



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERÍA Y AGRIMENSURA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE

ALINEAMIENTO VIAL PLANIMÉTRICO

Apunte de cátedra: Ing. Guillermo A. Cornero

AÑO 2002

CAPITULO 4.- ALINEAMIENTO VIAL PLANIMETRICO

4.1.- GENERALIDADES

Un trazado vial está compuesto, en su faz planimétrica, por una serie de alineamientos rectos empalmados entre sí por medio de curvas.

En un diseño balanceado todos los elementos geométricos de la carretera, dentro de lo económicamente factible, deben permitir una circulación vehicular continua y uniforme a la velocidad de proyecto.

4.2.- FORMULACION TEORICA

Cuando un vehículo circula sobre una trayectoria curva se encuentra sometido a una fuerza centrífuga, la cual es equilibrada por el peralte (pendiente transversal de la calzada en curva) y por el rozamiento en el sistema neumático-calzada.

Sea C el centro de gravedad de un vehículo circulando sobre una curva con peralte p, figura 4.2.1.

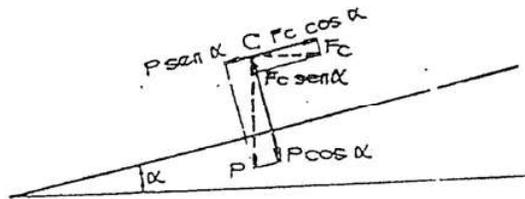


FIG. 4.2.1. ESTADO DE SOLICITACIONES DE UN VEHICULO EN CURVA.

La expresión de los esfuerzos paralelos a la calzada que actúan transversalmente sobre el vehículo será:

$$f (P \cos \alpha + F_c \sen \alpha) + P \sen \alpha = F_c \cos \alpha \quad 4.2.1$$

siendo:

f coeficiente de rozamiento transversal.

P peso del vehículo
 $\text{tg } \alpha = p$ (peralte)
 F_c fuerza centrífuga = $\frac{m \cdot v^2}{R}$
 v velocidad de circulación del vehículo, en m/s
 R radio de la curva, en m

La ecuación 4.2.1 puede ser expresada:

$$f + f \frac{v^2}{g \cdot R} p + p = \frac{v^2}{g \cdot R} \quad 4.2.2$$

$$f + p = \frac{v^2}{g \cdot R} (1 - f \cdot p) \quad 4.2.3$$

El valor $f \cdot p$ es de escasa significación, ya que los valores máximos de peralte y rozamiento son 0,12 y 0,17 respectivamente. La ecuación 4.2.3 queda transformada:

$$f + p = 0,0079 \frac{v^2}{R} \quad 4.2.4$$

siendo v velocidad del vehículo en km/h.

Cuando un vehículo transita a velocidad constante sobre una curva circular peraltada, si el valor del coeficiente de rozamiento transversal f del sistema neumático-calzada es nulo, la totalidad de la fuerza centrífuga es absorbida por el peralte y no es necesario un movimiento en las ruedas delanteras para realizar el giro. En aquellos casos en que el vehículo circula a una mayor o menor velocidad, deberá compensarse la diferencia de la fuerza centrífuga mediante el rozamiento entre el neumático y la calzada.

Por lo tanto el circular a diferentes velocidades sobre una curva peraltada es factible debido a que el rozamiento transversal del sistema neumático-calzada absorbe el remanente de la fuerza centrífuga.

4.3.- COEFICIENTE DE ROZAMIENTO TRANSVERSAL

El coeficiente de rozamiento transversal es función de una serie de variables, siendo las más importantes:

a) Velocidad del vehículo

- b) Tipo y estado de la superficie de rodamiento
- c) Tipo y estado del neumático

El coeficiente de rozamiento transversal puede ser adoptado mediante dos criterios: uno de ellos, afectando con un factor de seguridad los máximos valores obtenidos mediante ensayos experimentales en el sistema neumático-calzada, y el otro, adoptando como valores máximos admisibles aquellos que provoquen una fuerza centrífuga tal que ocasione en el conductor una sensación de malestar, la cual actúa sobre el mismo motivando una disminución de la velocidad.

Estudios experimentales sobre conductores permitieron establecer que, coeficientes de rozamiento transversal superiores a los expresados a continuación, provocan sensaciones de falta de confort:

- $f = 0,21$ para velocidades menores de 32 km/h.
- $f = 0,18$ para velocidades comprendidas entre 40 km/h y 48 km/h.
- $f = 0,15$ para velocidades mayores de 56 km/h.

AASHO 1965 adopta como valores admisibles de diseño, la variación lineal del coeficiente de rozamiento entre 0,16 para velocidad de 48 km/h y 0,11 para 128 km/h, figura 4.3.1.

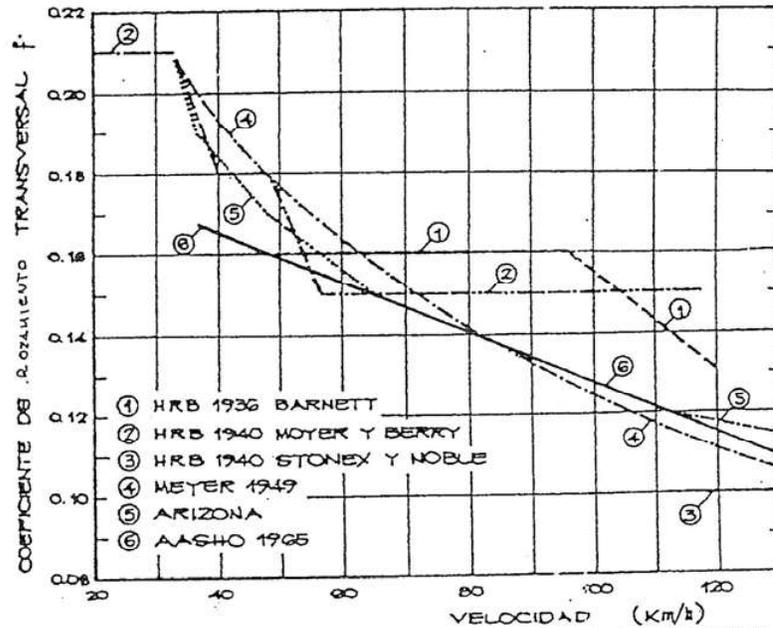


FIG.3.1. VALORES DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO TRANSVERSAL EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD.

En la medida que investigaciones posteriores aporten nuevos elementos de juicio estos valores máximos admisibles del coeficiente de rozamiento podrán ser modificados.

4.4.- VALORES MÁXIMOS DEL PERALTE

Los valores máximos del peralte están limitados por varios factores:

- a) Condiciones climáticas (calzadas húmedas, nevadas o heladas)
- b) Condiciones topográficas de la región
- c) Carreteras de tipo rural o urbano
- d) Proporción de vehículos que, circulando lentamente, tendrían bajas condiciones de confort

En general, las dificultades en los procesos constructivos y en las tareas de mantenimiento de una carretera, como así también la incomodidad en la circulación en vehículos a bajas velocidades, limitan a 12% el valor máximo del peralte. Este valor ocasiona notables dificultades en la circulación sobre calzadas enripiadas.

En general se adoptan los valores máximos de peralte de acuerdo al siguiente criterio:

- Peralte máximo 10%: en zonas rurales montañosas con heladas o nevadas poco frecuentes.
- Peralte máximo 8%: en zonas rurales llanas u onduladas.
- Peralte máximo 6%: en zonas urbanas.

Estudios experimentales han indicado que el valor máximo de 8% del peralte da buenas condiciones de seguridad en calzadas sometidas con frecuencia a heladas o nevadas.

4.5.- RADIOS MÍNIMOS Y MÁXIMOS DE CURVA

Para una velocidad de diseño dada, el radio mínimo de una curva queda determinado por los valores máximos del coeficiente de rozamiento transversal y del peralte. Por lo tanto el radio mínimo de una curva puede ser calculado mediante la siguiente expresión:

$$R = 0,0079 \frac{v^2}{p + f} \tag{4.5.1}$$

Se denomina grado de curvatura D al valor del ángulo al centro subtendido por un arco de circunferencia de cien pies de longitud, y se lo expresa en grados:-

$$D = \frac{1.746,375}{R} = \frac{30,48 \cdot 180^\circ}{R \cdot \pi} \tag{4.5.2}$$

siendo R el radio de la curva en metros.

