



Foto: Banco de imágenes del Instituto de Tecnologías Educativas. Ministerio de Educación.

La velocidad, base del trazado

(2ª parte)

Sandro Rocci
Profesor Emérito

Universidad Politécnica de Madrid

2. Relación del trazado con la velocidad

2.1. Introducción

Los indicadores escogidos para relacionar el trazado con la velocidad operativa en una vía deben cumplir las condiciones siguientes:

- Han de ser estrictamente función del trazado de la vía.
- Tiene que haber una relación razonable entre el indicador y la velocidad operativa.

En Alemania se emplea la **tasa de cambio de curvatura** (*Curvature Change Rate, CCR*), o el ángulo de giro medio por unidad de longitud. Este concepto coincide con el de sinuosidad. Se obtiene sumando el valor absoluto de todos los ángulos de giro¹ de un tramo, y dividiendo esa suma por la longitud del tramo. Este indicador ha sido muy empleado por Lamm para sus criterios de consistencia: sus modelos de velocidad operativa se basan en este índice.

A lo largo de un itinerario, si se traza un diagrama de la **CCR** acumulada a lo largo de la distancia recorrida, es fácil distinguir en aquél tramos homogéneos (*figura 2.1-A de la página siguiente*).

a) Warren (I) consideró que las caracterís-

ticas más influyentes eran la curvatura en planta, la inclinación de la rasante y su longitud, el número de carriles, el estado del pavimento, la visibilidad disponible, el despeje lateral, el número de intersecciones y la presencia de edificaciones contiguas.

- b) Según Polus y otros (II), la curvatura media del tramo presenta una correlación negativa con la velocidad operativa media.
- c) McLean (III) llegó a la conclusión de que no sólo el radio de la curva, sino también la velocidad deseada eran las variables estadísticamente más significativas.
- d) Tignor y Warren (IV) destacaron que las características más influyentes eran el número de accesos y el desarrollo comercial contiguo.
- e) Por el contrario, Fildes y otros (V) opinan que las que más influyen son la anchura de la calzada y el número de carriles.
- f) Fitzpatrick y otros (VI) no sólo emplearon indicadores del trazado para determinar la velocidad operativa, sino que también emplearon otras cinco variables: inclinación de la rasante, anchura de la plataforma, peligrosidad de las

márgenes², densidad de accesos, y límite de velocidad.

El primer paso fue determinar qué índices se podían emplear para describir el comportamiento de la vía. Sólo se tomaron en cuenta rectas independientes de las secciones críticas adyacentes. Para ello, se determinó la longitud crítica frontera entre rectas dependientes e independientes. Con los resultados obtenidos, se realizaron dos análisis: uno gráfico y otro estadístico.

Las relaciones cualitativas establecidas a partir del análisis gráfico fueron las siguientes:

- A medida que la tasa de cambio de curvatura (**CCR**) aumentaba, la velocidad operativa disminuía.
- A medida que el radio decrecía, también lo hacía la velocidad operativa.
- Un incremento del radio medio provocaba un incremento de las velocidades operativas.
- El aumento de la longitud media de las

(1) Incluyendo los correspondientes a las curvas de transición.

(2) Medida por la escala cualitativa definida en: Zegeer, Charles V., J. Hummer, D. Reinfurt, L. Herf & W. Hunter. *Safety Effects of Cross-Section Design for Two-Lane Roads. Report FHWA-RD-87/08 y /09*, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington DC (1987).

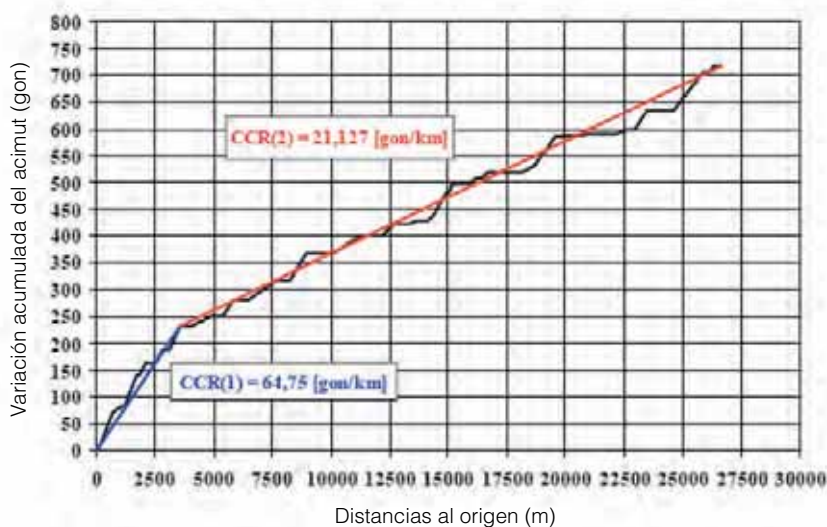


Figura 2.1.A. Cómo se diferencian tramos de trazado en planta homogéneo. Fuente: Crisman, Bruno; Marchionna, Aurelio; Perco, Paolo; Roberti, Roberto: *Operating Speed Prediction Model For Two-Lane Rural Roads*. Departamento di Ingegneria Civile - Università di Trieste 2005.

rectas provocaba un aumento de la velocidad operativa.

- A medida que la tasa de cambio de curvatura vertical aumentaba, la velocidad operativa disminuía.
- Un aumento de la tasa de cambio de curvatura combinada provocaba una disminución de la velocidad operativa.

Todas estas conclusiones eran intuitivas aun antes de un análisis cuantitativo. Sin embargo, realizado éste, ninguno de los indicadores del trazado estudiados resultó ser estadísticamente significativo, ni siquiera considerando las variables auxiliares.

