



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

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTE

ALINEAMIENTO VIAL ALTIMÉTRICO

Apunte de cátedra revisado y actualizado por:

Ing. María Ester Piantanida

AÑO 2004

ALINEAMIENTO VIAL ALTIMÉTRICO1.- CONSIDERACIONES GENERALES

El alineamiento altimétrico de una carretera queda definido por el perfil longitudinal del eje de la calzada, denominado también rasante.

Dicho perfil longitudinal está formado por una serie de alineamientos rectos empalmados entre sí mediante arcos de curvas.

Para permitir una circulación vehicular que asegure un correcto flujo de tránsito en absolutas condiciones de seguridad, los alineamientos rectos verticales deben cumplir una serie de exigencias en cuanto a las limitaciones de sus pendientes. Además, las curvas que empalman los quiebres de estos alineamientos deben proveer una adecuada visibilidad y un conveniente confort.

El diseño de una rasante queda definido en base a requerimientos impuestos por una serie de variables de diversos órdenes (geológicos, hidrológicos, constructivos, del movimiento de suelos, etc.) que condicionan el logro de la mejor solución técnico-económica posible. En todo momento dicha rasante debe cumplir con las condiciones de seguridad y flujo de tránsito mencionadas en el párrafo anterior.

2.- PENDIENTES MÁXIMAS EN CARRETERAS2.1.- Conceptos generales

Toda carretera debe ser diseñada para favorecer una operación uniforme en todo su recorrido, por lo tanto se deben establecer valores límites de pendientes longitudinales que permitan que la circulación vehicular se desarrolle en dichas condiciones.

Los factores que determinan tales condiciones límites de circulación sobre pendientes son los siguientes:

- Fricción en el sistema neumático-calzada, la cual debe permitir la transmisión de los esfuerzos de tracción proporcionados por las ruedas motrices, y de los esfuerzos de frenado que suministran las ruedas frenantes.
- Condiciones operativas de las unidades motrices, que permiten proveer el esfuerzo de tracción adecuado para circular en rampas, sin provocar reducciones de velocidad tales que afecten la seguridad y/o la capacidad de la carretera.

2.2.- Fricción en el sistema neumático-calzada

La ecuación general del movimiento puede ser expresada:

$$\begin{aligned} f_x P_a &\geq R_d + R_a \pm R_i + R_j = \\ &= P r_d / 1000 + P r_a / 1000 \pm P i\% / 100 + P a / g \end{aligned}$$

Dicha ecuación, referida a la unidad de peso resulta:

$$1000 f_x P_a / P \geq r_d + r_a + 10 i\% + 102 a$$

- siendo f_x coeficiente de fricción longitudinal
 P_a peso adherente (ruedas motrices), t
 R_d resistencia a la rodadura, kg
 R_a resistencia del aire, kg

- Ri resistencia por pendiente, kg
- Rj resistencia por inercia, kg
- P peso total del vehículo, t
- rd resistencia específica a la rodadura, kg/t
- ra resistencia específica del aire, kg/t
- i pendiente longitudinal, %
- a aceleración del vehículo, m/s²
- g aceleración de la gravedad, m/s²

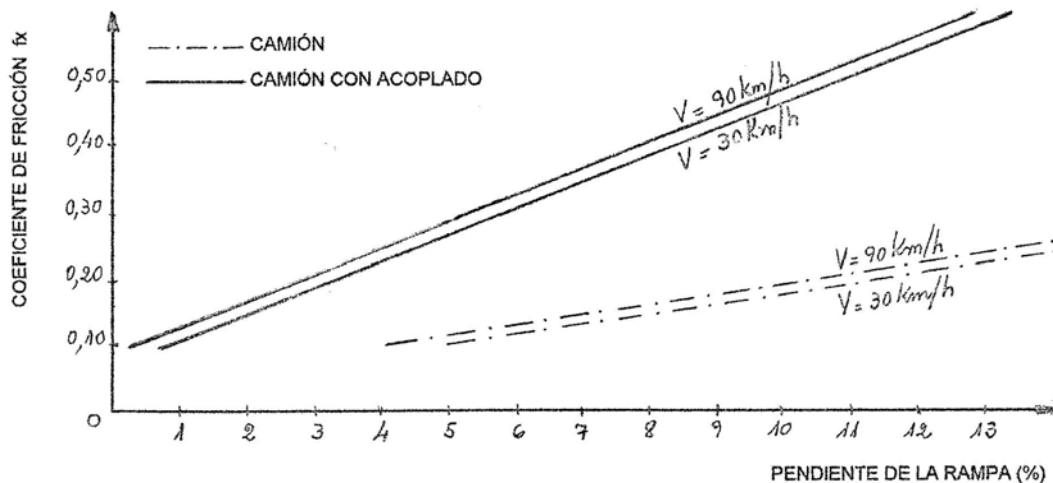
Si se considera un vehículo que para una determinada velocidad sostenida (a = 0) puede ascender una rampa con una pendiente longitudinal máxima, la expresión anterior queda reducida:

$$1000 f_x Pa / P = rd + ra + 10 i \text{ máx \%}$$

Las relaciones Pa / P corresponden aproximadamente a los siguientes valores:

- automóvil Pa / P = 0,50
- camión Pa / P = 0,65
- camión con acoplado Pa / P = 0,25

En la figura siguiente se ha graficado, en función de la pendiente de la rampa y del coeficiente de fricción fx, la ecuación anterior aplicada a vehículos pesados, ya que estos determinan las condiciones límites. El comportamiento de una unidad tractora con semiacoplado puede ser asimilado sin mayores errores al de un camión con acoplado.



PENDIENTES MÁXIMAS PARA VEHÍCULOS COMERCIALES EN FUNCIÓN DE LA FRICCIÓN

La velocidad de operación del vehículo tiene poca influencia en las condiciones de fricción del sistema neumático-calzada en virtud de que la resistencia específica del aire es de escasa significación en los vehículos pesados.

Es notable la baja capacidad de circulación sobre rampas de los camiones con acoplado o unidades tractoras con semiacoplado, ya que su reducida relación Pa / P impide proveer una adecuada fricción en las ruedas motrices.

Nota: Velocidad sostenida es la máxima velocidad lograda cuando se anula la colaboración de la inercia (fuerza de inercia = 0) en el esfuerzo de tracción.

Para un determinado valor del coeficiente de fricción, una disminución de la velocidad de operación hasta un valor mínimo que se denomina velocidad sostenida, permite la circulación sobre rampas con mayores pendientes, ya que el término (102 a) de la fórmula adquiere valores negativos y su colaboración en el esfuerzo de tracción es independiente del sistema neumático-calzada.

Calzadas heladas o nevadas ($f_x = 0,15$) limitan a 2% las pendientes de rampas para camiones con acoplado y a 7% para camiones.

Las normas AASHTO 1994 adoptan para 90 km/h un coeficiente de fricción longitudinal para pavimentos húmedos $f_x = 0,30$, con lo cual en esas condiciones los camiones no tendrían problemas en ascender elevadas pendientes, pero los camiones con acoplado estarían limitados a pendientes máximas del orden del 5%. Para velocidades de 30 km/h con $f_x = 0,40$ las pendientes máximas para camiones con acoplado estarían en el orden del 8%, siempre considerando las condiciones críticas de calzadas húmedas.

Las condiciones del frenado en el descenso de pendientes no son determinantes ya que el frenado se efectúa en todas las ruedas y por lo tanto $P_a / P = 1$.

2.3.- Tracción automotora

2.3.1.- Características operacionales de los vehículos

Los camiones de gran peso son los vehículos que soportan mayor carga por unidad de potencia y en consecuencia tienen una menor velocidad y una inferior capacidad de aceleración. Estos efectos se traducen en una mayor dificultad de circulación, en especial en rampas.

Estudios experimentales realizados sobre carreteras indican que la velocidad promedio de los camiones sobre tramos de carretera horizontales, es aproximadamente 10 km/h inferior a la velocidad media de los automóviles.

Comparándolos con sus calidades operativas en horizontal, los vehículos pesados sobre pendientes descendentes muestran un incremento en su velocidad media de marcha para pendientes comprendidas en un rango de 5% a 7%, mientras que para pendientes de más de 7% sufren una disminución de la misma (razones de seguridad hacen usar marchas más bajas).

Estudios realizados sobre circulación de vehículos han permitido expresar que la calidad operativa de un vehículo puede ser evaluada por medio de su relación Peso/Potencia. Vehículos con similares rangos de la relación Peso/Potencia poseen análogas capacidades operativas.

La capacidad operativa de los vehículos circulando en rampas es función de las siguientes variables:

- Relación Peso/Potencia
- Pendiente de la rampa
- Longitud de la rampa
- Velocidad de entrada a la rampa
- Tipo de superficie de rodamiento
- Resistencia del aire
- Habilidad del conductor

Con relación a los automóviles, sus características operativas con respecto a las pendientes son sumamente variables, pero en general se admite que valores de hasta 8% no afectan apreciablemente la capacidad de la carretera. En este tipo de vehículo la

reducida carga por unidad de potencia otorga una gran capacidad de operación, permitiendo una mayor fluidez en el flujo circulatorio.

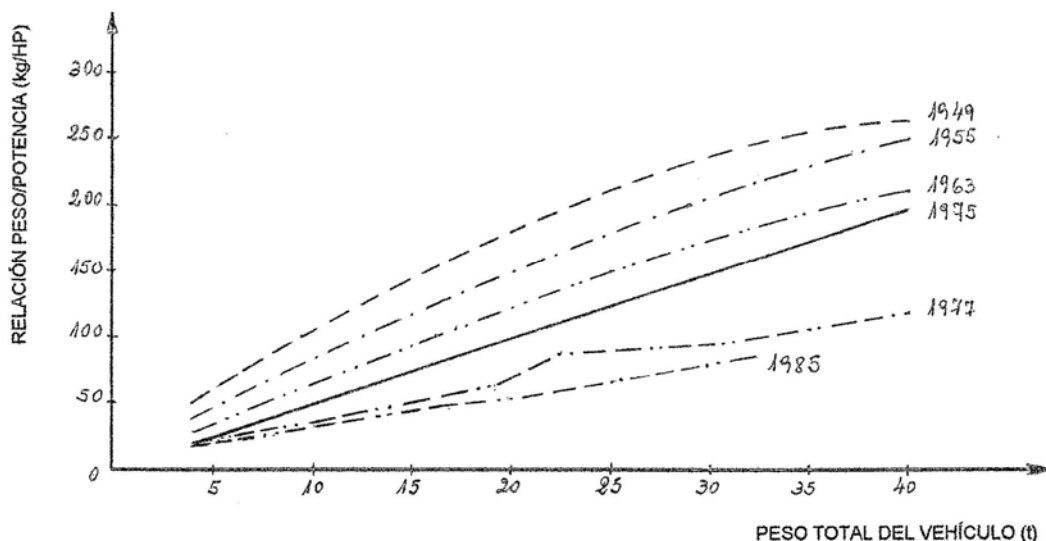
2.3.2.- Relación Peso/Potencia

Los automóviles de producción comercial poseen relaciones Peso/Potencia que oscilan entre 10 y 20 kg/HP.

En 1957 C. Saal realizó en carreteras de U.S.A. una encuesta para establecer los porcentajes existentes de vehículos pesados con relaciones Peso/Potencia superiores a 181 kg/HP, obteniendo los siguientes resultados:

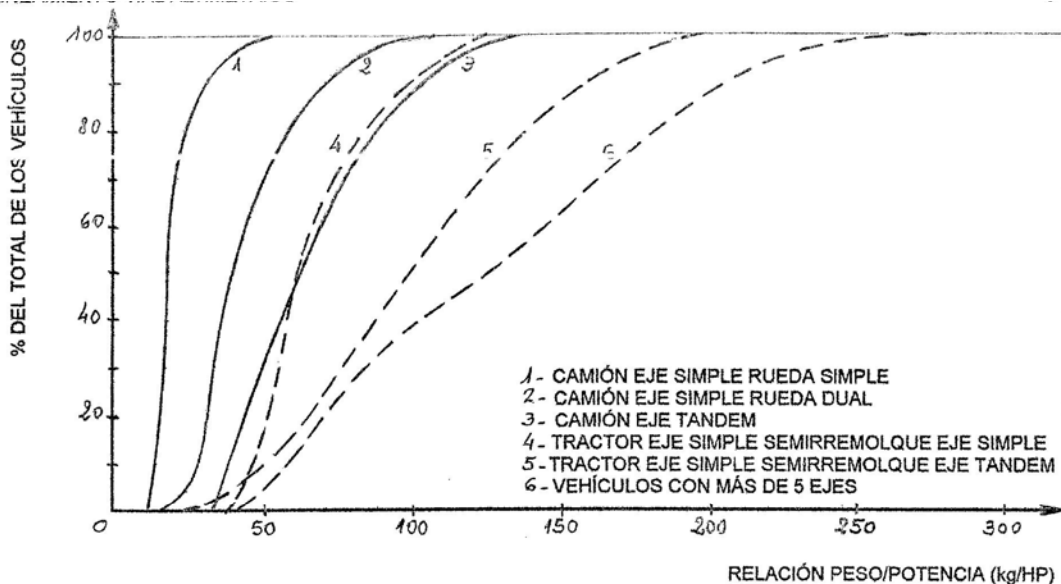
| PORCENTAJES DE VEHÍCULOS PESADOS CON RELACIONES PESO/POTENCIA MAYORES DE 181 kg/HP | |
|--|------------------|
| TIPO DE VEHÍCULO | VALOR PORCENTUAL |
| Camión de 3 ejes | 10% |
| Tractor-semirremolque de 3 ejes | 12% |
| Tractor-semirremolque de 4 ejes | 37% |
| Vehículos con más ejes | 51% |

En 1963 y siempre para carreteras norteamericanas, Wright y Tignor, en base a estudios de tránsito realizados en los años 1949, 1955 y 1963 por el Bureau of Public Roads, demostraron una definida tendencia hacia la disminución de la relación Peso/Potencia en función del tiempo. En la figura que se acompaña a continuación se grafican dichos resultados. En la misma figura se agregan los resultados de estudios realizados en 1975, 1977 y 1985 reafirmando dicha tendencia.