En el gráfico 4.5.1 se ha representado la ecuación 4.5.1 para valores de (p+f) variando entre 0,14 y 0,26.

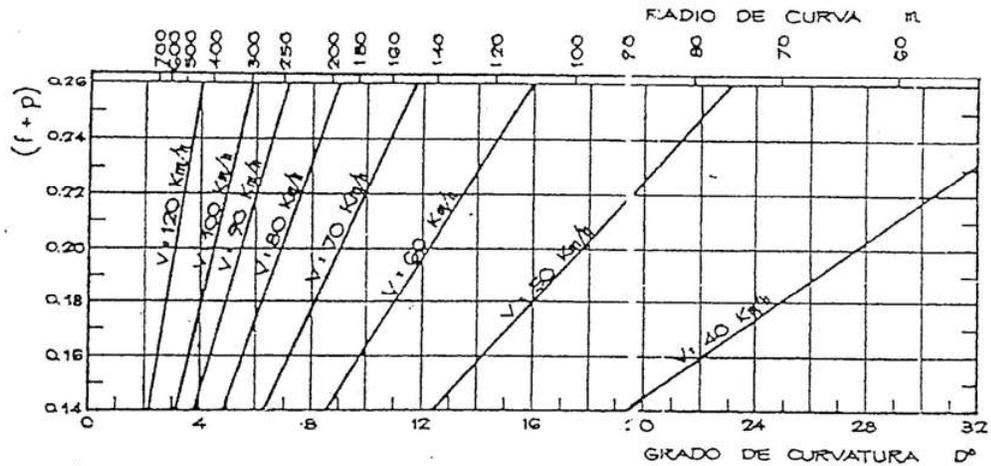


FIG. 4.5.1. VALORES DE CURVATURA EN FUNCIÓN DE (p+f) Y V.

Con la expresión 4.5.1 y los valores máximos de p y f expresados anteriormente se han calculado los radios mínimos de curva, y consecuentemente los máximos grados de curvatura, para distintas velocidades de diseño, consignándose dichos valores en la tabla 4.5.1.

TABLA 45.1.

VALORES MINIMOS DE RADIO DE CURVA PARA PERALTES MAXIMOS DE 6% , 8% Y 10%.

VD Km/h	PERALTE MAXIMO p	f MAXIMO	p+f	RADIO MINIMO R (m.)	GRADO DE CURVATURA MAXIMO D°
30	0.06	0.17	0.23	31	56.3
40	0.06	0.17	0.23	55	31.8
50	0.06	0.16	0.22	90	19.4
60	0.06	0.15	0.21	135	12.9
70	0.06	0.15	0.21	184	9.5
80	0.06	0.14	0.20	253	6.9
90	0.06	0.13	0.19	337	5.2
100	0.06	0.13	0.19	416	4.2
110	0.06	0.12	0.18	531	3.3
120	0.06	0.11	0.17	669	2.6
30	0.08	0.17	0.25	28	62.4
40	0.08	0.17	0.25	51	34.2
50	0.08	0.16	0.24	82	21.3
60	0.08	0.15	0.23	124	14.1
70	0.08	0.15	0.23	168	10.4
80	0.08	0.14	0.22	230	7.6
90	0.08	0.13	0.21	305	5.7
100	0.08	0.13	0.21	376	4.6
110	0.08	0.12	0.20	478	3.7
120	0.08	0.11	0.19	599	2.9
30	0.10	0.17	0.27	26	67.2
40	0.10	0.17	0.27	47	37.2
50	0.10	0.16	0.26	76	23.0
60	0.10	0.15	0.25	114	15.3
70	0.10	0.15	0.25	155	11.3
80	0.10	0.14	0.24	211	8.3
90	0.10	0.13	0.23	278	6.3
100	0.10	0.13	0.23	343	5.1
110	0.10	0.12	0.22	434	4.0
120	0.10	0.11	0.21	542	3.2

No existen normas que limiten los radios máximos a pesar de que parecería lógica tal limitación.

En general los vehículos están diseñados para seguir una trayectoria en línea recta a menos que su dirección sea perturbada. Por esta razón dichos vehículos, circulando en alineamientos rectos sobre calzadas sin bombeo, no requieren que se accione su dirección salvo para corregir perturbaciones creadas por anomalías de la calzada.

Ahora bien, al conducir un vehículo a una determinada velocidad sobre una curva de radio excesivamente grande, el conductor, al no sentir la presencia de esfuerzos entre neumático y calzada, moverá la dirección instintivamente para tratar de seguir la curva dentro de su carril. Se produce entonces lo que podría denominarse un sobrecontrol del vehículo, debiendo el conductor realizar sucesivas correcciones en la dirección. Como consecuencia de esto la trayectoria sobre la curva se itera mediante una serie de pequeños cambios en la dirección que no favorecen al correcto dominio del vehículo.

El control de este efecto podría realizarse mediante la determinación de radios máximos de curva, fijados de manera tal que la maniobra de giro esté acompañada de un pequeño esfuerzo transversal en el sistema neumático-calzada, que colabore a dirigir la maniobra de giro.

Al no haber en vigencia normas que controlen este efecto, puede establecerse el criterio de adoptar como valores máximos aquellos radios que no requieran peralte en su diseño.

4.6.- VALORES DEL PERALTE

Lo expuesto anteriormente permite determinar para una dada velocidad de diseño y un valor adoptado de peralte máximo un radio mínimo de curva (curvatura máxima).

Ahora bien, el proyectista puede adoptar, en base a las condiciones particulares de un determinado quiebre de alineamientos rectos, un radio de curva que cumpla lo mejor posible con las técnicas del diseño. Dicho radio lógicamente deberá ser igual o mayor que el radio mínimo exigido.

En caso que dicho radio coincida con el mínimo, el peralte responderá a su valor máximo. A medida que el radio adoptado sea mayor evidentemente menor será el peralte correspondiente.

Debe determinarse por lo tanto, para cada velocidad de diseño la variación del peralte en función del aumento de los radios de curva. Un extremo de esta variación es el peralte máximo establecido de acuerdo a las consideraciones anteriormente expuestas, y que define la máxima curvatura, y el otro extremo es cero, que corresponde a alineamientos rectos.

Para una velocidad de diseño determinada y grados de curvatura comprendidos entre $D = 0$ y D máximo, el peralte debe variar de manera tal que exista una relación lógica entre el coeficiente de rozamiento transversal y el valor del peralte aplicado.

Se presentan cuatro métodos para determinar la variación del peralte en función del aumento de los radios de curva:

- 1°) El peralte varía en relación lineal con el grado de curvatura, desde peralte nulo para $D = 0$ hasta peralte máximo para D máximo.
- 2°) Se consideran dos etapas en cuanto a la variación del peralte: la primera que parte de $D = 0$, en la cual la fuerza centrífuga es absorbida totalmente por el peralte hasta que éste adquiere su máximo valor, y la segunda, desde este último punto hasta D máximo, en la cual los incrementos de la aceleración centrífuga son absorbidos por el aumento en forma lineal del coeficiente de rozamiento.
- 3°) Vale el mismo razonamiento efectuado para el caso anterior, pero definiendo como límite de la primera etapa el mayor grado de curvatura que puede ser absorbido por el peralte máximo solamente (colaboración nula del rozamiento) pero considerando como velocidad no la de diseño sino la media de marcha.
- 4°) La variación del peralte está en relación curvilínea con el grado de curvatura, con valores comprendidos entre los métodos 1 y 3.