2.2. Consistencia

2.2.1. Definición

La consistencia del diseño es la condición bajo la cual el trazado de la vía está en armonía con las expectativas de los conductores, los cuales pueden prever sus acciones con seguridad e incluso con comodidad. Estas expectativas no sólo son fruto de la experiencia previa del propio conductor, sino también como consecuencia del tramo de vía que lleve recorrido. Se trata de que no aparezcan situaciones imprevistas, y

además difíciles de resolver, que requieran de los conductores percepciones muy rápidas y de múltiples elementos a la vez.

Ya en el apartado 1.1 de la Norma 3.1-IC se dice que:

“... deberá lograrse una homogeneidad de características geométricas tal que induzca al conductor a circular sin excesivas fluctuaciones de velocidad, en condiciones de seguridad y comodidad. Para ello se evitarán los puntos en que las características geométricas obliguen a disminuir bruscamente la velocidad y se facilitará la apreciación de las variaciones necesarias de velocidad mediante cambios progresivos de los parámetros geométricos y con la ayuda de la señalización...”

En el apartado 4.5 de la misma Norma figuran unas condiciones sobre la relación entre los radios de curvas consecutivas³ y sobre el radio mínimo de una curva siguiente a una alineación recta de más de 400 m de longitud que, de hecho, constituyen unas condiciones de consistencia adaptadas de las normas alemanas **RAS-L**. Estas condiciones representan una muy buena aportación de la Norma de 1999 y deben ser mantenidas, pues resuelven el problema de cómo llegar hasta elementos de baja velocidad específica.

2.2.2. Criterios experimentales

Diversos estudios (VII) (VIII) (IX) (X) han analizado la relación entre la siniestralidad y la consistencia. Por ejemplo, las curvas que requieren una reducción de velocidad de más de 20 km/h presentan una siniestralidad seis veces superior a las que no requieren reducir la velocidad.

Aunque la consistencia del trazado comenzó a estudiarse en la década de 1970, la mayoría de las investigaciones se han llevado a cabo a partir de los años 90. Han consistido en el desarrollo de diferentes métodos basados en la velocidad de los vehículos, en su estabilidad, en el trazado de la carretera, o en el comportamiento del conductor. Los métodos basados en el análisis de las velocidades han sido los más desarrollados hasta la fecha, y han sido em-



Foto: Banco de imágenes del Instituto de Tecnologías Educativas. Ministerio de Educación.

(3) O separadas por una recta de menos de 400 m de longitud.

pleados en países como Estados Unidos, Suiza y Alemania.

Los métodos de evaluación de la consistencia de la velocidad se fundamentan en determinar la velocidad a la que un vehículo tipo puede circular a lo largo del tramo en estudio, teniendo en cuenta su trazado y comparando con ciertos criterios. Para ello, en primer lugar estiman el perfil de velocidad correspondiente al percentil 85 (V_{85}), a partir de modelos matemáticos que relacionan la velocidad con algunas características geométricas de la carretera.

Leisch y Leisch (III) desarrollaron un procedimiento para evaluar la consistencia del trazado basándose en la determinación de la velocidad operativa, distinguiendo entre vehículos pesados y ligeros, y teniendo en cuenta la aceleración y la deceleración debidas a la presencia de curvas en planta. Para calificar la consistencia propusieron comparar el perfil de velocidades con la velocidad de diseño, y aplicar la “regla de las 10 millas”:

- La velocidad media de los vehículos ligeros no debe diferir en más de 16 km/h de la velocidad de diseño.
- La reducción en la velocidad de diseño entre dos tramos consecutivos no debe superar unos 16 km/h.
- La velocidad media de los vehículos pesados no debe ser inferior en más de 16 km/h a la de los vehículos ligeros.

Lamm y Choueiri (XIV) y Lamm y otros (XI) establecieron un procedimiento de evaluación de la consistencia, que consiste en comparar la variación del grado de curvatura (GC)⁴ y de la V_{85} entre elementos consecutivos. La consistencia se califica por los siguientes criterios:

- Si $\Delta GC \leq 5^\circ$ y $\Delta V_{85} \leq 10$ km/h la consistencia del trazado es buena.
- Si $\Delta GC > 10^\circ$ y $\Delta V_{85} > 20$ km/h la consistencia del trazado es mala.

Basándose en la siniestralidad media, Lamm y otros (XIV) sugirieron otro criterio para evaluar la consistencia del trazado entre elementos consecutivos (tabla 2.2-A).

Tabla 2.2-A.

Diseño	ΔV_{85} (km/h)
Bueno	≤ 10
Regular	entre 10 y 20
Malo	> 20

Polus y Mattar-Habib (XII) han propuesto otro criterio de medida de la consistencia, también basado en la velocidad:

- El primer parámetro (R_a) es el área normalizada (por unidad de longitud) comprendida entre el perfil de velocidades y la velocidad media⁵.
- El segundo parámetro (σ) es la desviación estándar de la velocidad operativa (V_{85}) a lo largo de la carretera.

El modelo de consistencia (C) que proponen es

$$C = 2,808 \cdot e^{0,278 \cdot R_a - \frac{\sigma}{3,6}}$$

Los intervalos propuestos figuran en la tabla 2.2-B.

Tabla 2.2-B.

Diseño	C
Bueno	> 2
Regular	entre 1 y 2
Malo	< 1

2.2.3. El IHSDM

Por el rigor de los estudios en los que está basado y por la facilidad de su aplicación práctica destaca el procedimiento de análisis de la consistencia **IHSDM** (*Interactive Highway Safety Design Module*, módulo interactivo de diseño para seguridad viaria). Se trata de un programa informático desarrollado por la Administración Federal de Carreteras (**FHWA**) de Estados Unidos (XIII), que permite evaluar varios aspectos de la seguridad viaria, de manera que se facilitan la detección de problemas potenciales de inseguridad, la comparación de la seguridad de varias alternativas, y la optimización de la seguridad de un diseño.