RELACIÓN PESO/POTENCIA EN VEHÍCULOS DE U.S.A.
ENTRE LOS AÑOS 1949 Y 1985

Estos mismos investigadores graficaron la distribución de porcentajes de distintos grupos de vehículos, clasificados según el número de ejes, en función de la relación Peso/Potencia.



CURVAS DE FRECUENCIA ACUMULADA DE RELACIÓN PESO/POTENCIA EN VEHÍCULOS PESADOS

De todos los camiones cargados estudiados sólo el 8% superó la relación 181 kg/HP, mientras que considerando la totalidad de los vehículos, cargados y descargados, esta relación era excedida por sólo el 5%.

Considerando los vehículos de una única unidad, dicho gráfico muestra que todos ellos tienen una relación Peso/Potencia inferior a 181 kg/HP. Este valor sólo es excedido por un pequeño porcentaje de tractores con semirremolques de 4 ejes y por un 20% de los vehículos de 5 ó más ejes.

Las Normas AASHTO en base a estas consideraciones toman como valor de diseño la relación Peso/Potencia de 181 kg/HP.

En nuestro país los transportistas circulan con relaciones Peso/Potencia muy superiores, pero debe tenerse en cuenta que dicho tránsito se realiza en su casi totalidad uniendo las zonas más pobladas, las cuales debido al desarrollo característico nacional corresponden a regiones de llanura. Cuando dichos camiones deben servir zonas onduladas o de montaña circulan en general con una sola unidad y con menores cargas.

Cabe destacar que generalmente en los camiones sobrecargados, los conductores suelen sobrealimentar los motores, alcanzando una mayor potencia en detrimento de un mayor consumo y una mayor contaminación ambiental.

En cuanto a los ómnibus interurbanos, la relación Peso/Potencia está en el orden de los 70 kg/HP para aquéllos que circulan en zonas llanas y onduladas, y de los 50 kg/HP para aquéllos que circulan en zonas de montaña.

2.3.3.- Características operacionales de los vehículos en pendientes

Numerosos investigadores norteamericanos realizaron estudios teóricos y experimentales al respecto. Los dos trabajos más completos fueron los de Huff y Scrivner y de Firey y Peterson, los cuales desarrollaron curvas tipo de las características operacionales de los vehículos en pendientes.

Los trabajos de Huff y Scrivner fueron tomados como base de diseño por las Normas AASHTO de diseño geométrico. Estos investigadores desarrollaron una teoría simplificada sobre circulación en pendientes, considerando las fuerzas actuantes sobre un camión ascendiendo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P a / g = F_t - P \text{ sen } \alpha$$

- siendo P peso del vehículo
- g aceleración de la gravedad
- a fuerza de aceleración del vehículo
- Ft esfuerzo neto de tracción transmitido a la calzada
- α ángulo de la pendiente, en grados

Como hipótesis simplificatorias consideran que:

- no hay resistencia por inercia de los elementos mecánicos del vehículo
- la velocidad del viento es nula
- no hay variación en el tipo de superficie de rodamiento
- el vehículo circula con la válvula de admisión de combustible totalmente abierta, es decir, a las máximas velocidades posibles.

Si un camión circula sobre una rampa a una máxima velocidad sostenida se verifica que la aceleración a es nula, luego:

$$F_t / P = \text{sen } \alpha$$

Huff y Scrivner realizan un estudio experimental con una unidad de relación Peso/Potencia de 160 kg/HP sobre diversas pendientes a una altitud de 300 metros sobre el nivel del mar. Con los datos obtenidos de velocidades sostenidas determinan que las mismas responden a una ecuación del siguiente tipo:

$$F_t / P = A v + B$$

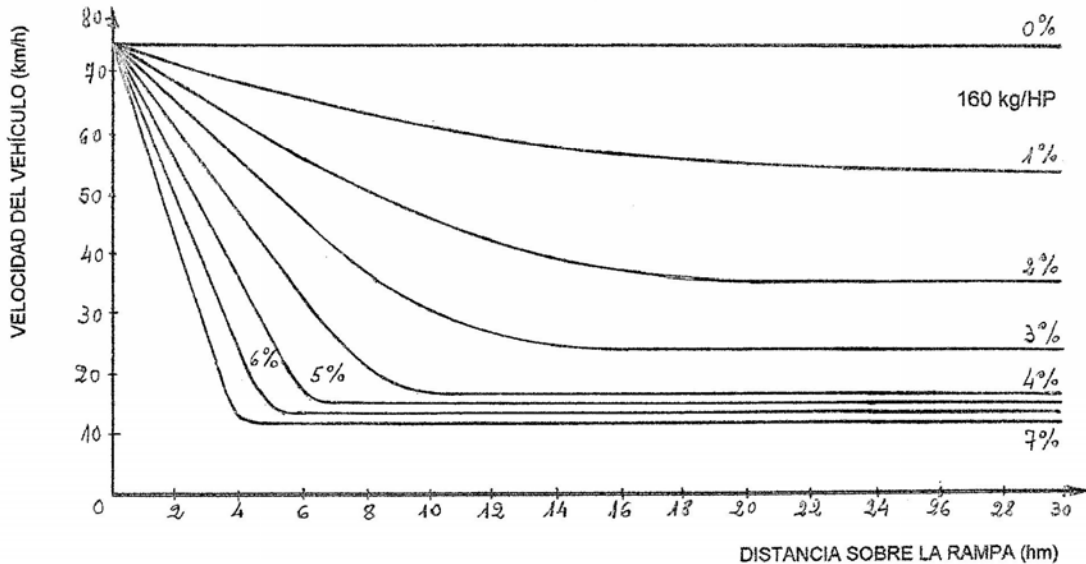
siendo v la velocidad, y A y B dos valores constantes para determinados rangos de velocidades.

Sustituyendo F_t / P y operando se llega a una expresión del siguiente tipo:

$$x = \frac{1}{g} \frac{v_0^2 - v^2}{A (v_0 + v) - 2 (\text{sen } \alpha - B)}$$

siendo x la longitud de la rampa medida desde su origen.

Con los valores de A y B obtenidos experimentalmente grafican las curvas de velocidad-distancia de rampa, para vehículos que ingresan a una velocidad de 75 km/h.

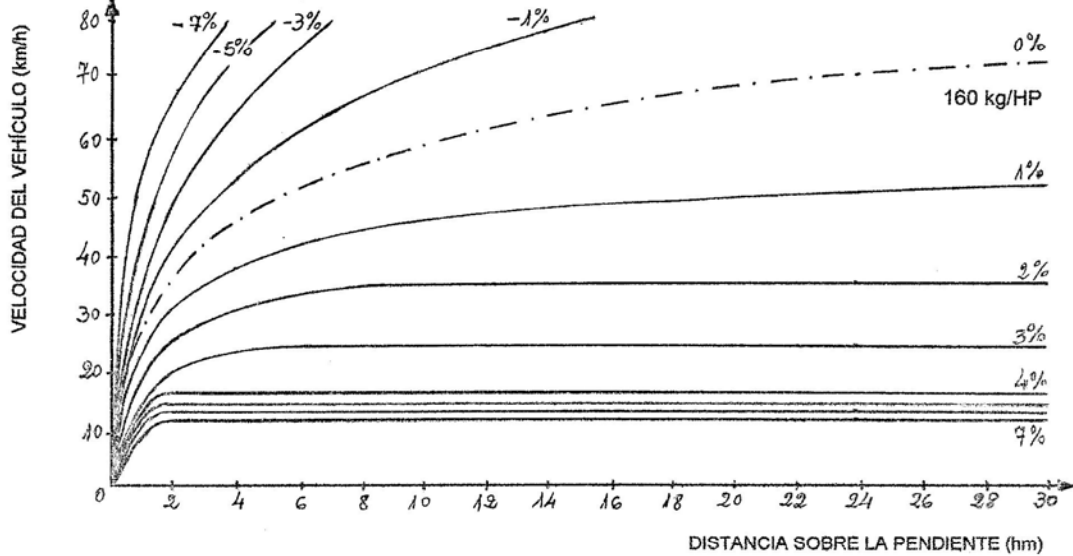


CURVAS DE VELOCIDAD-DISTANCIA SOBRE RAMPA PARA VEHÍCULOS PESADOS (HUFF Y SCRIVNER)

De dicha gráfica puede deducirse por ejemplo que, un camión con velocidad de entrada de 75 km/h a una rampa de 4% de pendiente, recorre 480 metros antes de reducir su velocidad a 40 km/h. Si se quiere saber a qué velocidad circulará dicho camión sobre la misma rampa después de recorrer 500 metros si su velocidad de entrada es de 50 km/h, debe entrarse en la grafica determinando primero la progresiva que corresponde en dicha pendiente a la velocidad de 50 km/h (360 m), y adicionando luego los 500 metros a dicha progresiva (360 m + 500 m) puede evaluarse en ese punto la velocidad buscada: 20 km/h.

Las curvas se tornan rectas horizontales cuando la fuerza de inercia se hace cero (se anula su colaboración en el esfuerzo de tracción), y el vehículo circula a una máxima velocidad sostenida hasta el final de la rampa cualquiera sea su longitud.

Huff y Scrivner también graficaron una segunda familia de curvas para evaluar, en relación a su capacidad de aceleración, el comportamiento de un vehículo que entra en una pendiente a una velocidad igual o menor a la máxima sostenida.



CURVAS DE VELOCIDAD-DISTANCIA SOBRE PENDIENTE PARA VEHÍCULOS PESADOS (HUFF Y SCRIVNER)

Un camión está capacitado para acelerar hasta una velocidad de 16 km/h o más sólo en rampas de 4% o menores.

Huff y Scrivner compararon estas curvas semiempíricas con datos experimentales recabados sobre carreteras, obteniéndose algunas discrepancias. Las más importantes fueron las siguientes:

- Se presentaron algunas irregularidades en las curvas graficadas causadas principalmente por el movimiento del camión, en especial donde se alcanzaban las máximas velocidades sostenidas.
- Las velocidades reales máximas sostenidas fueron de 1,6 a 3,2 km/h mayores a las obtenidas en las gráficas semiempíricas.

No obstante estas discrepancias las curvas obtenidas pueden ser consideradas representativas de la operación de vehículos pesados.

Las investigaciones de Firey y Peterson parten de una ecuación similar a la anteriormente vista:

$$\frac{P}{g} \frac{dv}{dt} = Ft - Fr - P \text{ sen } \alpha$$

donde Ft esfuerzo de tracción provocado por la unidad motriz, en kg
 Fr resistencia al rodamiento, en kg
 P peso bruto del vehículo, en kg

La fuerza de tracción del motor es:

$$F_t = \frac{E}{V_{\text{máx}}} \cdot 274$$

siendo E nº de revoluciones del motor con la válvula de admisión totalmente abierta
 V_{máx} velocidad máxima del vehículo para una determinada marcha, en km/h

La fuerza de tracción del motor se hace cero cuando el motor es desembragado para efectuar el cambio de marcha.

La resistencia al rodamiento responde a la siguiente ecuación, adoptada de un estudio realizado por Sawhill y Firey para camiones pesados:

$$F_r = \frac{P}{148,5} + 88,5$$

Sobre rampas significativas Fr no es de importancia ya que el esfuerzo tractor es notablemente superior.

A fin de reducir variables han adoptado los siguientes rangos límites:

- Relación Peso/Potencia: 91 kg/HP a 181 kg/HP
- Peso bruto del vehículo: 13,6 toneladas a 31,8 toneladas
- Pendientes de carreteras: - 8% a + 8%
- Radios equivalentes de curvas verticales: R = 762 m a R = 6092 m ó R = 00

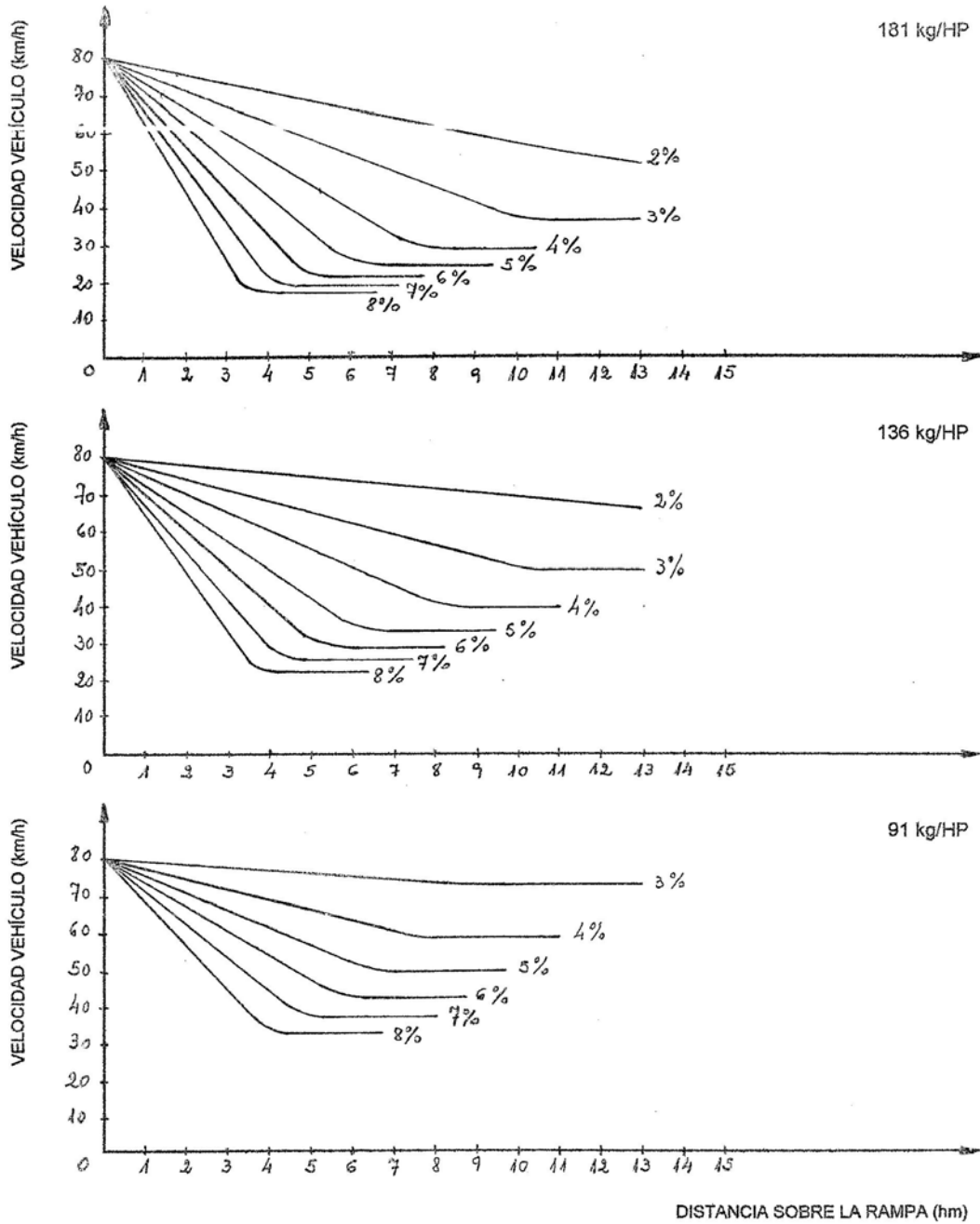
Sobre las curvas de desaceleración el primer cambio de marcha se supuso cuando $v = 0,8 v_0$, y sobre las de aceleración cuando $v = 1,25 v_0$. Se adoptó un tiempo promedio de 2 segundos para realizar el cambio de marcha (esfuerzo de tracción nulo).

