



**XVII CONGRESO ARGENTINO
DE VIALIDAD Y TRÁNSITO**

Trabajo Técnico: **VELOCIDADES DIRECTRIZ INFERIDA Y MÁXIMA SEGURA CRÍTICA**

Área Temática **Seguridad Vial**

Autores **Francisco Justo Sierra - Ingeniero Civil UBA**

Avenida Centenario 1825 9A
(1643) BECCAR – Buenos Aires
(011) 47471829
franjustierra@yahoo.com



Alejandra Débora Fissore – Ingeniera Civil UNSa

Florida 141 1º A
(4400) SALTA – Capital
(0387) 4319246
alejandra.fissore@gmail.com



ÍNDICE

RESUMEN

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEO GENERAL DE CUATRO MONOGRAFÍAS

1.2 VELOCIDAD DIRECTRIZ INFERIDA Y MÁXIMA SEGURA CRÍTICA: GENERALIDADES

2 SEGURIDAD NOMINAL Y SUSTANTIVA – CRITERIOS DE SEGURIDAD DE LAMM

3 VELOCIDAD DIRECTRIZ INFERIDA – VDI

4 VELOCIDAD MÁXIMA SEGURA CRÍTICA – VMSC

5 DETERMINACIÓN DE LA VDI Y DE LA VMSC

5.1 MÉTODOS GRÁFICOS – TABLAS Y GRÁFICOS

5.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

6 COMENTARIOS

7 PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

RESUMEN - 20027-RES

La velocidad directriz guía el diseño de elementos de los alineamientos horizontal y vertical según los principios físicos de equilibrio dinámico de un vehículo en movimiento curvo, y distancia visual de detención en curvas verticales, según modelos matemáticos racionales cuyos coeficientes se ajustan según resultados y observaciones de experiencias de campo que los investigadores realizan con actualizadas herramientas de medición de velocidad, desaceleración, distancia de frenado, fricción neumático-calzada, peralte, inclinación lateral del vehículo, medidas con riguroso control.

Para una dada velocidad directriz, teniendo en cuenta adecuados coeficientes de seguridad, en curvas horizontales, teóricamente el equilibrio dinámico se alcanza para una amplia gama de combinaciones de valores prácticos de radios, peraltes y fricciones.

Para analizar en profundidad las variables Velocidad, Radio, Peralte, Fricción Transversal y Longitud de transición, y para entender mejor cómo se relacionan, se plantearon cuatro monografías conexas y complementarias:

1) Velocidades y equilibrio dinámico en curvas

2) Distribución del peralte y fricción transversal

3) VELOCIDAD DIRECTRIZ INFERIDA Y MÁXIMA SEGURA CRÍTICA

4) Transición del peralte – Hidroplaneo

La primera trata los aspectos más generales del problema; definiciones, planteo físico y condiciones límites de velocidad, peralte, fricción transversal y radio.

La segunda analiza las situaciones intermedias; dada una determinada velocidad, un peralte máximo y una relación fricción transversal-velocidad, cómo distribuir el peralte para radios mayores al mínimo y cuál es la distribución resultante de la fricción transversal.

La tercera analiza el proceso inverso; para una curva con un determinado radio y peralte cuál es la velocidad directriz inferida (fricción lateral s/norma) y la velocidad máxima segura crítica (fricción lateral máxima)

La cuarta trata la transición del peralte y su efecto sobre la seguridad vial en relación con la posibilidad de hidroplaneo.

Se consideraron normas argentinas DNV 67/80 y ANDG 10 (no en vigor) y extranjeras AASHTO (EUA), 3.1 – IC Trazado (España) entre otras.

VELOCIDADES DIRECTRIZ INFERIDA Y MÁXIMA SEGURA CRÍTICA

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEO GENERAL DE CUATRO MONOGRAFÍAS

Las velocidades directrices guían los diseños de elementos de los alineamientos horizontal y vertical según los principios físicos de equilibrio dinámico de un vehículo en movimiento curvo, y distancias visuales de detención en las curvas verticales, según modelos matemáticos racionales cuyos coeficientes se ajustan según los resultados y observaciones de experiencias de campo que los investigadores realizan con actualizadas herramientas de medición de velocidad, desaceleraciones, distancias de frenado, fricciones neumático-calzada, peraltes, inclinaciones laterales del vehículo en medidas con riguroso control.

Además de los factores humanos de expectativas, reflejos, tiempos de reacción, género, edad, carácter y temperamento, educación, y clasificación funcional de los caminos, en función de la VD seleccionada el proyectista dimensiona y coordina los elementos curvos horizontales y verticales del camino teniendo siempre en consideración los previstos comportamiento de los conductores, y la eliminación de combinaciones que puedan violar sus expectativas. El proyectista debe comprender y adecuarse al sentir de los conductores; no debe pretender imponerles un comportamiento que violente, que sea contrario, a aquel que los conductores naturalmente tendrían en los diferentes escenarios del camino.

Para una dada velocidad directriz, teniendo en cuenta adecuados coeficientes de seguridad, en curvas horizontales, teóricamente el equilibrio dinámico se alcanza para una amplia gama de combinaciones de valores prácticos de radios, peraltes y fricciones.

Para analizar en profundidad las variables Velocidad, Radio, Peralte, Fricción Transversal y Longitud de transición, y para entender mejor cómo se relacionan, se plantearon cuatro monografías conexas y complementarias:

- 1) Velocidades y equilibrio dinámico en curvas
- 2) Distribución del peralte y fricción transversal

3) VELOCIDAD DIRECTRIZ INFERIDA Y MÁXIMA SEGURA CRÍTICA

- 4) Transición del peralte – Hidroplaneo

La primera trata los aspectos más generales del tema; definiciones, planteo físico y condiciones límites de velocidad, peralte, fricción transversal y radio.

La segunda analiza las situaciones intermedias; dada una determinada velocidad, un peralte máximo y una relación fricción transversal-velocidad, cómo distribuir el peralte para radios mayores al mínimo y cuál es la distribución resultante de la fricción transversal.

La tercera, que aquí se desarrolla, analiza el proceso inverso; para una curva con un determinado radio y peralte cuál es la velocidad directriz inferida (fricción lateral $s/norma$) y la velocidad máxima segura crítica (fricción lateral máxima)

La cuarta trata la transición del peralte y su efecto sobre la seguridad vial en relación con la posibilidad de hidroplaneo.

