

EUROCONSULT, S.A.

- o -

**LIBRO BLANCO SOBRE
VELOCIDAD, VISIBILIDAD Y
ADELANTAMIENTOS**

Madrid, 20 de diciembre de 1993

INDICE

1	<u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1	COMPORTAMIENTO DE LOS CONDUCTORES	1
1.2	LAS REGLAMENTACIONES TÉCNICAS	3
1.3	EL CASO DE LA VELOCIDAD	4
2	<u>NORMATIVA TÉCNICA EN RELACIÓN CON LA VELOCIDAD</u>	6
2.1	INSTRUCCIÓN 3.1-IC "TRAZADO" (1961)	6
2.2	ORDEN CIRCULAR 8.2-IC "MARCAS VIALES" (1962)	12
2.3	NORMA COMPLEMENTARIA PARA AUTOPISTAS (1976)	13
2.4	NORMA 8.2-IC "MARCAS VIALES" (1987)	14
2.5	INSTRUCCIÓN 8.3-IC "SEÑALIZACIÓN DE OBRAS" (1987)	16
2.6	INSTRUCCIÓN 8.1-IC "SEÑALIZACIÓN VERTICAL" (1991)	18
2.6.1	<u>Señalización y balizamiento de curvas.</u>	18
2.6.2	<u>Señalización de velocidad máxima.</u>	20
2.6.3	<u>Señalización sobre adelantamiento.</u>	21
3	<u>VARIACIONES DE LA VELOCIDAD INSTANTÁNEA</u>	25
3.1	DISTRIBUCIÓN TEMPORAL	25
3.1.1	<u>Factores que influyen.</u>	25
3.1.2	<u>Forma de la curva de distribución.</u>	26
3.1.2.1	Datos del Reino Unido.	26
3.1.2.2	Datos españoles.	26
3.1.3	<u>Fractil de referencia.</u>	29
3.1.4	<u>Estimación de V_{85} y V_{99}.</u>	31
3.1.5	<u>Limitaciones de velocidad.</u>	31
3.2	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	33
3.2.1	<u>Generalidades.</u>	33
3.2.2	<u>Factores que influyen en la distribución espacial de velocidades.</u>	34
3.2.3	<u>Valor representativo de la distribución espacial.</u>	35
3.2.4	<u>Estimación de</u>	36
3.2.4.1	Modelización.	36
3.2.4.2	Velocidad base.	36
3.2.4.3	Deducción por falta de visibilidad.	37
3.2.4.4	Deducción por sinuosidad de la planta.	38
3.2.4.5	Corrección por ondulación de la rasante.	38
3.2.5	<u>Deducción por restricciones en la sección.</u>	39
3.3	DECELERACIÓN	39
3.3.1	<u>Generalidades.</u>	40
3.3.2	<u>Velocidad inicial.</u>	40
3.3.3	<u>Deceleración admisible.</u>	40
3.3.3.1	Maniobra de emergencia.	40
3.3.3.2	Maniobras deliberadas.	41
3.3.3.3	Maniobras subconscientes.	42
3.3.4	<u>Modelo de deceleración.</u>	42
3.3.4.1	Señalización de reducciones de velocidad.	43
3.4	VELOCIDAD EN CURVAS CIRCULARES	45
3.4.1	<u>Rozamiento movilizad.</u>	45

3.4.2	<u>Pautas de accidente.</u>	45
3.4.2.1	Generalidades.	46
3.4.2.2	Vuelco.	46
3.4.2.3	Quiebro.	47
3.4.2.4	Deslizamiento.	48
3.4.3	<u>Rozamiento movilizado admisible.</u>	55
3.4.4	<u>Velocidades máximas en curva.</u>	58
3.4.5	<u>Influencia del peralte.</u>	61
3.5	ACELERACIÓN	61
3.5.1	<u>Velocidad inicial.</u>	62
3.5.2	<u>Aceleración alcanzable.</u>	62
3.5.2.1	Máximas prestaciones.	62
3.5.2.2	Maniobras deliberadas.	63
3.5.3	<u>Modelo de aceleración.</u>	63
3.5.3.1	Generalidades.	63
3.5.3.2	Máximas prestaciones.	64
3.5.3.3	Modelo cuadrático.	66
4	<u>VELOCIDAD DE PROYECTO</u>	66
4.1	GENERALIDADES	67
4.2	VALORES RECOMENDABLES DE LA MÍNIMA VELOCIDAD DE PROYECTO	67
4.2.1	<u>Generalidades.</u>	68
4.2.2	<u>Fuera de poblado.</u>	68
4.2.3	<u>En zona urbana.</u>	70
4.2.4	<u>En nudos.</u>	70
4.3	HOMOGENEIDAD Y ESCALONAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE PROYECTO	71
5	<u>VISIBILIDAD</u>	72
5.1	VISIBILIDAD DISPONIBLE Y NECESARIA	72
5.2	VISIBILIDAD DISPONIBLE	73
5.2.1	<u>Definición.</u>	73
5.2.2	<u>Determinación.</u>	74
5.2.2.1	Generalidades.	74
5.2.2.2	Limitaciones en planta.	75
5.2.3	<u>Limitaciones en alzado.</u>	77
5.2.3.1	Acuerdos verticales convexos.	78
5.2.3.2	Acuerdos verticales cóncavos.	80
5.3	MODELOS PARA LA VISIBILIDAD NECESARIA	87
5.3.1	<u>Detención ante un obstáculo imprevisto.</u>	88
5.3.1.1	Planteamiento general.	88
5.3.1.2	En un acuerdo vertical.	90
5.3.1.3	En una rasante uniforme.	91
5.3.2	<u>Presencia de una divergencia, o detención eventual ante una marca vial transversal en un cruce o en la entrada a una glorieta, o ante un semáforo.</u>	91
5.3.3	<u>Evitación de una colisión con otros vehículos.</u>	93
5.3.3.1	Cruce.	93
5.3.3.2	Convergencia.	95
5.3.3.3	Adelantamiento.	96
6	<u>EL ADELANTAMIENTO</u>	97
6.1	INTRODUCCIÓN	97
6.2	PROBABILIDAD DE COMPLETAR UN ADELANTAMIENTO	100
6.2.1	<u>Generalidades.</u>	100

6.2.2	<u>Valor mínimo.</u>	101
6.2.3	<u>Probabilidad de hueco en el tráfico contrario.</u>	102
6.2.4	<u>Posibilidad material del adelantamiento.</u>	103
6.3	MODELIZACIÓN DEL ADELANTAMIENTO	104
6.3.1	<u>Casos.</u>	104
6.3.2	<u>Elementos básicos del modelo.</u>	105
6.3.2.1	Generalidades.	105
6.3.2.2	Longitud del vehículo adelantante.	105
6.3.2.3	Longitud del vehículo adelantado.	106
6.3.2.4	Separación entre vehículos adelantante y adelantado.	106
6.3.2.5	Período de análisis.	106
6.3.2.6	Velocidad del vehículo adelantado.	107
6.3.2.7	Velocidad inicial del vehículo adelantante.	107
6.3.2.8	Fase inicial.	108
6.3.2.9	Decisión.	108
6.3.2.10	Completar el adelantamiento.	108
6.3.2.11	Desistir del adelantamiento.	108
6.3.2.12	Comportamiento del vehículo contrario.	111
6.3.3	<u>Ecuaciones que rigen el movimiento de los vehículos.</u>	113
6.3.3.1	Casos.	113
6.3.3.2	Fase inicial.	113
6.3.3.3	Fase final: adelantamiento completado.	116
6.3.3.4	Fase final: adelantamiento desistido.	118
6.3.3.5	Movimiento del vehículo contrario.	121
6.3.3.6	Visibilidad.	123
6.4	VALORES ADOPTADOS PARA LOS PARÁMETROS	124
6.4.1	<u>Generalidades.</u>	124
6.4.2	<u>Longitud de vehículos.</u>	125
6.4.3	<u>Distancias entre vehículos.</u>	125
6.4.4	<u>Periodos de análisis y repliegue.</u>	125
6.4.5	<u>Velocidad del vehículo adelantado.</u>	125
6.4.6	<u>Aceleración.</u>	125
6.4.7	<u>Deceleración.</u>	127
6.5	VALORES DE LOS PARÁMETROS Y VARIABLES	127
6.6	DEFINICIÓN DE ZONAS DE PREAVISO Y DE PROHIBICIÓN DEL ADELANTAMIENTO	128
6.6.1	<u>Generalidades.</u>	128
6.6.1.1	Zonas de pre-aviso.	128
6.6.1.2	Prohibición del adelantamiento.	138
6.6.1.3	Criterios para la definición de zonas de pre-aviso y de prohibición del adelantamiento.	141
6.6.2	<u>Principio de zona de pre-aviso.</u>	142
6.6.3	<u>Final de la zona de preaviso y principio de una zona de prohibición.</u>	142
6.6.4	<u>Final de la zona de prohibición.</u>	149
6.6.5	<u>Distancia mínima entre dos prohibiciones consecutivas.</u>	150
6.6.6	<u>Resumen.</u>	152
6.6.7	<u>Ejemplo.</u>	152

LIBRO BLANCO SOBRE VELOCIDAD, VISIBILIDAD Y ADELANTAMIENTOS

1 INTRODUCCIÓN

1.1 COMPORTAMIENTO DE LOS CONDUCTORES

Una carretera constituye una infraestructura con un elevado grado de fijeza en sus elementos¹, y que 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 profesionales².

Las hipótesis que se manejan para proyectar las carreteras no pueden tener en cuenta simultáneamente:

- Las características de todos los vehículos: no sólo sus prestaciones³ y dispositivos de seguridad pasiva⁴ son diferentes, sino que su estado⁵ puede ser deficiente.
- Los comportamientos de todos los conductores, regulados por los artículos 2, 3 y 17 del vigente Reglamento General de Circulación⁶ (RGC), los cuales 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

¹ Sólo se puede exceptuar, en el estado actual de la técnica, la señalización de mensaje variable.

² Como sucede en el transporte ferroviario, aéreo o marítimo.

³ Peso, capacidad de aceleración y de frenado (ABS).

⁴ Airbag, barras laterales o antivuelco, etc.

⁵ Por ejemplo, la presión de inflado de los neumáticos.

⁶ Aprobado por Real Decreto 13/1992, de 17 de enero.

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 las anteriores disposiciones, algunos conductores tienen comportamientos anómalos, tales como:

- Negligencia¹ 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⁽¹⁾: apuramiento de las prestaciones del vehículo, desprecio de la señalización y normativa, y conducción 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 alcohol² o estupefacientes y sustancias psicotrópicas³.

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

Los riesgos asociados a un comportamiento anómalo de los conductores se ponen de manifiesto de forma más relevante en distintas circunstancias que requieren, precisamente, mayor concentración o sujeción a una normalización. Entre ellas destacan las siguientes:

- El tránsito por curvas en planta, y por otros puntos singulares de la carretera: cruces, entradas o salidas.
- El mantenimiento de una distancia adecuada entre vehículos que circulan en el mismo sentido.

¹ Artº 3 del RGC.

² Capítulo IV del Título primero del RGC.

³ Capítulo V del Título primero del RGC.

- La maniobra de detención ante un obstáculo imprevisto en la calzada.
- En carreteras de calzada única en las que, para adelantar a vehículos más lentos, sea preciso invadir el carril normalmente reservado a la circulación en sentido contrario, la maniobra de adelantamiento.

1.2 LAS REGLAMENTACIONES TÉCNICAS

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 supuestos¹ que sirvieron para diseñar la carretera. Sin embargo, los criterios de establecimiento de la señalización y, en general, del diseño de la carretera, no pueden cubrir simultáneamente todas las circunstancias de los vehículos y los comportamientos de sus conductores: cualquier criterio tendrá un campo de validez limitado. Por ello, es inevitable establecer un compromiso entre las posibilidades² 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 reglamentaciones eminentemente técnicas, rara vez pensadas para fundamentar en ellas procesos legales, y en las que se considera una multitud de factores externos de difícil fijación, y 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.

¹ Que, en general, el conductor desconoce.

² Tanto funcionales como económicas.

También es preciso distinguir, en una reglamentación técnica, la distinta obligatoriedad de su contenido:

- Normas o reglas de obligado cumplimiento, cuyo alcance y las eventuales excepciones a su cumplimiento han de estar previstos en ellas.
- Recomendaciones o directrices, cuyo cumplimiento es obligatorio salvo justificación en contrario.

En general, la recomendación suele ser anterior, cronológicamente, a la norma: tras un cierto período de evaluación, resulta posible en muchos casos delimitar las reglas obligatorias en todos los casos, y las excepciones que pueden admitirse en una norma.

1.3 EL CASO DE LA VELOCIDAD

El Capítulo II del Título II del Reglamento General de Circulación está dedicado a la velocidad, estableciendo que

- *"... 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..."¹*
- *"... se circulará a velocidad moderada y, si fuera preciso, se detendrá el vehículo cuando las circunstancias lo exijan..."²*

No obstante estas disposiciones, 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.

¹ Artículo 45 del RGC.

² Artículo 46 del RGC.

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

En relación con estos criterios, se pueden distinguir dos niveles:

- Los relacionados con una seguridad estricta, basada en velocidades elevadas y en maniobras de emergencia.
- Los relacionados con la comodidad de la conducción, basada en velocidades más normales y en maniobras menos bruscas y realizadas con mayor margen.

El segundo de los niveles citados es el que se debe usar para el diseño de la carretera; mientras que el primero se debe utilizar para la comprobación de ciertos aspectos de la seguridad de la circulación.

2 NORMATIVA TÉCNICA EN RELACIÓN CON LA VELOCIDAD

La normativa técnica en vigor define una serie de conceptos relativos a la velocidad, que se exponen a continuación y que, como se verá, no siempre forman un todo coherente y se pueden prestar a ciertas confusiones que se comentan al final de cada apartado. Las citas textuales van en *letra cursiva*.

2.1 INSTRUCCIÓN 3.1-IC "TRAZADO" (1961)

La aún vigente Instrucción de la Dirección General de Carreteras 3.1-IC "Características geométricas. Trazado", aprobada por Orden Ministerial de 22 de abril de 1961, define, entre otros conceptos:

- La velocidad geométrica, como *"la máxima velocidad media que puede conseguirse en condiciones de seguridad en un tramo de carretera, cuando las circunstancias meteorológicas y de tráfico son tan favorables, que las únicas limitaciones vienen determinadas por las características geométricas del tramo"*.
- La velocidad real (de circulación) en un tramo de carretera, como *"la máxima velocidad media que puede garantizarse en condiciones de seguridad a cualquier conductor, en las condiciones de tráfico existentes en la hora de proyecto⁽¹⁾. A efectos prácticos, se considera como velocidad real aquella que es superada únicamente por el 20 % de los vehículos"*.

Estos dos conceptos son muy poco usados para el trazado, por lo que sus imprecisiones no resultan relevantes. La velocidad geométrica no es empleada por la Instrucción 3.1-IC, y la velocidad real sólo lo es en relación con las condiciones⁽²⁾ que hacen necesario el establecimiento de una "vía lenta".

(1) Se entiende por condiciones de tráfico existentes en la hora de proyecto a aquéllas, especialmente la intensidad, que sólo son rebasadas durante un cierto número de horas (normalmente 30) al año. Este concepto no está definido explícitamente en la Instrucción 3.1-IC.

(2) Cuadro #13

Velocidad específica (km/h)	60	70	80	100	120
Velocidad real (km/h)	50	55	60	65	70

En cambio, resulta fundamental el concepto de **velocidad específica** de una curva circular, definida como "la máxima velocidad que se puede mantener en condiciones de seguridad en una curva circular de longitud suficiente, cuando las circunstancias meteorológicas y de tráfico son tan favorables, que las únicas limitaciones vienen impuestas por las características geométricas de la curva circular⁽¹⁾".

La Instrucción 3.1-IC fija⁽²⁾ un valor mínimo de la **velocidad específica** de cada una de las alineaciones de un tramo de carretera, en función de la naturaleza (relieve) del terreno y de la intensidad media diaria (IMD) del tramo. Este concepto, sin embargo, está más relacionado con la **velocidad de proyecto** que se analiza en el apartado #4.

(1) Además, "puede extenderse esta definición a cualquier alineación de características geométricas constantes a lo largo de toda ella".

(2) Cuadro #1

Terreno	IMD		
	< 500	500 á 2 000	> 2 000
	Velocidad específica (km/h)		
Llano	70	100	120 - 100
Ondulado	60	80	100 - 80
Accidentado	50	60	80 - 60
Muy accidentado	30	40	80 - 60

Para curvas circulares la Instrucción asocia, a cada valor de la velocidad específica, un valor del radio⁽¹⁾, a través del valor f del rozamiento transversal movilizado, calculado por la expresión

$$f = \frac{(VE)^2}{127 * R} - \frac{p}{100}$$

siendo: VE (km/h) la velocidad específica
 R (m) el radio
 p (%) el peralte

(1) Y a cada valor del radio, el correspondiente peralte:

(Cuadro #6)

R	p (%)
< 50 m	10,0
50 á 70 m	9,5
70 á 90 m	9,0
90 á 110 m	8,5
110 á 140 m	8,0
140 á 170 m	7,5
170 á 210 m	7,0
210 á 260 m	6,5
260 á 320 m	6,0
320 á 390 m	5,5
390 á 460 m	5,0
460 á 560 m	4,5
560 á 660 m	4,0
660 á 780 m	3,5
780 á 940 m	3,0
940 á 1 100 m	2,5
1 100 á 4 000 m	2,0
> 4 000 m	Bombeo del 2 %

Para definir la velocidad específica, se impone la condición de que el rozamiento f sea igual a unos límites⁽¹⁾ en función de la propia velocidad, que se derivaron (originalmente en los años 40 - 50) de la observación del comportamiento real de los conductores en curva: por lo que están más relacionados con unas condiciones de circulación cómoda, que con el apuramiento de las condiciones de seguridad... ¡contrariamente a lo afirmado en la definición de velocidad específica!.

La velocidad específica interviene, según la citada Instrucción, en los conceptos siguientes:

- La distancia de parada (maniobra que se realiza a partir de dicha velocidad específica), que representa el valor mínimo de la distancia de visibilidad de parada, exigible en todo lugar de la carretera.

Se adopta un modelo matemático compuesto por un movimiento uniforme durante un tiempo de percepción y reacción de 2 s, seguido de un movimiento uniformemente decelerado en una rasante inclinada, con un coeficiente de rozamiento longitudinal entre rueda y pavimento, dado por la Fig. 1 en función de la velocidad inicial.

(1)

Cuadro #4

Velocidad específica (km/h)	f
30	0,210
40	0,191
50	0,171
60	0,156
70	0,148
80	0,141
90	0,135
100	0,126
120	0,112

Estos límites son muy inferiores a los relacionados con la seguridad de la circulación (Cf. apartado 3.4).

COEFICIENTES DE ROZAMIENTO LONGITUDINAL

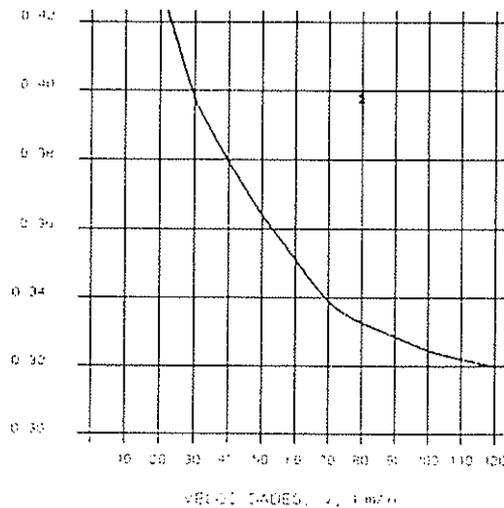


Fig. 1 Coeficientes de rozamiento longitudinal para parada (Instrucción 3.1-IC)

- La distancia de adelantamiento, que representa el valor mínimo de la distancia de visibilidad de adelantamiento, exigible en ciertas circunstancias⁽¹⁾.

Para la distancia de adelantamiento D_a (m) se consigna una fórmula, sin más explicaciones⁽²⁾:

$$D_a = 30 + V + (V - 8) * \sqrt{\frac{0,7 * V}{j}}$$

(1) En todo lugar de una carretera con calzada única y tres carriles (el central para adelantamientos en ambos sentidos), y en la máxima longitud posible en las de calzada única y dos carriles, sin bajar de una proporción mínima (Cuadro #3) en una longitud de 5 km.

(2) Al parecer, esta fórmula responde a un modelo matemático de seguimiento de un vehículo que circula a una velocidad inferior en 16 km/h a la específica, con un tiempo de percepción y reacción de 3 s y una longitud media de los vehículos igual a 6 m. Hay quien piensa que... ¡está equivocada!

siendo: V (km/h) la velocidad específica.

j (m/s^2) la aceleración media, dada por la Fig. 2.

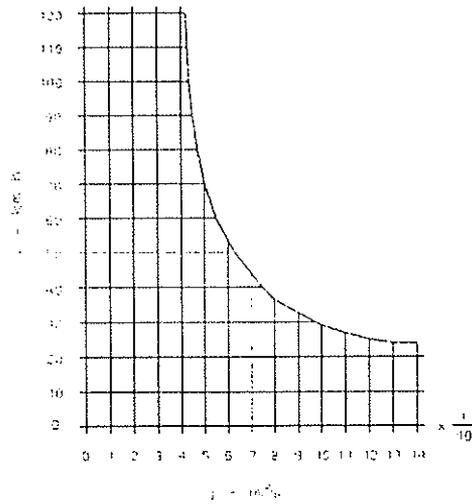


Fig. 2 Valor normal de la aceleración, a efectos de la distancia de adelantamiento (Instrucción 3.1-IC)

- La longitud mínima de un acuerdo vertical, bien directamente por razón de estética, bien indirectamente por razón de visibilidad (parada o adelantamiento).
- La longitud mínima de las curvas de acuerdo, en relación con la limitación de la variación de la aceleración centrípeta no compensada por el peralte.
- La anchura de los carriles.

2.2 ORDEN CIRCULAR 8.2-IC "MARCAS VIALES" (1962)

La Orden Circular de la Dirección General de Carreteras y Caminos Vecinales 8.2-IC "Marcas viales", de 23 de abril de 1962, ha sido anulada por la Norma 8.2-IC "Marcas viales" (1987)⁽¹⁾.

En esta Orden Circular se utiliza como referencia⁽²⁾ una velocidad que, en el caso de nuevas carreteras es el 90 % de la velocidad de proyecto⁽³⁾ y, para carreteras ya en explotación -caso más frecuente- en que no es fácil conocer la velocidad de proyecto... es la de un vehículo que, circulando en buenas condiciones de visibilidad y tráfico, lleve una velocidad sólo superada por el 10 % de los vehículos que circulan por ese tramo.

En su Capítulo II y apartado 2.4.2, se enfoca el problema del adelantamiento de una forma que, a pesar del tiempo transcurrido, sigue teniendo vigencia y actualidad:

Una determinación exacta de las zonas en que el adelantamiento es peligroso exigiría un estudio estadístico de las velocidades reales de los vehículos sobre la carretera considerada, y la fijación de la distancia de visibilidad que permite el adelantamiento, teniendo en cuenta dichas velocidades y su distribución.

Es preciso tener en cuenta que dicha distancia varía según la velocidad de los vehículos más rápidos, pero que depende igualmente de la proporción y velocidad de los vehículos lentos o sea, en cierto modo, de la composición del tráfico. Más aún, la distancia de visibilidad que permite el adelantamiento depende también de los vehículos que circulan en sentido inverso y de su número. Por otra parte, sobre una carretera de dos carriles dichos vehículos pueden retardar la ejecución de la maniobra de adelantamiento, ya que el conductor que se dispone a pasar a otro debe esperar, a veces, a que el carril de la izquierda esté libre para iniciar su maniobra, necesitando en este caso mayor distancia que sino hubiese tenido que detenerse.

Estas consideraciones muestran la complejidad de un estudio de adelantamiento, como consecuencia de los numerosos factores que intervienen. Según los valores que se les atribuya y su combinación, la distancia que permite el adelantamiento puede variar del simple al doble en un mismo punto singular.

La distancia mínima de visibilidad que se debe adoptar para marcar líneas continuas sobre carreteras de dos y tres carriles es, pues, necesariamente un compromiso entre las exigencias de

(1) Apartado 2.4.

(2) Especialmente en lo relativo al adelantamiento.

(3) No definida en ese texto.

la seguridad y la de fluidez de la circulación. Si se adopta la distancia más larga, es decir, la que corresponde a las condiciones más desfavorables de adelantamiento, las líneas que de acuerdo con ella se deben marcar garantizan teóricamente la seguridad, pero restringen considerablemente el uso de la calzada, porque las condiciones más desfavorables no se presentan más que raramente. Por el contrario, si en un tramo de carretera en que la visibilidad es suficiente no se marca ninguna línea continua, es peligroso pero deja, en principio, plena libertad al conductor. Si no fuese así, la utilización de la carretera se vería considerablemente perjudicada y la seguridad sería ilusoria, porque continuamente se cometerían infracciones.

De todas formas, esta distancia mínima depende de la velocidad V de los vehículos... A continuación se fijan unas cifras que realizan, generalmente, el compromiso buscando entre las exigencias de la seguridad y de la facilidad de la circulación:

Velocidad V (km/h)	50	60	70	80	90	100
Visibilidad (m)	80	110	140	175	210	250

2.3 NORMA COMPLEMENTARIA PARA AUTOPISTAS (1976)

La Norma complementaria de la Instrucción 3.1-IC "Trazado de autopistas", aprobada por Orden Ministerial de 12 de marzo de 1976, define la velocidad de proyecto de una autopista o tramo⁽¹⁾ de autopista, como "la... que permite definir las características geométricas mínimas de construcción de sus elementos particulares". Implícitamente se admite que ninguna velocidad específica debe ser inferior a la velocidad de proyecto.