Con estas consideraciones desarrollaron una serie de ecuaciones del movimiento para circulación de vehículos pesados sobre curvas verticales (pendiente variable) y sobre pendientes uniformes.

En una segunda instancia hicieron una ulterior simplificación usando un solo valor promedio del peso bruto del vehículo: P = 22,7 toneladas, ya que encontraron que una variación del peso dentro de los rangos establecidos (13,6 t a 31,8 t) no afectaba apreciablemente la relación Ft/P.

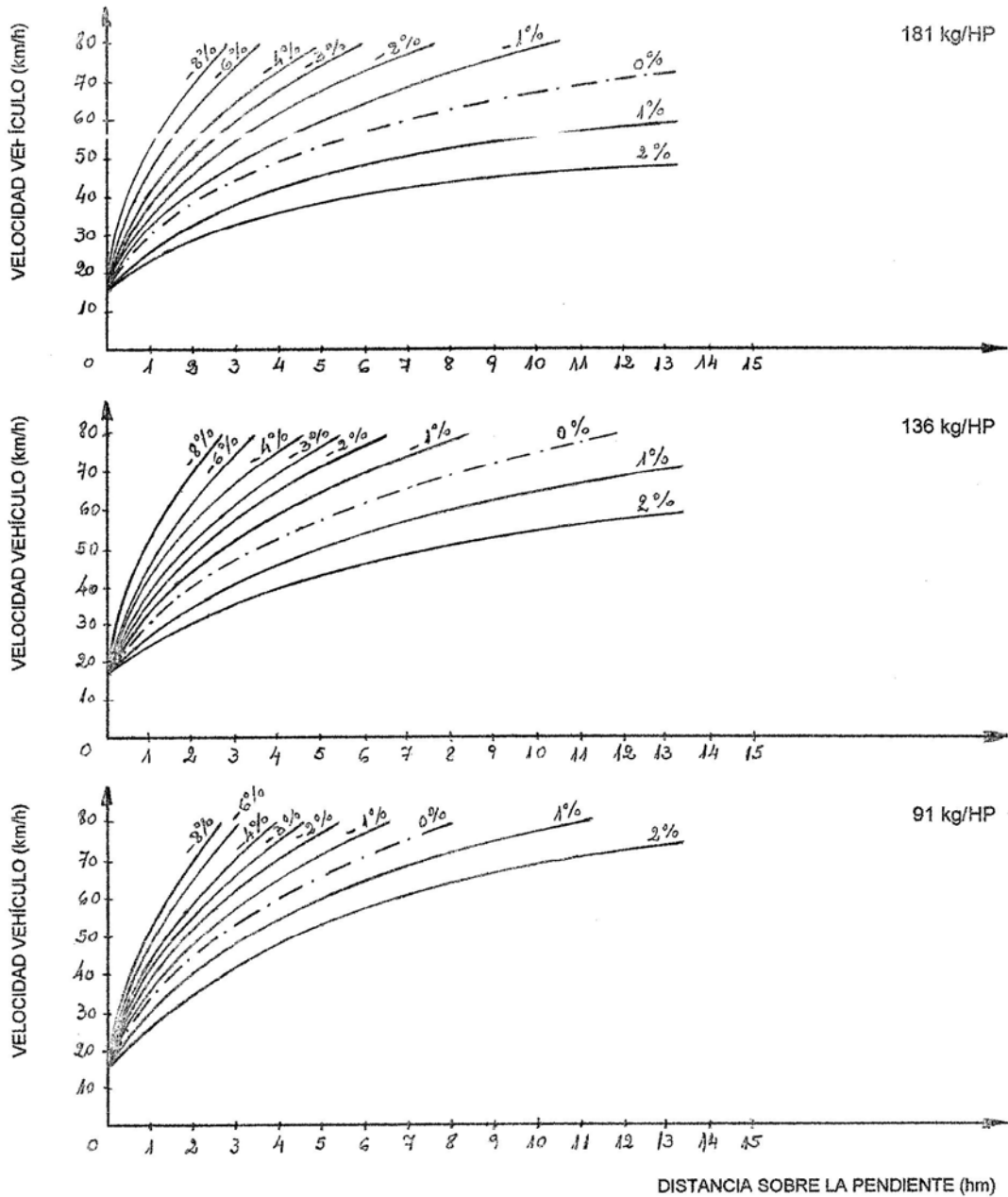
Con los datos calculados mediante las ecuaciones del movimiento así desarrolladas, representaron las gráficas de velocidad-longitud de pendientes. Los diagramas reales acusaban pequeños saltos correspondientes a los puntos en que se realizaba el cambio de marcha; estas curvas fueron reemplazadas por una curva continua que cubría, sin apreciables diferencias, las originalmente obtenidas.

En las figuras siguientes se presentan las gráficas de velocidad-longitud de rampas sobre pendientes uniformes, para una velocidad de entrada en la rampa de 80 km/h y valores de la relación Peso/Potencia de 181, 136 y 91 kg/HP, respectivamente.



CURVAS DE VELOCIDAD-DISTANCIA SOBRE RAMPA
 PARA VEHÍCULOS PESADOS (FIREY Y PETERSON)

A continuación se presentan las gráficas de velocidad-longitud sobre pendientes uniformes, para una velocidad de entrada de 16 km/h y valores de la relación Peso/Potencia de 181, 136 y 91 kg/HP respectivamente.



CURVAS DE VELOCIDAD-DISTANCIA SOBRE PENDIENTE PARA VEHÍCULOS PESADOS (FIREY Y PETERSON)

Para pendientes uniformes, cuando la velocidad de entrada es distinta de 16 km/h u 80 km/h respectivamente, las curvas mencionadas pueden ser utilizadas cambiando el punto de entrada cero por el de la correspondiente velocidad en la respectiva curva de pendiente, en forma similar a lo expresado para las gráficas de Huff y Scrivner.

Los gráficos presentados, además de las consideraciones expuestas, tienen las siguientes limitaciones:

- 1º) El par motor debe ser razonablemente constante en el rango de las revoluciones del motor para válvula de admisión totalmente abierta.
- 2º) La superficie de rodamiento debe ser pavimentada, por lo tanto no son utilizables para calzadas de tierra o enripiadas.

3º) Las características de la resistencia al rodamiento deben ser razonablemente similares a las supuestas.

2.3.4.- Criterios de diseño de pendientes límites

La pendiente máxima no es por sí sola un elemento de control en el diseño geométrico; es necesario también considerar la longitud de cada pendiente en particular para determinar las condiciones de operación deseables de un vehículo.

Se define como **Longitud Crítica** de una rampa a la máxima longitud sobre la cual un vehículo cargado puede operar con una razonable reducción de su velocidad. Sobre una rampa determinada, longitudes menores que la crítica permiten operaciones aceptables dentro de un rango deseable de velocidades.

Para establecer valores de diseño de longitudes críticas de rampa deben evaluarse los siguientes factores:

- Relación Peso/Potencia de un camión tipo de diseño
- Tipo de superficie de rodamiento
- Velocidad de entrada del vehículo a la rampa
- Velocidad mínima del vehículo debajo de la cual su interferencia en el tránsito se torna conflictiva
- Características operativas del vehículo tipo
- Incidencia de la altitud en la potencia de la unidad motriz

Con relación al camión tipo las normas AASHTO establecen como vehículo de diseño aquél que posee una relación Peso/Potencia de 181 kg/HP.

Debe tenerse en cuenta que las curvas características de operación de vehículos en pendientes responden sólo a calzadas pavimentadas, por lo cual no tienen validez para calzadas naturales o enripiadas.

Como velocidad de entrada en la rampa debe adoptarse la velocidad media de marcha. Si bien en general los vehículos pesados circulan en horizontal a velocidades inferiores en 10 km/h a las de los automóviles, los conductores de los vehículos pesados en general incrementan su velocidad antes de ingresar a una rampa, a menudo en grado considerable, a fin de tratar de iniciar la ascensión a una velocidad lo más alta posible. Esto puede ser objeto de reajuste de acuerdo a las condiciones inmediatamente anteriores a la rampa: si el acceso se verifica luego de un tramo de pendiente ascendente dicha velocidad debe ser corregida disminuyendo la misma de acuerdo a las gráficas de características operacionales de los vehículos; si por el contrario el ingreso se verifica desde una pendiente descendente cabe al proyectista evaluar cuantitativamente este efecto. AASHTO recomienda que puede ser considerado un incremento de 8 km/h en la velocidad de los vehículos que ingresan a la rampa provenientes de moderadas pendientes en descenso, y de 16 km/h en aquéllos provenientes de fuertes pendientes descendentes.

En cuanto a los valores de las velocidades mínimas tolerables de los vehículos pesados no hay aún informes específicos concretos al respecto, siendo el criterio básico el de establecer velocidades mínimas de vehículos pesados tales que no provoquen demoras irrazonables en la circulación de todos los vehículos.

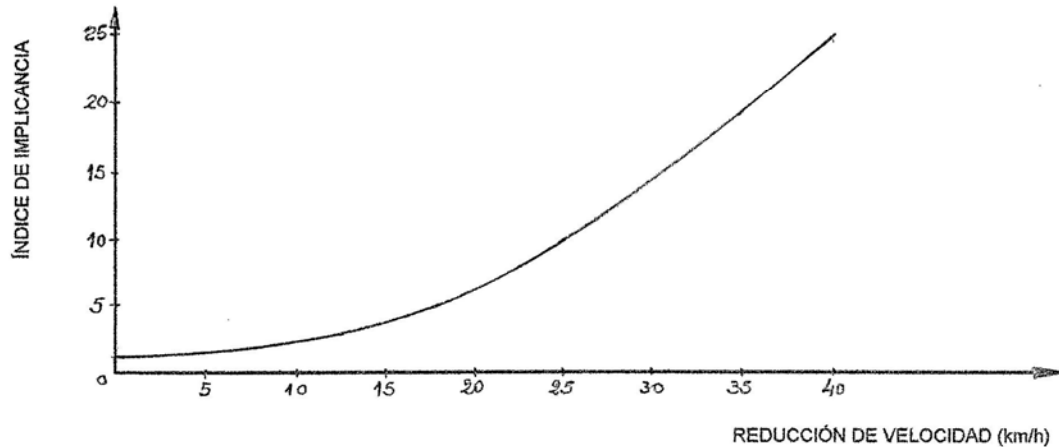
Como principio lógico, si bien algunos estados de U.S.A. especifican una única velocidad mínima tolerable cuyo valor generalmente oscila entre 32 y 56 km/h, las velocidades mínimas tolerables de los vehículos pesados pueden ser relacionadas con las velocidades de diseño.

Las normas AASHTO establecen que, si bien calzadas multicarriles divididas pueden tolerar velocidades mínimas más bajas que calzadas de dos carriles bidireccionales, puede

adoptarse como norma general una reducción de la velocidad media de marcha de 25 km/h como valor límite de la mínima velocidad tolerable.

El investigador D. Salomón en un estudio realizado sobre accidentes para el Bureau of Public Roads informa que, independientemente de la velocidad media de marcha de la carretera, a mayor desviación de la velocidad del vehículo con respecto a la velocidad media, mayor será su posibilidad de estar involucrado en un accidente.

