

NORMAS DE DISEÑO GEOMETRICO DE CAMINOS RURALES

I N D I C E

<u>INTRODUCCION</u>	pag. 1
<u>CAPITULO I</u>	
<u>FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO</u>	
1º) <u>CONFIGURACION DEL TERRENO</u>	" 2
2º) <u>TRANSITO</u>	" 3
1 - <u>Volúmenes</u>	" 3
Volumen medio diario anual	" 3
Volumen medio diario mensual, semanal etc.	" 3
Volumen horario	" 3
2 - <u>Distribución</u>	" 4
3 - <u>Composición</u>	" 4
4 - <u>Crecimiento</u>	" 4
Tránsito inicial	" 5
Expansión del tránsito inicial	" 5
5 - <u>Velocidad</u>	" 10
Velocidad directriz	" 10
Velocidad máxima ponderada segura	" 10
Velocidad media instantánea	" 11
Velocidad general de recorrido	" 11
Velocidad de operación	" 11
Velocidad de marcha	" 11
Velocidad media de marcha	" 11
6 - <u>Grado de congestión</u>	" 13
Capacidad	" 13
Nivel de servicio	" 13
Volumen de servicio	" 14
<u>REFERENCIAS</u>	" 16
<u>CAPITULO II</u>	
<u>CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DEL DISEÑO</u>	" 17

1a) <u>DISTANCIAS DE VISIBILIDAD</u>	pag. 17
1 - <u>Distancias de detención</u>	" 17
2 - <u>Distancias de sobrepaso</u>	" 19
2a) <u>ALINEAMIENTO PLANIMETRICO</u>	" 23
1 - <u>Curvas horizontales</u>	" 23
Coeficiente de fricción lateral	" 23
Valores máximos del peralte	" 23
Radios mínimos de curvatura	" 24
Determinación del peralte en función del radio de la curva y la velocidad directriz	" 24
Radios mínimos que no exigen peralte	" 24
Radios mínimos deseables	" 26
Curvas de transición - Longitud mínima	" 28
Longitudes de transición a adoptar	" 29
Longitudes deseables	" 29
Transición del peralte	" 29
Radios a partir de los cuales no es indispensable introducir curvas de transición	" 31
Longitudes mínimas de transición para curvas circulares compuestas	" 32
Sobreanchos	" 33
2 - <u>Visibilidad en curvas horizontales</u>	" 34
Visibilidad para detención	" 34
Visibilidad para sobrepaso	" 36
3a) <u>ALINEAMIENTO ALTIMETRICO-DISEÑO GEOMETRICO DE LA RASANTE</u>	" 38
1 - <u>Curvas verticales</u>	" 38
Generalidades	" 38
Forma de las curvas verticales	" 38
Curvas verticales convexas	" 38
Curvas verticales cóncavas	" 44
Diferencias algebraicas de pendientes que no requieren la introducción de curvas verticales	" 48
2 - <u>Pendientes</u>	" 50
Pendientes máximas	" 50
Pendientes nocivas	" 52
Longitudes de las pendientes	" 53
Longitudes máximas	" 54
Influencia de la altitud sobre las pendientes	" 59
Reducción de pendientes en curvas horizontales	" 62

4a) <u>DISEÑO GEOMETRICO DE LA SECCION TRANSVERSAL</u>	pag. 66
1 - <u>Calzada</u>	" 66
<u>Diseño Geométrico</u>	" 66
<u>Trocha adicional ascendente</u>	" 68
<u>Secciones con cuatro trochas</u>	" 71
2 - <u>Banquinas</u>	" 71
3 - <u>Cantero central</u>	" 72
4 - <u>Taludes y contrataludes</u>	" 73
5 - <u>Cunetas y cunetas prestamos</u>	" 75
6 - <u>Caminos o calles colectoras</u>	" 75
7 - <u>Zona de camino</u>	" 75
<u>REFERENCIAS</u>	" 77

CAPITULO III

CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO GEOMETRICO DEL PROYECTO

1a) <u>ESTETICA DEL CAMINO</u>	" 78
1 - <u>Criterio paisajista</u>	" 78
<u>Fundamentos</u>	" 78
2 - <u>Guiado visual</u>	" 78
2a) <u>CRITERIOS GENERALES PARA EL DISEÑO GEOMETRICO</u>	" 79
1 - <u>Cambios en la velocidad directriz del proyecto</u>	" 79
2 - <u>Recomendaciones relativas a las condiciones planimétricas del proyecto</u>	" 79
3 - <u>Recomendaciones relativas a las condiciones altimétricas del proyecto</u>	" 82
4 - <u>Recomendaciones relativas a las condiciones que debe reunir la sección transversal</u>	" 83
5 - <u>Coordinación planialtimétrica y de la sección transversal del proyecto</u>	" 83
6 - <u>Procedimiento general de coordinación planialtimétrica</u>	" 85
<u>REFERENCIAS</u>	" 88

## CAPITULO I

### FACTORES QUE INFLUYEN EN EL DISEÑO

El diseño geométrico de un camino, se encontrará preponderantemente influenciado por dos factores: Primero por la configuración del terreno que debe atravesar, y segundo, por las modalidades y exigencias del tránsito que debe soportar.

Será un buen diseño el que, con un costo anual mínimo, tenga en cuenta, simultáneamente ambos factores, en la medida de su importancia.

En efecto, cuando el tránsito es reducido, el diseño del camino deberá estar más influenciado por el primer factor, es decir, tendrá que adaptarse dentro de lo posible a la configuración del terreno. En cambio, cuando el tránsito es intenso, las necesidades de los usuarios y las características del tránsito serán los factores que intervendrán preponderantemente en su diseño.

#### 1º) CONFIGURACION DEL TERRENO.

La configuración del terreno a que se ha hecho referencia, no comprende solamente las características físicas y topográficas del terreno, sino también, el uso de las tierras, y el desarrollo de la zona atravesada.

Si bien todos estos factores influyen en la elección de un trazado, preponderantemente, para un tránsito dado, la topografía del terreno es la que determina el nivel de las normas de diseño geométrico.

De acuerdo con su relieve, se ha clasificado al terreno en tres clases:

- Zona llana
- Zona ondulada
- Zona montañosa

Las zonas llanas poseen pendientes del terreno tan reducidas, que el relieve en sí, no influye mayormente en el trazado o en el costo de un camino.

En cambio, en las zonas montañasas las pendientes del terreno influyen de manera decisiva en el trazado o en el costo del camino que las atraviesan.

Las zonas onduladas, poseen características intermedias entre las dos anteriores.

Esta clasificación no es rígida, ya que habrá caminos que deban desarrollarse en terrenos que no podrán encuadrarse estrictamente en algunos de la clasificación anterior.

En general, aunque se presentan excepciones, los caminos de montaña se desarrollan por lugares con suelos de características rocosas, lo que no ocurre comunmente con los de la zona llana.

La presencia de cursos de agua, de suelos de baja calidad, de zonas inundables etc., también pueden influir en el trazado de un camino.

Finalmente, la existencia de cultivos valiosos, yacimientos de minerales utilizables, construcciones de importancia etc., son otros factores que incidirán en la elección de un trazado.

## 2º) TRANSITO.

Los volúmenes, composición, distribución, crecimiento y velocidad del tránsito, conjuntamente con la topografía, determinan diversas magnitudes del diseño geométrico de un camino, tales como radios, peraltes, parámetros de curvas verticales, pendientes, anchos de calzada, etc.

### 1 - Volúmenes.

Se denomina, en general, volumen de tránsito a la cantidad de vehículos que pasa por un determinado punto de un camino, en la unidad de tiempo.

Los más usados son los siguientes:

#### Volumen medio diario anual:

Es el volumen de tránsito anual dividido por 365, o sea indica el promedio anual del volumen diario. Suele denominarse, más simplemente, volumen medio diario.

#### Volumen medio diario mensual, semanal, etc.:

Es el volumen de tránsito de un mes, semana, etc., dividido por el número de días de dicho lapso.

#### Volumen horario:

Si se ordenan por magnitudes decrecientes los volúmenes horarios de las 8760 horas de un año, se denomina volumen horario de la *n*-ésima hora, al que ocupa el rango *n*-ésimo de dicho ordenamiento. En otros términos es el volumen horario que durante el transcurso del año solo es superado (*n*-1) veces.

En la generalidad de los casos a los fines de diseño, se utiliza el volumen de la trigésima hora anual, excepto para caminos con volúmenes estacionales muy acentuados. En estos últimos suelen utilizarse los volúmenes de la 50a. o la 80a. hora anual.

Para una determinada sección, la relación entre el volumen de la trigésima hora anual y el volumen medio diario anual, varía muy lentamente de año a año.

En los E.E.U.U. se ha encontrado que en caminos rurales de dos trochas indivisas, en un lapso del orden de los 20 años, dicha relación ha variado en promedio, del 15,3 % (1) al 13,6 % (2). Este último valor corresponde al promedio de los años 1961 - 1962. Para estos mismos años, en zonas urbanas el promedio era del 10,6 %.

En nuestro país, en el año 1963 (3) se han efectuado determinaciones de dicha relación, en determinados caminos rurales de la Provincia de Buenos Aires, encontrándose que el volumen de la trigésima hora anual está comprendido entre el 16 y el 18 % del volumen medio diario anual, siendo su promedio el 16,6 %.

Para un camino influenciado por el tráfico urbano, se determinó que dicho porcentaje era del 10,1 %.

Se estima que en nuestro país se irá produciendo, en el transcurso de los años, un decrecimiento del porcentaje correspondiente a caminos rurales, en forma similar al operado en los E.E.U.U.

## 2 - Distribución.

Si bien, en general, la distribución de los volúmenes de tránsito medio diario anual es la misma en ambas direcciones, durante las horas de "pico" una de las trochas lleva volúmenes mayores que la otra. Para esas condiciones se ha encontrado, que para caminos rurales, en uno de los sentidos del tránsito circulan del orden de las dos terceras partes del volumen total.

## 3 - Composición.

El tránsito puede ser dividido en tres grupos principales a saber:

a) Automóviles: Se incluyen también en esta categoría a las "rurales", camionetas, y todo otro vehículo cuyas características de operación se asemeje a las de los automóviles.

b) Omnibus: Incluye a los "colectivos", micro-ómnibus y similares.

c) Camiones: Incluye a los camiones con y sin acoplado, semi-remolques, semi-remolques con acoplado y todo otro vehículo cuyas características de operación sean similares a las de los camiones.

De acuerdo a datos sobre el patentamiento de vehículos automotores (4) el porcentaje de vehículos de carga ha ido disminuyendo paulatinamente en los últimos años.

De acuerdo a estudios sobre predicción del tránsito (5) (6) la tendencia de disminución del porcentaje de camiones proseguirá en el futuro.

Además, se ha observado que el porcentaje de camiones en el tránsito urbano, en general es menor que en el tránsito rural. Para este último, dicho porcentaje con relación al volumen medio diario, era del orden del 40% para el año 1964, aunque muy variable de un camino a otro.

En la red rural en jurisdicción de la Dirección de Vialidad de la provincia de Buenos Aires, se ha determinado un porcentaje promedio del 46 %, obteniéndose en cambio el 21 % de camiones en la red provincial de zonas semi-urbanas (3).

Para caminos rurales, en las horas de "picos" de volúmenes de tránsito, la proporción de camiones es menor, del orden de la mitad a los dos tercios del volumen diario (8), aunque datos de observaciones anteriores hacían variar dicha proporción entre el 67 y el 75 % de este volumen (9).

En general podría aceptarse que el porcentaje de camiones en la trigésima hora anual, sea del orden de las dos terceras partes del correspondiente al volumen medio diario anual.

## 4 - Crecimiento.

Se denomina período de proyección de un camino al lapso comprendido entre la iniciación de su estudio, hasta el momento en que deja de prestar, con la eficiencia asignada, los servicios para el cual fuera proyectado. Este último momento suele designarse como año futuro de diseño.

El intervalo de tiempo comprendido desde la iniciación del estudio hasta la finalización de la obra y habilitación al tránsito, que comprende los lapsos necesarios para el estudio, proyecto, licitación y construcción del camino, se designa como período de realización.

La diferencia entre los períodos precedentemente citados, o sea el lapso durante el cual el camino prestará, en general, servicios con igual o mayor eficiencia que la asignada en el proyecto, es el período de servicio.

Para un adecuado diseño geométrico del camino es fundamental conocer el volumen y composición futura del tránsito que lo deba recorrer.

Para ello, será necesario conocer previamente el volumen de tránsito inicial que tendrá el camino al cabo del período de realización y luego se determinará el crecimiento estimado de dicho volumen a través del tiempo, hasta el año futuro de diseño, o sea durante el período de servicio asignado.

#### Tránsito inicial.

El volumen medio diario de tránsito inicial es la suma de dos componentes:

- a) Tránsito existente.
- b) Tránsito atraído.

La existencia de la primera componente, o sea el tránsito existente, solo tiene sentido cuando se trate de efectuar mejoras sobre un camino en uso y no cuando se trate de un trazado nuevo.

Su determinación se efectúa en general con censos de tránsito. Si solo se conocen por ejemplo, el volumen medio diario de un mes determinado, el volumen medio diario anual puede hallarse dividiendo el volumen anterior por un coeficiente denominado de estacionalidad (10), que en general varía entre 0,8 y 1,2 aunque estos límites para caminos con tránsito estacional muy acentuado, pueden ser más amplios (3).

La segunda componente o sea el tránsito atraído corresponde al tránsito existente que usaba anteriormente otras rutas próximas, pero que debido a la construcción del nuevo camino, o el mejoramiento del existente circulará por éste, debido al mejor servicio que ofrece.

Este volumen puede ser obtenido por censos de tránsito de origen y destino (11), o estimado en base al conocimiento de factores locales, longitud, pendientes, capacidad, etc. de la red de caminos existentes, y de las facilidades que el camino nuevo o mejorado ofrezca a la circulación (12).

Por otra parte, aunque los caminos existentes aludidos puedan tener un buen diseño geométrico, si los volúmenes que circulan por ellos se encuentran próximos a su capacidad, es presumible que una parte importante de su tránsito se derivará al camino nuevo o mejorado.

#### Expansión del tránsito inicial.

Determinado el tránsito inicial, se podrá estimar el tránsito para el año futuro de diseño.

Para ello, este último tránsito se considera integrado por cuatro componentes, a saber:

- a) Crecimiento vegetativo.
  - b) Incremento originado por el tránsito inducido.
  - c) Incremento originado por el mayor desarrollo del área de influencia con relación al normal, debido a la construcción del camino.
  - d) Decremento debido a diversas causas.
- a) Crecimiento vegetativo o normal.

Es el incremento originado por el aumento general en la zona, del número y recorrido de los automotores.

En estudio efectuado (13) recientemente, se predice que para todo el país desde el año 1962 hasta el año 1990 habrá un aumento de volúmenes de tránsito del 487,93 %, lo que representa una tasa anual de crecimiento del 5,8 %. Este valor se encuentra próximo al crecimiento originado entre 1936 a 1962, del 518 % que representa una tasa anual de 6,5 %.

Otro trabajo sobre predicción de tránsito (5) plantea dos hipótesis para el período 1960 a 1975. Por la primera de ellas resulta una tasa anual media de crecimiento del 10,3 % y por la segunda el 7,1 %.

Por otro estudio efectuado en la Ruta Nacional Nº 19, en la provincia de Santa Fe (10), se obtuvo que el valor del coeficiente medio instantáneo de crecimiento de los volúmenes de tránsito entre 1952 y 1964 era de 0,0686, lo que representa una tasa anual del 7,1 %.

Finalmente en otra publicación (14), en base a los censos de tránsito de Vialidad Nacional, se ha estimado en un 8 %, el valor de la tasa anual de crecimiento hasta 1975.

Como dato ilustrativo se señala que el parque automotor, aumentó desde 749525 vehículos en 1958 a 1575571 vehículos en 1965 (15) lo que representa una tasa de crecimiento medio del 11,2 %.

No obstante se considera que este veloz crecimiento, originado por la rápida expansión de la industria automotriz en nuestro país, no podrá mantenerse (5).

Por otra parte, de los estudios citados se desprende que la tasa de crecimiento anual de camiones varía relativamente poco entre el Gran Buenos Aires y el resto del país, siendo en cambio más importantes las variaciones en la tasa de aumento anual de automóviles.

Se han establecido en consecuencia tres zonas con diferentes tasas de crecimiento anual de tránsito.

A) Zonas muy desarrolladas.

Conjunto de zonas urbanas y suburbanas de grandes núcleos poblados, tales como el Gran Buenos Aires, Córdoba, Rosario. Incluye también otras grandes ciudades cuyo desarrollo sea muy rápido.

B) Zonas desarrolladas.

En general comprende casi todo el litoral del país excepto las zonas indicadas en A) y partes de la Patagonia, Cuyo y del noroeste. Incluye también a zonas poco desarrolladas pero en vías de rápido desarrollo.

C) Zonas poco desarrolladas y en lento proceso de desarrollo.

Comprende gran parte del noroeste, partes de Cuyo y de la Patagonia y zonas aisladas del litoral.

Las tasas de crecimiento anual son respectivamente las siguientes:

CUADRO Nº I-1

TIPO DE VEHICULO	Tasa anual de crecimiento del tránsito		
	<u>ZONA A</u> %	<u>ZONA B</u> %	<u>ZONA C</u> %
Automóviles	8,5	7,0	6,0
Camiones	5,5	5,0	4,5

Si bien la zona A es de pequeña extensión, absorbe aproximadamente la mitad o más de los volúmenes de tránsito automotor del país, en cambio la zona C, que es muy extensa, absorbe, aproximadamente, sólo la décima parte del total.

Esta División por zonas, algo ambiguas, no es rígida ya que habrá caminos cuyas tasas de crecimiento serán diferentes a las indicadas.

Es de desear que censos de tránsito más frecuentes y mayor número de años de registro, permitan determinar valores más aproximados de dichas tasas.

En el cuadro Nº I-1 no se han considerado las tasas de crecimiento de los ómnibus, debido al reducido porcentaje de estos vehículos en relación al volumen total de tránsito. No obstante para calcular las tasas de crecimiento del tránsito total, se podrá, para simplificar, dividir el tránsito de ómnibus en mitades, asignando sendas partes, al de automóviles y camiones.