1.2 VELOCIDAD DIRECTRIZ INFERIDA Y MÁXIMA SEGURA CRÍTICA: GENERALIDADES

Los alineamientos horizontales (y verticales) se diseñan para una **velocidad directriz designada** (seleccionada) de acuerdo con las normas de diseño geométrico correspondientes, como se desarrolló en las dos primeras monografías de esta serie de cuatro.

El proceso inverso es tratar de inferir cuál fue la *velocidad directriz seleccionada* del proyecto geométrico de un camino existente, de cuyas curvas se conocen R y e por medición, y la norma de aplicación. Entonces, tal velocidad recibe el nombre de **velocidad directriz inferida**, VDI, que por definición, en un buen diseño debería ser igual a la VD designada (supuesta desconocida de otra forma).

Entre otras aplicaciones, se necesita conocer VDI para tareas de planeamiento, reconstrucciones, mejoramientos, y es dato esencial para las inspecciones o auditorías de Ingeniería de Seguridad Vial en cuanto al nivel de la **coherencia de diseño** de los alineamientos, y calificación mediante los criterios de seguridad, por caso los tres de Lamm.

Un concepto distinto de la *velocidad directriz* (designada o inferida) es la **velocidad máxima segura crítica o límite, VMSC**, inferida a partir de los valores R y e medidos, para la **fricción lateral máxima**, correspondiente a la velocidad buscada

2 SEGURIDAD NOMINAL Y SUSTANTIVA – CRITERIOS DE SEGURIDAD DE LAMM

Los elementos de diseño incoherentes con las expectativas del conductor incrementan el tiempo de procesamiento, y la sobrecarga de trabajo mental. Lógicamente, hay una relación inherente entre la coherencia de diseño y la seguridad del usuario, con la “coherencia” asociada con el potencial de menos choques.

Con razonable criterio, si las normas de diseño geométrico de aplicación responden a los más modernos criterios de seguridad vial, está bien suponer que el camino será **más** seguro que otro que no las cumpla. Así, la seguridad nominal estaría a la par de la seguridad sustantiva, medida por los resultados comprobados de choques, muertos, heridos y daños materiales.

En las curvas simples y sucesivas, nominalmente seguras respecto del equilibrio dinámico, pueden no serlo si violan las expectativas de los conductores (factor humano). Lamm relacionó el equilibrio dinámico en curva con el factor humano y los datos de los choques, vuelcos y víctimas y estableció criterios de calificación del proyecto de las curvas horizontales, BUENO, REGULAR, MALO, basados en las variaciones o saltos de velocidad, curvatura y fricción lateral.

Los saltos de velocidad para aplicar los criterios deben ser para velocidades que respondan a los mismos conceptos básicos de distribuir el peralte, y no comparar velocidades directrices inferidas VDI, con velocidad máxima segura crítica VMSC, <http://goo.gl/Mkioyv>

3 VELOCIDAD DIRECTRIZ INFERIDA – VDI

Teórica y conceptualmente la inferencia de la **velocidad directriz inferida**, VDI, puede hacerse a partir de los elementos geométricos resultantes del equilibrio dinámico (R, e, ft) o visibilidad (R, M, fl) en las curvas horizontales; y por visibilidad en las curvas verticales convexas (L, K, fl, h1, h2). En la práctica sólo se considera el equilibrio dinámico. En la vialidad argentina, la VDI suele llamarse *velocidad máxima segura deseable*, VMSD.

Para inferir la velocidad directriz de un camino existente a partir del alineamiento horizontal, mediante relevamiento u otras fuentes se conocen las dimensiones físicas de los elementos fijos: radio y peralte de las curvas. Dado que existen varios métodos para calcular el peralte en relación con su valor, transición y distribución, es necesario conocer su norma de aplicación. Por ejemplo, conocer en la Argentina los métodos de distribuir los peraltes indicados en las normas DNV'67/80 y su actualización ANDG 10, y la variación de la fricción transversal en función de la velocidad.

La velocidad se supone constante, y la fuerza reactiva de fricción lateral y longitudinal varía desde cero a máximos positivos o negativos, sobrepasado los cuales se produce el deslizamiento del vehículo. La separación de la fricción en sus componentes longitudinal (tangencial) y lateral (transversal) es un elemental artificio de cálculo que el proyectista debe considerar, dado que la variación de una componente significa la variación de la otra; por ejemplo, la distancia de detención no es igual en recta (fricción lateral nula) que en curva, donde la fricción longitudinal disminuye por la aparición de la componente lateral. Las fuerzas de fricción crecen con el peso del vehículo y disminuyen con la velocidad, y dependen de las condiciones superficiales de calzada y neumáticos. En lugar de fuerzas se consideran aceleraciones y desaceleraciones.

Los proyectistas viales usan una velocidad directriz designada para establecer las características del diseño; los operadores establecen límites de velocidad considerados seguros para el tipo particular de camino que no superen a la velocidad directriz, pero los conductores seleccionan su velocidad de operación según su percepción individual de la seguridad. Con bastante frecuencia, éstas velocidades no son compatibles y sus valores relativos entre sí pueden variar. Según la FHWA, <http://goo.gl/GwPbXU>, la velocidad directriz inferida, VDI, se define como la máxima velocidad para la cual se cumplen todos los criterios relacionados con la velocidad directriz en un lugar en particular. Para un dado un dado conjunto de características viales, es la velocidad directriz que uno puede inferir como que cumple la sección.

En el **Libro Verde** del 2001, AASHTO revisó la definición de la velocidad directriz como velocidad máxima segura para recorrer un camino por la siguiente: *velocidad seleccionada para determinar varias características del diseño geométrico vial*, sin relacionarla con el límite de velocidad señalizado. La aptitud para predecir exactamente las velocidades en todos los tipos de calles y caminos no existe, y durante el proceso de diseño geométrico no hay ninguna guía confiable sobre cómo alcanzar características específicas de la velocidad de operación (p.e., velocidad media, del 85º percentil, desviación) y relaciones de velocidades (p.e., entre las velocidades directrices y las de operación del 85º percentil). Las velocidades previstas de operación y límites señalizados deben considerarse al seleccionar la velocidad directriz, pero no hay ninguna regulación que establezca una relación más directa.