Comenzó a gestarse en 1994, y está previsto que esté compuesto por seis módulos independientes:

- Módulo de predicción de accidentes.
- Módulo de consistencia del diseño.
- Módulo conductor/vehículo.
- Módulo de revisión y diagnóstico de intersecciones.
- Módulo de revisión de normas.
- Módulo de análisis del tráfico.

Se encuentra disponible una versión aplicable a carreteras interurbanas de calzada única con dos carriles, aunque está previsto desarrollar una versión para carreteras multicarril. En la versión actual están

disponibles todos los módulos excepto el de conductor/vehículo.

El **IHSDM** evalúa la consistencia mediante un análisis del perfil de velocidades. Para evaluar la consistencia, realiza dos comparaciones: la velocidad operativa (V_{85}) se compara con la velocidad de diseño (V_d) y, además, se comparan entre sí las velocidades de elementos consecutivos. Los criterios para calificar la consistencia están fundamentados en los trabajos de Lamm y otros (XIV) (tabla 2.2-C). La evaluación se hace para cada uno de los dos sentidos de circulación.

Tabla 2.2-C.

Criterio	Intervalo (km/h)	Consistencia
$V_{85} - V_d$	$V_{85} - V_d \leq 10$	Buena
	$10 < V_{85} - V_d \leq 20$	Regular
	$20 < V_{85} - V_d$	Mala
ΔV_{85}	$\Delta V_{85} \leq 10$	Buena
	$10 < \Delta V_{85} \leq 20$	Regular
	$\Delta V_{85} > 20$	Mala

Una vez determinado el perfil de velocidades, el módulo de consistencia del **IHSDM** procede a la evaluación de ésta de acuerdo con los criterios de la tabla 1.4-C. Con el primer criterio representa gráficamente la consistencia asignando distintos colores al perfil de velocidades (figura 2.2-A de la página siguiente): diferencias de más de 20 km/h se representan en color rojo; diferencias entre 10 y 20 km/h, en color amarillo; y diferencias menores a 10 km/h en color verde.

De acuerdo con el segundo criterio de consistencia, el **IHSDM** coloca banderas coloreadas en el perfil de velocidades: las banderas rojas indican cambios de velocidad de más de 20 km/h; las amarillas, cambios entre 10 y 20 km/h; y las verdes cambios inferiores a 10 km/h. Hay que reseñar que, según Voigt (XVI), la siniestralidad en curvas con bandera roja podría ser seis veces mayor que en las curvas con bandera verde, donde no se requiere reducir la velocidad.

Además de las salidas gráficas de resultados, el **IHSDM** proporciona los resultados

(4) El grado de curvatura (GC) es el ángulo central subtendido por un arco de 100 pies (30,48 m). Su relación con el radio R es $GC (^\circ) = (1\,746,28) / R (m)$.

(5) Calculada como la media de las velocidades ponderadas por la longitud de cada elemento del trazado.

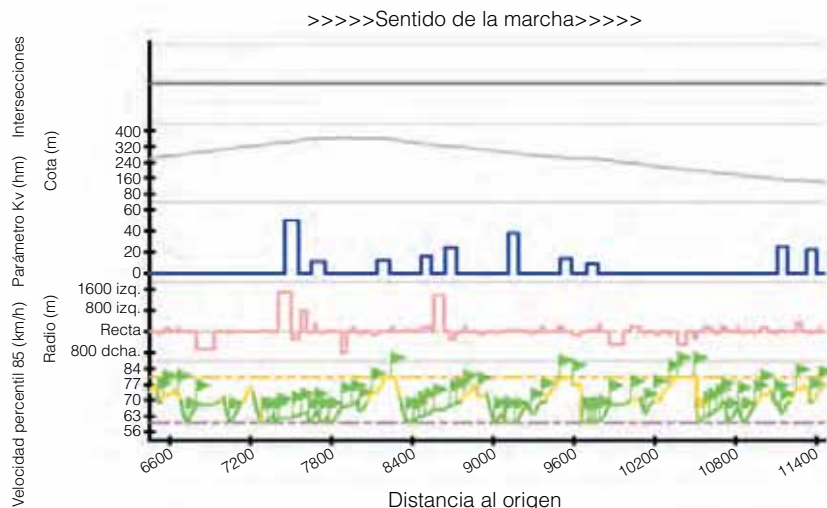


Figura 2.2-A. Resultados gráficos obtenidos con el IHSDM (Sánchez y Castro 2003).

en forma de tablas. La tabla con el perfil de velocidades es particularmente interesante, pues en ella se señalan con un asterisco las situaciones de deceleración forzada⁶.

El principal inconveniente de la aplicación del **IHSDM** al estudio de la consistencia del trazado en las carreteras españolas estriba en la utilización de modelos de perfiles de velocidades calibrados para las condiciones de circulación estadounidenses. Desde un punto de vista práctico, hay que reseñar la dificultad de la introducción de los datos del trazado de la carretera que se va a estudiar: es necesario introducirlos en un formato propio del **IHSDM**, o bien en un formato estándar (*Landxml*); y son todavía escasos los programas comerciales de trazado que exporten a alguno de ellos (XXII).