La tasa media de crecimiento del tránsito total, aplicando las tasas indicadas en el cuadro Nº 1 es de aproximadamente de 7 % para un período de 25 años que comience en la actualidad.

b) Incrementos originados por el tránsito inducido.

Se denomina tránsito inducido o generado, a aquel que sólo se origina por las favorables condiciones de circulación que ofrece el camino y que no existiría de no habérselo ejecutado o mejorado.

Por ejemplo la construcción de un camino entre dos localidades no vinculadas anteriormente por dicho medio de comunicación, puede ser un factor que, sin restar tránsito a otras rutas, incida para que un determinado número de vehículos lo utilicen, originando un tránsito inducido. De igual manera puede haber un tránsito inducido importante, debido a la pavimentación de un camino de tierra, circunstancia que genera una serie de viajes antes inexistentes.

En los E.E.U.U. hay estudios limitados sobre el tránsito inducido pero se ha llegado a la conclusión que se genera al primero o al segundo año de construido o mejorado un camino, en porcentajes muy variables que pueden llegar al 30 o 60 % del tránsito inicial, pero que generalmente están comprendidos entre el 5 y 25 % (8). En nuestro país se ha verificado que alguno de estos incrementos por tránsito generado, debidos a sustanciales mejoras de un camino (por ejemplo pavimentación de un camino de tierra), eran de magnitud apreciable, llegando en algún caso al 80% del tránsito inicial.

c) Incremento debido al mayor desarrollo de la zona de influencia del camino, con relación al que normalmente hubiera tenido lugar, de no haberse ejecutado.

La componente del tránsito futuro del camino originada por el desarrollo normal de la zona aledaña, se encuentra considerada al aplicar la tasa correcta de crecimiento vegetativo.

No obstante, cuando debido a la ejecución o mejoramiento sustancial de un camino, la zona adyacente sufre un proceso de desarrollo más acelerado que el normal, ya sea por subdivisión de la tierra y creación de nuevos núcleos de población, ya sea por la radicación de industrias, etc., se produce un incremento adicional del tránsito. Esta componente se designa más simplemente como volumen originado por mayor desarrollo.

Este mayor desarrollo se produce en general a lo largo de un número relativamente grande de años, por cuya causa su influencia puede ser tenida en cuenta incrementando la tasa anual de crecimiento vegetativo.

Indudablemente, para poder evaluar este incremento debe poseerse una información detallada de las condiciones locales y de sus posibilidades de mayor desarrollo que se originarían por la ejecución del camino.

En casos favorables la tasa de incremento adicional a considerar puede llegar a ser del orden del 1%, siendo en general mayor para automóviles

que para camiones y mayor también para zonas próximas a las urbanas que para las estrictamente rurales. En estas últimas en muchos casos este incremento de tránsito puede ser de escasa o nula significación.

Se utilizarán las siguientes denominaciones:

- n<sup>i</sup> : Período de realización, en años.
- n<sup>ii</sup> : Período de establecimiento del tránsito generado, contado a partir de la iniciación del estudio.
- n<sup>iii</sup> : Lapso que transcurre desde la fecha de iniciación del estudio, hasta la fecha de producirse el decremento de tránsito, por causas circunstanciales, en años.
- n : Período de proyección, en años.
- T : Volumen medio diario de tránsito, en un mes dado a la fecha del estudio, en veh/día.
- m : Coeficiente de estacionalidad.
- T<sub>a</sub> : Volumen medio diario anual de tránsito existente a la fecha del estudio, en veh/día.
- A : Tránsito atraído que circularía en la fecha del estudio, de habilitarse en dicho momento el camino proyectado, en veh/día.
- E : Tránsito total de estudio, suma de los dos anteriores, en veh/día.
- a : Coeficiente medio instantáneo de crecimiento de volúmenes de tránsito.
- r : Tasa de aumento del tránsito por crecimiento vegetativo.
- I : Volumen de tránsito inicial, al cabo del período de realización en veh/día.
- C : Componente del volumen de tránsito futuro de diseño, originada por crecimiento vegetativo del tránsito inicial.
- E : Porcentaje de aumento del tránsito inicial por establecimiento del tránsito inducido o generado, en %.
- G : Componente del volumen de tránsito futuro de diseño originado por el crecimiento vegetativo del tránsito inducido en veh/día.
- d<sup>i</sup> : Tasa de aumento del tránsito a partir de la habilitación del camino por mayor desarrollo que el normal de la zona adyacente, originado por su ejecución.
- d : Tasa de aumento equivalente, de tránsito, a partir de la fecha de estudio, por mayor desarrollo que el normal de la zona adyacente al camino, originado por su ejecución.
- M : Componente del volumen de tránsito futuro de diseño originado por el mayor desarrollo que el normal de la zona adyacente al camino, en veh/día.
- D : Decremento del volumen diario anual de tránsito producido en un año determinado por alguna causa particular, en veh/día.
- D<sup>i</sup> : Componente negativa del tránsito futuro de diseño correspondiente a un decremento del tránsito originado en alguna causa particular, en veh/día.
- N : Tránsito futuro de diseño, en veh/día.
- f : Factor de expansión del tránsito.
- P<sub>o</sub> : Porcentaje de camiones en la fecha del estudio, respecto al volumen medio diario anual correspondiente.
- P<sub>c</sub> : Porcentaje de camiones respecto al volumen medio diario anual del tránsito, del año futuro de diseño.

Las relaciones que se obtienen son las siguientes:

$$T_a = \frac{T}{m}$$

$$E = T_a + A$$

$$I = E e^{an^i}$$

y haciendo  $a = \lg (1 + r)$  se llega a

$$I = E (1 + r)^{n^i}$$

$$C = I (1 + r)^{n - n^i}$$

$$G = \frac{rI}{100} (1 + r)^{n - n^i}$$

Dadas las groseras apreciaciones de los datos, sin mayor error, se puede suponer que:

$$n^n = n^i$$

$$C + G = E \left(1 + \frac{K}{100}\right) (1 + r)^n$$

$$M = E \left(1 + \frac{K}{100}\right) (1 + r)^n \left[ (1 + d)^{n-n^i} - 1 \right]$$

haciendo  $d = \frac{n - n^i}{n} d^i$ , se obtiene aproximadamente:

$$M = E \left(1 + \frac{K}{100}\right) \left[ (1 + r + d)^n - (1 + r)^n \right]$$

$$C + G + M = E \left(1 + \frac{K}{100}\right) (1 + r + d)^n$$

$$D^i = D (1 + r + d)^{n-n^i}$$

$$N = E \left(1 + \frac{K}{100}\right) (1 + r + d)^n - D (1 + r + d)^{n-n^i}$$

$$N = \left(\frac{T}{M} + A\right) \left(1 + \frac{K}{100}\right) (1 + r + d)^n - D (1 + r + d)^{n-n^i}$$

$$r = \left(1 + \frac{K}{100}\right) (1 + r + d)^n - \frac{D}{E} (1 + r + d)^{n-n^i}$$

$$N = E f$$

Esta expresión se aplica cuando la tasa de crecimiento del tránsito de los diversos tipos de vehículos, es la misma.

En caso contrario, las expresiones halladas se aplicarán separadamente para cada uno de los volúmenes de los diferentes tipos de vehículos. Aplicando los subíndices "a" y "c" respectivamente, según se trate de automóviles y camiones, tendremos:

$$N = N_a + N_c$$

$$N = E_a f_a + E_c f_c$$

$$E = E_a + E_c$$

$$f = \frac{E_a f_a + E_c f_c}{E_a + E_c}$$

$$P_c = \frac{E_c}{E_a + E_c}$$

$$P_c = \frac{N_c}{N_a + N_c}$$

Considerando que razonablemente el período de servicio con una eficiencia igual o mayor que la asignada, tenga una duración de 20 años, y que el lapso de realización comprenda 5 años, tendremos que el período de proyección deberá ser de 25 años.

En la tabla N° 1 se han consignado los valores estimados del coeficiente de expansión del tránsito y el porcentaje de camiones que existirá en el año futuro de diseño, para diversas hipótesis. No obstante cuando los casos particulares se aparten de las hipótesis formuladas deberá calcularse el tránsito del año futuro de diseño, considerando separadamente el tránsito de automóviles y camiones, con sus porcentajes y tasas de aumento correspondientes. Si el tránsito de ómnibus fuera sustancial, se lo deberá calcular por separado. En caso contrario, como hipótesis simplificada se considerará dividido, por partes iguales, entre tránsito de automóviles y camiones.

#### 5 - Velocidad.

Las denominaciones que se usarán más frecuentemente, serán las siguientes:

##### Velocidad directriz:

Referida a una sección de camino, es la máxima velocidad, a la que puede circular, con seguridad, en todos sus puntos, un conductor de habilidad media manejando un vehículo, en condiciones mecánicas aceptables, en una corriente de tránsito con volúmenes tan bajos que no influyan en la elección de su velocidad, cuando el estado del tiempo, de la calzada y de la visibilidad ambiente son favorables.

Tal como se desprende de la definición, un camino de una velocidad directriz dada, no podrá ser recorrido con seguridad a dicha velocidad, cuando, por ejemplo, soplen vientos huracanados, cuando la calzada se encuentre resbaladiza por formación de hielo, o cuando, de noche, no se encuentre convenientemente iluminado.

Las velocidades directrices elegidas, de acuerdo a los volúmenes de tránsito, varían entre los siguientes rangos:

Zona montañosa: de 30 a 80 km/hora.  
" ondulada : de 50 a 110 km/hora.  
" llana : de 90 a 130 km/hora.

##### Velocidad máxima ponderada segura.

Referida a un determinado tramo de camino, es el promedio ponderado de las velocidades directrices de cada sección parcial de aquél.

Para caminos con velocidades directrices menores que 110 km/hora, la forma práctica de determinar la velocidad máxima ponderada segura es la siguiente:

- a) Se determina, de acuerdo a las tablas Nros. 2, 7, 9 y 12, la velocidad máxima segura que puede admitir cada una de las curvas horizontales y verticales.
- b) Para el conjunto de curvas de velocidad máxima segura inferior a 110 km/hora, se determina la longitud sobre la cual se puede suponer constante dicha velocidad.

Para ello, teniendo en cuenta las distancias necesarias para deceleración y aceleración, en el caso que la curva vincule alineamientos rectos de extensión apreciable, se suman las siguientes distancias aproximadas a la longitud propia de cada curva:

Para velocidad directriz de	30 km/hora:	250 m
" " " "	40 " "	240 m
" " " "	50 " "	220 m
" " " "	60 " "	200 m
" " " "	70 " "	170 m
" " " "	80 " "	140 m
" " " "	90 " "	100 m
" " " "	100 " "	50 m

- c) Se multiplican las longitudes parciales  $L_1$  así halladas por sus velocidades máximas seguras correspondientes  $V_1$ , y la longitud restante del tramo  $L_r$  por  $V_r = 110$  km/hora.

Siendo  $L$  la longitud total del tramo, el valor de  $L_r$  será:

$$L_r = L - L_1$$

- d) La suma de las cantidades precedentemente halladas, se divide por la longitud total del tramo en cuestión. Este cociente es la velocidad máxima ponderada segura  $V_{dm}$ , o sea:

$$V_{dm} = \frac{V_1 L_1 + V_r L_r}{L_1 + L_r}$$

Para caminos de velocidad directriz superior a 110 km/hora, se adopta como velocidad máxima ponderada segura, directamente el valor de la velocidad directriz.

Velocidad media instantánea:

Es el promedio de las velocidades instantáneas de todos los vehículos que pasan por un determinado punto del camino.

Velocidad general de recorrido:

Es la relación entre la longitud de una determinada sección de camino y el tiempo que tarda el vehículo en recorrerla, incluyendo todas las demoras y detenciones originadas por el tránsito y las condiciones propias del camino.

Velocidad de operación:

Referida a una sección de camino, es la máxima velocidad general de recorrido a la que puede circular, con seguridad, en todos sus puntos, un conductor de habilidad media, manejando un vehículo en condiciones mecánicas aceptables, en una corriente de tránsito de determinado volumen, cuando el estado del tiempo, de la calzada y de la visibilidad ambiente son favorables.

De acuerdo a la definición, la velocidad de operación es igual a la máxima ponderada segura, únicamente cuando los volúmenes de la corriente de tránsito son tan bajos, que no influyan en la elección de la velocidad del conductor.

Velocidad de marcha:

Es la relación entre la longitud de una determinada sección de camino, y el tiempo que tarda el vehículo en recorrerla, excluyendo los lapsos por demoras y detenciones originadas por causas ajenas al camino en sí.

Velocidad media de marcha:

Es el promedio de las velocidades de marcha de todo un conjunto de vehículos, que recorren una sección determinada de camino.

Cuando las secciones de camino son cortas y no existen demoras originadas por el tránsito, la velocidad media instantánea es aproximadamente igual a la velocidad media de marcha en dicha sección.

En consecuencia, en condiciones ideales de camino esto es en recta y rasante horizontal, se ha determinado la velocidad media de marcha por la medición del promedio de velocidades instantáneas, con volúmenes bajos de tránsito, de manera de que no haya demoras apreciables por la presencia de otros vehículos (condiciones de operación libre).

En estas condiciones, las velocidades medias de marcha para caminos rurales, determinadas en los E.E.U.U. (2) en diferentes años, discriminadas por tipo de vehículos, han sido las siguientes: (Cuadro Nº I-2).

CUADRO Nº I-2

AÑO	VELOCIDAD MEDIA DE MARCHA EN km/hora		
	Automóviles	Omnibus	Camiones
1948	78,6	80,5	69,4
1952	81,7	83,9	72,4
1956	83,7	84,1	74,4
1960	86,6	89,3	77,6
1964	91,6	92,2	81,9

En nuestro país se han hecho estudios similares (3) en algunos caminos de la provincia de Buenos Aires. Para volúmenes bajos de tránsito, o sea prácticamente en condiciones de operación libre, en alineamientos rectos y sin interferencias por cruces, en el año 1963 se ha llegado al siguiente promedio de velocidades:

Automóviles  
 Tránsito con 30% de camiones : 71,3 km/hora  
 Tránsito con 40% de camiones : 65 km/hora  
 Tránsito con 40% de camiones : 63 km/hora

Las diferencias entre estas velocidades y las correspondientes de los E.E.U.U. pueden explicarse por la mayor antigüedad de nuestro parque automotor, y por su gran proporción de coches medianos y pequeños.

Considerando que las condiciones en las que se efectuaron las observaciones de velocidades citadas (3) podrían corresponder a una velocidad de 120 km/hora; estimando que dentro de unos 25 años el porcentaje medio de camiones en caminos rurales sea del orden del 30% y que se opere un aumento de velocidades, similar al de los E.E.U.U., se tendrá que para dicha fecha, la velocidad media de marcha será de unos 88 km/hora.

CUADRO Nº I-3

Velocidad directriz	Relación entre la velocidad media de marcha y la velocidad directriz	Velocidad media de marcha (redondeada)
km/hora		km/hora
30	0,96	29
40	0,935	37
50	0,91	45
60	0,885	53
70	0,86	60
80	0,835	67
90	0,81	73
100	0,785	79
110	0,76	84
120	0,735	88
130	0,71	92
140	0,685	96

Dado que los caminos que se proyectan en el presente deberán servir al tránsito futuro, se considera razonable adoptar como velocidad media de marcha. 88 km/hora cuando la velocidad directriz sea de 120 km/hora.

Teniendo en cuenta que para menores velocidades directrices hay una mayor proporción de vehículos que la sobrepasan, disminuyendo en consecuencia las diferencias entre aquéllas y las velocidades de marcha, se han adoptado para éstas los porcentajes que figuran en el cuadro Nº I-3, de la página anterior.

#### 6 - Grado de congestión.

A fin de evaluar el grado de congestión de una sección de camino, debe conocerse previamente su capacidad.

Siguiendo en general al Manual de Capacidad de Caminos-Edición 1965 (2) daremos la siguiente definición:

##### Capacidad:

Es el máximo número de vehículos que pueden pasar, en la unidad de tiempo, por un determinado punto de una trocha o calzada, en un sentido (o en ambos, para caminos de dos o tres trochas indivisas) bajo las condiciones prevaletientes del tránsito o camino.

En general la unidad de tiempo elegida es la hora. Las condiciones prevaletientes del tránsito y del camino se refieren, respectivamente, a las características de los vehículos y composición del tránsito que circula, y a las características geométricas particulares del camino (ancho de calzada, obstrucciones laterales, alineamientos, etc.).

##### Nivel de servicio:

La medida del grado de congestión de una trocha o calzada, está dada por el nivel de servicio del tránsito que circula por ella.

Para ello además de una descripción cualitativa de dichos niveles de servicio, el manual citado (2) ha tratado de efectuar su determinación cuantitativa, en base a las velocidades de operación y relación entre volúmenes admitidos y capacidad del camino, para cada tipo de carretera rural (de dos trochas indivisas, de calzadas divididas, etc.).

Dichos niveles de servicio son los siguientes:

Nivel A: Tránsito en condiciones de operación prácticamente libre, con altas velocidades de operación.

Hay poca o ninguna restricción a la maniobrabilidad de los vehículos (sobre paso, cambio de trocha, etc.) por la presencia de otros vehículos y los conductores pueden circular a la velocidad que deseen dentro de las limitaciones del diseño geométrico del camino. Tránsito no congestionado.

Nivel B: Tránsito con condiciones de operación estable, y con velocidades de operación y libertad de maniobra ligeramente restringidas. Hay alguna restricción en la maniobrabilidad de los vehículos y los conductores tienen razonable libertad para elegir su velocidad de circulación. Tránsito sin apreciable congestión.

Nivel C: Tránsito en condiciones de operación estable, pero con velocidades de operación y libertad de maniobra más restringidas que en el caso anterior. Gran parte de los conductores ven restringida su libertad para elegir su velocidad de circulación. Ligera congestión de tránsito.

Nivel D: Las condiciones de operación del tránsito se aproximan a la inestabilidad. Las velocidades de operación son más bajas que en el caso anterior y pueden reducirse apreciablemente por cambios en el volumen, o restricciones en la corriente de tránsito. La libertad de maniobra es reducida. Tránsito medianamente congestionado.

