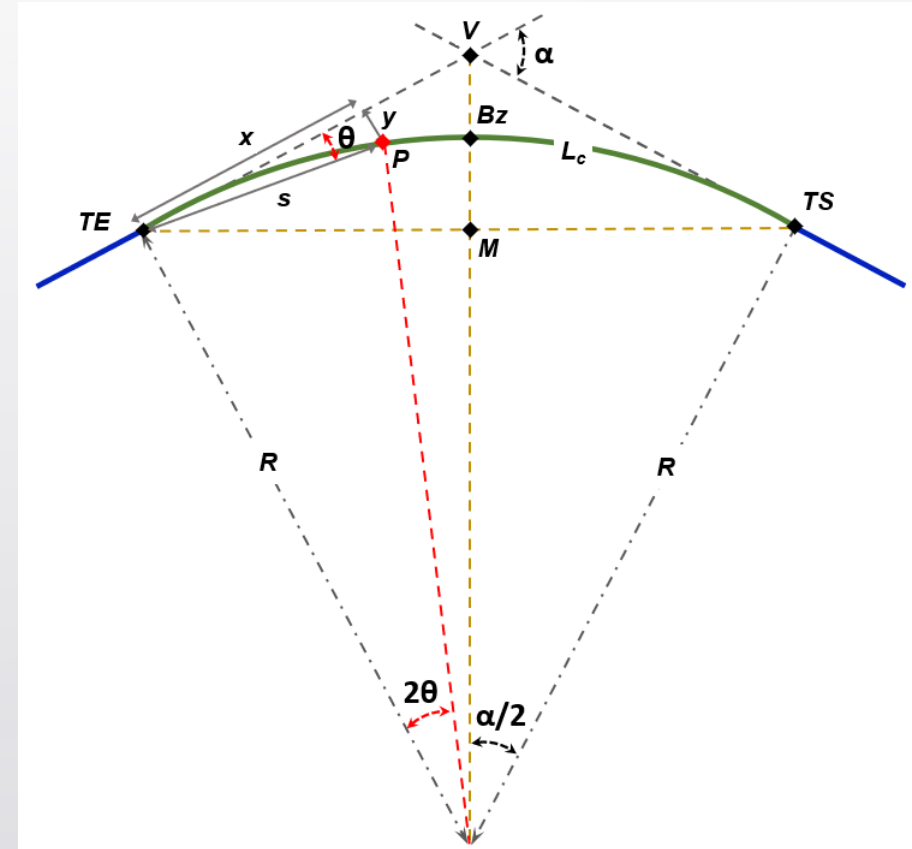
- **Mínimo por la estética:** el gradiente θ del borde exterior se limita considerando una función de la velocidad diferente (tabla 3-15).

$$L_e \geq \frac{100 A \cdot p}{74 - 0,3 v}$$

para
 $v \geq 80 \text{ km/h}$

Curvas circulares - Replanteo

- Para definir una curva también hay que considerar su ubicación general en el terreno y para ello se define:
 - Puntos notables:
 - **V**: Vértice
 - **TE**: Tangente de entrada
 - **TS**: Tangente de salida
 - **Bz**: Bisectriz
 - Dimensiones notables:
 - **t**: Tangente (TE-V=V-TS)
 - **b**: Bisectriz o Externa (V-Bz)
 - **m**: Ordenada media (Bz-M)
 - **c**: Cuerda larga (TE-TS)
 - **L_c**: Desarrollo(arco)
 - **R**: Radio (dato)
 - **α**: Ángulo externo o de intersección (dato)



Curvas circulares - Replanteo

- Se utiliza un conjunto de fórmulas para definir las dimensiones notables:

$$t = R \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

$$b = R \left(\sec \frac{\alpha}{2} - 1 \right)$$

$$L_c = R \pi \frac{\alpha}{180}$$

$$c = 2 R \operatorname{sen} \frac{\alpha}{2}$$

$$m = R \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right) \text{ con } [\alpha] = ^\circ$$