2.3. Normativa comparada

2.3.1. Alemania

En Alemania, hasta 2006 el diseño contaba con criterios basados tanto en la velocidad de diseño como en la velocidad específica⁷:

- La velocidad de diseño se basaba en la funcionalidad de la vía dentro de la red, y en el nivel de servicio deseado para ella, habida cuenta del relieve del terreno y de consideraciones económicas. Se empleaba para determinar las características mínimas y deseables de la mayoría de los elementos del trazado, y de las combinaciones entre ellos.
- La velocidad específica era, en todos los casos, mayor que la de diseño y no

inferior a la velocidad límite; y en ella se basaba la valoración geométrica de elementos concretos del trazado, como el peralte y la visibilidad. El motivo por el cual se diseñaban estos elementos en función de la velocidad operativa estimada era que si no se hubiera hecho de este modo, se habrían producido defectos de seguridad.

En las carreteras con calzadas separadas, ambas velocidades se estimaban en función de la tasa de cambio de curvatura (**CCR**) y de la anchura de la calzada.

La normativa alemana consideraba que:

- La velocidad específica no debía superar a la de diseño en más de 20 km/h, si la segunda no era inferior a 100 km/h; ni a 20 km/h en caso contrario. Si resultaba superior a 20 km/h, había que aumentar la velocidad de diseño o tomar medidas para limitar la velocidad operativa estimada.
- La diferencia de velocidad específica entre elementos consecutivos debía ser inferior a 10 km/h.

A partir de 2006, la normativa alemana (XVI) sufre un proceso de reestructuración. Entre otros tipos y clases, figuran ahora:

- Las autopistas (interurbanas y urbanas) pasan a ser objeto de una nueva norma, *Richtlinie für die Anlage der Autobahnen (RAA)*. Se clasifican en:
 - Continentales, **AS 0**.
 - Principales, **AS I**.
 - Interregionales, **AS II**.
- Desaparecen los conceptos de veloci-

dad de diseño y de velocidad específica, que son sustituidos por unas **condiciones de diseño** (*Entwurf Klassen Autobahnen*): **EKA 1** para las autopistas federales, y **EKA 2** para las demás. Se pretende que se circule con seguridad en mojado a una velocidad recomendada⁸ de:

- 130 km/h (**EKA 1** para **AS 0** y **AS I**).
- 120 km/h (**EKA 1** para **AS II**).
- 100 km/h (**EKA 2** para **AS II**).
- Las carreteras convencionales de los *Länder* o Estados Federales pasan a ser objeto de otra nueva norma, *Richtlinie für die Anlage der Landstrassen (RAL)*. Se clasifican en:
 - Principales, **LS I**.
 - Interregionales, **LS II**.
 - Regionales, **LS III**.

También desaparece el concepto de velocidad de diseño, que es sustituido por unas **condiciones de diseño** (*Entwurf-Klassen Landstrassen*) **EKL 1** para las **LS I**, **EKL 2** para las **LS II**, y **EKL 3** para las **LS III**. La velocidad recomendable es de 110 km/h para **EKL 1**, 100 km/h para **EKL 2**, y 90 km/h para **EKL 3**.

2.3.2. Australia

La Guía australiana de diseño emplea un indicador del trazado (la velocidad deseada) como estimador de la velocidad operativa.

Basándose en los estudios de *McLean*, la velocidad deseada establece un "entorno de velocidad" (figura 2.3-A de la página siguiente) del cual se deriva, según el radio de la curva que se esté estudiando, la velocidad operativa en ella (percentil 85).

Para velocidades de diseño inferiores a 80-90 km/h, las velocidades operativas tienden a ser superiores a la de diseño; mien-

(6) Considera que hay deceleración forzada o incómoda si se sobrepasan los 4,5 (km/h)/s.

(7) Estimada, en las autopistas interurbanas (que no tienen límite genérico de velocidad), como el percentil 85 de la distribución de la velocidad operativa sobre pavimento mojado, que es función de la sinuosidad y de la anchura de la calzada; en las autopistas periurbanas y en las carreteras convencionales, coincide con el límite de velocidad.

(8) En Alemania se recomienda una velocidad (con señales del tipo **S-7**) en las carreteras (como las autopistas) en las que no hay límite genérico ni específico de velocidad. Rebasar esa velocidad recomendada no es un delito ni una falta, aunque en caso de accidente la responsabilidad del conductor se puede ver incrementada. En 1974 se introdujo una velocidad recomendada de 130 km/h en las autopistas alemanas, que siguen sin tener un límite genérico.

tras que se comportan al contrario cuando la velocidad de diseño es superior.

2.3.3. Austria

El límite de velocidad en las autopistas austríacas es⁹ de 130 km/h. Se ha estado discutiendo seriamente si suprimir ese límite o aumentarlo, e incluso se han permitido tramos experimentales con un límite de 160 km/h; pero se suprimieron en 2007.

La normativa austríaca en materia de autopistas representa un ejemplo extremo de la diferencia entre la *velocidad de proyecto* empleada para clasificar la vía¹⁰, y la *velocidad específica* que se deriva del diseño de sus elementos y, en concreto, de las relaciones entre ella, el radio de la curva, la inclinación de la rasante y la longitud del elemento. La velocidad de proyecto de un tramo es igual a la menor velocidad específica de sus elementos; pero la velocidad específica puede llegar a 140 km/h.

2.3.4. Francia

Los parámetros geométricos fundamentales para el trazado en planta y en alzado están determinados por una velocidad de proyecto convencional denominada *velocidad de referencia*, que sirve para determinar sus valores mínimos.

La oferta de la carretera en materia de velocidades, representada por una velocidad específica (igual a la de proyecto en los elementos más críticos) se compara entonces con la demanda, representada por la velocidad operativa en curva, deducida de una amplia campaña de medidas realizadas en los años ochenta (XVII). Se utiliza el percentil 85 de su distribución, para el que se adopta el menor de los dos valores estimados por las *figuras 2.3-B y C* en función del radio y de la inclinación de la rasante en rampa, si tiene más de 250 m de longitud.