Nivel E: Tránsito en condiciones de operación inestable, con volúmenes próximos, o que alcanzan a la capacidad del camino. Las velocidades de operación son bajas oscilando en general entre los 40 y los 60 km/hora. Tránsito fuertemente congestionado.

Nivel F: Tránsito en condiciones de operación forzada, con volúmenes inferiores a la capacidad del camino. Las velocidades son reducidas y en el caso extremo, cuando se produzcan detenciones de la corriente, tanto la velocidad como el volumen de tránsito se anulan. La congestión es total.

#### Volumen de servicio.

Es el máximo número de vehículos que pueden pasar en la unidad de tiempo, con un determinado nivel de servicio, por un punto de una trocha o calzada, en un sentido (o en ambos para caminos de dos y tres trochas indivisás).

Para caminos rurales de importancia, se ha elegido en condiciones medias, para zona llana, el nivel de servicio "B", como el que proporciona un grado aceptable de restricción a la velocidad de circulación y a la libertad de maniobra, en la trigésima hora anual.

En cambio, para zonas onduladas y montañosas dada la configuración del terreno, se ha tenido en cuenta, que los conductores aceptarán en general una mayor restricción a su velocidad de circulación y a su libertad de maniobra, que en el caso de las zonas llanas. Por dicha razón se han elegido respectivamente, niveles generales de servicio "C" y "D" respectivamente.

Es importante determinar los volúmenes de servicio que podrán admitir, en condiciones medias, con dichos niveles generales de servicio, los caminos rurales de dos trochas.

De acuerdo con el Manual de Capacidad de Caminos (2) se llega a la siguiente expresión:

$$N = \frac{2000 (v/c) W}{K[1 + 0,01 pcq (E_c - 1)]}$$

Siendo N: Volumen de tránsito medio diario anual, en veh/hora.

(v/c): Relación entre volumen de servicio y capacidad, para el nivel de servicio dado.

W: Coeficiente de ajuste por ancho de trocha y distancia lateral a obstrucciones, para el nivel de servicio dado.

K: Relación entre el volumen medio diario anual y el volumen horario de la trigésima hora anual.

P<sub>C</sub>: Porcentaje de camiones en el volumen medio diario anual.

q : Relación entre el porcentaje de camiones en la hora pico y el porcentaje de camiones en el volumen medio diario anual.

E<sub>c</sub> : Equivalente en automóviles de un camión medio.

Para caminos en zona llana, con velocidad directriz de 120 km/hora, porcentaje de visibilidad de sobrepaso mayor que el 80% de la longitud del camino, ancho de calzada 7,30 m y sin restricciones por obstáculos laterales, admitiendo que:

$$K = 0,136; q = 2/3; E_c = 2,5 \text{ (nivel B) y } v/c = 0,45 \text{ (nivel B)}$$

se llega a la siguiente expresión:

$$N = \frac{6620}{1 + 0,01 p_c}$$

Para caminos de dos calzadas (cuatro trochas), en zona llana con velocidad directriz igual o mayor que 120 km/hora control parcial o total de accesos, sin restricciones por obstáculos y ancho de calzada y admitiendo que K = 0,141 (en una dirección), q = 2/3 E<sub>c</sub> = 2,00 y v/c = 0,50 (nivel B), se llega a la expresión siguiente:

$$N = \frac{28400}{1 + 0,0067 p_c}$$

Los valores de estos volúmenes para diversos porcentajes de camiones, se han consignado en el cuadro No I-4.

CUADRO No I-4

Porcentaje de Camiones	Volúmenes medios diarios anuales de servicio caminos rurales en zona llana (nivel de servicio "B")	
	Camino de dos trochas indivisas V=120 km/hora a.c. = 7,30 m	Camino de dos calzadas (4 trochas) V=120 km/hora a.c. = 7,30 m
%	veh/día	veh/día
10	6000	27.000
15	5700	26.000
20	5500	25.000
25	5300	24.000
30	5100	24.000
35	4900	23.000
40	4700	22.000
50	4400	21.000

En el cuadro que antecede no se incluyeron los volúmenes correspondientes a caminos en zona ondulada y montañosa, pues dependen, no solamente del porcentaje de camiones, sino del gradiente y longitud de las pendientes.

## CAPITULO II

### CARACTERISTICAS GEOMETRICAS DEL DISEÑO

#### 19 - DISTANCIAS DE VISIBILIDAD.

##### 1 - Distancias de detención.

Se ha denominado así la distancia que recorre, sobre una calzada en condiciones favorables, un conductor de habilidad media, manejando, a la velocidad directriz, un vehículo en condiciones mecánicas aceptables, desde el instante en que observa un obstáculo imprevisible en el camino, hasta el momento en que por aplicación de los frenos, se detiene.

El tiempo de detención se compone de dos partes:

- a) El tiempo de percepción y reacción, o sea el lapso que transcurre desde que el conductor observa el obstáculo hasta que acciona el pedal del freno.
- b) El tiempo de frenado, o sea el tiempo que transcurre desde que el conductor acciona el pedal del freno, hasta que el vehículo se detiene.

Cuando el camino se encuentra en pendiente, la expresión que determina la distancia de detención, es la siguiente:

$$D_1 = \frac{V \cdot t}{3,6} + \frac{v^2}{254 (f \pm i)}$$

Los significados de los términos que intervienen en esta expresión son los siguientes:

- $D_1$  : Distancia de detención, en m
- $V$  : Velocidad directriz, en km/hora
- $t$  : Tiempo de percepción y reacción
- $f$  : Coeficiente de fricción longitudinal
- $i$  : Valor absoluto de la pendiente

El signo positivo de la fórmula se utiliza para las subidas, y el negativo para las bajadas.

Estrictamente, el factor "f" de la fórmula, engloba además, por unidad de peso, la resistencia que el aire opone al avance del vehículo, la resistencia al rodamiento, y la resistencia interna del motor y engranajes (1) (siempre que el conductor no desembrague). Estas resistencias son pequeñas comparadas con la originada por la fricción en sí.

Los valores de t y f aceptados (2) y las distancias de detención resultantes son las que figuran en el Cuadro Nº II-I.

CUADRO Nº II-1

Distancias de detención en función de la velocidad directriz.

V: velocidad directriz	t: tiempo de percepción y reacción	f: Coeficiente de fricción	D <sub>1</sub> : Distancia de detención
km/hora	seg	-	m
30	2,9	0,54	30,72
40	2,8	0,52	43,22
50	2,7	0,50	57,18
60	2,6	0,48	72,87
70	2,5	0,46	90,54
80	2,4	0,44	110,59
90	2,3	0,42	133,43
100	2,2	0,40	159,55
110	2,1	0,39	186,30
120	2,0	0,37	219,88
130	2,0	0,35	262,32
140	2,0	0,33	311,16

Estos valores de "f", son inferiores a los valores límites consignados por la A.A.S.H.O. (3) para pavimentos en estado seco. Los coeficientes medios de seguridad, varían entre el 20% para velocidades bajas y el 50 % para las altas.

Con el pavimento húmedo, los valores del coeficiente de fricción son inferiores a los consignados en el cuadro Nº II-1. Teniendo en cuenta que bajo esas condiciones, la atención del conductor es más concentrada, se ha disminuído el lapso de percepción y reacción en 0,3 seg. Además, adoptando los coeficientes de fricción determinados por la A.A.S.H.O. para pavimentos húmedos, y las distancias de detención obtenidas precedentemente para cada velocidad directriz, las velocidades máximas seguras "Vs" que se obtienen, son las consignadas en el cuadro Nº II-2.

CUADRO Nº II-2

Velocidades máximas seguras para pavimentos húmedos.

V: Velocidad directriz	D <sub>1</sub> : Distancia de detención	f: Coeficiente de fricción para pavimentos húmedos	Vs: Velocidad máxima segura
km/hora	m	-	km/hora
30	30,72	0,41	30
40	43,22	0,39	39
50	57,18	0,36	48
60	72,87	0,35	56
70	90,54	0,33	65
80	110,59	0,32	74
90	133,43	0,31	82
100	159,55	0,30	91
110	186,30	0,30	100
120	219,88	0,29	110
130	262,32	0,28	121
140	311,16	0,27	132

Como puede observarse, para pavimentos húmedos, las velocidades máximas seguras son algo superiores al 90 % de la velocidad directriz y superiores también a las velocidades medias de marcha.

En caminos con trochas divididas se deberán tener en cuenta las distancias de detención correspondientes a cada mano de tránsito, las que resultarán menores para las pendientes positivas (subidas) que para las negativas (bajadas).

En el caso de caminos con trochas no divididas, se tomarán los valores más desfavorables, o sea que las distancias de detención a adoptar para las pendientes, serán las correspondientes a las que resulten de aplicar la fórmula con "i" negativo (bajadas).

En el cuadro N° II-3 que se consigna a continuación, se dan los valores de las distancias de detención en función de la velocidad directriz y la pendiente:

CUADRO N° II-3

VELOCIDAD DIRECTRIZ km/hora	Distancias de detención en pendientes (en metros)						
	Pendientes en %						
	Horizontal	- 3%	- 6%	- 9%	+ 3%	+ 6%	+ 9%
30	31	31	32	32	30	30	30
40	43	44	45	46	43	42	41
50	57	58	60	62	56	55	54
60	73	75	77	80	71	70	68
70	91	94	97	101	88	86	84
80	111	115	120	125	107	104	101
90	133	139	146	-	128	124	-
100	160	167	177	-	153	147	-
110	186	196	209	-	178	170	-
120	220	233	-	-	208	-	-
130	262	280	-	-	247	-	-
140	313	335	-	-	292	-	-

2 - Distancias de sobrepaso.

Para efectuar, en condiciones seguras, una maniobra de sobrepaso en un camino de dos trochas indivisas, el conductor deberá divisar, de - lante de su vehículo, una sección de camino, que en una longitud suficien - te, se encuentre libre de vehículos circulando en sentido contrario.

Denominaremos las magnitudes que intervienen, de la siguiente ma - nera:

- V : Velocidad directriz, en km/hora.
- $V_1$  : Velocidad del vehículo sobrepasado en km/hora.
- $V_2$  : Velocidad del vehículo que sobrepasa en km/hora.
- $d_1$  : Distancia recorrida por el vehículo que desea adelantarse du - rante el tiempo de percepción, decisión, reacción y comienzo de la maniobra de sobrepaso, en metros.
- $t_1$  : Tiempo que tarda el vehículo que desea adelantarse en recorrer la distancia anterior, en segundos.

- $d_2$  : Distancia recorrida por el vehículo que se adelanta desde que se desplaza a la trocha izquierda hasta que retoma la derecha, en metros.
- $t_2$  : Tiempo que tarda en efectuar la maniobra anterior, en segundos.
- $d_0$  : Distancia mínima entre vehículos que marchan en la misma dirección, en metros.
- $d_3$  : Distancia recorrida por un vehículo que circula en sentido contrario al que se adelanta, en metros, durante el lapso  $t_2$ .
- $D_2$  : Distancia de sobrepaso, en metros.

Las hipótesis que se formulan para determinar la longitud que debe ser abarcada por la visual del conductor para efectuar una maniobra de sobrepaso segura, o sea la distancia de sobrepaso, son las siguientes:

- a) El vehículo que debe ser sobrepasado circula a la velocidad media de marcha.
- b) El tiempo de percepción, evaluación, de las posibilidades de sobrepaso, reacción y comienzo de la aceleración del vehículo que sobrepasa se estima en  $t_1 = 4$  segundos.
- c) Durante el período anterior se acepta que el coche que sobrepasa circula a la misma velocidad que el vehículo que tiene adelante, y que la distancia  $d_1$  entre ambos vehículos expresada en metros, vale:  $0,2 V_1 + 8$ . (4).
- d) El promedio de velocidad del vehículo que sobrepasa, desde que inicia su desplazamiento hacia la trocha izquierda, hasta que retoma la derecha, supera en 15 km/hora al del vehículo sobrepasado.
- e) La calzada izquierda debe quedar libre en una longitud adicional  $d_3$  (ver figura nº 1) tal, de manera de permitir que un vehículo que sobrepasa circule en sentido contrario, a una velocidad  $V_2$  igual a la del vehículo que se adelanta, la recorra en el mismo tiempo que tarda el primero en desplazarse a la trocha izquierda, y retomar la trocha derecha.

Si bien los conductores, individualmente, actúan con ligeras variantes respecto al esquema simplificado cuyas hipótesis se han dado, las distancias obtenidas permiten el sobrepaso en la gran mayoría de los casos, de acuerdo a las experiencias de la A.A.S.H.O. (3).

Por otra parte, estas hipótesis implican admitir que para velocidades directrices reducidas, el vehículo que se adelanta podrá circular a velocidades algo superiores a aquéllas lo que es aceptable, ya que, en general, a las secciones con sobrepaso deberán estar dotadas de características geométricas, tanto en planimetría como en altimetría que permitan dicha mayor velocidad.

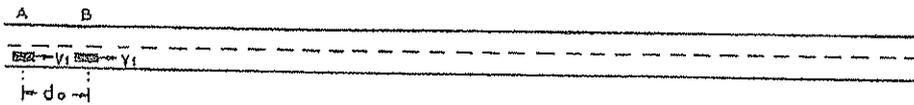
De cualquier manera, para esos casos las distancias así obtenidas, son superiores a las que resultarían de calcularlas con velocidades de sobrepaso igual a la directriz.

Se llega a las siguientes expresiones:

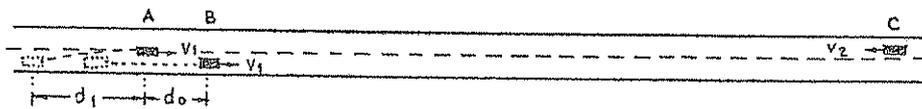
DISTANCIA DE VISIBILIDAD PARA SOBREPASO

- A : vehículo que se adelanta
- B : vehículo que es sobrepasado
- C : vehículo que circula en sentido contrario
- V : velocidades
- : trayectoria de los vehículos

a) Instante  $t$



b) Instante  $t+t_1$



c) Instante  $t+t_1+t_2$

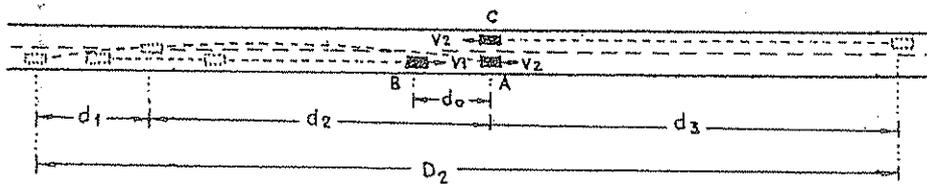


FIGURA N°1

$$t_1 = 4 \text{ seg}$$

$$t_2 = \frac{2 d_0}{V_2 - V_1}$$

$$d_1 = \frac{V_1 t_1}{3,6}$$

$$d_2 = \frac{V_2 t_2}{3,6}$$

$$d_3 = d_2$$

$$D_2 = d_1 + d_2 + d_3$$

Las distancias de sobrepaso obtenidas en función de la velocidad directriz se han consignado en el cuadro Nº II-4.

CUADRO Nº II-4

Distancias de sobrepaso para caminos rurales de dos trochas indivisas.

Velocidades			Tiempos parciales		Distancias parciales			Distancia de sobrepaso	
V	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	d <sub>0</sub>	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	D <sub>2</sub> calculada	D <sub>2</sub> adoptada
km/h	km/h	km/h	seg	seg	m	m	m	m	m
30	28,8	43,8	4,00	6,60	13,76	32,00	80,28	192,56	190
40	37,4	52,4	4,00	7,43	15,48	41,55	108,10	257,75	260
50	45,5	60,5	4,00	8,20	17,10	50,55	137,75	326,05	330
60	53,1	68,1	4,00	8,93	18,62	59,00	168,88	396,76	400
70	60,2	75,2	4,00	9,61	20,04	66,88	200,70	468,28	470
80	66,8	81,8	4,00	10,25	21,36	74,81	232,88	539,97	540
90	72,8	87,9	4,00	10,83	22,58	81,00	264,40	609,80	610
100	78,5	93,5	4,00	11,37	23,70	87,21	295,27	677,75	680
110	83,6	98,6	4,00	11,86	24,72	92,88	324,78	742,44	740
120	88,2	103,2	4,00	12,30	25,64	98,00	352,53	803,06	800
130	92,3	107,3	4,00	12,70	26,46	102,55	378,44	859,43	860
140	95,9	110,9	4,00	13,04	27,18	106,55	401,67	909,88	910

Para caminos de tres trochas indivisas, las distancias de sobrepaso pueden estimarse en el 70 % de los valores hallados anteriormente.

Se considera deseable contar en caminos de dos y tres trochas indivisas, con distancias de visibilidad sustancialmente mayores que las de terminadas, con el fin de permitir el sobrepaso simultáneo de dos o más vehículos.

Para el caso de tener el camino pendientes apreciables, las distancias mínimas obtenidas precedentemente deberán incrementarse ligeramente.

2º - ALINEAMIENTO PLANIMETRICO.

1 - Curvas horizontales.

Para obtener un diseño equilibrado de las curvas horizontales deberán determinarse los radios de éstas que para la velocidad directriz dada, utilicen valores de la fricción inferiores a los máximos establecidos como seguros.

La relación que liga el coeficiente de fricción lateral "f" de un vehículo que en una curva de radio "R" en metros y peralte "p" se mueve a una velocidad "V" (km/hora), es la siguiente:

$$f = 0,007865 \frac{v^2}{R} - p$$

Coefficiente de fricción lateral:

El coeficiente de fricción lateral que se adopta para el diseño, es prácticamente el mismo que recomienda A.A.S.H.O. (3), y es el máximo que ofrece un razonable margen de seguridad sin proporcionar molestias al conductor medio. La variación de este coeficiente con la velocidad directriz se ha considerado lineal adoptándose la siguiente relación empírica:  $f = 0,196 - 0,7 V$ , en la cual "V" es la velocidad directriz expresada en km/hora.