John Glennon, en base a las investigaciones de Salomón y a la distribución de la velocidad de vehículos que circulan en el estado de Texas (U.S.A.), obtiene un valor que denomina **Índice de implicancia en accidentes** para camiones de 4 ó más ejes, para distintas reducciones de la velocidad (considera un índice igual a 1 para una reducción nula de la velocidad). Dichos valores se grafican en la figura siguiente:



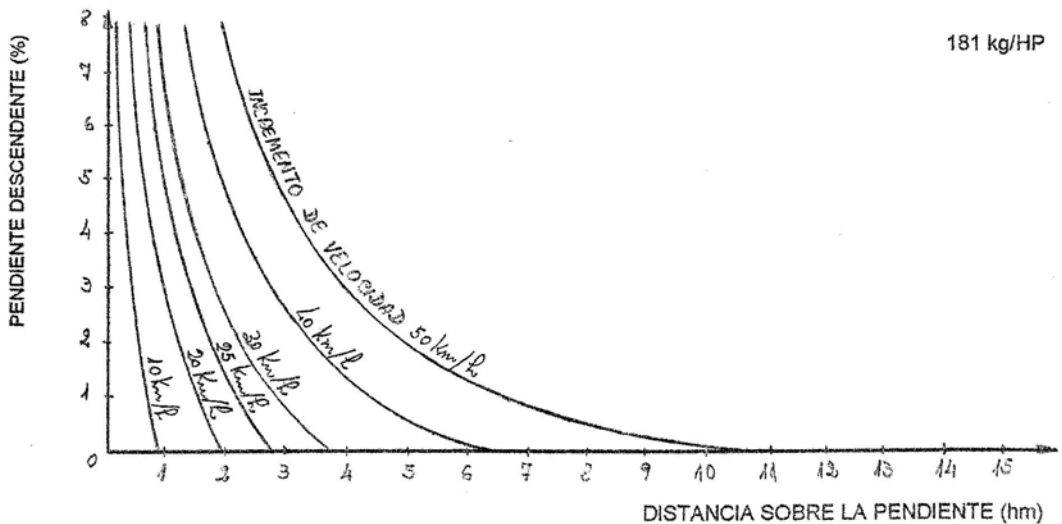
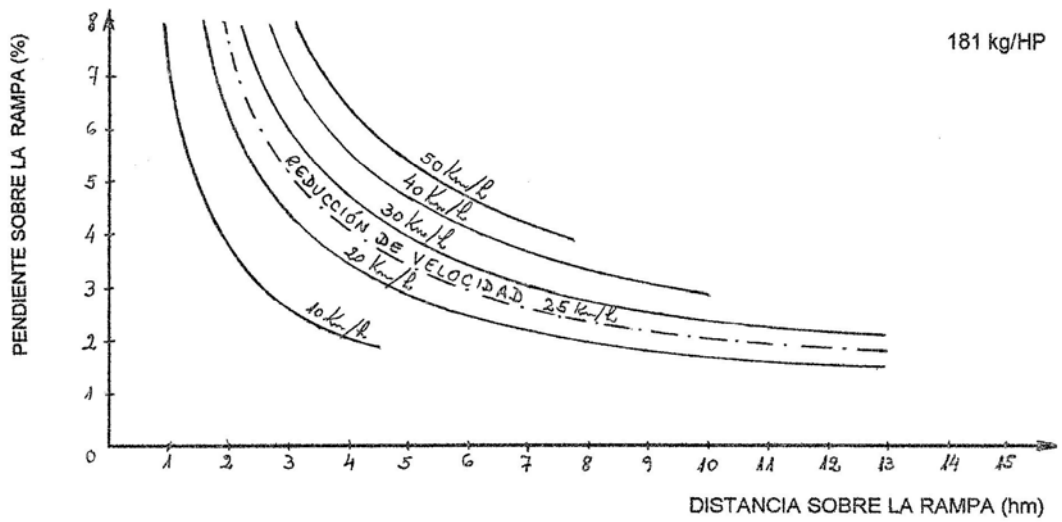
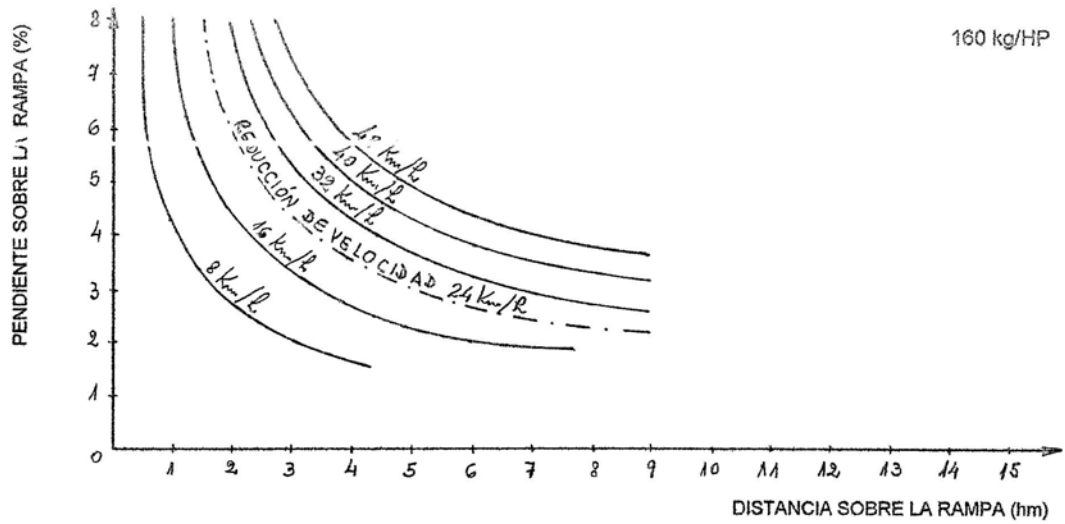
ÍNDICE DE IMPLICANCIA DE ACCIDENTES -
REDUCCIÓN DE LA VELOCIDAD

La curva obtenida muestra que a partir de una reducción de 15 km/h su pendiente se incrementa fuertemente; así, para una reducción de 15 km/h, el índice de implicancia en accidentes alcanza un valor de 3,5 mientras que para 25 km/h es de 9. Estas consideraciones indican que podría adoptarse como valor de diseño una reducción de 15 km/h, lo cual permitiría obtener una apreciable disminución de accidentes, en relación a los 25 km/h adoptados por AASHTO.

A los efectos de diseñar longitudes críticas de rampas, pueden utilizarse gráficas de condiciones operativas de vehículos pesados en función de la reducción de la velocidad. Con estas gráficas, para una rampa dada y una determinada reducción de velocidad puede obtenerse la longitud crítica de la rampa.

En las dos figuras siguientes se representan curvas de características operativas de vehículos sobre rampas uniformes, en función de la reducción de la velocidad según Huff y Scrivner, y Firey y Peterson, respectivamente. Las primeras corresponden a valores adoptados por las normas AASHTO.

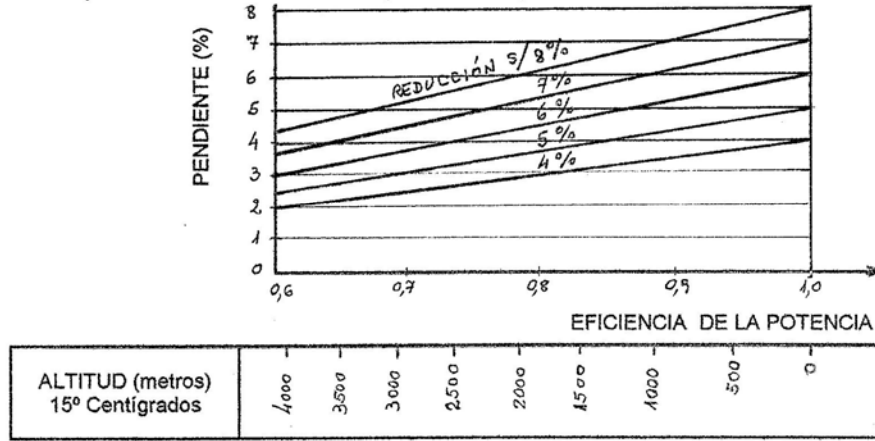
En la tercera figura se representan los incrementos de velocidad en pendientes descendentes según datos de Firey y Peterson.



2.3.5.- Reducción de potencia debido a altitud y temperatura

La potencia de las unidades motrices disminuye con la altitud y la temperatura. Debe considerarse por lo tanto la incidencia de este efecto en el comportamiento de los vehículos que circulan en rampas ubicadas a elevadas altitudes.

En la próxima figura se grafican las disminuciones de las pendientes en función de la eficiencia de la potencia, considerando las máximas para una eficiencia unitaria que corresponde a funcionamiento a nivel del mar. En correspondencia con la eficiencia de potencia se expresan las altitudes correspondientes para una temperatura de 15°.



REDUCCIÓN DE PENDIENTE EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE CORRECCIÓN DE LA POTENCIA SEGÚN LA ALTITUD

De la gráfica puede determinarse la disminución de una pendiente máxima en función de la altitud.

La variación de la temperatura, dentro de los rangos naturales en que se produce, no afecta en forma apreciable los valores de la potencia.

En la práctica no se realizan correcciones de potencia para alturas inferiores a 600 metros.

Para vehículos que deban trabajar en elevadas altitudes se fabrican motores sobrealimentados que son menos sensibles a los problemas de reducción de potencia.

3.- CURVAS VERTICALES

3.1.- Generalidades

Las curvas verticales deben proveer, en el quiebre de dos alineamientos rectos consecutivos, un enlace tal que permita una correcta continuidad de la carretera.

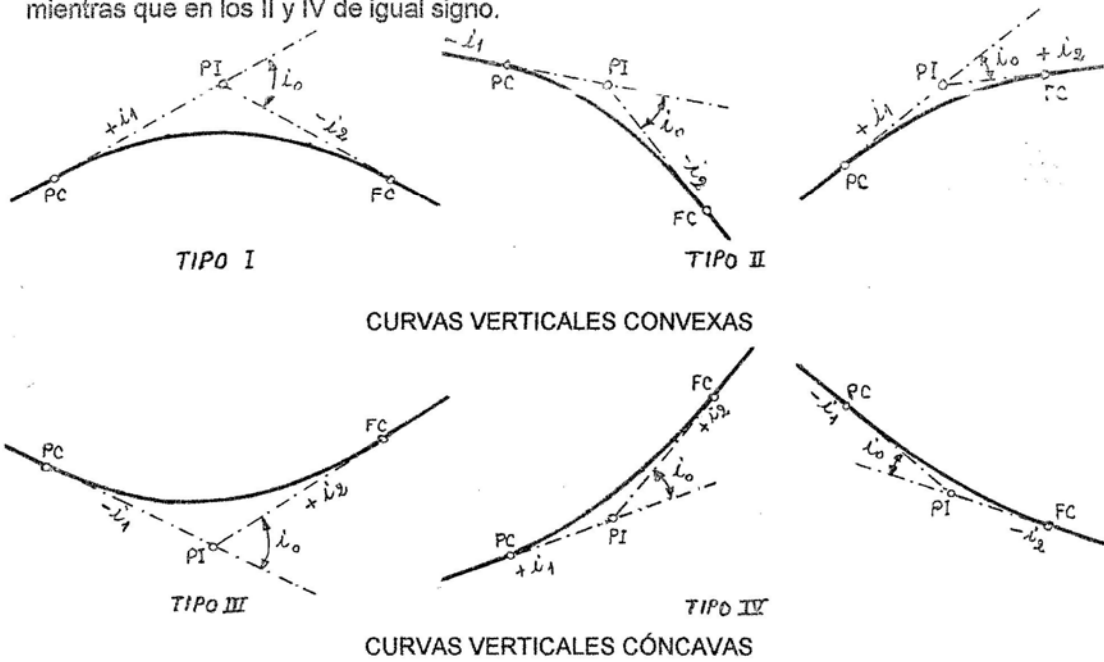
La geometría de las curvas verticales debe cumplir con las siguientes condiciones:

- 1º) Asegurar las distancias de visibilidad de frenado y sobrepaso requeridas para garantizar absolutas situaciones de seguridad en la carretera.
- 2º) Proveer el confort necesario para la circulación vehicular.
- 3º) Conferir apariencias visuales estéticas a la carretera.

Además, en carreteras urbanas con cordón emergente dichas curvas deben proveer una pendiente tal que asegure el correcto desagüe superficial de las aguas pluviales.

Las curvas verticales pueden ser clasificadas en dos tipos: convexas y cóncavas y se presentan las formas esquematizadas en la próxima figura.

En los tipos I y III ambos alineamientos rectos tienen pendientes de distinto signo, mientras que en los II y IV de igual signo.



- Siendo i_1 e i_2 pendientes de los alineamientos rectos, en %
- i_0 diferencia algebraica de las pendientes, en %
- PI punto de intersección de los alineamientos rectos
- L longitud de la curva vertical
- PC principio de curva
- FC fin de curva

3.2.- Teoría de la curva vertical parabólica

Para el trazado de curvas verticales, en la técnica vial se utiliza la parábola cuadrática de eje vertical ya que, además de presentar un confortable desarrollo para la circulación vehicular, su diseño y cálculo es de suma simplicidad.

Tomando como centro de coordenadas un punto cualquiera, la ecuación general de la parábola que tiene el eje paralelo a las ordenadas, queda expresada de la siguiente manera:

$$y = \frac{x^2}{2p} + b x + c$$

- siendo b y c constantes genéricas que dependen del origen de coordenadas
- p constante que define a la parábola y que se denomina parámetro

Derivando con respecto a x puede obtenerse la pendiente de la tangente en un punto determinado:

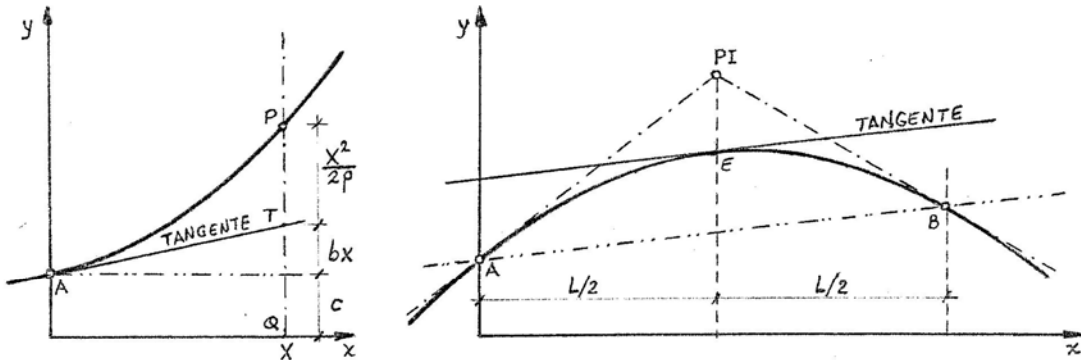
$$\frac{dy}{dx} = \frac{x}{p} + b$$

La variación unitaria de dicha pendiente será:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{p}$$

Esta ecuación permite expresar que la variación de la pendiente por unidad de desarrollo de la curva es constante, es decir que la pendiente aumenta o disminuye proporcionalmente al desarrollo de la curva. Esta condición presenta evidentemente excelentes características para el logro de un comfortable movimiento vehicular.