Las **autopistas** interurbanas francesas (XVIII) se clasifican en dos categorías, según el estándar de sus trazados en planta y en alzado, como consecuencia de las características de su entorno (relieve, uso del suelo, etc.), que debe ser consistente con la percepción del usuario:

- **L₁**, adecuada para llanuras o valles donde los condicionantes del entorno

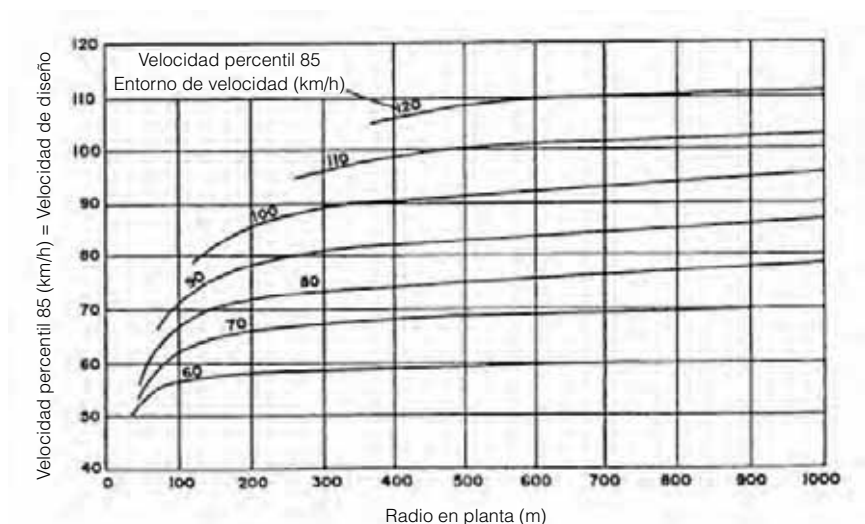


Figura 2.3-A. Entornos de velocidad en la Guía australiana de diseño de carreteras. Fuente: (III).

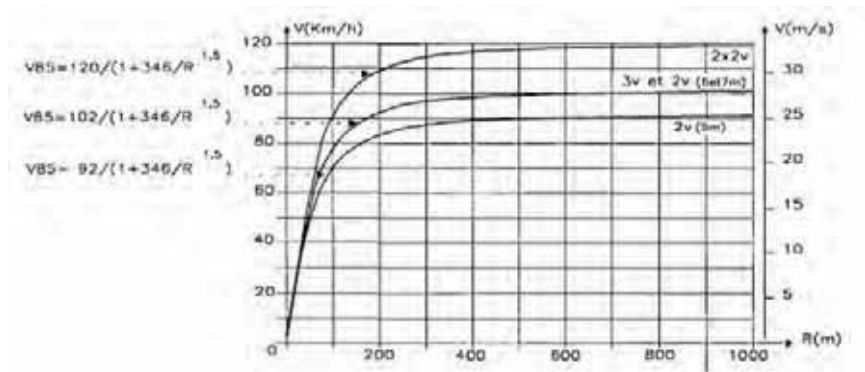


Figura 2.3-B. Velocidades operativas en función del radio. Fuente: (XVII).

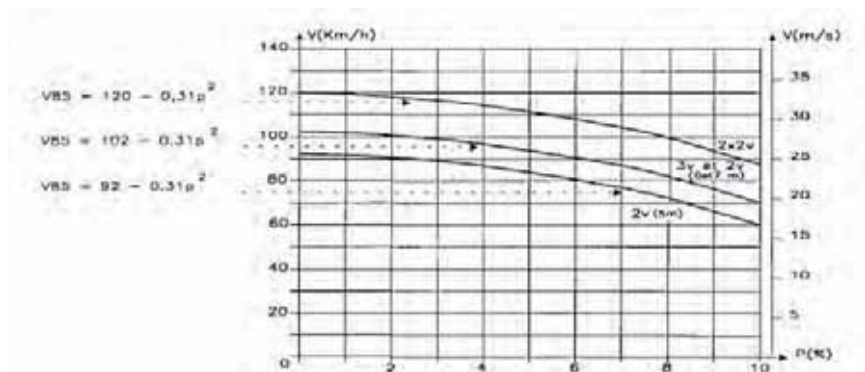


Figura 2.3-C. Velocidades operativas en función de la inclinación de la rasante. Fuente: (XVII).

son moderados. Límite genérico de velocidad 130 km/h.

- **L₂**, más adecuada para relieves más difíciles, debido a los impactos ambientales y económicos. Límite genérico de velocidad 110 km/h.

Los tramos contiguos que estén clasificados en categorías diferentes tienen que

tener una longitud mínima de 10 km; el cambio de categoría debe tener lugar donde el usuario pueda percibir claramente un cambio en el entorno.

Para las **carreteras convencionales**

(9) 100 km/h para autobuses y remolques, 80 km/h para camiones.

(10) Hay tres clases: 100, 120 y 140 km/h.

interurbanas (XIX) de calzada única (límite genérico de velocidad¹¹ 90 km/h) se clasifican en los siguientes tipos, para cada uno de los cuales se distinguen dos categorías:

- **T** (tránsito): se prima la movilidad a media o gran distancia.
 - **T80**: en terreno ondulado, permite en general un buen compromiso entre el coste y el confort dinámico.
 - **T100**: generalmente bien adaptada a un relieve no exigente.
- **R** (multifuncionales): constituyen la parte esencial de la red de carreteras principales fuera de poblado. Sirven a la movilidad a pequeña o media distancia, y a los usos ligados al entorno.
 - **R60**: en terreno ondulado, permite en general un buen compromiso entre el coste y el confort dinámico.
 - **R80**: generalmente bien adaptada a un relieve no exigente.

