

La velocidad: ¿Hacia un enfoque realista?

Por SANDRO ROCCI
Dr. Ingeniero de Caminos,
Canales y Puertos



Dentro de los comportamientos anómalos son de destacar la negligencia y la temeridad que en muchas ocasiones se sustentan en los efectos nocivos del alcohol y las sustancias psicotrópicas.

1. Introducción

1.1. El comportamiento de los conductores

UNA carretera tiene un elevado grado de fijeza en sus elementos y, sin embargo, debe acomodar a un tráfico de intensidad y velocidad variables, tanto en el espacio como en el tiempo, y en general no conducido por profesionales, como sucede en el transporte ferroviario, aéreo o marítimo.

En relación con los comportamientos de los conductores, los artículos 2, 3 y 17 del vigente Reglamento General de Circulación (RGC) prescriben que

– "... los usuarios de la vía están obligados a comportarse de forma que no... causen peligro... a las personas o daños a los bienes..."

– "... se deberá conducir con la

diligencia o precaución necesarias para evitar todo daño, propio o ajeno, cuidando de no poner en peligro tanto al mismo conductor como a los demás ocupantes del vehículo y al resto de los usuarios de la vía..."

– "...los conductores deberán estar en todo momento en condiciones de controlar sus vehículos..."

No obstante estas disposiciones legales, algunos conductores tienen comportamientos anómalos, tales como:

– **Negligencia** para interpretar la señalización, hacerse una idea exacta del trazado de la carretera, evaluar correctamente las distancias y velocidades de los demás vehículos, etc. Puede ser permanente (conductor distraído) o, más frecuentemente, transitoria provocada por el cansancio (somnolencia).

– **Temeridad**: apurar las presta-

ciones del vehículo, despreciar la señalización y normativa, y conducir a mayor velocidad de la adecuada, según su percepción personal de la carretera y su entorno.

– Combinación de las dos conductas anteriores, en general bajo el efecto del alcohol o estupefacientes y sustancias psicotrópicas.

Estas conductas anómalas podrían evolucionar en el futuro, a través de cambios en las pautas culturales de la población, desde una situación de dirigismo no siempre respetado, hacia una libertad responsable basada en la información. Pero, en el momento actual, y para tratar de prevenirlas, en todas las reglamentaciones relativas a la circulación se incluyen preceptos que recuerdan la obligación que tiene todo conductor de ser, en todas las circunstancias, dueño de su vehículo, de forma

“**C**onviene no confundir el alcance de una reglamentación jurídica, en la que las conductas correctas o defectuosas están claramente especificadas, del correspondiente a una normativa técnica, rara vez pensada para fundamentar en ellas procesos legales.”

que pueda ajustarse a las exigencias de la prudencia y estar constantemente en disposición de efectuar las maniobras que le incumban.

1.2. ¿De qué sirve la normativa?

Además del control de su vehículo al que está obligado, el conductor se puede ver ayudado por una señalización que le sirva de referencia para ajustarse a los supuestos (que, en general, desconoce) que sirvieron para diseñar la carretera.

Sin embargo, las hipótesis que se manejan para diseñar y señalar las carreteras no pueden tener en cuenta simultáneamente las características de todos los vehículos (cuyas prestaciones y dispositivos de seguridad pasiva son diferentes, y cuyo estado puede ser deficiente), y 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 cobertura de casos, y el riesgo correspondiente a los casos no cubiertos más que por el citado control por parte del conductor.

A este respecto, conviene no confundir el alcance de una reglamentación jurídica, en la que las conductas correctas o defectuosas están claramente especificadas, del correspondiente a una normativa técnica, rara vez pensada para fundamentar en ella procesos legales y en la que, al considerar una multitud

de factores externos de difícil cuantificación, entre lo deseable y lo prohibido hay una amplia gama de soluciones más o menos aceptables.

Así, por ejemplo, una señal R-301 indica la "... prohibición de circular a velocidad superior a la indicada en (ella)...", pero no informa de las razones que han llevado a su colocación. La infracción de la prohibición, pues, da lugar a una infracción susceptible de sanción (reglamentación jurídica), pero no se puede inferir de aquella la posibilidad o gravedad de un accidente; mientras que una reglamentación técnica intentará cuantificar estas consecuencias, siquiera de forma simplificada, para establecer unos criterios de implantación de la señal.

Por tanto, no siempre resulta posible delimitar con exactitud reglas que obliguen en todos los casos; y se pueden admitir más o menos excepciones y matizaciones sin caer en una transgresión. En definitiva, hay pocos blancos y negros, y más bien muchos tonos de gris.

1.3. El caso de la velocidad

El Reglamento General de Circulación dedica algunos preceptos a la velocidad:

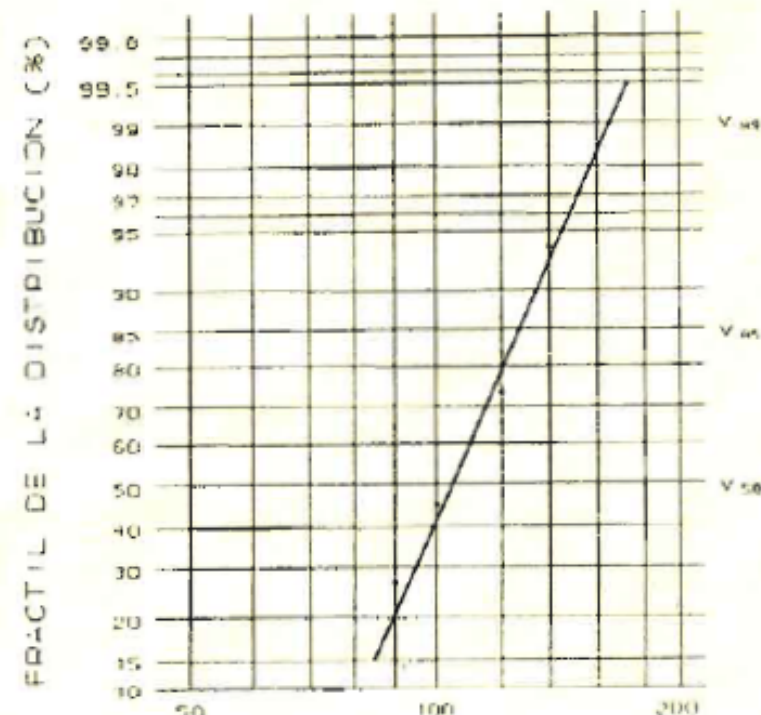


Fig. 1. Media en autopistas (1992).

– "... todo conductor está obligado a respetar los límites de velocidad establecidos y a tener en cuenta, además, sus propias condiciones físicas y psíquicas, las características y el estado de la vía, del vehículo y su carga, las condiciones meteorológicas, ambientales y de circulación y, en general, cuantas circunstancias concurren en cada momento, a fin de adecuar su velocidad a las mismas, de manera que siempre pueda detenerlo dentro de los límites de su campo de visión y ante cualquier obstáculo que pudiera presentarse..."