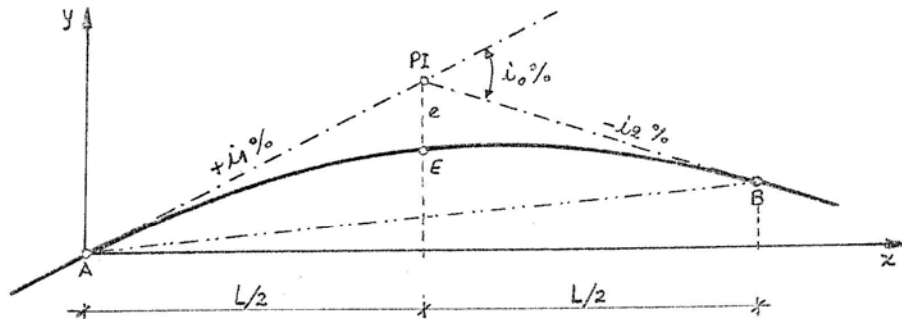
La parábola vertical goza de las siguientes propiedades:



PROPIEDADES DE LA PARÁBOLA

- 1º.- La diferencia entre la ordenada PQ de un punto cualquiera de una parábola y la ordenada TQ correspondiente a la tangente a dicha curva en otro punto A, es igual al cuadrado de la abscisa x referida a dicho punto A dividido por dos veces el parámetro.
- 2º.- Las proyecciones horizontales de las tangentes a dos puntos cualesquiera, A y B, de una parábola, que se intersectan en un punto PI, son iguales.
- 3º.- Cada cuerda AB es paralela a la tangente en el punto E de la parábola, correspondiente al punto medio de la proyección horizontal de dicha cuerda.

Sean dos alineamientos rectos verticales con pendientes $+i_1\%$ y $-i_2\%$ que se intersectan en PI, empalmados mediante una curva vertical parabólica de longitud L.



CURVA VERTICAL PARABÓLICA

A los efectos de simplificar el desarrollo del cálculo, se toma como origen de coordenadas para resolver la parábola el punto A, principio de la curva. Un posterior traslado de los orígenes de coordenadas de cada curva a un único punto de referencia para todo el tramo, permitirá conocer las cotas y progresivas de cualquier punto de la parábola.

Sea X_A la progresiva del principio de curva A referida al origen del tramo, e Y_A la cota de dicho punto A relacionada a un determinado plano de comparación. La progresiva X y la cota Y de un punto cualquiera de la parábola estarán dadas por las siguientes expresiones:

$$X = X_A + x$$

$$Y = Y_A \pm y$$

siendo x e y las coordenadas de dicho punto de referencia al origen A.

De acuerdo con la segunda propiedad enunciada, los puntos A y B de principio y fin de curva se hallarán a distancias iguales $L/2$ hacia delante y hacia atrás de la abscisa del punto PI

A lo largo de la curva vertical entre A y B la variación total de la pendiente será:

$$i_0 \% = + i_1 \% - (- i_2 \%)$$

En base a lo expuesto sobre curvas parabólicas puede escribirse la siguiente expresión:

$$\frac{1}{p} = \frac{i_0}{100 L}$$

El valor de la ordenada y correspondiente a un punto cualquiera de la curva de abscisa x será:

$$y = \frac{i_1 x}{100} - \frac{x^2}{2 p}$$

El valor de la ordenada e desde el punto PI hasta el centro de la curva será:

$$e = \frac{x^2}{2 p} = \frac{i_0}{200 L} (L/2)^2 = \frac{i_0 L}{800}$$

Resumiendo, puede resolverse el cálculo de una curva vertical mediante el siguiente procedimiento:

1º - Cálculo de i_0

$$i_0 = (\pm i_1) - (\pm i_2)$$

2º - Cálculo de e

$$e = \frac{i_0 L}{800}$$

3º - Aplicando las ecuaciones

$$X = X_A + x$$

$$Y = Y_A \pm y$$

$$y = \frac{i_1 x}{100} - \frac{x^2}{2 p}$$

se calcula la cota de rasante en cualquier punto de la curva.

3.3.- Curvas verticales convexas

3.3.1.- Conceptos generales

Las longitudes mínimas de las curvas verticales convexas quedan definidas de acuerdo a los siguientes requerimientos:

- Seguridad vial
- Confort en la circulación
- Apariencia estética de la carretera

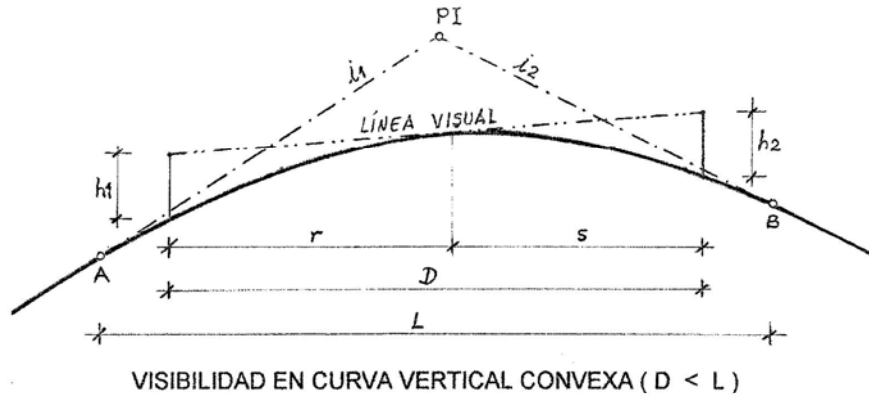
3.3.2.- Requerimientos de la seguridad vial

Las exigencias en cuanto a la seguridad vial quedan cubiertas logrando una adecuada distancia de visibilidad libre de interferencias.

Las fórmulas que expresan la longitud mínima de la curva en función de la distancia de visibilidad se deducen para dos casos distintos:

a) Cuando la distancia de visibilidad D es menor que la longitud L de la curva ($D < L$)

- b) Cuando la distancia de visibilidad D es mayor que la longitud L de la curva ($D > L$)
 Desarrollo del caso a --- ($D < L$)



$$D = r + s$$

De acuerdo con la primera propiedad de la parábola cuadrática se puede expresar:

$$h_1 = r^2 / 2p \qquad h_2 = s^2 / 2p$$

- siendo p parámetro de la parábola
 h_1 altura del ojo del conductor respecto a la calzada
 h_2 altura del obstáculo respecto a la calzada

Reemplazando $p = 100 L / i_0$ en las expresiones anteriores, puede escribirse:

$$h_1 = r^2 i_0 / 200 L \qquad h_2 = s^2 i_0 / 200 L$$

Operando:

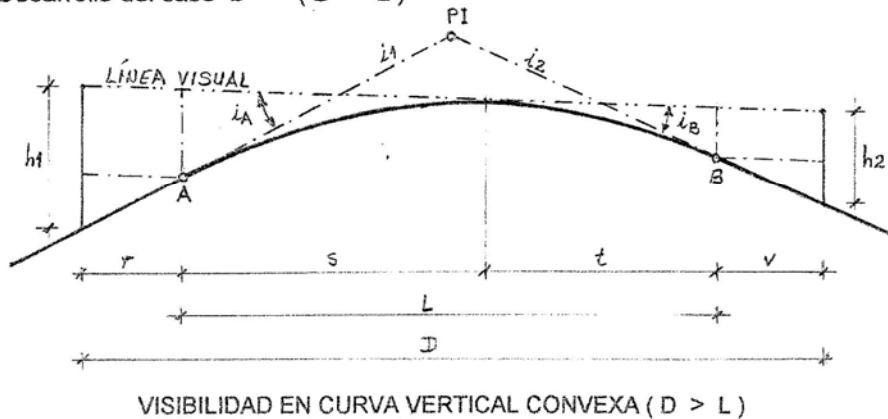
$$r^2 = 200 L h_1 / i_0 \qquad s^2 = 200 L h_2 / i_0$$

$$D = (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \sqrt{200 L / i_0}$$

Luego resulta:

$$L = \frac{i_0 D^2}{200 (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2}$$

Desarrollo del caso b --- ($D > L$)



$$D = r + s + t + v$$

La diferencia de pendientes (en metro sobre metro) entre la línea visual y las tangentes en A y en B respectivamente, será:

$$i_A = s / p \quad i_B = t / p$$

Los valores de h_1 y h_2 pueden expresarse de la siguiente forma:

$$h_1 = \frac{s^2}{2p} + \frac{s}{p} r \quad h_2 = \frac{t^2}{2p} + \frac{t}{p} v$$

Operando pueden obtenerse los valores de r y v :

$$r = \left(h_1 - \frac{s^2}{2p} \right) \frac{p}{s} = \frac{p h_1}{s} - \frac{s}{2}$$

$$v = \left(h_2 - \frac{t^2}{2p} \right) \frac{p}{t} = \frac{p h_2}{t} - \frac{t}{2}$$

Reemplazando y operando, se obtiene:

$$D = \frac{p h_1}{s} + \frac{p h_2}{(L-s)} + \frac{L}{2}$$

La posición de la línea visual que provoca el mínimo valor de D se tendrá cuando:

$$\frac{dD}{ds} = 0 = \frac{p h_1}{s^2} - \frac{p h_2}{(L-s)^2} = \frac{h_1}{s^2} - \frac{h_2}{(L-s)^2}$$

$$s = \frac{L \sqrt{h_1}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \quad t = (L-s) = \frac{L \sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}}$$

Reemplazando

$$D = \frac{p \sqrt{h_1}}{L} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) + \frac{p \sqrt{h_2}}{L} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) + \frac{L}{2}$$

Reemplazando $p = \frac{100L}{i_0}$

$$D = \frac{100 \sqrt{h_1}}{i_0} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) + \frac{100 \sqrt{h_2}}{i_0} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) + \frac{L}{2}$$

Operando:

$$D = \frac{100}{i_0} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2 + \frac{L}{2}$$

$$L = 2D - \frac{200}{i_0} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2$$

3.3.2.1.- Visibilidad de frenado

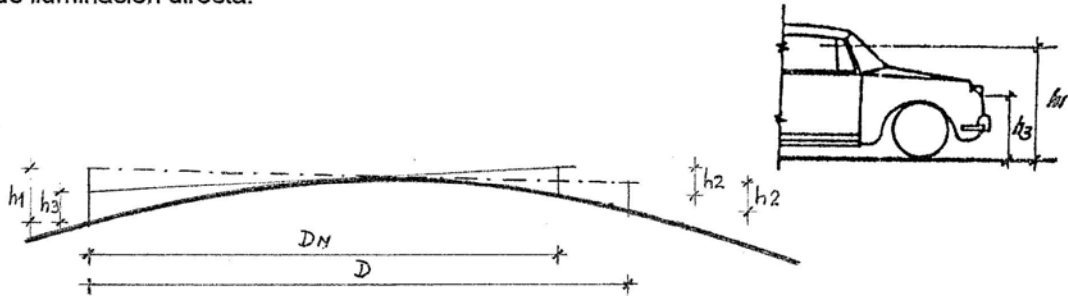
Se adopta como altura del ojo $h_1 = 1,07$ metros y como altura del obstáculo $h_2 = 0,15$ metros. Reemplazando estos valores resultan:

$$\text{Caso a --- } (D < L) \quad L = \frac{i_0 D^2}{404} \quad p = \frac{D^2}{4,04}$$

Caso b --- ($D > L$)
$$L = 2 D - \frac{404}{i_0} \qquad p = \frac{200 D}{i_0} - \frac{40400}{i_0^2}$$

Estas fórmulas proveen las longitudes mínimas de curvas verticales convexas requeridas para asegurar la distancia de visibilidad de frenado, y los valores de los parámetros correspondientes.

En circulación nocturna la longitud visible de calzada es aquella iluminada por los faros delanteros de los vehículos. Todo objeto, para ser directamente iluminado por las luces de un vehículo, debe ser lo suficientemente alto como para entrar dentro del campo de iluminación directa.



VISIBILIDAD NOCTURNA EN CURVAS CONVEXAS

En condiciones de circulación nocturna la distancia de visibilidad de frenado en una curva vertical queda expresada por la siguiente ecuación, adoptando como altura de los faros $h_3 = 0,60$ metros y como altura del obstáculo $h_2 = 0,15$ metros.

$$L = \frac{i_0 DN^2}{270}$$

siendo DN distancia de visibilidad de frenado de una determinada sección de curva en circulación nocturna.

Igualando la expresión de L para circulación nocturna con la longitud de una curva determinada en la forma convencional, y operando, resulta:

$$L = \frac{i_0 D^2}{404} = \frac{i_0 DN^2}{270}$$

$$DN = 0,82 D$$

Esta última igualdad permite expresar que en circulación nocturna la distancia de visibilidad queda reducida a un 82% de la diurna correspondiente.

Esta reducción de la distancia de visibilidad significa una disminución de velocidad del orden del 13% con respecto a la correspondiente para circulación diurna.

Se juzga innecesario tomar en consideración este efecto de reducción de la distancia de visibilidad en condiciones de calzada iluminada por el vehículo ya que, en general, la velocidad media vehicular en circulación nocturna es inferior en un 10% a la media desarrollada durante el día.

3.3.2.2.- Visibilidad de sobrepaso

Se toma en este caso como altura del objeto $h_2 = 1,30$ metros, valor que representa la altura media de un vehículo de pequeño porte. Las ecuaciones que resuelven la longitud de la curva para estas condiciones son las siguientes:

Caso a --- ($D < L$)
$$L = \frac{i_0 D^2}{946} \qquad p = \frac{D^2}{9,46}$$

$$\text{Caso b --- (D > L)} \quad L = 2 D - \frac{946}{i_o} \quad p = \frac{200 D}{i_o} - \frac{94600}{i_o^2}$$

Las longitudes de curvas verticales requeridas para asegurar la visibilidad de sobrepaso son sustancialmente mayores que las necesarias para otorgar visibilidad de frenado.

En la práctica, por razones de orden técnico y económico, estas condiciones de visibilidad son difíciles de obtener en la totalidad de un tramo.

Según criterio de la Dirección Nacional de Vialidad debe tratarse en lo posible que en secciones de 3 kilómetros de longitud se logren los siguientes porcentajes de distancias con visibilidad para el sobrepaso:

- Zona llana 80%
- Zona ondulada 50%
- Zona montañosa 30%

Cabe destacar que debe ponerse el mayor empeño en el diseño a los fines de lograr tramos de carretera que ofrezcan condiciones de visibilidad de sobrepaso en la mayor parte de su longitud.

