



La velocidad, base del trazado (1ª Parte)

Sandro Rocci, Profesor Emérito
Universidad Politécnica de Madrid.

1. Enfoque

1.1. Velocidad operativa

El trazado de una carretera consta de una serie de elementos, en su mayoría fijos; sin embargo debe acomodar a un tráfico de intensidad y velocidad variables tanto en el espacio como en el tiempo; y en general los vehículos no son conducidos por profesionales, como sucede en el transporte ferroviario, aéreo o marítimo.

El componente más evidente sobre el que se refleja el comportamiento de los conductores es la **velocidad operativa**: la velocidad a la que operan o circulan los conductores que recorren los distintos elementos que constituyen la vía. Esta velocidad representa la **demanda** sobre el trazado. Es el parámetro más importante para categorizar la movilidad de una vía, pues influye en el tiempo de viaje. Se con-

sigue logrando un buen nivel de servicio a una velocidad lo más elevada posible.

La **AASHTO** ha definido la velocidad operativa como *“la máxima velocidad media a la que un conductor puede circular por un tramo de vía bajo unas condiciones favorables de meteorología y las circunstancias predominante del tráfico, sin rebasar en ningún momento una velocidad segura, determinada mediante la velocidad de diseño basada en un análisis de la vía por tramos”*. Esta definición no tiene una buena traducción práctica para el ingeniero, especialmente si la velocidad es reducida. Por ello algunos estudios, como los desarrollados por Krammes y otros (1), definieron la velocidad operativa... como la velocidad a la cual se observaba que operaban los vehículos!

Siempre que la intensidad de la circulación no lo dificulte, la velocidad operativa no es constante a lo largo de un tramo de carretera, ni siquiera si éste es homogéneo en cuanto a su

diseño y circunstancias. La mayoría de los conductores está dispuesta a aceptar una menor velocidad operativa donde perciban unas circunstancias evidentemente adversas, más que si no hay una razón aparente para ello. La vigilancia y sanción también pueden tener influencia en su comportamiento.

Sólo quien conduce el vehículo decide cuál debe ser su velocidad operativa, en cada momento y lugar. Esta decisión es compleja, y en ella influyen numerosos factores, variables y diversos, tanto por su distribución temporal, sino también por cómo se hallan repartidos a lo largo de la vía. Entre ellos básicamente se pueden distinguir:

a) El tipo de carretera. Es de esperar (y de hecho así se contrasta con los datos empíricos) que las vías de mayor rango presenten mayores velocidades operativas.

b) Las características de la vía y de su entorno, que no sólo determinan lo que es físicamente posible pa-

ra un vehículo, sino también lo que le parece adecuado a su conductor. Los factores relacionados con ellas son muy numerosos y, en la mayor parte de los casos, son objetivos, medibles y cuantificables; y se pueden tener en cuenta con más o menos aproximación, explicando una gran parte de la variabilidad. Influyen de manera decisiva los elementos del trazado con características estrictas, representados principalmente por:

- Las curvas en planta (sinuosidad).
- La presencia de rampas y pendientes.
- La anchura de la plataforma.
- La visibilidad disponible.
- La frecuencia de nudos y accesos, etc.

c) También intervienen, aunque en mucho menor grado que las características de la vía, las del **vehículo**. Además de su tipo y su antigüedad, los principales factores que influyen en la velocidad operativa de un vehículo están relacionados con:

- Sus prestaciones, que influyen en su capacidad de aceleración, sobre todo en una rampa. Dependen de la relación entre la masa del vehículo y de la potencia de su motor: lo cual hace que sean distintas las prestaciones de los vehículos pesados de las de los ligeros.

- La interacción entre los neumáticos y el pavimento que, al movilizar un rozamiento entre ambos, permite cambiar de trayectoria o de velocidad. El rozamiento que se puede movilizar tiene, empero, un límite.

- En algunos casos, la razón entre la anchura de apoyo del vehículo y la altura de su centro de gravedad sobre el pavimento, que influyen en la posibilidad de un vuelco.

d) Constituyen un grupo bastante abstracto los factores que hacen referencia a las **características de los conductores** (personalidad, actitud, motivos, etc.) y a sus circunstancias (edad; sexo; presencia de acompañantes; historial previo de accidentes e infracciones, actitud hacia las normas de tráfico y, en particular, hacia el límite de velocidad; finalidad del desplazamiento; placer derivado de la

conducción; valoración del riesgo; valor asignado al tiempo ahorrado; costes asociados al desplazamiento; etc.). Aunque han sido muy estudiados, los resultados han sido poco claros: son subjetivos o no son cuantificables. Unos factores se han mostrado significativos en algunos estudios, pero no en otros. Por ello no resulta en general fácil tenerlos en cuenta, debido a la gran variabilidad de las circunstancias; y menos aún formular teorías generales sobre el comportamiento al volante. Esto subraya la complejidad de las decisiones de los conductores; sin embargo, éstos se mantienen dentro de unos márgenes de comportamiento que hacen que una estimación basada en factores medibles resulte suficientemente aproximada tanto para diseñar la vía, como para estimar perfiles de velocidad operativa.

También influyen las características (relacionadas con la velocidad) del tramo de carretera por el que se acaba de pasar, y la percepción de las correspondientes al tramo inmediatamente siguiente. En condiciones favorables de circulación y de entorno, los conductores pueden mantener la velocidad que juzgan más adecuada: generalmente mayor en las rectas y menor en las curvas. Contrariamente a una opinión bastante extendida, las velocidades en las curvas, por sí solas, no son un buen indicador de la distribución de velocidades en el tramo: tiene mucha influencia la proporción de alineaciones rectas o de poca curvatura.

e) La **densidad** y la composición del tráfico y, especialmente, la proporción de vehículos pesados. Según Polus y otros (II), hay una correlación negativa entre la velocidad operativa y el volumen del tráfico. En condiciones de tráfico poco intenso (por debajo de 200 veh./h), no hay relación entre el volumen del tráfico y la operación de los vehículos. En el momento en que el flujo de tráfico supera ese umbral, comienza a haber una interacción de signo negativo.

f) Las circunstancias del **entorno**: día, noche, lluvia, niebla, nieve, hielo.

g) Las **ayudas** exteriores a la con-

ducción: señalización, balizamiento, alumbrado, etc. Para concretar la velocidad operativa hay que matizar claramente las condiciones de su determinación:

- Dado que una misma vía presta servicio bajo muy diversos regímenes, se suele referir la velocidad operativa a las condiciones más óptimas y claras, que corresponden a unas circunstancias meteorológicas **favorables**¹ y a un **flujo libre** de los vehículos².