Según el Informe NCHRP 504, <https://goo.gl/Cvxig8>, aunque puede definirse una relación entre la velocidad de operación y el límite de velocidad señalado, con igual confianza no puede hacerse lo mismo con la velocidad directriz y cualquier velocidad de operación o límite de velocidad señalado. Se halló también que hay una gran variación en la velocidad de operación para una dada VDI en los caminos rurales de dos-carriles, CR2C, y que cuando el límite señalado supera la velocidad directriz (Por ejemplo, RN9 General Paz – Rosario, RN8 Ramal Pilar - Argentina) pueden surgir problemas de responsabilidad civil, aunque los conductores puedan exceder con seguridad la velocidad directriz.

Para una dada velocidad directriz, teniendo en cuenta adecuados coeficientes de seguridad, teóricamente el equilibrio dinámico se alcanza para una muy amplia gama de combinaciones de valores prácticos de radios, peraltes y fricciones (infinita), pero los accidentes frontales o por salida desde la calzada ocurren más para los radios menores aunque cumplan las condiciones del equilibrio dinámico.

Distinto del ferrocarril donde el vehículo es guiado por las vías, por influencia del factor humano en los caminos el **equilibrio dinámico no garantiza la seguridad del movimiento y el buen comportamiento de los conductores.**

Para diseñar las curvas horizontales hay diversos métodos para combinar las fricciones y peraltes. Mayoritariamente para caminos rurales se adopta una combinación tal que a la velocidad de operación elegida por la mayoría de los conductores la fricción lateral sea nula, lo que resultaría en mayor comodidad y seguridad del movimiento porque se supone que al elegirla los conductores tienen bien presente su seguridad y comodidad. Tal velocidad suele ser la velocidad media de marcha $VMM = VO50$ (velocidad de operación del 50º percentil) en flujo libre, o mejor, la velocidad de operación del 85º percentil $VO85$ de los vehículos en condiciones convenidas de flujo libre, sólo automóviles, calzada húmeda, buenas condiciones climáticas e iluminación.

Por razones prácticas el peralte se limita a determinados valores según el tipo de camino y zona rural o urbana, y clima (frío, calor, seco, lluvioso, congelamiento superficie calzada).

En la distribución del peralte de diseño, adoptando como velocidad de operación la elegida por el x° percentil de los conductores, para fricción lateral nula, fijada una de las otras dos variables se determina la tercera.

El radio mínimo deseable es el correspondiente a la condición de peralte máximo (emáx), fricción lateral nula ($f_l=0$) y velocidad media de marcha ($VMM=VO50$), o de operación ($VO85$), u otra, deducida estadísticamente a partir de la velocidad directriz VD , según la norma que se trate.

En el otro extremo, para radios decrecientes o curvatura creciente, para velocidad directriz, fricción lateral máxima admisible y peralte máximo está la condición crítica para **casos extremos**, como dice Rühle; se alcanza entonces el radio mínimo absoluto para la VD seleccionada. Sería algo así como la condición de tensión de rotura de una viga, que en algún **caso excepcional** el proyectista vial podría verse obligado a adoptar; por ejemplo, en virtud de restricciones topográficas / presupuestarias, previa 'excepción de diseño' aprobada.

Siguiendo las recomendaciones del **Método 5 de AASHTO de distribución del peralte**, las normas DNV67 de Rühle (no actualizadas en la versión DNV80) recomiendan distribuir el peralte para que a la velocidad media de marcha ($VO50$) la fricción lateral sea nula.

Condición ideal que no se cumple en gran parte del rango práctico de radios; en efecto, al pretender una discutible *transición gradual* en el diagrama peralte y radio (o curvatura $1/R$ rad/m) para una dada VD, entre el enfoque cómodo y seguro y el caso extremo, en ambas normas se adoptaron distribuciones curvilíneas, tales que según cual sea el peralte máximo adoptado, para un determinado radio e igual velocidad directriz resultan peraltes diferentes (Ver Monografía 2 Distribución del Peralte y Fricción Transversal).

Para un determinado radio, para peraltes máximos de 6, 8 y 10% (Tablas 3, 4 y 5 DNV67 se obtienen tres peraltes diferentes), como consecuencia de la transición hacia la condición crítica, condición que algunos proyectistas creen que tienen iguales condiciones de seguridad en todo el rango de radios; obviando tener en cuenta que a igualdad de equilibrio dinámico, por influencia del factor humano los accidentes en curva aumentan en frecuencia y gravedad al disminuir el radio, según se grafica:

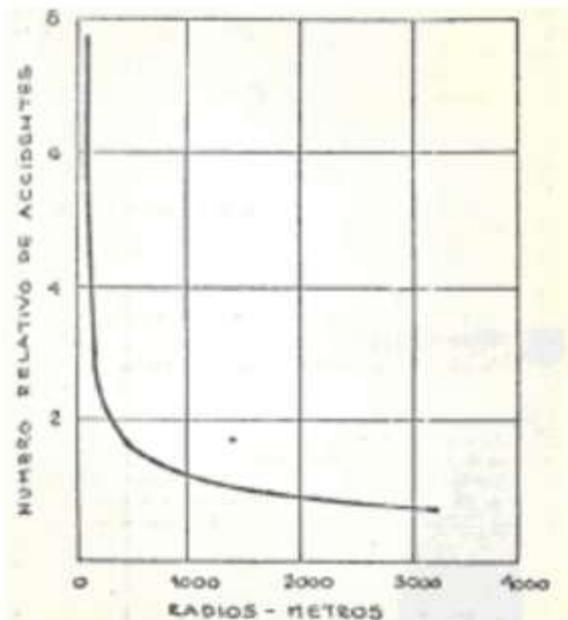


Gráfico III

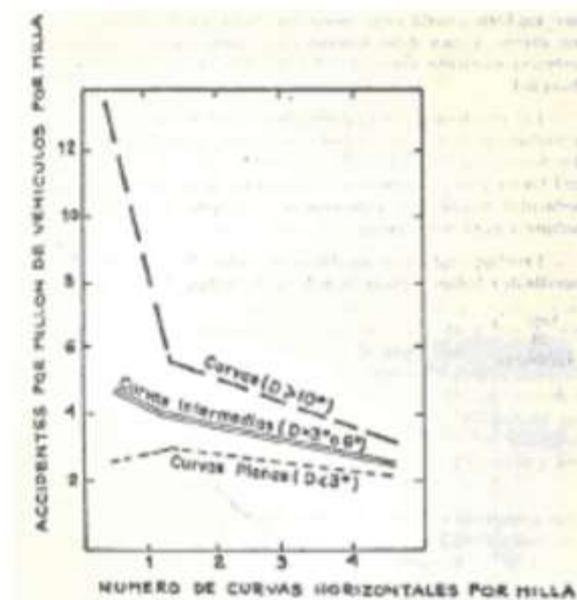


Gráfico IV

La peor situación ocurre con los proyectistas que usan sistemáticamente la condición crítica para diseñar sus curvas, por una pretendida razón de economía de movimiento de suelos; criticable proceder típico de quienes no tienen en cuenta los costos de los accidentes.