3.3.3.- Requerimientos del confort en la circulación

Los ocupantes de un vehículo que circula sobre una curva vertical están sujetos a una aceleración centrífuga que es función de la velocidad del vehículo y de la curvatura de dicha curva.

La disminución del confort que provoca tal aceleración es de muy difícil evaluación ya que son numerosas las variables que intervienen en su generación (suspensión del vehículo y de los asientos, flexibilidad del neumático, peso transportado, etc.). Estudios experimentales realizados por diversos investigadores permiten estimar que aceleraciones del orden de 0,3 m/s² no afectan la comodidad de circulación.

Tomando como límite este valor de 0,3 m/s² puede expresarse lo siguiente:

$$(V / 3,6)^2 = 0,3 p$$

siendo V velocidad del vehículo, en km/h

p parámetro de la parábola (radio del círculo osculador), en m

Operando:

$$L = \frac{V^2 i_o}{390}$$

Esta expresión arroja longitudes de curva inferiores a las exigidas por la condición de seguridad (distancia de visibilidad), no siendo por lo tanto determinantes en cuanto al diseño de curvas verticales convexas.

3.3.4.- Requerimientos de la apariencia estética de la carretera

La ecuación $L = 2 D - \frac{200}{i_o} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})^2$ para bajos valores de i_o resulta

en pequeñas longitudes de curva que en la práctica podrían provocar efectos visuales poco agradables. Para controlar tal eventualidad se estima conveniente limitar la longitud mínima de las curvas verticales en relación a cada velocidad de diseño. Es de práctica común usar como norma de diseño la siguiente expresión:

$$L = 0,6 V$$

siendo L longitud mínima de la curva, en m

V velocidad de diseño, en km/h

3.4.- Curvas verticales cóncavas

3.4.1.- Conceptos generales

De acuerdo a lo expresado anteriormente, las curvas verticales deben proveer condiciones de seguridad y confort en la circulación y conferir agradables efectos estéticos a la geometría de la carretera.

Estos criterios que controlan el diseño de las curvas verticales cóncavas se detallan a continuación.

3.4.2.- Requerimientos de la seguridad vial

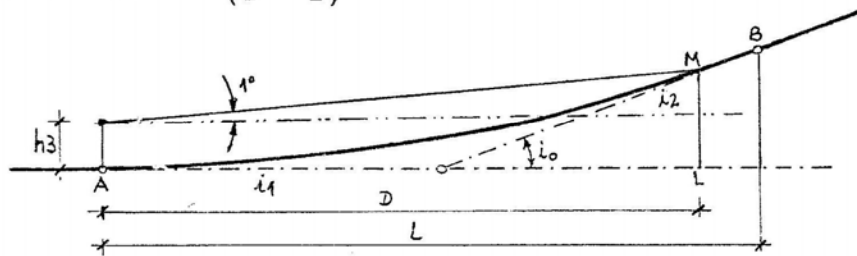
Una curva vertical debe asegurar en todo momento una correcta visibilidad. Cuando un vehículo circula sobre una curva vertical cóncava durante la noche, la sección de carretera iluminada por el propio vehículo depende de la disposición de los faros delanteros y de la geometría de la curva. Deben por lo tanto establecerse controles en el diseño de las curvas verticales cóncavas, de manera de asegurar una longitud mínima de carretera iluminada igual a la distancia de visibilidad de frenado.

A los efectos de una simplificación en las variables de cálculo se estima en forma aproximada una altura media de los faros del vehículo $h_3 = 0,60$ metros, y una divergencia del haz de luz en sentido ascendente de 1° , medido sobre el eje longitudinal de dicho haz.

Las fórmulas que expresan la longitud mínima de la curva en función de las condiciones de visibilidad se deducen para dos casos distintos, en forma similar a lo expuesto para curvas convexas.

- a) Cuando la distancia de visibilidad D es menor que la longitud L de la curva ($D < L$)
- b) Cuando la distancia de visibilidad D es mayor que la longitud L de la curva ($D > L$)

Desarrollo del caso a -- ($D < L$)



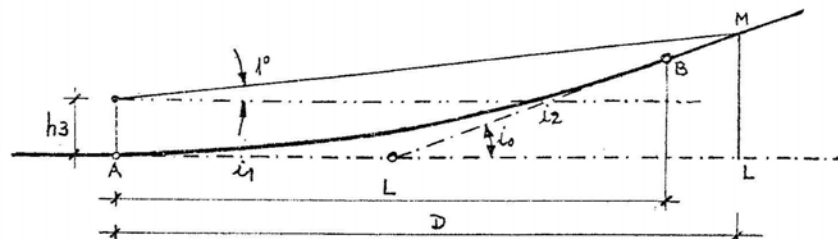
VISIBILIDAD EN CURVA VERTICAL CÓNCAVA ($D < L$)

$$ML = D^2 / 2 p = i_0 D^2 / 200 L = h_3 + D \operatorname{tg} 1^\circ$$

Operando y reemplazando:

$$L = \frac{i_0 D^2}{120 + 3,5 D}$$

Desarrollo del caso b -- ($D > L$)



VISIBILIDAD EN CURVA VERTICAL CÓNCAVA ($D > L$)

$$ML = \frac{i_o}{100} \cdot \left(D - \frac{L}{2} \right) = h_3 + D \operatorname{tg} 1^\circ$$

Operando y reemplazando:

$$L = 2 D - \frac{120 + 3,5 D}{i_o}$$

3.4.3.- Requerimientos del confort en la circulación

Valen las mismas consideraciones expresadas para el caso de curvas verticales convexas, pero ahora la aceleración tiene el mismo sentido de la gravedad.

En forma similar, las longitudes de curvas exigidas por la condición de confort son inferiores a las requeridas por la condición de seguridad (distancia de visibilidad), no siendo por lo tanto determinantes en el diseño de curvas verticales cóncavas.

3.4.4.- Requerimientos de la apariencia estética de la carretera

Para este caso también tiene validez la expresión $L = 0,6 V$ que permite lograr agradables aspectos visuales en la conformación de la carretera.

3.5.- Quiebres mínimos de alineamientos rectos que no requieren curvas

Puede prescindirse de empalmar dos alineamientos rectos con una curva vertical cuando el apartamiento e tiene valores inferiores a 2,5 centímetros. Reemplazando en la ecuación $e = \frac{i_o L}{800}$ resulta $i_o L = 20$

El mínimo valor de L estaba dado por la expresión $L = 0,6 V$ y reemplazando la misma en la ecuación anterior resulta:

$$i_o = \frac{100}{3 V}$$

Además, se estima conveniente, a fin de lograr buenos efectos visuales en la configuración del alineamiento vertical, prever curvas verticales en todo quiebre de alineamiento con diferencia algebraica de pendientes igual o mayor de 0,5% ($i_o \geq 0,5\%$).

3.6.- Gráficos

En los gráficos siguientes se representan las longitudes mínimas de curvas verticales en función de las diferencias algebraicas de pendientes, para variadas velocidades de diseño, que cumplen con todos los requisitos detallados en el texto.

Cabe destacar que, en todos los casos posibles, es conveniente el uso de longitudes de curva mayores a los mínimos.

En los citados gráficos, la curva de trazos indica $D = L$

A la derecha de dicha línea la longitud de la curva vertical L es directamente proporcional con i_o , mientras que a la izquierda de la misma la relación es una función inversa de i_o que se interrumpe al intersectar a la vertical correspondiente a $L = 0,6 V$.

AASHTO 1994 modifica el tramo que es función inversa de i_o prolongando la recta correspondiente a $D < L$, modificación que queda del lado de la seguridad y no en excesiva magnitud, puesto que cuando i_o es pequeño esta mayor longitud no representa un costo adicional importante.

En el gráfico Curvas verticales convexas con visibilidad para maniobra de sobrepaso se muestra, para velocidades de 30, 40 y 120 km/h, en línea de trazo y punto, la forma exacta de la relación $L - i_o$ para $D > L$.

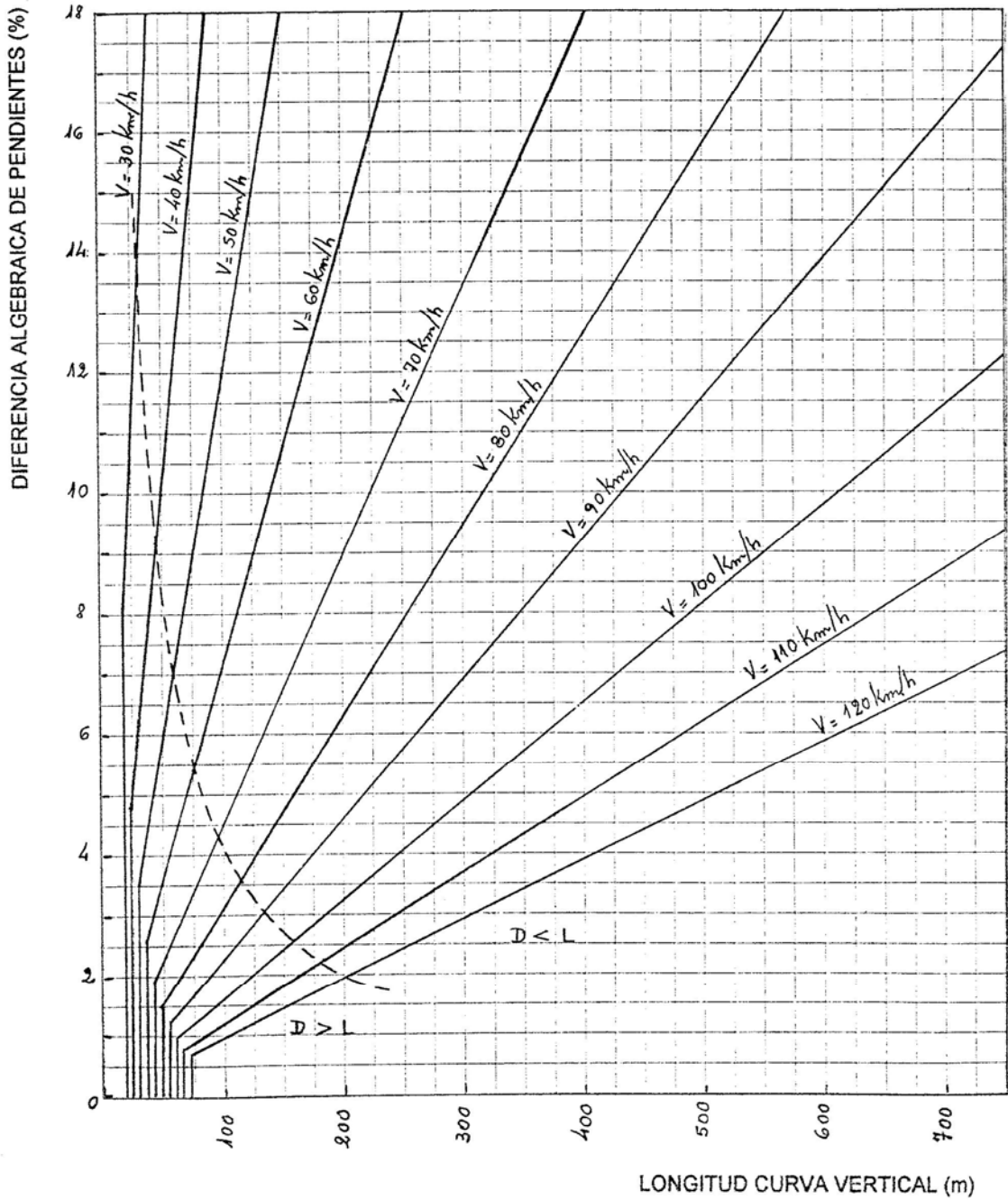
CURVAS VERTICALES CONVEXAS

DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE FRENADO, LÍMITE INFERIOR

V velocidad de diseño, en km/h D distancia de visibilidad de frenado, en m
 h1 altura del ojo del conductor 1,07 metros h2 altura del obstáculo 0,15 metros
 io diferencia algebraica de pendientes, en % L longitud mínima de curva, en m
 Fórmulas: $D > L$ $L = 2 D - \frac{200}{io} (\sqrt{h1} + \sqrt{h2})^2 = 2 D - \frac{404}{io}$

$$D < L \quad L = \frac{io D^2}{200 (\sqrt{h1} + \sqrt{h2})^2} = \frac{io D^2}{404}$$