- Por otro lado, hay que especificar qué usuario se considera **representativo** del grupo. En este sentido, se suele considerar como patrón el que mantiene una velocidad sólo superada por el 15% de los vehículos, la cual se asocia a la comodidad de la conducción (y *a fortiori* a su seguridad)³.

- También es necesario especificar cómo se observa y mide la velocidad. Al pasar por una sección, los vehículos lo hacen a distintas velocidades: hay una distribución **temporal** de las velocidades operativas. A lo largo de un tramo de carretera, un mismo vehículo mantiene un perfil variable de velocidad (más deprisa en los tramos fáciles, y menos en los complicados): hay una distribución **espacial** de las velocidades operativas.

Básicamente se dispone de tres opciones elementales:

1. Velocidades instantáneas en un tramo concreto de la vía. En los estudios sobre la capacidad y las condiciones generales de la corriente circulatoria⁴ se emplean generalmente estos valores **espaciales**.

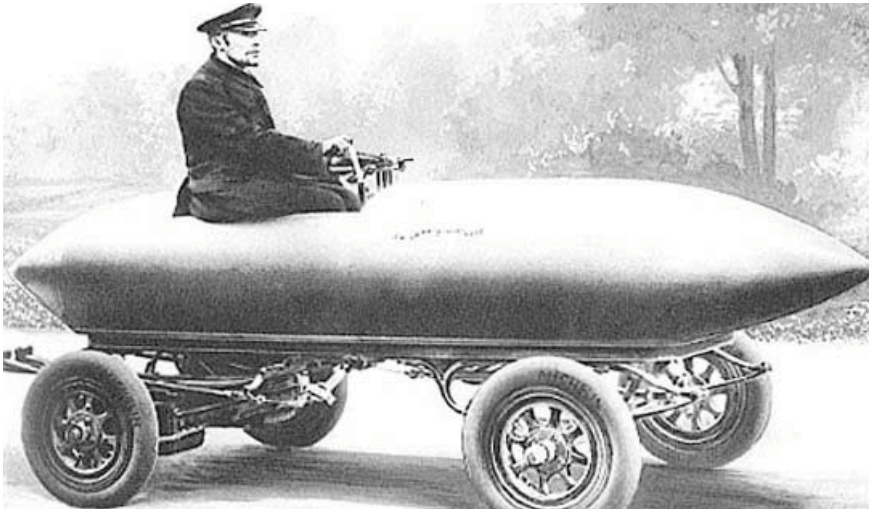
2. Velocidades de paso por una sección durante el periodo de observación. Para el diseño de la vía y en los estudios sobre las características

(1) De día y con el pavimento seco.

(2) En ese caso, se corresponde con lo que en Ingeniería de Tráfico se llama **velocidad libre**, con un intervalo mínimo de unos 5 s entre vehículos sucesivos por un mismo carril.

(3) Este planteamiento presupone la existencia de una distribución estadística de la población de velocidades, de la que se extraen muestras.

(4) Nivel de servicio y demás análisis contenidos en el Manual de Capacidad.



El primer vehículo que rebasó los 100 km/h. Era de vapor, y se le llamó "La Jamais Contente", o sea, "la nunca satisfecha".

de la circulación en puntos concretos (rectas, curvas, acuerdos verticales, nudos viarios, etc.), relacionados con las características del diseño, se emplean generalmente valores **temporales** que se concretan, salvo casos especiales, en las velocidades de los vehículos ligeros en situaciones próximas a las condiciones de flujo libre⁵.

3. Tiempos de recorrido de un tramo concreto en el periodo de observación⁶.

1.2. Velocidad de diseño

1.2.1. Introducción

A pesar de su aparente sencillez, el concepto de **velocidad de diseño** es bastante complejo y, por lo tanto, es importante aclarar su alcance.

Se trata de un concepto *a priori*, puesto que en muchos casos la vía ni siquiera se encuentra todavía materializada. Para su elección se atiende a un proceso de toma de decisiones, ligado a criterios y normas establecidos por el responsable de la infraestructura, donde resultan primordiales valoraciones de carácter social como la seguridad y la sostenibilidad del propio sistema de transporte viario⁷. La velocidad de diseño suele terminar siendo tan sólo un criterio para establecer un trazado consistente y coordinado.

Las hipótesis que se manejan para diseñar y señalizar las carreteras no pueden tener en cuenta simultáneamente las características de todos los vehículos (cuyas prestacio-

nes y dispositivos de seguridad pasiva son diferentes, y cuyo estado puede ser deficiente), ni los comportamientos de todos los conductores: cualquier criterio tendrá un campo de validez limitado. Por ello, es inevitable establecer un compromiso entre las posibilidades de que los casos más frecuentes los cubra el propio diseño de la vía, y el riesgo correspondiente a los casos no cubiertos más que por el control por parte del conductor.

En la práctica, se consideran dos etapas para manejar el concepto de velocidad de diseño:

- En primer lugar, se elige una velocidad de diseño para todo un itinerario, en función principalmente de la clasificación funcional de la carretera. Esa velocidad suele ser la mínima que la política de la Administración considera aceptable.

- Posteriormente, se divide la carretera en tramos⁸ de características homogéneas, y a cada uno de ellos se le asigna una velocidad de diseño no inferior a la mínima definida para todo el itinerario, en función de factores como el relieve del terreno, los usos del suelo, la percepción del usuario, etc.

De la velocidad de diseño dependen muchas decisiones, como las relativas a los radios de las curvas, a la longitud de los acuerdos verticales, a la visibilidad necesaria, a la anchura de la sección transversal, al tipo de

dispositivos de desagüe superficial, etc. Esas decisiones se basan en leyes físicas y en ciertas hipótesis acerca de las características de los conductores, de los vehículos y de la propia carretera: esas hipótesis suelen ser muy conservadoras, y proporcionan unos considerables márgenes de seguridad al diseño.

Debido a los problemas que se plantean si se diseñan las vías basándose exclusivamente en la velocidad de diseño, cada vez se tiende más a diseñarlas mediante criterios relacionados con las velocidades operativas, es decir: actuando directamente sobre el comportamiento del conductor a lo largo de la vía.