Se definen cuatro valores estándar de la velocidad de proyecto⁽²⁾, a definir en las instrucciones para la redacción del estudio correspondiente, y cuya diferencia entre tramos contiguos se limita á 20 km/h⁽³⁾.

Se modifica algo el modelo de deceleración para detención especificado en la Instrucción 3.1-IC, adoptando un tiempo de percepción y reacción algo mayor (2,5 s), y fijando el coeficiente de rozamiento longitudinal en el valor mínimo (0,32) de la gama propuesta por la 3.1-IC.

(1) A estos efectos, se denomina tramo al limitado por dos enlaces consecutivos o no, por uno de éstos y un terminal, o por dos terminales".

(2) 140, 120, 100 y 80 km/h.

(3) Salvo que se interpongan tramos intermedios de longitud no inferior á 5 km, y cuya velocidad de proyecto permita efectuar a transición con diferencias inferiores á 20 km/h.

2.4 NORMA 8.2-IC "MARCAS VIALES" (1987)

La Norma 8.2-IC "Marcas viales", aprobada por Orden Ministerial de 16 de julio de 1987, introduce un nuevo concepto: la velocidad máxima que un precepto general, la señalización fija o las limitaciones físicas (velocidad específica⁽¹⁾) permitan. Aunque esta definición se puede someter a distintas interpretaciones literales, lo correcto es definir como velocidad máxima al menor de los tres valores siguientes:

- La limitación genérica impuesta por el Reglamento de circulación, aunque no esté explícitamente señalizada.
- La limitación específica impuesta por la señalización vertical.
- La limitación resultante de las características del trazado, aunque no esté explícitamente señalizada. Entre estas características ocupa un lugar destacado la velocidad específica de las curvas.

Esta velocidad máxima interviene en:

- Las dimensiones de trazo y vano en las marcas longitudinales discontinuas.
- Detalles de señalización horizontal en carriles adicionales o de cambio de velocidad.
- En la señalización de las prohibiciones del adelantamiento y su preaviso, distinguiendo el caso de carreteras de nuevo trazado y carreteras existentes.

En los casos en que la marca longitudinal continua se utilice como consecuencia de la falta de visibilidad para adelantamiento, se iniciará cuando la distancia de visibilidad disponibles (observador y obstáculo a 1,2 m de altura sobre el pavimento y a 1 m del borde interior de su carril) sea inferior a la indicada en la tabla 1 en función de la velocidad máxima permitida VM.

(1) Esta velocidad específica se podrá observar directamente en la vía, o estimar a partir de la caracterización del trazado. El Anexo #1 a la Norma incluye, para ello, un gráfico que relaciona el ángulo de giro y la bisectriz de una curva (es decir, una estimación de su radio) con la velocidad específica, y cita métodos de medida con bases largas y cortas, así como los aparatos de radar.

TABLA 1

DISTANCIA DE VISIBILIDAD NECESARIA (DVN)
PARA NO INICIAR LA MARCA CONTINUA DE PROHIBICION DEL ADELANTAMIENTO
O PARA FINALIZARLA EN VIAS EXISTENTES

Velocidad máxima (km/h)	40	50	60	70	80	90	100
DVN (m)	50	75	100	130	165	205	250

La marca continua finalizará en el punto en que se vuelva a disponer de una distancia de visibilidad igual a la dada por la tabla 1 en vías existentes, y por la tabla 2 en vías de nuevo trazado.

TABLA 2

DISTANCIA DE VISIBILIDAD NECESARIA (DVN)
PARA FINALIZAR LA MARCA CONTINUA DE PROHIBICION DEL ADELANTAMIENTO
EN VIAS DE NUEVO TRAZADO

Velocidad máxima (km/h)	40	50	60	70	80	90	100
DVN (m)	145	180	225	265	310	355	395

Cuando entre dos prohibiciones de adelantamiento quede un tramo de una longitud inferior a la dada por la tabla 1, se unirán ambas prohibiciones, ya que no se cuenta con suficiente distancia para completar el adelantamiento, o para desistir de él. En vías de nuevo trazado, es deseable que la longitud del tramo no baje de la indicada en la tabla 3.

TABLA 3

DISTANCIA DESEABLE
ENTRE DOS MARCAS CONTINUAS DE PROHIBICION DEL ADELANTAMIENTO
EN VIAS DE NUEVO TRAZADO

Velocidad máxima (km/h)	40	50	60	70	80	90	100
DVN (m)	160	200	245	290	340	385	435

Cuando la aplicación de la regla anterior resulte en una elevada proporción del tramo con marca vial continua, deberá reconsiderarse la velocidad máxima permitida VM, a fin de disminuir dicha proporción.

La zona de preaviso anterior al principio de una marca continua de prohibición de adelantamiento deberá disponerse a partir de la sección en que la distancia de visibilidad disponible sea inferior a la necesaria, dada por la tabla 4 en función de la velocidad máxima VM permitida en el tramo.

TABLA 4

DISTANCIA DE VISIBILIDAD (DVN) AL PRINCIPIO DE UNA ZONA DE PREAVISO

Velocidad máxima (km/h)	40	50	60	70	80	90	100
DVN (m)	185	230	270	310	350	390	435

Caso de que no resultase posible la determinación de la distancia de visibilidad disponible a que se refiere el párrafo anterior, la longitud mínima de la zona de preaviso anterior al principio de una prohibición de adelantamiento no podrá ser inferior a la fijada en la tabla 5.

TABLA 5

LONGITUD MINIMA DE UNA ZONA DE PREAVISO

Velocidad máxima (km/h)	40	50	60	70	80	90	100
L (m)	95	115	135	155	175	190	215

2.5 INSTRUCCIÓN 8.3-IC "SEÑALIZACIÓN DE OBRAS" (1987)

La Instrucción de la Dirección General de Carreteras 8.3-IC "Señalización de obras", aprobada por Orden Ministerial de 31 de agosto de 1987, y cuyo contenido coincide, en líneas generales, con el documento de la OCDE "Gestion de la circulation et sécurité routière au droit des zones sous chantier" (1989), considera:

- Una velocidad de aproximación normalmente practicada al aproximarse a la zona de obras... (que) con frecuencia rebasa los límites impuestos por la legislación o por la señalización ordinaria de la carretera. Es preciso hacer una estimación realista, recurriendo incluso a estimaciones directas, de la... que sólo sea rebasada por el 15 % de los vehículos, la cual se adoptará como (velocidad de aproximación).
- Una velocidad limitada en la zona de obras, constante.

Resultan interesantes los comentarios contenidos en el apartado 3.1:

Lo más frecuente es que, por rutina, desidia o temor a responsabilidades, se fijen valores anormalmente bajos (para la velocidad limitada). La pretensión de limitar la velocidad exclusivamente por medio de señalización, a un valor que no sea realista y fácilmente comprensible por el usuario no sólo no alcanza el efecto pretendido, al ser ignorada la limitación o servir ésta exclusivamente de trampa a efectos represivos, sino

que desprestigia a la propia señalización y reduce su credibilidad general.

Por consiguiente, para la velocidad limitada en la zona de obras se deberá adoptar el mayor valor posible, compatible con la visibilidad y protecciones disponibles. En vías de elevada velocidad y, en especial, en autopistas y autovías, no se deberá limitar la velocidad a valores inferiores a:

- 80 km/h si sólo se reduce el número de carriles.
- 60 km/h si, además, se establecen desvíos o carriles provisionales, en especial cambiando de calzada.
- 40 km/h para los vehículos que no tengan que detenerse ante una ordenación (de la circulación) en sentido único alternativo.

En el resto de las vías, y salvo justificación en contrario, no se deberá limitar la velocidad a valores inferiores a 50 km/h, salvo en el caso de ordenación (de la circulación) en sentido único alternativo, en la que el límite para los vehículos que no tengan que detenerse se podrá rebajar a 40 km/h.

En la aproximación a una zona de obras, la deceleración sigue el modelo descrito para la distancia de parada, con un tiempo de percepción y reacción de 2 s, y un coeficiente de rozamiento longitudinal, entre rueda y pavimento, comprendido entre 0,14 (recomendable) y 0,28 (máximo)⁽¹⁾.

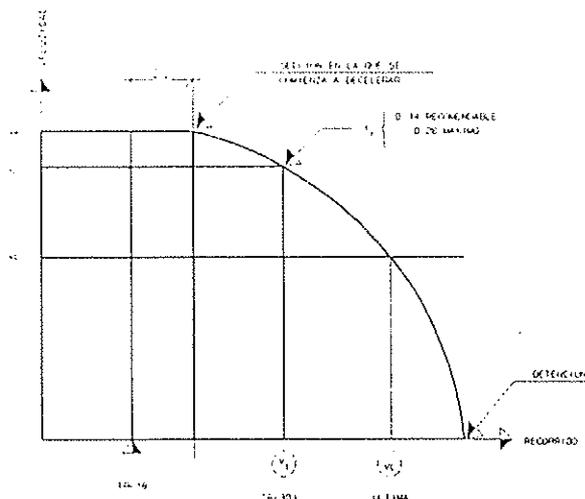


Fig. 3. Modelo de reducción de la velocidad y su relación con la señalización (Norma 8.3-IC)

(1) Con rasante horizontal, las deceleraciones resultan de 5 y 10 (km/h)/s, respectivamente.

2.6 INSTRUCCIÓN 8.1-IC "SEÑALIZACIÓN VERTICAL" (1991)

La nueva Instrucción de la Dirección General de Carreteras 8.1.-IC "Señalización vertical", actualmente está en fase de borrador pero se está aplicando en la práctica, sobre todo en lo no regulado por disposiciones de mayor rango, ni que las contradiga.

2.6.1 Señalización y balizamiento de curvas.

Se definen los siguientes conceptos:

- La velocidad máxima en curvas, en condiciones de seguridad, correspondiente a la movilización de un rozamiento transversal igual á 0,25.

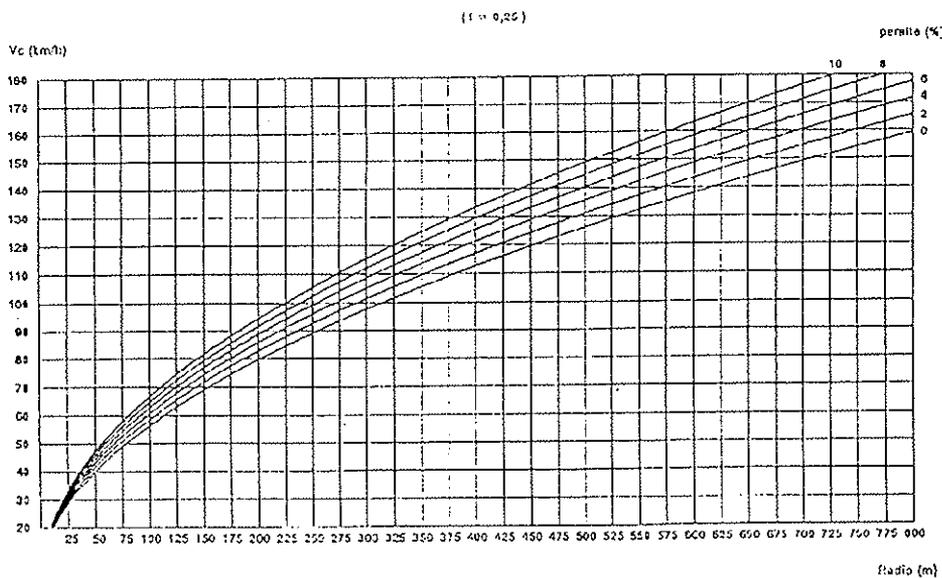


Fig. 4 Velocidad máxima de seguridad en curvas (Borrador de Instrucción 8.1-IC)

- La velocidad máxima de aproximación a una curva, que depende de:
 - La distancia... que haya entre ella y la anterior.
 - Las velocidades máximas en ambas.
 - Las posibilidades de deceleración y aceleración del vehículo.

En la práctica, se obtiene en función de la distancia corregida... entre la curva y la anterior, y de la inclinación media de la rasante entre ambas. La distancia corregida se obtiene sumando a la distancia real (entre tangentes comunes) dos términos de ajuste:

- Un ajuste por deceleración, a razón de 7 (km/h)/s⁽¹⁾, más el efecto de la inclinación de la rasante, hasta alcanzar la velocidad máxima de la curva.
- Un ajuste por aceleración desde la velocidad máxima de la curva anterior, con aceleración variable⁽²⁾.

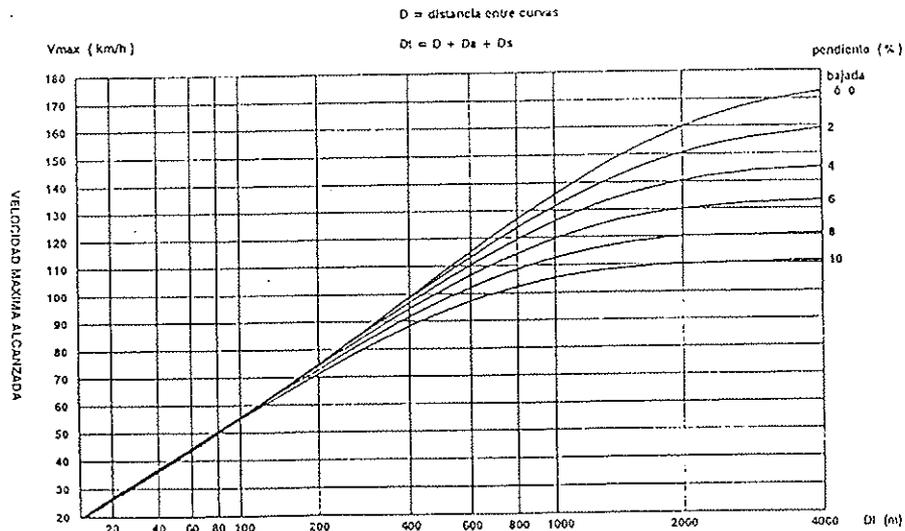


Fig. 5 Velocidad máxima de aproximación a una curva (Borrador de Instrucción 8.1-IC)

La diferencia entre la velocidad V_m máxima de aproximación a una curva y la velocidad V_s máxima en ésta determina el grado de la curva y, consecuentemente, su señalización y

(1) Correspondiente a una suave aplicación de los frenos. Coeficiente de rozamiento longitudinal del orden de 0,20.

(2) Correspondiente a un vehículo de 100 CV de potencia y 175 km/h de velocidad máxima, en condiciones de máximas prestaciones, según el modelo descrito en el apartado 3.5.2.1.

balizamiento⁽¹⁾. En ningún caso se explicitan limitaciones o recomendaciones de velocidad superiores al límite genérico impuesto por la reglamentación.

2.6.2 Señalización de velocidad máxima.

Se define, además de la velocidad máxima impuesta por la señalización, una velocidad de aproximación, referida al percentil 85 (con nivel de servicio A ó B) real, aunque rebase las limitaciones genéricas y aun las específicas impuestas por la señalización.

Son interesantes los comentarios contenidos en el apartado 7.1 de la Instrucción:

Para ser respetadas y exigibles, las limitaciones de velocidad deben aparecer razonables, y no innecesariamente restrictivas. No se impondrán límites excesivos que perjudiquen la credibilidad de la señalización, tengan repercusiones en la capacidad de la carretera, o provoquen accidentes por alcance o formación de colas.

La deceleración necesaria para alcanzar una velocidad limitada a partir de otra de aproximación responderá a un modelo de deceleración uniforme por la acción de los frenos, a razón de 7 (km/h)/s⁽²⁾ -correspondiente a una suave aplicación de aquéllos- complementada por el efecto de la inclinación de la rasante, después de un tiempo de percepción y decisión de 2 segundos.

(1)

TABLA #8

BALIZAMIENTO Y SEÑALIZACION SEGUN EL GRADO DE LA CURVA

$V_m - V_s$ (km/h)	PRIMER PANEL	SEÑALES
< 15	Ninguno	Ninguna
15 á 30	Sencillo	P-13 ó P-14
30 á 45	Doble	P-13 ó P-14 + S-7
> 45	Triple	

(2)

Coefficiente de rozamiento longitudinal del orden de 0,20.

2.6.3 Señalización sobre adelantamiento.

La velocidad que se considera, a efectos de la maniobra de adelantamiento, es la que en la realidad sólo es rebasada por el 15 % de los vehículos (V_{85}).

Se adopta una normativa algo compleja, en la que se definen:

- Zonas de adelantamiento permitido.
- Zonas de preaviso, dentro de las cuales no se debe iniciar un adelantamiento⁽¹⁾, pero sí se puede completar uno iniciado con anterioridad.
- Zonas de prohibición del adelantamiento, dentro de las cuales no se debe invadir el carril contrario.

La definición del principio y final de las zonas de preaviso y adelantamiento se basan en la V_{85} y en la visibilidad disponible VD.

- a) El principio de una zona de preaviso se situará⁽²⁾ en la sección en la que se deje de disponer de una visibilidad igual a la dada por la tabla 12⁽³⁾.

TABLA 12

V_{85} (km/h)	50	60	70	85	100	120	140
L (m)	110	150	195	275	355	480	690

- (1) Sería cuestionable si esta limitación abarca a vehículos muy lentos (tractores) o a vehículos cuya ocupación transversal es reducida (dos ruedas).
- (2) Salvo lo previsto en los apartados b.2), b.3) y b.4) siguientes.
- (3) Igual a la visibilidad necesaria para iniciar y desistir de un adelantamiento en presencia de un vehículo contrario.

a la dada por la tabla 19⁽¹⁾, en cuyo caso se adelantará el principio de la zona de prohibición⁽²⁾, de manera que la longitud de ésta sea igual a la dada por la tabla 19.

TABLA 19

V_{85} (km/h)	50	60	70	85	100	120	140
L (m)	30	35	40	50	60	70	80

- d) El principio de la siguiente zona de preaviso, independientemente determinado con arreglo a los apartados a) y b) anteriores, no estará antes del final de la zona de prohibición. En caso contrario, se unirán las dos zonas de prohibición.

Esta última condición resulta, en la práctica, muy restrictiva, pues da lugar a prohibiciones de adelantamiento muy largas.

(1) Correspondiente á 2 s a la velocidad V_{85} .

(2) Y, en su caso, el principio de la zona de preaviso, de modo que la longitud de ésta no resulte inferior a la dada por la tabla 13.

3 VARIACIONES DE LA VELOCIDAD INSTANTÁNEA

3.1 DISTRIBUCIÓN TEMPORAL

3.1.1 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.
- La 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.

3.1.2 Forma de la curva de distribución.

3.1.2.1 Datos del Reino Unido.¹

En el Reino Unido⁽¹⁾ se admite que, cuando no hay interferencia por parte de otro tráfico⁽²⁾, en la distribución temporal de velocidades de libre circulación se cumplen las relaciones

$$\frac{V_{99}}{V_{85}} = \frac{V_{85}}{V_{50}} = 1,19 = \sqrt{\sqrt{2}}$$

Estas relaciones estructuran un sistema de diseño basado en una serie de valores estándar de la velocidad, en la que la razón entre dos términos consecutivos es $\sqrt{\sqrt{2}}$. Esta serie es:

35 - 42,5 - 50 - 60 - 70 - 85 - 100 - 120 - 145 km/h

y, dentro de ella, la diferencia entre V_{99} y V_{85} , o entre esta última y V_{50} , está representada por un escalón de la serie. Dado que en los factores dinámicos que intervienen en el trazado influye básicamente el cuadrado de la velocidad, la razón entre los valores de dichos factores, correspondientes a dos términos de la serie, es $\sqrt{2}$.

-
- ¹
- Departmental Advice Note TA 43/84 "Highway Link Design", Part B, 1.
 - LF 779 & 780. Speed Flow Relationships on Rural Motorways and All-Purpose Dual Carriageways. TRRL 1979.
 - LF 923 & 924. Speed/Flow/Geometry Relationships on Single Rural Carriageways. TRRL 1980.
 - LF 925. Changes in Speeds on Rural Roads. TRRL 1980.

² Niveles de servicio A ó B.

3.1.2.2 Datos españoles.

La circulación en España pone de manifiesto unas pautas de circulación algo diferentes a la del Reino Unido, caracterizadas por una mayor proporción de vehículos veloces.

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 las curvas de distribución acumulada representadas en la Fig. 6, que muestran una buena aproximación a una distribución de GALTON (logarítmico-normal), coherente con que no hay velocidades negativas ni infinitas.

Los valores de los fractiles relevantes, y la razón entre ellos, se muestran en la tabla #3.1.

TABLA #3.1

DATOS SOBRE DISTRIBUCIONES DE VELOCIDAD
(medias, fuera de poblado)

FRACTIL	CARRETERAS DE CALZADA UNICA		CARRETERAS CON CALZADAS SEPARADAS
	ARCEN \leq 1,5 m	ARCEN $>$ 1,5 m	
V_{99} (km/h)	128	145	165
V_{85} (km/h)	90	110	130
V_{50} (km/h)	70	90	105
V_{99} / V_{85}	1,38	1,33	1,28
V_{85} / V_{50}	1,30	1,25	1,23

Por las circunstancias de su toma, se puede considerar que estos datos corresponden a las velocidades practicadas por los conductores donde las condiciones son muy favorables: tramos rectos de gran longitud en terreno llano, de día, sin lluvia y con bajas intensidades de circulación. Llama la atención el escaso respeto de las limitaciones genéricas de velocidad. Sin embargo, donde las circunstancias no resulten tan favorables, parece lógico que las velocidades resulten inferiores; aunque no se dispone actualmente de datos sobre su distribución ni que la relacionen con otros parámetros.

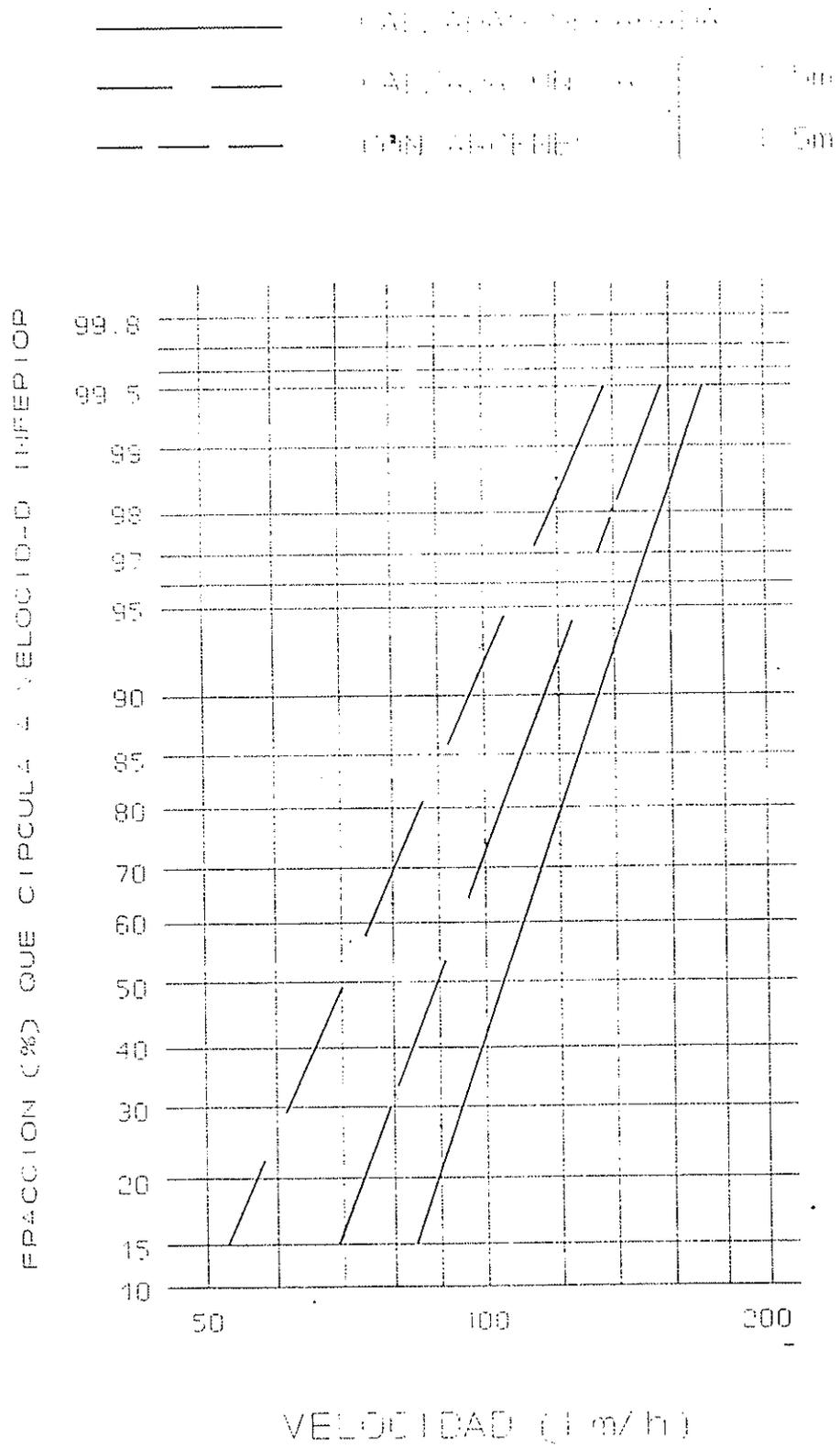


Fig. 6: Distribuciones medias de velocidad en España (DGC, 1992).

