

TRANSICIONES DE BOMBEO Y PERALTE

La concepción moderna del trazado parte de la premisa que la curvatura debe ser la guía inductora⁷ de la velocidad. La geometría del alineamiento está estrechamente vinculada con la velocidad que los conductores desarrollan en él, de aquí que sea necesario estudiar la total extensión de la ruta subdividiéndola en tramos no mayores de 5 Km. A cada uno de estos tramos se le analizará haciendo particular énfasis en su curvatura para evitar la dispersión de las velocidades de circulación.

Tramos con curvatura similar generan uniformidad de la velocidad, mientras que tramos con curvatura variante la dispersan. En cualquier caso, para una determinada velocidad de proyecto, no deben intercalarse radios mínimos entre radios muy superiores a él ya que los conductores, invariablemente, ajustarán su velocidad a la curvatura general del trazado resultando la curvatura fuerte una sorpresa riesgosa.

La presencia de condicionantes, como la topografía por ejemplo, no permite la uniformidad de radios deseada por lo que se hace inevitable la inserción de diferentes radios en los distintos tramos del trazado. Las experiencias tendientes a la solución del interrogante han sido numerosas y por ello la normativa vial de los diversos países difiere notablemente. La heterogeneidad de la composición del tráfico y la dispersión estadística de las velocidades hace difícil, si no imposible, adoptar una solución única. La manera en que el peralte se asigna, desde un valor máximo al mínimo, es denominada habitualmente distribución del peralte.

En Venezuela se ha empleado durante años el método de distribución del peralte desarrollado por el Departamento de Transporte de la División de Autopistas del Estado de California de los Estados Unidos de Norte América, comúnmente denominado 'Método de California'. Se basa ese procedimiento en la hipótesis de que las velocidades de circulación de los vehículos en las curvas son una función directa del radio. A esta velocidad así inducida, particular de cada radio, se le denomina velocidad directriz y por ello el concepto de curvatura va asociado a ella y consecuentemente al peralte. Con esto se quiere significar que a pesar de que todos los vehículos no se desplazan a la misma velocidad si es posible establecer estadísticamente el rango de variación de las velocidades dentro de una curva de de probabilidad.

⁷ También las longitudes rectas estimulan el aumento de la velocidad de circulación.

Indefectiblemente asociada a las curvas, dado como un hecho cumplido la asignación del peralte, ocurre la necesidad de dar a la calzada la inclinación transversal que corresponda desde el tramo recto, en bombeo total, al curvo, con el peralte plenamente desarrollado. Para el estudio de este contenido es necesario definir los conceptos 'Eje de Rotación', 'Longitud de Transición de bombeo' y 'Longitud de Transición de peralte':

EJE DE ROTACIÓN

Se denomina así al punto de la sección transversal sobre el que se efectuará la rotación que permitirá alcanzar el valor del peralte. Para el desvanecimiento del bombeo se empleará el mismo eje de rotación. En carreteras no divididas, o en aquellas con divisoria central igual o menor a 3 m, el eje de rotación coincide con el (*CL*), pero en determinadas circunstancias esta rotación convendría efectuarla por el borde interior, por ejemplo, en zonas muy planas donde, para romper la monotonía del trazado, interesaría destacar la apariencia de la curva. Si la carretera se proyecta con plataformas aisladas y el separador es mayor de 3 m, la rotación se hará independientemente por los bordes interiores de los canales inmediatos a la divisoria central.

TRANSICIONES DE BOMBEO Y PERALTE EN CURVAS CIRCULARES SIMPLES

Para lograr que el vehículo pase de una trayectoria rectilínea a una curva sin que los pasajeros —y aún los mismos componentes vehiculares— sufran los efectos de la aparición brusca de la fuerza centrípeta o se produzcan condiciones de inseguridad como riesgos de deslizamientos, es necesario dotar a la calzada de una sobreelevación que elimine o atenúe esos efectos negativos. Para ello se debe rotar la calzada alrededor del eje que define su perfil longitudinal. En la alineación recta se producirá el desvanecimiento del bombeo en una distancia denominada Longitud de Transición de bombeo (*LTb*). Inmediatamente a la transición de bombeo se encuentra la Longitud de Transición de peralte (*LTp*), distancia ésta sobre la que se concluirá la rotación de la calzada hasta desarrollar una inclinación transversal igual a la del peralte de la curva.

Esta inclinación de la calzada permanecerá constante a lo largo de un tramo de vía cuyo eje es un arco de circunferencia. Finalizado este tramo con peralte total se localiza otra transición de peralte cuya función es disminuir de manera gradual la pendiente transversal hasta llevarla a un valor cero.

Una segunda transición de bombeo, ya sobre el alineamiento recto, rotará los canales exteriores desde la pendiente transversal horizontal hasta la inclinación que corresponda al bombeo.

PENDIENTE RELATIVA DEL BORDE EXTERIOR

La longitud de la transición de peralte ha sido objeto de experimentación exhaustiva y en la tercera década del pasado siglo hacía su aparición en la ingeniería vial el concepto "Pendiente Relativa del Borde Exterior". El concepto aún perdura en su esencia pero los valores sugeridos para la "pendiente relativa" han variado con el tiempo y las latitudes. El elemento determinante de estos cambios ha sido la velocidad de circulación.

En líneas generales la pendiente relativa del borde exterior debe ser tal que permita la inclinación gradual, segura y confortable de la calzada sin que su presencia cause en el conductor una perspectiva engañosa de la curva.

Puesto que en todo el desarrollo del borde exterior la rata de variación es constante, la longitud de transición de peralte —y consecuentemente la de bombeo— pueden expresarse como una función lineal del desnivel máximo entre el eje y los bordes.