1.2.2. Historia

La velocidad de diseño tiene definiciones diferentes incluso dentro de un mismo país. Este concepto fue inicialmente desarrollado en EE.UU. en los años 30 del siglo XX, como una herramienta para diseñar en planta carreteras convencionales, de forma que la mayoría de usuarios desarrollara una velocidad uniforme a lo largo de ellas. La paulatina motorización de los vehículos a partir del comienzo de dicho siglo hizo que durante mucho tiempo tuvieran que convivir en la misma vía dos tipos de tráfico, uno motorizado y el otro no, con unas velocidades muy diferentes. Puesto que las vías existentes en esa época estaban diseñadas para vehículos no motorizados⁹, pronto aumentó el número de accidentes debido a su ina-

(5) Baja intensidad de la circulación, buen tiempo, luz diurna, etc.

(6) Coincide con la **velocidad de planeamiento**.

(7) La Administración dispone de dos estrategias generales: una referida a la hipótesis de una conducción responsable por parte de los usuarios (materializada en recomendaciones); y otra más paternalista, la cual puede adoptar una actitud más coercitiva o más indulgente frente a los errores de aquéllos.

(8) El concepto de tramo abarca una longitud limitada: lo que permite variar la velocidad de diseño a lo largo del itinerario, en función del entorno de la carretera perceptible por el usuario.

(9) El diseño de las vías en esa época estaba basado únicamente en la creación de rectas y curvas de radio constante, buscando la máxima adaptación posible al terreno. El diseño obtenido solía tener una muy baja consistencia, como se entiende hoy este concepto.

decuación para las velocidades de los motorizados.

En torno a 1930, Young expuso que *“las carreteras deben ser proyectadas en base a la velocidad, es decir: los tramos de las carreteras, preferiblemente los interurbanos, deberían tener curvas mayores para una misma velocidad teórica”*. Los bajos radios de las curvas se intentaban contrarrestar aumentando el peralte (sin superar un máximo).

La base para seleccionar la velocidad de diseño apareció en 1936 en los trabajos de Joseph Barnett, quien recomendó *“la velocidad de diseño de una vía convencional debería ser la máxima velocidad razonable que adoptaría el conductor más rápido de un grupo de vehículos, una vez fuera de las zonas urbanas”*. El objetivo de este razonamiento era dotar de un equilibrio al diseño de las vías: todo lo inesperado es siempre peligroso. Barnett expuso un método de diseño basado en dar un peralte derivado de las 3/4 partes del radio y cambiar el rozamiento transversal admisible. En resumen, Barnett seleccionó una velocidad de diseño adecuada basándose en un alto percentil de la distribución de velocidades operativas, mientras que Young la definió como una velocidad uniforme conforme a la mayoración de todas las curvas de la vía.

En 1938, la **AASHO** aceptó el concepto propuesto por Barnett con una modificación de la definición de velocidad de diseño: *“la máxima velocidad aproximadamente uniforme que será probablemente adoptada por el grupo más rápido de conductores, aunque no necesariamente por el pequeño porcentaje de temerarios”*. Esta modificación subrayaba la uniformidad de la velocidad a lo largo de un tramo de vía. Se pretendía seleccionar una velocidad de diseño adecuada, basada en los deseos razonables de la mayoría de los conductores, y diseñar los elementos del trazado de la carretera para acomodarse a ella. En los años cuarenta, el nuevo concepto se desarrolló en varios documentos de **AASHO**:

- *A Policy on Highway Types (Geometric)* (1940). Se determinaría la velocidad de diseño en base al relieve de la zona atravesada, a justificaciones económicas basadas en el volumen y características del tráfico, el coste de la vía, y a otros factores pertinentes como los de tipo estético.

- *A Policy on Criteria for Marking and Signing No-Passing Zones on Two and Three Lane Roads* (1940). La velocidad de diseño debería indicar la velocidad a la que los conductores deben circular en condiciones normales con suficiente margen de seguridad. Debería ser estimada midiendo la velocidad cuando la vía no está congestionada, relacionando las velocidades con el número o los porcentajes de vehículos, y escogiendo una que no sea inferior a la velocidad empleada por casi todos los conductores.

- *A Policy on Design Standards* (1941). Las velocidades de diseño serían 48, 64, 80, 96 y 113 km/h; y en cada tramo deberían estar basadas principalmente en las características de la zona, aunque el tráfico condicionara esta decisión: una vía con más tráfico presentaría una velocidad de diseño mayor que una con menos tráfico en un terreno de relieve similar.

- *A Policy on Design Standards* (1945). Se establecieron los siguientes valores estándar (km/h) para la velocidad de diseño:

Terreno	Mínima	Deseable
Llano	96	113
Ondulado	80	96
Montañoso	64	80
Urbano	64	80

Tabla 1.2-A

La definición de la velocidad de diseño evolucionó a lo largo del tiempo, volviéndose más abstracta. En 1954 la **AASHO**¹⁰ la cambió a la siguiente: *“máxima velocidad segura que puede ser mantenida en un tramo concreto de carretera, cuando las condiciones de la circulación y del entorno son tan favorables que lo que condiciona la conducción es el propio diseño de la carretera”*. Además, añadió más información sobre la velocidad de diseño:

- La velocidad de diseño estaría relacionada con las características físicas de la vía que tienen influencia sobre la circulación de los vehículos.

- La velocidad de diseño debería ser congruente con el relieve y los usos del suelo adyacente, y con la clasificación funcional de la vía.

- Todos los aspectos de la vía deberían ser diseñados teniendo en cuenta la velocidad de diseño, con el objetivo de obtener un diseño equilibrado.

- Siempre que fuera factible, se deberían usar valores superiores a los mínimos.

- La velocidad de diseño escogida debería ser consistente con las expectativas de los conductores.

- La velocidad de diseño escogida debería ajustarse a los objetivos y hábitos de prácticamente la totalidad de los conductores.

En esta nueva definición se introdujo el término *máxima velocidad segura*; se reconoció que la velocidad de circulación (e incluso el límite específico de velocidad) podían ser superiores a la de diseño sin necesariamente comprometer la seguridad; y se dio por sentado que un conductor elige su velocidad apreciando correctamente las características del diseño. Pero como no todos los conductores están familiarizados con las repercusiones de la velocidad de diseño sobre características como la curvatura (en planta o en alzado), la distancia de detención, etc., la velocidad que elijan puede no resultar siempre la más adecuada. Bajo este punto de vista, y para disponer de un cierto coeficiente de seguridad, los límites de velocidad deberían ser algo inferiores¹¹ a la velocidad de diseño.

En 1965 la **AASHO** repitió¹² la definición de 1954; y en 1973 la extendió a las vías urbanas. La velocidad media de diseño era la media ponderada de las velocidades de diseño en un tramo, considerando que cada

(10) En el documento *A Policy on the Geometric Design of Rural Highways*.