El cambio de tipo sólo debería tener lugar donde la carretera cambie de función, en general en una población o intersección importante. Dentro de un mismo tipo, los cambios de categoría pueden tener lugar donde haya una modificación claramente perceptible del relieve o del entorno: por ejemplo, penetración en un terreno ondulado o accidentado.

Una autopista que pase a través de un terreno con un relieve particularmente difícil (límite genérico de velocidad 90 km/h) no se incluye en las categorías anteriores, y su nivel de servicio será menor. Asimismo, hay carreteras situadas en esos tipos de terreno en las que respetar las reglas ordinarias conduciría a costes excesivos. Para que a esos tramos se les pueda dar un tratamiento especial, las dificultades deben ser continuas o frecuentes a lo largo de al menos una decena de kilómetros: no bastan unas dificultades aisladas¹².

En esos casos, se necesita un estudio especial de los siguientes temas:

- La integración en el entorno, general-

(11) En las carreteras del tipo R se puede adoptar un límite de velocidad de 110 km/h siempre que, en un entorno de puro campo abierto, no haya accesos directos de colindantes al conjunto de la vía. Esta condición no debe conducir a un tipo híbrido donde los nudos se resuelvan a distinto nivel; la mayoría deben adoptar la tipología en glorieta.

(12) Sin embargo, una carretera por el fondo de un valle no tiene necesariamente que ser considerada como una carretera en zona de relieve difícil.

Tabla 2.3-A.

CLASE DE VÍA			GAMA DE VELOCIDADES DE DISEÑO (km/h)	LÍMITE DE VELOCIDAD (km/h)
Autopista	Interurbana	Tronco	80 - 140	130
		Vía de servicio	40 - 100	90
	Urbana	Tronco	80 - 140	130
		Vía de servicio	40 - 60	50
Carretera convencional interurbana	Principal	Tronco	70 - 120	110
		Vía de servicio	40 - 100	90
	Secundaria	60 - 100	90	
Vía arterial urbana		Tronco	50 - 80	70
		Vía de servicio	25 - 60	50
Vía urbana colectora - distribuidora			40 - 60	50

mente frágil y con un importante valor paisajístico. A este respecto, el empleo de viaductos, túneles, muros de sostenimiento, etc. debe ser sistemáticamente estudiado y, en su caso, preferido (a pesar de su coste) a las grandes explotaciones que respetan menos el medio ambiente y normalmente se insertan peor en el paisaje.

- Las consecuencias del trazado sobre la geotecnia, la hidrología y el drenaje.
- Las consecuencias del diseño y del equipamiento viario (dispositivos de contención de vehículos, ayudas a la conducción, etc.) sobre la conservación y la explotación (gestión de riesgos naturales, vialidad invernal, desagüe, etc.).

Este tipo de tramos se iniciarán y terminarán donde haya un cambio brusco en el relieve (puerto de montaña, garganta) perceptible por los usuarios.

2.3.5. Italia

Se emplea (XX) el concepto de gama de velocidades de diseño, dentro de la cual se definen las características geométricas de los distintos elementos del trazado para permitir al proyectista adaptarlo al entorno atravesado, de manera que las velocidades operativas correspondientes a cada gama sean compatibles con la sección transversal.

- El extremo superior de la gama, que no debe ser inferior al límite genérico de velocidad, corresponde a los elementos menos estrictos del trazado.
- El extremo inferior de la gama corresponde a la velocidad de diseño de los elementos más limitativos del trazado.

Se recomienda adoptar valores superiores a dicho extremo inferior, si el entorno es favorable.

Las gamas de velocidad de diseño se indican en la *tabla 2.3-A*.

El proceso de diseño en Italia se apoya en perfiles de velocidad (uno para cada sentido de circulación) para comprobar la consistencia del trazado. Sólo se considera la curvatura en planta para establecerlos. Se asume que la aceleración y la deceleración, a razón de de 0,80 m/s² en valor absoluto, tienen lugar en las rectas o en las curvas de transición.

Se busca la consistencia del trazado:

- Evitando ir de un extremo a otro de la gama de velocidades de diseño en elementos contiguos.
- Escalonando la transición de las velocidades de diseño de tramos contiguos, si son muy diferentes.

A lo largo del trazado la velocidad específica de los distintos elementos del mismo debe ser tal, que los conductores no sean sorprendidos por cambios bruscos o muy frecuentes en la velocidad operativa a la que pueden realizar con seguridad el recorrido.

Para identificar los tramos homogéneos y establecer su velocidad de diseño se debe atender a los siguientes criterios:

- La longitud mínima de un tramo de carretera con una misma velocidad de diseño debe ser de 3 km para velocidades entre 20 y 50 km/h, y de 4 km para velocidades entre 60 y 110 km/h.
- La diferencia de velocidad de diseño entre tramos adyacentes no puede ser mayor de 20 km/h.

No obstante lo anterior, si debido a un marcado cambio en el relieve del terreno en

Tabla 2.3-B. Restricciones (km/h) por sección y accesos.

TIPO DE PLATAFORMA		CALZADA ÚNICA						CALZADAS SEPARADAS			
								SIN ARCENES	CON ARCENES		
Anchura (m) de la calzada		6		7,3		10		7,3	11	7,3	11
Número de conexiones y accesos por km.		9 a 12		6 a 8		2 a 3		6 a 8	2 a 3		
Anchura (m) del arcén	Normal	29	26	23	21	19	17	10	9	6	4
	1,5	31	28	25	23						
	0,5	33	30								0

un corto tramo del itinerario fuera necesario establecer otro tramo con longitud menor, la diferencia de su velocidad de diseño con la de los tramos adyacentes no puede ser mayor de 10 km/h.