Los valores que se obtienen son los siguientes:

CUADRO Nº II-5

VELOCIDAD DIRECTRIZ km/hora	COEFICIENTE DE FRICCIÓN LATERAL	
	CALCULADO	REDONDEADO
30	0,175	0,18
40	0,168	0,17
50	0,161	0,16
60	0,154	0,15
70	0,147	0,15
80	0,140	0,14
90	0,133	0,13
100	0,126	0,13
110	0,119	0,12
120	0,112	0,11
130	0,105	0,10
140	0,098	0,10

Valores máximos de peralte.

Se han fijado estos valores máximos de acuerdo a los siguientes factores:

- a) Condiciones topográficas (llanura o montaña).
- b) Condiciones climáticas (zonas de heladas y nevadas frecuentes o no).
- c) Condiciones de operación de los vehículos (zonas de bajas velocidades, por frecuente presencia de intersecciones, o zonas sub-urbanas o urbanas).

Se han fijado en base a la combinación de dichas características tres valores máximos del peralte a saber:

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

#### Radio mínimo de curvatura.

De acuerdo a los coeficientes de fricción lateral adoptados se han determinado los radios mínimos de las curvas circulares, para cada valor del peralte, de acuerdo a la expresión siguiente:

$$R = 0,007865 \frac{v^2}{p + f}$$

Estos valores se han tabulado en la tabla N° 2.

#### Determinación del peralte en función del radio de la curva y la velocidad directriz.

Para una velocidad directriz dada, hay diversas maneras de fijar el peralte en función del radio, de las que destacaremos las siguientes (ver figura N° 2):

- 1º) El valor del peralte se hace inversamente proporcional al radio de curvatura, correspondiendo a R mínimo el valor de p máximo.
- 2º) El valor del peralte se determina de manera tal, que contrarreste la fuerza centrífuga que actúa sobre un vehículo que se desplace a la velocidad directriz desde un radio que corresponda a p max. Para curvas de radios menores se mantiene dicho valor p max.
- 3º) Este método es similar al N° 2, excepto que se basa sobre el promedio de la velocidad de marcha.
- 4º) Para radios grandes, el peralte se ha fijado de manera de contrarrestar totalmente la fuerza centrífuga que actúa sobre vehículos que circulan a la velocidad de marcha, definida anteriormente. A partir de un determinado radio y hasta el radio mínimo, el peralte va aumentando gradualmente de manera de hacerse máximo en correspondencia con dicho radio mínimo.

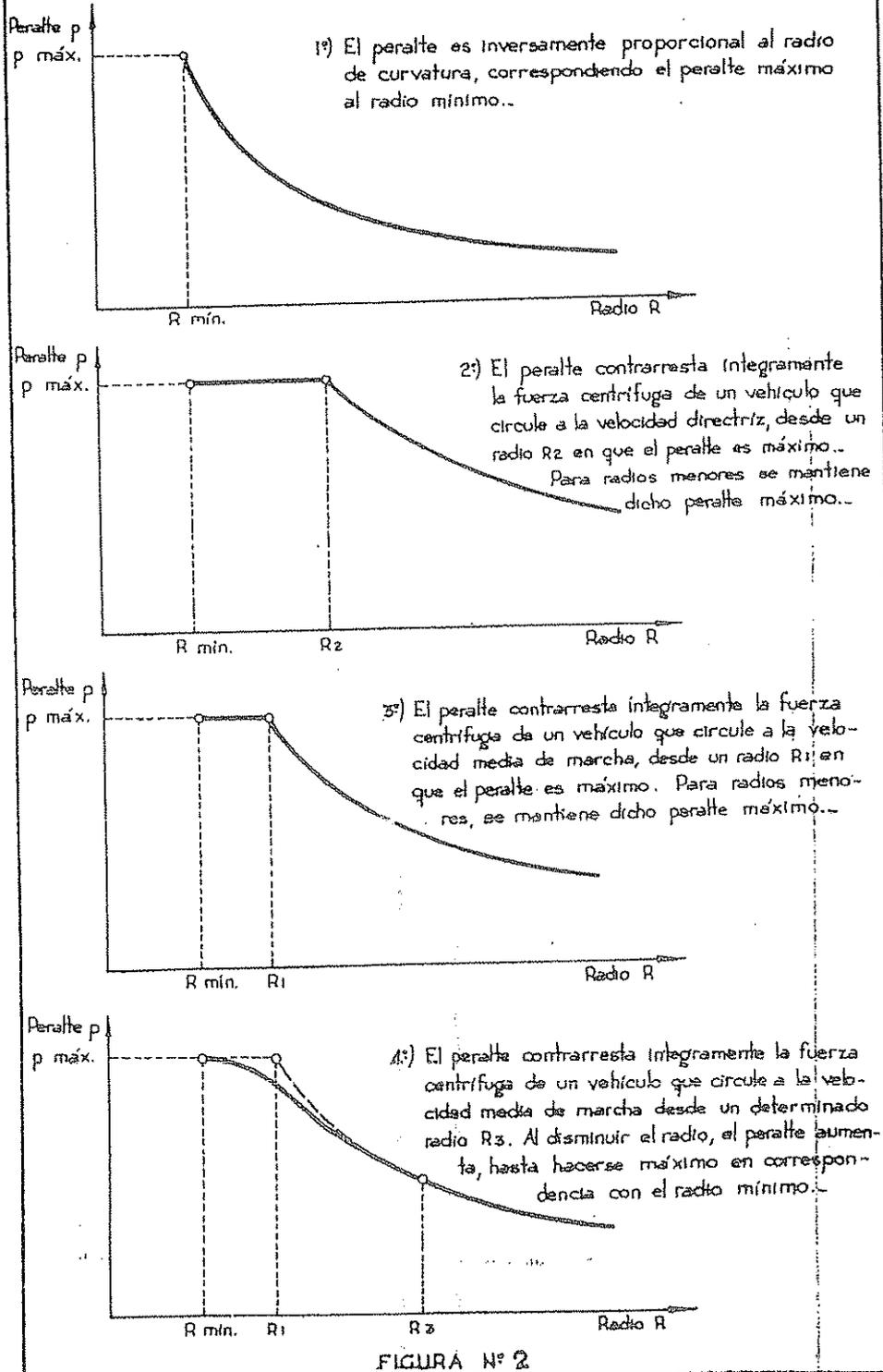
Se ha adoptado, para la fijación del peralte, este último criterio. Los valores del peralte, en función del radio y velocidad directriz están dados en las tablas Nros. 3, 4 y 5.

#### Radio mínimo que no exigen peralte.

El perfil transversal de la calzada, en alineamientos rectos, o sea el perfil normal, está constituido por dos segmentos de recta, simétricos respecto del eje, cuya pendiente transversal varía entre el 1% y el 2,5 %.

Para curvas con radios de gran magnitud se ha admitido mantener este perfil normal, siempre que el coeficiente centrífugo:  $0,007865 \frac{v^2}{R}$  no supere el valor de 0,015, para vehículos que circulen a la velocidad directriz.

### PROCEDIMIENTOS PARA PERALTAR LAS CURVAS



Esto significa que en dicho caso el coeficiente de fricción de los vehículos que transiten por la trocha externa estará comprendido entre 0,025 y 0,040, debido a que la pendiente transversal de dicha trocha, es negativa.

En consecuencia los radios para los cuales no es necesario peraltar las curvas son los siguientes:

CUADRO Nº II-6

VELOCIDAD DIRECTRIZ km/hora	RADIOS MINIMOS QUE NO NECESITAN PERALTE. m
30	500
40	900
50	1.500
60	2.000
70	2.500
80	3.500
90	4.500
100	6.000
110	7.000
120	8.000
130	9.000
140	10.000

Para radios menores que los anteriores, si los valores de los peraltes obtenidos en las tablas Nros. 3 a 5, fueran inferiores a la pendiente transversal del pavimento, se adoptará la magnitud de esta pendiente transversal como peralte en todo el ancho de la calzada.

Radio mínimo deseables.

Con los radios mínimos determinados precedentemente, y para vehículos marchando a la velocidad directriz, la fricción que se utiliza, corresponde a los valores máximos adoptados.

A partir de ese radio mínimo absoluto, para una determinada velocidad directriz, a medida que los radios aumentan, los coeficientes de fricción disminuyen.

Convencionalmente, un primer criterio para fijar radios deseables, sería el de encuadrar en tal denominación, a aquéllos en los que la fricción, utilizada para vehículos marchando a la velocidad directriz, corresponda a coeficientes menores que la mitad de los máximos.

Por otra parte, un segundo criterio sería el de considerar como deseables, los radios que durante la noche permitan iluminar suficientemente a objetos colocados en el camino, a una distancia igual a la de frenado.

Si se adoptara la distancia de frenado correspondiente a la velocidad directriz, los radios mínimos cumplirían las condiciones del párrafo anterior serían excesivamente grandes para velocidades directrices elevadas, (5) a saber:

CUADRO Nº II-7

Velocidad Directriz km/hora	Radio mínimo m
100	400
110	700
120	1500
130	3500

No obstante como por lo general la velocidad de los vehículos es menor durante la noche, se considera suficiente adoptar la distancia de frenado correspondiente a una velocidad igual al 90% de la directriz. De esta manera los radios mínimos serían los siguientes:

CUADRO Nº II-8

Velocidad Directriz km/hora	Radio mínimo m
100	250
110	400
120	600
130	1200

En definitiva, se han considerado como deseables los radios que cumplen simultáneamente las condiciones de los dos criterios enunciados precedentemente.

Por otra parte, deben considerarse los casos de quiebres de alineamientos rectos con ángulos de tangentes muy pequeñas.

En general es preferible evitar dichos quiebres si el ángulo de las tangentes es inferior a los 20°.

Los radios mínimos de las curvas que evitan el aspecto desagradable producido por el quiebre de alineaciones, se consignan en la tabla Nº 6.

Finalmente también es deseable evitar longitudes excesivas de curvas horizontales.

Si bien no pueden darse normas rígidas, para caminos de velocidades altas, esta longitud máxima deseable es de unos 3.500 metros.

El cuadro que sigue proporciona los radios máximos para cada ángulo de las tangentes que cumplen esta condición.

CUADRO Nº II-9

Angulo de las tangentes en grados.	Radios máximos deseables. m.
10°	20.000
20°	10.000
30°	7.000
40°	5.000
50°	4.000
60°	3.500
70°	3.000
80°	2.500
90°	2.500
100°	2.000

Curvas de transición - Longitud mínima.

1er. criterio - Comodidad.

Adoptando como transición la espiral de Euler o clotoide y en el caso en que, en cada uno de sus puntos, el peralte sea proporcional al desarrollo de la curva, se llega a que la longitud necesaria está dada por la siguiente fórmula (6):

$$L_e = 2,72 \frac{V}{A} \left( 0,007865 \frac{V^2}{R} - p \right)$$

R: Radio de la curva circular en m

p: Peralte de la curva circular

V: Velocidad directriz en km/hora

A: Aceleración de la aceleración centrífuga en  $m/seg^3$

Según los diversos autores (6) el valor de "A" que no proporciona ninguna sensación de incomodidad a los ocupantes de los vehículos, está comprendido entre  $0,30 \frac{m}{seg^3}$  y  $0,60 \frac{m}{seg^3}$ . Se ha adoptado el

valor de  $A: 0,45 \frac{m}{seg^3}$ , promedio de los dos anteriores.

2º criterio - Apariencia general.

Se considera que la transición debe tener una longitud mínima tal que un vehículo marchando a la velocidad directriz, no tarde más de 2 segundos en recorrerla.

En consecuencia la longitud mínima en metros está dada por la siguiente expresión, en la cual V es la velocidad directriz en km/hora:

$$L_e = \frac{V}{1,8}$$

En ningún caso se introducirá una longitud de transición inferior a 30 metros.

3er. criterio - Apariencia del borde.

Normalmente, el desarrollo del peralte debe efectuarse a lo largo de la espiral. En consecuencia, bajo este aspecto, la longitud mínima surge de la pendiente relativa máxima a dar al borde exterior de la curva de transición con respecto al eje de la calzada.

Para suavizar el quiebre de pendiente en los bordes de la curva en los puntos T.E. y C.E., se han adoptado los siguientes valores máximos de la pendiente relativa de los bordes de la calzada respecto al eje:

$$i = \frac{40}{V}$$

Siendo "i" la pendiente relativa mencionada en %, V la velocidad directriz en km/hora, se verifica que a mayor velocidad directriz, menor resulta el quiebre de pendientes admisible. Además, siendo "a" y S el ancho y sobreaancho, en m, de la calzada, y "p" el peralte, la longitud mínima de la transición deberá ser la siguiente:

$$L_e = 1,25 (a+S)p V$$

Para simplificar, se han considerado los siguientes anchos máximos de calzada:

Para V entre 30 y 40 km/hora	ac = 6,00 m
" V entre 50 y 70 km/hora	ac = 6,70 m
" V entre 80 y 90 km/hora	ac = 7,00 m
" V 100 km/hora	ac = 7,30 m
" V entre 110 y 140 km/hora	ac = 7,50 m

#### Longitudes de transición a adoptar.

Las tablas Nros. 3, 4 y 5 indican los valores de las longitudes mínimas de transición, redondeadas en múltiplos de 10 metros, que cumplen simultáneamente las cuatro condiciones fijadas precedentemente.

Para caminos de tres y cuatro trochas indivisas, se considera conveniente aumentar las longitudes mínimas de las transiciones dadas anteriormente en un 20% y 50% respectivamente.

Las características geométricas de las curvas de transición pueden obtenerse de las tablas especiales en uso (7) (8).

#### Longitudes deseables.

Se recalca que las longitudes dadas en las tablas citadas son las mínimas. Desde el punto de vista estético, cuando no hay inconvenientes de otra índole, es aconsejable aumentarlas en el orden del 50% al 100% sobre todo para curvas de radios amplios y velocidades directrices elevadas.

Además para que el aspecto agradable de la curva de transición pueda ser apreciado por los usuarios, su longitud no deberá ser inferior a la décima parte del radio.

No obstante, se exceptúan de lo anterior los casos en que la espiral se encuentre desarrollada en una rasante horizontal o de pendiente muy pequeña (del orden del 0,3 %) ya que se aumentaría la zona de la calzada con poca pendiente transversal y de difícil drenaje superficial.

#### Transición del peralte.

Para obtener el perfil peraltado, es necesario hacer rotar el perfil de la calzada a lo largo de la transición alrededor de una de las líneas siguientes (figura Nº 3):

- 1º) Eje longitudinal.
- 2º) Borde interno de la calzada.
- 3º) Borde exterior de la calzada.

Se empleará en general el método del punto 1º) ya que la deformación general del perfil se reparte uniformemente entre ambos bordes, y no se modifica el eje.

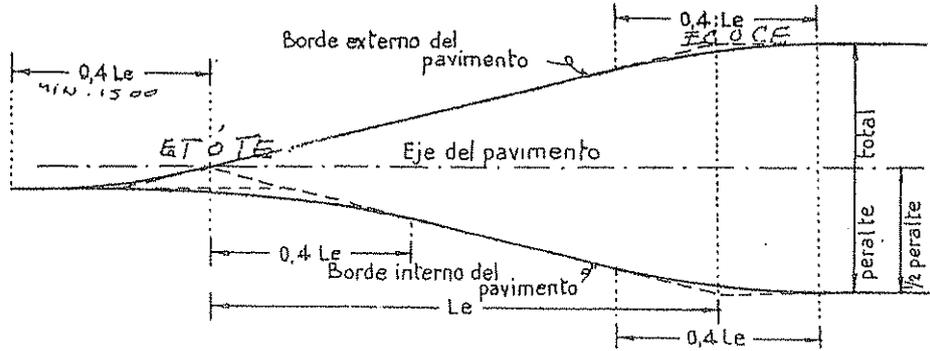
El segundo método se utilizará como excepción en los casos en que el pavimento se encuentre a la altura mínima sobre las cunetas o napa freática, o la curva se encuentre en correspondencia con obras de arte con tapada mínima.

El tercer método podrá utilizarse como excepción también, cuando por razones estéticas no sea conveniente deformar el perfil externo, que es el más notado por los conductores, o cuando el perfil resultante se adapte a la configuración del terreno.

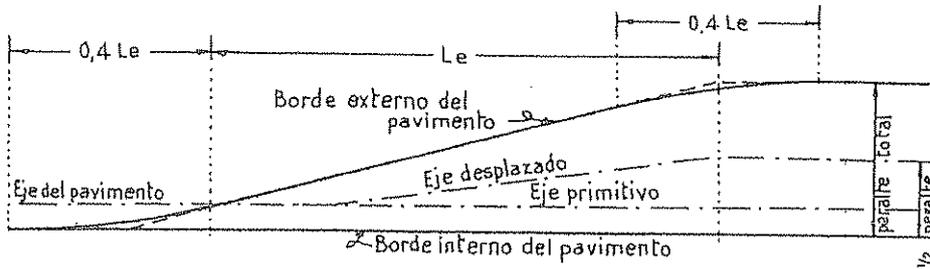
El quiebre que se produce en los bordes de la calzada en los puntos de empalme de la espiral con la tangente o la curva circular, se eliminará mediante curvas verticales cuya longitud sea  $L = 0,4 L_c$ , siendo  $L_c$  la longitud de la curva de transición. (figura nº 3)

### GIRO DEL PERALTE

#### 1º) GIRO ALREDEDOR DEL EJE



#### 2º) GIRO ALREDEDOR DEL BORDE INTERNO



#### 3º) GIRO ALREDEDOR DEL BORDE EXTERNO

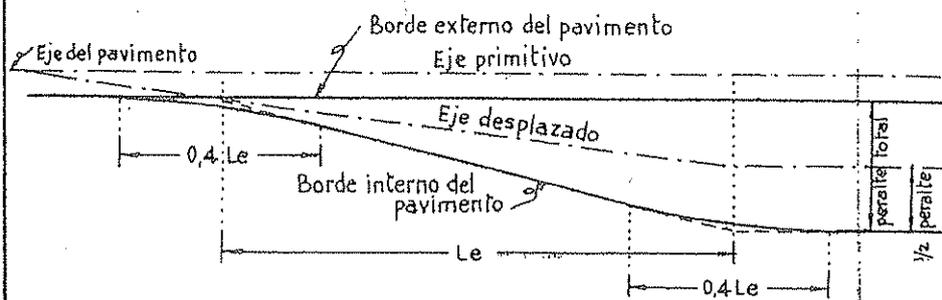


FIGURA Nº 3

Radio a partir de los cuales no es indispensable introducir curvas de transición.