Así, los triángulos semejantes de la Figura 40 permiten establecer la siguiente relación de proporcionalidad:

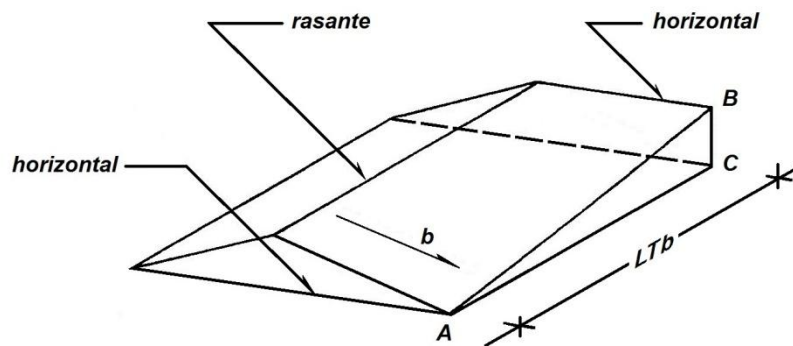


Figura 40 Esquema de la Transición de bombeo que antecede a una curva izquierda en una vía de calzada única.

$$\frac{LTP}{\Delta h_p} = \frac{LTb}{\Delta h_b} \quad \therefore \quad LTP = \frac{LTb \cdot \Delta h_p}{\Delta h_b} \dots \dots \dots (I)$$

donde Δh_b : desnivel por bombeo entre eje y borde de calzada.

Δh_p : desnivel por peralte entre eje y borde de calzada.

LTb : Longitud de Transición de bombeo.

LTP : Longitud de Transición de peralte.

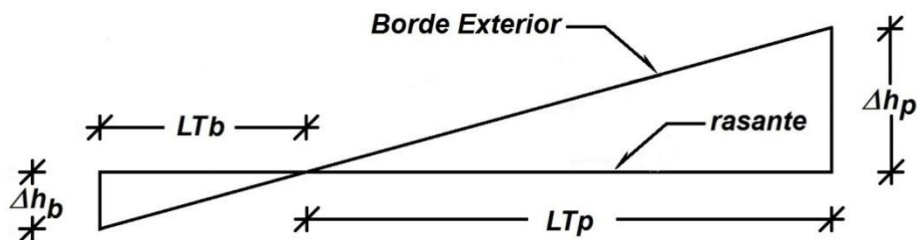


Figura 41 Esquema de la Pendiente Relativa del Borde Exterior en las Transiciones de bombeo y peralte.

Si analizamos ahora el triángulo **ABC**, rectángulo en **C**, de la **Figura 40**, encontramos que el desnivel por bombeo puede expresarse por: $\Delta h_b = a \cdot b$, donde "a" es la distancia entre el eje y el Borde Exterior del canal más alejado.

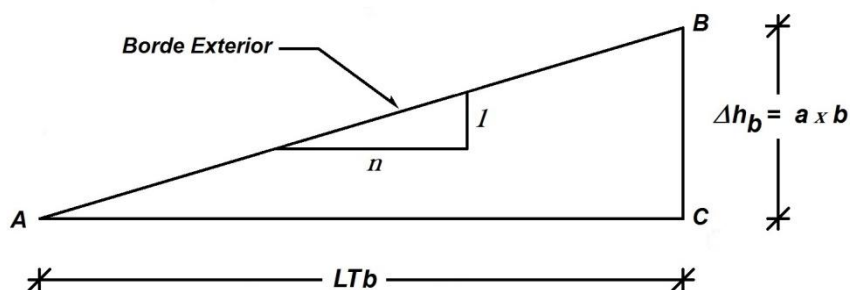


Figura 42 Esquema de la Pendiente relativa del Borde Exterior en la Longitud de Transición de bombeo.

Entonces la tangente del ángulo α es $1/n$, luego:

$$tg \alpha = \frac{a \cdot b}{LTb} = \frac{1}{n} \quad \therefore LTb = a \cdot b \cdot n \dots \dots \dots (II)$$

Sustituyendo (II) en (I) obtenemos:

$$LTp = \frac{a \cdot b \cdot n \cdot \Delta h_p}{a \cdot b} = n (\Delta h_p) \dots \dots \dots (III)$$

pero $\Delta h_p = a \cdot p$ y entonces $LTp = a \cdot p \cdot n^8$, donde n es la cotangente del ángulo de inclinación a del borde exterior con respecto al eje. En las figuras que anteceden, por simplificación, se ha supuesto la rasante horizontal. La pendiente del borde exterior en realidad se "relativiza" a la pendiente del eje.

Numerosas experiencias han concluido en que la pendiente relativa del borde exterior no debe ser única, sino que es la velocidad de proyecto el parámetro primordial a considerar y esto es intuitivamente entendible: variaciones bruscas de la pendiente

⁸ Para calzadas de 1 canal por sentido. Para 2 y 3 canales por sentido de circulación la aplicación de la formula daría lugar a transiciones de peralte muy largas por lo que las Normas Venezolanas prescriben $3/4(a \cdot p \cdot n)$ y $2/3(a \cdot p \cdot n)$, respectivamente.

longitudinal de la vía, cuando mal diseñada o controlada por fuerte topografía, causan sensaciones de cosquilleo y aun de vértigo en los ocupantes de los vehículos; si se aminora la velocidad desaparecerán, si se aumenta resultarán intolerables.

La Norma de la AASHTO da por apropiado un valor de pendiente relativa ($1/n$) con rata de variación de 1/2 % para una velocidad de 50 millas/hora (80 Km/h). La Tabla de valores recomendados por ese gremio para la pendiente relativa es el siguiente:

Velocidad (millas/hora)	30	40	50	60	70
Pendiente Relativa del Borde Exterior (%)	2/3	4/7	1/2	4/9	2/5

Tabla 14 Pendiente Relativa del Borde Exterior (AASHTO).