– "... se circulará a velocidad moderada y, si fuera preciso, cuando las circunstancias lo exijan..."

Una gran parte de los accidentes con víctimas, sobre todo de los mortales, está relacionada con una **velocidad inadecuada**, derivada no sólo de la inobservancia de las limitaciones establecidas, sino también de una estimación incorrecta de la velocidad a que la carretera puede ser recorrida con **seguridad**. Debido a estos tipos de conducta, resulta muy importante para la seguridad de la circulación:

- Que la velocidad que se tiene en cuenta para proyectar la carretera sea comprendida por el usuario.

- Que, en los casos en que sea necesario limitar la velocidad por medio de una señalización específica, esta limitación esté justificada, resulte creíble, y sea respetada.

- Que las características y señalización de las carreteras de las distintas clases y redes se refieran a criterios homogéneos.

2. ¿La velocidad no es constante!

2.1. Distribución temporal de velocidades

2.1.1. Factores que influyen.

La experiencia muestra que, en una misma sección de una carretera, no todos los vehículos circulan a la misma velocidad; sino que existe en dicha sección una **distribución temporal de velocidades**, en la que influyen:

- La clase de carretera y la limitación genérica de velocidad a ella asociada.

- Las características del tramo de carretera por el que acaban de pasar, relacionadas con la velocidad, y su percepción de las correspondientes al tramo inmediatamente siguiente.

- La composición del tráfico y, especialmente, la proporción de vehículos pesados.

- La relación entre la intensidad de la circulación y la capacidad de esa sección de carretera.

- La climatología favorable o adversa (lluvia, niebla, nieve, hielo).

- Las ayudas exteriores a la conducción: balizamiento, señalización, iluminación, etc.

En condiciones favorables de circulación y climatología, influyen de manera decisiva las limitaciones que representan los elementos del trazado con características reducidas, representados principalmente por las curvas en planta.

En cuanto a las limitaciones que se derivan de una insuficiente visibilidad, la mayoría de los conductores no suele moderar por ello su velocidad, aceptando un riesgo mayor que, en ciertos casos, puede resultar excesivo. También hay que tener en cuenta que ciertos conductores no respetan una seña-



La experiencia muestra que en una misma sección de una carretera, no todos los vehículos circulan a la misma velocidad.

lización limitativa de la velocidad.

2.1.2. Forma de la curva de distribución.

A partir de las campañas de aforo y pesaje de vehículos, realizadas por el Centro de Estudios de Carreteras (CEDEX) y otros, se han podido establecer unas curvas de distribución acumulada como las representadas en la Fig. 1, que muestran una buena aproximación a una distribución de GALTON (logarítmico-normal), coherente con que no hay velocidades negativas ni infinitas. Los valores de algunos fractiles representativos, y la razón entre ellos, se muestran en la tabla 1.

la señalización de una carretera. En relación con esta decisión, se pueden hacer las consideraciones siguientes:

- Un trazado que proporcione una circulación cómoda para los fractiles más altos de velocidad resultaría muy caro. Por tanto, los conductores rápidos deben estar dispuestos a admitir un cierto grado de incomodidad en sus maniobras: lo cual parece cierto.

- Sólo una fracción muy pequeña de conductores muy rápidos puede rebasar unas condiciones generales de seguridad, especialmente en lo relativo a maniobras de emergencia; aun así, se trata en general de conductores muy exper-

TABLA 1				
DATOS SOBRE DISTRIBUCIONES DE VELOCIDAD (1992, fuera de poblado)				
FRACTIL	CARRETERAS DE CALZADA UNICA		CARRETERAS CON CALZADAS SEPARADAS	
	Arcén < 1,5 m	Arcén > 1,5 m	Autovías	Autopistas
V_{99} (km/h)	127	148	164	168
V_{85} (km/h)	92	111	128	130
V_{50} (km/h)	71	89	104	106
V_{99}/V_{25}	1,38	1,33	1,28	1,29
V_{85}/V_{50}	1,30	1,25	1,23	1,23

2.1.3. Fractil de referencia.

Es preciso decidir a qué fractil de la distribución temporal de velocidades se refieren el trazado y

los 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.

— La señalización de las condiciones de seguridad no debe resultar excesivamente restrictiva y, por tanto, menos creíble y poco respetada por una fracción apreciable de los conductores.

— En otros casos, referirse a fractiles altos de la distribución de velocidades resulta excesivo. Así, la velocidad de un vehículo lento al que se pretende adelantar, y desde la cual se inicia una maniobra de adelantamiento desde una posición de seguimiento, debe ser reducida: se trata de un vehículo **lento**, y tomar valores superiores conduce a distancias de adelantamiento muy elevadas.

En definitiva, la sociedad debe establecer un **compromiso aceptable** entre los costes de construcción y los de explotación (entre los que se cuentan los correspondientes a la accidentalidad), habida cuenta de la diversidad de los comportamientos humanos a los que una infraestructura única pretende servir.

En una normativa técnica moderna, este compromiso debería adoptar la forma siguiente:

— Referir a la velocidad V_{85} (sólo superada por el 15 % de los vehículos), los aspectos del diseño de la carretera relacionados con la **comodidad** de la circulación: maniobras menos bruscas, realizadas con mayor margen.

— La utilización de V_{85} para el diseño debe proporcionar también valores dinámicos **aceptables** en lo relativo a la seguridad de la circulación de los vehículos más rápidos (V_{99}). Es decir, los conductores cuya velocidad esté comprendida entre V_{85} y V_{99} deben contar con un margen de seguridad aceptable, aunque circulen con mayor incomodidad (maniobras más bruscas o de emergencia).

— Referir a la velocidad V_{99} la **señalización de las siguientes condiciones propias de la carretera**:

- Máxima velocidad de paso por una curva.
- Distancia necesaria para la detención ante un obstáculo imprevisto.
- Aproximación a una zona con restricciones a la circulación (por ejemplo, obras).

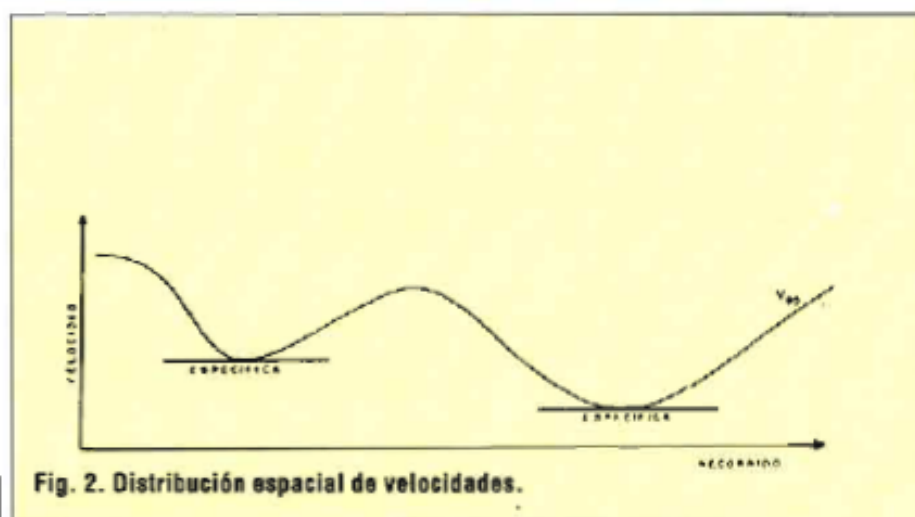


Fig. 2. Distribución espacial de velocidades.