También muestra la tabla #3.1 que la razón V_{99} / V_{85} no es constante, sino que disminuye de 1,38 á 1,28 al aumentar la clase de la carretera; mientras la razón V_{85} / V_{50} disminuye de 1,30 á 1,23. Consecuentemente, resulta más complejo que en el caso del Reino Unido establecer una serie de valores estándar de la velocidad aplicable a las condiciones españolas, en la que la diferencia entre V_{99} y V_{85} esté representada por un escalón de una serie geométrica. En base a los datos citados, se podrían plantear las siguientes:

80 - 100 - 130 - 165 km/h para carreteras con calzadas separadas

45 - 65 - 85 - 110 - 145 km/h para carreteras con calzada única con arcenes de anchura no inferior á 1,5 m cada uno

35 - 50 - 65 - 90 - 125 km/h para carreteras con calzada única con arcenes de anchura inferior á 1,5 m cada uno

En estas series estándar se puede admitir que, si un término representa V_{99} , el siguiente representa la correspondiente V_{85} . Cada escalón representa un grado de empeoramiento de las condiciones favorables que corresponden a los términos más altos de la serie.

3.1.3 Fractil de referencia.

Es preciso decidir el fractil de la distribución temporal de velocidades al que se refieren los elementos funcionales de una sección de carretera: trazado y señalización. En relación con este problema, se pueden hacer las consideraciones siguientes:

- Un trazado que proporcionara 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 expertos con vehículos de altas prestaciones⁽¹⁾, que pueden tolerar condiciones más estrictas de seguridad.
- La señalización de las condiciones de seguridad no debe resultar excesivamente restrictiva y, por tanto, menos creíble y respetada por una fracción apreciable de los conductores.

¹ Y buenas medidas de seguridad activa y pasiva.

- En otros casos, referirse a fractiles altos de la distribución de velocidades resulta excesivo. Así, la velocidad V_0 de un vehículo lento al que se pretende adelantar⁽¹⁾, y desde la cual se inicia una maniobra de adelantamiento desde una posición de seguimiento, no puede ser relativamente grande: se trata de un vehículo lento, y tomar valores superiores conduce a distancias de adelantamiento muy elevadas.

En relación con estas consideraciones, la Sociedad debe establecer un compromiso aceptable entre los costes de construcción y los de explotación⁽²⁾, habida cuenta de la diversidad de los comportamientos humanos a los que una infraestructura única pretende servir. En las reglamentaciones técnicas modernas, este compromiso adopta la forma siguiente:

- Se refieren a la velocidad V_{85} , (sólo superada por el 15 % de los vehículos⁽³⁾), 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⁽⁴⁾ aceptables⁽⁵⁾ 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).

¹ Apartado 6.3.2.6.

² Entre estos últimos se cuentan los correspondientes a la accidentalidad de la circulación que, por desgracia, no se pueden anular.

³ Aunque la V_{85} se refiere "stricto sensu" al conjunto de los vehículos, con frecuencia se aplica sólo a las velocidades de los vehículos ligeros, de más elevadas prestaciones.

⁴ Relacionados con el cuadrado de la velocidad.

⁵ Es decir, con un margen suficiente de seguridad estricta.

- Se debe referir a la velocidad V_{99} , la señalización de las siguientes condiciones de seguridad estricta 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).
- El resto de la señalización se puede referir a la V_{85} .

3.1.4 Estimación de V_{85} y V_{99} .

En carreteras existentes, se pueden medir directamente tanto V_{85} como V_{99} , aplicando las técnicas que se describen en el Anexo #1, por medio de aparatos de radar o bucles de aforo.

En nuevos trazados aún no construídos, o cuando no se puedan aplicar las técnicas anteriores, se pueden emplear modelos matemáticos⁽¹⁾ para, a partir de la definición del trazado, tanto en planta como en alzado y sección, estimar la V_{99} , en la que influyen más las prestaciones del vehículo y la destreza del conductor que en la V_{85} . Esta última se puede deducir, en principio, multiplicando la V_{99} por un factor como el expuesto en la tabla #3.1.

3.1.5 Limitaciones de velocidad.

En la distribución temporal de velocidades instantáneas, y 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 circulares⁽²⁾.

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. Tam-

¹ Apartados 3.3, 3.4 y 3.5, especialmente el 3.5.3.3.

² En otros elementos del trazado en planta, como rectas y curvas de transición, la velocidad instantánea está determinada por las necesidades de deceleración a la entrada de las curvas circulares, y por las posibilidades de aceleración a su salida.

bién hay que tener en cuenta que ciertos conductores no respetan una señalización limitativa de la 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 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.

Esta situación requiere 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 las condiciones de seguridad estricta propias de la carretera como, por ejemplo, la señalización y balizamiento de curvas, la visibilidad necesaria para la detención ante un obstáculo imprevisto, y la aproximación a una zona con restricciones a la circulación, 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.

Otros casos, como las prohibiciones del adelantamiento, pueden resultar más complejos:

- Si se refieren a velocidades elevadas, las visibilidades necesarias serán mayores, resultando en tramos también mayores de prohibición, lo cual reduce el nivel de servicio y, posiblemente, incite a la transgresión.
- Si, a través de una más eficaz acción represiva, bajasen las velocidades, las visibilidades necesarias también podrían bajarse.

3.2 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

3.2.1 Generalidades.

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⁽¹⁾ de carretera, ni siquiera si éste es homogéneo en cuanto a diseño. Hay una distribución espacial de velocidades, como la representada en la Fig. 7, que es consecuencia de:

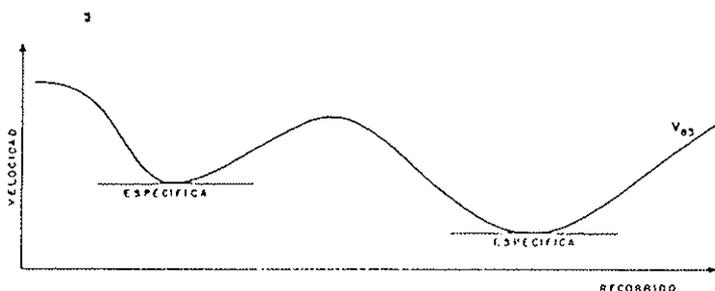


Fig. 7: Distribución espacial de velocidades.

- 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, considerar 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

¹ A estos efectos, parece que la longitud mínima de tramo a considerar es del orden de 2 km.

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), la tercera fase puede reducirse o llegar a faltar. 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.

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

La deceleración, además, interviene también en otras maniobras, como la divergencia para tomar una salida de la carretera, la detención ante un obstáculo inesperado, o el desistimiento de un adelantamiento ya iniciado; mientras que la aceleración interviene en el cruce de otras trayectorias de circulación y, especialmente, en el adelantamiento de vehículos más lentos.

3.2.2 Factores que influyen en la distribución espacial de velocidades.

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 S de la planta
- La ondulación de la rasante
- La anchura de la plataforma
- La visibilidad disponible
- La frecuencia de accesos⁽²⁾ y nudos

¹ 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.

² Excepto los residenciales.

3.2.3 Valor representativo de la distribución espacial.

A partir del fractil de referencia⁽¹⁾ representativo de la distribución temporal de velocidades instantáneas en cada sección de un tramo⁽²⁾ 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

Si el fractil de referencia de la distribución temporal es el 85, el valor de \bar{V}_{85} se asocia a la velocidad de proyecto del tramo⁽⁴⁾.

¹ Apartado 3.1.3.

² Nunca menos de 2 km: si el tramo fuera de longitud inferior a 2 km, se agrupará con el contiguo hasta alcanzar dicha longitud mínima.

³ 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.

⁴ Apartado 4.

3.2.4 Estimación de \bar{V} .

3.2.4.1 Modelización.

En carreteras existentes, se pueden efectuar mediciones directas de la velocidad en varios puntos, aplicando las técnicas que se describen en el Anexo #1, por medio de aparatos de radar o bucles de aforo; y de ellas estimar \bar{V} .

En nuevos trazados aún no construídos, o cuando no se puedan aplicar las técnicas anteriores, se pueden emplear modelos matemáticos para, a partir de la definición del trazado, tanto en planta como en alzado y sección, estimar la \bar{V}_{50} , en la que influyen menos las eventuales limitaciones específicas de la velocidad que en la \bar{V}_{85} . Esta última se puede deducir, en principio, multiplicando la \bar{V}_{50} por un factor como el expuesto en la tabla #3.1.

A continuación se expone uno de estos modelos, desarrollado en el Reino Unido⁽¹⁾ para carreteras fuera de poblado, y que reviste la forma

$$\bar{V}_{50} = VB - VV - RP \pm RA - RS$$

Los parámetros que intervienen en el modelo se analizan a continuación.

-
- ¹ - Departmental Advice Note TA 43/84 "Highway Link Design", Part B, 1.
 - LF 779 & 780. Speed Flow Relationships on Rural Motorways and All-Purpose Dual Carriageways. TRRL 1979.
 - LF 923 & 924. Speed/Flow/Geometry Relationships on Single Rural Carriageways. TRRL 1980.
 - LF 925. Changes in Speeds on Rural Roads. TRRL 1980.

3.2.4.2 Velocidad base.¹

La velocidad base VB representa la combinación más favorable de circunstancias, y se toma, en el modelo original británico, igual á:

- 108 km/h para autopistas de tres o más carriles por calzada.
- 104 km/h para autopistas de dos carriles por calzada.
- 102 km/h para las demás carreteras con calzadas separadas de tres o más carriles cada una.
- 98 km/h para las demás carreteras con calzadas separadas de dos carriles cada una.
- 88,5 km/h para carreteras de calzada única.

Con pavimento mojado se deducen 4,6 km/h en carreteras con calzadas separadas, y 2,8 km/h en las de calzada única.

La presencia de un tráfico Q {(veh/h)/carril} implica una reducción adicional de $\frac{6 * Q}{100\ 000}$ km/h en carreteras con calzadas separadas, y de $\frac{22 * Q}{120\ 000}$ km/h en las de calzada única.

Los datos sobre las condiciones españolas, contenidos en la tabla #3.1⁽¹⁾, muestran valores parecidos a los británicos:

- 105 km/h frente a la gama 98 á 108 km/h, para las carreteras con calzadas separadas
- 90 km/h frente á 88,5 km/h, para las de calzada única con arcenes amplios.
- 70 km/h para las de calzada única con arcenes estrechos.

¹ Apartado 3.1.2.

3.2.4.3 Deducción por falta de visibilidad.

En el modelo británico, se introduce una deducción para las carreteras de calzada única, igual á

$$VV = 12 \text{ km/h} - \frac{\overline{VD}}{60}$$

\overline{VD} (m) es la media armónica de la visibilidad disponible en el tramo, dada por

$$\overline{VD} = \frac{\sum l_i}{\sum \frac{l_i}{VD_i}} \times 720 \text{ m}$$

siendo: - VD_i la visibilidad (constante) en cada sección del tramo
 - l_i la longitud de cada sección.

3.2.4.4 Deducción por sinuosidad de la planta.

En el modelo británico, se introduce una deducción RP por restricción en planta, igual á:

- $\frac{9}{10} S$ km/h para carreteras con calzadas separadas.
- $\frac{S}{25}$ km/h para carreteras con calzada única.

siendo S la sinuosidad de la planta, medida en gon/km como la suma de los valores absolutos de los ángulos de giro del acimut a lo largo del tramo, dividida por la longitud de éste.

3.2.4.5 Corrección por ondulación de la rasante.

En el modelo británico, se introduce una corrección RA por restricción en alzado, igual á:

- $\frac{I_p}{4}$ km/h (que se añaden a la velocidad base), para carreteras con calzadas separadas.

- $\frac{I_r + 3 * I_p}{18}$ km/h (que se deducen de la velocidad base), para carreteras con calzada única.

siendo: - I_r , El índice de rampas, medido en m/km como la suma de los desniveles ascendidos a lo largo del tramo, dividida por la longitud de éste.

- I_p , El índice de pendientes, medido en m/km como la suma de los desniveles descendidos a lo largo del tramo, dividida por la longitud de éste.

3.2.5 Deducción por restricciones en la sección.

En el modelo británico, se introduce una deducción para las carreteras de calzada única; igual á

$$RS = 5 * \left[\frac{2}{A + 1} + \frac{F}{C} \right] - 1,1 * C$$

siendo: - C (m) la anchura de la calzada
 - A (m) la anchura del arcén más la de la berma contigua a él
 - F el número de accesos⁽¹⁾, nudos y estacionamientos por kilómetro (total por ambas márgenes).

¹ Excepto los residenciales.

3.3 DECELERACIÓN

3.3.1 Generalidades.

Tras la percepción de la necesidad de decelerar⁽¹⁾, se suele admitir que transcurre un intervalo de evaluación y reacción, sin que durante él se modifique la marcha del vehículo: a partir de entonces se decelera hasta reducir la velocidad al valor deseado en la sección en que éste resulta necesario. A continuación se examinan los principales parámetros que intervienen.

3.3.2 Velocidad inicial.

La velocidad inicial se suele tomar igual a V_{85} para las maniobras en que la condición determinante es la comodidad, como puede ser la aproximación a una divergencia o incluso la aproximación a una curva circular a efectos de diseño de ésta; pero si se trata de maniobras relacionadas con la seguridad, como pueden ser la detención ante un obstáculo imprevisto, o la señalización y balizamiento de una curva peligrosa o de una zona de obras, se debe considerar V_{99} .

3.3.3 Deceleración admisible.

Se pueden distinguir varios tipos de maniobra: emergencia, deliberada o subconsciente.

3.3.3.1 Maniobra de emergencia.

En las maniobras de emergencia, relacionadas con la V_{99} , 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 pavimento. Este último depende de los mismos factores que se analizan en el apartado 3.4.2.4 para la resistencia al rozamiento transversal: tipo, estado y humedad del pavimento, estado de los neumáticos y velocidad. Para un pavimento

¹ Que puede ser debida a la proximidad de una curva, divergencia o salida de la carretera, a la presencia de un obstáculo inesperado que obligue a detenerse, o a la de un vehículo que circule en sentido contrario y obligue a desistir de un adelantamiento.

convencional en buen estado, la tabla 3.2⁽¹⁾ muestra unos valores típicos de la resistencia al deslizamiento longitudinal, para distintas combinaciones de los demás factores.

TABLA 3.2

VALORES TÍPICOS DE LA RESISTENCIA μ_1
AL DESLIZAMIENTO LONGITUDINAL

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	0,80	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	

Para una gama normal de velocidades, neumáticos en buen estado y pavimento ligeramente mojado, los datos de la tabla 3.2 se pueden representar por la fórmula

$$\mu_1 = 0,86 - \frac{V}{500}$$

estando la velocidad V expresada en km/h.

3.3.3.2 Maniobras deliberadas.

Las maniobras deliberadas⁽²⁾ están relacionadas con la V_{85} , y en ellas no se deben exceder los rozamientos movilizables mediante una suave aplicación de los frenos, del orden de 0,25.

¹ Viguera / Garagorri / Crespo: La adherencia neumático - pavimento. Revista "CARRETERAS", junio 1992.

² Tales como la aproximación a una divergencia.

3.3.3.3 Maniobras subconscientes.

En las maniobras subconscientes no se suele movilizar un rozamiento superior á 0,175, alcanzable dejando de acelerar y reteniendo con el motor.

3.3.4 Modelo de deceleración.

En la forma de la variación de la velocidad con el recorrido también se puede distinguir entre maniobras de emergencia, deliberadas y subconscientes. A las dos primeras se ajusta bien un modelo cuadrático o de deceleración constante:

$$\frac{V}{V_c} = \sqrt{N^2 - (N^2 - 1) * \frac{s}{d}}$$

- siendo:
- V_c la velocidad final
 - V la velocidad en un punto genérico
 - s la distancia de ese punto al inicial
 - N la razón entre la velocidad inicial y la final
 - d la distancia necesaria para decelerar

La deceleración A es constante:

$$A = \frac{N^2 - 1}{7,2 * d} * V_c^2$$

[A en (km/h)/s, V_c en km/h, d en m]

A las maniobras subconscientes se ajusta mejor un modelo de orden sesquiáltero, en el que el cuadrado de la velocidad⁽¹⁾ varía con el cubo del recorrido:

$$\frac{V}{V_c} = \sqrt{N^2 - (N^2 - 1) * \left(\frac{S}{d}\right)^2 * \left(3 - 2 * \frac{S}{d}\right)}$$

La deceleración A es nula en los extremos de la transición y presenta un máximo en su centro, un 50 % superior al valor constante correspondiente al modelo cuadrático:

$$A = \frac{N^2 - 1}{7,2 * d} * \frac{S}{d} * \left(1 - \frac{S}{d}\right) * V_c^2$$

[A en km/h/s, V_c en km/h, d en m]

3.3.4.1 Señalización de reducciones de velocidad.

- Aproximación a curvas.

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 acompasar 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. La velocidad inicial es V₉₉, y el rozamiento longitudinal movilizad⁽²⁾ corresponde a una maniobra deliberada.

El tramo de deceleración puede incluir a parte de la curva de acuerdo, lo cual es válido para una clotoide siempre que N se limite a valores no superiores a 1,4; por encima de este valor se recomienda adoptar curvas de transición especiales.

¹ Que es proporcional a la aceleración centrífuga en las curvas.

² Del orden de 0,20.

Una fuerte reducción de velocidad antes de una curva resultará más legible para el conductor si se lleva a cabo intercalando una serie de curvas en S de radios decrecientes, que le vayan preparando para la baja velocidad específica de la última curva.

- Aproximación a otras zonas con restricciones en la velocidad de circulación.

Se pueden distinguir los siguientes casos de aproximación:

- A una zona de obras, circunstancia extraordinaria que el entorno no suele sugerir al conductor. En este caso, la velocidad inicial se debe tomar igual a V_{90} , pero la deceleración debe corresponder sólo a una maniobra deliberada⁽¹⁾. Si las retenciones ante la restricción a la circulación fueran habituales, de forma que se pueda situar espacialmente su final, se tendrá en cuenta esta circunstancia; de lo contrario habrá que confiar la seguridad a la deceleración de emergencia, que debe estar asegurada en todo lugar.
- A una zona urbana, especialmente en el caso de una travesía, en la que la velocidad de la circulación está genérica o específicamente limitada: circunstancia generalmente sugerida por el entorno. La velocidad inicial se puede tomar igual a V_{85} , y sería deseable que la deceleración correspondiera a una maniobra subconsciente.
- A una vía de giro de una intersección, o a un ramal de un enlace, que requiera una reducción de velocidad⁽²⁾ por tener un radio reducido. La velocidad inicial es V_{85} , y la deceleración corresponde, en general, a una maniobra deliberada.

Excepto donde la deceleración se pueda acomodar a una maniobra subconsciente, es práctica habitual señalar⁽³⁾ la limitación de velocidad. Donde ésta no se vea acompañada por la lectura que de la carretera y de su entorno hace el conductor, pueden presentarse problemas porque la deceleración necesaria sea mayor de la prevista en el diseño. En el fondo, se trata del mismo problema que la percepción del grado de una curva, pero que en estos casos no se puede resolver sólo con balizamiento.

¹ Y no a una de emergencia pues, a diferencia de la detención ante un obstáculo imprevisto, se trata de una circunstancia que, aunque no habitual en el tiempo, está señalizada en el espacio.

² Recorriendo, en general, el correspondiente carril de deceleración.

³ Con S-7 para recomendar una velocidad limitada, ó R-301 para prohibir rebasarla.

Por ello, donde la diferencia entre la velocidad inicial y la final es grande⁽¹⁾, también es habitual señalar un escalonamiento de velocidades: en la creencia de que los conductores acompañarán su marcha pasando junto a cada señal sin rebasar la velocidad en ella indicada.

Sin embargo, la colocación de señales R-301⁽²⁾ señalando sistemáticamente escalonamientos para la reducción de velocidad antes de salidas de autopistas o autovías, que es una circunstancia muy previsible por el conductor, no resulta justificada; y su sustitución por señales S-7 tampoco, excepto en circunstancias en las que las expectativas del conductor se puedan ver sorprendidas.

3.4 VELOCIDAD EN CURVAS CIRCULARES

3.4.1 Rozamiento movilizado.

Para una velocidad instantánea V (km/h), en una curva se cumple siempre que el rozamiento transversal⁽³⁾ movilizado f (que también representa la aceleración⁽⁴⁾ centrífuga no compensada por el peralte p [%]) está relacionado con el radio de curvatura ρ (m) a través de la fórmula

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

¹ En España, mayor de 30 km/h. Tal vez sea algo excesivo, y convenga elevar la diferencia mínima á 40 km/h, acorde con el máximo grado de la curva previsto en el Borrador de Instrucción de carreteras 8.1-IC "Señalización vertical".

² Vayan o no acompañadas de paneles complementarios S-870.

³ Adimensional.

⁴ Expresada como múltiplo de la aceleración de la gravedad $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

3.4.2 Pautas de accidente.

3.4.2.1 Generalidades.

Si la velocidad es excesiva y, por tanto, el rozamiento transversal movilizado también lo es, se puede producir un accidente que, en general, reviste una de las tres pautas que se analizan a continuación: vuelco, quiebro o deslizamiento.

3.4.2.2 Vuelco.

Con la misma notación que la ecuación del apartado 3.4.1, la condición de vuelco está expresada por la ecuación

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

- 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 la ecuación anterior con la del apartado 3.4.1, se puede deducir el rozamiento que se necesita movilizar para que el vehículo vuelque:

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

De esta ecuación, representada en la Fig. 8, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- 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 aun en los camiones no suele rebasar el valor 1,0: con lo que se necesita movilizar valores de f superiores á 0,5.

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

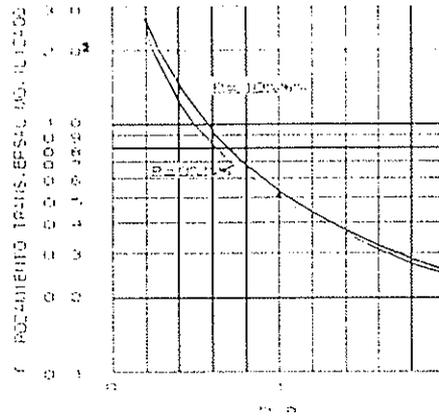


Fig. 8: Rozamiento transversal mínimo para producir el vuelco

3.4.2.3 Quiebro.

En vehículos articulados, quiebro⁽¹⁾ 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"⁽²⁾ a velocidades anormalmente bajas.

¹ Denominado "tijera" por los camioneros.

² Cuyo radio es reducido.

3.4.2.4 Deslizamiento.

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

El valor de μ es muy variable, según la macrotextura y microtextura⁽¹⁾ del pavimento, y depende de los siguientes factores:

a) Tipo de pavimento:

- A igualdad de los demás factores, los tipos de pavimento empleados en la Red estatal de carreteras⁽²⁾ 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.

¹ Se denomina microtextura al conjunto de irregularidades superficiales del pavimento cuya longitud de onda es inferior a 0,5 mm; y macrotextura, al conjunto de irregularidades superficiales cuya longitud de onda está comprendida entre 0,5 y 50 mm. La microtextura de un pavimento está relacionada con su adherencia al neumático y, por tanto, con el coeficiente de rozamiento a bajas velocidades; mientras que la macrotextura posibilita la evacuación del agua superficial del pavimento, y moviliza la histéresis del neumático por deformación y, por tanto, está relacionada con la resistencia al deslizamiento a altas velocidades.

² Mezclas bituminosas, convencionales o porosas, hormigón texturado).

- 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.

Se recomienda realizar un tratamiento superficial del pavimento cuando la resistencia media al deslizamiento transversal⁽¹⁾ baja de los umbrales siguientes:

- 0,35 en autopistas, autovías o vías rápidas.
- 0,40 en los ramales de enlace de las anteriores, y en carreteras convencionales.
- 0,45 en el resto de los nudos, en curvas de radio inferior a 250 m no balizadas ni señalizadas, y en rasantes descendentes de autopistas y autovías superiores al 5 % en más de 50 m.
- 0,50 en rasantes descendentes de autopistas y autovías superiores al 10 % en más de 50 m.
- 0,55 al aproximarse a cruces de peatones, vehículos o ferrocarriles.
- 0,60 en curvas de radio inferior a 100 m no balizadas ni señalizadas.

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 incli-

¹ Medida por el aparato SCRIM a 50 km/h, en verano.

nación y macrotextura del pavimento" ya no contribuyen eficazmente a la evacuación de la escorrentía superficial: en estas circunstancias, tampoco los conductores circulan a la velocidad que circularían en las dos primeras 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 hidropneumático.

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 evacúen la película de agua más aprisa: con lo que la zona de contacto va disminuyendo hasta anularse, en cuyo momento se produce el hidropneumático o apoyo del neumático sólo sobre dicha película, con anulación de la movilización de rozamiento. También el efecto de la microtextura se anula al aumentar la velocidad, mientras que el de la macrotextura (que moviliza la histéresis del neumático por deformación) permanece.

¹ Por lo demás, generalmente peraltado.

En relación con estos factores, conviene destacar:

- Su variabilidad en el tiempo:
 - El tipo de pavimento es prácticamente invariable.
 - El estado del pavimento y el de los neumáticos evolucionan a medio plazo.
 - La humedad del pavimento y la velocidad presentan grandes oscilaciones.

- Su dependencia causal:
 - 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.

Para un pavimento convencional en buen estado, la tabla 3.3⁽¹⁾ muestra unos valores típicos de μ para distintas combinaciones de los demás factores.

TABLA 3.3

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		0,95
	Desgastado	1		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

¹ Viguera / Garagorri / Crespo: La adherencia neumático - pavimento. Revista "CARRETERAS", junio 1992.

Los datos anteriores se pueden aproximar por las fórmulas de la tabla 3.4, representadas en la Fig. 9 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 á 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.