En la ANDG 10 se limitan los radios al mínimo deseable con la condición de velocidad media de marcha y fricción nula.

Como dato extremo se indica el rango entre los radios mínimos absolutos (peralte máximo y fricción máxima) para excepcionales extremos, y los radios mínimos deseables (peralte máximo, fricción nula y la VO50 correspondiente según correlaciones estadísticas a la VD del proyecto.

Cuando se disponga de datos fidedignos, en la ANDG 10 se recomienda cambiar VO50 por la VO85, como es práctica común en los países con grandes bases de datos de registros de velocidades de operación en caminos de diferente clasificación funcional y velocidades directrices, lo que les permite establecer correlaciones y modelos matemáticos, válidos para los caminos de las zonas desde donde provinieron los datos.

El Método 5 de transición del peralte de AASHTO, en combinación con el uso de múltiples tasas máximas de distribución del peralte, no promueve la coherencia de diseño. El Método 5 puede dar diferentes valores de peralte para la misma velocidad y radio, según la elección del proyectista del peralte práctico máximo.

Se usa en caminos rurales de alta velocidad; se enfatiza que la fricción lateral máxima se usa solamente en las curvas muy cerradas. Se pone énfasis en que el peralte intenta favorecer la tendencia de algunos conductores de viajar a o cerca de la velocidad directriz a lo largo de curvas de radios intermedios. Provee suficiente peralte para contrarrestar la mayor parte de la fuerza centrífuga experimentada por los conductores en curvas de intermedias a abiertas.

La mayoría de los estados en USA usan el Método 5; la excepción es California, cuyo departamento de transporte (DOT) provee una tabla que incluye todos sus valores máximos de peralte (8, 10 y 12%). Las relaciones R-e siguen aproximadamente los provistos en el **Libro Verde** para $e_{\text{máx}} = 12\%$ para una velocidad de 80 km/h. Es decir, generalmente California provee menos peralte que el que podría ser recomendado por el **Libro Verde** para velocidades de diseño mayores que 80 km/h.

Un gran inconveniente del Método 5 de distribución del peralte según el **Libro Verde**: su uso puede llevar a incoherencias de diseño. Esta violación de la coherencia surge de la disponibilidad de distribuciones de peralte significativamente diferentes para el mismo radio de curva. La violación ocurre cuando se usan peraltes prácticos máximos diferentes en caminos próximos. Los conductores que viajan entre estos caminos encuentran peraltes diferentes (correspondientes a demandas de fricción lateral) para curvas de radio similar.

Se cree que el propósito original del Método 5 fue que en todos los caminos rurales de alta velocidad dentro de una región de clima y topografía similares debería usarse un valor máximo de peralte. Mediante esta aplicación, un conductor aprendería a esperar el mismo peralte y demanda de fricción lateral cuando al conducir sobre una curva de radio dado, independientemente de la región en que se encuentra.

La práctica actual no es totalmente coherente con el percibido propósito del Método 5. En particular, los departamentos de transporte (DOT) estatales de muchos estados vecinos tendieron a diferenciarse en su adopción de adecuados peraltes máximos. Se identificó la magnitud de esta diversidad entre los peraltes máximos usados por varios estados. Se halló que mientras Illinois e Indiana tenían un peralte máximo de 8%, el estado inmediato al sudeste, Kentucky, tenía un peralte máximo de 10%. También se halló que los estados de California y Texas tenían peraltes máximos de 8 a 12%. Se observó que el uso de peraltes máximos diferentes conduce a una situación donde una combinación radio-peralte puede tener cualquier número de velocidades directrices posibles.

El actual uso de múltiples peraltes máximos da indirectamente a los ingenieros proyectistas con un rango aceptable de peraltes permitiéndoles considerar varias tablas. Aunque la provisión de un rango tiene beneficios obvios en términos de flexibilidad de diseño, una consecuencia de esta provisión es **menor coherencia de diseño** (mayor violación de las expectativas de los conductores con la consecuente menor seguridad).

4 VELOCIDAD MÁXIMA SEGURA CRÍTICA – VMSC

Un concepto distinto de la *velocidad directriz* (designada o inferida) es la **velocidad máxima segura crítica o límite, VMSC**, inferida a partir de los valores R y e medidos, para la **fricción lateral máxima**, correspondiente a la velocidad buscada; es decir:

$$VMSC = \sqrt{127R (e + f_{\text{máx}}(VMSC))}$$

Se resuelve iterativamente porque $f_{\text{máx}}$ es función de la VMSC buscada.