— El resto de la señalización se puede referir a la V_{85} .

2.1.4. Efecto de las limitaciones de velocidad.

No se puede dejar de considerar aquí el efecto que pueden tener sobre la distribución temporal de velocidades las **limitaciones** genéricas que la legislación puede imponer, en función de la clase de carretera, o las específicas (más restrictivas) fijadas para algunos tramos por la señalización vertical.

Es forzoso reconocer que, en la situación actual en España, el respeto por unas y otras es más bien escaso: lo cual sitúa a la Administración responsable de las carreteras y, lo que es peor, directamente a los funcionarios encargados de ellas, ante el hecho de que buena parte de las mismas se halla infradimensionada frente a las velocidades **realmente** practicadas, aun cuando sea **ilegalmente**, por los usuarios. La tabla 1 es suficientemente elocuente.

Esta situación requeriría dos tipos de actuaciones por parte de la Administración:

— Por un lado, acciones tendentes a reducir el número de infracciones en lo relativo a los límites de velocidad, que no sólo necesitan de una eficaz acción represiva, sino de una credibilidad del riesgo asumido en cada caso concreto.

— Por otro lado, el disponer de un mayor **margen de seguridad** en la infraestructura, que permita que un eventual rebasamiento de los límites de velocidad no resulte forzosamente en un accidente y que, caso de ocurrir éste, tenga unas consecuencias limitadas.

En la situación actual, parece prudente que algunas cuestiones relacionadas con condiciones de seguridad estricta propias de la carretera se refieran a las velocidades **reales**, sin contar con el efecto de la limitación genérica en ningún caso, y con el de la limitación específica sólo en casos muy justificados, en los que se pueda asegurar que será creída y, por tanto, respetada.

2.2. Distribución espacial de velocidades

2.2.1. Lo que ocurre en realidad.

Siempre que la intensidad de la circulación no se lo dificulte, la **velocidad instantánea** de un vehículo no es constante a lo largo de un mismo tramo de carretera, ni siquiera si éste es homogéneo en cuanto a diseño. Hay una **distribución espacial de velocidades**, como la representada en la Fig. 2, que es consecuencia de:

— Las características de la parte del tramo recién recorrida.

— Las posibilidades percibidas por el conductor en cada momento.

En condiciones favorables de circulación y climatología, 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.

El recorrido a lo largo de un tramo de carretera se puede, así, con-

“**L**a velocidad instantánea de un vehículo no es constante a lo largo de un mismo tramo de carretera, ni siquiera si éste es homogéneo en cuanto a diseño.”

siderar compuesto por una serie de fases como las que se describen a continuación:

– **Deceleración** antes de llegar a una curva, con influencia de la inclinación de la rasante. Si la curva anterior está muy próxima y las características geométricas de ambas son parecidas, esta fase puede reducirse o llegar a faltar en los tramos de curvas enlazadas.

– **Tránsito** por la curva a **velocidad constante**, sin apenas influencia de la inclinación de la rasante.

– **Aceleración** a la salida de la curva, con influencia de la inclinación de la rasante, hasta alcanzar un límite superior de velocidad¹, si el tramo recto siguiente a la curva tiene suficiente longitud, o hasta iniciar una nueva fase de deceleración. Donde la siguiente curva esté muy próxima (curvas enlazadas), esta tercera fase puede reducirse o llegar a faltar.

La mayoría de los accidentes relacionados con una velocidad inadecuada tiene lugar en la primera y segunda fase.

La velocidad alcanzable entre curvas sucesivas se convierte así en un indicador de las posibilidades percibidas por el conductor: desde las elevadas velocidades propias de un trazado en terreno llano, con deceleraciones claras para abordar curvas aisladas, hasta las sucesiones de curvas enlazadas propias de un trazado en terreno accidentado, donde la velocidad no tiene grandes oscilaciones.

Además de las condiciones relativas a la intensidad de la circulación, al estado del pavimento y a las circunstancias meteorológicas, el trazado de un tramo de carretera influye en la distribución espacial

de velocidades a través de los parámetros siguientes:

- La **sinuosidad** de la planta
- La **ondulación** de la rasante
- La **anchura** de la plataforma
- La **visibilidad** disponible
- La **frecuencia** de accesos² y nudos

2.2.2. Velocidad de proyecto.

Para cualquier fractil de referencia representativo de la distribución temporal de velocidades instantáneas en cada sección de un tramo de carretera, la representación de su distribución espacial en el tramo es la **media armónica**³ en el tramo:

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

siendo:– $\bar{V}$ la media armónica de velocidades en el tramo

– V_i la velocidad (constante) en cada sección del tramo

– l_i la longitud de cada sección



La sociedad debe establecer un **compromiso aceptable** entre los costes de construcción y los de explotación.

- 1 A estos efectos, parece que la longitud mínima de tramo a considerar es del orden de 2 km.
- 2 El que el conductor juzga adecuado o el que permiten las prestaciones del vehículo, habida cuenta también de las limitaciones genéricas o específicas de la velocidad.
- 3 Excepto los residenciales.
- 4 Es un error muy común creer que la velocidad media es la media aritmética de las velocidades. La que se debe emplear es la media armónica, que coincide con la razón entre la longitud del tramo y el tiempo invertido en recorrerlo: concepto análogo al de velocidad geométrica definido en la aún vigente Instrucción 3.1-IC.
- 5 Y a ella corresponderá una velocidad de proyecto más alta.

Si el fractil de referencia de la distribución temporal es el 85, el valor de V_{85} se suele asociar a la **velocidad de proyecto** del tramo. Mejor que tener un significado físico concreto, ésta debe constituir una referencia encaminada a obtener un trazado razonable y coordinado con la lectura que de la carretera hace el usuario. 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 recta en terreno llano será recorrida a mayor velocidad⁴ que otra carretera más sinuosa en terreno accidentado, o situada en una zona de intenso uso del suelo):

– En carreteras de nuevo trazado o al acondicionar carreteras existentes, la elección de una velocidad de proyecto tiene importantes repercusiones en la curvatura de la carretera, en la visibilidad disponible en cada punto de ella, y sobre todo en su coste: representa un compromiso entre los costes re-