Estando la pendiente relativa expresada en porcentaje, el cálculo de n (cotangente) para 70 millas/h, por ejemplo, es este:

$$\frac{2}{5}\% = 0,04\% \rightarrow \text{Pendiente}(\text{decimal}) = 0,004 \therefore n = \frac{1}{0,004} = 250$$

Las Normas Venezolanas acogen los valores de la AASHTO con pequeños arreglos a fin de adaptarlos a nuestro sistema de medidas:

Velocidad (Kn/h)	50	65	80	95	110
Pendiente Relativa Del Borde Exterior (%)	0,6667	0,5714	0,5000	0,4444	0,4000
n	150	175	200	225	250

Tabla 15 Valores mínimos normales de la Pendiente Relativa del Borde Exterior según las Normas Viales Venezolanas.

La transición de peralte puede ilustrarse esquemáticamente de manera que la imposibilidad de ver al mismo tiempo, en una vista lateral, los dos bordes de vía (que además tienen distinta longitud) quede zanjada. Examinaremos las dos vertientes de la transición: a) en curvas circulares simples y (b) en curvas circulares con arcos de transición de curvatura.

a) TRANSICIÓN DE PERALTE EN CURVAS CIRCULARES SIMPLES

Para obtener la rotación de la calzada en bombeo, hasta su inclinación en el peralte total, debemos, en principio, pensar en las siguientes alternativas:

a.1 Rotar la calzada, en el alineamiento recto, hasta el valor de peralte, buscando así el tránsito del vehículo por el punto de tangencia con el peralte totalmente desarrollado.

a.2 Iniciar gradualmente la rotación de la calzada en el punto de tangencia.

a.3 Distribuir la rotación de la calzada en los alineamientos recto y curvo.

La alternativa a.1 obligaría al conductor a vencer la deriva producida por la rotación de la calzada moviendo el volante en sentido contrario a la dirección de giro de la curva. Además, la repentina anulación de la componente del peso, en el paso por el punto de tangencia, induciría a maniobras erráticas.

La segunda alternativa conlleva a desarrollar toda la rotación en el alineamiento curvo y el vehículo transitaría el punto de tangencia, donde instantáneamente aparecería toda la fuerza centrípeta, sin un peralte (o parte de él) que contrarrestara sus efectos. El conductor se vería obligado, en caso de que la vía tuviera suficiente ancho, a desplazarse a una trayectoria con radio de curvatura mayor hasta alcanzar valores de peralte que le permitan volver a la trayectoria inicial. Si la calzada es angosta la maniobra es irrealizable.

Las Normas Viales Venezolanas adoptan la tercera posibilidad: una parte de la transición de peralte se realiza en el tramo recto y el resto en el curvo. Los valores recomendados son $2/3$ y $1/3$ de la longitud, respectivamente. Esta práctica no deviene en una solución totalmente satisfactoria ya que en el punto de tangencia se habrá desarrollado $2/3$ del peralte lo que equivale a una rotación de la calzada en el tramo recto, donde no es necesaria. En menor proporción, pero no eliminados, los efectos negativos descritos para la alternativa a.1 tendrían su aparición. Por otra parte en la tangente de entrada sería necesario todo el peralte para anular la fuerza centrípeta y sólo encontraríamos desarrollados $2/3$ del mismo.

En la realidad el vehículo no sigue una trayectoria geométrica ceñida a la demarcación del canal de circulación y este hecho aminora los efectos indeseables: intuitivamente el conductor comienza a girar el volante antes de llegar al punto de tangencia (**TC**) describiendo el móvil una trayectoria de transición de curvatura que finaliza luego del referido punto; el radio de curvatura, en el paso por la tangente, es mayor que el de la curva y los valores de fricción desarrollados (entre neumáticos y pavimento) no resultan tan elevados como del cálculo se pudiera inferir. Un razonamiento similar es aplicable a la trayectoria descrita por el vehículo para salir del alineamiento curvo y alcanzar el punto **CT** donde, a pesar de que no existe curvatura horizontal, el empuje lateral de la componente paralela a la calzada del peso del vehículo, desarrollada por los $2/3$ de peralte restantes, obliga a girar el volante aun transitando la recta.

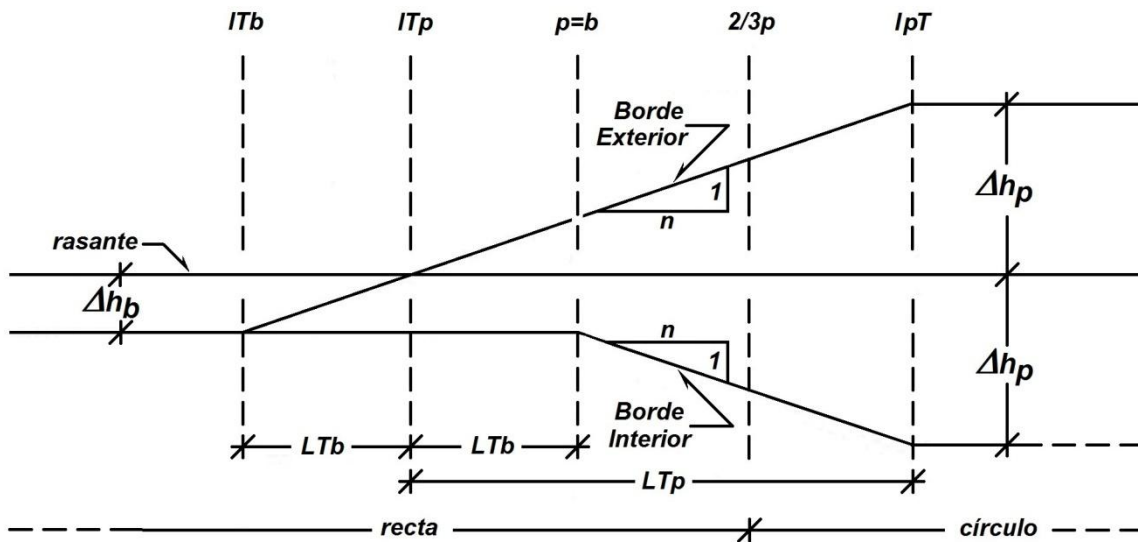


Figura 43 Esquema de las Transiciones de bombeo y peralte en Curva Circular Simple Rotación por el eje del Alineamiento Horizontal.