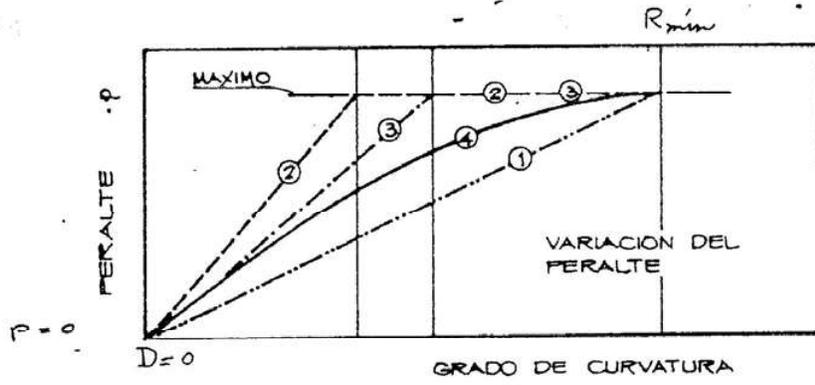


FIG. 4.6.1. VARIACION DEL PERALTE EN FUNCION DEL GRADO DE CURVATURA.

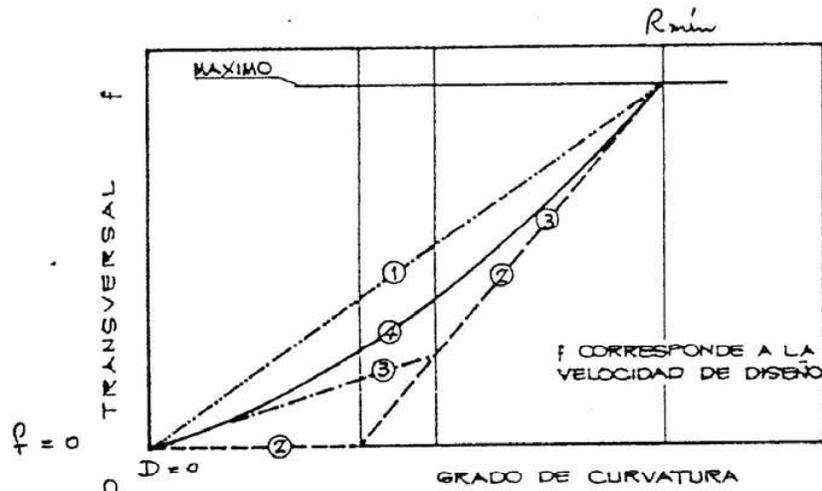


FIG. 4.6.2. VARIACION DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO TRANSVERSAL EN FUNCION DEL GRADO DE CURVATURA PARA VELOCIDAD DE DISEÑO.

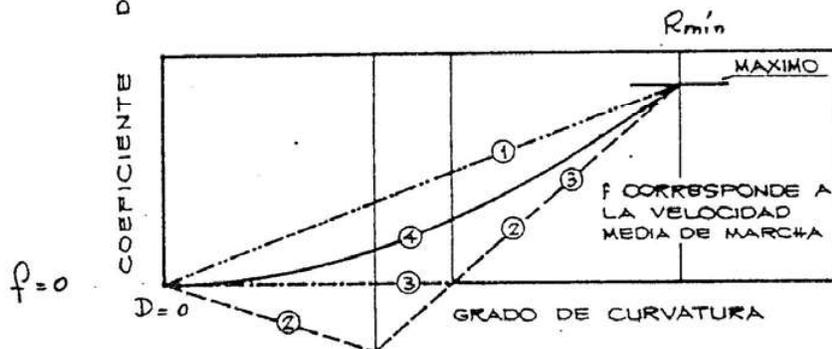


FIG. 4.6.3. VARIACION DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO TRANSVERSAL EN FUNCION DEL GRADO DE CURVATURA PARA VELOCIDAD MEDIA DE MARCHA.

La figura 46.1 presenta un esquema de las distintas variaciones del peralte en función del grado de curvatura; y las figuras 46.2 y 46.3 las variaciones del coeficiente de rozamiento en función del grado de curvatura para las velocidades de diseño y media de marcha respectivamente.

En el método 1 las variaciones del peralte y del coeficiente de rozamiento están en relación directa con la curvatura, es decir que los conductores que transiten sobre una determinada ruta a la velocidad de diseño soportarán efectos de peralte y rozamiento directamente proporcionales a los grados de curvatura de las curvas que recorran. Lo expresado puede parecer una distribución ideal de la variación del peralte y del coeficiente de rozamiento, pero esto tiene validez cuando la circulación de todos los vehículos se realiza a la velocidad de diseño, ya sea en los alineamientos rectos como en las curvas con sus variadas curvaturas.

Si bien la velocidad de diseño debería ser el objetivo de todos los conductores, se presenta en ellos una tendencia a circular más velozmente sobre los alineamientos rectos y sobre las curvas amplias que sobre las curvas de radios menores. Esta modalidad obligaría a tratar de proveer valores de peralte algo en exceso a los previstos con el método 1 en las curvas amplias.

Estas condiciones son contempladas en el método 2. Este sistema, utilizado en normas ya fuera de vigencia, trata de anular en lo posible la fuerza centrífuga no contrarrestada por el peralte, que actúa sobre el conductor. Con esta práctica no se requiere ningún rozamiento en el sistema neumático-calzada en aquellas curvas con peraltes menores que el máximo.

Este método presenta dos condiciones desfavorables. Una de ellas es que la brusca variación del peralte y del coeficiente de rozamiento en función del grado de curvatura no ofrece condiciones aceptables en la circulación vehicular. La otra es que todo vehículo que circule a la velocidad media de marcha estará sometido a esfuerzos de rozamiento en el sistema neumático-calzada de sentido negativo, lo cual producirá sobre el conductor un efecto contrario al natural.

El método 3 es un intento de cubrir las deficiencias del sistema descrito anteriormente. Para ello finaliza la variación del peralte no ya en el grado de curvatura en el cual dicho peralte absorbe la totalidad de la fuerza centrífuga actuante sobre un vehículo que circula a la velocidad de diseño, sino en aquella curvatura que corresponde al vehículo circulando a la velocidad media de marcha. Este punto corresponde aproximadamente a la mitad del valor D máximo.

Con las anteriores condiciones, en esta primera etapa también colabora el rozamiento, aunque en menor grado, en aquellos vehículos que circulan a la velocidad de diseño. En cuanto a aquellos vehículos que circulan a la velocidad media de marcha la colaboración del rozamiento es nula hasta el momento en que se llega al valor máximo del peralte; es decir, no se presentan en ningún momento condiciones de rozamiento con sentido negativo.

Este método tiene, si bien en menor grado, las mismas desventajas del sistema anterior.

Para favorecer las características de sobrevelocidad que se presentan en curvas amplias es deseable que la variación del peralte se aproxime al obtenido mediante el método 3. Por otra parte también es conveniente el método 1 ya que la variación del peralte y del rozamiento presentan condiciones más satisfactorias.

Finalmente, el método 4 plantea una situación intermedia entre los métodos 1 y 3, adoptando una variación de carácter parabólico.-

En la figura 4.6.4 se grafican las variaciones de los peraltes en función del grado de curvatura, para distintas velocidades de diseño y para peraltes máximos de 6%, 8% y 10%, según lo establecido en el método 4.