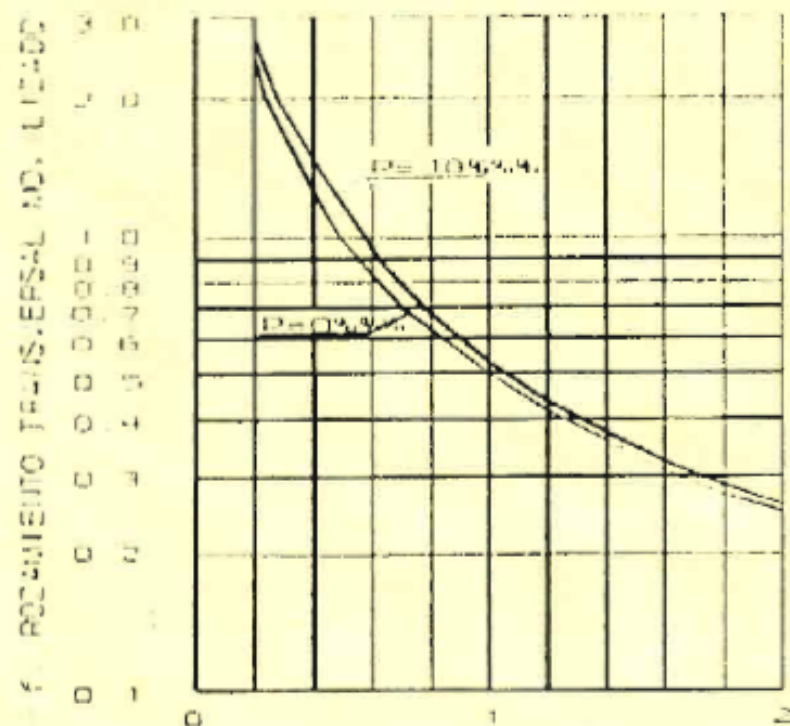


Fig. 3. Rozamiento transversal mínimo para producir el vuelco.

lacionados con la explotación y los derivados de la construcción.

A partir de las características de su trazado, se puede estimar la velocidad de proyecto de una carretera existente. Esto puede ser útil para comparar el valor estimado con un estándar deseable.

2.3. ¿Cómo fijar la velocidad mínima de proyecto?

Suele ser la propia Administración quien, como parte de su planificación, fija la velocidad de proyecto a emplear en cada tramo concreto. Sobre esto hay que hacer dos observaciones:

– El concepto de **tramo** a emplear sólo debería abarcar una longitud del orden de 2 km; lo que permitiría variar la velocidad de proyecto a lo largo de un itinerario, en función del entorno de la carretera perceptible por el usuario.

– La velocidad de proyecto fijada debería ser la mínima que la política de la Administración considera aceptable; pero no se debería impedir que se adoptaran mayores velocidades de proyecto donde ello resulte fácil y no costoso. Por ejemplo, en La Mancha cuesta casi lo mismo adoptar una velocidad de proyecto de 120 km/h que una de 140 km/h: ¿está justificado hablar sólo de la primera?

Los datos proporcionados por la tabla 1, algo redondeados a continuación, resultan reveladores de la velocidad de proyecto que **desean** (y realmente practican) los automovilistas españoles fuera de poblado y **en circunstancias favorables**, aprovechando las crecientes prestaciones de la mayoría de los vehículos:

– Autopistas y autovías: 130 km/h

– Carreteras de calzada única:

* Arcén > 1,5 m: 110 km/h

* Arcén < 1,5 m: 90 km/h

Fuera de poblado, consideracio-

“**L**a reducción de velocidad se tiene que acompañar a una perceptibilidad de la curva, enfatizada por el balizamiento: este concepto se recoge en la nueva Instrucción de la Dirección General de Carreteras 8.1-IC.”

nes relacionadas con el coste de construcción pueden obligar a limitar la velocidad de proyecto para acoplar el trazado a terrenos de relieve acentuado, especialmente en zonas aisladas, por debajo de estos valores. Pero no se debe olvidar que, si bien los conductores aceptan fácilmente limitar su velocidad 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... aumentando con ello el coste de explotación.

Se plantea, entonces, la cuestión de qué hacer donde no se pueda mantener la velocidad de proyecto mencionada con anterioridad: más adelante se dan algunos ejemplos relacionados con el tránsito por curvas circulares y con la distancia de detención. En relación con las primeras, no tiene tanta importancia la velocidad a la que puede recorrer una curva aislada, aunque sea baja: sino más bien cómo se llega a ella de una forma fácilmente legible por el conductor, sin confiar excesivamente en la señalización. La reducción de velocidad se tiene que acompañar a una perceptibilidad de la curva, enfatizada por el balizamiento: este concepto se recoge en la nueva Instrucción de la Dirección General de Carreteras 8.1-IC “Señalización vertical”, en la que intensidad de la señalización y balizamiento de una curva depende del **grado de la curva**, o diferencia entre la velocidad máxima de aproximación a la curva, y la velocidad máxima en ésta.

Las velocidades mínimas de proyecto empleadas para vías urbanas son menores que fuera de poblado, no sólo por consideraciones de coste sino también funcionales: la frecuente gran intensidad de la circulación en ellas, que sólo necesita las velocidades asociadas a la capacidad (60 a 80 km/h), y la menor distancia entre nudos. Los valores de la velocidad de proyecto a emplear en zona urbana suelen estar relacionados con la función asignada a la vía en una estructura jerarquizada: autopista, colectora, residencial, etc.

En cuanto a los nudos:

- Únicamente en ramales de enlaces que no crucen a nivel ninguna otra trayectoria y que vayan a funcionar cerca de su capacidad, se pueden justificar velocidades de proyecto del orden de 60 a 80 km/h.

- En los demás tipos de ramal, y en las vías de giro de intersecciones, las velocidades de proyecto pueden ser más bajas, sobre todo donde haya limitaciones de espacio o la ordenación de la circulación pueda obligar a la detención. Esta posibilidad es frecuentemente ignorada al proyectar intersecciones o enlaces, los cuales resultan innecesariamente grandes y, por tanto, caros.

puede producir un accidente que, en general, reviste una de las tres pautas que se analizan a continuación: vuelco, quiebro o deslizamiento.

3.2. Pautas de accidente

3.2.1. Vuelco.

Con la misma notación que la ecuación anterior, la condición de vuelco está expresada por la ecuación

$$\frac{V^2}{127 \cdot p} = \frac{h \cdot \frac{p}{100} + \frac{a}{2}}{h - \frac{a}{2} \cdot \frac{p}{100}}$$



Las velocidades de proyecto pueden ser más bajas, sobre todo donde haya limitaciones de espacio u ordenación de la circulación (intersecciones, glorietas).

3. Un ejemplo: la velocidad en curvas circulares

3.1. El rozamiento movilizado

Para una velocidad instantánea V (km/h), en una curva se cumple siempre que el rozamiento transversal movilizado f [que también representa la aceleración centrífuga no compensada por el peralte p (%)] está relacionado con el radio de curvatura ρ (m) a través de la fórmula

$$f = \frac{V^2}{127 \cdot \rho} - \frac{p}{100}$$

Si la velocidad es excesiva y, por tanto, el rozamiento transversal movilizado también lo es, se

siendo: - a la anchura de apoyo del vehículo, medida entre los centros del área de contacto entre ruedas y pavimento.