Para tener en cuenta en el diseño la relativa indisciplina de los conductores es necesario dimensionar los elementos geométricos de forma tal que puedan ser recorridos con plena seguridad a la velocidad máxima más probable con la que sería abordado cada uno de ellos: su velocidad específica. Su valor depende esencialmente de los siguientes parámetros:

- De la velocidad de diseño del tramo homogéneo en el que se encuentra incluido el elemento. Es deseable que a la mayoría de los elementos que integran el tramo homogéneo se les pueda asignar como velocidad específica el valor de la velocidad de diseño del tramo.
- Del trazado inmediatamente antes del elemento considerado, teniendo en cuenta el sentido en que el vehículo realiza el recorrido. La gran mayoría de los conductores, según la percepción del trazado que tienen delante, incrementan su velocidad operativa hasta rebasar en 20 km/h ó más la velocidad de diseño del tramo.

2.3.6. Reino Unido

La velocidad de diseño ha de estar en consonancia con las velocidades operativas que se esperan¹³. Se admite que éstas¹³ están influidas por tres tipos de restric-

ciones perceptibles por el usuario, a través de la relación contenida en el ábaco de la figura 2.3-D para carreteras interurbanas de nuevo trazado.

Las restricciones son:

- a) **Trazado** (*Alignment Constraint A_c*) (en km/h):

- Calzadas separadas:

$$A_c = 6,6 + \frac{CCR}{10}$$

- Calzada única:

$$A_c = 12 - \frac{VD}{60} + \frac{2 \cdot CCR}{45}$$

siendo: **CCR** (gon/km) la sinuosidad.

VD (m) la media armónica de la visibilidad disponible, considerando las superio-

res a 720 m como iguales a este límite.

- b) **Sección y conexiones** (*Layout constraint L_c*): dada (en km/h) por la tabla 2.3-B.

- c) **Velocidad límite**: esta restricción resulta nula si sólo se aplican los límites genéricos interurbanos¹⁴; de lo contrario, se emplea el límite específico.

Las velocidades de diseño (*design speeds*) representan una estimación del percentil 85 de la distribución de las velocidades operativas; y se estructuran en gamas o franjas 120 - 100 - 85 - 70 - 60 - 50 km/h, con el sufijo **A** ó **B** para designar la categoría superior o inferior, respectivamente, de cada una.

Una vez establecido un trazado tentativo para una velocidad de diseño inicial, se calculan las velocidades correspondientes a las **A_c** y **L_c** de todos los elementos que, en un tramo de al menos 2 km, las presenten sustancialmente distintas: y ello para decidir si está justificado aumentar la velocidad de diseño o, si por el contrario, se pueden aplicar diseños excepcionales a algunos elementos para restringir el coste o el impacto ambiental.

En los acondicionamientos de corta longitud¹⁵ se sigue una técnica similar, salvo que se comprueba la consistencia de la velocidad con la de los tramos contiguos.

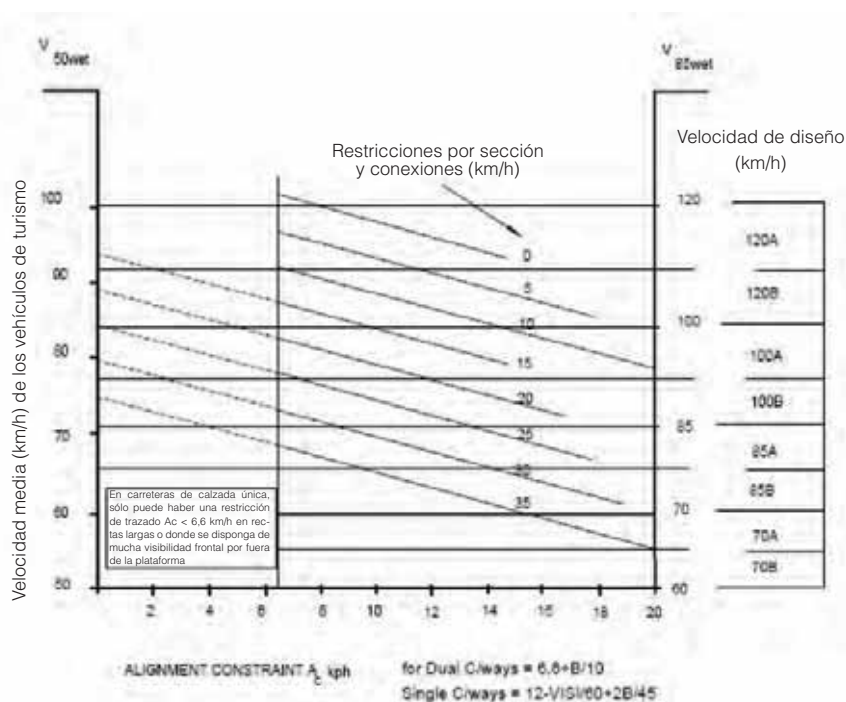


Figura 2.3.D. Ábaco para determinar la velocidad de diseño en carreteras interurbanas de nuevo trazado (Reino Unido).

(13) Representadas por la mediana o fractil 50 de la distribución de velocidades de vehículos ligeros.

(14) 112 km/h en carreteras con calzadas separadas; 96 km/h en carreteras de calzada única.

(15) Hasta unos 2 km.

2.3.7. Suiza

El suizo (XXI) fue el primer método de diseño que introdujo un modelo de perfil de velocidad para evaluar la consistencia del diseño, prediciendo la reducción de la velocidad operativa entre elementos sucesivos para evaluar la consistencia.