TABLA 3.4

FORMULAS APROXIMADAS DE LA RESISTENCIA μ
AL DESLIZAMIENTO TRANSVERSAL
EN FUNCION DE LA VELOCIDAD V (km/h)

HUMEDAD DEL PAVIMENTO	ESTADO DE LOS NEUMATICOS	VALOR DE μ
Seco	Bueno	$\mu = 1,004 - \frac{V}{2\ 500}$
	Desgastado	$\mu = 1,007 - \frac{V}{1\ 400}$
Ligeramente mojado	Bueno	$\log \mu = - \frac{V}{200} - 0,07$
	Desgastado	$\log \mu = - \frac{V}{111} - 0,19$
Muy mojado	Bueno	$\log \mu = - \frac{V}{100}$
	Desgastado	$\log \mu = - 0,13 * (\frac{V}{10} + 1)$

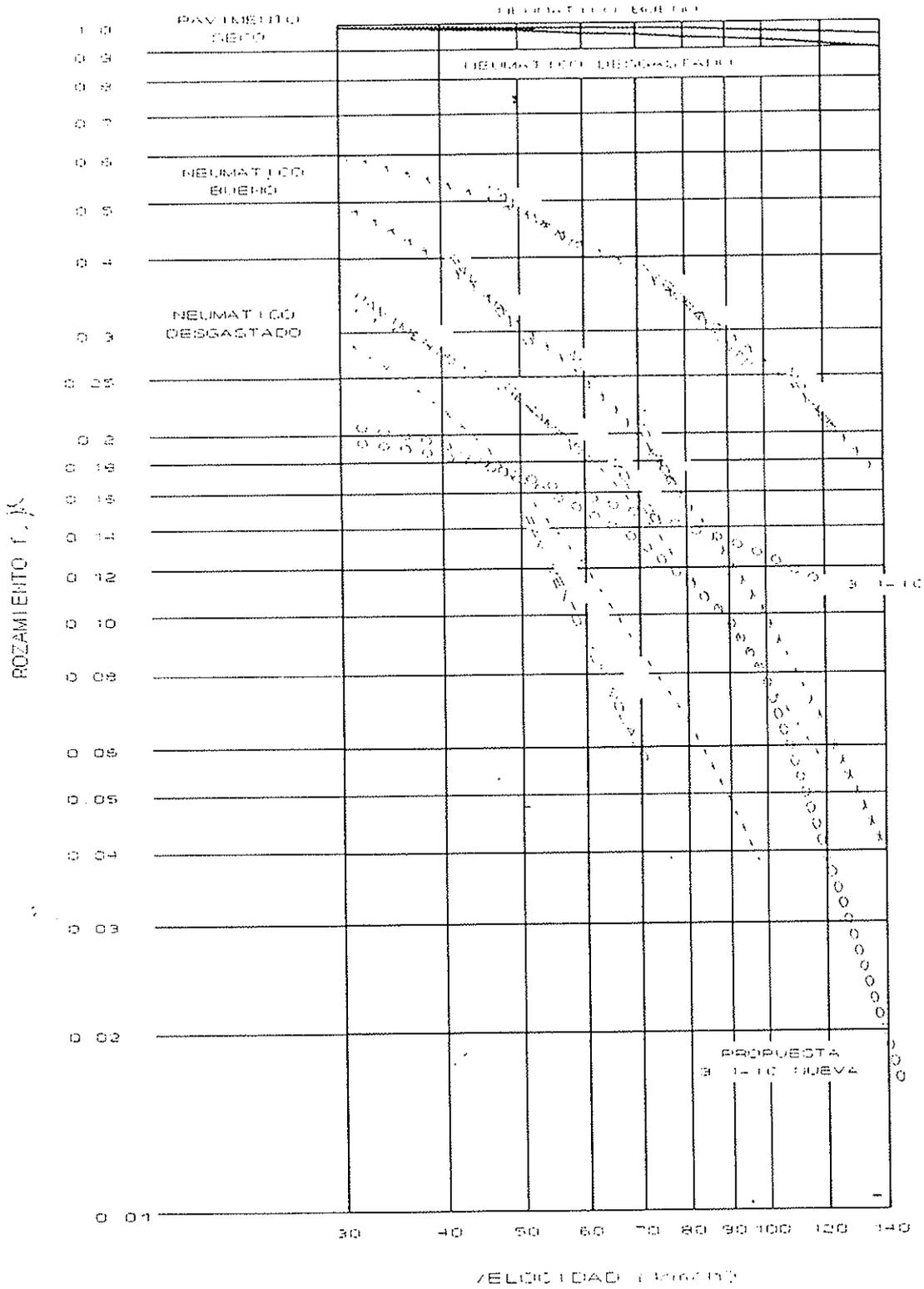


Fig. 9: Resistencia al deslizamiento y rozamiento movi-
lizado, en función de la velocidad

3.4.3 Rozamiento movilizado admisible.

Se suele admitir que el diseño de una curva, asociado a la velocidad $V_{85}^{(1)}$, se debe basar en unos valores del rozamiento transversal movilizado bastante bajos⁽²⁾, 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⁽³⁾, asociada a la velocidad $V_{99}^{(4)}$, y en la que se basa la señalización⁽⁵⁾ de la curva, está relacionada con la movilización de un mayor rozamiento transversal. Es errónea la práctica⁽⁶⁾ de basar la señalización 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 quien valore cuánto debe disminuir su velocidad por ellas.

¹ Apartado 3.1.2.

² 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.

³ Es decir, sin riesgo inaceptable de que se produzca un accidente por cualquiera de las tres pautas analizadas en el apartado 3.4.2.

⁴ Apartado 3.1.2.

⁵ O, con un enfoque más moderno y realista, el fundamento del balizamiento de las curvas, tal y como lo preconiza el borrador de Instrucción 8.1-IC "Señalización vertical" (Cf. apartado 2.6.1). Se podría pensar en una doble señalización, una para pavimento seco y otra para mojado.

⁶ Corriente en España.

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 ó más).

Para curvas de distintos radios, peraltadas con arreglo al Cuadro #6 de la vigente Instrucción 3.1-IC⁽¹⁾, y con los valores de la resistencia al deslizamiento descritos en el apartado 3.4.2.4, se representan en la Fig. 10 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.

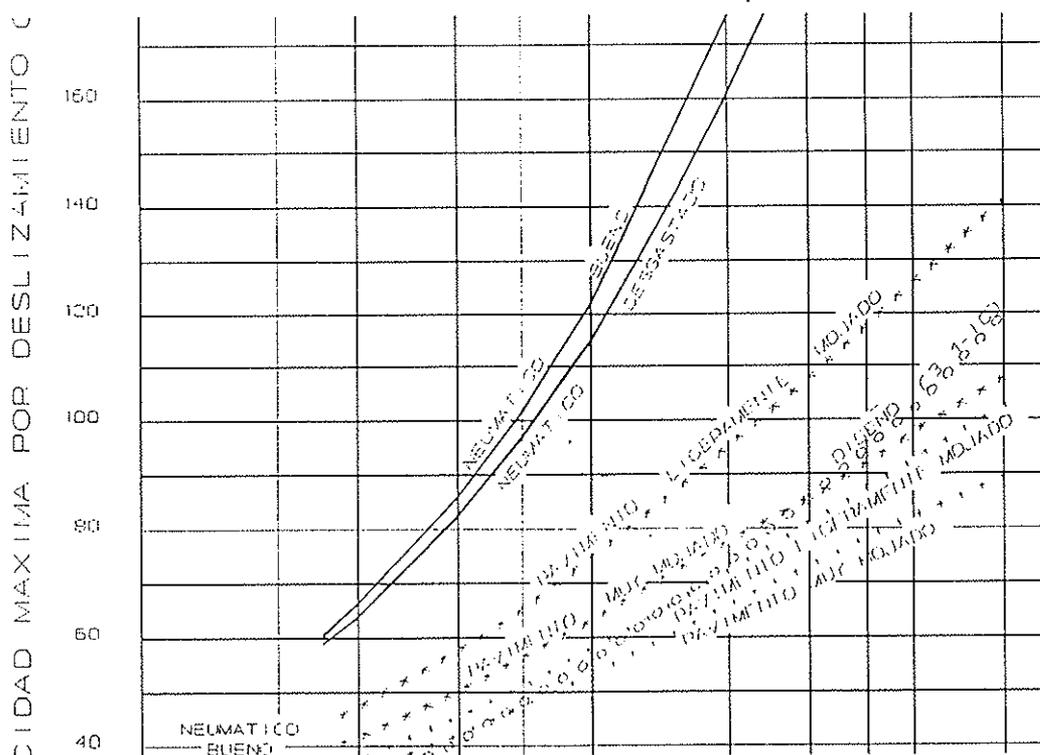


Fig. 10: Velocidades máximas compatibles con el deslizamiento, y velocidades de diseño.

También se han representado las velocidades de diseño de esas curvas, siempre según la 3.1-IC. En la tabla 3.5 se representan los márgenes de seguridad correspondientes.

¹ Apartado 2.1.

TABLA 3.5

MARGEN DE SEGURIDAD (km/h)
FRENTE A UN ACCIDENTE POR DESLIZAMIENTO

HUMEDAD DEL PAVIMENTO	ESTADO DEL NEUMATICO	VELOCIDAD DE DISEÑO ⁽¹⁾ (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		

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 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 deslizamiento parece suficiente cuando el pavimento está ligeramente mojado.

Por otro lado, los rozamientos movilizados sin deslizar (neumáticos en buen estado, pavimento ligeramente húmedo) son superiores á 0,25⁽²⁾ para velocidades inferiores á 110 km/h.

¹ Según Instrucción 3.1-IC vigente.

² Valor máximo admitido para que no se produzcan quiebros en vehículos articulados (Apartado 3.4.2.3).

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_{85} , los valores preconizados por la vigente Instrucción 3.1-IC y, mejor aún, 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, 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 se superará una resistencia al deslizamiento igual a 0,25. en estos casos, se mantendrá un margen entre V_{99} y V_{85} igual al dado por la tabla 3.5.

3.4.4 Velocidades máximas en 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:

- Artículo 154, señal R-301: "... Velocidad máxima. Prohibición de circular a velocidad superior... a la indicada en la señal...".
- Artículo 159, 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 recomienda⁽¹⁾, de la definición de esta última se desprende claramente que se refiere a condiciones favorables, que serían las que se han descrito en el apartado 3.4.3 anterior como pavimento seco.

En la tabla #3.6 se indican las velocidades máximas correspondientes a curvas de distinto radio, peraltadas con arreglo al Cuadro #6 de la vigente Instrucción 3.1-IC⁽²⁾, en las condiciones de pavimento ligeramente mojado⁽³⁾ y pavimento seco⁽⁴⁾, manteniendo en el primer caso el margen de seguridad dado por la tabla #3.5 para vehículos articulados. También se indican las velocidades de diseño según la citada Instrucción.

TABLA #3.6
VELOCIDADES⁽⁵⁾ EN CURVAS

RADIO (m)	PERALTE (%)	VELOCIDAD DE DISEÑO (km/h)	VELOCIDAD LIMITE (km/h)	
			PAVIMENTO LI- GERAMENTE 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	-

¹ Apartado 1.2.

² Apartado 2.1.

³ Y neumático en buen estado.

⁴ Y neumático desgastado.

⁵ En las casillas en que hay dos cifras separadas por una barra (/), la primera corresponde al caso de presencia apreciable de vehículos articulados decelerando.

A la vista de este cuadro 3.5, parece lógico formular la siguiente propuesta, que matiza la contenida al final del apartado 3.4.3 en lo relativo a señalización y balizamiento de curvas:

- Los valores de la velocidad máxima en curvas a emplear en su balizamiento y señalización, según el borrador de Instrucción 8.1-IC "Señalización vertical" (1991)⁽¹⁾ son los correspondientes a pavimento ligeramente mojado. Esta circunstancia es suficientemente frecuente para ser tomada en cuenta en una recomendación, aunque no corresponda a las circunstancias más favorables⁽²⁾: 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 empleará el primero o segundo valor, de los que figuran en la correspondiente fila de la tabla #3.6, 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.

¹ Apartado 2.6.2.

² Como indica la definición del RGC.

3.4.5 Influencia del peralte.

Contrariamente a una opinión bastante extendida, el aumento del peralte tiene poca influencia en la velocidad máxima a la que una curva puede ser recorrida:

Sea, por ejemplo, una curva de 300 m de radio con un 3 % de peralte. Su velocidad máxima, admitiendo un valor máximo $f = 0,25$, sería

$$V_{99} = \sqrt{127 * 300 * \left(\frac{3}{100} + 0,25 \right)} = 103,3 \text{ km/h}$$

El aumento del peralte al 10 %, o sea un 217 % más, sólo aumentaría la velocidad máxima (con el mismo criterio) á

$$V_{99} = \sqrt{127 * 300 * \left(\frac{10}{100} + 0,25 \right)} = 115,5 \text{ km/h}$$

o sea, sólo un 11,8 % más.

Sin embargo, para peraltes muy grandes⁽¹⁾, las apreciaciones anteriores resultan algo pesimistas:

- Se desprecia el aumento de reacción perpendicular al pavimento, debida a la fuerza centrífuga. La fórmula del apartado 3.4.1 es una simplificación de la general

$$f = \frac{\frac{V^2}{127 * \rho} - \frac{p}{100}}{1 + \frac{V^2}{127 * \rho} * \frac{p}{100}}$$

en la que se ha tomado el denominador igual á 1.

- No se tiene en cuenta que el peralte reduce la deriva de los neumáticos.

¹ 10 % ó más.

3.5 ACELERACIÓN

De forma análoga a cuanto se ha expuesto para la deceleración, se pueden considerar para la aceleración los parámetros que se comentan a continuación.

3.5.1 Velocidad inicial.

Se suele tomar igual a la V_{85} de la curva anterior para las maniobras en que la condición determinante es la comodidad, como puede ser la aproximación a una convergencia o incluso la salida de una curva circular a efectos de diseño de ésta.

Si se trata de maniobras relacionadas con la seguridad, como la obtención de la máxima velocidad de aproximación a la curva siguiente, se debe considerar la V_{99} de la curva.

Para el adelantamiento de un vehículo más lento⁽¹⁾ desde una posición de seguimiento, se parte de una velocidad igual a la de éste. Como se ha visto en el apartado 3.1.3, esta velocidad no puede ser relativamente grande: se trata de un vehículo lento, y tomar valores superiores conduce a distancias de adelantamiento muy elevadas. Considerando que la maniobra de adelantamiento se debería practicar con la fracción más lenta del tráfico, se puede tomar una velocidad inicial igual a una fracción de V_{85} ⁽²⁾.

3.5.2 Aceleración alcanzable.

3.5.2.1 Máximas prestaciones.

A diferencia del caso de la deceleración, no suele ser el rozamiento entre neumáticos y pavimento lo que determina la máxima aceleración posible, sino las prestaciones del vehículo y la destreza de su conductor. En España⁽³⁾ se ha desarrollado un modelo de máximas prestaciones, corres-

¹ Apartado 6.3.2.7.

² Apartados 3.1.2.2 y 6.3.2.6.

³ S. Rocci: "Estudio de las prestaciones de un vehículo de competición" (Revista de Obras Públicas, enero 1976), y otros trabajos sin publicar.

pendiente a un coche representativo de las condiciones medias del parque español, que tiene un peso de 1 080 kg y un motor de gasolina de 100 CV, que le permite alcanzar una velocidad máxima $V_{\text{máx}} = 175$ km/h en llano, y que proporciona un empuje e (kN), para vencer la inclinación de la rasante y, con el resto, acelerar⁽¹⁾.

$$e = \frac{403 - 2,275 * V}{76 - 0,57 * V}$$

siendo V (km/h) la velocidad.

Los resultados de este modelo están relacionados con la V_{99} y se emplean, por ejemplo, para obtener la máxima velocidad de aproximación a una curva⁽²⁾.

3.5.2.2 Maniobras deliberadas.

Las maniobras deliberadas⁽³⁾, relacionadas con la V_{85} (comodidad), movilizan valores medios de la aceleración que no suelen exceder los 4 (km/h)/s⁽⁴⁾, acordes con los rozamientos longitudinales preconizados por la Instrucción 3.1-IC⁽⁵⁾.

3.5.3 Modelo de aceleración.

3.5.3.1 Generalidades.

También se puede distinguir entre maniobras en condiciones de máximas prestaciones y maniobras deliberadas⁽⁶⁾.

¹ Apartado 3.5.3.2.

² Apartado 2.6.1.

³ Tales como la aproximación a una convergencia, o el adelantamiento en condiciones de prestaciones normales.

⁴ Coeficiente de rozamiento longitudinal del orden de 0,12.

⁵ Apartado 2.1.

⁶ Las maniobras subconscientes no son relevantes en el contexto que se analiza.

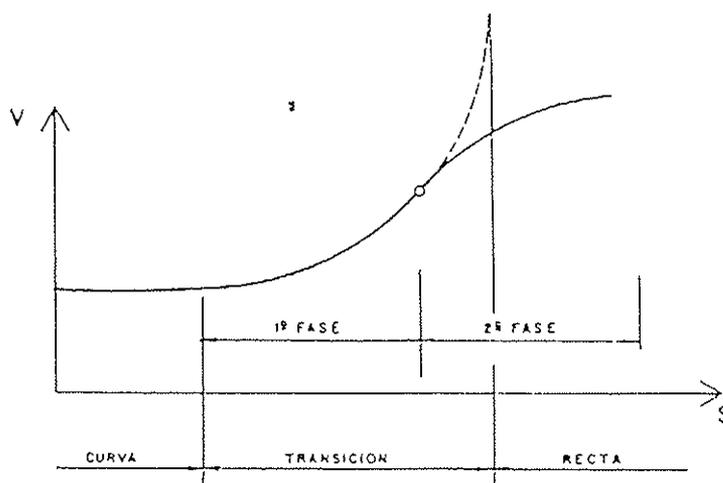


Fig. 11: Fases de aceleración a la salida de una curva.

En la aceleración a la salida de una curva, en condiciones de máximas prestaciones, se pueden distinguir dos fases:

- Al principio, la combinación de curvatura ρ y peralte p en la curva de transición puede impedir que el vehículo desarrolle toda su capacidad de aceleración, pues de hacerlo se rebasaría el valor f del rozamiento movilizado que se ha considerado admisible⁽¹⁾:

$$V = \sqrt{127 * \rho * \left[\frac{p}{100} + f_{\max}(V) \right]}$$

[V en km/h, ρ en m, p en %, y f_{\max} adimensionales]

- A partir de un cierto punto en que la curvatura haya disminuído suficientemente, son determinantes las prestaciones del vehículo.

¹ Apartado 3.4.3.

3.5.3.2 Máximas prestaciones.

En condiciones de máximas prestaciones, el movimiento del vehículo representativo al acelerar está gobernado por la ecuación diferencial⁽¹⁾

$$\frac{1150*b}{1 - 0,57*b} * \frac{db}{ds} - 4,65*i = 0$$

con

$$b = 1 - \frac{V}{V_{\max}}$$

- siendo:
- V (km/h) la velocidad
 - s (m) el recorrido desde el reposo
 - i (m/m) la inclinación de la rasante (positiva subiendo).

La integración de esta ecuación diferencial (para i constante) resulta en la siguiente expresión para el recorrido s (m) desde el reposo:

$$s = - \frac{329*(1-b)^2 + \frac{1150}{1+2,65*i} * [1 - b + \frac{1 - 2*i}{1+2,65*i} * \ln \frac{(1+2,65*i)*b - 4,65*i}{1 - 2*i}]}{1 + 2,65*i}$$

¹ S. Rocci: "Estudio de las prestaciones de un vehículo de competición" (Revista de Obras Públicas, enero 1976), y otros trabajos sin publicar.

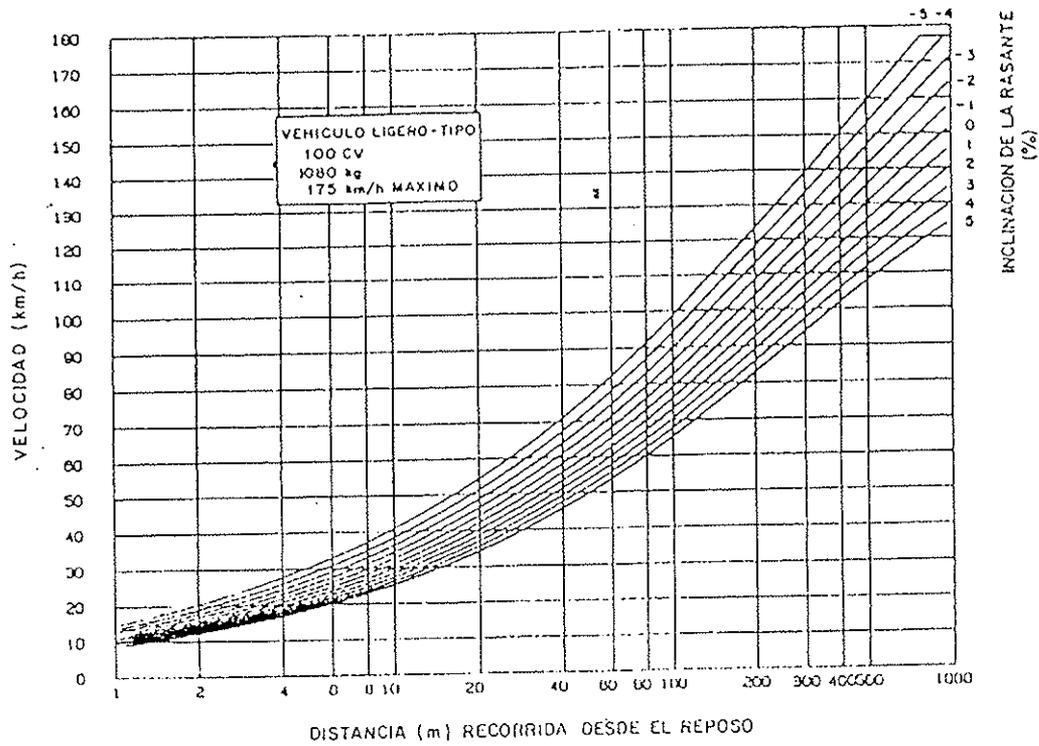


Fig. 12: Relación espacio - velocidad

3.5.3.3 Modelo cuadrático.

A la mayoría de las maniobras que no se realizan en condiciones de máximas prestaciones, se ajusta bien un modelo cuadrático:

$$s = \frac{V_0 + V}{7,2} * t$$

$$A = \frac{V - V_0}{t}$$

- siendo:
- V_0 (km/h) la velocidad inicial
 - V (km/h) la velocidad en un punto genérico
 - t (s) el tiempo transcurrido desde el inicio.
 - s (m) la distancia de ese punto al inicial
 - A (km/h/s) la aceleración media.

4 VELOCIDAD DE PROYECTO

4.1 GENERALIDADES

La velocidad de proyecto de un tramo de carretera homogéneo en cuanto a trazado, mejor que tener un significado físico concreto, 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 velocidad⁽¹⁾ que otra carretera más sinuosa en terreno accidentado, o situada en una zona de intenso uso del suelo.

La velocidad de proyecto está relacionada con la distribución espacial de velocidades instantáneas que se puedan practicar con comodidad en ese tramo. Por tanto, un estimador o valor representativo de la velocidad de proyecto es la \bar{V}_{85} ⁽²⁾.

En carreteras de nuevo trazado o en acondicionamientos de carreteras existentes, la elección de una velocidad de proyecto tiene importantes repercusiones en la curvatura⁽³⁾ de la carretera, en la visibilidad disponible en cada punto de ella, y sobre todo en su coste: representa un compromiso entre los costes relacionados con la explotación y los derivados de la construcción.

Procediendo a la inversa, y en base a 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.

¹ Y a ella corresponderá una velocidad de proyecto más alta.

² Apartado 3.2.3.

³ En planta y en alzado.

4.2 VALORES RECOMENDABLES DE LA MÍNIMA VELOCIDAD DE PROYECTO

4.2.1 Generalidades.

La elección de una velocidad de proyecto se debería basar en el estudio económico de su repercusión en los costes de construcción, mantenimiento y explotación (costes del usuario). Sin embargo, tal estudio rara vez resulta asequible, ni siquiera justificado, en fase de proyecto; y debe ser la propia Administración quien, como parte de su planificación, fije la velocidad de proyecto a emplear en cada tramo concreto. A estos efectos, conviene tener en cuenta lo siguiente:

- El concepto de tramo a emplear es el establecido en los apartados 3.2.1 y 3.2.3: lo que implica una variabilidad de la velocidad de proyecto a lo largo de un itinerario, en función del entorno de la carretera, perceptible por el usuario.
- La mínima velocidad de proyecto fijada debería ser la 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 terreno llano 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?

4.2.2 Fuera de poblado.

Los datos proporcionados por la tabla #3.1, algo redondeados a continuación, resultan reveladores de la V_{85} 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
 - * Arcen < 1,5 m: 90 km/h

No acompasar la velocidad de proyecto, en esas mismas circunstancias favorables, a estos valores (aunque excedan de las limitaciones genéricas) puede no ajustarse a las expectativas de una fracción importante de los conductores.

Sin embargo, apenas las circunstancias dejan de ser tan favorables, consideraciones relacionadas con el coste de construcción (especialmente en carreteras de calzada única), pueden obligar a limitar la velocidad de proyecto por debajo de estos valores, para acoplar el trazado a terrenos de relieve acentuado, sobre todo en zonas aisladas. Pero no se debe olvidar que, si bien los conductores aceptan fácilmente limitaciones en su velocidad en zonas evidentemente difíciles, en otras que no lo sean tanto no la relacionan con la importancia de la carretera, sino más bien con la intensidad de la circulación⁽¹⁾ y con las limitaciones físicas perceptibles; entonces vuelven a practicar las velocidades correspondientes a circunstancias más favorables, rebasando con facilidad las condiciones de seguridad, especialmente las relacionadas con la visibilidad.