- h la altura sobre el pavimento del centro de gravedad del vehículo.

Comparando ambas ecuaciones, se puede deducir el rozamiento que se necesita movilizar para que el vehículo vuelque:

De esta última ecuación, representada en la Fig. 3, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

$$f \geq \frac{0,5 + \frac{h}{a} \cdot \frac{p}{100}}{\frac{h}{a} - 0,5 \cdot \frac{p}{100}} - \frac{p}{100}$$

- Cuanto menor es el peralte, se necesita movilizar menos rozamiento transversal f entre neumáticos y pavimento, para producir el vuelco.

- En los coches, h/a es pequeño, y aún en los camiones no suele rebasar el valor 1,0: con lo que se necesita movilizar valores de f superiores a 0,5.

Por tanto, suelen resultar más críticas las otras dos pautas de accidente, asociadas a menores valores de f .

3.2.2. Quiebro.

En vehículos articulados, se puede producir un **quiebro**⁶ del conjunto alrededor del eje vertical que pasa por la articulación. Es un fenómeno dinámico complejo, en el que intervienen los siguientes factores:

- El semirremolque no tiene ruedas contiguas a la articulación, por lo que la fuerza centrífuga se transmite a través de ella a las ruedas traseras de la tractora.

- La tractora es muy corta de batalla, por lo que se la hace girar con más facilidad que si fuera larga.

- Si, además, el vehículo frena, el semirremolque empuja a la tractora y agrava el fenómeno.

Se suele admitir que este fenómeno de quiebro adquiere relieve a partir de valores de f del orden de 0,25. Los conductores de estos vehículos están acostumbrados a no rebasar este límite en conducción ordinaria; pero la combinación con un frenado puede sorprenderles. Esto explica, por ejemplo, el que se produzcan quiebros en ramales de enlace tipo "lazo", de radio reducido, a velocidades anormalmente bajas.

3.2.3. Deslizamiento.

La pauta de accidente más frecuente es el **deslizamiento**, por superar f el valor de la resistencia μ al deslizamiento transversal, propia del conjunto neumático + pavimento.

El valor de μ es muy variable, y depende de los siguientes factores:

6 Especialmente el relacionado con las expropiaciones.
7 Denominado "tijera" por los camioneros.

a) Tipo de pavimento:

- A igualdad de los demás factores, los tipos de pavimento normalmente empleados en carreteras de la red principal presentan valores de μ muy similares.

- En otros tipos de pavimento, como hormigón sin texturar o tratamientos superficiales mediante riegos con gravilla, μ suele resultar inferior.

- Con tratamientos superficiales especiales (lechadas bituminosas, micro-aglomerados, etc.) se consiguen valores de μ iguales o superiores a los de los pavimentos convencionales.

b) Estado del pavimento: con el paso del tiempo y bajo la acción del tráfico, los pavimentos van perdiendo sus características superficiales iniciales:

- Los áridos se pulen, más o menos aprisa según su naturaleza.

- Disminuye la macrotextura, perjudicando la evacuación de la lluvia.

- Si se producen ondulaciones longitudinales en el pavimento, el contacto entre éste y el neumático se vuelve irregular.

- Si se producen roderas, en ellas se puede acumular el agua.

c) Humedad del pavimento: cuando llueve, la presencia de una película de agua sobre el pavimento disminuye notablemente el valor de μ . Descartando a priori la presencia de nieve o hielo, circunstancias meteorológicas extraordinarias en las que las velocidades se reducen apreciablemente, se pueden distinguir las situaciones siguientes:

- Pavimento seco.

- Pavimento ligeramente mojado, con un espesor de película de agua del orden de 0,2 mm.

- Pavimento ligeramente mojado después de una sequía prolongada, con acumulación de finos que pueden actuar de lubricante. A efectos prácticos, se puede asimilar a la siguiente.

- Pavimento muy mojado, con un espesor de película de agua del orden de 2 mm. Este caso es excepcional, pues corresponde a lluvias muy intensas durante las cuales la inclinación y macrotextura del pavimento ya no contribuyen

TABLA 2 VALORES TÍPICOS DE LA RESISTENCIA μ AL DESLIZAMIENTO TRANSVERSAL				
HUMEDAD DEL PAVIMENTO	ESTADO DE LOS NEUMÁTICOS	VELOCIDAD (km/h)		
		30	60	90
Seco	Bueno	aproximadamente 1		0,95
	Desgastado			0,90
Ligeramente mojado	Bueno	0,60	0,40	0,30
	Desgastado	0,35	0,20	0,10
Muy mojado	Bueno	0,55	0,25	0,12
	Desgastado	0,30	0,12	0,05

eficazmente a la evacuación de la escorrentía superficial: en estas circunstancias, tampoco los conductores circulan a la velocidad que circularían en las otras dos situaciones.

d) Estado de los neumáticos: aunque cuando el pavimento está seco no reviste especial importancia, sí resulta decisivo para la seguridad cuando está mojado:

- La estudiada textura que lleva la superficie de rodadura del neumático contribuye a la evacuación de la película de agua, facilitando el contacto con el pavimento para movilizar el rozamiento.

- Si el neumático está desgastado y su textura ha disminuido o se ha perdido, la evacuación de la película de agua es más dificultosa, y disminuye la zona de contacto efectivo, llegándose incluso al fenómeno de **hidroplaneo**.

Estudios realizados en autopistas españolas en 1985 y 1986 han demostrado que:

- Un 15 % de los vehículos requeriría un cambio inmediato de neumáticos.

- Un 35 % de los neumáticos mostraba un desgaste superior al 50 %.

- Un 62 % de los neumáticos presentaba una baja presión de inflado.

Por tanto, parece que la situación, en cuanto al estado de los

neumáticos, podría mejorar todavía mucho en España.

e) Velocidad: al igual que el estado de los neumáticos, se trata de un factor de escasa relevancia con pavimento seco, pero muy importante con pavimento mojado. Al aumentar la velocidad, se exige a las texturas del neumático y del pavimento que evacuen la película de agua más aprisa: con lo que la zona de contacto va disminuyendo hasta anularse, en cuyo momento se produce el **hidroplaneo** o apoyo del neumático sólo sobre dicha película, con anulación de la movilización de rozamiento.

En relación con estos factores, conviene destacar que no es fácil atribuir a quién es debido un valor de la resistencia al deslizamiento:

- El tipo y estado del pavimento dependen de la acción del titular de la carretera.

- El estado de los neumáticos y la velocidad dependen del conductor.

- La humedad del pavimento depende de causas ambientales.

También parece difícil definir una situación estándar, de la cual se desprenda la resistencia al deslizamiento:

- Aunque el tipo de pavimento es prácticamente invariable...

- el estado del pavimento y el de los neumáticos evolucionan a medio plazo, y

- la humedad del pavimento y la

velocidad presentan grandes oscilaciones.

Para un pavimento convencional en buen estado, la tabla 2^a muestra unos valores típicos de μ para distintas combinaciones de los demás factores.