Se considera que cuando el desplazamiento "p" entre la curva circular y la tangente es menor que 0,10 m es innecesario introducir una curva de transición entre ambas, ya que el vehículo describirá de por sí una transición sin apartarse más de 0,10 m del eje de su trocha.

La expresión que da aproximadamente este desplazamiento es la siguiente:

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

Teniendo en cuenta la condición de comodidad, la longitud mínima a considerar será la siguiente:

$$L_e = \frac{2,72 V}{A} \left( \frac{0,007865 V^2}{R} - p \right)$$

Despreciando en esta última expresión el término p del paréntesis, reemplazando en la expresión anterior y despejando el valor de R, obtenemos:

$$R = 0,098 V^2$$

En este caso R es el radio mínimo que no requeriría transición y V la velocidad directriz fijada.

En el cuadro que sigue se indican para cada velocidad directriz, los radios mínimos a partir de los cuales no es imprescindible introducir transiciones:

CUADRO Nº II-10

VELOCIDAD DIRECTRIZ EN km/hora	RADIOS A PARTIR DE LOS CUALES NO ES IMPRESCINDIBLE INTRODUCIR TRANSICIONES, EN METROS.-
30	90
40	160
50	250
60	400
70	500
80	700
90	800
100	1.000
110	1.200
120	1.500
130	1.800
140	2.000

Además de ser una manera elegante de desarrollar el peralte, desde el punto de vista estético es deseable también introducir transiciones para radios mayores que los anteriores, siempre que sea posible apreciarlas visualmente. Para ello tal como se ha expresado anteriormente, será necesario aumentar las longitudes de transición del orden de 1,5 a 2 veces las fijadas en las tablas Nros. 3, 4 y 5, con un mínimo igual a la décima parte del radio.

Para velocidades directrices bajas y caminos de categoría inferior, en muchos casos es suficiente introducir transiciones simples, es decir crearlas de hecho, al ubicar todo el sobreebancho en el interior de la curva circular

Cuando no se empleen transiciones espirales, el desarrollo del peralte se efectuará sobre las longitudes mínimas dadas para  $L_e$  en las tablas citadas. En este caso la mitad del desarrollo del peralte se efectuará sobre la tangente y la otra mitad sobre la curva circular.

Longitudes mínimas de transición para curvas circulares compuestas.

Se utilizan las curvas circulares compuestas cuando la configuración del terreno no permite una sola curva circular.

Los elementos de estas curvas son los siguientes:

	Curva de <u>mayor radio</u>	Curva de <u>menor radio</u>
Radio (en m)	$R_1$	$R_2$
Peralte	$P_1$	$P_2$
Sobreebancho (en m)	$S_1$	$S_2$

Elementos comunes a ambas curvas

Velocidad directriz (en km/hora)	V
Longitud de transición (en m)	$L_e$
Radio de una circunferencia cuya curvatura es la diferencia entre las de ambas curvas (en m)	$R_a$
Desplazamiento de los ejes de las curvas circulares en correspondencia del radio común (en m)	$P_a$

Se pueden presentar los siguientes casos:

- 1º) Cuando el radio de la curva mayor no supere al doble de la curva menor ( $\frac{R_1}{R_2} \leq 2$ ), o la velocidad directriz sea inferior a 40 km/hora.

En este caso puede omitirse introducir una transición espiral, ya que llevando las diferencias de sobreebanchos de ambas curvas en el interior de la de menor radio se crea una transición simple adecuada. Las longitudes, que en este caso, resultan suficientes para desarrollar las diferencias de peralte y sobreebancho son las siguientes:

CUADRO Nº II-11

Velocidad directriz comprendida entre :	Longitud de transición
30 y 50 km/hora	30 m
60 y 90 " "	40 m
100 y 120 " "	50 m
130 y 140 " "	60 m

2a) Cuando la relación de radios entre ambas curvas circulares supere a dos,  $(\frac{R_1}{R_2} > 2)$  y la velocidad directriz sea de 40 km/hora o mayor.

Para ello se procede así:

a) Se calcula  $R_a$  :

$$R_a = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}$$

b) Se calcula la longitud mínima de la espiral que proporciona una aceleración centrífuga menor que el valor adoptado:

$$L_e = 6,05 V \left( \frac{0,007865 V^2}{R_a} + p_1 - p_2 \right)$$

c) Se calcula la longitud mínima de la espiral que proporciona una adecuada pendiente relativa del borde:

$$L_e = 1,25 (a + S_2 - S_1) (p_2 - p_1) V$$

d) De los dos valores anteriores se elige el  $L_e$  que resulte mayor.

e) Se calcula el desplazamiento de los ejes centrados en las calzadas respectivas de ambas curvas, teniendo en cuenta que la diferencia de sobreanchos se lleva hacia el interior de la curva de menor radio:

$$p_a = \frac{L_e^2}{24 R} + S_1 - S_2$$

f) Si dicho desplazamiento es inferior a 0,10 m no es necesario introducir una transición espiral. En este caso se adopta una transición simple cuya longitud (redondeada) sea el valor  $L_e$  elegido.

g) Si el desplazamiento  $p_a$  es superior a 0,10 m se introduce una transición espiral cuya longitud mínima también sea el valor  $L_e$  elegido (redondeado).

#### Sobreanchos.

Para mantener en las curvas las mismas condiciones de seguridad en el cruce de vehículos que en las rectas, es necesario introducir sobreanchos, por las siguientes razones:

- El vehículo al describir la curva, ocupa un mayor ancho, ya que generalmente las ruedas traseras recorren una trayectoria ubicada en el interior de la descrita por las ruedas delanteras. Además el extremo lateral delantero, describe una trayectoria exterior al del vehículo.
- La dificultad que experimentan los conductores para mantenerse en el centro de su trocha debido a la menor facilidad de apreciar la posición relativa de sus vehículos dentro de la curva.

Esta dificultad aumenta con la velocidad pero disminuye a medida que los radios de las curvas son mayores.

Para el caso a) si el vehículo describiera una curva marchando a muy pequeña velocidad, el sobreancho se podría calcular geoméricamente, ya que su eje posterior es radial. Lo mismo ocurriría cuando describiera una curva peraltada a una velocidad tal, de manera de que la fuerza

centrífuga quedara completamente contrarrestada por la acción del peralte. En cambio si la velocidad fuera menor o mayor que la anterior, las ruedas traseras se moverían a lo largo de una trayectoria más cerrada o más abierta, respectivamente.

Para el cálculo práctico del sobreancho no se ha tenido en cuenta esta circunstancia, muy variable según las características de los vehículos y la velocidad que desarrollan.

Para determinar la magnitud del sobreancho, debe elegirse un vehículo representativo del tránsito de la ruta. Dada la gran proporción de camiones que circula por los caminos, actualmente del orden del 40 % del tránsito total, se ha tomado como vehículo representativo un camión semiremolque de las siguientes dimensiones:

Distancia entre la parte frontal y eje de  
lantero ( $L_1$ ) ..... : 1,20 m  
Distancia entre el eje delantero y el eje  
trasero de la unidad tractora ( $L_2$ ) ..... : 4,30 m  
Distancia entre el eje trasero de la uni-  
dad tractora y el eje del semiremolque ( $L_3$ ) : 6,40 m

Si bien hay vehículos de mayores dimensiones aun, su influencia en el cálculo solo se haría notar para radios muy reducidos correspondientes a caminos de velocidades directrices bajas.

Por otra parte, para una velocidad de 30 km/hora, que en zonas rurales se adopta solamente para caminos de montaña, en los que las fuertes pendientes prácticamente no permiten el tránsito de camiones con acoplado, de las dimensiones indicadas precedentemente, el vehículo representativo que se ha adoptado es el camión sin remolque ( $L_3 = 0$ ), con las siguientes medidas:

$$L_1 = 1,20 \text{ m}$$

$$L_2 = 6,80 \text{ m}$$

Siendo R el radio de la curva en metros y V la velocidad directriz en km/hora, la expresión que da el sobreancho S, en metros, de un camino de 2 trochas es la siguiente (ver figura N° 4):

$$S = 2 \left[ R - \sqrt{R^2 - (L_2^2 + L_3^2)} \right] + \sqrt{R^2 + L_1 (2 L_2 + L_1)} - R + \frac{V}{10\sqrt{R}}$$

En el caso de curvas con transición espiral, el sobreancho se deberá repartir, en general, por partes iguales a ambos lados del eje, aunque en ciertos casos podrá ser ubicado en el borde interior de la curva circular; en cambio para curvas con transición simple, se lo ubicará siempre en el borde interior de la curva circular.

Por razones prácticas no se proporciona sobreancho a las curvas, cuando su cálculo arroje un valor inferior a 0,50 m.

## 2 - Visibilidad en curvas horizontales.

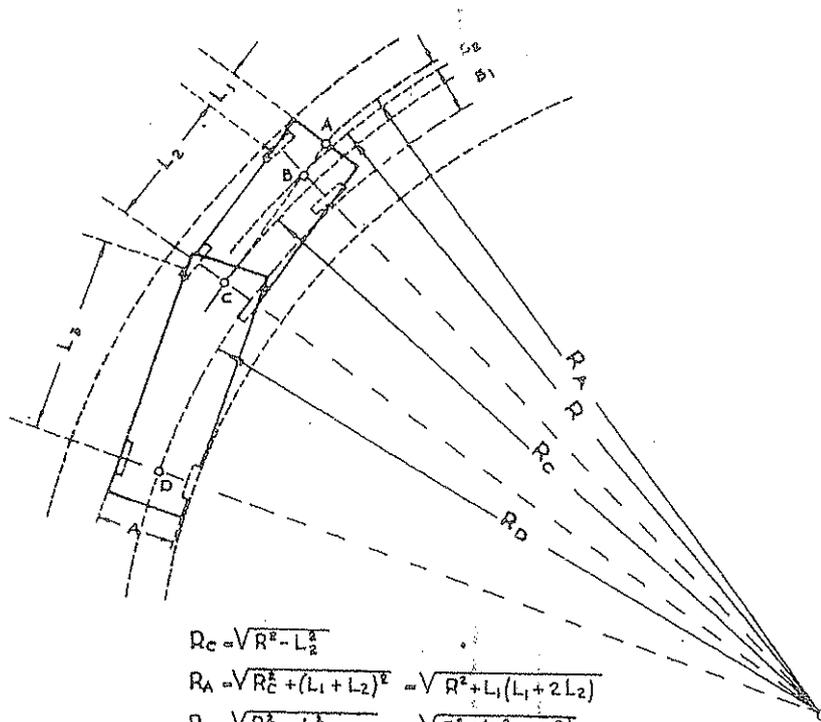
### Visibilidad para detención.

Es necesario que en cualquier punto del camino exista la distancia mínima de visibilidad para detención correspondiente a la velocidad directriz del proyecto.

### SOBREANCHO EN LAS CURVAS

Dimensiones del semiremolque adoptado para el diseño:

- $L_1 = 1,20 \text{ m.}$
- $L_2 = 4,30 \text{ m.}$
- $L_3 = 6,40 \text{ m.}$



$$R_C = \sqrt{R^2 - L_2^2}$$

$$R_A = \sqrt{R_C^2 + (L_1 + L_2)^2} = \sqrt{R^2 + L_1(L_1 + 2L_2)}$$

$$R_D = \sqrt{R_C^2 - L_3^2} = \sqrt{R^2 - (L_2^2 + L_3^2)}$$

Sobreanchos:

$$S_1 = R - R_D = R - \sqrt{R^2 - (L_2^2 + L_3^2)}$$

$$S_2 = R_A - R = \sqrt{R^2 + L_1(L_1 + 2L_2)} - R$$

$$S_v = \frac{V}{10\sqrt{R}} \text{ (por dificultad de maniobrar en las curvas)}$$

Para camino de 2 trochas  
Sobreancho total:

$$S = 2S_1 + S_2 + S_v$$

$$S = 2 \left[ R - \sqrt{R^2 - (L_2^2 + L_3^2)} \right] + \left[ \sqrt{R^2 + L_1(L_1 + 2L_2)} - R \right] + \frac{V}{10\sqrt{R}}$$

FIGURA N° 4

En el caso de curvas horizontales, la visual del conductor dirigida a un punto de la curva, ubicada a la distancia de detención con respecto al vehículo, pasa por el interior de la curva.

La presencia de obstrucciones a dicha visual, tales como taludes de desmonte, cercas o construcciones, pueden constituir en consecuencia, un peligro para el tránsito.

La tabla Nº 7 suministra, para camino de dos trochas con rasante de pendiente uniforme y longitud de la curva horizontal mayor que la distancia de frenado, las distancias mínimas, medidas desde el centro de la calzada en curva, en dirección al radio, a las que deben encontrarse las obstrucciones laterales, cuya altura sobre la rasante sea superior al valor indicado en la misma tabla. (ver figura en tabla Nº 7).

Dichas distancias mínimas varían con la pendiente longitudinal de la curva horizontal. A tal efecto se han considerado como pendientes negativas las bajadas con giro a la derecha (o subidas con giro a la izquierda) y positivas las de giro contrario.

Los valores de las alturas de las obstrucciones laterales que figuran en la tabla aludida, se han determinado considerando que las alturas del ojo del conductor y del obstáculo en el camino son de 1,10 m y 0,20 m respectivamente, y que ambos se encuentran del borde de la calzada a una distancia igual a la cuarta parte de su ancho normal en recta.

En el caso de que la curva horizontal esté superpuesta con otra vertical, cóncava o convexa, la altura máxima de las obstrucciones laterales ubicadas a una distancia máxima del eje, igual a la dada en la tabla Nº 7, será la siguiente:

$$h_0 = h + 1/2 (C_1 + C_2) - C_0$$

En esta expresión, "h" es la altura dada en la tabla Nº 7, "C" es la cota en el centro de la calzada en curva, y "C<sub>1</sub>" y "C<sub>2</sub>" son respectivamente las cotas de la rasante en puntos equidistantes del anterior, cuya distancia entre sí sea igual a la de frenado.

Los valores de la tabla consideran que tanto el conductor como el objeto se encuentran sobre la curva. Si una parte de la distancia de frenado se desarrolla sobre la tangente, la distancia a los obstáculos puede ser menor.

En este caso las distancias laterales mínimas a obstrucciones laterales de altura indefinida se obtendrán del gráfico Nº 1 construido de acuerdo a un estudio inédito (9). En este gráfico también figuran las alturas máximas de obstrucciones laterales cuyas distancias al eje son menores que las anteriores.

#### Visibilidad para sobrepaso.

Si bien es preferible tener visibilidad de sobrepaso en el mayor porcentaje posible de longitud de camino, gran parte de las curvas horizontales no permiten visuales de la longitud necesaria para efectuar dicha maniobra.

Por otra parte, en las curvas de radios reducidos que utilizan al máximo la fricción lateral, no pueden efectuarse con seguridad dichas maniobras, ya que, para sobrepasar, los vehículos deberán marchar, en gran proporción de casos, a velocidades algo superiores a la directriz y realizar maniobras de cambios de trocha que supondrán excederse

de dicha fricción máxima segura.

Además, en las curvas con giro a la derecha, el vehículo que debe ser sobrepasado obstruye en cierta medida la visual del conductor que desea adelantarse.

No obstante, de acuerdo a un estudio realizado (10) para cada velocidad directriz, a partir de cierto radio, con distancias de visibilidad adecuadas, la maniobra de sobrepaso puede efectuarse en condiciones seguras.

Por otra parte, el "Reglamento General de Tránsito para los Caminos y Calles de la República Argentina", que actualmente no permite dicha maniobra, se encuentra en revisión, y existen razones para suponer, que en el nuevo reglamento se permitiría, en forma restringida, la maniobra de sobrepaso en curvas.

La tabla Nº 8 suministra para caminos de dos trochas y longitud de curva horizontal mayor que la distancia de visibilidad de sobrepaso, las distancias mínimas medidas desde el centro de la calzada en curva, en dirección al radio a las que deben encontrarse los obstáculos laterales, cuya altura sobre la rasante sea superior a 1,10 m (altura del ojo del conductor).

En caso de que la curva horizontal esté superpuesta con otra vertical, cóncava o convexa, la altura máxima de los obstáculos laterales ubicados a una distancia lateral menor que la dada en la tabla Nº 8, será la siguiente:

$$h_0 = 1,10 \text{ m} + 1/2 (C_1 + C_2) - C_0$$

En esta expresión  $C_0$  es la cota en el centro de la calzada en curva y  $C_1$  y  $C_2$  son, respectivamente, las cotas de la rasante en puntos equidistantes del anterior, cuya distancia entre sí sea igual a la de visibilidad de paso.

Si la longitud de la curva fuera menor que la longitud de sobrepaso las distancias laterales mínimas a obstrucciones laterales se obtendrán del gráfico Nº 2.

- - - - -

## ALINEAMIENTO ALTIMÉTRICO-DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA RASANTE.

### 1 - Curvas verticales.

#### Generalidades.

Para obtener un cambio gradual entre dos rasantes rectilíneas contiguas de diferente pendiente, es necesario introducir entre ellas una curva vertical.

El diseño geométrico de las curvas verticales, deberá permitir que se cumplan las siguientes condiciones:

- 1º) Seguridad para el tránsito.
- 2º) Comodidad para los ocupantes de los vehículos.
- 3º) Apariencia estética de la rasante.
- 4º) Drenaje superficial adecuado.

#### Forma de las curvas verticales.

En la práctica vial se utilizan las curvas verticales circulares, parábolas cuadráticas y parábolas cúbicas. Estas últimas o la introducción de curvas de transición entre las rasantes rectilíneas y las curvas circulares verticales han sido sugeridas por algunos autores (11) (12) (13) para evitar la aplicación brusca de una aceleración radial, al entrar el vehículo en la curva vertical.

Por su simplicidad, nuestra práctica vial ha adoptado como curvas verticales las parábolas cuadráticas, que difieren muy poco de las curvas circulares, dentro de los rangos de los parámetros y pendientes usuales. Más adelante se analiza la necesidad de introducir transiciones en las curvas verticales.