El perfil de velocidad se desarrolla a partir de la velocidad específica (constante) estimada en las curvas en planta, y de la máxima velocidad alcanzable en las rectas, habida cuenta de unas tasas de aceleración y deceleración de $0,80 \text{ m/s}^2$ en la entrada y la salida de las curvas, respectivamente.

Los criterios para que el diseño sea consistente son los siguientes:

- La máxima diferencia de velocidad entre una curva y la recta (o curva de mayor radio) anterior es de 5 km/h.
- La máxima diferencia de velocidad específica entre dos elementos consecutivos es de 10 km/h en carreteras con velocidad de diseño inferior a 70 km/h, y en todo caso se deben evitar diferencias de velocidad específica superiores a 20 km/h.
- La visibilidad disponible no debe ser inferior a la distancia requerida para reducir la velocidad con una deceleración de $0,8 \text{ m/s}^2$ entre curvas sucesivas.

Referencias

- (I) Warren, D. L.: *Chapter 17: Speed Zoning and Control, Synthesis of Safety Research Related to Traffic Control and Roadway Elements Vol. 2, Report No. FHWA-TS-82-233, Federal Highway Administration*, Washington, D.C. 1982.
- (II) Polus, Abishail; Livneh, Moshe; Craus, Joseph: *Effect of Traffic and Geometric Measures on Highway Average Running Speed, Transportation Research Record n.º. 960*, págs. 34-39, 1984.
- (III) McLean, A. J.: *Speeds, Friction Factors and Alignment Design. Standards. Research Report ARR 154, Australian Road Research Board*, Victoria, Australia 1988.
- (IV) Tignor, S. C.; Warren, D. L.: *Driver Speed Behavior on U.S. Streets and Highways, Compendium of Technical Papers, Institute of Transportation Engineers*, Washington, D.C. 1990.
- (V) Fildes, B.N.; Rumbold, G.; Leening, A.: *Speed behaviour and Driver's Attitude Towards Speeding. Monash University Report No.16*, 1991.
Fildes, B.N.; Lee, S.J.: *The Speed Review. Road Environment, Behaviour, Speed Limits, Enforcement and Crashes, Monash University for the Federal Office of Road Safety*, Report CR 127; 1993.
- (VI) Fitzpatrick, Kay; Miaou, S.-P.; Brewer, M.; Carlson, P.; Wooldridge, M. D.: *Exploration of the Relationships between Operating Speed and Roadway Features on Tangent Sections. Journal of Transportation Engineering, ASCE*, págs. 261-269. (2005).
- (VII) Lamm, Rudolf; Choueiri, E. M.: *Recommendations for Evaluating Horizontal Design Consistency Based on Investigations in the State of New York. Transportation Research Record 1122*, 68-78. (1987).
- (VIII) Lamm, Rudolf; Guenther, A. K.; Choueiri, E. M.: *Safety Module for Highway Geometric Design. Transportation Research Record 1512*, 7-15. (1995).
- (IX) Voigt, A.: *Evaluation of Alternative Horizontal Curve Design Approaches on Rural Two-Lane Highways. Texas Transportation Institute, Report No. TTI-04690-3, Texas* (1996).
- (X) Anderson, I.; Bauer, K. M.; Harwood, Douglas W.; Fitzpatrick, Kay: *Relationship to Safety of Geometric Design Consistency Measures for Rural Two-Lane Highways. Transportation Research Record 1658*, 43-51. (1999).
- (XI) Lamm, Rüdiger; Choueiri, E. M.; Mailaender, Theodor: *Comparison of Operating Speed on Dry and Wet Pavement of Two-Lane Rural Highways. Transportation Research Record 1280*, 199-207. (1990).
- (XII) Polus, Abishail; Mattar-Habib, C.: *New Consistency Model for Rural Highways and its Relationship to Safety. Journal of Transportation Engineering 130 (3)*, 286-293. (2004).
- (XIII) *IHSMD Design Consistency Module. Engineer's Manual. Federal Highway Administration (FHWA)*. Washington. 2004.
- (XIV) Lamm, Rüdiger; Choueiri, E. M.; Hayward, J. C.; Paluri, A.: *Possible Design Procedure to Promote Design Consistency in Highway Geometric Design on Two-Lane Rural Roads. Transportation Research Record 1195*, 111-122. (1988).
- (XV) Castro, María: *El trazado y la velocidad. La inseguridad viaria: Aspectos prácticos en el proyecto de las carreteras y de sus elementos*. Curso organizado por INTEVIA. Madrid, 2005.
- (XVI) *Neue Richtlinie für die Strassenentwurf. Grundlagen und Hintergründe der künftigen Richtlinien für die Anlage von Autobahnen, Landstraßen und Stadtstraßen. Institut für Straßen- und Eisenbahnwesen*. Coloquio en la Universidad de Karlsruhe, 12 de diciembre de 2006.
- (XVII) Gambard, Jean-Michel: *Vitesses Pratiées et Géometrie de la Route. Note d'Information B.C.10. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA)*. Abril 1986.
- (XVIII) *Instruction sur les Conditions Techniques d'Aménagement des Autoroutes de Liaison (ICTAAL). Circulaire du 12 décembre 2000, Direction des Routes, Ministère des Travaux Publics, Transports et Logement*. París, diciembre 2000.
- (XIX) *Recommandations Techniques pour la Conception Générale et la Géométrie de la Route. Aménagement des Routes Principales (sauf les autoroutes et routes express à deux chaussées). Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA)*. Bagneux, agosto 1994.
- (XX) *Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade. Decreto ministeriale del 5 novembre 2001. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti*.
- (XXI) *Projectierung, Grundlagen. Geschwindigkeit als Projectierungselement. Schweizerische Verband des Strassen- und Verkehrsfaehleute (VSS). SN 640080b*. (1991). ❖