- Y para replantear un punto genérico P:
Por coordenadas polares

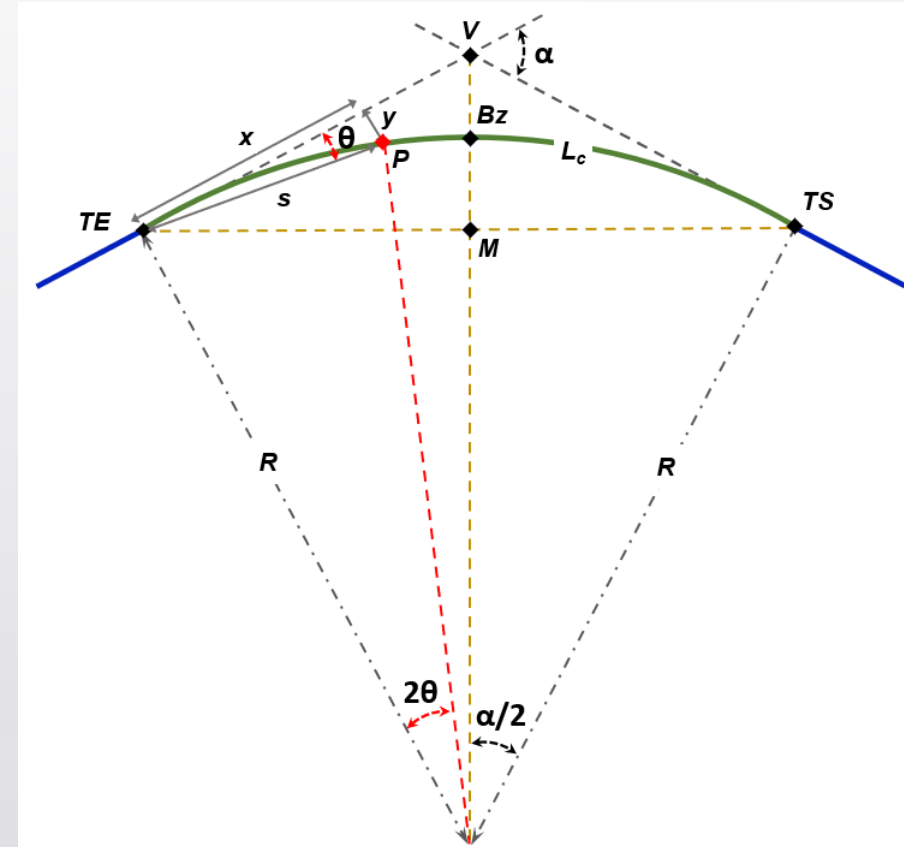
$$\theta_P = a \frac{90}{\pi R}$$

$$s_P = 2 R \operatorname{sen} \theta_P \quad a = \text{arco TE-P}$$

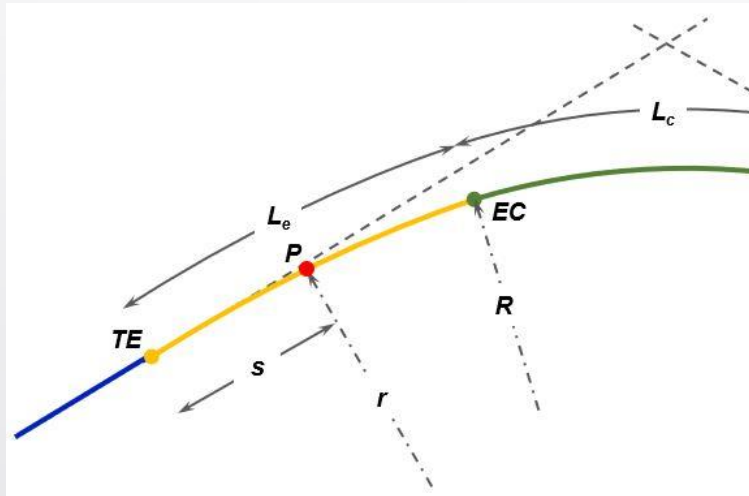
Por coordenadas cartesianas

$$x_P = R \left(1 - \cos 2\theta_P \right)$$

$$y_P = R \operatorname{sen} 2\theta_P$$



Curvas con espiral - Replanteo



- La Clotodie no tiene una ecuación elemental. Antiguamente se recurría a tablas de referencia para el replanteo. Actualmente los software de diseño facilitan el replanteo como se desee (coordenadas relativas o absolutas).

TABLES 333

TABLE 13. FUNCTIONS OF HIGHWAY SPIRAL FOR $L_s = 1^*$

θ	p	k	x	y	L.T.	S.T.	L.C.	θ
0.0	0.00000	0.50000	1.00000	0.00000	0.66667	0.33333	1.00000	0.0
.1	015	000	000	058	667	333	000	.1
.2	029	000	000	116	667	334	000	.2
.3	044	000	.99999	175	667	334	000	.3
.4	058	000	999	233	667	334	000	.4
0.5	0.00073	0.50000	0.99999	0.00291	0.66667	0.33334	1.00000	0.5
.6	088	000	999	349	667	334	000	.6
.7	102	000	998	407	668	334	.99999	.7
.8	117	000	998	465	668	334	999	.8
.9	131	000	997	524	668	334	999	.9
1.0	0.00146	0.49999	0.99997	0.00582	0.66668	0.33334	0.99999	1.0
.1	161	999	996	640	668	335	998	.1
.2	175	999	995	698	668	335	998	.2
.3	190	999	995	756	669	335	998	.3
.4	204	999	994	814	669	335	997	.4
1.5	0.00219	0.49999	0.99993	0.00873	0.66669	0.33336	0.99997	1.5
.6	233	999	992	931	669	336	997	.6
.7	248	998	991	989	670	336	996	.7

Curvas Horizontales - Ejemplos extremos



Curvas Horizontales - Ejemplos extremos



Curvas Horizontales - Ejemplos extremos



Curvas Horizontales - Ejemplos extremos



Curvas Horizontales - Ejemplos extremos



Curvas Horizontales - Condicionantes externas

- Evolución del tráfico
- Drenaje en zonas urbanas
- Limitación de expropiaciones