Los datos anteriores se representan en la Fig. 4 junto con los valores de f admitidos para el diseño de curvas por la vigente Instrucción 3.1-IC y la propuesta de modificación de ésta (1993).

Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Con pavimento seco, la resistencia al deslizamiento es muy elevada (del orden de 0,9), y depende poco de la velocidad o del estado del neumático.

- Para velocidades apreciables (por ejemplo, superiores a 70 km/h), la resistencia al deslizamiento con neumático bueno y pavimento muy mojado es del mismo orden de magnitud que la correspondiente a neumático desgastado y pavimento ligeramente mojado; pero en ambos casos es inferior al valor de f preconizado por la vigente Instrucción 3.1-IC para el diseño de curvas.

- Para esa misma gama de velocidades apreciables, los valores de f preconizados por el borrador de nueva Instrucción 3.1-IC/93 se ajustan mejor a la resistencia al deslizamiento con pavimento ligeramente mojado y neumático desgastado.

- La resistencia al deslizamiento con neumáticos desgastados y pavimento muy mojado es bastante inferior.

3.3. ¿Cuál es el rozamiento movilizado admisible?

Se suele admitir que el diseño de una curva, asociado a la velocidad V_{95} , se base en unos valores del rozamiento transversal movilizado bastante bajos⁸, que proporcionen una conducción cómoda y sin maniobras bruscas.

La velocidad máxima a la que la curva puede ser recorrida en condiciones aceptables de seguridad, asociada a la velocidad V_{99} , y en la que se basa la señalización¹¹ de la curva, está relacionada con la movilización de un mayor rozamiento transversal. Es errónea la práctica, corriente en España, de basar la se-

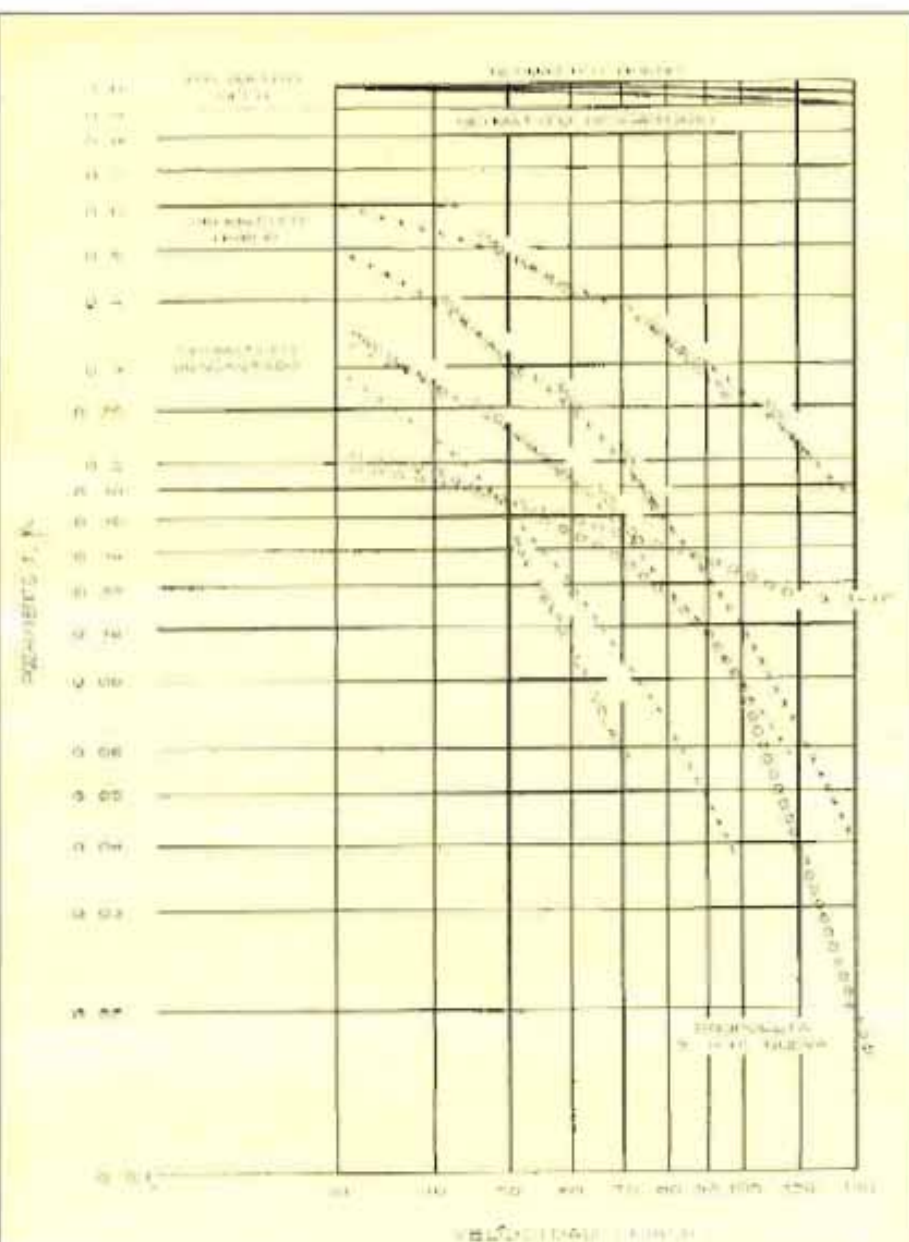


Fig. 4. Resistencia al deslizamiento y rozamiento movilizado en función de la velocidad.

ñalización de la velocidad máxima en curvas en valores bajos de f , como los utilizados para el diseño de éstas: pues sólo conduce a desprestigiar el sentido de las señales y a hacer caso omiso de ellas, creando en los conductores la idea de que las limitaciones de velocidad en

curva pueden ser rebasadas sin peligro.

Además, los valores que se adopten deben corresponder a condiciones frecuentes y no adversas (neumáticos en mal estado, pavimento muy mojado, etc.), pues en estas últimas debe ser el conductor

8 Por lo demás, generalmente penalizado.

9 Viguera / Garagorri / Crespo: La adherencia neumático-pavimento. Revista "CARRETERAS", junio 1992.

10 Como los preconizados por la Instrucción 3.1-IC "Trazado" (Cf. apartado 2.1, cuadro 4 en nota de pie de página), y por la Norma complementaria para autopistas (apartado 2.3), con valores comprendidos entre 0,101 y 0,132.

11 O, con un enfoque más moderno y realista, el fundamento del balzamiento de las curvas, tal y como lo preconiza el borrador de Instrucción 8.1-IC "Señalización vertical" (Cf. apartado 2.6.1).

“**S**i el tráfico contuviera una proporción apreciable de vehículos articulados, y éstos se pudieran ver sometidos a inesperadas deceleraciones combinadas con la curva no conviene superar un rozamiento movilizado igual a 0,25.”