$$L = 0,6 V$$



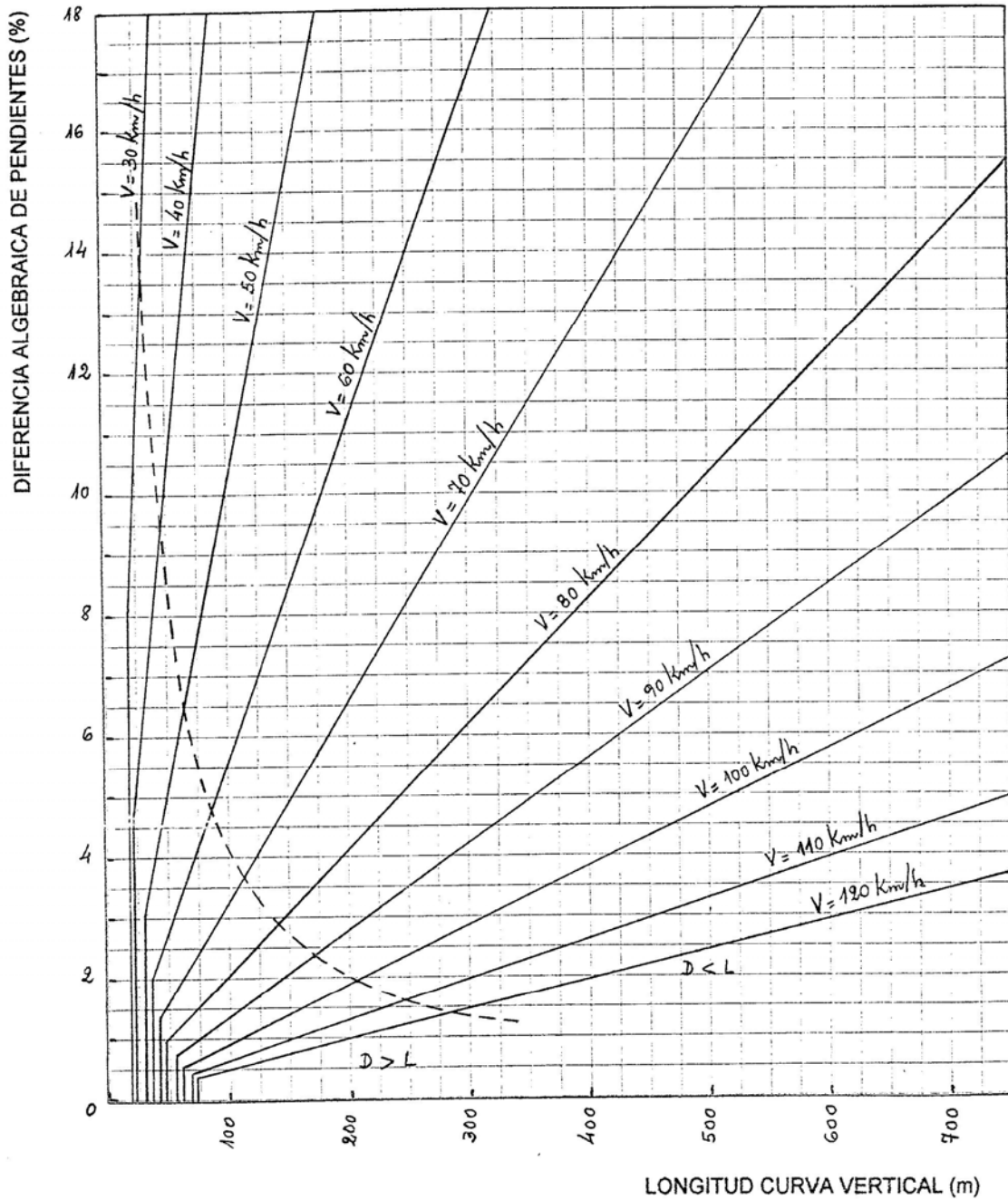
CURVAS VERTICALES CONVEXAS

DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE FRENADO, LÍMITE SUPERIOR

- | | | | |
|----|---|----|---|
| V | velocidad de diseño, en km/h | D | distancia de visibilidad de frenado, en m |
| h1 | altura del ojo del conductor 1,07 metros | h2 | altura del obstáculo 0,15 metros |
| io | diferencia algebraica de pendientes, en % | L | longitud mínima de curva, en m |
- Fórmulas: $D > L \quad L = 2 D - \frac{200}{io} (\sqrt{h1} + \sqrt{h2})^2 = 2 D - \frac{404}{io}$

$$D < L \quad L = \frac{io D^2}{200 (\sqrt{h1} + \sqrt{h2})^2} = \frac{io D^2}{404}$$

$$L = 0,6 V$$



CURVAS VERTICALES CONVEXAS

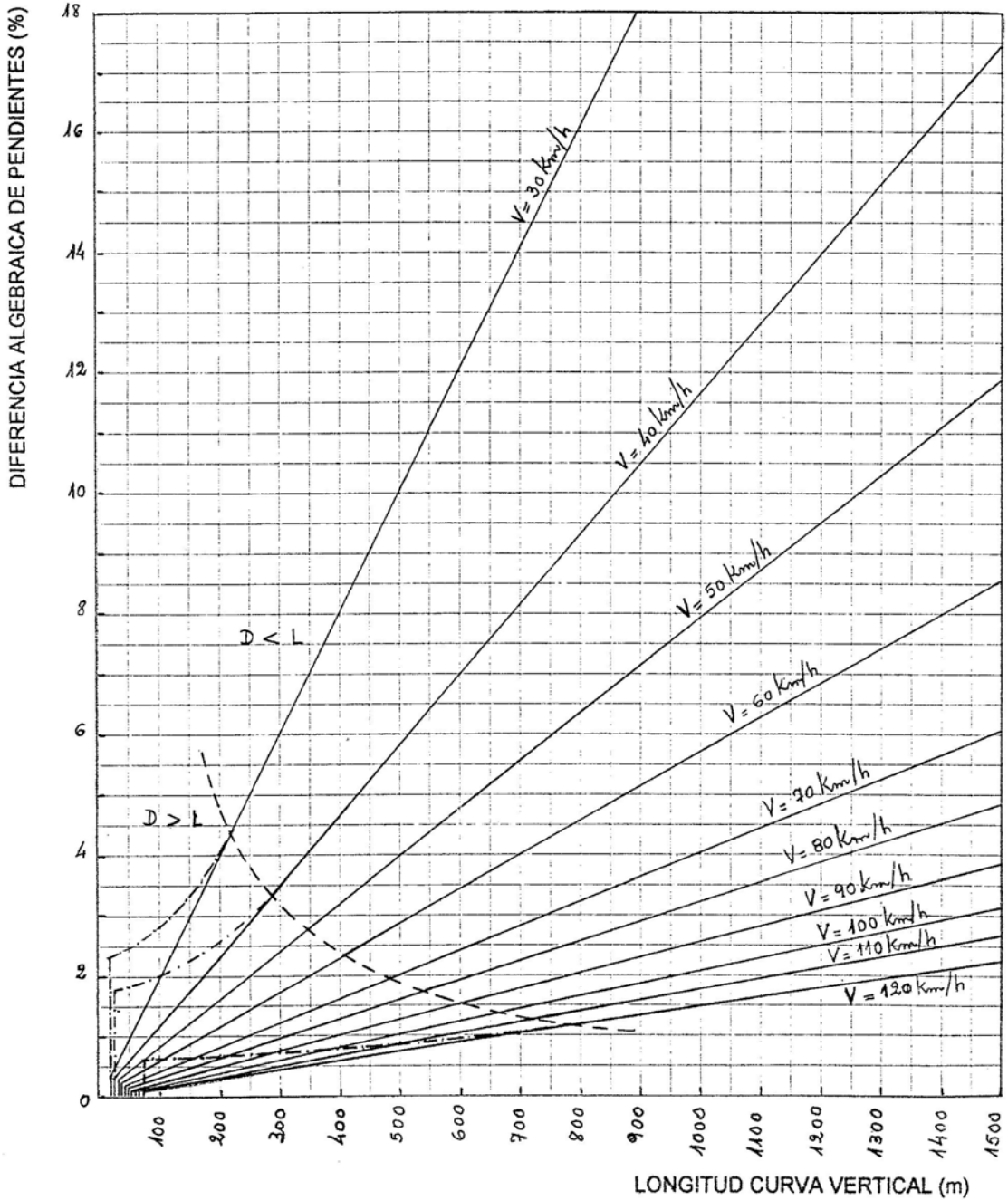
DISTANCIA DE VISIBILIDAD PARA MANIOBRA DE SOBREPASO

V velocidad de diseño, en km/h D distancia de visibilidad de frenado, en m
 h1 altura del ojo del conductor 1,07 metros h2 altura del vehículo opuesto 1,30 metros
 io diferencia algebraica de pendientes, en % L longitud mínima de curva, en m

Fórmulas: $D > L$ $L = 2 D - \frac{200}{io} (\sqrt{h1} + \sqrt{h2})^2 = 2 D - \frac{946}{io}$

$D < L$ $L = \frac{io D^2}{200 (\sqrt{h1} + \sqrt{h2})^2} = \frac{io D^2}{946}$

$L = 0,6 V$



CURVAS VERTICALES CÓNCAVAS

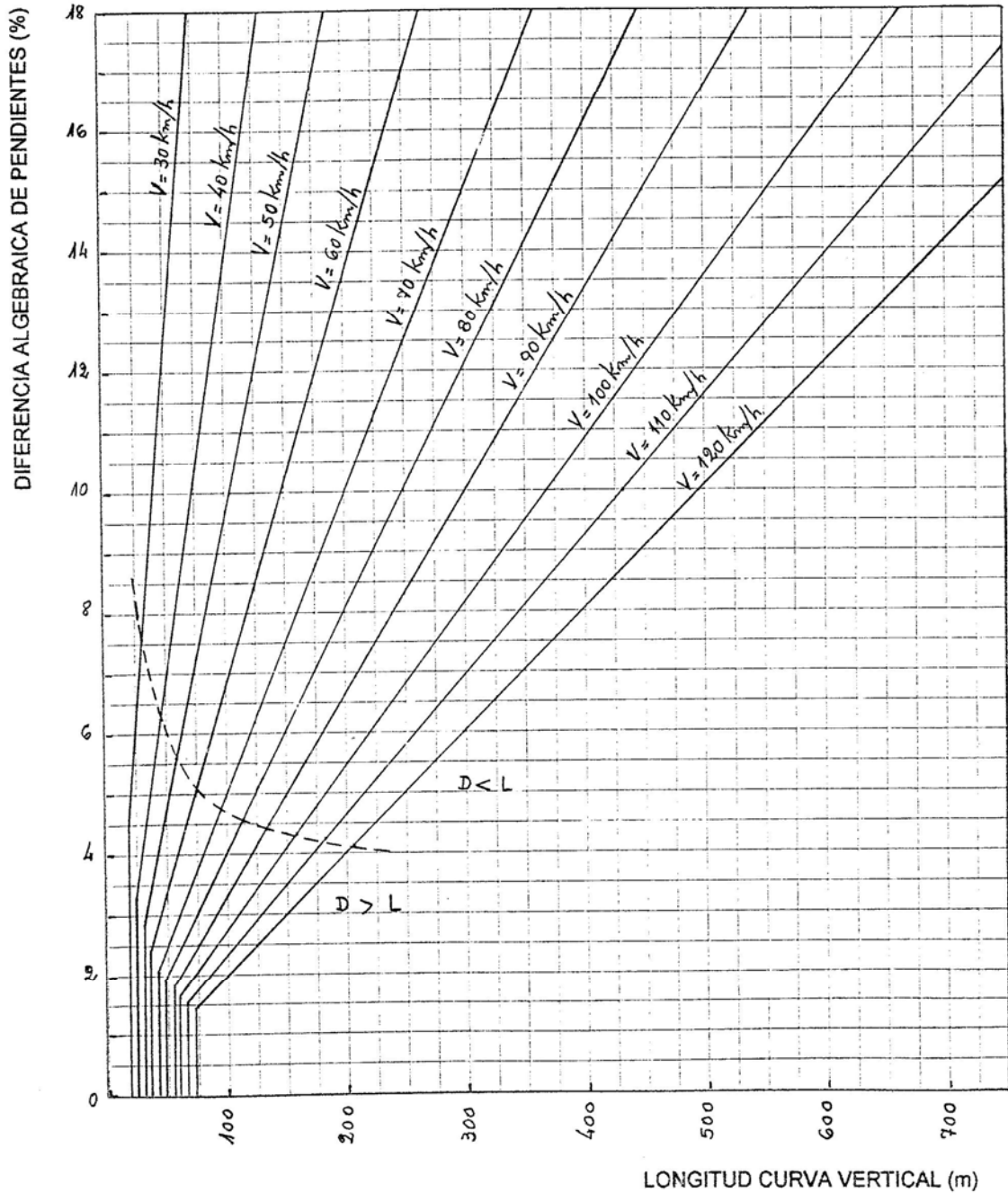
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE FRENADO, LÍMITE INFERIOR

- V velocidad de diseño, en km/h
- h3 altura de los faros del vehículo 0,60 metros
- io diferencia algebraica de pendientes, en %
- D distancia de visibilidad de frenado, en m
- α ángulo de divergencia del haz luminoso 1°
- L longitud mínima de curva, en m

Fórmulas: $D > L \quad L = 2D - \frac{200 h_3 + 200 D \operatorname{tg} 1^\circ}{i_o} = 2D - \frac{120 + 3,5 D}{i_o}$

$D < L \quad L = \frac{i_o D^2}{200 h_3 + 200 D \operatorname{tg} 1^\circ} = \frac{i_o D^2}{120 + 3,5 D}$