Para la individualización de estas curvas parabólicas se utiliza su parámetro, o sea el radio de curvatura en el vértice:  $p = x^2/2y$ , continuando la práctica vigente en nuestro medio desde 1949 (2) y que se ha ido generalizando en diversos países.

#### Curvas verticales convexas.

Se trata de determinar los parámetros de este tipo de curvas que permitan cumplir simultáneamente las cuatro condiciones impuestas precedentemente, que se repiten a continuación:

- 1º) Seguridad para el tránsito.

Para satisfacer esta condición, es indispensable contar con distancias de visibilidad, desde el ojo del conductor hasta el posible obstáculo, iguales a las de detención. Se consideran los casos de operación diurna y nocturna, a saber:

a) Para operación diurna, las distancias de detención elegidas, son las correspondientes a la velocidad directriz.

b) Para operación nocturna, teniendo en cuenta que en general, los conductores no imprimen a sus vehículos las velocidades máximas a las que circularían de día, se han adoptado distancias de detención correspondientes a una velocidad igual al 90 % de la directriz.



a) Parámetros mínimos absolutos para operación diurna:

$$p = \frac{2 D_1}{1} - \frac{2(\sqrt{h} + \sqrt{h'})^2}{1^2} \quad (\text{Válida para } L < D_1)$$

$$p = \frac{D_1^2}{2(\sqrt{h} + \sqrt{h'})^2} \quad (\text{Válida para } L > D_1)$$

b) Parámetros mínimos absolutos para operación nocturna:

$$p' = \frac{2 D_1'}{1} - \frac{2(\sqrt{h''} + \sqrt{h'})^2}{1^2} \quad (\text{Válida para } L < D_1')$$

$$p' = \frac{D_1'^2}{2(\sqrt{h''} + \sqrt{h'})^2} \quad (\text{Válida para } L > D_1')$$

c) Parámetros mínimos deseables:

$$p'' = \frac{2 D_1}{1} - \frac{2(\sqrt{h''} + \sqrt{h'})^2}{1^2} \quad (\text{Válida para } L < D_1)$$

$$p'' = \frac{D_1^2}{2(\sqrt{h''} + \sqrt{h'})^2} \quad (\text{Válida para } L > D_1)$$

Los valores de los parámetros que cumplen simultáneamente con las condiciones mínimas absolutas impuestas para las operaciones diurna y nocturna, figuran en las columnas de la derecha de la tabla N° 9, en la que se ha tenido en cuenta, para caminos de trochas indivisas, la variación de la distancia de frenado en función de la pendiente media de la curva vertical. La tabla N° 10 permite obtener los parámetros mínimos deseables.

2º) Comodidad de los ocupantes de los vehículos.

a) Aceleración radial máxima.

Al circular un vehículo por una curva vertical, sus ocupantes están sujetos a una aceleración radial determinada por la velocidad de aquél y el radio de curvatura. Respecto del valor máximo admisible de dicha aceleración, que no ocasione sensación de incomodidad, no existe un criterio uniforme entre los diversos autores, (3) (11) variando entre 1,20 m/seg<sup>2</sup> a 0,15 m/seg<sup>2</sup> (este último valor, aplicable a autopistas).

Se considera que en general un valor de 0,30 m/seg<sup>2</sup> responde con amplitud a las exigencias de la comodidad, tanto para curvas verticales cóncavas como convexas.

Teniendo en cuenta que el parámetro de las parábolas cuadráticas es igual al radio de curvatura en su vértice y que éstas son sensiblemente equivalentes a curvas circulares de radio igual a dicho parámetro, se tiene:

$$p = \frac{v^2}{a}$$

Siendo:

- a: Aceleración radial en m/seg<sup>2</sup>
- v: Velocidad directriz, en m/seg
- p: Parámetro, en m

Expresando la velocidad en km/hora y reemplazando a por su valor adoptado (0,30 m/seg<sup>2</sup>) se tiene:

$$p = 0,25 v^2$$

Los parámetros mínimos en función de la velocidad directriz son, en consecuencia, los que figuran en el cuadro Nº II-12:

CUADRO Nº II-12

Velocidad Directriz km/hora	Parámetro mínimo (m)
30	225
40	400
50	625
60	900
70	1225
80	1600
90	2025
100	2500
110	3025
120	3600
130	4225
140	4900

b) Variación máxima de la aceleración radial.

Algunos autores han considerado la conveniencia de evitar la brusca aplicación de una aceleración radial, utilizando como curvas verticales, espirales o parábolas cúbicas. Se ha estimado que una variación de aceleración inferior a  $b = 0,25 \text{ m/seg}^3$  ( $0,8 \text{ pié/seg}^3$ ) ya cae por debajo de los límites de percepción humana (11). Con las notaciones conocidas la longitud mínima, en metros, de la transición espiral vertical será:

$$L_e = \frac{v^3}{46,66 b p}$$

reemplazando "b" por su valor se llega a

$$L_e = \frac{v^3}{11,66 p}$$

El desplazamiento "d", en metros que sufre la curva vertical, por la introducción de la espiral (equivalente al valor "p" en curvas horizontales) será el siguiente:

$$D = \frac{v^6}{52240 p^3 b^2}$$

reemplazando "b" por su valor y despejando "p", llegamos a:

$$p = \frac{0,068}{\sqrt[3]{d}} v^2$$

Consideramos que dentro de las técnicas constructivas previsibles en un futuro próximo, pueda haber una tolerancia en la rasante de 0,02 m, con respecto a la prevista.

Un criterio respecto de la necesidad de introducir curvas verticales de transición sería el de no aplicarlas cuando "d" sea inferior a 0,02 m y que dicho desplazamiento se produjera recién después de recorrer el vehículo la longitud de transición en un tiempo "t" proporcional a "d", y en este caso, no inferior a un segundo ( $t = 50 d$ , expresándose "t" en seg y "d" en m).

Es decir el valor del parámetro mínimo y la longitud mínima de transición, que cumplen el criterio anterior, se obtendrán reemplazando el valor:  $d = 0,02$  m, en las siguientes expresiones:

$$P_{\min} = \frac{0,068}{\sqrt[3]{d}} v^2$$

$$L_{\min} = 14 dV$$

o sea:

$$P_{\min} = 0,25 v^2$$

$$L_{\min} = 0,28 v$$

Los parámetros mínimos que satisfacen el criterio de aceleración máxima,  $a = 0,30$  m/seg<sup>2</sup>, también cumplen con las condiciones precedentemente enunciadas, ya que sus valores están dados por la misma fórmula:  $p = 0,25 v^2$ .

Las longitudes de transición correspondientes a un desplazamiento:  $d = 0,02$  m, resultarían de reemplazar el valor del parámetro mínimo obtenido en la expresión correspondiente, a saber:

$$L_e = \frac{v^3}{11,66 \times 0,25 v^2} \quad \text{o sea:}$$

$$L_e = 0,34 v$$

Es decir también se cumpliría la segunda condición respecto a la longitud mínima de transición ( $L_{\min} = 0,28 v$ ).

En síntesis, adoptando como mínimo parámetros dados por la fórmula  $p = 0,25 v^2$ , no sería necesario introducir transiciones para las curvas verticales, absorbiéndose la brusca aplicación de las fuerzas originadas por la aceleración radial, por el sistema de amortiguación del vehículo.

3º) Apariencia estética de la rasante.

Desde el punto de vista estético, para evitar que la rasante presente un aspecto no satisfactorio, se ha fijado para las curvas verticales convexas, una longitud mínima dependiente de la velocidad directriz.

Siendo  $L_{\min}$  la longitud mínima en metros y  $V$  la velocidad directriz en km/hora, la expresión adoptada es la siguiente:

$$L_{\min} = 0,7 V \quad \text{o sea:}$$

$$P_{\min} = \frac{0,7 V}{i}$$

En esta última expresión  $P_{\min}$  es el parámetro, e "i" la diferencia algebraica de pendientes.

Por otra parte, independientemente de la velocidad directriz, se ha elegido, como límite inferior de los parámetros, el valor de 400 m o sea:

$$P_{\min} = 400 \quad (\text{en metros})$$

Finalmente, se ha considerado que la combinación de estas condiciones con las de seguridad y comodidad, proporcionan una adecuada apariencia estética a la rasante.

#### 4º) Drenaje superficial adecuado.

El problema del drenaje solo se presenta en las curvas verticales con pavimentos provistos de cordones, en el punto en que la tangente a la rasante es horizontal. Las normas A.A.S.H.O. de diseño geométrico de caminos rurales consideran que en estos casos el drenaje es adecuado, cuando a una distancia de 15,20 m de dicho punto, la pendiente longitudinal es igual o mayor que 0,35 %. Esto implica que el parámetro no supere los 4.350 m, o sea que para velocidades superiores a 90 km/hora, esta condición estaría en general en contraposición con las del criterio de seguridad.

No obstante es poco frecuente, en caminos rurales, el uso de cordones, y de presentarse esta situación deberán utilizarse los parámetros que cumplan el criterio de seguridad asegurando, no obstante, un drenaje adecuado en aquellos puntos críticos (por ejemplo, interrumpiendo o eliminando los cordones).

Además de los parámetros mínimos que cumplan los criterios anteriores, deberán tomarse en consideración los parámetros de las curvas convexas que permiten el sobrepaso de vehículos.

Para el caso de operación diurna en que a lo largo de la distancia de sobrepaso ( $D_2$ ) correspondiente a la velocidad directriz, haya un solo alineamiento recto y que altimétricamente, haya solamente dos rasantes unidas por una curva vertical convexa, los parámetros mínimos que permiten la maniobra de sobrepaso están dados por las siguientes expresiones:

$$p = \frac{2D_2}{1} + \frac{2(\sqrt{h} + \sqrt{h''' - 0,05})^2}{12} \quad (\text{válida para } L < D_2)$$

$$p = \frac{D_2^2}{2(\sqrt{h} + \sqrt{h''' - 0,05})^2} \quad (\text{válida para } L > D_2)$$

Se señala que dadas las relativamente largas distancias de sobrepaso y la consiguiente dificultad en percibir los vehículos que se aproximan, la visual que se ha considerado, es la trazada desde el ojo del conductor, hasta 0,05 por debajo del techo del vehículo que circula en sentido contrario.

Para cada velocidad, los valores de los parámetros mínimos que permiten el sobrepaso, están dados en la tabla N° 11.

Debido a la baja altura de los faros de los coches, en curvas convexas, de noche, un conductor recién puede ver directamente un vehículo que se acerca en sentido contrario, a una distancia menor que en el caso de operación diurna.

No obstante, debido a la iluminación indirecta de elementos próximos al camino, tales como árboles, taludes, etc., o aun el propio resplandor de los faros en la atmósfera, puede apreciarse la aproximación de un vehículo en sentido contrario, antes de percibir directamente la luz de sus faros. Este hecho, unido a la circunstancia de ser, en general menores las velocidades nocturnas, permite prescindir de verificar en estas condiciones, los parámetros de las curvas convexas determinadas para el caso de operación diurna.

De superponerse curvas horizontales y verticales o de existir más de una curva vertical a lo largo de una distancia igual a la de sobrepaso, deberá verificarse que no existan obstáculos por encima de la visual de dicha longitud, tendida de ojo del conductor a vehículo, a alturas sobre la calzada de 1,10 m y 1,30 m respectivamente.

Para verificar, sobre rasantes proyectadas, las distancias de visibilidad para sobrepaso y marcar las zonas sin sobrepaso, es de utilidad un escalímetro especial (18) ejecutado en material transparente que esencialmente consta de una línea horizontal superior y dos líneas paralelas en la parte inferior: la primera a 1,10 m y la segunda a 1,30 m respectivamente, de la mencionada en primer término, medidas, ambas distancias, en la escala vertical del plano.

Horizontalmente, el escalímetro mencionado está dividido en metros (medidos también en la escala del plano desde un origen dado) y en correspondencia con las distancias de sobrepaso están consignados los valores de la velocidad directriz respectiva.

Se opera sobre el plano de la rasante cuyas escalas horizontales y verticales coincidan con las del escalímetro.

Haciendo coincidir la intersección de la primera paralela y la vertical del origen con el punto de la rasante cuya distancia de visibilidad se desea verificar (punto A, figura Nº 5) y girando el escalímetro hasta que la paralela superior sea tangente a la rasante, (punto B), en la intersección de la paralela inferior con la rasante (punto C) se podrá leer en el escalímetro, sobre la escala horizontal correspondiente, la distancia de visibilidad y velocidad directriz respectiva.

Si estas distancias (o velocidad) superan a la distancia de sobrepaso del proyecto (o velocidad directriz del proyecto) el conductor que se encuentre en el punto A, tendrá visibilidad de sobrepaso mayor que la necesaria. Este procedimiento es válido para rasantes de pequeña pendiente. En la misma figura Nº 5 se detallan las correcciones a introducir para pendientes empinadas.

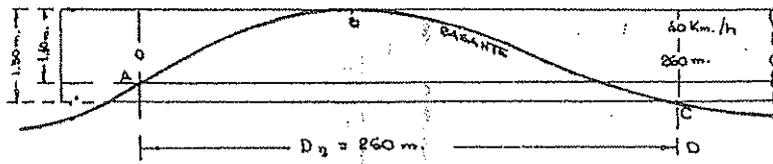
Una vez verificados todos los puntos, en el plano del perfil longitudinal podrá marcarse con una línea horizontal continua, la zona en la cual no existe sobrepaso, lo que facilitará, un posible ajuste de la rasante para lograr mayor visibilidad.

#### Curvas verticales cóncavas.

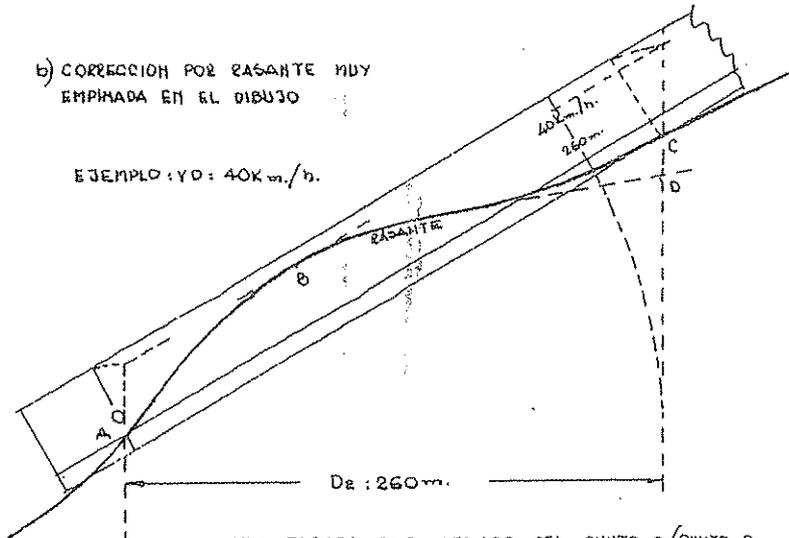
Las condiciones que debe cumplir el diseño geométrico de estas curvas son las ya mencionadas anteriormente, a saber:

# VERIFICACION DE LA DISTANCIA DE SOBREPASO

a) BASANTE PRACTICAMENTE HORIZONTAL EN EL DIBUJO  
EJEMPLO: VD: 40 Km/h.



b) CORRECCION POR BASANTE MUY EMPINADA EN EL DIBUJO  
EJEMPLO: VD: 40 Km/h.



SI LA BASANTE PASARA POR DEBAJO DEL PUNTO C (PUNTO D POR EJEMPLO) NO HABERIA SOBREPASO PARA LOS VEHICULOS QUE PASARAN POR A HACIA D ( $D_s$ : DISTANCIA DE SOBREPASO)

c) SOBREPASO BAJO UNA ESTRUCTURA  
EJEMPLO: VD: 40 Km/h.

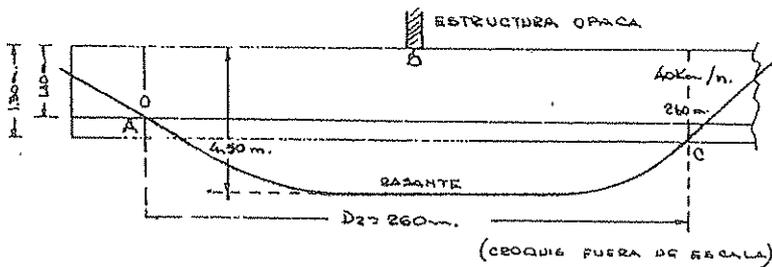


FIGURA N° 5

19) Seguridad en el tránsito.

En este caso prevalecen las condiciones de operación nocturna, ya que dada la configuración de la curva, no hay problemas de visibilidad en horas diurnas.

Se han adoptado como mínimos absolutos, los parámetros que permiten una suficiente iluminación nocturna a una distancia igual a la de frenado, correspondiente a una velocidad del vehículo equivalente al 90 % de la velocidad directriz.

Para ello se ha considerado que el haz luminoso de los faros del vehículo forma un ángulo de  $1^\circ$ , por encima de su eje longitudinal paralelo a la tangente de la rasante sobre la que circula, y que la altura de los faros es de 0,65 m. Como parámetros mínimos deseables se han considerado aquellos que permiten una iluminación suficiente a la distancia de frenado correspondiente a la velocidad directriz.

Usando las notaciones dadas para las curvas convexas tendremos:

a) Parámetros mínimos absolutos (operación nocturna)

$$p' = \frac{2 D'}{1} - \frac{2 h'' + 0,035 D'}{1^2} \quad (\text{válida para } L < D')$$

$$p' = \frac{D'^2}{2 h'' + 0,035 D'} \quad (\text{válida para } L > D')$$

b) Parámetros mínimos deseables (operación nocturna)

$$p'' = \frac{2 D_1}{1} - \frac{2 h'' + 0,035 D_1}{1^2} \quad (\text{válida para } L < D_1)$$

$$p'' = \frac{D_1^2}{2 h'' + 0,035 D_1} \quad (\text{válida para } L > D_1)$$

Los valores de los parámetros mínimos absolutos y deseables obtenidos figuran en las columnas de la derecha de las tablas Nros. 12 y 13 respectivamente, donde se ha tenido en cuenta, para caminos de anchas indivisas, la variación de la distancia de frenado en función de la pendiente media de la curva vertical.

20) Comodidad de los ocupantes de los vehículos.