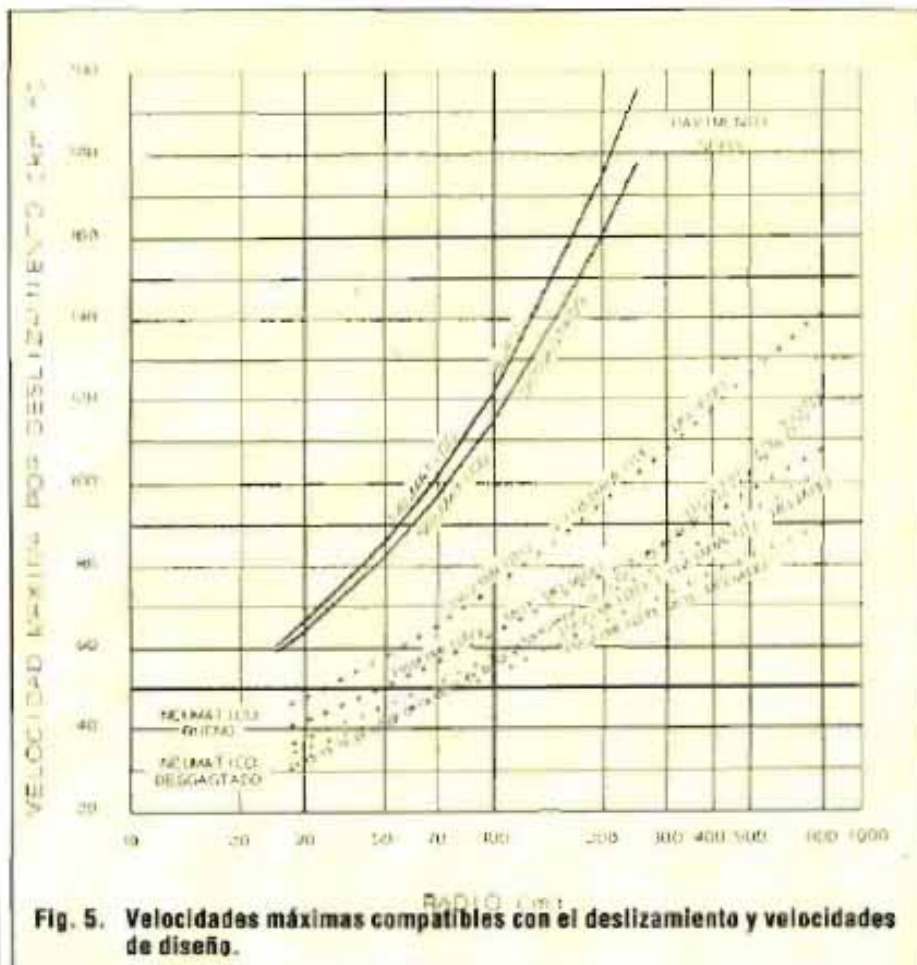
quien valore cuánto debe disminuir su velocidad por ellas.

Para fijar esta velocidad máxima en curva parece útil definir un **margen de seguridad**, expresado como la diferencia entre aquella y la velocidad empleada para el diseño. Este margen de seguridad no debería ser inferior a un valor fácilmente entendible por un conductor, y representativo del riesgo que está acostumbrado a asumir: por ejemplo, entre 10 km/h para velocidades muy bajas (del orden de 35 km/h), y 20 km/h para velocidades altas (100 km/h o más).

Para curvas de distintos radios, peraltadas con arreglo al Cuadro 6 de la vigente Instrucción 3.1-IC, y con los valores de la resistencia al deslizamiento descritos en la tabla 2, se representan en la Fig. 5 las máximas velocidades (en las distintas circunstancias de humedad del pavimento y estado de los neumáticos) compatibles con que no se produzca un accidente por deslizamiento. También se han representado las velocidades de diseño de esas curvas, siempre según la 3.1-IC. En la tabla 3 se representan los márgenes de seguridad correspondientes.

Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

— Las velocidades de diseño de las curvas (condiciones de **comodidad**) son del mismo orden de magnitud que las máximas a que pueden ser recorridas con neumáticos desgastados, sin deslizar cuando su pavimento está ligeramente



mojado, siempre que no se rebasen los 80 km/h.

— Lo anterior sigue siendo cierto aunque el pavimento esté muy mojado, si el estado de los neumáticos es bueno.

— Con neumáticos buenos, el margen de seguridad frente al des-

lizamiento parece suficiente cuando el pavimento está ligeramente mojado.

— Los rozamientos movilizados sin deslizar (neumáticos en buen estado, pavimento ligeramente húmedo) son superiores a 0,25¹² para velocidades inferiores a 110 km/h.

TABLA 3										
MARGEN DE SEGURIDAD (km/h)										
FRENTE A UN ACCIDENTE POR DESLIZAMIENTO										
HUMEDAD DEL PAVIMENTO	ESTADO DEL NEUMATICO	VELOCIDAD DE DISEÑO ¹² (km/h)								
		31,3	40,7	49,9	60	69,7	80,8	91,4	100,4	120,1
		RADIO (m)								
		25	45	75	120	175	250	350	450	800
Seco	Bueno	29,1	40,9	55,8	74,3	93,2	-	-	-	-
	Desgastado	27,3	37,6	50,3	65,5	80,4	97,2	-	-	-
Ligeramente mojado	Bueno	12,8	15,2	17,8	19,9	21,0	21,2	21,5	21,4	21,4
	Desgastado	4,6	4,3	3,7	2,5	0,4	-2,6	-5,9	-8,9	-16,6
Muy mojado	Bueno	8,6	8,4	8,1	6,9	4,8	1,7	-1,6	-4,7	-12,5
	Desgastado	2,8	1,4	-0,3	-2,9	-5,2	-10,5	-15,2	-19,2	

A la vista de todas estas consideraciones, se podría aceptar como límite del rozamiento movilizado admisible:

– Para el diseño de la curva, basado en la V_{25} , se pueden mantener los valores preconizados por la vigente Instrucción 3.1-IC o, mejor aún, adoptar los contenidos en el Borrador de Instrucción 3.1-IC/93, que son algo más conservadores para el caso de neumáticos desgastados.

– Para fijar la V_{99} máxima a la que puede ser recorrida la curva, se puede adoptar la resistencia al deslizamiento con neumáticos en buen estado y pavimento ligeramente mojado, dada por

$$\log \mu = - \frac{V}{200} - 0,07$$

– Si el tráfico contuviera una proporción apreciable de vehículos articulados, y éstos se pudieran ver sometidos a inesperadas deceleraciones combinadas con la curva, no conviene superar un rozamiento movilizado igual a 0,25. En estos casos, se debería mantener un margen, entre V_{99} y V_{25} , igual al dado por la tabla 3.

3.4. ¿Cuál es la velocidad máxima de una curva?

El artículo 47 del Reglamento General de Circulación (RGC) establece que "... los titulares de la vía fijarán, empleando la señalización correspondiente, las limitaciones de velocidad específicas que correspondan con arreglo a las características del tramo de la vía..."

Para esa "... señalización correspondiente...", el RGC prevé lo siguiente:

– Señal R-301: "... Velocidad máxima. Prohibición de circular a velocidad superior... a la indicada en la señal..."