Donde no se puedan mantener las velocidades de proyecto correspondientes a circunstancias favorables, se podrán rebajar tanto más cuanto más evidente resulte para el conductor el deterioro de esas circunstancias. Un método eficaz para ello puede ser apoyarse en la serie estándar de velocidades⁽²⁾ de manera que, por cada escalón que se baja, la nueva V_{99} ⁽³⁾ pasa a coincidir con la antigua V_{85} ⁽⁴⁾.

Las series de valores estándar de la velocidad mínima de proyecto preconizadas en el apartado 3.1.2.2 para carreteras fuera de poblado son las siguientes:

80 - 100 - 130 - 165 km/h para carreteras con calzadas separadas

45 - 65 - 85 - 110 - 145 km/h para carreteras con calzada única con arcenes de anchura no inferior á 1,5 m cada uno

35 - 50 - 65 - 90 - 125 km/h para carreteras con calzada única con arcenes de anchura inferior á 1,5 m cada uno

¹ Que puede ser muy baja.

² Apartado 3.1.2.

³ Condiciones de seguridad estricta.

⁴ Condiciones de comodidad en la circulación.

En otros apartados⁽¹⁾ se han estudiado casos 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 acompasar 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 la aproximación a 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.

4.2.3 En zona urbana.

Las velocidades mínimas de proyecto empleadas para vías urbanas son menores que fuera de poblado, no sólo por consideraciones de coste⁽²⁾ sino también funcionales: la frecuente gran intensidad de la circulación en ellas, que sólo necesita las velocidades instantáneas asociadas a la capacidad, 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.

4.2.4 En nudos.

En cuanto a 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 á 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.

¹ Apartados 3.4 y 5.3.1.

² Especialmente el relacionado con las expropiaciones.

4.3 HOMOGENEIDAD Y ESCALONAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE PROYECTO

Para que un tramo de una carretera⁽¹⁾ sea considerado homogéneo en cuanto a trazado, y tenga por tanto una única velocidad de proyecto, no debe haber grandes diferencias⁽²⁾ entre las V_{g5} con que se recorren los elementos del tramo, y la velocidad de proyecto que es su media armónica. Donde la diferencia sea excesiva, además de analizar la peligrosidad relacionada con esas variaciones, habrá que comprobar si se trata de varios sub-tramos contiguos, con distintas velocidades de proyecto.

En particular, conviene cuidar los siguientes casos:

- Después de una alineación recta superior á 1 km ó, aun estando comprendida entre 0,5 km y 1 km, si la rasante es descendente y superior al 3 %, el radio mínimo de la curva circular no debiera ser inferior á 300 m.
- Después de una alineación recta comprendida entre 0,5 y 1 km, el radio mínimo de la curva circular no debiera ser inferior á 200 m.
- Dos curvas enlazadas no debieran tener radios muy diferentes: el mayor no debiera rebasar los 3/2 del menor.

Tampoco son deseables grandes diferencias entre las velocidades de proyecto de tramos contiguos: a este respecto, no se debe rebasar un escalón de la serie de valores estándar preconizada en el apartado 3.1.2.2. En caso contrario, se deben intercalar entre ambos uno o varios sub-tramos que proporcionen un adecuado escalonamiento de velocidades.

Se deben comprobar especialmente los casos siguientes:

- Al final de rasantes descendentes superiores al 3 %.
- En carreteras de calzada única, inmediatamente antes de una prohibición del adelantamiento.
- Al aproximarse a bifurcaciones.
- En las conexiones con nuevas variantes de trazado o población.

¹ La definición de tramo se ha comentado en el apartado 4.2.

² Por ejemplo, menos de 15 km/h. Esto correspondería a que, entre dos elementos consecutivos situados el primero 15 km/h por encima de la velocidad de proyecto, y el segundo 15 km/h por debajo, no haya una diferencia superior á 30 km/h, o sea (en el caso de una curva), un grado, para que el que bastaría el balizamiento proporcionado por un panel sencillo (apartado 2.6.1.).

5 VISIBILIDAD

5.1 VISIBILIDAD DISPONIBLE Y NECESARIA

En toda sección de una carretera hay una visibilidad disponible, que depende principalmente de la forma, dimensiones y disposición de los elementos de la carretera, pero no de la velocidad a la que ésta se recorre.

Para conducir con comodidad, se recomienda que se mantenga constantemente visible al conductor, sin pérdidas de trazado, la parte de la carretera que se recorrerá en los próximos diez o doce segundos, especialmente al aproximarse a secciones delicadas: salidas, cruces, áreas de servicio o de peaje.

Para que se puedan realizar con seguridad, determinadas maniobras lícitas requieren una visibilidad necesaria, que es inferior a la relacionada con la comodidad: entonces la visibilidad disponible no debe ser inferior a la necesaria. En la visibilidad necesaria interviene la velocidad del vehículo que realiza la maniobra y, en su caso, la de los demás vehículos involucrados.

Se suelen considerar las maniobras siguientes:

a) Detención de un vehículo aislado:

- En todo lugar, ante la presencia de un obstáculo imprevisto en la calzada.
- Donde sea preciso:
 - Ante una marca vial transversal en un cruce o en la entrada a una glorieta.
 - Ante un semáforo.
 - Ante una zona de obras cuya ordenación de la circulación prevea una detención.

b) Percepción de la presencia de una divergencia, o de la aproximación a una zona con restricciones a la circulación (por ejemplo, obras).

c) Evitación de una colisión con otros vehículos:

- Cruce.
- Convergencia.
- En su caso, adelantamiento de un vehículo más lento en presencia de un vehículo contrario.

Exigir que la visibilidad disponible en una sección de una carretera no sea inferior a la necesaria para realizar determinada maniobra, equivale en la práctica a exigir una limitación de la velocidad en dicha sección. Si la visibilidad disponible es insuficiente, es decir, si la velocidad real rebasa dicho límite, es preciso adoptar una o varias de estas medidas:

- Aumentar la visibilidad.
- Hacer especialmente aparente la falta de visibilidad, por ejemplo, por medio de un balizamiento adecuado.
- En el caso de la aproximación a una curva, mejorar su radio o intercalar una sucesión favorable de curvas de radios decrecientes.

Una señalización restrictiva puede resultar poco respetada por los conductores, quienes entonces asumen un riesgo mayor.

5.2 VISIBILIDAD DISPONIBLE

5.2.1 Definición.

La visibilidad disponible se mide hacia adelante en el sentido de la marcha, y a lo largo de la trayectoria del vehículo, en las condiciones siguientes:

a) Posición del conductor

- Altura sobre el pavimento: 1,2 m ó 2,5 m, según resulte más desfavorable. El segundo valor se aplica a las limitaciones de la visibilidad disponible causadas por elementos situados sobre la carretera (pasos superiores, pórticos, etc.), y el primero a los demás casos.

- Situación transversal en la calzada: á 0,5 m¹ del borde izquierdo del carril más desfavorable.

b) Características de los faros a efectos de iluminación nocturna

- Altura del eje del faro sobre el pavimento: 0,75 m.
- Dirección del haz luminoso: paralela a la rasante y a la trayectoria.
- Abertura máxima del haz luminoso: 1º por encima del eje, y 3º a cada lado de él.
- Alcance máximo del haz luminoso: 200 m. Esta cifra se ve considerablemente reducida si se emplea la luz de cruce.

c) Características del objeto a percibir

- Obstáculo, en maniobras de detención: 0,30 m de altura sobre el pavimento², en la posición más desfavorable.
- Vehículo, en maniobras de evitación de colisión: 1,2 m de altura sobre el pavimento, á 0,5 m del borde izquierdo del carril más desfavorable.
- Cruce, o entrada a una glorieta: marca vial transversal que indique la necesidad de detenerse, y cuya altura es nula.
- Divergencia: primera³ marca vial que indique la presencia de la divergencia, y cuya altura es nula. La presencia de balizas mejora la percepción de la divergencia.
- Semáforo: salvo otra disposición explícita, 2 m de altura entre el pavimento y el borde inferior del disco rojo.

5.2.2 Determinación.

5.2.2.1 Generalidades.

La visibilidad disponible se puede medir en campo, o estimar en gabinete analizando el trazado.

¹ Esta cifra parece más adecuada que la de 1 m que figura en la Norma 8.2-IC "Marcas viales".

² La Instrucción 3.1-IC considera un obstáculo de sólo 0,10 m de altura, pero esto parece algo pesimista pues un obstáculo aislado de esa altura sería esquivado sin necesidad de detener el vehículo.

³ En el sentido de marcha.

Para ello, desde cada posición del conductor se dirige una visual, tangente al elemento⁽¹⁾ limitador de la visibilidad y que llegue hasta el objeto a percibir, y se determina la distancia a éste a lo largo de la trayectoria del vehículo.

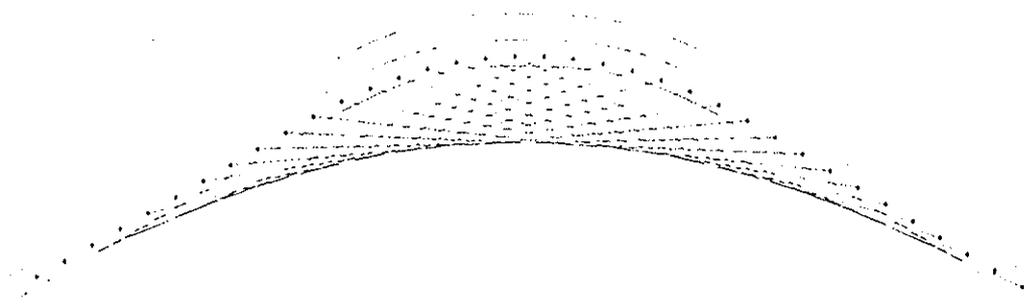


Fig. 13: Esquema de visibilidad en planta

5.2.2.2 Limitaciones en planta.

La visibilidad en planta se puede ver estorbada por obstáculos situados en la parte interior de las curvas, tales como taludes de desmote, vegetación, edificios, o el propio vehículo⁽²⁾ al que se pretende adelantar.

- Obstáculos fijos.

Hay que despejar de obstáculos la zona determinada por la envolvente de las visuales entre las posiciones del conductor y del obstáculo a percibir, situadas a una distancia no inferior a la deseada. En una curva, el caso más desfavorable corresponde al carril interior; pero en carreteras con calzadas separadas, puede haber problemas donde haya en la mediana un seto o un muro, si su altura no es suficientemente reducida.

A continuación se examinan dos casos particulares, para los que la modelización matemática es relativamente fácil, y que representan los extremos de la gama de posibilidades.

¹ Talud de desmote, vegetación, edificio, pavimento de un acuerdo convexo, vehículo pesado al que se pretende adelantar, tablero de paso superior, final de la zona iluminada, etc.

² Generalmente pesado.

- a) Si la longitud de la curva circular es suficiente para que tanto el conductor como el objeto a percibir queden dentro de ella, la mínima distancia de visibilidad disponible $VD_{\min}^{(1)}$ (m) está dada por la fórmula

$$VD_{\min} = 2 * R * \arccos \left(1 - \frac{d}{R} \right) \approx \sqrt{8 * R * d}$$

- siendo: - R (m) el radio de la curva
 - d (m) el despeje o distancia transversal entre el elemento limitador de la visibilidad y el eje que define la curva

- b) Si la longitud de la curva⁽²⁾ es suficiente para que tanto el conductor como el objeto a percibir queden fuera de ella, la mínima distancia de visibilidad disponible $VD_{\min}^{(1)}$ (m) está dada por la fórmula aproximada

$$VD_{\min} \approx \left[\frac{\pi * \Omega}{200} - \operatorname{tg} \frac{\Omega}{4} \right] * R + \frac{2 * d}{\operatorname{sen} \frac{\Omega}{2}}$$

- siendo: - R (m) el radio de la parte circular de la curva
 - d (m) el despeje o distancia transversal entre el elemento limitador de la visibilidad y el eje que define la curva
 - Ω (gon) el desarrollo angular de la curva

¹ Medida a lo largo del eje que define el radio de la curva circular.

² En este caso, incluyendo las curvas de transición.

Si Ω es pequeño, la fórmula anterior se puede aproximar por

$$VD_{\min} \approx \frac{3 \cdot \pi \cdot \Omega}{800} \cdot R + \frac{d}{\frac{\pi \cdot \Omega}{800}}$$

b) Otros vehículos

Tanto la normativa británica como la Instrucción 8.1-IC (borrador) introducen un nuevo concepto: el deterioro de la visibilidad disponible en curvas a la derecha pues, en ellas, el propio vehículo al que se pretende adelantar puede limitar dicha visibilidad, y ello con radios bastante amplios, en contra de lo que parece a primera vista.

Se ha observado que este fenómeno tiene lugar para radios comprendidos entre los límites dados por la tabla #5.1.

TABLA #5.1

GAMA DE RADIOS EN CURVAS A DERECHAS
EN QUE LA VISIBILIDAD SE VE DIFICULTADA
POR EL VEHICULO ADELANTADO

\bar{V}_{85} (km/h)		ARCENES > 1,5 m						
		45		65		85		110
		ARCENES < 1,5 m						
		35	50	65	90			
R (m)	Límite inferior	220	310	380	650	1 080	1 200	1 800
	Límite superior en circunstancias							
	Favorables ⁽¹⁾	360	560	720	1 200	2 050	2 250	3 400
	Desfavorables	1 000	1650	2 050	3 350	5 800	6 400	9 700

¹ Rasante descendente y visibilidad suficiente para iniciar y completar un adelantamiento en presencia de un vehículo contrario.

El empleo de radios medianos, comprendidos dentro de los límites dados por la tabla #5.1, puede animar a maniobras de adelantamiento peligrosas, por lo que sería deseable evitarlo en lo posible: sería mejor emplear, en su lugar, rectas o radios superiores (adelantamiento permitido) o inferiores (adelantamiento claramente imposible) a dichos límites.

5.2.3 Limitaciones en alzado.

5.2.3.1 Acuerdos verticales convexos.

La visual tangente al pavimento limita la visibilidad. A continuación se examinan dos casos particulares, para los que la modelización matemática es relativamente fácil, y que representan los extremos de la gama de posibilidades. La aplicación de las fórmulas se facilita por la tabla #5.2.

- Acuerdos largos.

Si la diferencia⁽¹⁾ θ (%) entre las inclinaciones de la rasante en sus extremos es suficiente para que tanto el conductor como el objeto a percibir queden dentro del acuerdo, lo que se cumple si

$$\theta^2 \geq \frac{20\,000 * (\sqrt{1,2} + \sqrt{h})^2}{|K\downarrow|}$$

siendo: - h (m) la altura del objeto a percibir.

- K_{\downarrow} (m) el parámetro⁽²⁾ del acuerdo.

la visibilidad disponible $VD_{\text{mín}}$ es constante, y su valor es

$$VD_{\text{mín}} = (\sqrt{1,2} + \sqrt{h}) * \sqrt{2 * |K\downarrow|}$$

¹ En un acuerdo convexo es negativa.

² En un acuerdo convexo es negativo.

- Acuerdos cortos.

Los extremos de la visual tangente al acuerdo quedan fuera de éste si

$$\theta^2 < \frac{20\,000 * (\sqrt{1,2} + \sqrt{h})^2}{K_v}$$

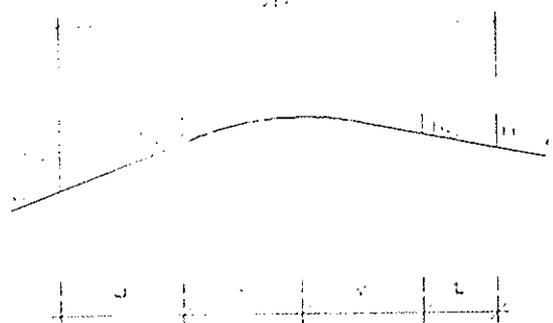


Fig. 14: Visibilidad en un acuerdo convexo corto

siendo: - $\theta = i_s - i_e$

- i_e (%) la inclinación de la rasante de salida del acuerdo
- i_s (%) la inclinación de la rasante de entrada del acuerdo
- h (m) la altura del objeto a percibir.
- K_v (m) el parámetro¹ del acuerdo.

Por definición,

$$h_e = \frac{x^2}{-2 * K_v} \quad ; \quad h_s = \frac{y^2}{-2 * K_v}$$

$$x = K_v * \frac{i - i_e}{100} \quad ; \quad y = K_v * \frac{i_s - i}{100} \quad ; \quad x + y = \frac{K_v * \theta}{100}$$

siendo i (%) la inclinación de la visual.

Por tanto,

$$- \frac{K_v}{20\,000} * (i - i_e)^2 = 1,2 + d * \frac{i - i_e}{100}$$

$$- \frac{K_v}{20\,000} * (i_s - i)^2 = h + t * \frac{i_s - i}{100}$$

¹ En un acuerdo convexo es negativo.

La visibilidad disponible VD está dada por

$$VD = \frac{K_v \cdot \theta}{200} - \frac{120}{i - i_e} - \frac{100 \cdot h}{i_s - i}$$

Anulando la derivada respecto de la variable independiente i para hallar el mínimo,

$$\frac{12\,000}{(i - i_e)^2} - \frac{10\,000 \cdot h}{(i_s - i)^2} = 0$$

o sea,

$$i_{VD_{min}} = \frac{\sqrt{1,2} \cdot i_s + \sqrt{h} \cdot i_e}{\sqrt{1,2} + \sqrt{h}}$$

La visibilidad mínima es

$$VD_{min} = \frac{K_v \cdot \theta}{200} - (\sqrt{1,2} + \sqrt{h})^2 \cdot \frac{100}{\theta}$$

y corresponde a que el observador se halla situado antes de la tangente de entrada del acuerdo vertical, a una distancia d (m) de ella, igual á

$$d_{VD_{min}} = - \frac{120}{\theta} \cdot \frac{\sqrt{1,2} + \sqrt{h}}{\sqrt{1,2}} - \frac{\frac{K_v \cdot \theta}{200}}{\frac{\sqrt{1,2} + \sqrt{h}}{\sqrt{1,2}}}$$

TABLA #5.2

VALOR ABSOLUTO⁽¹⁾ (m) DEL PARAMETRO K_v
DE UN ACUERDO VERTICAL CONVEXO
SEGUN LA VISIBILIDAD DISPONIBLE

A) PERCEPCION DE MARCA VIAL⁽²⁾
(h = 0)

VISIBILIDAD DISPONIBLE (m)	VALOR ABSOLUTO (%) DE LA DIFEREN- CIA DE INCLINACIONES DE LA RASANTE EN LOS EXTREMOS DEL ACUERDO					
	1	2	3	4	5	≥ 6
50	-		(667)	1 000	1 040	1 042
75	-	1 500	2 333	2 344		
100	-	4 000	4 167			
125	1 000	6 500	6 510			
150	6 000	9 000	9 375			
175	11 000	11 500	12 760			
200	16 000	16 667				
250	26 000	26 042				
300	36 000	37 500				
400	66 667					

¹ Los valores entre paréntesis son inferiores al mínimo de 900 m que prescribe el borrador de Instrucción 3.1-IC, excepto para intersecciones.

² Posibilidad de detención ante cruce o entrada a glorieta, o divergencia.

(sigue TABLA #5.2)

VALOR ABSOLUTO⁽¹⁾ (m) DEL PARAMETRO K_v
DE UN ACUERDO VERTICAL CONVEXO
SEGUN LA VISIBILIDAD DISPONIBLE

B) DETENCION ANTE UN OBSTACULO
(h = 0,30 m)

VISIBILIDAD DISPONIBLE (m)	VALOR ABSOLUTO (%) DE LA DIFERENCIA DE INCLINACIONES DE LA RASANTE EN LOS EXTREMOS DEL ACUERDO								
	1	2	3	4	5	6	7	≥ 8	
50	-					(167)	(327)	(406)	
75	-			(375)	(840)	1 000	1 041	1 042	
100	-		(667)	1 625	1 840	1 852			
125	-		2 333	2 875	2 894				
150	-	1 500	4 000	4 125	4 167				
175	-	4 000	5 667	5 671					
200	-	6 500	7 333	7 407					
250	-	11 500	11 574						
300	6 000	16 500	16 667						
400	26 000	26 500	29 630						
500	46 000	46 296							

¹ Los valores entre paréntesis son inferiores al mínimo de 900 m prescrito por el borrador de Instrucción 3.1-IC, excepto para intersecciones.

(sigue TABLA #5.2)

VALOR ABSOLUTO⁽¹⁾ (m) DEL PARAMETRO K,
DE UN ACUERDO VERTICAL CONVEXO
SEGUN LA VISIBILIDAD DISPONIBLE

C) PERCEPCION DE UN VEHICULO
(h = 1,20 m)

VISIBILIDAD DISPONIBLE (m)	VALOR ABSOLUTO (%) DE LA DIFERENCIA DE INCLINACIONES DE LA RASANTE EN LOS EXTREMOS DEL ACUERDO							
	1	2	3	4	5	6	7	≥ 8
100	-				(160)	(667)	(898)	1 000
125	-			(250)	1 160	1 500	1 612	1 628
150	-			1 500	2 160	2 333	2 344	
175	-		1 000	2 750	3 160	3 190		
200	-		2 667	4 000	4 167			
250	-	1 000	6 000	6 510				
300	-	6 000	9 333	9 375				
400	-	16 000	16 667					
500	4 000	26 042						

¹ Los valores entre paréntesis son inferiores al mínimo de 900 m prescrito por el borrador de Instrucción 3.1-IC, excepto para intersecciones.

(sigue TABLA #5.2)

VALOR ABSOLUTO⁽¹⁾ (m) DEL PARAMETRO K_v
DE UN ACUERDO VERTICAL CONVEXO
SEGUN LA VISIBILIDAD DISPONIBLE

C) PERCEPCION DE UN SEMAFORO
(h = 2,00 m)

VISIBILIDAD DISPONIBLE (m)	VALOR ABSOLUTO (%) DE LA DIFERENCIA DE INCLINACIONES DE LA RASANTE EN LOS EXTREMOS DEL ACUERDO						
	2	3	4	5	6	7	≥ 8
100	-					(286)	(538)
125	-				(668)	1 001	1 157
150	-			961	1 501	1 715	1 782
175	-		(877)	1 961	2 334	2 429	2 431
200	-		2 127	2 961	3 168	3 175	
250	-	2 670	4 627	4 961	4 962		
300	-	6 004	7 127	7 145			
400	8 508	12 670	12 702				
500	18 509	19 337	19 846				

¹ Los valores entre paréntesis son inferiores al mínimo de 900 m prescrito por el borrador de Instrucción 3.1-IC, excepto para intersecciones.

5.2.3.2 Acuerdos verticales cóncavos.

Aparte del caso en que el tablero de un paso superior dificulte la visibilidad, el único que suele interesar⁽¹⁾ es aquél en que el obstáculo ($h = 0,30$ m) a percibir sobre la calzada está al final de la zona iluminada por los faros del vehículo. A continuación se examinan dos casos particulares, para los que la modelización matemática es relativamente fácil, y que representan los extremos de la gama de posibilidades. La aplicación de las fórmulas se facilita por la tabla #5.3.

- Acuerdos largos.

La diferencia⁽²⁾ θ (%) entre las inclinaciones de la rasante en los extremos del acuerdo es suficiente para que tanto el faro como el obstáculo a percibir queden dentro del acuerdo, si

$$\theta \geq \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2954}{K_v}}}{0,573}$$

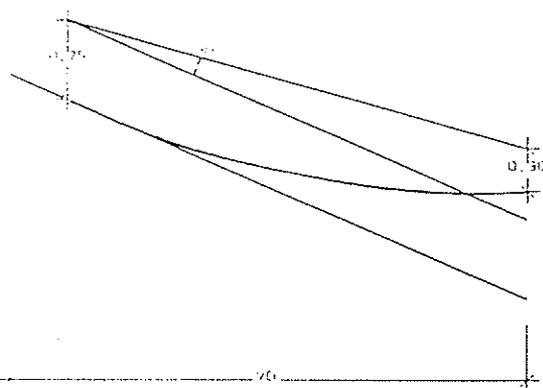


Fig. 15: Visibilidad en un acuerdo cóncavo largo

siendo K_v (m) el parámetro⁽³⁾ del acuerdo.

¹ Pues la presencia de marcas viales transversales de detención, o de divergencias, se debe resaltar mediante un balizamiento reflectante; y los vehículos que circulan tienen luces de posición.

² En un acuerdo cóncavo es positiva.

³ En un acuerdo cóncavo es positivo.

Entonces se cumple que

$$\overline{VD} * \frac{i}{100} + \frac{\overline{VD}^2}{2 * K_v} + 0,30 = 0,75 + \overline{VD} * \operatorname{tg} (\alpha + \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{i}{100})$$

y, admitiendo que

$$\frac{1}{1 - \frac{i}{100} * \operatorname{tg} \alpha} \approx 1$$

lo que, incluso para $i = 10 \%$, da un error inferior al $0,175 \%$, se tiene la ecuación de segundo grado

$$\overline{VD}^2 - 2 * K_v * \operatorname{tg} \alpha * \overline{VD} - 0,90 * K_v = 0$$

siendo $\alpha \approx 1^\circ$ el ángulo máximo que forma con el cono de luz del faro con el eje longitudinal del coche.

La mínima visibilidad disponible VD_{\min} (m) es constante, y su valor es

$$VD_{\min} = \frac{K_v}{57,3} * \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2954}{K_v}} \right]$$

- Acuerdos cortos.

Tanto el faro como el obstáculo a percibir quedan fuera del acuerdo si

$$\theta < \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{2954}{K_v}}}{0,573}$$

siendo K_v (m) el parámetro del acuerdo.