De acuerdo a las mismas consideraciones efectuadas para las curvas convexas, se consideran que satisfacen esta condición los parámetros que superan a los de la expresión siguiente:

$$p = 0,25 v^2$$

21) Apariencia estética de la rasante

Se adopta el mismo criterio que el utilizado para curvas verticales convexas o sea:

$$P_{\min} = \frac{0,7 V}{1}$$

$$P_{\min} = 400 \text{ m}$$

4a) Drenaje superficial adecuado.

Únicamente esta condición adquiere importancia, en el caso poco frecuente, en caminos rurales, de pavimentos con cordón, situados en los puntos en que la tangente a la rasante es horizontal. En este caso el parámetro máximo, sería de +.350 m. De ser necesarios parámetros mayores, deberá asegurarse un drenaje adecuado en dichos puntos críticos.

Fuera de los casos citados, hay que tener en cuenta cuando la curva vertical cóncava, en una intersección, corresponde a una calzada de dos trochas indivisas que pasa bajo nivel, quedando obstruida la visual del conductor, por la estructura superior.

Dadas las alturas de los vehículos, la altura mínima de la estructura superior sobre la rasante proyectada deberá ser de  $H = 4,50$  m, lo que permitirá futuras repavimentaciones, en espesores de hasta 0,10m.

En este caso, con los parámetros mínimos determinados precedentemente, la visual del conductor siempre tendrá una longitud mayor que la distancia de detención. En cambio, para efectuar una maniobra de sobrepaso se necesitarán en general parámetros mayores que los mínimos citados.

Teniendo en cuenta que la condición más desfavorable se produce cuando el vértice de la curva cóncava se encuentra aproximadamente en correspondencia con la estructura superior, con suficiente exactitud, los parámetros mínimos de las curvas verticales están dados por las siguientes expresiones (19):

$$p = \frac{2D_2}{1} - \frac{8}{1^2} \left( D - \frac{h_1 + h'}{2} \right) \quad (\text{Válida para } L < D_2)$$

$$p = \frac{D_2^2}{8 \left( H - \frac{h_1 + h'}{2} \right)} \quad (\text{Válida para } L > D_2)$$

Los términos tienen los siguientes significados:

- H : Altura de la estructura sobre el pavimento de la curva vertical, en metros.
- $h_1$  : Altura del ojo del conductor sobre el pavimento. El caso más desfavorable corresponde a un conductor de ómnibus con  $h_1 = 2,20$  m.
- $h'$  : Altura del objeto. Se adopta el valor de 0,20 m.

Los demás términos tienen los significados dados anteriormente. Los valores de estos parámetros mínimos se encuentran consignados en la tabla Nº 14

Cabe señalar que adoptar el conjunto de valores:  $h_1 = 2,20$  m y  $h' = 0,20$  m es prácticamente equivalente a admitir el par de valores  $h = 1,10$  m (altura del ojo del conductor del vehículo y  $h'' = 1,35$  m (altura del vehículo). Esta circunstancia nos permite verificar las condiciones de sobrepaso, en rasantes bajo nivel, con el mismo escalímetro para curvas verticales indicado anteriormente, cuando dentro de la longitud de sobrepaso, hay más de una curva vertical. (figura Nº 5).

Diferencias algebraicas de pendientes que no requieren la introducción de curvas verticales.

1er. Criterio: Comodidad de los ocupantes de los vehículos.

Supongamos que entre dos rasantes rectilíneas se introduzca una curva de transición total que cumpla con las condiciones de comodidad fijadas:

$$\text{Aceleración radial: } a < 0,30 \text{ m/seg}^2$$

$$\text{Variación de la aceleración radial: } b < 0,25 \text{ m/seg}^3$$

Es decir el parámetro en el vértice deberá ser:

$$p \geq 0,25 v^2$$

En concordancia con el criterio ya anteriormente expuesto consideraremos que no será necesario introducir dicha curva vertical, cuando la máxima diferencia "e" de cotas entre ésta y las tangentes, sea en el vértice, menor que 0,02 m, y que la longitud de la transición sea recorrida por el vehículo en un tiempo t, proporcional a "e", (igual a un segundo para e = 0,02 m), o sea:  $t \text{ (seg)} = 50 e \text{ (m)}$ .

Es decir:

$$L_e = 14 e v$$

Además en curvas de transición total se verifica muy aproximadamente que  $e = 4 d$ , por lo que:

$$p = \frac{0,068}{\sqrt[3]{\frac{e}{4}}} v^2 \quad \text{o sea:}$$

$$p = \frac{0,108}{\sqrt[3]{e}} v^2$$

Reemplazando este valor en la expresión dada anteriormente,  $L_e = \frac{v^3}{11,66 p}$  llegamos a la siguiente:

$$L_e = 0,8 \sqrt[3]{e} v$$

Igualando esta expresión con:

$$L_e = 14 e v, \text{ despejando el valor de "e"}$$

$$e = 0,0136 \text{ m}$$

Reemplazando a su vez este valor en la anterior,  $p = \frac{0,108}{\sqrt[3]{e}} v^2$  Obtenemos:

$$p = 0,45 v^2$$

Es decir, cumpliéndose la condición impuesta  $L_e = 14 e v$ , se satisfacen las demás condiciones:

$$e < 0,02 \text{ m} \quad \text{y}$$

$$p \geq 0,25 v^2$$

Recordando que en curvas de transición total se verifica muy aproximadamente que:  $p_1 = L_e$ , obtenemos el valor de la diferencia algebraica de pendientes "i" por debajo del cual no es necesario introducir curvas verticales:

$$i = \frac{L_e}{p}$$

$$i = \frac{14 \times 0,0136 \cdot V}{0,45 \cdot V^2}$$

$$i = \frac{0,4}{V}$$

o sea, expresando i en ‰

$$i (\%) = \frac{40}{V}$$

2º) Criterio: Apariencia estética de la rasante.

Se considera que con una diferencia algebraica "i" debajo del 0,5 ‰, la sensación de quiebre de dos rasantes rectilíneas no es percibida por la gran mayoría de los usuarios del camino.

En consecuencia el valor máximo de la diferencia i, para la cual no es necesario introducir curvas verticales es:

$$i = 0,5 \%$$

En consecuencia, del conjunto de ambos criterios expuestos precedentemente para cada velocidad directriz, los máximos valores de "i" para los cuales no es necesario introducir curvas verticales son:

CUADRO Nº II-13

Velocidad directriz km/hora	Diferencia algebraica de pendientes ‰
30	0,50
40	0,50
50	0,50
60	0,50
70	0,50
80	0,50
90	0,44
100	0,40
110	0,36
120	0,33
130	0,31
140	0,29

## 2. - Pendientes.

En general la influencia de las pendientes, con relación a la circulación de vehículos aislados, se hace sentir mucho más fuertemente sobre la velocidad de camiones que sobre la de automóviles, por cuya causa, en los proyectos, la magnitud de aquéllas, deberá fijarse en función de las características y proporción de camiones dentro de la corriente vehicular.

### Pendientes máximas.

Las pendientes máximas que pueden subir, a velocidad uniforme, camiones con remolque, y el coeficiente de fricción desarrollado, están relacionados por la siguiente expresión, en la cual se ha despreciado por ser pequeña, la resistencia del aire (velocidades reducidas):

$$P_a f = (P_c + P_r) (r + i_m)$$

Los términos tienen el siguiente significado:

- $P_c$  : Peso del camión.
- $P_a$  : Peso adherente.
- $P_r$  : Peso del remolque.
- $r$  : Resistencia a la tracción en recta y en horizontal por unidad de peso. (Coeficiente de resistencia al rodamiento).
- $f$  : Coeficiente de fricción.
- $i_m$  : Pendiente máxima.

Despejando  $i_m$  se obtiene:

$$i_m = \frac{P_a f}{P_c + P_r} - r$$

En general se tiene que aproximadamente (20):

$$P_a = \frac{2}{3} P_c \quad P_r = \frac{3}{4} P_c \quad \text{y} \quad r = 0,015 \quad (\text{Pavimento poco rugoso})$$

$$i_m = 0,38 f - 0,015$$

Considerando como caso más desfavorable de pavimentos poco rugosos y húmedos, tendríamos  $f = 0,30$ , o sea

$$i_m = 10\%$$

En cambio para camiones sin remolque y automóviles, en el caso más desfavorable mencionado, la pendiente máxima sería del orden del 18 %.

Por otra parte, si el camino se encuentra en zonas por cuyo clima se prevé la formación de hielo en la calzada, el valor de  $f$  es del orden de 0,10 y en consecuencia las pendientes máximas que dichos vehículos podrían subir serían del siguiente orden:

$i_m = 2\%$  (camiones con remolque).

$i_m = 5\%$  (camiones sin remolque y automóviles).

En caminos con apreciable proporción de camiones con acoplado, la pendiente máxima que se ha adoptado es del 8 %, aunque se considera deseable no pasar del 6 % o 7 %, para evitar encontrarse en condiciones próximas a los límites respecto a la fricción.

En cambio, en las zonas donde fuera frecuente la formación de hielo en la calzada y en caminos con proporción apreciable de camiones con acoplado, sería deseable no superar pendientes del 2 %. No obstante, si por razones de topografía no pudiera cumplirse lo anterior, sería conveniente que las pendientes máximas no excedan del 4 % o 5 %, para no obstaculizar mayormente el tránsito de automóviles y camiones sin acoplado mientras persistan dichas condiciones climáticas adversas.

En síntesis tanto las pendientes deseables como las máximas hasta alturas de 500 metros sobre el nivel del mar, se han fijado en función de la categoría del camino y de la topografía de la zona que atraviesa, de acuerdo al cuadro Nº II-14 que sigue:

CUADRO Nº II-14

Valores de las pendientes

Categoría del camino	Topografía de la zona	Velocidad directriz,	Pendientes	
			Deseable	Máxima
		km/hora	%	%
Especial	Llana Ondulada	130	2	3
		110	3	4
I	Llanura Ondulada Montañosa	130	3	3
		110	3	5
		80	4	6
II	Llana Ondulada Montañosa	120	3	3
		100	3	5
		70	5	7
III	Llana Ondulada Montañosa	110	3	5
		90	4	6
		60	5	7
IV	Llana Ondulada Montañosa	100	4	6
		70	5	7
		40	6	8
V	Llana Ondulada Montañosa	90	5	6
		50	6	8
		30	7	10

Los valores de este cuadro se han volcado en la planilla Nº 1, que resume las características de diseño geométrico que deben regir los caminos rurales según su categoría.

En casos excepcionales, podrán aumentarse las pendientes máximas en un 1 % siempre que las longitudes de estas pendientes no excedan los valores máximos que se indican más adelante. En cambio será conveniente reducirlas, cuando se prevea frecuente formación de hielo sobre la calzada.

Por otra parte, deberán reducirse también los valores de aquellas pendientes máximas, cuando sus longitudes sean superiores a las determinadas por el procedimiento indicado más adelante.

Pendientes nocivas.

La pendiente por la cual un vehículo, que baja con una velocidad uniforme, no utiliza la fuerza de tracción del motor, se considera una pendiente de equilibrio.

Si dicha velocidad uniforme se hace igual a la velocidad directriz, que es la máxima que puede desarrollar con seguridad un vehículo, obtendremos que las pendientes de equilibrio, están dadas por la siguiente expresión (4):

$$i_e = r + \frac{\delta \rho}{2g} \frac{S}{P} v^2 \quad \text{en la cual:}$$

- $i_e$  : pendiente de equilibrio.
- $r$  : resistencia a la tracción en recta y en horizontal, por unidad de peso (coches  $r = 0,01$ ; camiones  $r = 0,015$ ; pavimento poco rugoso).
- $\delta$  : peso específico del aire en condiciones medias (aproxim.  $1,22 \text{ kg/m}^3$ , a  $15^\circ \text{ C}$  y  $760 \text{ mm}$  de presión).
- $c$  : coeficiente sin dimensión (automóviles standard  $c = 0,5$ ; camiones  $c = 0,9$ ) (4).
- $g$  : aceleración de la gravedad ( $9,8 \text{ m/seg}^2$ ).
- $S$  : superficie de la sección transversal máxima del vehículo (coches promedio:  $2 \text{ m}^2$ ; camiones de  $18.000 \text{ kg}$ , promedio:  $8 \text{ m}^2$ ).
- $P$  : peso del vehículo, en  $\text{kg}$  (coches:  $1000 \text{ kg}$ ; camiones  $18.000 \text{ kg}$ ).
- $v$  : velocidad directriz en  $\text{m/seg}$ .

Reemplazando los valores correspondientes a coches y camiones llegamos a las siguientes expresiones ( $V$ : velocidad directriz en  $\text{km/hora}$ ).

$$i_e = 0,01 + 0,000005 v^2$$

$$i_e = 0,015 + 0,000002 v^2$$

Estos valores figuran en el cuadro Nº II-15 que sigue:

CUADRO Nº II-15

Velocidad directriz km/hora	Pendientes de equilibrio	
	automóviles	camiones
	%	%
30	1,5	1,7
40	1,8	1,8
50	2,2	2,0
60	2,8	2,2
70	3,4	2,5
80	4,2	2,8
90	5,0	3,1
100	6,0	3,5
110	7,0	3,9
120	8,2	-
130	9,4	-
140	10,8	-

Las pendientes de gran longitud mayores que las de equilibrio, son nocivas ya que los vehículos, al bajar, deben disipar parte de su energía en frenar, exigiendo en consecuencia, un consumo adicional de ésta.

Esta circunstancia influye notablemente en los costos de operación de vehículos en los caminos con altos volúmenes de tránsito, por cuya causa, es deseable no proyectar pendientes superiores al 3% o 4%, cuando tengan longitudes apreciables y circule por ellos un tránsito con alto porcentaje de camiones.

#### Longitudes de las pendientes:

La influencia de la magnitud de las pendientes sobre la velocidad de los vehículos, es mucho más pronunciada para el caso de los camiones que para los automóviles (ver gráfico Nº 3).

Por esta causa se ha considerado como longitud crítica a la máxima deseable de un camino de dos trochas con una rasante de pendiente dada, que origina una reducción en la velocidad media de marcha de los vehículos comerciales (camión de 180 kg de peso bruto por HP) de aproximadamente 25 km/hora.

Esta reducción representa para caminos de velocidad directriz superior a 50 km/hora una velocidad que se considera aceptable para los camiones, del orden de la mitad de la directriz.

Este en el criterio adoptado por la A.A.S.H.O. (13) y para cada velocidad directriz ha hallado las relaciones entre la magnitud de la pendiente y su longitud. Como dichas relaciones son prácticamente las mismas para diversas velocidades directrices, se ha determinado una única relación que vincula ambas variables, independientemente de la velocidad directriz.

Dicha relación puede expresarse, aproximadamente, en la siguiente forma:

$$L_c (i - 0,014) = H_c$$

$i$  : pendiente máxima deseable, en m/m.

$L_c$  : longitud crítica de la pendiente, en metros.

$H_c$  : constante, en metros.

Para una diferencia de velocidades de 25 km/hora se tiene que  $H_c = 9,00$  m.

Esta expresión es válida siempre que el tramo anterior al de la pendiente ascendente considerada tenga una longitud suficiente, prácticamente en horizontal.

Si en cambio, dicha pendiente está precedida por una pendiente descendente de longitud apreciable y si el diseño geométrico del camino lo permite, podrá admitirse que el camión tipo considerado, inicie la subida por la pendiente ascendente con velocidades de 5, 10 o aún 15 km/hora, mayores que las previstas en el caso anterior.

Es decir puede admitirse que la disminución de velocidad en la pendiente ascendente, sea de unos 30, 35 o 40 km/hora, en lugar de los 25 km/hora considerados anteriormente.

Por otra parte si la pendiente del tramo inmediatamente anterior es también ascendente y de una magnitud apreciable, la disminución de velocidad a considerar tendría que ser inferior a los 25 km/hora citados.

La fórmula general aproximada que liga el gradiente deseable de la pendiente con su longitud crítica, es la siguiente:

$$L_c (1 - 0,014) = H_c'$$

y  $H_c' = 0,36 \Delta V$

en la cual  $L_c$  : longitud crítica de la pendiente en m.

$i$  : pendiente máxima deseable en m/m.

$H_c'$  : constante, en m.

$\Delta V$  : disminución admisible de la velocidad, en km/hora.

El procedimiento gráfico para determinar las longitudes críticas de diversas rasantes en pendiente está determinado en los ejemplos del gráfico nº 4.

#### Longitudes máximas.

Las longitudes críticas de pendientes halladas precedentemente producen una disminución en la velocidad de un camión tipo que puede ser considerada para dicho vehículo, como aceptable.

Si bien es deseable no excederse de dichas longitudes, muchas veces no es posible hacerlo, especialmente en caminos de montaña.

No obstante, para longitudes de pendientes de magnitud apreciable, se ha fijado como límite máximo aquel que produce para la corriente de tránsito en la hora pico, un grado de congestión que se encuentra en el extremo de lo tolerable.

Si bien los niveles generales de servicio son los que figuran en el cuadro Nº I-5, para el caso de pendientes o conjunto de pendientes aisladas, de longitud no superior a cuatro kilómetros, se ha aceptado como nivel de servicio tolerable un valor comprendido entre los niveles anteriores y la capacidad del camino.

El camión tipo que se ha adoptado para determinar dicho grado de congestión, para camino de dos trochas indivisas, tiene un peso bruto de 150 kg/HP. En cambio, para caminos de dos calzadas divididas, se ha adoptado como vehículo representativo, el camión de 90 kg/HP, de acuerdo a los resultados de observaciones efectuadas en los E.E.U.U. (20). Las velocidades de este tipo de vehículos, en función de la pendiente, son las que figuran en el gráfico Nº 3.

Para caminos de montaña de categoría I, con dos calzadas divididas de 7,00 m de ancho cada una, banquetas de 3,00 m y velocidad media ponderada segura de 80 km/hora, se ha considerado el gradiente de las pendientes aisladas, y sus longitudes correspondientes, no superiores a 4000 metros, de tal manera que los volúmenes de la hora "pico" del tránsito futuro de diseño que soporte, lleguen aproximadamente al 70% de la capacidad del camino.

Aproximadamente, para el tipo de camino indicado precedentemente, este volumen es un promedio entre el correspondiente al nivel de servicio "D" y la capacidad del camino.