5 DETERMINACIÓN DE LA VDI Y DE LA VMSC

5.1 MÉTODOS GRÁFICOS – TABLAS Y GRÁFICOS

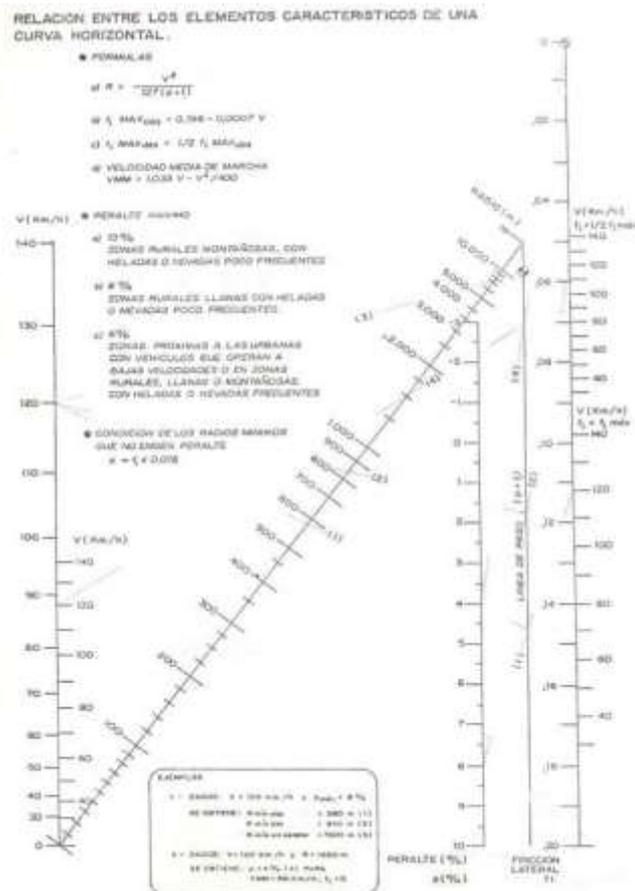
Si se dispone de las tablas o gráficos y los peraltes máximos prácticos según se trate de zona rural o urbana y frecuencia de nevadas o congelamiento de la calzada, con R y e medidos se entra en la tabla o gráfico para el emáx y se halla la columna (tabla) o línea (gráfico) donde cae la casilla (tabla) o punto (gráfico).

DNV 67/80 – Ejemplo determinación de VDI y VMSC

Datos: R = 1500 m; e = 4%

Velocidad directriz inferida. En el eje del nomograma N se une el punto Peralte = 4% con Fricción transversal húmeda $f_t = 0$. Se determina un punto en la línea de paso (eje derecho del nomograma N), el cual se une con el punto R = 1500 en el eje diagonal del nomograma N, y se prolonga hasta hallar $VMM = 98$ km/h, correspondiente a una **VDI = 120 km/h**.

Velocidad máxima segura crítica. Se halla por tanteos con ayuda de dos reglas transparentes que giren alrededor de los datos (R=1500 y e=4%) y se corten en la línea de paso. Comenzando poco a poco desde valores mayores que $V = 120$ km/h, la solución se obtiene en segundos cuando las prolongaciones corten a los ejes V y $f_t(V)$ en valores iguales. Para el ejemplo, $V = f_t(V) =$ **VMSC \approx 130 km/h**



Nomograma N – Velocidad, radio, peralte y fricción transversal – DNV67 - EGIC 1986

ANDG 10 – Ejemplos determinación de VDI y VMSC

Ejemplo 1.

Datos: $R = 800$; $e = 8\%$

Velocidad directriz inferida. En el eje del nomograma N se une el punto Peralte = 8% con Fricción transversal húmeda $ft = 0$ y se determina un punto en la línea de paso (eje derecho del nomograma N), el cual se une con el punto $R = 800$ en el eje diagonal del nomograma N, y se prolonga hasta hallar $VMM = 91$ km/h, correspondiente a una **VDI = 110 km/h.**

Velocidad máxima segura crítica. Se halla por tanteos con ayuda de dos reglas transparentes que giren alrededor de los datos ($R=800$ y $e=8\%$) y se corten en la línea de paso. Comenzando poco a poco desde valores mayores que 110 km/h, la solución se obtiene en segundos cuando las prolongaciones cortan a los ejes V y $ft(V)$ en valores iguales; en el ejemplo, $V = ft(V) = \mathbf{VMSC} \approx 127$ km/h

• Fórmulas:

$$a) R = \frac{V^2}{127(e+ft)}$$

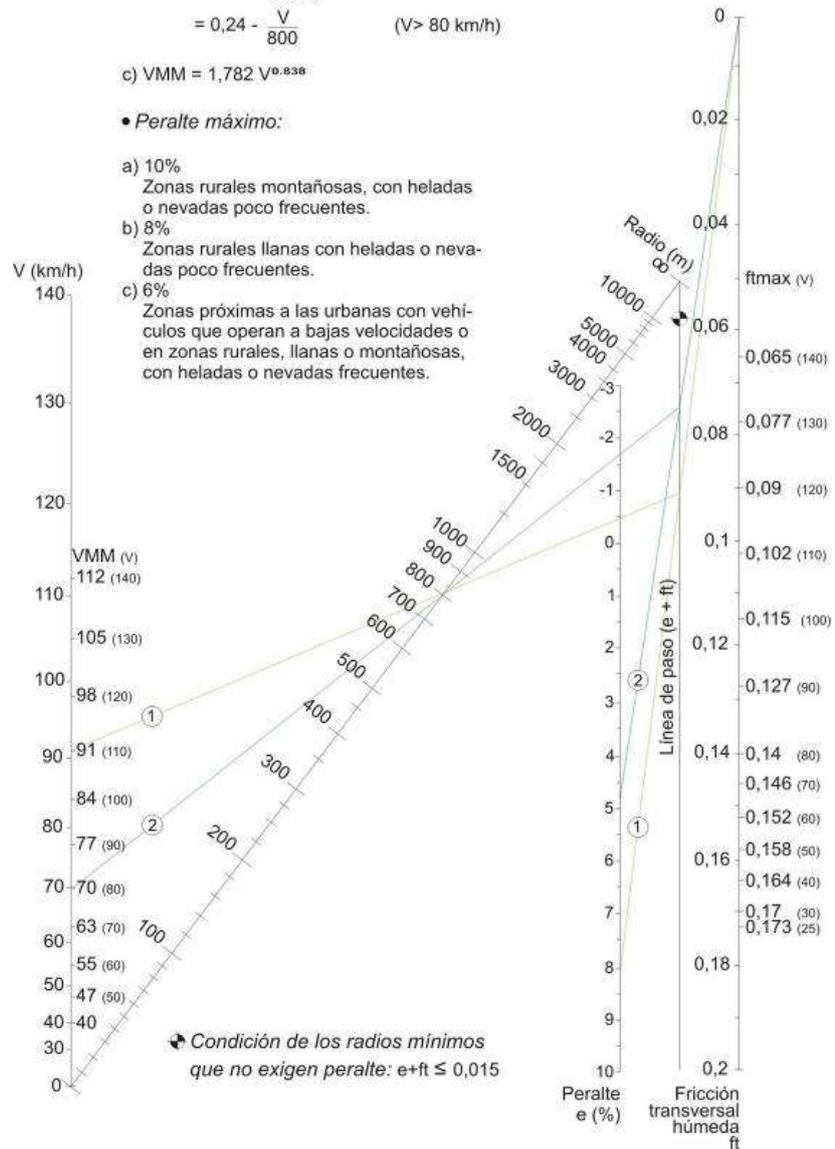
$$b) ft_{\max} = 0,188 - \frac{3V}{5000} \quad (V \leq 80 \text{ km/h})$$

$$= 0,24 - \frac{V}{800} \quad (V > 80 \text{ km/h})$$

$$c) VMM = 1,782 V^{0,838}$$

• Peralte máximo:

- 10%
Zonas rurales montañosas, con heladas o nevadas poco frecuentes.
- 8%
Zonas rurales llanas con heladas o nevadas poco frecuentes.
- 6%
Zonas próximas a las urbanas con vehículos que operan a bajas velocidades o en zonas rurales, llanas o montañosas, con heladas o nevadas frecuentes.