A continuación realizaremos un ejemplo que incluye el uso de los criterios expuestos:

Datos:

Velocidad del tramo: 80 Km/h ; Radio de curvatura = 500 m
 Plataforma: 2 canales de 3,60 m c/u Hombrillos: 1,80 m
 Longitud de Transición de bombeo: ? Longitud de Transición de peralte: ?

Solución:

El primer paso es determinar si la curva puede diseñarse con un arco circular o si requiere espirales de transición de curvatura⁹ antecedendo y siguiendo al arco circular. Siendo las transiciones de longitud variable emplearemos una fórmula aproximada para determinar el Retranqueo, parámetro geométrico denotado ΔR_c que determina el uso o no de transiciones de curvatura¹⁰. La interpretación geométrica del Retranqueo es la separación entre el arco circular original y la tangente para suplir un espacio que permita la inserción del arco de transición. Asumiendo que utilizamos una Longitud de Transición de peralte mínima tenemos los siguientes elementos para calcularla: 1) el peralte asignado por la N.V.V. para un radio de 500 m es 6 %, 2) la pendiente relativa del Borde Exterior es 200 y 3) el ancho de rotación es 3,60 m; luego:

$$LTP = a \cdot p \cdot n = 3,60 \cdot 0,06 \cdot 200 = 43,20 \text{ m}$$

⁹ Para consultar sobre este tema véase las notas "Curvas de Transición".

¹⁰ Los autores difieren en cuanto al máximo valor del Retranqueo por lo que emplearemos en el curso el más generalizado: 0,30 m.

y el Retranqueo será:

$$\text{Retranqueo} = \Delta R_c \cong \frac{(LTp)^2}{24 R_c} = \frac{(43,20)^2}{24 \cdot 500} = 0,16 \text{ m}$$

El valor del retranqueo indica que no hay necesidad de arco de transición entre la recta y el arco circular por lo que pudiera admitirse el diseño con curva circular simple. Sin embargo, dado que las transiciones pudiesen tener valores superiores, por ejemplo las longitudes de espiral normalizadas, es necesario verificar si con transiciones de peralte superiores a la mínima el retranqueo permanece en el umbral permitido. Dado que la tasa de variación de la pendiente del borde exterior es constante en toda la longitud de transición de peralte, el desvanecimiento y la generación del bombeo se logrará en una longitud igual a:

$$LTb = Ltp \frac{b}{p} = 43,20 \frac{2}{6} = 14,40 \text{ m}$$

En el punto Inicio de Transición de bombeo **ITb**, sobre el alineamiento recto, a 43,20 m del **TC**, comenzará la rotación de los carriles exteriores. A 14,40 m del punto anterior, medidos en el sentido de avance, se localiza otro punto singular, Inicio de Transición de peralte **ITp**, aún en la recta. La rotación habrá llevado en este punto a los carriles exteriores a la posición horizontal.

La rotación continúa gradualmente hasta que se alcanza un peralte de 2 % en el punto (**p=b**), comenzando los canales interiores, que han permanecido en bombeo, a rotar, definiendo una sección transversal de inclinación uniforme. Alcanzado el punto **TC** la rotación habrá llevado a la plataforma (canales + hombrillos) a una inclinación transversal de 4 % (2/3 del peralte total).

Ahora, en el alineamiento curvo, toda la calzada rota gradualmente hasta desarrollar el peralte total. El punto Inicio del peralte Total **IpT** se localiza a 14,40 m hacia adelante del punto **TC**. Entre los puntos **IpT** y **FpT** encontramos una plataforma inclinada con el valor del peralte de la curva; la longitud de este tramo depende del radio de curvatura y del ángulo de deflexión.

Otro ejemplo, esta vez considerando una carretera multicanal, nos acercará al cálculo de progresivas y cotas en la curva:

Datos:

Velocidad del tramo: 90 Km/h

Radio de curvatura = 700 m

Plataforma única: 4 carriles de 3,60 m c/u

Hombrillo: 1,50 m

Ángulo de deflexión: 22°08'02"

Progresiva del punto TC: 8+455,05

Cota del punto **TC**: 815,234 m

Pendiente de la rasante: 2,5 %

Se pide:

Longitud de Transición de bombeo: ?

Longitud de Transición de peralte: ?

Cota y progresiva de los puntos *ITb, ITp, p=b, IpT, FpT*.

Cota de los bordes de calzada en las secciones transversales de los puntos singulares (incluido el *TC*).