Entonces se cumple que

$$\frac{i_e}{100} \left(d + \frac{L}{2} \right) + \frac{i_s}{100} \left(\frac{L}{2} + t \right) + 0,30 = 0,75 + \overline{VD} * \text{tg} \left(\alpha + \text{arc tg} \frac{i}{100} \right)$$

y, admitiendo que

$$\frac{1}{1 - \frac{i_e}{100} * \text{tg} \alpha} \approx 1$$

lo que, incluso para $i = 10 \%$, da un error inferior al $0,175 \%$, se tiene

$$\overline{VD} = \frac{0,45 + \left(\frac{L}{2} + d \right) * \frac{\theta}{100}}{\frac{\theta}{100} - \text{tg} \alpha}$$

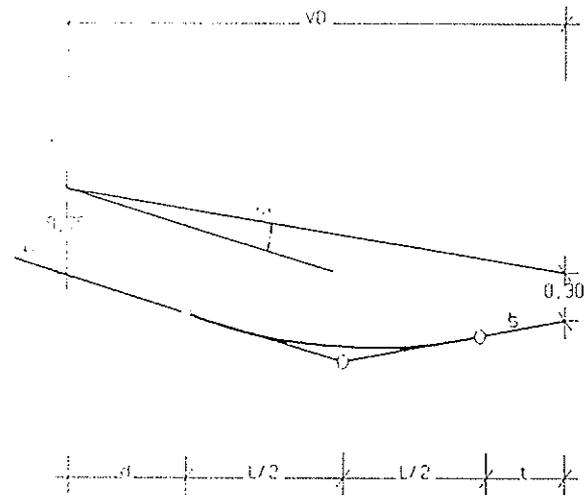


Fig. 16: Visibilidad en un acuerdo cóncavo corto

siendo $\alpha \approx 1^\circ$ el ángulo máximo que forma con el cono de luz del faro con el eje longitudinal del coche.

La mínima visibilidad disponible VD_{\min} (m) ocurre para $d = 0$, o sea cuando el faro está en la tangente de entrada del acuerdo: y su valor es

$$VD_{\min} = \frac{K_v * \theta^2 + 9\,000}{200 * (\theta - 1,745)}$$

TABLA #5.3

VALOR⁽¹⁾ (m) DEL PARAMETRO K_v
 DE UN ACUERDO VERTICAL CONCAVO
 SEGUN LA VISIBILIDAD DISPONIBLE
 PARA LA DETENCION ANTE UN OBSTACULO
 ($h = 0,30$ m)

VISIBILIDAD DISPONIBLE (m)	DIFERENCIA (%) DE INCLINACIONES DE LA RASANTE EN LOS EXTREMOS DEL ACUERDO			
	3	4	5	≥ 6
50	(394)	(847)	942	945
75	1 092	1 552	1 599	
100	1 789	2 256	2 278	
125	2 486	2 961	2 969	
150	3 183	3 666	3 667	
175	3 881	4 370		
200 ⁽²⁾	4 578	5 076		

5.3 MODELOS PARA LA VISIBILIDAD NECESARIA

5.3.1 Detención ante un obstáculo imprevisto.

5.3.1.1 Planteamiento general.

La visibilidad necesaria es igual a la suma de la distancia recorrida (a la velocidad inicial) durante un tiempo de percepción y reacción⁽³⁾, y de la distancia necesaria para la detención, deducida de la aplicación del modelo de deceleración descrito en el apartado 3.3.

¹ Los valores entre paréntesis son inferiores al mínimo de 900 m prescrito por el borrador de Instrucción 3.1-IC, excepto para intersecciones.

² Más allá de 200 se puede considerar que la iluminación que un obstáculo recibe de los faros del vehículo no es eficaz.

³ Generalmente se admiten 2 segundos.

La distancia total DD (m) recorrida hasta la detención está dada por la ecuación

$$DD = \frac{V_o^2}{1,8} + s_1 - s_o$$

- siendo:
- s_1 (m) el valor de s correspondiente al punto de detención.
 - s_o (m) el valor de s correspondiente al punto de iniciación del frenado.
 - V_o (km/h) la velocidad inicial.

Ahora bien, la deceleración D [(km/h)/s] está dada por la ecuación

$$D = 3,6 * g * \left[\frac{i (s)}{100} + f_1 \right]$$

- siendo:
- s (m) el recorrido
 - $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ la aceleración de la gravedad
 - i (%) la inclinación de la rasante⁽¹⁾
 - f_1 el rozamiento longitudinal movilizado entre neumático y pavimento.

Por definición,

$$V * dV = 3,6 * D * ds$$

e integrando,

$$\frac{V_o^2}{2} = 3,6^2 * g * \left[\int_{s_o}^{s_1} \frac{i (s) * ds}{100} + (s_1 - s_o) * f_1 \right]$$

¹ Positiva subiendo.

Por consiguiente,

$$V_o = \sqrt{254 * \left[\int_{s_o}^{s_1} \frac{i(s)}{100} * ds + f_1 * (s_1 - s_o) \right]}$$

5.3.1.2 En un acuerdo vertical.

Si toda la fase de frenado tiene lugar dentro de un acuerdo vertical y, por tanto,

$$s_o = 0 ; \quad \frac{i(s)}{100} = \frac{i_e}{100} + \frac{s}{K_v}$$

siendo: - i_e (%) la inclinación de la rasante en el momento de iniciar el frenado

- K_v (m) el parámetro⁽¹⁾ del acuerdo vertical

el sistema de ecuaciones del apartado 5.3.1.1 se simplifica, puesto que

$$\int_0^{s_f} \frac{i(s)}{100} ds = s_f \frac{i_e}{100} + \frac{s_f^2}{2 * K_v}$$

siendo s_f (m) la distancia recorrida durante el frenado. Por tanto,

$$\frac{V_o^2}{254} = \frac{s_f^2}{2 * K_v} + \left(f_1 + \frac{i_e}{100} \right) * s_f$$

¹ Positivo en un acuerdo cóncavo, negativo en uno convexo.

La distancia total recorrida está dada por

$$DD = \frac{V_o}{1,8} + K_v * (f_l + \frac{i_e}{100}) * \left[\sqrt{1 + \frac{\frac{V_o^2}{127 * K_v}}{[f_l + \frac{i_e}{100}]^2}} - 1 \right]$$

5.3.1.3 En una rasante uniforme.

Si la inclinación i (%) de la rasante es uniforme, el sistema del apartado 5.3.1.1 se simplifica a

$$DD = \frac{V_o}{1,8} + \frac{V_o^2}{254 * (\frac{i}{100} + f_l)}$$

Para una velocidad inicial igual a V_{99} y un coeficiente de rozamiento longitudinal igual a

$$f_l = 0,86 - \frac{V_{99}}{500}$$

correspondiente a neumáticos en buen estado y pavimento ligeramente mojado⁽¹⁾, se exponen en la tabla #5.4 las visibilidades necesarias para una detención de emergencia ante un obstáculo imprevisto.

¹ Apartado 3.3.3.1.

TABLA #5.4

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_{99} (km/h)				INCLINACION DE LA RASANTE (%)					
				-10	-5	0	+5	+10	
CARRETERAS CON CALZADAS SEPARADAS	165	CARRETERAS DE CALZADA UNICA CON ARCENES > 1,5 m	145	341	315	294	276	262	
	130		125	257	240	226	214	204	
	100		110	205	193	183	175	167	
			85	125	190	179	170	163	156
			65	90	149	142	136	130	125
				90	126	120	115	111	107
				85	105	101	97	94	91
				65	95	92	88	86	83
				50	63	61	59	57	56
					43	42	41	40	39

5.3.2 Presencia de una divergencia, o detención eventual ante una marca vial transversal en un cruce o en la entrada a una glorieta, o ante un semáforo.

La visibilidad necesaria está determinada por la condición de que la presencia de la divergencia, o de la eventual necesidad de detenerse, sea percibida con antelación suficiente para poder efectuar la maniobra correspondiente con comodidad. Se considera como un mínimo absoluto un tiempo de recorrido de 3,5 segundos, siendo recomendable disponer de unos 7 segundos. La distancia correspondiente, expresada en m, corresponde aproximadamente a la velocidad de aproximación⁽¹⁾, expresada en km/h, o al doble de ella.

¹ En este caso, V_{95} .

5.3.3 Evitación de una colisión con otros vehículos.

5.3.3.1 Cruce.

La visibilidad necesaria para que se pueda cruzar⁽¹⁾ otra trayectoria de tráfico está determinada por la condición de que el conductor del vehículo que espera cruzar pueda ver si viene otro vehículo y, en este caso, juzgar si éste se halla a una distancia suficiente para que el primero pueda terminar el cruce antes de que llegue el segundo.

Se suele emplear un modelo matemático como el siguiente:

- El vehículo que pretende cruzar tiene una longitud $l^{(2)}$ (m), y está detenido á 3 m del borde del carril o calzada que pretende cruzar, cuya anchura es w (m).

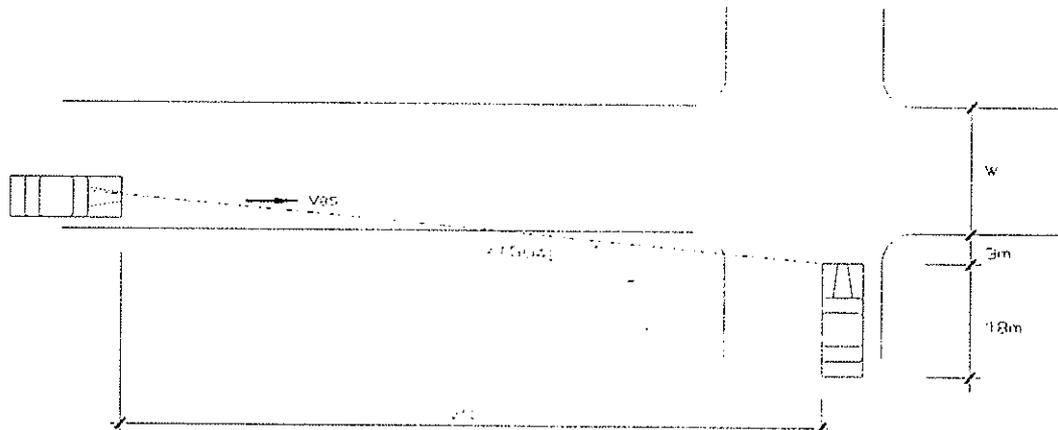


Fig. 17: Visibilidad necesaria para cruzar

- Tras un tiempo de percepción y análisis de 3 segundos, el vehículo cruza con un movimiento uniformemente acelerado a partir del reposo, con aceleración media $j^{(3)}$ ((km/h)/s).

¹ Aproximadamente en ángulo recto.

² Normalmente se considerará un vehículo articulado, con $l = 18$ m.

³ Se puede considerar aceptable la cifra de 4 (km/h)/s.

El tiempo total t_c (s) necesario para el cruce está dado por la ecuación

$$t_c = 3 + \sqrt{\frac{7,2 * (3 + l + w)^2}{j}} = 3 + 1,34 * \sqrt{21 + w}$$

- El vehículo que se acerca por la trayectoria que va a ser cruzada circula a la velocidad V_{KS} (km/h), y no tiene que modificarla.

Con este modelo, la visibilidad necesaria VN (m) está dada por la ecuación siguiente, cuya aplicación facilita la tabla #5.5:

$$VN = \frac{V_{85} * t_c}{3,6}$$

TABLA #5.5

VISIBILIDAD MINIMA (m) PARA CRUCE PERPENDICULAR EN LLANO
EN PRESENCIA DE OTRO VEHICULO
QUE NO MODIFICA SU VELOCIDAD

V_{KS} (km/h)		ANCHURA w A CRUZAR (m)				
		4	7	10,5	12	14
ARCENES > 1,5 m	110	297	309	322	327	334
	90	243	252	263	268	273
	85	229	238	249	253	258
	65	175	182	190	193	197
	50	135	140	146	149	152
	45	121	126	132	134	137
ARCENES < 1,5 m	35	94	98	102	104	106

Si el cruce resultase fallido, siempre debe poder detenerse cualquiera de los vehículos, o ambos. Por lo tanto, no deben sufrir interferencias las visuales que queden dentro de un triángulo, delimitado por la recta que une las posiciones de dos vehículos que estén a una distancia de la trayectoria estimada del vehículo contrario, igual a:

- Si la ordenación de la circulación en el cruce no asigna prioridad de paso, o si ésta es fija, la distancia necesaria para detenerse ante un obstáculo imprevisto⁽¹⁾.
- Si la ordenación de la circulación asigna una prioridad alternativa mediante semáforos, la distancia necesaria para una detención eventual⁽²⁾.

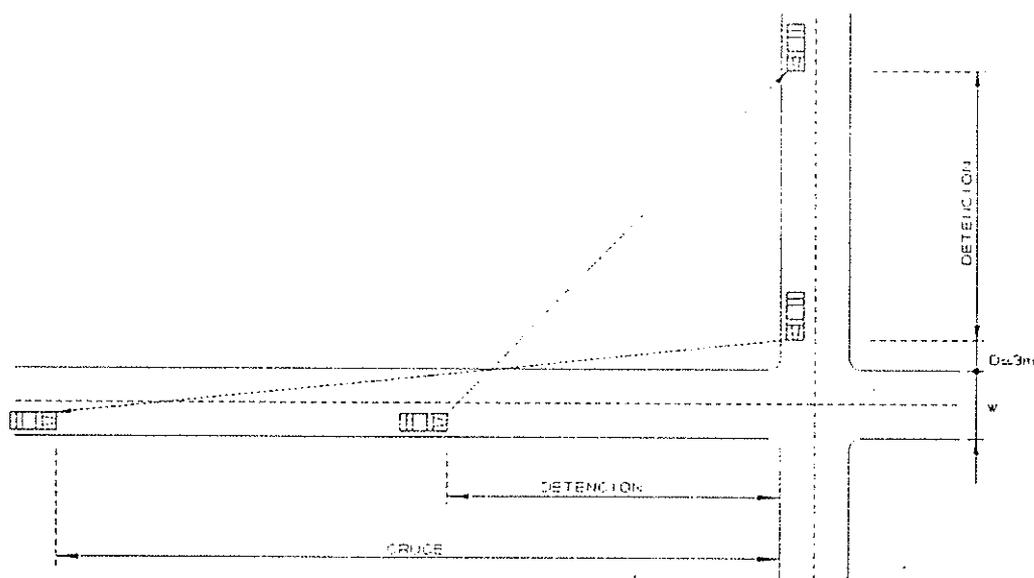


Fig. 18: Triángulos de visibilidad en cruces

5.3.3.2 Convergencia.

La visibilidad necesaria para que un vehículo detenido gire y luego converja a velocidad suficiente con el tráfico de paso se obtiene mediante la aplicación de modelos análogos al considerado en el apartado anterior para el cruce.

¹ Apartado 5.3.1.

² Apartado 5.3.2.

5.3.3.3 Adelantamiento.

Debido a su complejidad, este modelo se analiza con detalle en el apartado siguiente.

6 EL ADELANTAMIENTO

6.1 INTRODUCCIÓN

En carreteras de calzada única, uno de los objetivos funcionales es procurar que la mayoría de los vehículos se pueda desplazar con las mínimas interferencias con otros más lentos, a los que tienen que adelantar.

En el Reglamento general de circulación (RGC), se dedica el Capítulo VII del Título II a la maniobra de adelantamiento.

Al efectuar un adelantamiento, los conductores deben ser conscientes de que están realizando una maniobra compleja, que implica siempre un cierto riesgo, pues se ocupa temporalmente un carril destinado al sentido contrario de circulación, con posibilidad de colisionar con un vehículo que circule normalmente por él.

Aunque el conductor que pretenda adelantar conozca sus propias posibilidades y las de su vehículo, hay otros factores que debe estimar en cada caso concreto. De ellos, los que más influyen en este riesgo son:

- a) El número, longitud y separación de los vehículos a los que hay que adelantar de una sola vez, que influye en la distancia **relativa** recorrida durante la maniobra y que, frecuentemente, no se descubre hasta que se inicia ésta. El artículo 54 del RGC acota estas circunstancias, al prescribir que

"... la separación que debe guardar todo conductor de vehículo que circule detrás de otro sin señalar su propósito de adelantamiento, deberá ser tal que permita al que a su vez le siga adelantarle con seguridad. Los vehículos con peso máximo autorizado superior a 3 500 kg, y los vehículos y conjuntos de vehículos de más de 10 m de longitud total deberán guardar, a estos efectos, una separación mínima de 50 m..."

- b) La velocidad V_0 del conjunto de vehículos al que se pretende adelantar, que influye en la distancia **absoluta** recorrida durante la maniobra, puesto que es limitada la diferencia de velocidades que el vehículo adelantante puede establecer.

Por ejemplo, si la diferencia media de velocidades entre el vehículo adelantado y el adelantante fuera sólo de 1 km/h, la maniobra requeriría del orden de 100 segundos

para realizarse, durante los que un vehículo adelantado que circule á 90 km/h habría recorrido 2,4 km, a los que habría que sumar la distancia recorrida por un posible vehículo que circulara en sentido contrario. Por otro lado, si la diferencia media de velocidades fuera de 10 km/h, las cifras indicadas se dividirían por diez.

La velocidad V_u tiene gran importancia: tanto es así, que hasta cabría imaginar la utilidad de una señal que informara al conductor de qué valor se ha adoptado para señalar las prohibiciones del adelantamiento en un tramo, o sea: de que tiene una probabilidad razonable de adelantar, en condiciones de seguridad, a otro vehículo que lleve una velocidad igual o inferior a la indicada.

c) Las condiciones del tramo de carretera que va a recorrer durante el adelantamiento:

- Fundamentalmente, la visibilidad⁽¹⁾, que puede ser limitada tanto por la planta y alzado de la carretera como por el propio vehículo al que se pretende adelantar⁽²⁾. Es evidente que, cuanto mayor sea la visibilidad disponible, mayor será la proporción de vehículos que podrán completar un adelantamiento, lo cual es muy deseable.
- La inclinación de la rasante, que disminuye las prestaciones de aceleración si es rampa, y las de frenado si es pendiente.
- La presencia, o no, de una señalización que prohíba el adelantamiento o avise de la proximidad de la prohibición.

d) La presencia y, en caso afirmativo, la distancia y velocidad del vehículo contrario, que deben ser estimadas a gran distancia y, en su caso, en condiciones adversas de visibilidad⁽³⁾. Una elevada velocidad⁽⁴⁾ del vehículo contrario es un factor muy desfavorable.

El punto 3 del artículo 85 del RGC prescribe que "... (no se deberá) obligar a otros usuarios a modificar su trayectoria o velocidad..."; pero en la realidad

¹ Incluso esta visibilidad se puede ver dificultada por circunstancias tales como el deslumbramiento nocturno por los faros de los vehículos contrarios, o la proyección de neblina por el vehículo anterior, en tiempo lluvioso y con pavimento no drenante.

² Cf. apartado 5.2.2.2.b).

³ De noche, con lluvia, etc.

⁴ E incluso superior a la máxima autorizada (Cf. apartado 3.1.4).

se debería contar con esta posibilidad, en el caso del vehículo contrario, si su velocidad es elevada.

La estimación de todos estos factores una vez iniciada la maniobra requiere, por parte de los conductores, no sólo invertir un cierto tiempo, sino también aceptar el riesgo de que su decisión se base en unas estimaciones equivocadas.

Los comportamientos de los conductores están regulados por los artículos 2, 3 y 17 del RGC, los cuales 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..."

En el caso del adelantamiento, el control se traduce en maniobras evasivas, como la preconizada por el punto 2 del artículo 85 del RGC:

" Si después de iniciar la maniobra de adelantamiento, (el conductor que lo efectúe) advirtiera que se producen circunstancias que pudieran hacer difícil la finalización del mismo sin provocar riesgos, reducirá rápidamente su marcha y regresará de nuevo a su mano... "

Aun con estas precauciones, no siempre observadas, el riesgo implicado no se puede anular: si, por ejemplo, si el adelantamiento hubiera progresado lo suficiente como para que resultase difícil desistir de él y si, en ese momento, el vehículo contrario estuviera a corta distancia y con elevada velocidad, resultaría casi imposible evitar una colisión, a no ser que tuvieran éxito maniobras evasivas en planta en el último momento. Para esto último, la presencia de arcones de anchura suficiente resulta imprescindible, aunque puede generar una excesiva confianza en las posibilidades de evasión.

Además de este obligatorio control de su vehículo, el conductor que pretende adelantar se puede ver ayudado por una señalización que le sirva de referencia. En algunos países como, por ejemplo, el Reino Unido, esta señalización en la mayoría de los casos no existe; pero en otros, como en España, su presencia es muy frecuente. En este caso, aunque parece entendido que una prohibición denota que el adelantamiento en ese tramo puede ser peligroso, no lo está tanto

que la ausencia de tal prohibición no significa que se pueda adelantar indiscriminadamente. La ausencia de prohibición es una condición necesaria para un adelantamiento, pero puede no ser suficiente.

A la vista de lo expuesto, y como ya se ha destacado⁽¹⁾, la señalización relacionada con el adelantamiento es imposible de modelizar de forma que sirva a todos los vehículos y conductores, cuyas velocidades, prestaciones y aptitudes son muy diferentes. Cualquier criterio que se establezca tiene un campo de validez limitado. Un ejemplo extremo lo constituyen las carreteras de montaña, en las que resulta difícil establecer el compromiso entre seguridad y fluidez de la circulación, basado en una modelización representativa: esto ha llevado, en algunas de ellas, a confiar más en los conductores, no explicitando las prohibiciones⁽²⁾.

Más que el criterio en sí, para la seguridad de la circulación conviene adoptar uno uniforme a nivel nacional, de modo que los conductores puedan confiar en él.

6.2 PROBABILIDAD DE COMPLETAR UN ADELANTAMIENTO

6.2.1 Generalidades.

La existencia de frecuentes y largos tramos en que no haya oportunidades para adelantar a otros vehículos más lentos provoca frustración a los conductores que se ven atrapados tras una "caravana", lo que les incita a transgredir la prohibición. La frustración de las oportunidades de adelantamiento es particularmente frecuente donde concurren las siguientes circunstancias:

- Terreno con relieve ondulado, especialmente con rasantes descendentes que favorecen la aceleración.
- Población dispersa.
- Elevada proporción de viajes de largo recorrido a alta velocidad.
- Proporción apreciable de vehículos lentos, que causan la formación de caravanas.

¹ Apartado 2.2.

² En cuanto a la señalización horizontal (marcas viales), o no se pintan en el eje, sino en los bordes de la calzada, o se advierte de que la marca discontinua del eje no representa más que el centro de la calzada. Esta advertencia tiene el inconveniente de su literariedad: mensaje largo, no codificado, incomprensible para extranjeros, y necesariamente reiterado tras la confluencia con otras vías.

- Frecuencia de intersecciones y accesos.
- Intensidad de circulación suficientemente alta para restringir el adelantamiento, pero no suficiente para justificar una ampliación o duplicación de la calzada.

En un tramo de carretera⁽¹⁾, la probabilidad P_a de que un vehículo pueda completar un adelantamiento en condiciones de seguridad es igual al producto de la probabilidad P_v de que el vehículo esté en una zona en que el adelantamiento sea físicamente posible en esas condiciones, por la probabilidad P_h de que, en la corriente de tráfico que circula en sentido opuesto, haya un intervalo suficiente entre dos vehículos sucesivos⁽²⁾.

$$P_a = P_v * P_h$$

6.2.2 Valor mínimo.

El mínimo valor admisible de la probabilidad P_a de completar un adelantamiento⁽³⁾ depende de la intensidad horaria de circulación en el sentido considerado, y del número máximo de vehículos que se considera aceptable en una caravana⁽⁴⁾. Si resulta inferior al límite indicado en la Fig. 19, se puede considerar que la frustración va a resultar inaceptable.

Para aumentar la probabilidad P_a de que un vehículo pueda completar con éxito un adelantamiento en un tramo determinado se puede, en principio:

- a) Reducir el número de intersecciones, por cierre o desvío, o por su transformación en enlaces.
- b) Modificar el trazado en planta, para obtener alineaciones rectas más largas o, cuando menos tramos con mayor visibilidad.

¹ Cf. apartados 3.2.1, 3.2.3 y 4.2. En todo caso, se debe dotar al tramo de al menos una oportunidad para el adelantamiento.

² Se suele admitir igual á 24 s.

³ Apartado 6.2.1.

⁴ Normalmente se considera aceptable una caravana compuesta por entre 4 y 8 vehículos, incluido el lento que la precede.

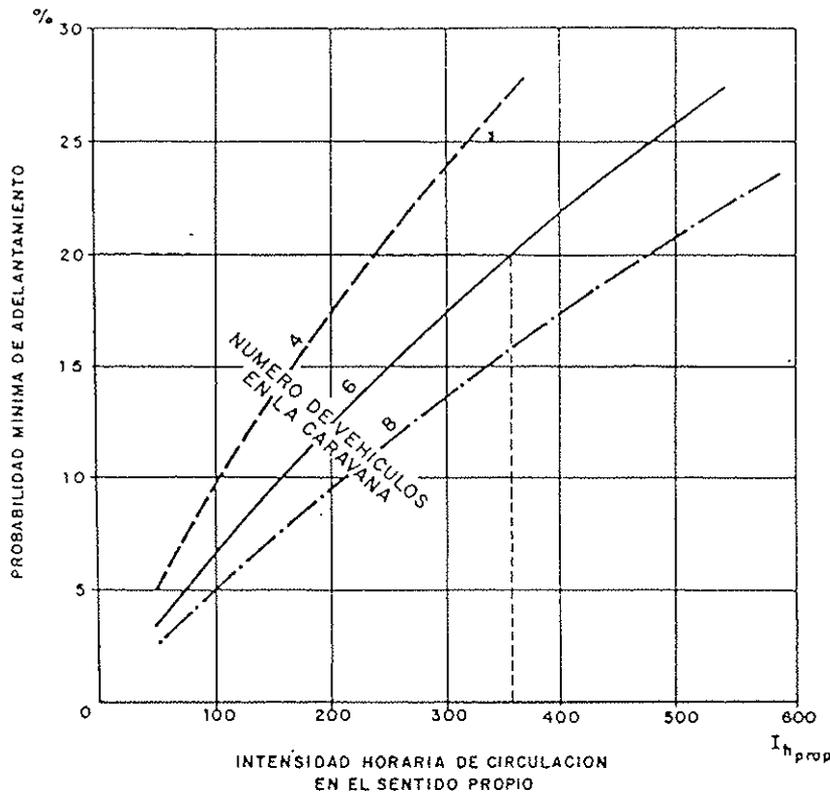


Fig. 19 Mínima probabilidad aceptable de adelantamiento (Fuente: Geometric Design Standards for Ontario Highways, agosto de 1991).