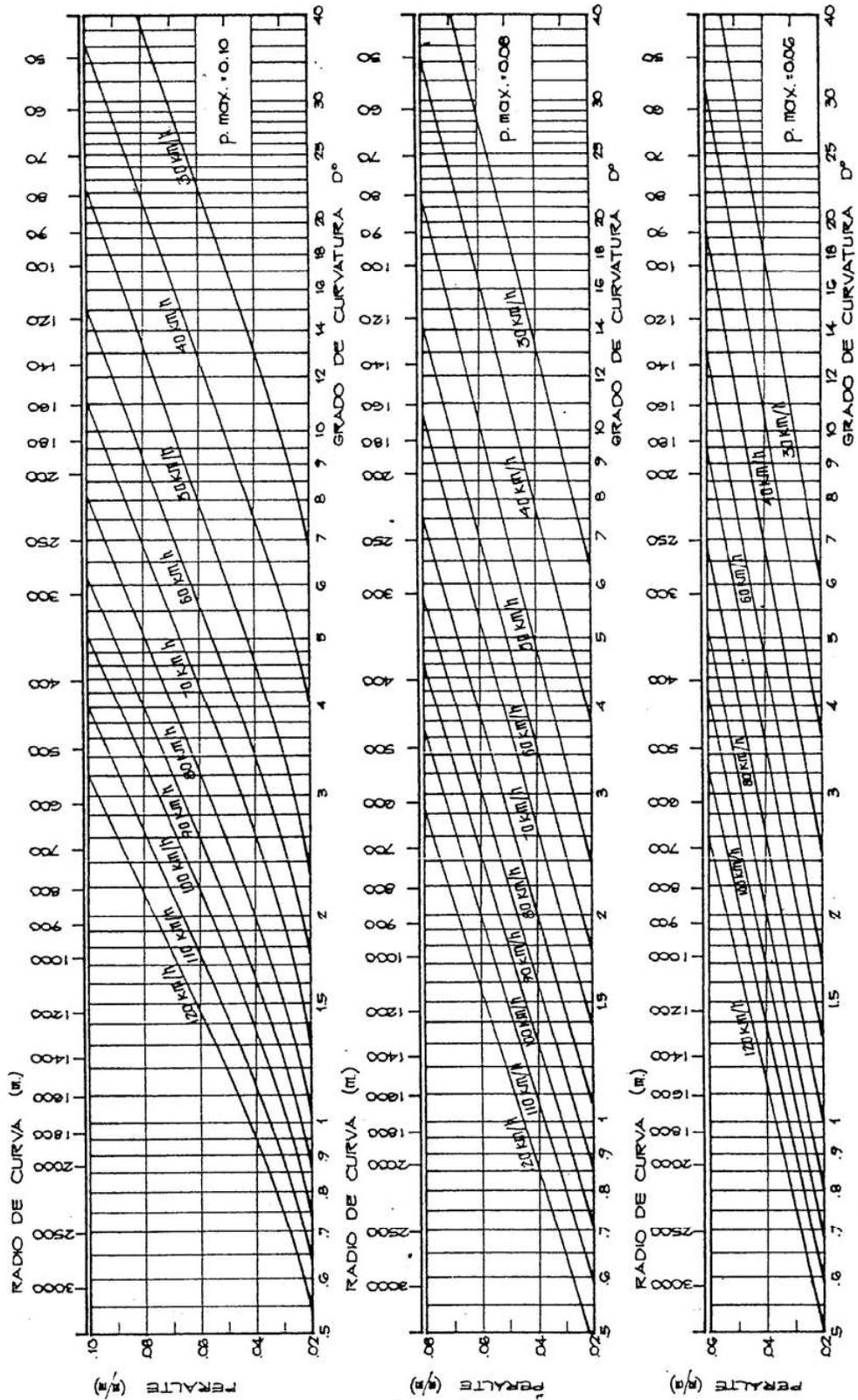


FIG. 4.6.4. VARIACION DEL PERALTE EN FUNCION DEL GRADO DE CURVATURA.

4.7.- CURVAS SIN PERALTE

El gálibo de una calzada presenta pendientes transversales que oscilan entre 1,5% y 2% de acuerdo al tipo de pavimento.

Un vehículo que ingresa a una curva sin peraltar con giro hacia la derecha, encuentra alguna forma de peralte en la pendiente transversal que forma el gálibo normal de la calzada. Por el contrario aquel vehículo que ingresa en una curva con giro a la izquierda, encuentra condiciones de peralte negativo. Ahora bien, si la curva es suficientemente amplia, el rozamiento transversal provee el esfuerzo necesario para contrarrestar la fuerza centrífuga emergente y el peralte negativo.

Debe establecerse, por lo tanto, un criterio de diseño por el cual se definan las condiciones a partir de las cuales no es necesario peraltar las curvas.

AASHO 1965 adopta como criterio genérico peraltar todas las curvas que requieran peraltes iguales o superiores a 2%. Además establece que en aquellos casos en que no se peralten curvas y se presenten en el sistema neumático-calzada, para vehículos que circulen a la velocidad media de marcha, valores del coeficiente de rozamiento superiores a 0,024 se modifique el gálibo normal. Esta modificación puede ejecutarse rotando la semicalzada que provee peralte negativo hasta una posición horizontal, o bien continuando la rotación hasta que ambos carriles formen un mismo plano inclinado.

Tomando como válido este criterio, que logra prudentes condiciones de seguridad en la circulación vehicular, podemos establecer las siguientes normas:

1°) Debe desarrollarse el peralte en todo alineamiento curvo que requiera peraltes iguales o superiores al 2%.

2°) Se mantiene el gálibo normal de los alineamientos rectos en todo alineamiento curvo en el cual, para aquellos vehículos que circulen a la velocidad media de marcha, los valores del coeficiente de rozamiento no superen 0,024.

Esta condición se presenta en calzadas con pendientes transversales menores de 1,5% , con radios de curva superiores a los expresados en la tabla siguiente:

Tabla 4.7.1.- RADIOS MINIMOS PARA GALIBO NORMAL PENDIENTE TRANSVERSAL = 1,5%				
VELOCIDAD (km/h)		RADIO MINIMO (m)	VALORES DE f PARA PERALTE NEGATIVO	
DISEÑO	MEDIA DE MARCHA		a V _D	a V _{MM}
30	30	790	0,024	0,024
40	39	1340	0,024	0,024
50	47	1940	0,025	0,024
60	55	2650	0,026	0,024
70	63	3480	0,026	0,024
80	71	4420	0,027	0,024
90	78	5340	0,027	0,024
100	85	6340	0,028	0,024
110	91	7260	0,028	0,024
120	98	8420	0,029	0,024

En aquellas calzadas con pendientes transversales mayores de 1,5% , las condiciones que permiten mantener el galibo normal se presentan para radios muy grandes, generalmente no utilizados en la práctica.

3°) En los casos intermedios se rota, sobre el eje de la calzada, la semibóveda con pendiente que origina peralte negativo hasta que la misma adopte una posición horizontal. La rotación también puede ser continuada hasta que la totalidad de la calzada tenga una pendiente uniforme igual a la del carril interno de la curva. El semigalibo horizontal no es aconsejable pues no provee las condiciones mínimas de desagüe.

4.8.- CURVAS DE TRANSICION

El cambio de dirección en la circulación de un vehículo no puede ser efectuado en forma instantánea ya que ello provocaría una brusca variación de la aceleración centrífuga. Por ello todo vehículo, cuando entra o sale de una determinada curva, desarrolla una trayectoria de transición entre el alineamiento recto y el grado de curvatura correspondiente a la misma.

La trayectoria delineada varía en función de la velocidad de circulación, el radio de la curva, el peralte, el tipo y estado de la superficie de rodamiento, y la habilidad del conductor.

Para una moderada velocidad y un elevado radio de curva, un conductor medianamente hábil puede desarrollar, con suficiente comodidad, una trayectoria de transición dentro de los límites del ancho normal del carril.

Para elevadas velocidades y bajos radios de curva, la transición puede ser lograda mediante la ocupación parcial del carril adyacente, con todos los peligros que ello implica, o bien mediante una brusca maniobra dentro de los límites físicos del propio carril. Esta operación puede provocar desde una sensación de malestar en el usuario, hasta problemas en cuanto a la seguridad misma en la circulación.

Para evitar estas condiciones deben establecerse normas de diseño que permitan a los vehículos circular en todo momento dentro de sus respectivos carriles con absolutas condiciones de seguridad y confort.

Como criterio de diseño para controlar las condiciones de circulación expresadas anteriormente se establece la intercalación de elementos de transición con curvatura variable entre alineamientos rectos y curvos, y curvos entre sí de diferentes radios.

Las principales ventajas que ofrecen dichas curvas de transición son las siguientes:

1º.- Proveen una trayectoria fácil de desarrollar por los conductores, en la cual la aceleración centrífuga varía gradualmente entre un valor cero para el alineamiento recto y su valor máximo para el grado de curvatura correspondiente. Esto permite reducir la ocupación indebida de los carriles adyacentes, tiende a promover una mayor uniformidad en la velocidad de circulación, y logra mejores condiciones de seguridad. -

2º.- Su longitud permite desarrollar altimétricamente el peralte, desde el valor cero correspondiente al alineamiento recto, hasta el concerniente a la curva circular.

3º.- Facilitan de igual manera el desarrollo del sobrecancho.

4º.- Modelan estéticamente las curvas mejorando el efecto visual producido por el desarrollo del peralte.