(11) 10-20 km/h.

(12) En el documento *A Policy on the Geometric Design of Rural Highways*.

subtramo tenía su propia velocidad de diseño, incluso 113 km/h en rectas largas.

En 1977, Leisch y Leisch (III) consideraron a la velocidad de diseño como una representación potencial de la velocidad operativa, determinada basándose en el diseño y en la correlación de las características físicas de la vía. Era un indicador de la máxima velocidad consistente con el trazado, cercana a la máxima velocidad que un conductor podía mantener en condiciones de seguridad en situaciones de meteorología ideales y en una situación de flujo libre. Serviría como un indicador de la calidad geométrica de la vía.

En 1984, 1990 y 1994 la ya **AASHTO** repitió¹⁴ la definición de 1954 y 1965.

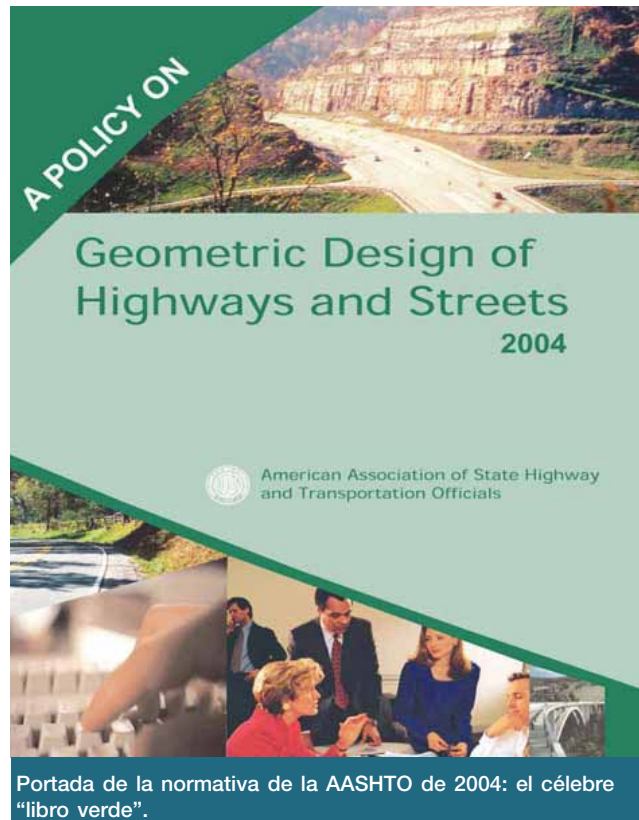
En 1988, el manual norteamericano que reglamenta los dispositivos de control del tráfico¹⁵ recalca que la velocidad de diseño estaba determinada por el trazado y por la relación de las características físicas de la vía que influyen sobre la circulación de los vehículos.

La Norma española 3.1-IC de 1999 indica que:

“El trazado de una carretera se definirá en relación directa con la velocidad a la que se desea que circulen los vehículos en condiciones de comodidad y seguridad aceptables.

Para evaluar cómo se distribuyen las velocidades en cada sección, se considerarán fijos los factores que incidan en ella relacionados con la clase de carretera y la limitación genérica de velocidad asociada a ella, así como las características propias de las secciones próximas. Se considerarán esencialmente variables la composición del tráfico (en particular el porcentaje de vehículos pesados) y la relación entre la intensidad de la circulación y la capacidad de la carretera.”

Lo anterior presupone que serán



Portada de la normativa de la AASHTO de 2004: el célebre “libro verde”.

respetados los límites genéricos de velocidad, lo cual dista de ser cierto; y define el trazado sin considerar velocidades superiores: lo cual puede dejar desprotegido, en materia de seguridad estricta, a una fracción apreciable de los conductores.

En 1997, 2000 y 2001 Fambro y otros recomendaron revisar la definición de velocidad de diseño para el Manual de trazado de la **AASHTO**, manteniendo las premisas descritas en 1954. La nueva definición recomendada era “la velocidad de diseño es una velocidad seleccionada para diseñar determinados aspectos de la vía”: una definición que resulta algo circular. El término “seguridad” se eliminó de la definición, con el objetivo de evitar la percepción de que velocidades superiores a la velocidad de diseño no fueran seguras. Esta definición se adoptó por la **AASHTO** en el *Green Book* del año 2001; y sobre su selección se dijo lo siguiente:

- La velocidad de diseño debería ser congruente con el relieve y los usos del suelo adyacente, y con la clasificación funcional de la vía.
- Excepto para las carreteras locales, habría que tratar de conseguir el

máximo grado de seguridad, movilidad y eficacia compatible con los condicionantes externos.

- La velocidad de diseño elegida debería ser consistente con la velocidad que un conductor espera del entorno, ya que aceptará de mejor grado un descenso de la velocidad si los condicionantes externos sugieren la necesidad de dicha disminución, mejor que si se lo imponen sin justificar.
- En terrenos de relieve similar, una vía de mejor rango funcional podría justificar una velocidad de diseño mayor que otra de menor importancia. En cambio, no se debería emplear una baja velocidad de diseño en una carretera secundaria, en un terreno cuyo relieve per-

mitiera a los conductores circular a altas velocidades. Esto era debido a que los conductores ajustan su velocidad a las condiciones del entorno, mejor que a la clasificación funcional de la carretera.

- La velocidad seleccionada para el diseño debería ajustarse a los hábitos y expectativas de la mayoría de los conductores.

- Otro factor que se podría considerar en la selección de la velocidad de diseño es la longitud media del desplazamiento. Para una mayor distancia que recorrer, los conductores desearían una mayor movilidad.

Debido a los problemas generados por la ambigüedad de la definición y por el amplio rango de criterios para su selección y aplicación, Krammes y Glascock propusieron añadir otra cláusula: aplicar la velocidad de diseño únicamente a curvas en planta y a acuerdos verticales, pero no a las rectas y rasantes uniformes intermedias.

(13) En el documento A Policy on the Design of Urban Highways and Arterial Streets.

(14) El muy conocido Green Book o Libro Verde.

(15) Manual on Uniform Traffic Control Devices, (**MUTCD**).

Según las últimas recomendaciones de **AASHTO**, la velocidad de diseño debería ser prácticamente coincidente con el percentil 95 de la distribución de la velocidad operativa. Sin embargo, esta velocidad de diseño es una cota inferior de las velocidades de diseño de los diferentes elementos: habrá, a lo largo de un mismo trazado, elementos que presenten una velocidad de diseño mayor, induciendo por tanto velocidades operativas aún mayores (y por tanto pudiendo ser una fuente de inconsistencias).