Nomograma N – Velocidad, radio, peralte y fricción transversal ANDG 10

<https://goo.gl/nSzOFe> - Nomograma página 3.25

Ejemplo 2.

Datos: $R = 800$; $e = 8\%$

Resulta $VMM = 77$ km/h, correspondiente a una **VDI = 90 km/h = VD**; y **VMSC ≈ 120 km/h**

5.2 MÉTODOS ANALÍTICOS

Para inferir la velocidad sea la velocidad directriz o la velocidad máxima segura crítica, teniendo como datos el Radio y el peralte, se utiliza la ecuación de equilibrio dinámico en curva, que es función de la fricción lateral, la que a su vez depende de la velocidad, que es la incógnita por hallar. Los modelos matemáticos representativos de la fricción lateral en función de V son funciones empíricas decrecientes de la velocidad: lineales (DNV 67/80), lineal + lineal (ANDG 10), logarítmica o lineal + logarítmica (AASHTO'04).

Si la relación entre ft y V es lineal la ecuación de inferencia resultante es de segundo grado, pero si es de grado superior o logarítmica la resolución analítica es compleja y se resuelve prácticamente por iteración (tanteo = prueba + error + ajuste).

En los ejemplos de la guía FHWA 2009 (<https://goo.gl/zLIPRT>) resulta extraño que la velocidad se infiera *agregando como dato la VD designada* (que se supone es desconocida). Los valores de ft se toman de los gráficos representativos, función lineal a partir de 40 mph = 64.4 km/h.

Por regresión se hallan las funciones empíricas de mejor ajuste de ft en función de V a partir de datos tabulados o graficados y se resuelven las ecuaciones de equilibrio dinámico con el comando ROOT de las calculadoras científicas o una planilla de cálculo.

Para las funciones mixtas como lineal + logarítmicas puede hallarse una función general f, V para hallar un valor de prueba de V, con una bifurcación según caiga en uno u otro rango de la función mixta, cada uno con su función; pero las diferencias resultantes son tan pequeñas por lo que puede desestimarse el reajuste.

DNV 67/80 – Determinación analítica y ejemplos de cálculo de VDI y VMSC

Ver Monografía 2 Distribución del Peralte y Fricción Transversal –
2.2 DISTRIBUCIÓN DEL PERALTE DNV 67/80

Los valores tabulados de Rühle con saltos Δe 1% e indeterminación de R3 y R1 resultan en una 'función' escalonada, con algunos puntos muy fuera de secuencia como por ejemplo 7% para V = 100 km/h y R = 700 m (Tabla N°4, 8%), en lugar de 6%.

INTAL. Por razones prácticas de programación y buen ajuste alrededor de V = 90 km/h, desde 1983 en la práctica vial argentina algunos proyectistas adoptaron la distribución entre f y e según la ecuación de las Normas Unificadas de los Países de Cono Sur (INTAL), más la variación lineal de $f_{\max} = 0.196 - 0.0007 V$ de DNV 67/80. Con ella puede inferirse la velocidad directriz (VDI) y la velocidad máxima crítica (VMSC) con el comando ROOT de la HP-48GX o resolviendo la ecuación de segundo grado para el emáx que corresponda, según la propuesta siguiente para emáx = 8%:

VDI2* = VMSC2

```
<
"VD Inferida km/h
emáx=8% Método 42 DNV67
MSGBOX "Rmetros? e%"
PROMPT → R e
< 1 1 e 8 / - J - R *
+ r
< .0889 r ≠ 50
140.208 r ≠ + J .0889 r
* - 2 / 0 RND "VDIkm/h"
→TAG
>
>
```

VMSC2

```
< "VMSCritica DNV67 "
MSGBOX "Rmetros? e%"
PROMPT 100 / → R e
< V 50 127 / R / V
.0007 * + e - 196 - 'V'
80 ROOT 0 RND "VMSCkm/h"
→TAG 'V' PURGE
>
>
```

$$R_{\text{mín}} = R \left[1 - \sqrt{1 - \frac{e}{e_{\text{máx}}}} \right] \text{ INTAL 1983}$$

$$f_{\text{máx}} = 0.196 - 0.0007 \times V, \text{ DNV 67/80}$$

$$R_{\text{mín}} = \frac{V^2}{127(e_{\text{máx}} + f_{\text{máx}})}$$

Se deduce para $e_{\text{máx}} = 8\%$

$$V = \text{VDI}2 = \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{[(0.0889 \cdot R_{\text{mín}})^2 + 140.208 \cdot R_{\text{mín}}]} - 0.0889 \cdot R_{\text{mín}} \right\}$$

Los coeficientes resultan de los siguientes cálculos:

$$127 = 3.6^2 \times 9.8$$

$$0.0889 = 127 \times 0.007$$

$$140.208 = 4 \times 35.052 = 4 \times [127 (0.08 + 0.196)]$$

Ejemplo 1.

Datos: $R = 2200$; $e = 2\%$; $e_{\text{máx}} = 8\%$

Resulta **VDI = 89 km/h** y **VMSC = 167 km/h**

Datos correspondientes a la chicana del km 459.5 de RN9 Rosario-Córdoba, en la localidad de Leones.