La transición puede ser desarrollada mediante curvas con variación continua del grado de curvatura, o bien por medio de sucesivos arcos de curva circulares de radios diferentes.

Este último sistema se utiliza solamente para lograr transición de curvas circulares de pequeño radio y su uso queda prácticamente relegado al diseño de ramas de enlace en cruces de rutas a nivel. Este tipo de transición recibe el nombre de curvas compuestas.

La transición continua se resuelve generalmente mediante la espiral de Arquímedes o clotoide. La ecuación de dicha curva responde a la siguiente expresión:

$$\frac{1}{R} = K \cdot L \quad 4.8.1$$

siendo R radio de curva en un punto P determinado
 K constante de la ecuación
 L desarrollo del arco de la curva desde su origen hasta dicho punto P

4.9.- LONGITUD DE LA ESPIRAL

La longitud mínima de una espiral de transición que permita optimizar las condiciones de circulación queda determinada por los siguientes requerimientos:

a) Variación de la aceleración centrífuga

La fuerza centrífuga no absorbida por el peralte p al final de la transición estará dada por la siguiente expresión:

$$\frac{P}{g} a = \frac{P}{g \cdot R} \cdot \frac{v^2}{(3,6)^2} - P \cdot p \quad 4.9.1$$

siendo P peso del vehículo, en tn
 R radio de la curva, en m
 v velocidad de diseño, en km/h
 a aceleración centrífuga, en m/s^2
 g aceleración de la gravedad, en m/s^2

La aceleración centrífuga remanente puede ser expresada:

$$a = 0,0772 \frac{v^2}{R} - g \cdot p \quad 4.9.2$$

Si se denomina t al tiempo en segundos que tarda un vehículo, que circula a la velocidad de diseño, en recorrer la longitud total de una espiral de transición, puede expresarse:

$$t = 3,6 \frac{L_e}{v} \quad 4.9.3$$

siendo L_e longitud de la curva de transición, en m
 v velocidad de diseño, en km/h

La aceleración centrífuga pasará en ese tiempo t de un valor cero en el alineamiento recto a su valor máximo a correspondiente al punto de empalme con la curva circular de radio R . La variación de la aceleración en la unidad de tiempo será:

$$\Delta a = \frac{a}{t} = \frac{1}{t} \left(0,0772 \frac{V^2}{R} - g \cdot p \right) \quad 4.9.4$$

Reemplazando t según 4.9.3:

$$\Delta a = \frac{V}{3,6 Le} \left(0,0772 \frac{V^2}{R} - g \cdot p \right) \quad 4.9.5$$

$$Le = 2,73 \frac{V}{\Delta a} \left(0,00787 \frac{V^2}{R} - p \right) \quad 4.9.6$$

expresión que define la longitud mínima de una espiral de transición en función de la variación de la aceleración centrífuga.

En carreteras las condiciones de confort en la circulación limitan la variación de la aceleración centrífuga a valores máximos comprendidos entre $0,3 \text{ m/s}^2$ y $1,0 \text{ m/s}^2$. Numerosos autores adoptan como valor de diseño una variación igual a $0,6 \text{ m/s}^2$.

En la tabla 4.9.1 se expresan los valores mínimos de longitudes de espiral que cumplen con esta condición para una variación de la aceleración igual a $0,6 \text{ m/s}^2$, considerando para cada velocidad los radios mínimos (máximo rozamiento y peralte admitidos).

Tabla 4.9.1.- LONGITUDES MINIMAS DE ESPIRALES DE TRANSICION EN FUNCION DE LA ACELERACION CENTRIFUGA PARA RADIOS MINIMOS										
VELOCIDAD DE DISEÑO (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
LONGITUD MINIMA DE ESPIRAL (m)	23	31	36	41	48	51	53	59	60	60

b) Desarrollo del peralte

Se define como desarrollo del peralte a la variación del perfil transversal de la calzada entre la última sección del alineamiento recto y la sección con el peralte correspondiente al radio de la curva circular.

Es necesario, por lo tanto, establecer una longitud mínima de espiral de transición que permita desarrollar el peralte con aceptables condiciones en cuanto al confort del usuario y al aspecto estético de la conformación planialtimétrica de la calzada.

Esta condición demanda por lo general mayores longitudes de curva de transición que las requeridas según el criterio anterior.

AASHO 1965 adopta como criterio de diseño para satisfacer las condiciones de estética y confort en cuanto al desarrollo del peralte, la limitación de los valores de la pendiente relativa entre borde y eje de calzada (diferencia entre la pendiente longitudinal del eje y la del borde de pavimento). La misma no debe sobrepasar los valores límites graficados en la figura 4.9.1.

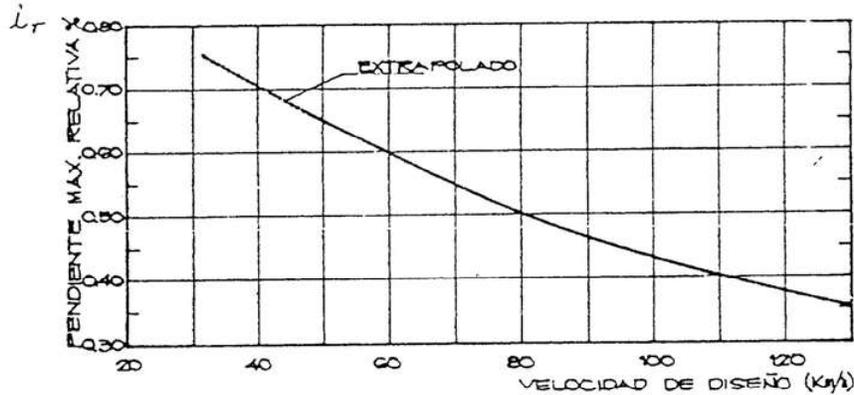


FIG. 4.9.1. MÁXIMA PENDIENTE RELATIVA ENTRE EJE Y BORDE DE PAVIMENTO EN CALZADA DE DOS CARRILES.

En la tabla 4.9.2 se expresan las longitudes mínimas de espirales de transición en función del desarrollo del peralte para distintos anchos de carril y velocidades de diseño.

$$L_e = \frac{1}{2} ac \cdot \frac{p}{L_r} \quad ac = \text{ancho de calzada}$$

En rutas de elevadas categorías se recomienda adoptar longitudes de espirales superiores a las expresadas en la tabla 4.9.2.

Para calzadas multicarriles AASHO recomienda afectar los valores de longitudes mínimas de la tabla 4.9.2 de los siguientes coeficientes C:

Para calzadas de 3 carriles C = 1,2
 Para calzadas de 4 carriles C = 1,5
 Para calzadas de 6 carriles C = 2,0

TABLA 4.9.2.- LONGITUDES MINIMAS DE ESPIRALES DE TRANSICION EN FUNCION DEL DESARROLLO DEL PERALTE

ANCHO DE CARRIL (m)	PERALTE (%)	LONGITUD MINIMA DE ESPIRAL Le (m) PARA DISTINTAS VELOCIDADES DE DISEÑO (km/h)									
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
3,65	4	19	21	22	24	27	29	32	34	36	38
	6	29	31	34	37	40	44	48	51	55	58
	8	39	42	45	49	53	58	63	68	73	77
	10	49	52	56	61	66	73	79	85	91	96
3,35	6	27	29	31	34	37	40	44	47	50	53
	8	36	38	41	45	49	54	58	62	67	70
	10	45	48	52	56	61	67	73	78	84	88
3,05	6	24	26	28	31	33	37	40	43	46	48
	8	33	35	38	41	44	49	53	57	61	64
	10	41	44	47	51	56	61	66	71	76	80

c) Apariencia visual del trazado

Las normas AASHO estiman que las exigencias de apariencia visual del trazado de la carretera quedan ampliamente cubiertas si un vehículo, circulando a la velocidad de diseño, tarda ^{por lo} no menos de dos segundos en recorrer el total de la transición.