1.2.3. Fractil de referencia

En cualquier caso, la velocidad de diseño debe ajustarse a los deseos y costumbres de casi todos los conductores, y comprender la casi totalidad de las velocidades deseadas por éstos, donde resulte factible:

- No sería práctico acomodar las velocidades deseadas por **todos** los conductores, pues los deseos de algunos de éstos son irrazonablemente veloces. Por ejemplo, no conviene diseñar para velocidades elevadas las calles residenciales. Para ser razonables, sólo hay que acomodar a **casi todos** los conductores. Los más rápidos deben soportar de buen grado un cierto grado de incomodidad en sus maniobras: lo cual parece confirmado por la experiencia.

- Sólo se puede admitir que una fracción muy pequeña de conductores muy rápidos se sitúe fuera de unas condiciones límite de seguridad, especialmente en lo relativo a maniobras de emergencia; aun así, se trata en general de conductores muy expertos, con vehículos de altas prestaciones y buenas medidas de seguridad activa y pasiva, que pueden tolerar maniobras más bruscas y condiciones más estrictas de seguridad. Para los demás conductores, las condiciones de seguridad (y su señalización) no deben resultar excesivamente restrictivas y, por tanto, menos creíbles y poco respetadas.

- En muchos casos, referirse a fractiles altos de la distribución de velocidades resulta *prima facie* excesivo. Así ocurre con la velocidad de un vehículo lento al que se pretende ade-

lantar, y a partir de la cual se inicia una maniobra de adelantamiento desde una posición de seguimiento: esta velocidad tiene forzosamente que ser reducida¹⁶. Adoptar valores superiores conduce a unas distancias de adelantamiento muy largas.

Muchos factores influyen en el diseño de una carretera, y su importancia puede ser decisiva: el relieve, el medio ambiente, el uso del suelo y otros temas pueden convertir en muy costoso, o incluso en inaceptable, un diseño que acomodaría los deseos de casi todos los conductores. Por ejemplo, se puede querer mejorar el radio de una curva o la longitud de un acuerdo vertical para permitir una mayor velocidad; pero esto puede no resultar posible si se invade una montaña, un río u otro rasgo natural en una zona ambientalmente frágil. La mención a donde resulte factible reconoce esta limitación; aunque la normativa recomienda emplear una velocidad de diseño lo más elevada posible, siempre que no haya impedimento y resulte fácil y no costoso. Por ejemplo, en La Mancha cuesta casi lo mismo adoptar una velocidad de diseño de 120 km/h que una de 140 km/h: ¿está justificado hablar sólo de la primera?

1.3. Velocidad deseada

La **velocidad deseada** es una variable auxiliar y no directamente medible, empleada a veces para la predicción de velocidades operativas. Su definición es: la *velocidad que el conductor desea mantener en condiciones de flujo libre, donde el trazado y otras variables (como la visibilidad) no le coartan*. Por ello se suele estimar como la velocidad máxima del vehículo en rectas largas o en curvas muy amplias, en las cuales el conductor alcanza y luego mantiene esa velocidad.

La velocidad deseada es diferente para cada conductor, e influyen en ella numerosas variables independientes de la vía y asociadas a otras causas, como el propósito del viaje, el conocimiento previo de la vía, la longitud total estimada del desplazamiento, etc. No sólo es una variable cuya estima-

ción depende tanto del trazado de la vía como de su clasificación funcional, sino que su variabilidad es muy grande. El modelo general establecido por McLean (IV) es:

$$V_{85} = 53,8 - \frac{3\,260}{R} + \frac{85\,000}{R^2} + 0,464 \cdot V_d$$

siendo: V_{85} (km/h) el percentil 85 de la distribución de velocidades operativas.

V_d (km/h) la velocidad deseada.

R (m) el radio de la curva.

En un estudio de Crisman y otros (V) se analizó la velocidad deseada (denominada también *velocidad ambiental*). En otro estudio (VI) ofrecieron para ella la expresión siguiente (figura 1.3-A):

$$V_d = 239,49 \cdot (\text{CCR})^{-0,1875}$$

siendo:

V_d (km/h) la velocidad deseada.

CCR (gon/km) la sinuosidad del tramo de carretera (su tasa de cambio de curvatura).

1.4. Velocidad específica

Como una primera aproximación a las velocidades operativas para deducir de ellas las de diseño, en España se emplean desde los años sesenta¹⁷ las velocidades específicas de cada uno de los elementos del trazado¹⁸, deducidas de sus características geométricas en base a unos criterios de seguridad muy parecidos a los adoptados por la **AASHTO** en 1954 para la velocidad de diseño.

La **velocidad específica** de los distintos elementos de la vía representa la **oferta** que ésta hace a los conductores que la interpretan correctamente. Para ello se les informa, en ciertos casos, mediante una señalización específica. Sin embargo, en la práctica el comportamiento de los conductores no siempre se atiene a las hipótesis subyacentes a la definición de la velocidad específica. Tiene que corresponder a parámetros de seguridad y de comodidad, los

¹⁶ ¡Se trata de adelantar a un vehículo lento!

(17) Instrucción 3.1-IC de 1964.

(18) Muy especialmente, las de las curvas en planta.

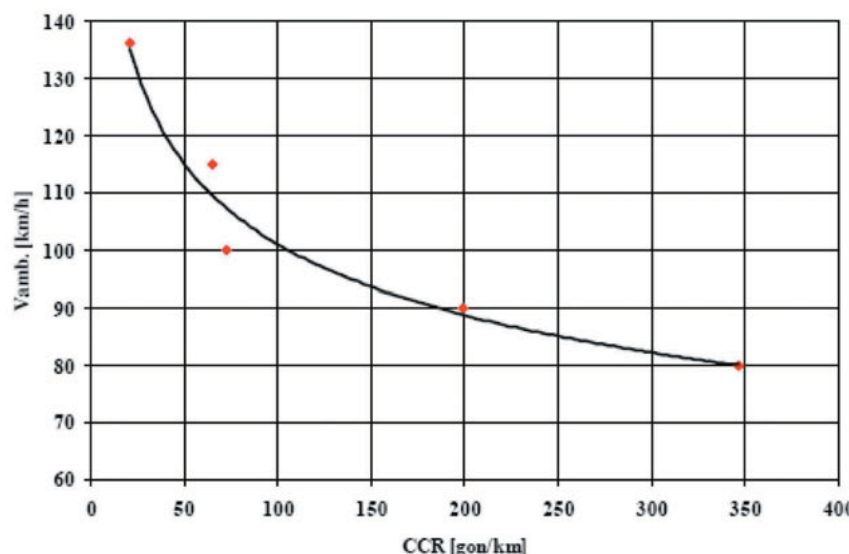


Figura 1.3-A. Relación entre la velocidad deseada y la sinuosidad del trazado en planta. (Fuente: Ref. VI)