EICAM. El ingeniero civil Eduardo Rosendo Moreno, docente de los cursos de postgrado de la Escuela de Caminos de la Universidad Nacional de San Juan, halló que el R3 de mejor ajuste con las tablas de Rühle se obtiene adoptando la curvatura de R1 ($1/R1$) como promedio de las curvaturas de Rmín ($1/R_{\text{mín}}$) y R3 ($1/R3$). Resulta:

$$R3 = \frac{R1 \times R_{\text{mín}}}{(2 \times R_{\text{mín}} - R1)}$$

La cual sólo es válida si $2R_{\text{mín}} > R1$; caso contrario se adopta $1/R3 = 0$, y se considera la función de variación del peralte según el Método 5 de AASHTO. Resulta:

$$e = e_{\text{máx}} \times \left(\frac{R1}{R3} \right) \times \left[\frac{R3}{R} - \frac{R_{\text{mín}}}{2(R3 - R_{\text{mín}})} \times \left(\frac{R3}{R} - 1 \right)^2 \right]$$

ANDG 10 – Determinación analítica y ejemplos de cálculo de VDI y VMSC

Por ser prácticamente insensible en los resultados se omite la distinción de la expresión de la VMM en función de VD con corte en 40 km/h. Para todas se usa la expresión de $V > 40$ km/h. El cálculo es directo; con R, e y $f = 0$ se halla VMM según la ecuación de equilibrio dinámico, y se pasa de VMM a VDI según su relación empírica deducida por regresión de las tablas de AASHTO 04: $VMM = 1.782V^{0.83758}$

Resulta:

$$VDI = \left\{ \frac{\left[(127 \cdot R)^2 \right]^{1.1939}}{1.782} \right\}$$

VDI3 = VMSC3

VMSC3

```

«
"VD Inferida km/h
Método DNV10 =
* Método 4 AASHTO"
MSGBOX "Rmetros? e%?"
PROMPT 100 / → R e
« 127 R * e * √ 1.782
/ 1.19392 ^ & RND
"VDIkm/h" →TAG
»
»

```

```

« "VMSCritica DNV10 "
MSGBOX "Rmetros? e%?"
PROMPT 100 / → R e
« V 50 127 / R / V
.0009 * + e - .2059 -
"V" 80 ROOT 0 RND
"VMSCkm/h" →TAG 'V'
PURGE
»
»

```

El coeficiente 1.1939, resulta de: $1.1939 = \frac{1}{0.83758}$

Ejemplo 1.

Datos: R = 2200; e = 2%; emáx = 8%

Resulta **VDI = 87 km/h** y **VMSC = 155 km/h**

Datos correspondientes a la chicana del km 459.5 de RN9 Rosario-Córdoba, en la localidad de Leones.

Ejemplo 2.

Datos: R = 2200; e = 4%; emáx = 8%

Resulta **VDI = 131 km/h** y **VMSC = 165 km/h**

6 COMENTARIOS

Tal como se expuso en la Monografía 2 Distribución del Peralte y Fricción Transversal, el pretendido *aumento gradual* del peralte de DNV 67/80 y de AASHTO Método 5 significa disminuir la componente física estable, invariable, el peralte; y aumentar la componente física inestable, variable, la fricción lateral reactiva del contacto pavimento – neumático; cuya humedad intermedia excepcionalmente será uniforme en un tramo vial, como tampoco otras variables inciertas o diversas, tales como material y estado de las superficies en contacto (macro y microtextura, ahuellamiento, exudación, presión de inflado, área de pisada...)

En DNV 67/80 y en todas las Políticas AASHTO sobre Diseño Geométrico se afirma fundamentalmente que, al transitar una curva horizontal, la condición virtuosa es aquella para la cual, a la velocidad elegida por la mayoría de los conductores en flujo libre, la fricción lateral es nula, como en las rectas. Lo cual es contradictorio con adoptar, en parte o todo el rango de radios o curvatura, un aumento gradual del peralte entre tal condición virtuosa y la situación de colapso inminente, situación que **sólo debe usarse en casos extremos**, según Rühle.

AASHTO critica que en los gráficos de sus Métodos 3 y 4 la fricción aumenta rápidamente en la mitad del rango de curvatura $1/R$ hasta el máximo correspondiente al R_{\min} , y que está marcada diferencia en la fricción lateral para diferentes curvas es incoherente y que puede resultar en conducción errática a la velocidad directriz o a la velocidad media de marcha.

Los gráficos de fricción comparativos de la Monografía 2 Distribución del Peralte y Fricción Transversal, muestran la subjetividad de la afirmación de un aumento rápido de la fricción lateral al comparar AASHTO 2011 y ANDG 10, que **de existir no tiene porqué resultar en una conducción errática**. En efecto, **el aumento gradual del peralte (= disminución gradual de la fricción) en un gráfico $e-1/R$ no tiene NINGÚN sentido práctico ni afecta la SEGURIDAD VIAL** porque las curvas inmediatas en el gráfico excepcionalmente serán inmediatas en el camino; pueden estar separadas varios km, con varias curvas intermedias, y porque desde el punto de vista de la Seguridad Sustantiva lo que importa es la **gradualidad de cambios de radios o de la fricción lateral demandada entre curvas sucesivas en el camino**, según los tres criterios de seguridad de Lamm, o las relaciones halladas entre los saltos en el gráfico de curvaturas -en función de las progresivas de un camino- con los saltos en la velocidad de operación ΔV_{85} , violación de expectativas y accidentes viales, lo cual es la esencia conceptual del módulo Coherencia de Diseño del exitoso programa IHSDM, cuyo antecedente empírico se remonta a la recomendación de no superar por seguridad la relación 1:1.5 entre los radios de dos curvas sucesivas.

El Método 4 de AASHTO, utilizado en la ANDG 10 mantiene la condición 'virtuosa' de fricción nula a la velocidad media de marcha hasta el peralte práctico máximo, y no la infecta con dosis graduales de una condición 'crítica, incómoda e insegura' como es la fricción lateral máxima.

En AASHTO 2011 se aconseja o pondera **evitar el uso del peralte máximo** en una parte sustancial del rango de radios de curva o de curvatura $1/R$, de lo que resultarían **diseños más equilibrados**.

Por el contrario, en la Actualización ANDG10 se considera muy conveniente usar la oposición del peralte práctico máximo desde el punto en que se lo alcanza, hasta el radio mínimo.

En la DNV 67/80 si entre R_3 y R_{\min} se reduce el peralte con una infundada y compleja gradualidad, aumenta la fricción demandada para mantener el equilibrio dinámico a igualdad de velocidad, y **disminuye la reserva de fricción para los vehículos que circulen por encima de la velocidad directriz, que desconoce el conductor, quien adopta la velocidad según su personal conveniencia, y la reduce a medida que percibe riesgos a la seguridad de su movimiento**.