Esta condición establece entonces como límite aquella longitud de transición que permita a los vehículos recorrer el total de la espiral en un tiempo de dos segundos. Esto puede ser expresado mediante la siguiente ecuación:

$$Le = 0,556 \cdot v \quad 4.9.7$$

En la tabla 4.9.3 se consignan las longitudes minimas de espiral que responden a la ecuación 4.9.7:

TABLA 4.9.3.- LONGITUDES MINIMAS DE ESPIRALES DE TRANSICION EN FUNCION DE LA APARIENCIA VISUAL DEL TRAZADO

VELOCIDAD DE DISEÑO (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
LONGITUD MINIMA DE ESPIRAL (m)	17	22	28	33	39	44	50	56	61	67

De las tres condiciones expresadas que determinan la longitud mínima de la espiral de transición, debe adoptarse para cada caso el mayor valor, por ser el que define la situación crítica.

4.10.- DESARROLLO DEL PERALTE

Antes de entrar en la transición debe rotarse el carril externo de la calzada hasta que quede horizontal, a fin de no entrar en la curva con peralte negativo. Esto se implementa sobre el alineamiento recto en una sección inmediatamente anterior al punto de enlace con el principio de la curva de transición (TE). Esta sección recibe el nombre de tangente extendida.

En forma similar a lo expresado para definir la longitud de la espiral de transición, puede adoptarse como criterio para determinar la longitud de la tangente extendida, la limitación de la pendiente relativa entre borde y eje de la calzada. En base a estas consideraciones se transcriben en la tabla 4.10.1 los valores mínimos de longitud de tangente extendida para anchos de carril de 3,65 m y 3,05 m, y distintas pendientes transversales, correspondientes al gálibo normal en alineamientos rectos.

TABLA 4.10.1.- LONGITUDES MINIMAS DE TANGENTE EXTENDIDA

ANCHO CARRIL (m)	PEND. TRANSV. (%)	LONGITUD MINIMA TANGENTE EXTENDIDA (m) PARA VELOCIDADES DE DISEÑO (km/h)									
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
3,65	1,5	7	8	8	9	10	11	12	13	14	15
	2,0	10	10	11	12	13	15	16	17	18	19
	2,5	12	13	14	15	17	18	20	21	23	24
3,05	1,5	6	7	7	8	8	9	10	11	12	12
	2,0	8	9	9	10	11	12	13	14	15	16
	2,5	10	11	12	13	14	15	17	18	19	20

$$l_{g. ext.} = 2_{carril} \frac{v_c}{L_r}$$

El desarrollo del peralte debe ser realizado totalmente dentro de la espiral de transición a fin de entrar en la curva circular con el valor del peralte correspondiente.

En curvas sin transición generalmente se desarrolla la parte del peralte sobre el alineamiento recto y parte sobre el curvo. Es aceptada la práctica de ubicar la mayor parte del desarrollo del peralte sobre el alineamiento recto. Como criterio general puede desarrollarse entre el 60% y el 80% del peralte sobre el alineamiento recto en este tipo de curvas.

Se presentan tres métodos para desarrollar el giro del peralte:

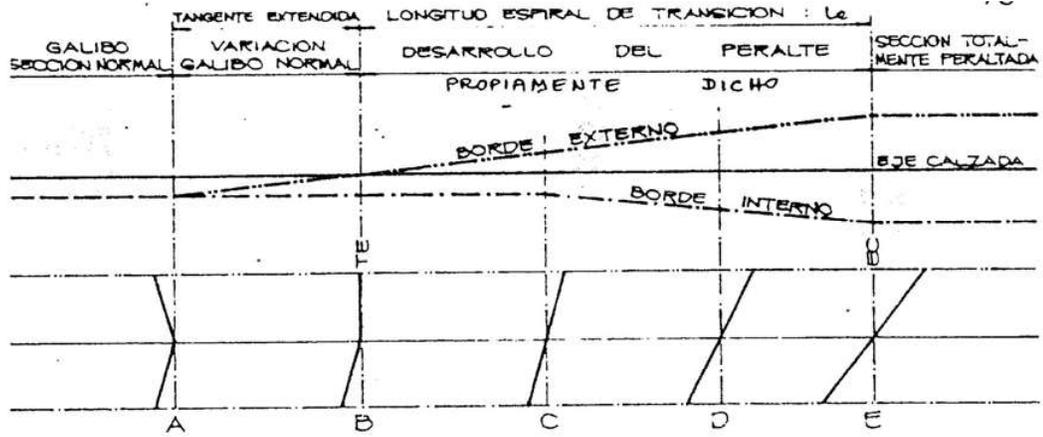
- 1.- rotación del perfil transversal alrededor del eje de la calzada
- 2.- rotación del perfil transversal alrededor del borde interno de la calzada
- 3.- rotación del perfil transversal alrededor del borde externo de la calzada

En la figura 410.1 se representan gráficamente los diferentes sistemas para desarrollar el peralte.-

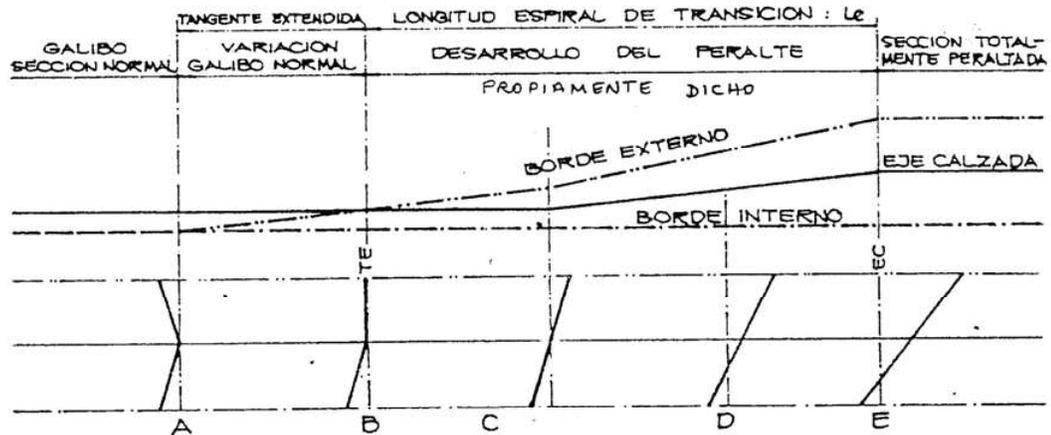
El esquema I de dicha figura indica el desarrollo mediante la rotación del perfil transversal alrededor del eje de la calzada. Este criterio es el más ampliamente utilizado ya que es el que provoca la menor distorsión en el alabeo de la calzada.

El esquema II corresponde al desarrollo mediante el giro alrededor del borde interno. Se utiliza este método cuando las necesidades del proyecto (movimiento de suelos, desagües, drenajes, etc.) no permiten el hundimiento del borde interno de la calzada.

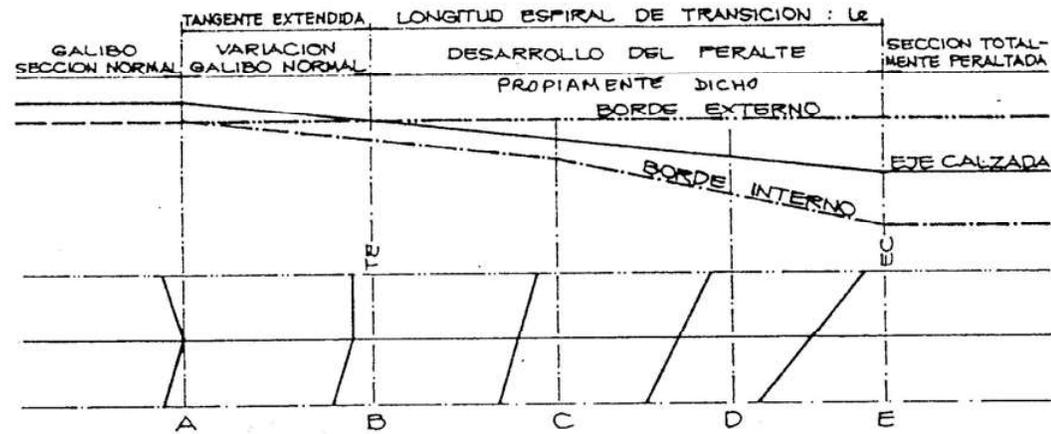
Por último, el esquema III representa el desarrollo mediante el giro alrededor del borde externo. Si bien este método provoca una fuerte depresión de la calzada además de una mayor distorsión en cuanto al alabeo de su superficie, presenta condiciones de apariencia general más favorables ya que no provoca cambios de pendiente en el borde exterior, borde que más se evidencia en el campo visual del conductor.