- c) Establecer carriles adicionales en rampas (o incluso en otros emplazamientos) donde resulten económicamente justificados.

Si tanto la intensidad de la circulación en el sentido considerado como la proporción de vehículos lentos son elevados, el establecimiento de carriles adicionales no resulta tan beneficioso para el nivel de servicio, y sería deseable duplicar la calzada, a partir de que sea

$$I_{hprop} = 600 - 10,6 \cdot p$$

- siendo: - I_{hprop} la intensidad horaria en el sentido propio.
 - p (%) la proporción de vehículos pesados.

En todo caso, es conveniente que la lectura que un conductor haga de la carretera y su entorno (sobre todo en terreno llano, o donde la rasante sea descendente) identifique claramente las zonas en que se puede completar con seguridad un adelantamiento: este requisito debe primar sobre la coordinación entre el trazado en planta y en alzado. Donde no se pueda adelantar, tal circunstancia debería también resultar claramente aparente: la longitud de cada tramo en que esto ocurra no debería exceder de 1,5 km (recomendable) ó 3 km (máximo absoluto).

6.2.3 Probabilidad de hueco en el tráfico contrario.

La probabilidad $P_h^{(1)}$ de encontrar un intervalo suficiente en el tráfico que circula en sentido opuesto depende de la intensidad horaria I_{hop} de éste (Fig. 20)

6.2.4 Posibilidad material del adelantamiento.

La probabilidad $P_v^{(1)}$ de que haya posibilidad material del adelantamiento es igual a la proporción de la longitud del tramo en que, simultáneamente, concurren las circunstancias siguientes:

- El adelantamiento no está prohibido por la señalización.
- La visibilidad disponible es suficiente para completar el adelantamiento aun en presencia de un vehículo contrario. Cuanto mayor sea la visibilidad disponible, mayor será la proporción de vehículos que podrán completar un adelantamiento ya iniciado, si la intensidad de la circulación no lo impide.

¹ Apartado 6.2.1.

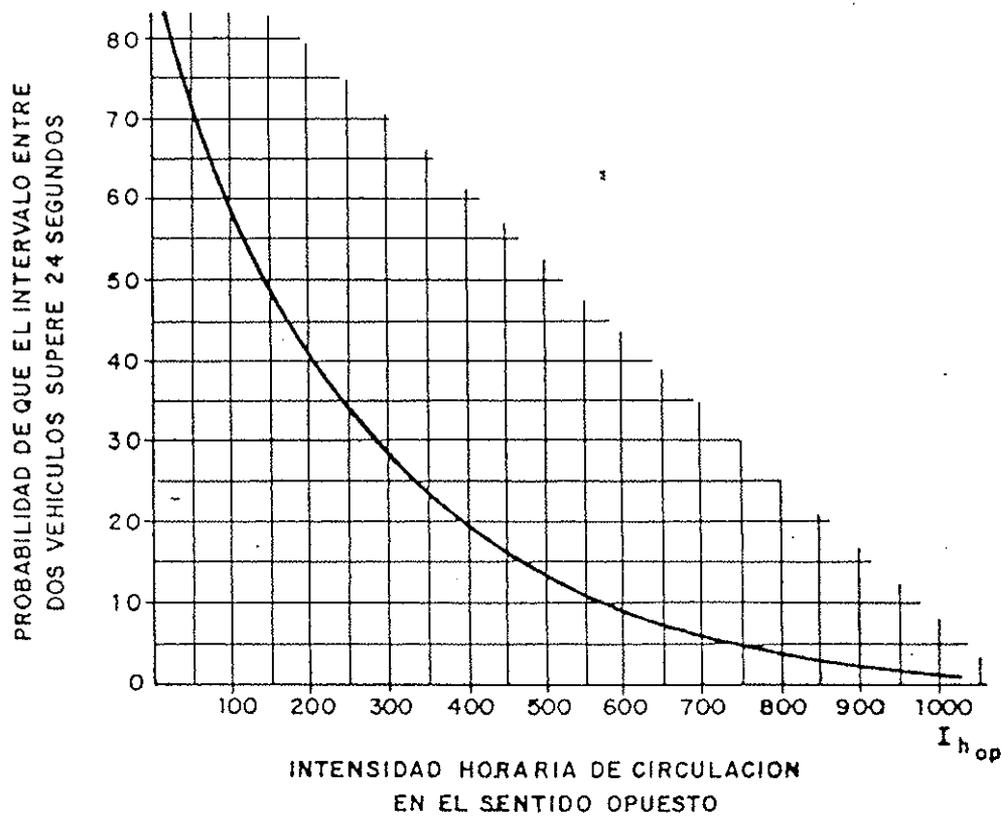


Fig. 20: Probabilidad de encontrar un hueco de al menos 24 s en la corriente de tráfico opuesta (Fuente: Geometric Design Standards for Ontario Highways, agosto de 1991).

6.3 MODELIZACIÓN DEL ADELANTAMIENTO

6.3.1 Casos.

En una maniobra de adelantamiento ya iniciada es preciso distinguir:

- Si el vehículo que pretende adelantar viene ya lanzado desde muy atrás, a una velocidad superior a la del vehículo adelantado, o si, por el contrario, parte del seguimiento de este último a su misma velocidad. Estas dos situaciones representan los extremos de una

gama de posibilidades relativas a la velocidad a la que se inicia la maniobra.

- Si el adelantamiento puede tener éxito, en cuyo caso se completa⁽¹⁾, o si puede resultar fallido⁽²⁾, en cuyo caso se debe desistir de él. En la modelización que se expone a continuación, se ha considerado prudente admitir que el conductor elige entre estas alternativas cuando (situación de decisión) el morro del vehículo adelantante⁽³⁾ se halla a una distancia tal de la trasera del vehículo adelantado, que si desistiera llegaría a emparejarse con ella.

6.3.2 Elementos básicos del modelo.

6.3.2.1 Generalidades.

Para analizar los movimientos relativos de los vehículos que intervienen en la maniobra⁽⁴⁾, y las distancias y visibilidades necesarias, resulta muy útil el empleo de un diagrama espacios / tiempos.

En toda modelización hay parámetros cuyo valor hay que elegir. En el apartado 6.4 se exponen los que se han considerado más adecuados, aunque esta elección se puede variar para el análisis de otros casos particulares.

Las variables que intervienen y los criterios de partida se describen en los apartados siguientes.

6.3.2.2 Longitud del vehículo adelantante.

La longitud del vehículo adelantante es l_a (m).

-
- ¹ Antes de cruzarse con un vehículo que venga en sentido contrario, o de llegar a una señal de prohibición del adelantamiento.
 - ² Por haber aparecido un vehículo demasiado próximo o veloz en sentido contrario, o una señal de prohibición del adelantamiento demasiado cercana, u otras circunstancias.
 - ³ Esta posición representa el comportamiento de la mayoría de los conductores, y proporciona un cierto margen de seguridad respecto de aquélla (en la que el vehículo adelantador ha avanzado más) en que se igualan los tiempos de ocupación del carril contrario en uno y otro caso (completar o desistir).
 - ⁴ El adelantado, el adelantante, y un posible vehículo que circule en sentido contrario.

6.3.2.3 Longitud del vehículo adelantado.

Se ha considerado un solo vehículo adelantado, con una longitud l_A (m). Esto está en consonancia con el artículo 54 del RGC, el cual prescribe que "... la separación que debe guardar todo conductor de vehículo que circule detrás de otro sin señalar su propósito de adelantamiento, deberá ser tal que permita al que a su vez le siga adelantarlo con seguridad. Los vehículos con peso máximo autorizado superior a 3 500 kg, y los vehículos y conjuntos de vehículos de más de 10 m de longitud total deberán guardar, a estos efectos, una separación mínima de 50 m..."

6.3.2.4 Separación entre vehículos adelantante y adelantado.

La separación entre los dos vehículos (adelantante y adelantado), en la posición de seguimiento, es d (m), algo superior a la longitud l_a del vehículo adelantante. El punto 1 del artículo 54 del RGC prescribe "... un espacio libre que... permita detenerse en caso de frenado brusco, sin colisionar... teniendo en cuenta especialmente la velocidad y las condiciones de adherencia y frenado...". Hay que tener en cuenta que la detención del vehículo adelantado no es instantánea.

Esta distancia d será la que, como mínimo, deberá quedar entre los vehículos adelantante y adelantado tras completar la maniobra de adelantamiento, o para iniciar el repliegue después de desistir de aquél.

6.3.2.5 Período de análisis.

Según el punto 1 del artículo 84 del RGC, "antes de iniciar un adelantamiento... el conductor que se proponga adelantar deberá... comprobar que existe espacio libre suficiente para que la maniobra no ponga en peligro ni entorpezca a quienes circulen en sentido contrario, teniendo en cuenta la velocidad propia y la de los demás usuarios afectados. En caso contrario deberá abstenerse de efectuarla. Ningún conductor deberá de adelantar a varios vehículos, si no tiene la total seguridad de que, al presentarse otro en sentido contrario, puede desviarse hacia el lado derecho sin irrogar perjuicios o poner en situación de peligro a alguno de los vehículos adelantados..."

En definitiva, el conductor del vehículo que pretende adelantar debe comprobar si viene otro vehículo por el carril contrario y, en caso afirmativo, valorar su velocidad y distancia. No es que, una vez iniciado el adelantamiento,

surge de repente el vehículo contrario como *deus ex machina*: en condiciones favorables⁽¹⁾ el vehículo contrario es percibido desde el instante inicial de la maniobra.

En una situación de seguimiento del vehículo adelantado, durante el tiempo t_d (s) invertido en la percepción de la situación y en su análisis, aquél limita la velocidad del vehículo adelantante, que le sigue durante un cierto trecho en caravana. Si, por el contrario, el vehículo adelantante ya viene lanzado por el carril normalmente reservado al sentido contrario, se puede considerar que el conductor ya viene atento a la posible presencia, distancia y velocidad de un eventual vehículo contrario.

6.3.2.6 Velocidad del vehículo adelantado.

Se ha considerado que el vehículo adelantado circula a velocidad V_0 (km/h) constante: el punto 2 del artículo 86 del RGC "... prohíbe al conductor del vehículo que va a ser adelantado aumentar la velocidad... (y dicho conductor) también estará obligado a disminuir la velocidad de su vehículo cuando, una vez iniciada la maniobra de adelantamiento, se produzca una situación que entraña peligro para su propio vehículo, para el vehículo que la está efectuando, para los que circulan en sentido contrario o para cualquier otro usuario de la vía...". No considerar esta posible disminución de la velocidad está del lado de la seguridad.

La velocidad V_0 se ha tomado igual a una cierta fracción α de la V_{85} : se trata de adelantar a un vehículo lento, y considerar valores de α próximos a la unidad lleva a que los vehículos que circulan en el entorno de V_{85} , y que pretenden adelantar, necesiten disponer de una visibilidad muy elevada.

6.3.2.7 Velocidad inicial del vehículo adelantante.

Si el adelantamiento se inicia a partir de una situación de seguimiento del vehículo adelantado, la velocidad inicial del vehículo adelantante será igual a la de aquél, V_0 .

Por el contrario, se puede considerar que la velocidad a la que se llega lanzado es constante e igual a V_{85} : no parece razonable, desde el punto de vista de la seguridad, considerar velocidades superiores, de las que resultan menores tiempos y distancias de adelantamiento.

¹ Una recta muy larga con amplia visibilidad.

6.3.2.8 Fase inicial.

El punto 1 del artículo 85 del RGC prescribe que *"durante la ejecución del adelantamiento, el conductor que lo efectúe deberá llevar su vehículo a una velocidad notoriamente superior a la del que pretende adelantar..."*

En una situación de seguimiento del vehículo adelantado, a partir del final del análisis el vehículo adelantante acelera, a partir de la velocidad inicial V_0 , hasta la situación de decisión. Si el vehículo adelantante llega lanzado a velocidad suficiente⁽¹⁾, no es preciso acelerar.

6.3.2.9 Decisión.

El momento de decisión (completar el adelantamiento o desistir de él) para el conductor del vehículo adelantante coincide con que su morro se halle a una distancia x (m) de la trasera del vehículo adelantado (Fig. 21). En ese momento, su velocidad es V_1 (km/h). La distancia x debe ser suficiente para que, si en ese momento se decidiera desistir del adelantamiento, el morro del vehículo adelantante no llegue a rebasar la trasera del vehículo adelantado. Una vez rebasada esa posición, el conductor ya no optará por desistir del adelantamiento, sino que intentará completarlo.

6.3.2.10 Completar el adelantamiento.

Si se decide completar el adelantamiento, el vehículo adelantante seguirá con el mismo tipo de movimiento que tenía durante la fase inicial hasta que, como prescribe el punto 3 del artículo 85 del RGC, *"... (pueda) reintegrarse a su carril tan pronto como le sea posible y de modo gradual, sin obligar a otros usuarios a modificar su trayectoria o velocidad..."*. En la práctica esto equivale a situarse por delante del vehículo adelantado, a una distancia d de éste.

6.3.2.11 Desistir del adelantamiento.

Si se decide desistir del adelantamiento, a partir del momento de decisión el vehículo adelantante inicia una deceleración D_a [(km/h)/s] uniforme y deliberada, desde la velocidad inicial V_1 , mientras el adelantado prosigue su movimiento uniforme a velocidad V_0 . La deceleración cesa

¹ Téngase en cuenta que, en la modelización propuesta, V_{85} es bastante superior a V_0 .

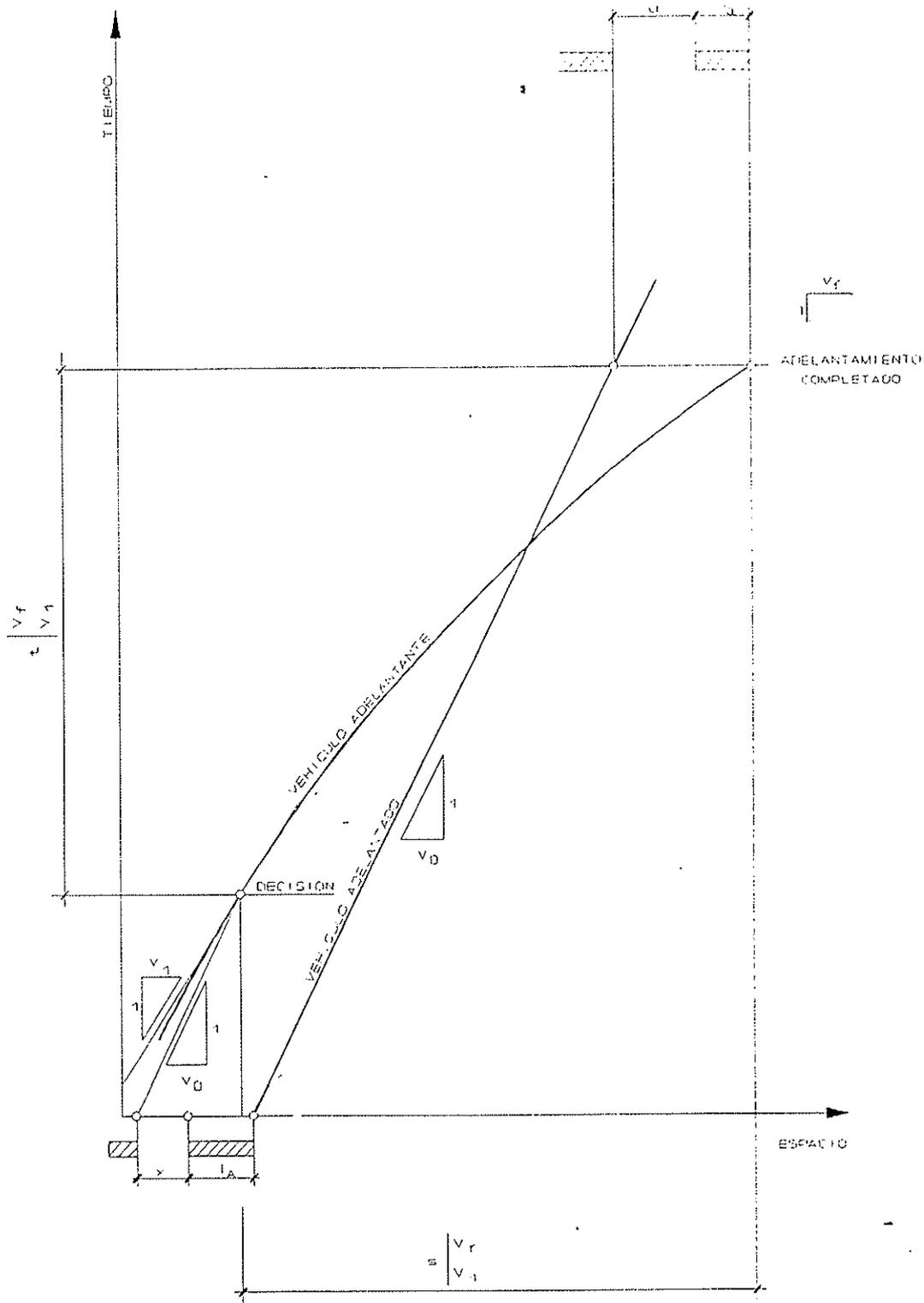


Fig. 22: Fase final de un adelantamiento completado

cuando el morro del vehículo adelantante, cuya velocidad ha bajado a V_f (km/h), vuelve a estar a una distancia d (m) por detrás de la trasera del vehículo adelantado⁽¹⁾: es decir, cuando se recupera una posición análoga a la de seguimiento, pero con el vehículo adelantante todavía en el carril contrario.

A partir de este momento, se produce su repliegue o vuelta al carril derecho, a velocidad constante V_f durante un tiempo t_r (s).

6.3.2.12 Comportamiento del vehículo contrario.

Para que un adelantamiento se pueda completar, o se pueda desistir de él, en condiciones aceptables de seguridad, es preciso que a partir del momento de decisión, el conductor de un eventual vehículo contrario no deje de ver al vehículo adelantante, y pueda ajustar su velocidad de forma que no se cruce con él antes de que la maniobra se termine. Esto equivale a no dejar de disponer de una visibilidad mutua⁽²⁾ VN (m) igual o superior a la suma de:

- La distancia que recorrerá el vehículo adelantante para terminar la maniobra.
- La distancia recorrida por el vehículo contrario durante ese tiempo.

El vehículo contrario circula inicialmente a velocidad constante e igual a la V_{99} . Aunque los conductores de estos vehículos tan rápidos suelen estar más atentos (por lo que se reduce el tiempo de percepción y análisis) y sus vehículos son capaces de prestaciones de frenado más elevadas, queda del lado de la seguridad adoptar la V_{99} en lugar de V_{85} , puesto que no se deja desprotegidos⁽³⁾ más que a un 1 % de los vehículos, en lugar de a un 15 %.

Aunque el punto 3 del artículo 85 del RGC prescriba que el vehículo contrario no debería modificar su velocidad, se ha considerado⁽⁴⁾ que, una vez transcurrido un período t_c (s) de percepción y análisis por parte de su conductor,

¹ Que se ha considerado igual a la distancia de seguimiento.

² Recuérdese que la altura sobre el pavimento es igual en ambos casos: 1,20 m (apartado 5.2.1). En este caso, la visibilidad se refiere a que el vehículo adelantante esté en el carril contrario.

³ Frente al modelo adoptado.

⁴ Dado que se está partiendo de V_{99} y no de V_{85} .

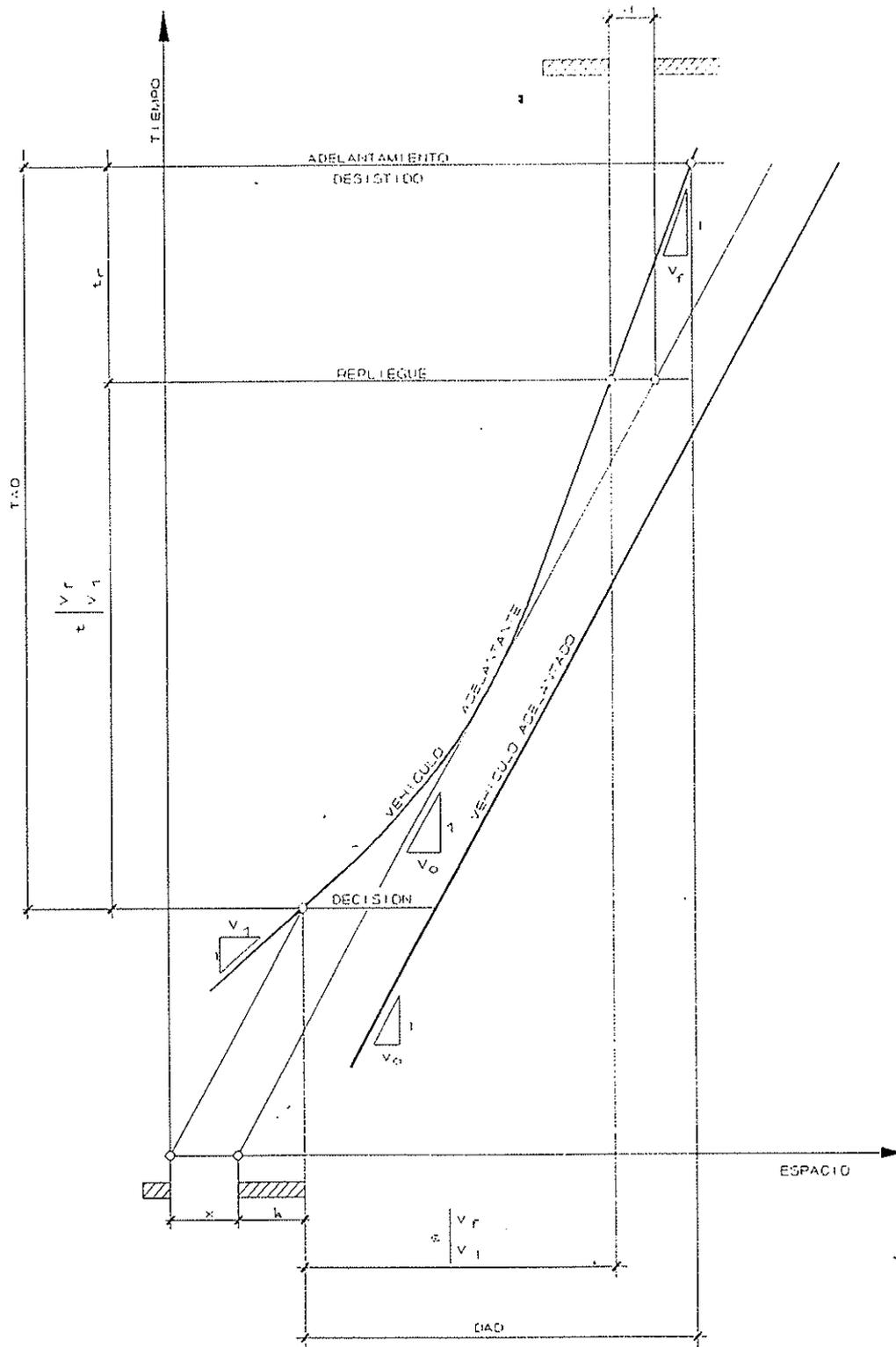


Fig. 23: Fase final de un adelantamiento desistido

decelera con una deceleración D_c [(km/h)/s] hasta alcanzar una velocidad V_{fc} (km/h).

6.3.3 Ecuaciones que rigen el movimiento de los vehículos.

6.3.3.1 Casos.

Los casos a considerar son, en general, cuatro:

- Adelantamiento lanzado completado
- Adelantamiento completado a partir del seguimiento
- Adelantamiento lanzado desistido
- Adelantamiento desistido a partir del seguimiento

6.3.3.2 Fase inicial.

- Adelantamiento lanzado.

En un adelantamiento lanzado, la velocidad V_1 del vehículo adelantante en el momento de decisión es

$$V_1 = V_{25}$$

Si, cuando el morro del vehículo adelantante se halla a una distancia x (m) de la trasera del vehículo adelantado (situación de decisión), siendo V_1 y V_0 las respectivas velocidades (en km/h), se aplica una deceleración D_a [(km/h)/s], los movimientos de ambos vehículos en un diagrama espacios - tiempos⁽¹⁾ están descritos, respectivamente, por las ecuaciones siguientes:

$$s = \frac{V_1}{3,6} * t - \frac{D_a}{7,2} * t^2$$

$$s = x + \frac{V_0}{3,6} * t$$

¹ s (m) y t (s), respectivamente.

Para que el morro del vehículo adelantante no llegue a rebasar la trasera del vehículo adelantado, situación a partir de la cual se ha definido la decisión de completar el adelantamiento o desistir de él, ha de ser

$$x \geq \frac{(V_1 - V_0)^2}{7,2 * D_a}$$

- A partir del seguimiento del vehículo adelantado.