Si el proyecto se desarrolla en zona de frecuentes heladas y nevadas la solución es bajar uno o dos puntos el peralte máximo práctico, pero no usar esta precaución donde no fuere necesaria.

En la Actualización ANDG 10, el pasaje entre las condiciones de radio mínimo crítico o absoluto, $R_{\text{mín}}$ y el radio mínimo deseable, $R_{\text{mínDes}}$, con variación Δf de la fricción a la velocidad V :

$$\Delta f = \frac{V^2}{127} \cdot \left[\frac{(R_{\text{mínDes}} - R_{\text{mín}})}{(R_{\text{mínDes}} \cdot R_{\text{mín}})} \right]$$

Para un radio R entre $R_{\text{mín}}$ y $R_{\text{mínDes}}$, la fricción a la velocidad V es:

$$f = \left\{ \frac{[\Delta f \cdot R_{\text{mín}} \cdot R_{\text{mínDes}}]}{[(R_{\text{mínDes}} - R_{\text{mín}}) \cdot R]} \right\} - e_{\text{máx}}$$

7 PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES

1. Poner en vigencia urgentemente actualización de las Normas de Diseño Geométrico de la DNV, ANDG 10, la cual no tendrá efectos retroactivos. Solo para aplicar en obras nuevas y reconstrucciones importantes de obras existentes. ANDG 10 RESUMEN, página R.ii (<https://goo.gl/bCP0yx>)
2. Distribuir el peralte según el Método 3º) de DNV 67/80, para $R \geq R_1$. Justificar una Excepción de Diseño para $R_{\text{mín}} \leq R < R_1$. Este método es similar al Método 4 de AASHTO y el único en la ANDG 10. Puede haber diferencias numéricas por las expresiones de la velocidad media de marcha y de la fricción lateral en función de la velocidad.
3. Verificar la coherencia de las curvas horizontales simples y sucesivas con los Criterios de Seguridad de Lamm y corregir si la calificación es POBRE.
4. Los saltos ΔV para aplicar los criterios de Lamm deben ser entre velocidades del mismo tipo; entre VD, o VDI. Nunca entre VD o VDI, y VMSC.
5. Como valor práctico normal más seguro, adoptar como máximo el peralte 8%. Para limitaciones por condiciones locales; por ejemplo 6% por frecuentes congelamiento de la calzada, adoptarlo de la misma distribución que para máximo 8%, y no cambiar de ley de variación o tabla, si están infectadas por el R3 y su extraña distribución de variación parabólica.
6. En las comparaciones, redondear los valores resultantes de dimensiones y velocidades.

5762 PALABRAS

BIBLIOGRAFÍA

- 1 **DNV 67/80**
Normas de diseño geométrico de caminos rurales
<https://goo.gl/YBjMFf>
- 2 **DNV ANDG10**
Actualización 2010 Normas y recomendaciones de diseño geométrico y seguridad vial – Instrucciones generales de estudios y proyectos A) Obras básicas
<http://goo.gl/fRq2nL>
- 3 **AASHTO**
2.1 Libro Verde 1994. 3a Edición
<https://goo.gl/OZFYXN>

2.2 Libro Verde 2011. 6a Edición
<http://goo.gl/dmRCLY>
- 4 **España. AEC**
Norma 3.1 – IC TRAZADO
<http://goo.gl/VmkITS>
<http://goo.gl/UqbB6Q>
- 5 **FHWA**
Conceptos de velocidad: Guía informativa. 2009. Pub. N° FHWA-SA-10-001
<https://goo.gl/zLIPRT>
<https://goo.gl/PbeZE4>
- 6 **TRB**
NCHRP SR 254. 1998 – Administración de la velocidad
<https://goo.gl/xhoXXm>

NCHRP Report 439. Métodos de distribuir el peralte y diseños de transiciones
<http://goo.gl/qzTvY9>
- 7 **NYS DOT**
Recomendaciones para diseñar el peralte según AASHTO
<https://goo.gl/4A1uTz>
- 8 **MUTCD**
Manual on Uniform Traffic Control Devices
<http://goo.gl/7hKVZW>
- 9 **Barnett, Joseph**
Curvas con transiciones para caminos. DNV 3ª Edición 1954
- 10 **Leisch – Neuman – Glennon**
Curvas de Caminos Rurales
<https://goo.gl/Lbxvk7>
- 11 **Fambro, Daniel B. y otros**
NCHRP Report 400 TRB Determinación de las distancias visuales de detención
<http://goo.gl/umU4kp>

- 12 Moreno, Eduardo Rosendo**
EICAM 2007. Distintos criterios para determinar el peralte
<https://goo.gl/fIZELi>
- 13 Sierra, Francisco J.**
EGIC DNV-UBA 1986. Trazado y Diseño Geométrico
<https://goo.gl/VbPT91>

XII CAVyT 1997. Monografía. Comparación normas DNV 67/80 - AASHTO 1994 (Premio) Revista Carreteras
<https://goo.gl/6CNTGu>

XIII CAVyT 2001. Monografía. La seguridad vial y las velocidades máximas señalizadas en las autopistas (Mención especial)
https://goo.gl/8wSXs5_004
- 14 BLOG FiSi**
Velocidad
<http://goo.gl/5QS1Dc>

Ruediger Lamm
<http://goo.gl/Mkioyv>

Simposio Diseño Geométrico Valencia 2010
<http://goo.gl/r2JWfv>

Simposio Diseño Geométrico Vancouver 2015
<http://goo.gl/plrtnV>
- 15 Rocci, Sandro**
2003 Capacidad, trazado y sección transversal. Universidad Politécnica de Madrid
<https://goo.gl/7EHuxa>

2006 Revisión de los límites de velocidad en los caminos españoles. Asociación Técnica de Carreteras. España. Info AEC N° 108
<https://goo.gl/zsUpby>
- 16 Kanellaidis, George**
Diseño de peralte en curvas viales. 1995/99. Universidad de Atenas
<http://goo.gl/oc7lez>
- 17 Universidad Trieste**
Límites longitud curva de transición
<https://goo.gl/iSitCm>
- 18 Federal Highways Administration – US Department of Transportation**
America's Highways 1776-1976
<https://goo.gl/lmhJ8C>

INGENIERÍA DE SEGURIDAD VIAL



VELOCIDADES Y DISTRIBUCIÓN DEL PERALTE EN LAS CURVAS HORIZONTALES