La Norma **3.1-IC** de 1999 define la velocidad específica de un elemento de trazado como la *máxima velocidad que puede mantenerse a lo largo de un elemento de trazado considerado aisladamente, en condiciones de seguridad y comodidad, cuando encontrándose el pavimento húmedo y los neumáticos en buen estado, las condiciones meteorológicas, del tráfico y legales²⁰ son tales que no imponen limitaciones a la velocidad.*

De esta manera, las condiciones geométricas de un elemento del trazado determinan su velocidad específica. Sin embargo, en la actual Norma **3.1-IC** alguna de estas condiciones se relaciona con la velocidad de proyecto: lo cual parece más bien una errata, y debe ser subsanada.

Las condiciones en las que se define la velocidad específica corresponden sensiblemente al percentil 85 de la distribución de las velocidades operativas, y se refieren básicamente a la comodidad de los usuarios. Los límites de una seguridad estricta (que sólo se rebasarían por menos del 1% de los usuarios²¹) se referirán

cuales deben ser comprobados en cada uno de los elementos de manera que su velocidad específica no sea inferior a la operativa; de lo contrario una u otra, o ambas, deben ser modificadas.

- Cuando la vía se encuentra en fase de proyecto, se puede estimar la velocidad operativa en cada tramo e incluso en cada elemento, mediante técnicas de simulación.

- En la fase de explotación, la observación directa de las velocidades operativas permite juzgar el nivel de consistencia alcanzado por el diseño. Donde las velocidades específicas son muy diferentes entre elementos contiguos, se generan **inconsistencias** en el trazado, pues se presentan diferencias entre ellas y las velocidades operativas.

El razonamiento anterior implica que a lo largo de un tramo de carretera hay una sucesión de velocidades específicas derivadas de las características de cada uno de los elementos del trazado. Así, la velocidad específica de una curva circular sería la máxima velocidad que se puede mantener en condiciones de seguridad¹⁹ en una curva circular de longitud suficiente, cuando las circunstancias meteorológicas y de tráfico son tan favorables, que las únicas limitaciones vienen determinadas por las características geométricas de la curva circular. Esta definición se podría exten-

der a cualquier elemento del trazado de características geométricas constantes a lo largo de todo él. A veces, este paradigma puede resultar poco intuitivo: resulta fácil asignar una velocidad específica a una curva, pero lo es mucho menos asignarla a una alineación recta.

Obsérvese que, de esta manera, la velocidad específica de una curva con

RELIEVE DEL TERRENO	IMD (veh.)		
	< 500	500 a 2 000	> 2 000
Llano	70	100	120 - 100
Ondulado	60	80	100 - 80
Accidentado	50	60	
Muy accidentado	30	40	80 - 60

Tabla 1.4-A. Velocidades específicas mínimas (km/h).

un radio superior al “radio mínimo correspondiente a la velocidad de proyecto” será igual a la velocidad de proyecto que tenga asociado ese radio como mínimo.

La Instrucción **3.1-IC** de 1964 prescribía que, a lo largo de un tramo de carretera, la velocidad específica de cada uno de sus elementos no debería ser inferior al valor que para ella se fijaba en la *tabla 1.4-A* en función del relieve del terreno y de la **IMD**. En cuanto a esta última, no se especificaba si se tomaría la del año de la puesta en servicio o la del año horizonte; aunque del contexto se puede deducir que se trata de esta última.

a otras condiciones también más estrictas: especialmente en lo relativo a los rozamientos movilizados (tanto transversales como longitudinales) que se consideren admisibles. Éstos podrán acercarse entonces a los valores de la resistencia al deslizamiento más que en el caso de la comodidad.

(19) Los parámetros empleados para definir la velocidad específica son, sin embargo, muy conservadores; están relacionados más bien con la comodidad que con la seguridad; y disponen de apreciables márgenes de seguridad respecto de la seguridad estricta.

(20) Se involucra así al límite de velocidad (genérico o específico) en la definición de la velocidad específica.

(21) Percentil 99.

La diferencia entre la velocidad correspondiente a unas condiciones de seguridad estricta y la velocidad específica (correspondiente a unas condiciones de comodidad) subyace al concepto de visibilidad deseable de parada que fija el apartado 3.2.2 de la Norma: se ha fijado esa diferencia en 20 km/h, pero no se han adoptado valores más altos para el rozamiento longitudinal movilizado admisible. Esa diferencia no debería ser inferior a un valor fácilmente entendible por los conductores, y representativo del riesgo que están acostumbrados a asumir: por ejemplo, desde unos 10 km/h para velocidades muy bajas (del orden de 15 km/h), hasta unos 35 km/h para velocidades altas (90 km/h ó más) (figura 1.4-A).

Entre las características de los elementos del trazado, se ha comprobado que es la curvatura en planta la que más restringe la velocidad específica.

- En las zonas urbanas, la frecuentemente escasa disponibilidad de espacio obliga a mayores curvaturas, que se corresponden bastante bien con las menores velocidades que se practican en esos entornos.

- Fuera de poblado, consideraciones relacionadas con el coste de construcción pueden obligar a limitar la velocidad específica para acoplar el trazado a terrenos de relieve acentuado, especialmente en zonas aisladas. Pero no se debe olvidar que, si bien los conductores aceptan fácilmente limitar su velocidad operativa en zonas evidentemente difíciles, en otras que no lo sean tanto aceptan riesgos mayores y rebasan con facilidad las condiciones de seguridad, especialmente las relacionadas con la visibilidad....