I GIRO ALREDEDOR DEL EJE.



II GIRO ALREDEDOR DEL BORDE INTERNO.



III GIRO ALREDEDOR DEL BORDE EXTERNO.

FIG.410.1. ESQUEMAS DE DESARROLLO DEL PERALTE.

Al desarrollar el peralte, cualquiera sea el método utilizado, se presenta una secuencia de variaciones del perfil transversal de la calzada entre el gálibo normal parabólico correspondiente al alineamiento recto, y la sección totalmente peraltada en correspondencia con la curva circular de radio R .

La variación del gálibo se inicia en la sección A, donde comienza a rotar el carril externo hasta alcanzar su posición horizontal. Esta etapa finaliza en la sección B y corresponde a la denominada tangente extendida.

A partir de B, comienzo del desarrollo del peralte propiamente dicho, se provoca la rotación del carril externo hasta lograr la pendiente que tiene el carril interno en el gálibo normal. En el sistema III este giro provoca un descenso del carril interno sin cambiar su pendiente. Esta secuencia finaliza en C; a partir de allí se rota el total de la sección transversal de la calzada (que ya responde a una única pendiente) sobre el punto de giro correspondiente (eje, borde interno o borde externo), hasta lograr la sección totalmente peraltada en coincidencia con el punto de enlace entre la espiral de transición y la curva circular de radio R (EC) en la sección E.

Considerando las numerosas variables que pueden presentarse en un diseño de rasante (movimiento de suelos, pendientes críticas, exigencias del desagüe y del drenaje, etc.) no pueden fijarse reglas preestablecidas en cuanto a los rangos de utilización de los tres métodos mencionados anteriormente. En cada caso particular la adopción del método para desarrollar el peralte debe ser consecuencia de un estudio que permita lograr la condición óptima.

En general el método más usualmente utilizado es el de rotación alrededor del eje de la calzada.

Los desarrollos de las líneas de eje y bordes de la figura 4.10.1 presentan quiebres en diversos puntos. Estos quiebres deben ser suavizados mediante curvas verticales que permitan un diseño con condiciones favorables de estética y seguridad.

El método del esquema I requiere curvas verticales más cortas ya que los quiebres en el caso de los máxi-

mos peraltes varían de 0,75% para velocidades de 30 km/h, a 0,38% para velocidades de 120 km/h. Los otros dos métodos presentan quiebres de mayor magnitud.

Como método empírico para calcular la longitud de la curva puede usarse la siguiente expresión:

$$L_d = 0,2 V \quad 4.10.1$$

siendo L_d longitud de la curva, en m
 V velocidad de diseño, en km/h

En cuanto al acotamiento de la curva, en general se resuelve gráficamente mediante la utilización de gálibos o plantillas con curvaturas variables.

4.11.- DESARROLLO DEL PERALTE EN CALZADAS SEPARADAS

De acuerdo a las características del separador central pueden presentarse tres casos generales para resolver el desarrollo del peralte:

Caso A.- El total de las calzadas, incluyendo el separador central, se peralta con una única pendiente transversal.

Caso B.- El separador central queda en posición horizontal rotando ambas calzadas alrededor de los bordes del separador central.

Caso C.- Las dos calzadas desarrollan independientemente su peralte dando en consecuencia una diferencia de cotas variable entre ambos bordes centrales.

El caso A queda relegado a separadores centrales angostos y peraltes moderados, ya que de otro modo se presentarían fuertes diferencias de cotas entre los bordes centrales de las calzadas. En la mayoría de estos casos se utiliza el sistema I para desarrollar el peralte (rotación alrededor del eje).

El caso B se aplica en calzadas con separadores centrales de anchos moderados. El giro del peralte se efectúa alrededor de los bordes centrales de las calzadas (sistemas II y III). Este método puede ser también utilizado en separadores centrales anchos en zonas llanas.

El caso C es utilizado en calzadas con separadores centrales de anchos mayores a 12 metros. El peralte se desarrolla en forma independiente para cada calzada por cualquiera de los tres métodos conocidos, y los bordes internos de las calzadas quedan unidos mediante una pendiente variable.

Para el caso A es conveniente incrementar la longitud mínima de la espiral con un coeficiente igual a la relación entre el ancho total de las calzadas más el separador central y la correspondiente calzada tipo de carriles indivisos. En separadores centrales con anchos inferiores a 2,40 metros este incremento puede ser despreciado dado su escaso valor.

En el caso B las longitudes mínimas de la curva de transición en carreteras de dos carriles para cada sentido de circulación con separadores centrales de anchos inferiores a 4,50 metros, son las mismas que las expresadas en las tablas 4.12.1, 4.12.2 y 4.12.3 para calzadas con cuatro carriles indivisos. Para calzadas de tres carriles por cada sentido de circulación las longitudes de la espiral son las mismas que las correspondientes a calzadas indivisas de seis carriles.

Para separadores centrales con anchos mayores de 4,50 metros, ya sea en los casos B o C, pueden ser utilizadas para cada una de las calzadas separadas las longitudes mínimas de espiral correspondientes a la respectiva calzada tipo de carriles indivisos.

Las carreteras con calzadas separadas deben ser diseñadas con condiciones estéticas más favorables que las indivisas, ya que el costo de las mejoras correspondientes son insignificantes en relación al costo total de las obras.

4.12.- ELEMENTOS PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO. TABLAS

En las tablas 4.12.1, 4.12.2 y 4.12.3 se consignan los valores de radios mínimos y longitudes mínimas de espiral para peraltes máximos de 6%, 8% y 10% respectivamente, en calzadas de dos y cuatro carriles indivisos.

Asimismo se expresan las variaciones del peralte y las respectivas longitudes mínimas de transición para radios variables entre 30 metros y 5.000 metros.

Los valores de los radios y de las longitudes mínimas de espiral adoptados responden en su mayor parte a los tabulados en la publicación "Curvas con transiciones para caminos" de Joseph Barnett, de uso general en nuestro país, ya que los mismos cubren satisfactoriamente la gama de valores necesarios para el diseño vial.

Grados de curvatura inferiores a los consignados bajo la línea negra no requieren espirales de transición. No obstante puede ser deseable su empleo.

Las longitudes mínimas de espiral se han calculado para anchos de carril de 3,65 metros. Anchos menores pueden requerir longitudes algo menores aunque no es recomendable tal reducción. En casos de extrema necesidad pueden obtenerse las longitudes mínimas de espiral en la tabla 4.9.2 debiendo ser verificados estos valores con las tablas 4.9.1 y 4.9.3.

Los peraltes menores de 2%, de acuerdo a lo expresado anteriormente, no necesitan ser desarrollados siendo suficiente rotar la semicalzada que proveería peralte negativo hasta llevarla en coincidencia con la pendiente correspondiente a la otra semicalzada. Esta operación suele denominarse modificación del gálibo normal (G.M.).

Para calzadas con pendientes transversales iguales o inferiores a 1,5% puede dejarse el gálibo normal para radios superiores a los consignados en la tabla 4.7.1.