Solución:

Determinemos, preliminarmente, el retranqueo para decidir sobre la necesidad de espirales de transición. Para ello se requiere calcular el valor de la Longitud de Transición de peralte: 1) el peralte prescrito por las N.V.V. para el radio 700 m es 4,5 %. 2) la Pendiente Relativa mínima del borde exterior es 650/3 y 3) el ancho de rotación es $a = 2 \cdot 3,60 = 7,20 \text{ m}$. La longitud mínima de transición de peralte será entonces:

$$LTp = \frac{3}{4} a \cdot p \cdot n = 7,20 \cdot 0,045 \cdot \frac{650}{3} = 52,65 \text{ m}$$

de donde el retranqueo será:

$$\text{Retranqueo: } \Delta R_c \approx \frac{(LTp)^2}{24 \cdot R_c} = \frac{(52,65)^2}{24 \cdot 700} = 0,17 \text{ m}$$

Este valor de retranqueo, inferior a 30 cm, permite inferir que no hay necesidad de espirales para enlazar los tramos rectos con el arco circular. Se estima entonces que la transición de curvatura que el conductor describirá indefectiblemente para evitar la manifestación súbita de la fuerza centrípeta, puede realizarse dentro de los límites del carril de circulación. Finalmente, se admite que la curva no requiere transiciones y concluimos que 3 % (2/3 de 4,5 %) del peralte se desarrollará en el tramo recto y el 1,5 % restante (1/3 de 4,5 %) lo hará en el tramo curvo.

La longitud de transición de bombeo es:

$$LTb = LTp \frac{b}{p} = 52,65 \frac{2}{4,5} = 23,40$$

o también:

$$LTb = \frac{3}{4} a \cdot b \cdot n = \frac{3}{4} 7,20 \cdot 0,02 \frac{650}{3} = 23,40 \text{ m}$$

Debido a que los valores de la Pendiente Relativa del Borde exterior son valores mínimos, es factible, en aras de la simplificación, redondear, a un valor mayor, la longitud de transición de peralte. Sin embargo, esto no es siempre posible por las limitaciones que ocasiona la cercanía a las curvas adyacentes.

La longitud del arco circular es:

$$L_c = \frac{\pi \cdot R_c \cdot \Delta^\circ}{180^\circ} = \frac{\pi \cdot 700 \cdot \Delta^\circ}{180^\circ} = 270,42 \text{ m}$$

A continuación efectuaremos el cálculo de las progresivas:

Punto TC	8+455,05
	– 35,10 ($\frac{2}{3} L_{Tp}$)
	<u>– 23,40</u> (L_{Tb})
Inicio de Transición de bombeo	8+396,55
	<u>+ 23,40</u> (L_{Tb})
Inicio de Transición de peralte	8+419,95
	<u>+ 23,40</u> (L_{Tb})
peralte = bombeo	8+443,35
	<u>+ 11,70</u> ($\frac{2}{3} L_{Tp} - L_{Tb}$)
Punto TC (Comprobación)	8+455,05
	<u>+ 17,55</u> ($\frac{1}{3} L_{Tp}$)
Inicio del peralte Total	8+472,60
	<u>+235,32</u> ($L_c - \frac{2}{3} L_{Tp}$)
Final del peralte Total	8+707,92

El paso final es el cálculo de las cotas de los bordes en las secciones transversales de los puntos singulares. Lo más conveniente es determinar, primero, las cotas del eje y luego, de acuerdo a la proporción de rotación en cada sección, las de los bordes. Para simplificar la secuencia de cálculo determinaremos la cota del punto **ITb** y empleando la diferencia de progresivas entre él y los restantes puntos singulares, obtendremos los desniveles generados por el desarrollo de la pendiente longitudinal (**P**) de la rasante:

$$Cota\ ITb = CITb = C_{TC} - P(\text{Progresiva del } TC - \text{Progresiva } ITb)$$

$$CITb = 815,234 - 0,025[(8 + 455,05) - (8 + 396,55)] = 813,772\ m$$

En la sección transversal contentiva del punto singular **ITb** ambos bordes de la plataforma se encuentran deprimidos una distancia vertical equivalente al valor del bombeo multiplicado por el ancho de rotación (**a**):

$$\Delta h_b = b \cdot a = 0,02 \cdot 7,20 = 0,144\ m$$

Puesto que ambos bordes están deprimidos en la misma magnitud las cotas serán iguales:

$$Cota\ Borde\ Interior = Cota\ Borde\ Exterior = CITb - \Delta h_b$$

$$Cota\ Bordes = 813,772 - 0,144 = 813,625\ m$$

Por un procedimiento análogo, siempre considerando la rotación de la plataforma, se calcularon los valores del cuadro siguiente:

Cota Borde Exterior	E J E			Cota Borde Interior
	Progresiva	Punto	Cota (m)	
813,628	8 + 396,55	ITb	813,772	813,628
814,357	8 + 419,95	ITp	814,357	814,213
815,086	8 + 443,35	$(p = b)_e$	814,942	814,798
815,450	8 + 455,05	TC	815,234	815,018
815,997	8 + 472,60	IpT	815,673	815,349
821,880	8 + 707,92	FpT	821,556	821,232

Tabla 16 Progresivas y Cotas de Eje y bordes de calzada en las Secciones Transversales de los puntos singulares que se indican.