$L = 0,6 V$



CURVAS VERTICALES CÓNCAVAS

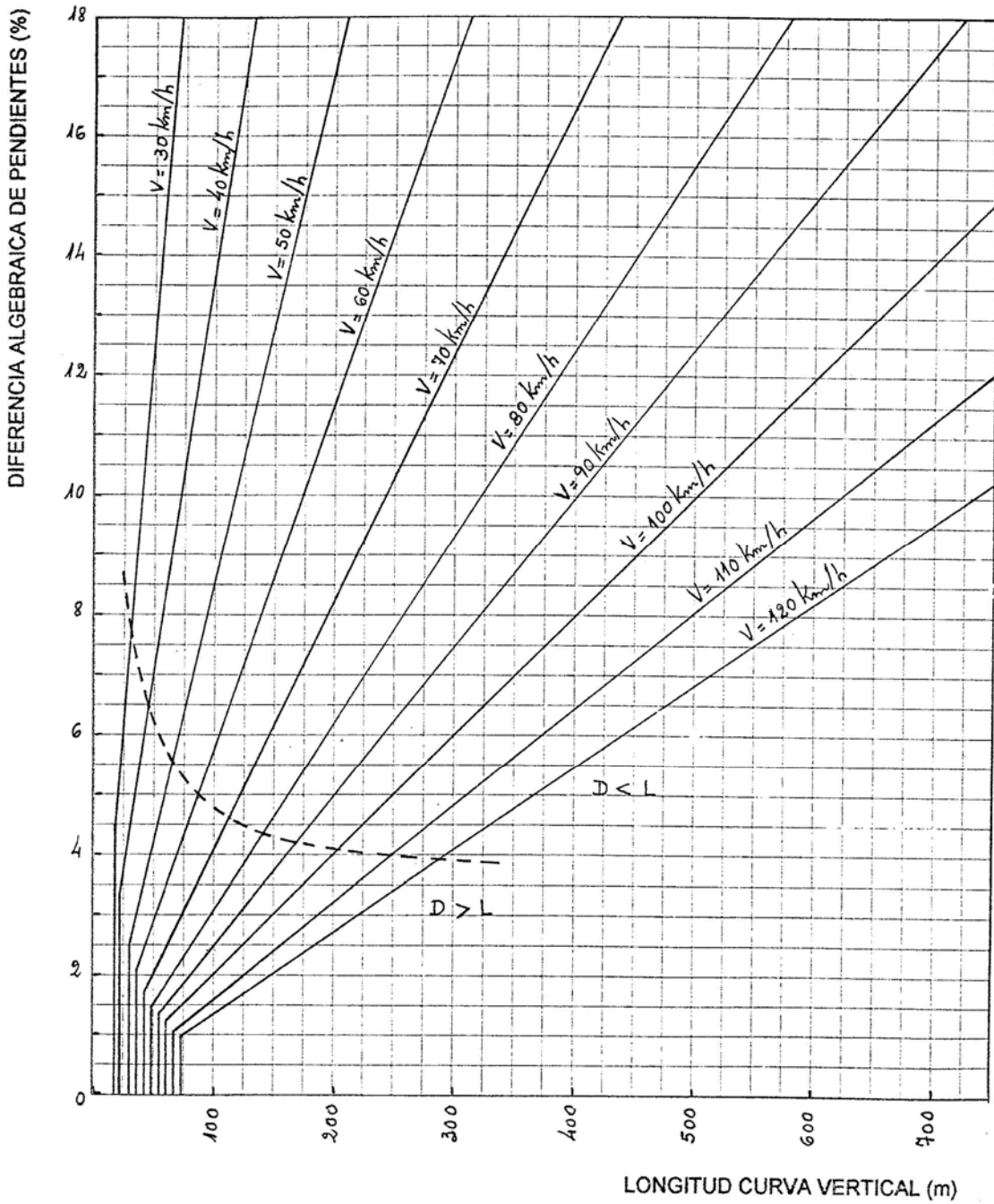
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE FRENADO, LÍMITE SUPERIOR

- V velocidad de diseño, en km/h
- h3 altura de los faros del vehículo 0,60 metros
- io diferencia algebraica de pendientes, en %
- D distancia de visibilidad de frenado, en m
- α ángulo de divergencia del haz luminoso 1°
- L longitud mínima de curva, en m

Fórmulas: $D > L \quad L = 2D - \frac{200 h_3 + 200 D \operatorname{tg} 1^\circ}{i_o} = 2D - \frac{120 + 3,5 D}{i_o}$

$D < L \quad L = \frac{i_o D^2}{200 h_3 + 200 D \operatorname{tg} 1^\circ} = \frac{i_o D^2}{120 + 3,5 D}$

$L = 0,6 V$

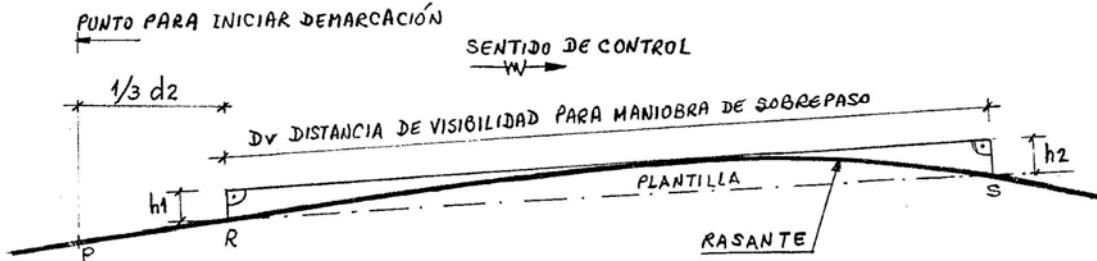


3.7.- Control de la distancia de visibilidad de sobrepaso

El alineamiento vertical se diseña en su totalidad para visibilidad de frenado, y en aquellas zonas en que el relieve del terreno lo permite, para visibilidad de sobrepaso.

Debe por lo tanto verificarse la visibilidad de sobrepaso sobre la totalidad del tramo, y delimitarse las zonas que no permiten esta maniobra a fin de proyectar la señalización correspondiente, o proceder en caso de necesidad a un rediseño de la rasante para lograr una mayor visibilidad.

El control de la distancia de visibilidad se realiza mediante una plantilla de material transparente, de una longitud igual a la distancia de visibilidad de sobrepaso para la correspondiente velocidad de diseño, y con las alturas $h_1 = 1,07$ metros y $h_2 = 1,30$ metros marcadas en cada extremo.



VERIFICACIÓN GRÁFICA DE LA DISTANCIA DE VISIBILIDAD PARA SOBREPASO

La plantilla se desliza con los puntos R y S sobre la rasante y se limita la zona donde la cresta de la curva vertical corta la línea teórica de la visual. La plantilla se debe deslizar primero en un sentido de circulación, y luego en sentido contrario verificando el otro carril.

En caso de presentarse una restricción al sobrepaso la demarcación horizontal debe iniciarse en el punto P, ubicado a una distancia $\frac{1}{3} d_2$ antes de R.

4.- NORMAS GENERALES PARA EL DISEÑO DEL ALINEAMIENTO VERTICAL

Además de las normas específicas para el diseño de alineamientos verticales desarrolladas en los títulos anteriores, pueden realizarse las siguientes recomendaciones que, si bien no responden a formulaciones de orden teórico ni empírico, contribuyen al logro de una rasante con absolutas condiciones de seguridad y excelente aspecto estético.

- Debe procurarse proyectar alineamientos rectos de longitud apreciable con reducidas diferencias de pendientes en sus quiebres, de manera de lograr una rasante suave y de agradable continuidad, y no un alineamiento vertical integrado por numerosos quiebres con reducidas longitudes entre ellos, enlazados mediante curvas de longitudes también mínimas.
- En zonas relativamente llanas debe evitarse que los cruces de depresiones pronunciadas de corta longitud se realicen con rasantes muy pegadas al terreno natural ya que, además de presentar pobres apariencias estéticas, pueden provocar efectos de riesgo en las maniobras de sobrepaso al ocultar parcialmente los vehículos que circulan por la zona baja. Estas condiciones deben evitarse aún a costa de grandes desmontes y terraplenes.
- Un alineamiento con suaves pendientes sucesivas ascendentes y descendentes favorece la circulación, en especial de los vehículos pesados. No obstante estas condiciones pueden incitar a los conductores de estos vehículos a circular a excesivas velocidades con los riesgos consecuentes.
- Debe evitarse en lo posible el diseño de dos curvas verticales consecutivas con curvatura del mismo sentido separadas por una reducida longitud de alineamiento recto, ya

que presentan efectos estéticos poco agradables, en especial si son curvas cóncavas visibles en forma conjunta.

- Sobre largas pendientes pronunciadas es preferible, en lugar de un único alineamiento recto, diseñar varios alineamientos con pendientes variadas. Este criterio tiene particular aplicación en carreteras de baja categoría.
- Cuando las intersecciones a nivel se presentan en secciones de carretera con moderadas a fuertes pendientes, es conveniente reducir tales pendientes en el área de la intersección.
- En aquellos tramos con fuertes pendientes que puedan afectar la capacidad de la calzada, deben diseñarse carriles adicionales para vehículos comerciales.

5.- COORDINACIÓN DE LOS ALINEAMIENTOS PLANIMÉTRICO Y ALTIMÉTRICO

Evidentemente, los alineamientos planimétrico y altimétrico no pueden proyectarse en forma independiente, ya que una mala combinación de dos elementos correctamente diseñados en forma individual puede provocar una deficiente integración espacial de la carretera.

La coordinación espacial de los alineamientos debe realizarse en la etapa de la localización del trazado, ya que una vez definida la traza son escasos el número y rango de los parámetros de diseño que permiten lograr una buena combinación integral de los mismos.

Los requerimientos que controlan el diseño de una carretera responden al siguiente detalle:

- Categoría de la carretera, definida por el tránsito que deberá soportar.
- Condiciones topográficas, geológicas e hidrológicas de la región.
- Uso actual y futuro de la tierra.
- Condiciones actuales de las vías de comunicación existentes.
- Ubicación de los puntos terminales del tramo.

Puede obtenerse una adecuada combinación espacial de los alineamientos planimétrico y altimétrico tomando en cuenta, además de todos los controles específicos detallados anteriormente, los siguientes requerimientos:

- Los alineamientos planimétrico y altimétrico deben estar correctamente balanceados. Un suave desarrollo planimétrico en coincidencia con fuertes pendientes longitudinales o, por el contrario, un alineamiento planimétrico fuertemente quebrado en zonas con suaves pendientes, provocan efectos estéticos poco agradables.
- Una adecuada combinación espacial de curvas verticales y horizontales puede provocar agradables efectos visuales. Por el contrario, sucesivos cambios de pendientes sobre alineamientos horizontales rectos dan como resultado una serie de gibas visibles desde grandes distancias.
- No debe diseñarse una curva vertical convexa de gran longitud en coincidencia con una curva horizontal de pequeño radio. Esta condición puede presentar problemas ya que el conductor suele no percibir con claridad el cambio en el alineamiento horizontal, en especial en circulación nocturna.

En consecuencia, debe tratarse que en todos los casos la curva más visible sea la horizontal. Esto puede lograrse aumentando el radio de la curva horizontal, o bien usando longitudes de curva vertical muy por encima de los valores mínimos normalizados.

- Tampoco deben diseñarse curvas horizontales de reducidos radios en coincidencia con curvas verticales cóncavas. En estas circunstancias, cualquier curvatura horizontal pronunciada produce visuales distorsionadas de la carretera que resultan desagradables.
- Deben evitarse curvas horizontales de radios reducidos en zonas terminales de fuertes pendientes, ya que en estos puntos las velocidades de los vehículos, en especial de los pesados, son excesivas pudiéndose crear situaciones de riesgo.
- En carreteras de dos carriles bidireccionales deben adoptarse los recaudos necesarios para asegurar frecuentes secciones en las que se puedan realizar maniobras de sobrepaso.
- En zonas de intersecciones de debe tratar en lo posible de lograr suaves curvaturas, tanto en el alineamiento altimétrico como en el planimétrico, a fin de asegurar favorables condiciones de visibilidad y circulación.

BIBLIOGRAFÍA

- ALINEAMIENTO VIAL ALTIMÉTRICO
Ing. Guillermo Antonio Comero - Facultad de Cs. Exactas e Ingeniería - U.N.R. - 1978.
- A POLICY ON GEOMETRIC DESIGN OF HIGHWAYS AND STREETS
American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO 1994.
- A POLICY ON GEOMETRIC DESIGN OF RURAL HIGHWAYS
American Association of State Highway Officials - AASHO 1965.
- HIGHWAY CAPACITY MANUAL
Transportation Research Board - Versión Española - 1995.
- TRAZADO Y DISEÑO GEOMÉTRICO DE CAMINOS RURALES
Ing. Francisco J. Sierra - Escuela de Graduados Ingeniería de Caminos - U.B.A. - 1986.
- PENDIENTES MÁXIMAS EN CARRETERAS
Ing. Guillermo Antonio Comero - VIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito - 1977.
- ESTUDIO DE SEGURIDAD DE TRÁNSITO. NORMAS DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CARRETERAS. TOMOS I Y II.
Dirección Nacional de Vialidad - 1980.
- NORMAS DE DISEÑO GEOMÉTRICO DE CAMINOS RURALES
Ing. Federico G. O. Rühle - Dirección Nacional de Vialidad - 1967.
- CARRETERAS: ESTUDIO Y PROYECTO
Ing. Jacob Carciente - Editorial Vega S.R.L - Venezuela - 1980.
- COSTRUZIONE DI STRADE, FERROVIE ED AEROPORTI - TOMO I
Ing. Giuseppe Tesoriere - Ed. G. Denaro - 1961.

ÍNDICE

| | | |
|-----------|--|----|
| 1.- | CONSIDERACIONES GENERALES | 1 |
| 2.- | PENDIENTES MÁXIMAS EN CARRETERAS | 1 |
| 2.1.- | Conceptos generales | 1 |
| 2.2.- | Fricción en el sistema neumático-caizada | 1 |
| 2.3.- | Tracción automotora | 3 |
| 2.3.1.- | Características operacionales de los vehículos | 3 |
| 2.3.2.- | Relación Peso/Potencia | 4 |
| 2.3.3.- | Características operacionales de los vehículos en pendientes | 5 |
| 2.3.4.- | Criterios de diseño de pendientes límites | 11 |
| 2.3.5.- | Reducción de potencia debido a altitud y temperatura | 14 |
| 3.- | CURVAS VERTICALES | 14 |
| 3.1.- | Generalidades | 14 |
| 3.2.- | Teoría de la curva vertical parabólica | 15 |
| 3.3.- | Curvas verticales convexas | 17 |
| 3.3.1.- | Conceptos generales | 17 |
| 3.3.2.- | Requerimientos de la seguridad vial | 17 |
| 3.3.2.1.- | Visibilidad de frenado | 19 |
| 3.3.2.2.- | Visibilidad de sobrepaso | 20 |
| 3.3.3.- | Requerimientos del confort en la circulación | 21 |
| 3.3.4.- | Requerimientos de la apariencia estética de la carretera | 21 |
| 3.4.- | Curvas verticales cóncavas | 22 |
| 3.4.1.- | Conceptos generales | 22 |
| 3.4.2.- | Requerimientos de la seguridad vial | 22 |
| 3.4.3.- | Requerimientos del confort en la circulación | 23 |
| 3.4.4.- | Requerimientos de la apariencia estética de la carretera | 23 |
| 3.5.- | Quiebres mínimos de alineamientos rectos que no requieren curvas | 23 |
| 3.6.- | Gráficos | 23 |
| 3.7.- | Control de la distancia de visibilidad de sobrepaso | 29 |
| 4.- | NORMAS GENERALES PARA DISEÑO DEL ALINEAMIENTO VERTICAL | 29 |
| 5.- | COORDINACIÓN DE ALINEAMIENTOS PLANIMÉTRICO Y ALTIMÉTRICO | 30 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 32 |
| | ÍNDICE | 33 |