Se plantea, entonces, la cuestión de qué hacer donde no se pueda mantener una velocidad específica suficiente: especialmente en relación con el tránsito por curvas circulares y con la visibilidad de parada. En relación con el primero, no tiene tanta importancia la velocidad específica de una curva aislada, aunque sea baja; sino más bien cómo

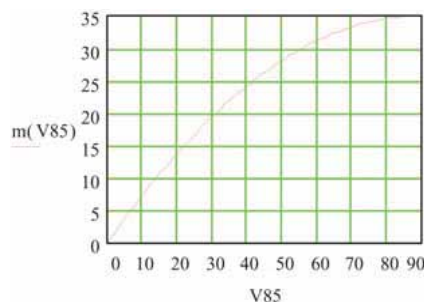


Figura 1.4-A. Margen de seguridad en función de la V85.

mo se llega a ella de una forma fácilmente legible por el conductor, y sin confiar excesivamente en la señalización. La reducción de velocidad se tiene que acompasar a una perceptibilidad de la curva, enfatizada por el balizamiento: este concepto se recoge en el apartado 6 de la Norma 8.1-IC "Señalización vertical", según el cual la intensidad de la señalización y del balizamiento de una curva depende del grado de la curva, o sea la diferencia entre la velocidad máxima de aproximación a la curva, y la velocidad máxima en ésta²².

1.5. Velocidad de proyecto

En la Norma complementaria de la 3.1-IC "Trazado" para autopistas (1976):

- Se definió la **velocidad de proyecto** de un tramo de carretera como *la que permite definir las características geométricas mínimas de construcción los elementos particulares de una autopista o tramo de autopista*. Es decir, se trata de una velocidad de diseño.

- Se definieron asimismo cuatro velocidades de proyecto para sendos tipos de vía: 80, 100, 120 y 140 km/h.

- Se recomendaba que la velocidad de proyecto de dos tramos contiguos no difiriera en más de 20 km/h; y en caso contrario, que se intercalara(n) otro(s) tramo(s)²³ de modo que se cumpliera esa limitación.

La Norma 3.1-IC de 1999 mantiene una definición análoga a la anterior: la velocidad de proyecto de un tramo es *la que permite definir las características geométricas mínimas de los elementos del trazado, en condiciones de comodidad y seguridad;* y

la identifica con la velocidad específica mínima del conjunto de elementos que componen el tramo.

Queda claro así que la velocidad de proyecto de un tramo representa la **oferta mínima** del tramo en materia de velocidades específicas: aunque se está así representando la distribución espacial (y hasta cierto punto, también la temporal) de esas velocidades, relacionadas con las operativas, por un solo parámetro (y no el valor medio, sino el mínimo), en vez de dos como es habitual.

Sin embargo, en la Norma de 1999 y para algunos criterios como la visibilidad, la velocidad de proyecto desempeña el papel que en la normativa anterior correspondía a la velocidad específica. Eso no parece conveniente porque, si la definición de la velocidad de proyecto no corresponde precisamente a él, cualquier elemento del trazado diseñado podrá ser recorrido en condiciones de seguridad y comodidad a su velocidad específica, que será mayor que la de proyecto; y en relación con los mencionados criterios, se pueden llegar a consumir los márgenes de seguridad disponibles.

Otra particularidad de la Norma de 1999 es que desaparece la velocidad de proyecto de 140 km/h que figuraba en la complementaria de 1976, so pretexto de que es superior al mayor límite genérico de velocidad entonces vigente (130 km/h en autopistas y autovías). Sin entrar en discusiones acerca de cuál es la velocidad específica de una alineación recta suficientemente larga, lo que parece en cualquier caso deseable es que las características relacionadas con una velocidad específica de 120 km/h proporcionen una seguridad estricta (no comodidad) suficiente a los vehículos que circulen a 155 km/h (un margen de 35 km/h sobre dicho límite).

1.6. Velocidad de planeamiento

La Norma 3.1-IC de 1999 introduce el concepto de **velocidad de planeamiento**.

(22) Ambas referidas ¡al fractil 99!

(23) De una longitud no inferior a 5 km.



¿Qué diferencia habrá entre la velocidad de planeamiento y la de proyecto en esta carretera noruega?.

neamiento, como la media armónica de las velocidades específicas de los elementos del trazado en planta de tramos homogéneos de longitud superior a 2 km:

$$\bar{V} = \frac{\sum L_i}{\sum \frac{L_i}{V_i}}$$

siendo: $\bar{V}$ la velocidad de planeamiento del tramo, para el fractil considerado.

V_i la velocidad específica (constante) en cada elemento del tramo, para ese mismo fractil.

L_i la longitud del elemento.

El fractil de referencia de la distribución parece ser el 85.

Asimismo indica la citada Norma que, al estudiar el trazado de un tramo, se calculará la velocidad de planeamiento y se comparará, tanto con la velocidad de proyecto del tramo como con las velocidades proyecto y de planeamiento de los tramos adyacentes, para estimar la homogeneidad de la geometría del tramo (aunque no se expone el criterio para dicha estimación).

La velocidad de planeamiento es uno de los parámetros más relevantes para el trazado de una carretera:

- Su definición se aplica a un tramo de cierta longitud²⁴; y en el proceso de planeamiento el tiempo de

recorrido de dicho tramo es un parámetro de gran significado.

- Representa un objetivo, elegido política y administrativamente en función del tipo de carretera y de un estudio de la rentabilidad de la inversión, en el que tiene gran influencia el relieve del terreno que atraviesa: una carretera en terreno llano será recorrida a mayor velocidad²⁵ que otra carretera en terreno accidentado, o situada en una zona de intenso uso del suelo.

Según la Norma, las velocidades de proyecto y de planeamiento que se adopten estarán en general definidas por estudios de carreteras (como un Estudio informativo) en función de los siguientes factores:

- Las condiciones topográficas y del entorno.
- Las consideraciones ambientales.
- La consideración de la función de la vía dentro del sistema de transporte.
- La homogeneidad del itinerario o trayecto.
- Las condiciones económicas.
- Las distancias entre nudos, y el tipo de los mismos.

1.7. Límite de velocidad

Algunas de las influencias sobre la velocidad operativa se hallan condensadas en conceptos como la veloci-

dad límite; aunque la influencia de ésta no es tan amplia como cabría esperar.

En gran medida la influencia de la velocidad límite sobre la velocidad operativa es función de la percepción que los conductores tienen de las limitaciones que impone la vía. De este modo, se puede observar cómo en las curvas en planta la velocidad límite es una variable con casi nula influencia, ya que los conductores por sí solos ya perciben que deben generalmente disminuir su velocidad; mientras que en las alineaciones rectas la velocidad límite se convierte en una de las variables de mayor influencia, ya que los conductores no son capaces de percibir un límite a la velocidad operativa.