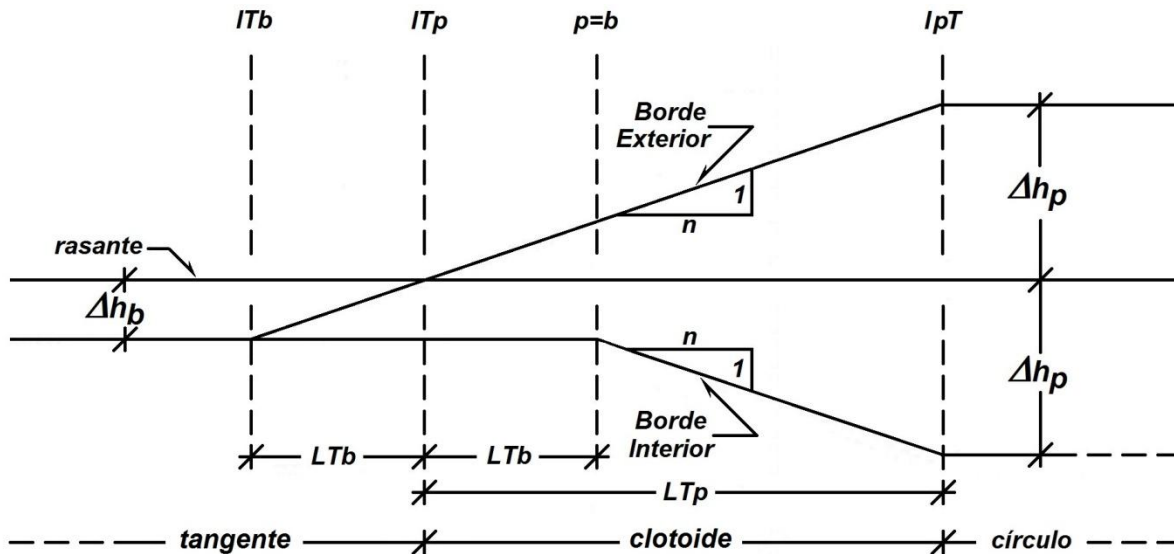
b) TRANSICIÓN DE PERALTE EN CURVAS CIRCULARES ESPIRALIZADAS

La clotoide o espiral de Cornu es, entre las curvas de transición que se han empleado en carreteras (Lemniscata, Parábola Cúbica), la más utilizada.

En virtud de su variación de curvatura —desde cero en su punto de tangencia, hasta infinito en cualquiera de sus dos polos— la clotoide permite que en su desarrollo se verifique **racionalmente** la transición de peralte. En una longitud de arco de clotoide (L_e) el peralte habrá hecho su gradual aparición en concordancia con la ley lineal teórica que rige el desarrollo de la curva.

Cuando el vehículo, transitado el arco de clotoide, alcanza la curva circular, el peralte desarrollado será el que corresponda a la máxima aceleración centrípeta de donde inferimos que teóricamente un móvil que se desplace a la velocidad de equilibrio, determinada para el arco circular, podrá también transitar el arco clotoidal sin necesidad de girar el volante (velocidad de manos libres).

Cabe destacar que cuando se diseña es obligante hacer la comparación de la Longitud de Transición de peralte con la longitud de la espiral dado que el desarrollo del peralte debe verificarse sobre el arco de clotoide. Si la longitud de la clotoide resultara menor que la Longitud de transición de peralte la pendiente relativa del Borde Exterior será menor que la recomendada por las Normas Venezolanas pudiendo evidenciarse



sensaciones molestas al elevarse bruscamente el borde exterior. La estética de la curva también se vería afectada pues la apariencia de la rotación se exageraría.

Figura 44 Esquema de las Transiciones de bombeo y peralte en arco circular espiralizado. Rotación de la calzada por el eje del Alineamiento Horizontal.

Un ejemplo ilustra lo analizado anteriormente:

Datos:

Velocidad de proyecto: 110 Km/h

Radio de curvatura: 650 m

Plataforma no dividida: 4 canales de 3,60 m c/u

Hombrillos: 1,80 m

Choque específico lateral: $c=0,6 \text{ m/seg}^2/\text{seg}$

Longitud de Transición de peralte: ?

Solución:

Aquí se desea encauzar la aceleración centrípeta prefijando un empuje lateral de $0,6 \text{ m/seg}^2/\text{seg}$ por lo que la longitud de la transición puede deducirse de la siguiente expresión:

$$L_e = \frac{(Vp)^3}{c \cdot R_c \cdot (3,6)^3} = \frac{(110)^3}{0,6 \cdot 650 \cdot (3,6)^3} = 73,15 \text{ m}$$

Comprobemos que $LTp \leq L_e$; el peralte para el radio 650 m es 5 %:

$$LTp = 0,75 \cdot a \cdot p \cdot n$$

Para $a = 7,20 \text{ m}$, $n = 250$ y $p = 0,05 \%$; $LTp = 67,50 \text{ m}$

$$L_e > LTp \text{ luego, } LTp = L_e = 73,15 \text{ m}$$

Siendo la longitud de transición de curvatura mayor que la longitud de transición de peralte se hace necesario aumentar la segunda hasta el valor 73,15 m, aunque esto conlleve a un pequeño aumento de la cotangente¹¹(n) del borde exterior de la calzada. Finalmente se calcula la Longitud de transición de bombeo:

$$LTb = LTp \frac{b}{p} = 73,15 \frac{2}{5} = 29,26 \text{ m}$$

La rotación de la calzada ocurre de la manera siguiente: en el punto ITb , situado en el alineamiento recto, a 29,26 m hacia atrás del punto singular TE , comienza el alabeo de los carriles exteriores que hasta ese momento permanecían en bombeo; los interiores conservan la inclinación transversal de la recta. A 29,26 m hacia adelante del punto ITb se localiza otro punto singular, ITp , en el cual la calzada exterior ha alcanzado, por efecto de la rotación, la posición horizontal (pendiente transversal 0 %). Planoaltimétricamente el punto ITp coincide con TE , la unión entre la tangente y la espiral. La curvatura horizontal tiende a infinito mientras que el peralte tiende a cero.

La rotación de los carriles continúa en una proporción directa a la longitud del arco de clotoide recorrido y a 29,26 m hacia adelante del punto TE , se habrá llegado a un valor de peralte igual al bombeo. Es el punto $p=b$ de la transición. Ahora todos los carriles, exteriores e interiores, más los hombrillos, forman una sección transversal colineal que rota aumentando su inclinación hasta alcanzar, en el punto de unión del arco de espiral y el círculo, EC , a 73,15 m hacia adelante de TE , el peralte de la curva. EC coincide con el punto singular IpT .