De acuerdo al Manual de Capacidad de Caminos (22), tendremos:

$$N = \frac{4000 n (v/c) W}{K_1 \left[ 1 + \frac{p_c q}{100} (E_c - 1) \right]}$$

$$W = 0,985$$

$$n = 2$$

$$K_1 = 0,141 \quad (\text{zona rural})$$

$$K_1 = 0,114 \quad (\text{zona urbana})$$

$$q = 2/3$$

Elegimos  $(v/c) W = 0,70$  con lo cual queda:

$$N = \frac{39700}{1 + 0,0067 p_c (E_c - 1)} \quad (\text{zona rural})$$

$$N = \frac{49100}{1 + 0,0067 p_c (E_c - 1)} \quad (\text{zona urbana})$$

En estas expresiones y en las que siguen, los términos tienen los siguientes significados:

- N : Volumen de tránsito medio diario anual en veh/hora.
- $v/c$  : Relación entre volumen de servicio y capacidad para el nivel de servicio dado.
- W : Coeficiente de ajuste por ancho de trocha y distancia lateral a obstrucciones, para el nivel de servicio dado.
- $W_c$  : Coeficiente de ajuste por ancho de trocha y distancia lateral a obstrucciones, para volúmenes de tránsito iguales a la capacidad del camino.
- n : Número de trochas por calzada.
- K : Relación entre el volumen medio diario anual y el volumen horario de la trigésima hora anual, para ambas direcciones de tránsito.
- $K_1$  : Relación entre el volumen medio diario anual y el volumen horario de la trigésima hora anual, para una sola dirección de tránsito.
- $p_c$  : Porcentaje de camiones es el volumen medio diario anual, en %.
- q : Relación entre el porcentaje de camiones en la hora pico y el porcentaje de camiones en el volumen medio diario anual.
- $E_c$  : Equivalente en automóviles de un camión medio que asciende una cuesta.

- $E_{cd}$  : Equivalente en automóviles de un camión medio que desciende una cuesta.
- $E_{cm}$  : Equivalente medio pesado, en automóviles de un camión medio para el conjunto de tránsito ascendente y descendente.
- $VS$  : Volumen horario de tránsito para un nivel de servicio dado en veh/hora.
- $C$  : Volumen horario de tránsito, correspondiente a la capacidad del camino en veh/hora.
- $T$  : Factor de ajuste a aplicar al volumen de tránsito, de acuerdo al porcentaje de camiones, para el nivel de servicio dado.
- $T_c$  : Factor de ajuste a aplicar al volumen de tránsito, de acuerdo al porcentaje de camiones, para volúmenes iguales a la capacidad del camino.

En consecuencia, para determinado porcentaje de camiones, y un dado valor de  $K_1$ , para cada valor de  $N$  hay un determinado valor de  $E_c$ . A su vez, para cada valor de  $E_c$  existen, de acuerdo a la tabla 9.4 del Ma<sup>c</sup> anual citado (22) diversas combinaciones de pendientes y longitudes correspondientes.

En el gráfico No 5 figuran dichas relaciones, y con él, pueden determinarse, dados los volúmenes y composición del tránsito, las longitudes tolerables de las pendientes. Este gráfico puede utilizarse también para caminos de la misma categoría, en zonas ondulada y llana.

En pendientes aisladas de longitud no mayor de 4000 m, de caminos de montaña de categoría II, con velocidad directriz: 70 km/hora; ancho de calzada: 6,70 m; ancho de banquetas: 2,00 m; distancia de visibilidad de sobrepaso de 460 m en un 30 % de longitud, y volúmenes de servicio en la trigésima hora anual iguales al promedio entre los correspondientes al nivel de servicio "D" y la capacidad de la calzada, tendremos:

$$VS = \frac{2000}{K} (v/c) W T$$

$$C = \frac{2000}{K} W_c T_c$$

Para las condiciones impuestas

$$N_a = \frac{1}{2} (VS + C)$$

$$N_a = \frac{2000}{K} \left( \frac{v}{c} \frac{WT}{2} + \frac{W_c T_c}{2} \right)$$

Teniendo en cuenta que  $T = T_c$ , ya que se considera el porcentaje de camiones durante las horas de congestión es de aproximadamente los dos tercios del porcentaje medio diario, llegamos a lo siguiente:

$$N = \frac{2000}{K} (v/c) \frac{W}{2} + \frac{W_c}{2} T$$

Se estima que durante la hora de congestión tolerable, el volumen de la trocha ascendente corresponde a las dos terceras partes del total, y el de la trocha descendente al tercio restante.

Aunque todavía no se ha determinado con certeza el efecto adverso de las pendientes descendentes sobre el tránsito de camiones, se considera que está próximo al de las pendientes ascendentes (24).

En base a lo anterior, si aceptamos que  $E_{cd} = 0,7 E_c$ , obtendremos el siguiente promedio pesado para el conjunto del tránsito:

$$E_{cm} = \frac{1}{3} E_{cd} + \frac{2}{3} E_c$$

$$E_{cm} = 0,9 E_c$$

En consecuencia, el valor de T será el siguiente:

$$T = \frac{1}{1 - \frac{pcq}{100} (E_{cm} - 1)}$$

$$T = \frac{1}{1 - pcq (0,9 E_c - 1)}$$

En consecuencia tendremos:

$$N = \frac{1000 (v/c W + W_c)}{K [1 - 0,01 pcq (0,9 E_c - 1)]}$$

A su vez el valor  $E_c$  es función de la combinación de la pendiente y longitud del tramo ascendente del camino, de acuerdo a la tabla Nº 10.10 del Manual mencionado (24).

Una vez hallado, por interpolación el valor  $v/c$  en la tabla Nº 10.7 y los valores  $W$  y  $W_c$  en la tabla Nº 10.8 del Manual citado, para el caso que nos ocupa obtendremos:

$$N = \frac{1000 (0,45 \cdot 0,873 + 0,88)}{0,136 [1 + 0,0067 p_c (0,9 E_c - 1)]}$$

$$N = \frac{9350}{1 + 0,0067 p_c (0,9 E_c - 1)}$$

De igual modo, para caminos de montaña, de categoría III, velocidad directriz 60 km/hora, ancho de calzada y banquetas de 6,70 m y 1,50 m respectivamente, eligiendo  $v/c = 0,48$ , llegamos a la misma expresión anterior:

$$N = \frac{9350}{1 + \frac{0,67}{100} p_c (0,9 E_c - 1)}$$

Esta expresión puede aplicarse también para pendientes aisladas de caminos de zonas onduladas y llanas, de longitud no superior a los 4000 m. En el gráfico Nº 6 se ha representado gráficamente la relación hallada, entre las pendientes, sus longitudes, los volúmenes de tránsito y su composición.

Para pendientes aisladas mayores del 2,5 % se ha determinado que la relación aproximada que liga la pendiente de un camino con su longitud, de manera de no producir un grado de congestión mayor que el tolerable, tiene la siguiente forma:

$$L(1-i_0) = H_m$$

En esta expresión  $i$  y  $L$  son la pendiente y su longitud;  $H_m$  un valor que depende de la altura sobre el nivel del mar, e  $i_0$  una magnitud que depende también de la altura sobre el nivel del mar y del volumen y composición del tránsito. En el gráfico Nº 6 figura la manera de hallar los valores de  $i_0$  y  $H_m$  y en el Nº 7 se encuentra indicado el procedimiento para determinar, en diversos casos, si un conjunto de pendientes y sus longitudes ocasionan un grado tolerable de congestión.

En el cuadro Nº II-16 se indican los valores de  $H_m$  e  $i_0$  para diversos volúmenes y composición del tránsito diario correspondiente a un camino de dos trochas a una altura media de 500 metros sobre el nivel del mar.

CUADRO Nº II-16

VOLUMENES DE TRANSITO MEDIO DIARIO			VALORES DE LAS CONSTANTES	
Proporción de camiones (%)			$H_m$ (m)	$i_0$
20	30	40		
590	400	300	16,40	0,0770
730	500	380	16,40	0,0650
870	600	460	16,40	0,0555
1150	800	610	16,40	0,0435
1400	1000	840	16,40	0,0360
1700	1200	930	16,40	0,0310
2100	1500	1170	16,40	0,0255
2700	2000	1600	16,40	0,0200
3300	2500	2000	16,40	0,0165
3900	3000	2400	16,40	0,0140
4900	4000	3400	16,40	0,0110
5900	5000	4300	16,40	0,0090

Los valores de los gráficos Nros. 5 y 6 son aplicables a pendientes aisladas de no más de 4 kilómetros de longitud, ya que los volúmenes de tránsito superan en algo, a los del nivel general de servicio que corresponde al camino proyectado. En cambio para pendientes medias generales (relación entre el desnivel total y longitud de una sección) que se desarrollen en más de 10 kilómetros de longitud de camino, se consideran aceptables aquellos valores que no originen un nivel de servicio más bajo que el consignado en el cuadro Nº I-5 para las respectivas categorías de camino.

Las tablas Nros. 15 y 16 determinan los valores de estas pendientes medias generales, para caminos en zona llana, ondulada y montañosa.

En general, para caminos de montaña con más de unos 2000 ó 3000 vehículos por día, es frecuente que no puedan cumplirse las condiciones referentes a longitud de pendientes que no ocasionan un grado de congestión mayor que el tolerable.

En ese caso, si los volúmenes de tránsito medio diario anual de diseño se encuentran próximos a los 5000 vehículos por día, en las secciones que tengan longitudes de pendientes mayores que las tolerables, se proyectarán dos calzadas separadas.

En cambio, si los volúmenes de tránsito están muy por debajo del límite mencionado, convendrá proyectar en general una trocha ascendente adicional, por la cual deberán circular los vehículos lentos evitándose así un grado no tolerable de congestión en el tránsito, o de lo contrario deberá buscarse un trazado con pendientes menos pronunciadas.

La solución más conveniente estará determinada por el proyecto de camino con mínimo costo anual de transporte.

De cualquier manera, en lo posible no deberá proyectarse un camino con las longitudes límites de las pendientes dadas en los gráficos Nros. 5 y 6 y tablas Nros. 15 y 16, con lo cual su vida útil podrá prolongarse, en muchos casos, en una apreciable cantidad de años.

Por último, se debe aclarar que en los cálculos de pendientes máximas, pendientes nocivas, etc., se ha admitido que los valores de los coeficientes de fricción y resistencia al rodamiento, corresponden a calzadas pavimentadas, ya que, aun cuando por su escaso tránsito o por otras razones, no se prevea su pavimentación en forma inmediata, debe suponerse que ésta se ejecute en un futuro mas o menos próximo.

Este mismo criterio se ha aplicado al efectuar los cálculos de reducciones de pendiente por altitud y por curvatura, tal como se verá en lo que sigue.

#### Influencia de la altitud sobre las pendientes.

De acuerdo a estudios realizados (23) se ha establecido que a igualdad de otras condiciones, la variación de la potencia de un motor al aumentar la altura sobre el nivel del mar, se debe al descenso de la temperatura ambiente y al descenso de la presión barométrica.

La potencia efectiva de un motor de cuatro tiempos (24) puede expresarse así:

$$N_e = \eta_m \eta_D \frac{P_m \cdot S \cdot l \cdot n \cdot N_c}{2 \times 60 \times 75} \quad \text{en la cual:}$$

$N_e$  : Potencia efectiva, a la altura  $h$  sobre el nivel del mar en HP.

$\eta_m$  : Rendimiento mecánico.

$\eta_D$  : Coeficiente de calidad del ciclo.

$P_m$  : Presión media del ciclo en  $\text{kg}/\text{m}^2$ .

$S$  : Sección de un cilindro, en m.

$l$  : Carrera en m.

$n$  : Número de revoluciones por minuto.

$N_c$  : Número de cilindros.

A su vez, la presión media es igual a la relación del trabajo realizado por kilogramo, y por ciclo y la diferencia entre los volúmenes específicos del aire aspirado y del comprimido al final de la carrera del pistón.

Siendo:

$h$  y  $h'$ : Alturas sobre el nivel del mar, en m.

- L : Trabajo indicado ideal realizado por ciclo y por kilogramo, en kgm/kg.
- $v_1$  : Volúmen específico del aire aspirado, a la altura h, en m<sup>3</sup>/kg.
- $v_2$  : Volumen específico del aire al final de la carrera del pistón.
- $\tau$  : Relación de compresión.
- $\gamma$  : Peso específico del aire aspirado a la altura h, en kg/m<sup>3</sup>.
- $\gamma'$  : Peso específico del aire a la altura h' sobre el nivel del mar en HP.
- p : Presión a la altura h.
- p' : Presión a la altura h'.
- T : Temperatura absoluta a la altura h.
- T' : Temperatura absoluta a la altura h'.
- t : Temperatura centígrada a la altura h.
- t' : Temperatura centígrada a la altura h'.

se tiene:

$$P_m = \frac{L}{v_1 - v_2}$$

$$v_2 = \frac{v_1}{\tau}$$

$$P_m = \frac{L}{v_1 \left(1 - \frac{1}{\tau}\right)}$$

$$P_m = \frac{L}{1 - \frac{1}{\tau}}$$

Aceptando que los valores  $\eta_m$ ,  $\eta_D$ , S, l, n,  $N^0$ , y L sean independientes de la altura, se llega a la siguiente expresión:

$$\frac{N_{e'}}{N_e} = \frac{\gamma'}{\gamma}$$

Por otra parte, a una altura h sobre el nivel del mar para subir una cierta pendiente i a una velocidad constante v, la potencia del motor deberá ser la siguiente:

$$N_e = \frac{FV}{3,6.75 \eta}$$

$$N_e = \frac{V}{270 \eta} \left( P_r + P_1 + \frac{\gamma_c}{25,92g} SV^2 \right)$$

En estas expresiones el significado de los términos es el siguiente:

- F : Fuerza de tracción del vehículo que se ejerce entre la calzada y las ruedas motrices en kg.
- $\eta$  : Rendimiento de las transmisiones, entre el motor y la rueda.
- V : Velocidad del vehículo en km/hora.
- P : Peso del vehículo.
- r : Resistencia a la tracción en recta y en horizontal por unidad de peso (coeficiente de resistencia al rodamiento).
- i : Pendiente de la calzada.
- $\gamma$  : Peso específico del aire en kg/m<sup>3</sup>.
- g : Aceleración de la gravedad.
- c : Coeficiente adimensional que tiene en cuenta la fineza de las formas del automotor.
- S : Area de la sección transversal del vehículo, en m<sup>2</sup>.

Si para una altura h' sobre el nivel del mar, se desea mantener la misma velocidad, la pendiente correspondiente deberá ser menor.

Siendo i' la pendiente a la altura h' que permita mantener la misma velocidad V, que a otra altura h, se tiene:

$$\frac{N_{e'}}{N_e} = \frac{r + i' + \frac{\gamma' c S V^2}{25,92 g}}{r + i + \frac{\gamma c S V^2}{25,92 g}}$$

Igualando con la relación obtenida anteriormente obtendremos:

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{r + i' + \frac{\gamma' c S v^2}{2g}}{r + i + \frac{\gamma c S v^2}{2g}}$$

$$r + i' = \frac{\gamma'}{\gamma} (r + i)$$

$$i' = \frac{\gamma'}{\gamma} (r + i) - r$$

Por otra parte, de acuerdo a las leyes de Boyle - Mariotte y Gay Lussac, se tiene:

$$\frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{P'}{P} \cdot \frac{T}{T'}$$

$$i' = \frac{P' T}{P T'} (r + i) - r$$

$$i' = \frac{P'}{P} \frac{273 + t}{273 + t'} (r + i) - r$$

En nuestro país, la variación de la temperatura con la altura tiene diversos valores según las zonas y la época del año. No obstante, si consideramos la zona central del país, (Mendoza, San Juan, Córdoba)

podemos admitir una temperatura media anual de 17° C a 500 metros sobre el nivel del mar, y un gradiente medio de 4,8° C por cada 1000 metros de altura (25).

Respecto de la variación de presión con la altura, para nuestro país se adapta la siguiente expresión (26), válida para latitudes medias:

$$h' - h = (18.400 + 67 \frac{t + t'}{2}) \log \frac{p}{p'}$$

Como, se trata de determinar las pendientes máximas a los fines de la capacidad de la calzada, debemos comparar, las presiones y temperaturas con las que sirvieron de base para fijar los valores correspondientes en el Manual de Capacidad de Caminos (22). Dicho manual está basado en las experiencias realizadas en las regiones montañosas de Virginia Occidental (21).

Se ha supuesto que aproximadamente dichas condiciones son equivalentes a las del centro de nuestro país, con alturas de 500 metros sobre el nivel del mar.

Teniendo en cuenta que para camiones, en pavimentos poco rugosos el coeficiente de resistencia al rodamiento  $r$ , es de 0,015 en promedio, llegamos a las siguientes expresiones:

$$t' = 19,4 - 0,0048 h \quad (\text{en } ^\circ \text{C})$$

$$t = 17^\circ \text{C}$$

$$p' = 760.0,1 \frac{h}{19700 - 0,16 h} \quad (\text{en mm})$$

$$p = 717 \text{ mm}$$

$$i' = 1,052 \frac{(1 + 0,015) 0,1 h / (19700 - 0,16 h)}{1 - 0,0000164 h} - 0,015$$

Esta reducción de pendientes por la altura ha sido tomada en cuenta en los gráficos Nros. 5 y 6.

#### Reducción de pendientes en curvas horizontales.

En el caso de que una curva horizontal se encuentre total o parcialmente en correspondencia con una rasante de determinada pendiente, el efecto combinado de dicha superposición equivale, en el caso más desfavorable, al de una rasante planimétricamente recta, cuya pendiente fuera mayor que la de la sección aludida.

La influencia de la curvatura sobre la pendiente ha sido tomada en cuenta en normas de diseño geométrico de diversos países por medio de fórmulas empíricas. Recientemente en nuestro país (27), basándose en experiencias efectuadas en los E.E.U.U. (28), se dieron fundamentos racionales para determinar dicha influencia, en la suposición de que los vehículos considerados circularan a la velocidad directriz.

Partiendo de las experiencias citadas precedentemente, se ha calculado la reducción de pendientes modificando algunas de las hipótesis