TABLA 4.12.1. ELEMENTOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO CURVAS HORIZONTALES
CARRETERAS RURALES CALZADAS INDIVISAS

GRADO DE CURVATURA D°	V: 30 Km/h		V: 40 Km/h		V: 50 Km/h		V: 60 Km/h		V: 70 Km/h		V: 80 Km/h		V: 90 Km/h		V: 100 Km/h		V: 110 Km/h		V: 120 Km/h		RADIO R m.	p. 6%
	R	p. %	Le m.	p. %	Le m.	p. %	Le m.	p. %	Le m.	p. %	Le m.	p. %	Le m.	p. %	Le m.	p. %	Le m.	p. %	Le m.	p. %		
56.21	30	60	30																		30	56.21
43.66	40	5.2	30	R min.: 55																	40	43.66
34.93	50	5.2	30	6.0	4.0																50	34.93
29.11	60	4.9	30	5.8	3.0																60	29.11
24.76	70	4.6	30	5.5	3.0																70	24.76
21.83	80	4.4	30	5.3	3.0																80	21.83
17.40	90	4.2	20	5.1	3.0	R min.: 90															90	17.40
17.46	100	4.0	20	4.9	3.0	6.0	4.0														100	17.46
14.55	120	3.6	20	4.6	3.0	5.8	4.0	R min.: 135													120	14.55
12.47	140	3.3	20	4.3	3.0	5.1	3.0	6.0	4.0												140	12.47
10.91	160	3.0	20	4.0	3.0	4.8	3.0	5.6	4.0	R min.: 184											160	10.91
9.70	180	2.8	20	3.8	3.0	4.6	3.0	5.4	4.0	6.0	5.0										180	9.70
8.73	200	2.6	20	3.6	3.0	4.4	3.0	5.2	4.0	5.8	5.0										200	8.73
7.94	220	2.5	20	3.4	3.0	4.2	3.0	5.0	4.0	5.6	4.0										220	7.94
6.99	250	2.2	20	3.2	3.0	4.0	3.0	4.8	4.0	5.3	4.0										250	6.99
5.82	300	2.0	20	2.9	3.0	3.7	3.0	4.4	4.0	5.0	4.0										300	5.82
4.99	350	G.M.	20	2.6	3.0	3.4	3.0	4.1	4.0	4.7	4.0										350	4.99
4.37	400		20	2.4	3.0	3.1	3.0	3.9	4.0	4.4	4.0										400	4.37
3.49	500		20	2.0	3.0	2.7	3.0	3.4	4.0	4.0	4.0										500	3.49
2.71	600		20	G.M.	3.0	2.3	3.0	3.0	4.0	3.6	4.0										600	2.71
2.18	800		20		3.0	2.0	3.0	2.5	4.0	3.0	4.0										800	2.18
1.75	1000		20		G.M.	3.0	2.0	2.0	4.0	2.6	4.0										1000	1.75
1.46	1200		20					G.M.	4.0	2.2	4.0										1200	1.46
1.16	1500		20							G.M.	4.0										1500	1.16
0.87	2000		20							G.M.	5.0										2000	0.87
0.70	2500		20								5.0										2500	0.70
0.58	3000		20								G.M.										3000	0.58
0.41	4000		20																		4000	0.41
0.35	5000		20																		5000	0.35

FERALTE MÁXIMO 6%
 V VELOCIDAD DE DISEÑO, Km/h.
 P FERALTE, %
 Le LONGITUD MÍNIMA DE ESPIRAL, m.
 Rmin: RADIO MÍNIMO DE CURVA, m.
 G.M.: GALIBO MODIFICADO ROTANDO LA PENDIENTE QUE PROVOCA PEALTE NEGATIVO.
 LOS RADIOS DEBAJO DE LA LINEA NEGRA NO REQUEREN CURVAS DE TRANSICIÓN.

TABLA 12.2. ELEMENTOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO CURVAS HORIZONTALES CALZADAS INDIVISAS

$P = 8\%$

GRADO DE CURVATURA D°	RADIO R m.	V: 30 Km/h		V: 40 Km/h		V: 50 Km/h		V: 60 Km/h		V: 70 Km/h		V: 80 Km/h		V: 90 Km/h		V: 100 Km/h		V: 110 Km/h		V: 120 Km/h			
		P %	Le m.	P %	Le m.	P %	Le m.	P %	Le m.	P %	Le m.												
58.21	30	7.7	40																				
43.06	40	7.1	40																				
34.73	50	6.6	40																				
27.11	60	6.1	30	7.6	40																		
24.76	70	5.7	30	7.2	40																		
21.83	80	5.3	30	6.8	40																		
17.40	90	5.0	30	6.5	40																		
14.55	100	4.7	30	6.2	40																		
12.47	120	4.2	20	5.7	30	6.7	40																
10.71	160	3.4	20	4.8	30	6.1	40																
9.70	180	3.2	20	4.6	30	5.8	40																
8.73	200	2.9	20	4.3	30	5.5	40																
7.94	220	2.6	20	4.0	30	5.2	30																
6.99	260	2.3	20	3.7	30	4.7	30																
5.82	300	G.M.	20	3.2	30	4.4	30																
4.37	400			2.8	30	4.0	30																
3.49	500			2.4	30	3.7	30																
2.71	600			G.M.	30	3.1	30																
2.18	800					2.5	30																
1.75	1000					2.0	30																
1.46	1200					G.M.	30																
1.16	1500																						
0.87	2000																						
0.70	2500																						
0.58	3000																						
0.44	4000																						
0.35	5000																						

PERALTE MÁXIMO 8%
V: VELOCIDAD DE DISEÑO, Km/h.
P: PERALTE, %.
Le: LONGITUD MÍNIMA DE ESPIRAL, m.
R_{min}: RADIO MÍNIMO DE CURVA, m.
G.M.: GALIBO MODIFICADO ROTANDO LA PENDIENTE QUE PROVOCA PERALTE NEGATIVO. LOS RÁPIDOS DEBAJO DE LA LÍNEA NEGRA NO REQUIEREN CURVAS DE TRANSICIÓN.

TABLA 4.12.3: ELEMENTOS DE DISEÑO GEOMÉTRICO CURVAS HORIZONTALES
CALZADAS INDIVIDUAS

GRADO DE CURVATURA D° **RADIO R m.** **V: 30 Km/h** **V: 40 Km/h** **V: 50 Km/h** **V: 60 Km/h** **V: 70 Km/h** **V: 80 Km/h** **V: 90 Km/h** **V: 100 Km/h** **V: 110 Km/h** **V: 120 Km/h** **p.10%**

GRADO DE CURVATURA D°	RADIO R m.	V: 30 Km/h		V: 40 Km/h		V: 50 Km/h		V: 60 Km/h		V: 70 Km/h		V: 80 Km/h		V: 90 Km/h		V: 100 Km/h		V: 110 Km/h		V: 120 Km/h		RADIO R m.	GRADO DE CURVATURA D°
		Le m.	p %	Le m.	p %	Le m.	p %	Le m.	p %	Le m.	p %	Le m.	p %	Le m.	p %	Le m.	p %	Le m.	p %	Le m.	p %		
58.21	30	9.4	50	50	R min.: 47																	30	58.21
43.66	40	8.4	50	100	60																	40	43.66
34.73	50	7.6	40	9.8	50																	50	34.73
27.11	60	6.9	40	9.1	50																	60	27.11
24.76	70	6.4	40	8.5	50																	70	24.76
21.83	80	5.9	30	8.0	50																	80	21.83
17.40	90	5.4	30	7.6	40																	90	17.40
14.55	100	5.0	30	7.2	40																	100	14.55
12.47	120	4.4	30	6.5	40																	120	12.47
10.71	140	3.8	20	5.9	40																	140	10.71
9.70	160	3.4	20	5.3	30																	160	9.70
8.73	180	3.0	20	4.9	30																	180	8.73
7.94	200	2.8	20	4.5	30																	200	7.94
6.77	220	2.5	20	4.2	30																	220	6.77
5.82	250	2.1	20	3.7	30																	250	5.82
4.77	300	G.M.	20	3.1	30																	300	4.77
4.37	350			2.6	30																	350	4.37
3.49	400			2.3	30																	400	3.49
2.71	500			G.M.	30																	500	2.71
2.18	600																					600	2.18
1.75	800																					800	1.75
1.46	1000																					1000	1.46
1.16	1200																					1200	1.16
0.87	1500																					1500	0.87
0.70	2000																					2000	0.70
0.58	2500																					2500	0.58
0.44	3000																					3000	0.44
0.36	4000																					4000	0.36
0.36	5000																					5000	0.36

PERALTE MÁXIMO 10 %
V: VELOCIDAD DE DISEÑO, Km/h.
p: PERALTE, %.
Le: LONGITUD MÍNIMA DE ESPIRAL, m.
Rmin: RADIO MÍNIMO DE CURVA, m.
G.M.: GALIBO MODIFICADO ROTANDO LA PENDIENTE QUE PRODUCA PERALTE NEGATIVO.
LOS RADIOS DEBAJO DE LA LÍNEA NEGRA NO REQUEREN CURVAS DE TRANSICIÓN.