Desde el punto anterior la inclinación de la plataforma permanecerá constante hasta el punto FpT , a partir del cual comenzará nuevamente la rotación que concluirá en el punto FTb sobre la tangente. Si se tratara de una curva de transición total donde el arco de círculo está reducido a un punto, el ECE . La única sección transversal con inclinación igual al peralte se localizaría teóricamente en ese punto. El cálculo de pro-

¹¹ El nuevo valor de la cotangente del borde exterior se obtiene despejándolo de la expresión $L_e = 0,75 (7,2) (0,05) n$. El valor así determinado para n es 270,93 que corresponde a la pendiente relativa del borde exterior para una velocidad algo superior a 120 Km/h.

gresivas y cotas del eje y bordes de calzada es análogo al ya explicado.

c) CASOS PARTICULARES DE LAS TRANSISIONES DE PERALTE

Tal como lo expresa la nota al pie de la página 83 de las presentes anotaciones, la N.V.V. prescribe como valor de recta intermedia corta entre dos curvas consecutivas, de igual o diferente sentido, una distancia mínima en bombeo de 40 m. No debe confundirse este valor con la longitud recta entre los puntos de tangencia de los alineamientos curvos. Si la recta intermedia en bombeo fuese de una longitud inferior a 40 m se realizará una transición continua de peralte aunque para ello deberá disminuirse proporcionalmente la pendiente relativa del borde exterior y suprimirse las transiciones de bombeo. El esquema siguiente ilustra la solución geométrica:

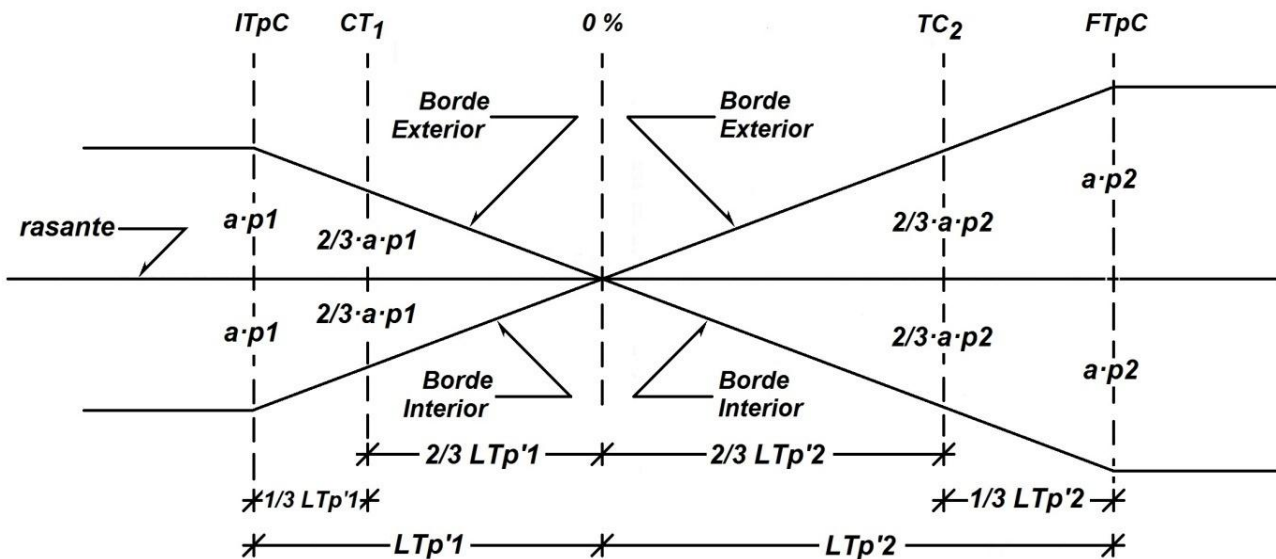


Figura 45 Transición de Peralte Continua en Curvas Circulares Simples consecutivas de sentido opuesto.

Un ejemplo numérico nos permite familiarizarnos con el método:

Datos:

$$\Delta^{\circ}_{11} = 25^{\circ}30'$$

$$\Delta^{\circ}_{12} = -30^{\circ}48'$$

$$Rc_{11} = 400 \text{ m}$$

$$Rc_{12} = 450 \text{ m}$$

$$D_{V11-V12} = 328,28 \text{ m}$$

$$V_p = 70 \text{ Km/h}$$

$$n = \frac{200}{3} + \frac{5}{3} V_p$$

$$\text{Prog. } CT_{11} = 5 + 555,55$$

$$\text{Cota } TC_{12} = 555,555 \text{ m}$$

$$P_{\text{rasante}} = -5,5 \%$$

$$a = 3,60 \text{ m}$$

$$LTp_{11} = ? \quad LTp_{12} = ?$$

Solución:

En primer término obtendremos la pendiente relativa del Borde Exterior:

$$n = \frac{200}{3} + \frac{5}{3}V_p = \frac{200}{3} + \frac{5}{3}70 = \frac{550}{3}$$