Del planteamiento anterior se deduce la necesidad de una relación entre la velocidad de diseño y la velocidad límite. En el caso en que ambas estén próximas, la velocidad operativa tenderá a situarse en ese mismo intervalo. En el caso de que ambas

(24) Por ejemplo, entre dos nudos viarios u otros elementos notables del itinerario; y de una longitud no inferior a 2 km, y preferiblemente a 5 km. Se podrían aplicar también criterios basados en la uniformidad de la tasa de variación de la curvatura (CCR).

(25) Y a ella corresponderá una velocidad de planeamiento más alta.

sean muy diferentes, la velocidad operativa tenderá a situarse en un valor cercano al que los conductores consideren seguro.

Los conductores escogen una velocidad en su conducción basada en la percepción que tienen de la vía:

- Si ésta presenta unas características que permiten a los conductores circular a mayor velocidad, el comportamiento general de éstos será el de aumentar su velocidad.

- En el caso contrario, los conductores circularán a menor velocidad.

En muchas ocasiones la velocidad de diseño es menor que aquella a la que los conductores piensan que pueden circular de forma segura (por ejemplo, en la aproximación a una curva estricta). En estos casos el diseño de la vía obliga a que los conductores adapten su velocidad a la que la vía permite en condiciones seguras, mediante la instalación de elementos de ayuda o coacción a la conducción (ejemplo, señales de curva peligrosa o limitaciones de velocidad).

En el caso de las limitaciones de la velocidad puede suceder lo mismo. Si el diseño de la vía implica que el conductor piense que un límite bajo no tiene justificación, su velocidad operativa no se adaptará a él. En estos casos se debe forzar al conductor a que identifique la velocidad operativa óptima como una cercana a la de diseño. Partiendo de la hipótesis de que el trazado no varía, la coacción a la velocidad operativa se debe centrar en otro tipo de elementos, como la anchura de los carriles, etc. Actuando sobre estos elementos también es posible condicionar la velocidad operativa de los conductores (VII).

Numerosos investigadores han estudiado la influencia de la velocidad límite en la operativa. Esta influencia, por otra parte, es evidente, ya que la propia velocidad operativa es un factor que se debe tener en cuenta a la hora de seleccionar la velocidad límite en una vía.

Sólo Alemania, el Reino Unido y Suecia reconocen explícitamente la re-

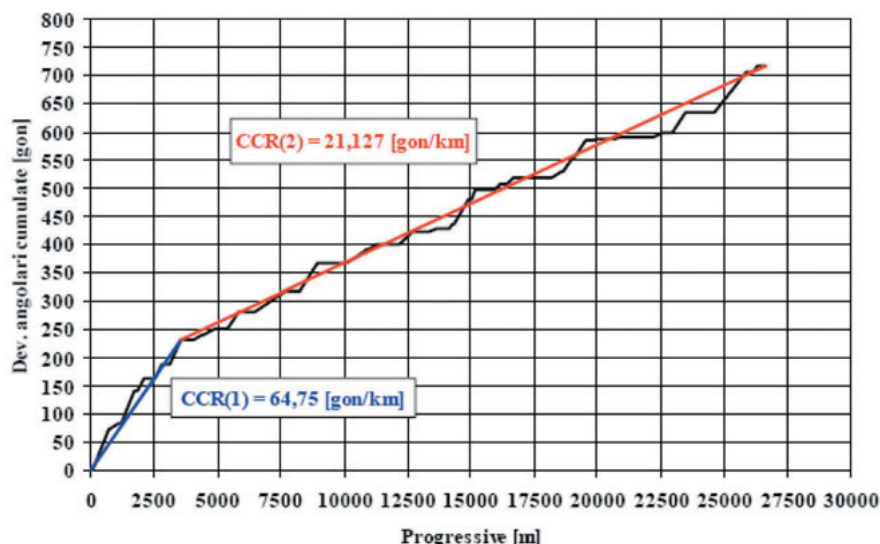


Figura 1.3.A. Identificación de tramos de trazado homogéneo, en un diagrama distancias al origen – variaciones acumuladas de acimut. (Fuente: Ref. VI).

lación entre la velocidad de diseño y el límite de velocidad:

- En la mayoría de las autopistas alemanas no hay límite genérico de velocidad; para ellas las condiciones de diseño corresponden a una velocidad recomendada de 130 km/h. En el resto de las carreteras la velocidad de diseño se corresponde aproximadamente con el límite.

- En el Reino Unido se reconoce que en un entorno urbano no resulta factible estimar las velocidades operativas en los tramos entre intersecciones. Por lo tanto, la estimación se debe basar en la experiencia y en la presencia de limitaciones de la velocidad.

- En Suecia se compararon las velocidades operativas y los límites de velocidad en los años setenta. Se comprobó que el percentil 85 de la distribución de las velocidades operativas era superior al límite en todos los casos excepto en las carreteras convencionales interurbanas principales.

En general es conocido y se acepta que el percentil 85 de la distribución de la velocidad operativa supera notablemente la velocidad límite.

Referencias

(I) Krammes, Raymond A.; Fitzpatrick, Kay; Blaschke, Joseph D.; Fambro, Daniel B.: *Speed. Understanding Design, Operating and Posted Spe-*

ed. Report No. 1465-1. Texas Transportation Institute, marzo 1996.

(II) Polus, Abishail; Livneh, Moshe; Craus, Joseph: *Effect of Traffic and Geometric Measures on Highway Average Running Speed, Transportation Research Record no. 960*, págs. 3439, 1984.

(III) Leisch, J. E.; Leisch, J. P.: *New Concepts in Design-Speed Application. Transportation Research Record 631*, págs. 4-14. (1977).

(IV) McLean J. R.: *Driver Speed Behaviour and Rural Road Alignment Design - Traffic Engineering and Control vol. n° 22, n°4*, abril 1981.

(V) Crisman, Bruno; Marchionna, Aurelio; Perco, Paolo; Roberti, Roberto: *Operating Speed Prediction Model For Two-Lane Rural Roads. Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Trieste 2005.*

(VI) Crisman, Bruno; Fugaro, Luigi; Marchionna, Aurelio; Roberti, Roberto: *Modello di Previsione delle velocità praticate dagli utenti attraverso la definizione di una velocità ambientale. XIII Convegno Nazionale S.I.I.V. - Padua (Italia) - 30/31 ottobre 2003.*

(VII) Stamatiadis, N.; Gong, H.: *Analysis of Inconsistencies Related to Design Speed, Operating Speed and Speed Limits. Kentucky Transportation Center. University of Kentucky. 2004.*

(Continuará en el próximo número (RUTAS 142). ■