– Señal S-7: "... Velocidad máxima aconsejable. Recomienda una velocidad máxima de circulación... que se aconseja no sobrepasar, aunque las condiciones meteorológicas y ambientales de la vía y de la circulación sean favorables..."

Aunque la señal R-301 prohíbe, mientras que la S-7 sólo recomien-

TABLA 4				
VELOCIDADES ¹² EN CURVAS				
RADIO (m)	PERALTE (%)	VELOCIDAD DE DISEÑO (km/h)	VELOCIDAD LÍMITE (km/h)	
			PAVIMENTO LIGERAMENTE MOJADO	PAVIMENTO SECO
25	10	20/31	33/44	58
45	10	30/40	45/56	89
75	9	39/50	57/68	99
120	8	51/60	71/80	123
175	7	63/70	84/91	147
250	6,5	79/81	100/102	174
350	5,5	91	113	–
450	5	100	122	–
800	3	120	142	–

da, de la definición de esta última se desprende claramente que se refiere a condiciones favorables (pavimento seco).

En la tabla 4 se indican las velocidades máximas correspondientes a curvas de distinto radio, peraltadas con arreglo al Cuadro 6 de la vigente Instrucción 3.1-IC, en las condiciones de pavimento ligeramente mojado y neumático en buen estado, y pavimento seco y neumático desgastado; manteniendo en el primer caso el margen de seguridad dado por la tabla 3 para vehículos articulados. También se indican las velocidades de diseño según la citada Instrucción.

A la vista de la tabla 4, parece lógico formular el siguiente criterio, en lo relativo a señalización y balizamiento de curvas:

– Los valores de la velocidad máxima en curvas a emplear en su balizamiento y señalización, son los correspondientes a pavimento ligeramente mojado. Esta circunstancia es suficientemente frecuente para ser tenida en cuenta en una recomendación, aunque no corresponda a las circunstancias más favorables¹³: se trata de un compromiso entre el margen de seguridad frente a un accidente (que incita a fijar una limitación baja) y la credibilidad de la señal (que obliga a no fijarla demasiado baja).

– Para lo anterior, se debería emplear el primero o segundo va-

lor, de los que figuran en la correspondiente fila de la tabla 4, según que haya una proporción apreciable de vehículos articulados que se puedan ver sometidos a deceleraciones inesperadas, o no.

– Si en algún caso se estimara necesario prohibir rebasar un límite de velocidad con una señal R-301, el valor que figure en ésta debería ser el correspondiente a pavimento seco. Como dicho valor resulta bastante elevado y, generalmente, rebasa la limitación genérica impuesta por el RGC, la señal R-301 será raramente empleada, lo que reforzará su credibilidad.

4. Otro ejemplo: la distancia de detención

4.1. Planteamiento

Tras la percepción de la necesidad de decelerar, debida a la presencia de un obstáculo inesperado que obligue a detenerse, se suele admitir que transcurre un intervalo de evaluación y reacción, sin que durante él se modifique la marcha

12 Según Instrucción 3.1-IC vigente.

13 Valor máximo admitido para que no se produzcan quiebrós en vehículos articulados.

14 En las casillas en que hay dos cifras separadas por una barra (/), la primera corresponde al caso de presencia apreciable de vehículos articulados decelerando.

15 Como indica la definición del RGC.

del vehículo: a partir de entonces se decelera hasta detenerse.

Si la inclinación i (%) de la rasante es uniforme, la distancia recorrida DD (m) está dada por

$$DD = \frac{V_0}{1.8} + \frac{V_0^2}{254 * \left(\frac{1}{100} + f_l \right)}$$

siendo:

- V_0 (km/h) la velocidad inicial.

- i (%) la inclinación de la rasante¹⁶.

- f_l el rozamiento longitudinal movilizado entre neumático y pavimento.

4.2. Velocidad inicial

No se puede dejar que un 15 % de los conductores asuman el riesgo de no detenerse a tiempo ante una situación de emergencia. Por lo tanto, la velocidad inicial se debe tomar igual a V_{90} , aunque en circunstancias favorables fuera de poblado la experiencia española haya mostrado que es igual a

- Autopistas y autovías: 165 km/h

- Carreteras de calzada única:

* Arcén > 1,5 m: 150 km/h

* Arcén < 1,5 m: 125 km/h

4.3. Deceleración admisible

En cuanto a la deceleración admisible, hay que tener en cuenta que se trata de una **manobra de emergencia**, en la que se puede alcanzar una deceleración igual a la proporcionada por la acción conjunta de la inclinación de la rasante y de la resistencia al rozamiento longitudinal del conjunto pavimento/neumático. Este último depende de los mismos factores que se han analizado en el apartado 3.2.3 para la resistencia al rozamiento transversal: tipo, estado y humedad del pavimento, estado de los neumáticos y velocidad. Para un pavimento convencional en buen estado, la tabla 5¹⁷ muestra unos valores típicos de la resistencia al deslizamiento longitudinal, para distintas combinaciones de los demás factores.

4.4. ¿Cuál es la visibilidad necesaria?

Para una velocidad inicial igual

TABLA 5 VALORES TÍPICOS DE LA RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO LONGITUDINAL				
HUMEDAD DEL PAVIMENTO	ESTADO DE LOS NEUMÁTICOS	VELOCIDAD (km/h)		
		30	60	90
Seco	Bueno	aproximadamente 1		
	Desgastado			
Ligeramente mojado	Bueno	0,80	0,75	0,68
	Desgastado	0,80	0,50	0,38
Muy mojado	Bueno	0,80	0,70	0,40
	Desgastado	0,75	0,40	0,20

TABLA 6 VISIBILIDAD (m) NECESARIA PARA UNA DETENCION DE EMERGENCIA ANTE UN OBSTACULO IMPREVISTO, EN UNA RASANTE UNIFORME (neumáticos en buen estado, y pavimento ligeramente mojado)					
V_{90} (km/h)	INCLINACIÓN DE LA RASANTE (%)				
	-10	-5	0	+5	+10
175	391	359	333	312	295
155	296	275	258	244	232
130	205	193	183	174	167
115	162	154	147	140	135
100	126	120	115	111	107
85	95	92	88	86	83
75	78	75	73	71	69
65	63	61	59	57	56
55	49	48	46	45	45
50	43	42	41	40	39
40	31	31	30	30	29

a V_{90} y un coeficiente de rozamiento longitudinal igual a

$$f_l = 0,86 - \frac{V_{90}}{500}$$

correspondiente a neumáticos en buen estado y pavimento ligeramente mojado, se exponen en la tabla 6 las visibilidades necesarias

para una detención de emergencia ante un obstáculo imprevisto. ■

Sandro Rocci es Director General Adjunto del Grupo EUROCONSULT (MADRID)

¹⁶ Positiva subiendo.

¹⁷ Vigueras / Garagorri / Crespo: La adherencia neumático-pavimento. Revista "CARRETERAS", junio 1992.