Los peraltes normales asignados por la **N.V.V.** para los radios 400 m y 450 m son $p_{11} = 7\%$ y $p_{12} = 6,5\%$, respectivamente. Las longitudes de las transiciones de peralte serán:

$$LTp_{11} = a \cdot p \cdot n = (3,60)(0,07) \left(\frac{550}{3} \right) = 46,20 \text{ m}$$

$$LTp_{12} = a \cdot p \cdot n = (3,60)(0,065) \left(\frac{550}{3} \right) = 42,90 \text{ m}$$

$$LTb_{11} = \frac{LTp_{11} \cdot b}{p} = \frac{(46,20)(2)}{7} = 13,20 \text{ m}$$

$$LTb_{12} = \frac{LTp_{12} \cdot b}{p} = \frac{(42,90)(2)}{6,5} = 13,20 \text{ m}$$

$$\frac{2}{3}LTp_{11} = \frac{2}{3}(46,20) = 30,80 \text{ m}$$

$$\frac{2}{3}LTp_{12} = \frac{2}{3}(42,90) = 28,60 \text{ m}$$

$$T_{11} = Rc_{11} \cdot tg \left(\frac{\Delta_{11}}{2} \right) = 400 \cdot tg(12,75^\circ) = 90,51 \text{ m}$$

$$T_{12} = Rc_{12} \cdot tg \left(\frac{\Delta_{12}}{2} \right) = 450 \cdot tg(15,40^\circ) = 123,95 \text{ m}$$

El valor de la **recta corta** entre las curvas consecutivas será:

$$Recta Corta = D_{v11-v12} - \left(T_{11} + \frac{2}{3}LTp_{11} + LTb_{11} + LTb_{12} + \frac{2}{3}LTp_{12} + T_{12} \right)$$

$$Recta Corta = 328,28 - 300,26 = 28,02 \text{ m}$$

La longitud 28,02 m representa el tramo recto de vía en bombeo neto entre las curvas consecutivas y por ser dicho valor menor al indicado por la **N.V.V.** la transición de peralte debe resolverse con una Transición Continua cuyo cálculo es el siguiente:

$$Distancia CT_{11} - CT_{12} = 328,28 - (T_{11} + T_{12}) = 113,82 \text{ m}$$

$$\frac{2}{3}LTp'_{11} + \frac{2}{3}LTp'_{12} = 113,82 \text{ m} \quad \text{y también:}$$

$$\frac{Lp'_{11}}{p_{11}} = \frac{Lp'_{12}}{p_{12}} \therefore \frac{Lp'_{11}}{Lp_{12}} = \frac{7}{6,5} \therefore Lp'_{11} = \frac{7 \cdot Lp'_{12}}{6,5}$$

Sustituyendo:

$$\frac{2}{3} \left(\frac{7 \cdot Lp'_{12}}{6,5} \right) + \frac{2}{3} Lp'_{12} = 113,82 \text{ m}$$

$$\frac{2}{3} Lp'_{12} \left(\frac{7}{6,5} + 1 \right) = 113,82 \text{ m}$$

$$\frac{2}{3} Lp'_{12} = 113,82 \left(\frac{13}{27} \right) = 54,80 \text{ m}$$

$$Lp'_{12} = \left(\frac{3}{2} \right) 54,80 = 82,20 \text{ m}$$

$$Lp'_{11} = \left(\frac{7}{6,5} \right) 82,20 = 88,52 \text{ m}$$

$$\frac{1}{3} Lp'_{11} = 29,51 \text{ m} ; \frac{2}{3} Lp'_{11} = 59,01 \text{ m} ; \frac{1}{3} Lp'_{12} = 27,40 \text{ m}$$

Traslade estos valores a una tabla y determine la progresiva y cota de los puntos singulares de la Transición de Peralte Continua así como las cotas de los bordes en las respectivas secciones transversales.

Si el acuerdo se diseña con arcos de clotoide antecedendo y siguiendo al arco circular, la transición de peralte entre las curvas consecutivas es la que se muestra:

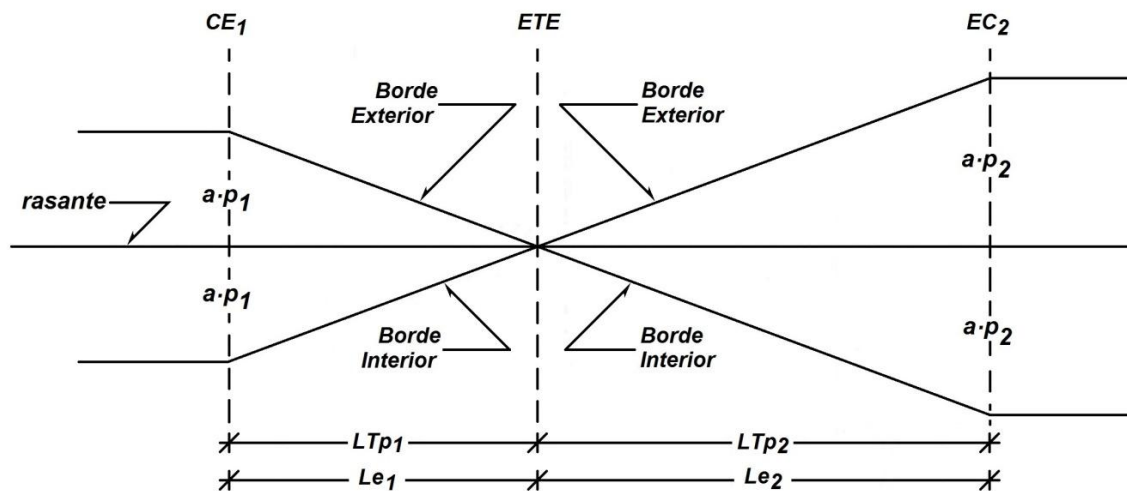


Figura 46 Transición de Peralte Continua en Curvas Circulares consecutivas espiralizadas. Curvaturas de sentido opuesto.

El incremento de la Longitud de Transición de Curvatura, donde necesariamente debe inscribirse la Transición de Peralte, modifica ligeramente el choque específico y en consecuencia las clotoides resultantes son de parámetro distinto a las originales.