A partir del seguimiento del vehículo adelantado, cuya velocidad es V_0 , la velocidad V_1 del vehículo adelantante en el momento de decisión está determinada:

- Por el modelo de aceleración empleado⁽¹⁾. Con la posible excepción⁽²⁾ de los tiempos únicamente rebajados por el 5 % de los vehículos y a partir de velocidades bajas, se puede adoptar un modelo cuadrático⁽³⁾ de aceleración media A [(km/h)/s], para el que sería

$$t \Big|_{V_0}^{V_1} = \frac{V_1 - V_0}{A}$$

$$s \Big|_{V_0}^{V_1} = \frac{V_1^2 - V_0^2}{7,2 * A}$$

¹ Apartado 3.5.

² Para la que se podría adoptar un modelo de máximas prestaciones.

³ Apartado 3.5.3.3.

siendo: - $s \Big|_{V_0}^{V_1}$ (m) la distancia recorrida por el vehículo que adelanta, desde la velocidad V_0 hasta la velocidad V_1 .

- $t \Big|_{V_0}^{V_1}$ (s) el tiempo transcurrido durante esa aceleración.

- Por la distancia relativa recorrida acelerando,

$$s \Big|_{V_0}^{V_1} - \frac{V_0}{3,6} * t \Big|_{V_0}^{V_1} = d - x$$

El razonamiento que define la distancia x de decisión es idéntico al del caso de un adelantamiento lanzado, pero con

$$V_1 = V_0 + \sqrt{\frac{7,2 * d}{\frac{1}{A} + \frac{1}{D_a}}}$$

resultando, con independencia de V_0 ,

$$x = \frac{d}{1 + \frac{D_a}{A}}$$

6.3.3.3 Fase final: adelantamiento completado.

- Planteamiento.

A partir del momento de decisión, y tanto si el adelantamiento es lanzado como si se parte de una situación de seguimiento del vehículo adelantado, el vehículo adelantante sigue un movimiento uniformemente acelerado, hasta que completa el adelantamiento al reintegrarse a su carril, a una distancia d por delante del vehículo adelantado.

El recorrido relativo en esta fase final del adelantamiento es igual a

$$S \left|_{V_1}^{V_f} - \frac{V_o}{3,6} * t \left|_{V_1}^{V_f} = x + l_A + d + l_a\right.$$

- siendo:
- $S \left|_{V_1}^{V_f}$ (m) la distancia recorrida al acelerar el vehículo adelantante, desde la velocidad V_1 hasta la velocidad V_f , ambas en km/h.
 - $t \left|_{V_1}^{V_f}$ (s) el tiempo transcurrido durante esa aceleración.
 - l_a (m) la longitud del vehículo adelantante.
 - l_A (m) la longitud del vehículo adelantado.
 - d (m) la separación entre los vehículos adelantado y adelantante al final de la maniobra.
 - x (m) la distancia de decisión⁽¹⁾.

Si, al igual que se hizo para la fase inicial, se admite un modelo cuadrático de aceleración, la velocidad final V_f está dada por

$$V_f = V_o + \sqrt{\left(1 + \frac{A}{D_a}\right) * (V_1 - V_o)^2 + 7,2 * A * (l_A + d + l_a)}$$

¹ Apartados 6.3.2.9 y 6.3.3.2.

y los tiempos invertidos y las distancias recorridas por el vehículo adelantante están dados por

$$t \Big|_{V_1}^{V_f} = \frac{V_f - V_1}{A}$$

$$s \Big|_{V_1}^{V_f} = \frac{V_f^2 - V_1^2}{7,2 * A}$$

- Distancia total recorrida durante un adelantamiento completado.

La distancia total DAC (m) recorrida por el vehículo adelantante durante toda la maniobra de adelantamiento: desde que se llega a la situación de decisión (adelantamiento lanzado) o se inicia el período de percepción y análisis (a partir del seguimiento), hasta que el adelantamiento se completa, vale:

Adelantamiento lanzado:

$$DAC = s \Big|_{V_1}^{V_f}$$

Adelantamiento a partir del seguimiento:

$$DAC = \frac{V_o}{3,6} * t_a + s \Big|_{V_o}^{V_1} + s \Big|_{V_1}^{V_f}$$

6.3.3.4 Fase final: adelantamiento desistido.

- Planteamiento.

A partir del momento de decisión, y tanto si el adelantamiento es lanzado como si se parte de una situación de seguimiento del vehículo adelantado, el vehículo adelantante sigue un movimiento uniformemente decelerado, hasta que se sitúa a una distancia d por detrás del vehículo adelantado.

El recorrido relativo en esta fase final del adelantamiento es igual a

$$s \left| \frac{V_f}{V_i} - \frac{V_o}{3,6} \right| * t \left| \frac{V_f}{V_i} \right| = x - d$$

- siendo:
- $s \left| \frac{V_f}{V_i} \right|$ (m) la distancia recorrida al decelerar el vehículo adelantante, desde la velocidad V_i hasta la velocidad V_f , ambas en km/h.
 - $t \left| \frac{V_f}{V_i} \right|$ (s) el tiempo transcurrido durante esa deceleración.
 - d (m) la separación entre los vehículos adelantado y adelantante al final de la maniobra.
 - x (m) la distancia de decisión¹⁾.

Si se admite un modelo de deceleración constante D_a [(km/h)/s], la velocidad final V_f está dada, en todo caso, por la ecuación

$$V_f = V_o - \sqrt{7,2 * D_a * d}$$

¹⁾ Apartados 6.3.2.9 y 6.3.3.2.

que limita D_a al valor

$$D_{a\text{máx}} = \frac{V_0^{*2}}{7,2 * d}$$

pues, de lo contrario, el vehículo adelantante se llegaría a detener durante el desistimiento.

Los tiempos invertidos y las distancias recorridas durante la deceleración por el vehículo adelantante están dados por

$$t \Big|_{V_1}^{V_f} = \frac{V_1 - V_f}{D_a}$$

$$s \Big|_{V_1}^{V_f} = \frac{V_1^2 - V_f^2}{7,2 * D_a}$$

- Tiempo total invertido, y distancia total recorrida durante el desistimiento.

Una vez situado a una distancia d tras el vehículo adelantante y a velocidad V_f , el vehículo adelantante se repliega a su carril, maniobra en la que invierte un tiempo t_r (s).

El tiempo total TAD (s) invertido en la maniobra de desistimiento, desde que se llega a la situación de decisión hasta que se termina el repliegue al carril propio, vale

$$TAD = t \Big|_{V_1}^{V_f} + t_r$$

La distancia total DAD (m) recorrida por el vehículo adelantante durante toda la maniobra de desistimiento vale:

$$DAD = \frac{V_f}{3,6} * t_r + s \left| \frac{V_f}{V_1} \right|$$

6.3.3.5 Movimiento del vehículo contrario.

- Planteamiento.

Ya se ha expuesto⁽¹⁾ que el vehículo contrario, una vez transcurrido un período t_c (s) de percepción y análisis por parte de su conductor, decelera con una deceleración D_c [(km/h)/s] hasta alcanzar una velocidad V_{fc} (km/h) al terminar el período $t \left| \frac{V_f}{V_1} \right|$ (si se trata de un adelantamiento completado), ó TAD (si se trata de un adelantamiento desistido).

Obviamente, si $t \left| \frac{V_f}{V_1} \right|$ ó TAD son inferiores á t_c , al vehículo contrario no le da tiempo a empezar a decelerar, y

$$V_{fc} = V_{99} \dots$$

En caso contrario, la velocidad V_{fc} está dada por las ecuaciones

Adelantamiento completado

$$V_{fc} = V_{99} - D_c * [t \left| \frac{V_f}{V_1} \right| - t_c]$$

¹ Apartado 6.3.2.12.

Adelantamiento desistido

$$V_{fc} = V_{99} - D_c * [t \frac{V_f}{V_1} - (t_c - t_r)]$$

Esto limita D_c al valor

Adelantamiento completado

$$D_{c\text{máx}} = \frac{V_{99}}{\frac{V_f - V_1}{A} - t_c}$$

Adelantamiento desistido

$$D_{c\text{máx}} = \frac{V_{99}}{\frac{V_1 - V_f}{D_a} - (t_c - t_r)}$$

pues, de lo contrario, el vehículo contrario se llegaría a detener durante su deceleración.

- Distancia recorrida por el vehículo contrario.

La distancia recorrida por el vehículo contrario durante la deceleración es

$$S \frac{V_{fc}}{V_{99}} = \frac{V_{99}^2 - V_{fc}^2}{7,2 * D_c}$$

y la distancia total es

$$D_c = \frac{V_{99}}{3,6} * t_c + s \left| \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right.$$

si $t \left| \frac{V_f}{V_1} \right. < t_c$, en cualquier caso se verificará:

$$V_{fc} = V_{99}$$

$$D_c = \frac{V_{99}}{3,6} * t \left| \frac{V_f}{V_1} \right.$$

$$s \left| \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right. = 0$$

6.3.3.6 Visibilidad.

Para que el vehículo contrario no colisione con el adelantante, tanto si éste completa el adelantamiento como si desiste de él, debe haber entre ambos una visibilidad mutua desde el instante de decisión: de manera que el vehículo contrario no deje de ver al adelantante, y pueda ajustar su velocidad para no cruzarse con él antes de que éste haya terminado su maniobra.

En el momento de decisión, esto equivale a

$$VN = DAC + D_c$$

para el adelantamiento completado, y a

$$VN = DAD + D_c$$

para el adelantamiento desistido.

Donde se disponga de una visibilidad inferior a VN para adelantamiento completado,

- o bien será necesario movilizar una aceleración superior,
- o bien sólo podrá completarse el adelantamiento cuando:
 - no haya vehículo contrario,
 - o éste se halle lejos⁽¹⁾,
 - o su velocidad sea reducida;
- o bien habrá que desistir del adelantamiento iniciado.

Donde se disponga de una visibilidad inferior a VN para adelantamiento desistido, sólo se podrá desistir cuando:

- no haya vehículo contrario,
- o éste se halle lejos⁽²⁾,
- o su velocidad sea reducida.

6.4 VALORES ADOPTADOS PARA LOS PARÁMETROS

6.4.1 Generalidades.

La adopción de un modelo, y de unos valores para los parámetros y variables que en él intervienen, constituye un **compromiso** mediante el cual se pretenden reproducir los complejos fenómenos que rodean el adelantamiento, y que son distintos en función del tiempo y del espacio, y de las numerosas circunstancias que se dan en la conducción.

En los apartados que siguen se exponen los valores que se han considerado más adecuados, aunque esta elección se pueda variar para analizar otros casos particulares.

¹ Distancia superior á $DAC + \frac{V_{99}}{3,6} * t \frac{V_r}{V_1}$

² Distancia inferior á DAD.

6.4.2 Longitud de vehículos.

Se han tomado $l_u = 5 \text{ m}$ y $l_A = 10 \text{ m}$.

6.4.3 Distancias entre vehículos.

Se ha tomado $d = 6 \text{ m}$.

6.4.4 Períodos de análisis y replieque.

Se han tomado $t_a = t_r = 3 \text{ s}$, y $t_r = 2,5 \text{ s}$.

6.4.5 Velocidad del vehículo adelantado.

La fracción α de la V_{85} empleada para definir la velocidad V_0 se ha tomado igual al 64 %.

6.4.6 Aceleración.

Estudios realizados en el Reino Unido⁽¹⁾ han demostrado que, en la práctica, el tiempo $t \left| \frac{V_f}{V_0} \right.$ que dura una maniobra de adelantamiento completado⁽²⁾ se distribuye según muestra la Fig. 23.

De esta distribución de tiempos de aceleración t (s) se puede deducir la distribución de las aceleraciones A [(km/h)/s] movilizadas durante un adelantamiento completado (tabla #6.1), a través de la ecuación

$$A = \frac{7,2 * (l_a + l_A + 2*d)}{t^2}$$

¹ Realizados por el Transport and Road Research Laboratory, sin publicar, y citados en la Departmental Advice Note TA 43/84 "Highway Link Design".

² Comprende la fase inicial (excepto el período de percepción y análisis) y la de completar el adelantamiento, es decir, toda la aceleración.

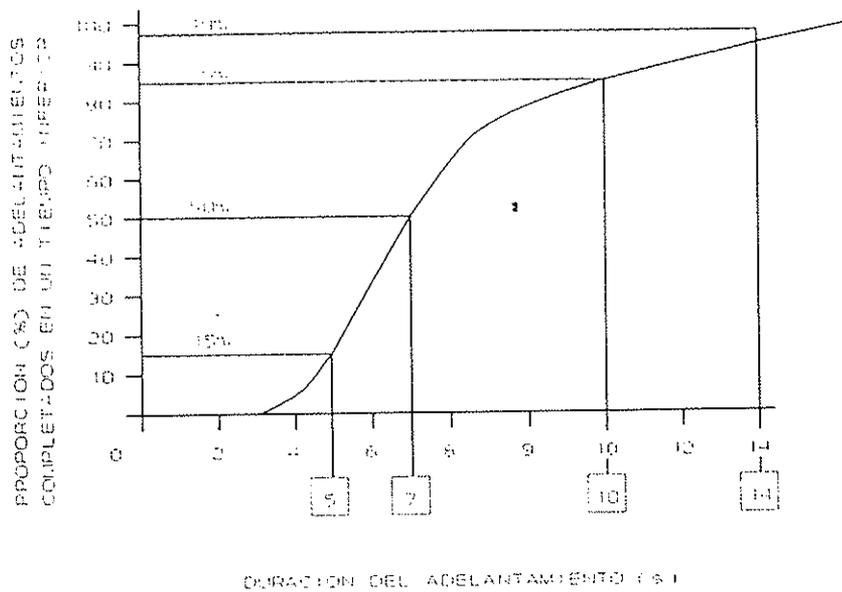


Fig. 25: Distribución de la duración de un adelantamiento completado

TABLA #6.1

DISTRIBUCION DE LA ACELERACION MOVILIZADA
EN UN ADELANTAMIENTO COMPLETADO
(recorrido relativo: 27 m)

Aceleración [(km/h)/s]	7,8	4,0	1,9	1,0
Proporción de vehículos que completan un adelantamiento movilizand una aceleración igual o superior	15	50	85	99

La distribución de la tabla #6.1 proporciona una indicación de cuáles son las aceleraciones movilizadas en adelantamientos completados, las cuales son un dato para la modelización. Como en otras ocasiones⁽¹⁾, es preciso establecer un compromiso sobre el fractil representativo de la distribución, en base al cual se deducen los demás parámetros del modelo: si se adopta un fractil muy bajo, se estará dando posibilidad de adelantar sólo a vehículos de mayores prestaciones y con conductores más diestros, en detrimento de la seguridad; si el fractil es muy alto, se estará perjudicando la fluidez de la circulación.

¹ Cf. apartado 3.1.3.

Se ha considerado razonable que la modelización del adelantamiento se refiera al percentil 85, es decir, a una aceleración de 1,9 (km/h)/s, correspondiente a que la maniobra de adelantamiento tiene una duración de 10 s⁽¹⁾; pero sin que esto constituya un estándar inamovible.

6.4.7 Deceleración.

Se ha considerado, tanto para D_u como para D_c , un máximo de 14 (km/h)/s, lo que equivale en llano a movilizar un rozamiento longitudinal del orden de 0,40. Este valor ofrece un cierto margen de seguridad respecto de la resistencia al deslizamiento longitudinal a velocidades elevadas, con neumático en buen estado y pavimento ligeramente mojado⁽²⁾, y es superior al correspondiente a una maniobra deliberada⁽³⁾ mediante una suave aplicación de los frenos.

En algunos casos se han considerados valores inferiores al máximo, para evitar la detención del vehículo que desiste del adelantamiento, o del vehículo contrario.

6.5 VALORES DE LOS PARÁMETROS Y VARIABLES

Para los valores de las velocidades que se han supuesto, y las aceleraciones y deceleraciones que se justifican en el apartado 6.4, las tablas siguientes indican los valores numéricos de las siguientes variables y parámetros_

Fase inicial

- Tabla #6.2: x y V_1
- Tabla 6.3⁽⁴⁾: $s |_{V_0}^{V_1}$ y $t |_{V_0}^{V_1}$

¹ Más los 3 s de percepción y análisis.

² Apartado 3.3.3.1.

³ Apartado 3.3.3.2.

⁴ Sólo para el caso del seguimiento.

Fase final (adelantamiento completado)

- Tabla #6.4: V_{f1} $S \left| \frac{V_1}{V_0} \right.$ Y $t \left| \frac{V_1}{V_0} \right.$
- Tabla #6.5: DAC.

Fase final (adelantamiento desistido)

- Tabla #6.6: V_{f1} $S \left| \frac{V_1}{V_0} \right.$ Y $t \left| \frac{V_1}{V_0} \right.$
- Tabla #6.7: TAD y DAD.

Vehículo contrario

- Tabla #6.8: V_{fc}
- Tabla #6.9: $S \left| \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right.$ Y D_c .

Visibilidad:

- Tabla #6.10: VN.

6.6 DEFINICIÓN DE ZONAS DE PREAVISO Y DE PROHIBICIÓN DEL ADELANTAMIENTO

6.6.1 Generalidades.

6.6.1.1 Zonas de pre-aviso.

La señalización prevista en el Reglamento general de circulación sólo se refiere a la prohibición del adelantamiento, mediante señales verticales y marcas viales longitudinales continuas, cuyo objeto es impedir que un vehículo circule por el carril reservado al sentido contrario de circulación.

TABLA #6.2

1
PARAMETROS RELACIONADOS
CON EL MOMENTO DE DECISION

A) Distancia x (m) del morro del vehículo adelantante a la trasera del vehículo adelantado

V_{85} (km/h)		ARCENES > 1,5 m						
		45	65	85	110			
		ARCENES < 1,5 m						
		35	50	65	90			
LANZADO		1,9	2,6	3,2	5,4	9,3	10,4	15,6
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, con aceleración [(km/h)/s]	7,8	2,4	2,1					
	4,0	1,5	1,3					
	1,9	0,8	0,7					
	1,0	0,5	0,4					

B) Velocidad V_1 (km/h) en el momento de decisión

V_{85} (km/h)		ARCENES > 1,5 m						
		45	65	85	110			
		ARCENES < 1,5 m						
		35	50	65	90			
LANZADO		35	45	50	65	85	90	110
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, con aceleración [(km/h)/s]	7,8	37	44	47	56	69	72	85
	4,0	34	40	44	53	66	69	82
	1,9	31	37	41	50	63	66	79
	1,0	29	35	38	48	61	64	77

TABLA #6.3

TIEMPOS Y DISTANCIAS EN LA FASE INICIAL
DE UN ADELANTAMIENTO A PARTIR DEL SEGUIMIENTO

V_{gs} (km/h)		ARCENES > 1,5 m							
		45	65	85	110				
V_o (km/h)		ARCENES < 1,5 m							
		35	50	65	90				
		22,4	28,8	32,0	41,6	54,4	57,6	70,4	
ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	$t_{\frac{v_1}{v_o}}$ (s)	1,8	1,9					
		$S_{\frac{v_1}{v_o}}$ (m)	15	19	21	26	32	34	41
	4,0	$t_{\frac{v_1}{v_o}}$ (s)	2,8	2,9					
		$S_{\frac{v_1}{v_o}}$ (m)	22	28	30	38	48	51	61
	1,9	$t_{\frac{v_1}{v_o}}$ (s)	4,4	4,5					
		$S_{\frac{v_1}{v_o}}$ (m)	33	41	45	57	73	77	93
	1,0	$t_{\frac{v_1}{v_o}}$ (s)	6,3	6,4					
		$S_{\frac{v_1}{v_o}}$ (m)	45	56	62	79	102	107	130

TABLA #6.4

PARAMETROS RELACIONADOS CON LA FASE FINAL
DE UN ADELANTAMIENTO COMPLETADO

A) Lanzado

V_{SS}		ARCENES > 1,5 m							
		45		65		85		110	
		ARCENES < 1,5 m							
		35	50	65	90				
ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	V_r (km/h)	61	69	73	87	106	111	131
		$t _{V_1}^{V_r}$ (s)	3,3	3,0	3,0	2,8	2,7	2,6	2,6
		$S _{V_1}^{V_r}$ (m)	43	48	50	59	70	74	88
	4,0	V_r (km/h)	51	59	64	78	97	102	122
		$t _{V_1}^{V_r}$ (s)	4,0	3,6	3,5	3,2	3,0	3,0	2,9
		$S _{V_1}^{V_r}$ (m)	48	53	55	63	75	79	93
	1,9	V_r (km/h)	44	53	58	72	91	96	116
		$t _{V_1}^{V_r}$ (s)	4,8	4,2	4,0	3,6	3,2	3,2	3,1
		$S _{V_1}^{V_r}$ (m)	53	57	60	68	79	82	97
	1,0	V_r (km/h)	40	50	54	69	88	93	113
		$t _{V_1}^{V_r}$ (s)	5,4	4,6	4,3	3,8	3,4	3,3	3,2
		$S _{V_1}^{V_r}$ (m)	56	60	63	70	81	85	99

(sigue TABLA #6.4)

PARAMETROS RELACIONADOS CON LA FASE FINAL DE UN ADELANTAMIENTO COMPLETADO

B) A partir del seguimiento

V ₈₅		ARCENES > 1,5 m							
		45		65	85				110
		ARCENES < 1,5 m							
		35		50	65			90	
ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	V _r (km/h)	61	68	71	81	94	97	110
		t _{v₁} ^{v_r} (s)	3,2	3,1					
		S _{v₁} ^{v_r} (m)	43	48	52	60	71	74	85
	4,0	V _r (km/h)	50	57	60	70	82	85	98
		t _{v₁} ^{v_r} (s)	4,1	4,1					
		S _{v₁} ^{v_r} (m)	48	55	59	70	85	88	103
	1,9	V _r (km/h)	42	48	51	61	74	77	90
		t _{v₁} ^{v_r} (s)	5,7	5,7					
		S _{v₁} ^{v_r} (m)	57	67	72	87	107	113	133
	1,0	V _r (km/h)	36	43	46	56	68	72	84
		t _{v₁} ^{v_r} (s)	7,6	7,6					
		S _{v₁} ^{v_r} (m)	69	82	89	109	136	143	170

TABLA #6.5

DISTANCIAS DAC (m) DE ADELANTAMIENTO COMPLETADO

A) Lanzado

V_{85} (km/h)		ARCENES > 1,5 m							
		45	65	85	110				
		ARCENES < 1,5 m							
		35	50	65	90				
ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	43	48	50	59	71	74	88	
	4,0	48	53	55	63	75	79	93	
	1,9	53	57	60	67	79	82	97	
	1,0	56	60	63	70	81	85	99	

B) A partir del seguimiento

V_{85} (km/h)		ARCENES > 1,5 m							
		45	65	85	110				
		ARCENES < 1,5 m							
		35	50	65	90				
ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	77	92	99	120	149	156	184	
	4,0	89	107	116	143	178	187	223	
	1,9	109	132	144	179	226	237	284	
	1,0	132	163	178	223	283	299	359	

TABLA #6.6

PARAMETROS RELACIONADOS CON LA FASE FINAL
DE UN ADELANTAMIENTO DESISTIDO

V_{RS} (km/h)		ARCENES > 1,5 m							
		45	65	85	110				
V_r (km/h)		ARCENES < 1,5 m							
		35	50	65	90				
V_r (km/h)		0	4	7	17	30	33	46	
ADELANTAMIENTO LANZADO									
$t \frac{V_r}{V_1}$ (s)		3,0	2,9	3,0	3,4	3,9	4,1	4,6	
$S \frac{V_r}{V_1}$ (m)		15	20	24	39	63	70	99	
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, CON ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	$t \frac{V_r}{V_1}$ (s)	3,2	2,8					
		$S \frac{V_r}{V_1}$ (m)	16	19	21	29	39	41	51
	4,0	$t \frac{V_r}{V_1}$ (s)	2,9	2,6					
		$S \frac{V_r}{V_1}$ (m)	14	16	18	25	34	37	46
	1,9	$t \frac{V_r}{V_1}$ (s)	2,7	2,4					
		$S \frac{V_r}{V_1}$ (m)	11	14	16	22	30	33	41
	1,0	$t \frac{V_r}{V_1}$ (s)	2,5	2,2					
		$S \frac{V_r}{V_1}$ (m)	10	12	14	20	28	30	38

TABLA #6.7

A) TIEMPO TAD (s) DE ADELANTAMIENTO DESISTIDO

V_{85} (km/h)		ARCENES > 1,5 m						
		45		65		85		110
		ARCENES < 1,5						
LANZADO		3,5		50	65		90	
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, CON ACELERACION [(km/h)/s]		7,8	5,6	5,3				
		4,0	5,4	5,1				
		1,9	5,2	4,9				
		1,0	5,0	4,7				

B) DISTANCIA DAD (m) DE ADELANTAMIENTO DESISTIDO

V_0 (km/h)		ARCENES > 1,5 m							
		45		65		85		110	
		ARCENES < 1,5 m							
LANZADO		35		50	65		90		
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, CON ACELERACION [(km/h)/s]		15	23	29	51	84	92	131	
		7,8	16	22	26	40	59	64	83
		4,0	14	19	23	37	55	60	78
		1,9	11	17	21	34	51	55	73
		1,0	10	15	19	32	48	53	69

TABLA #6.8

VELOCIDAD FINAL V_{fc} (km/h) DEL VEHICULO CONTRARIO

A) Adelantamiento completado

V_0 (km/h)		ARCENES > 1,5 m						
		45		65	85		110	
		ARCENES < 1,5 m						
		35		50	65		90	
V_{99} (km/h)		46	60	66	86	113	120	146
LANZADO, CON ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	42	60	66	86	113	120	146
	4,0	32	51	59	83	113	120	146
	1,9	21	43	52	78	110	117	145
	1,0	13	38	47	75	108	116	143
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, CON ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	44	58	64	84	111	118	144
	4,0	31	44	50	70	97	104	130
	1,9	8	22	29	49	76	83	109
	1,0	0	0	1	21	48	55	81

B) Adelantamiento desistido

V_0 (km/h)		ARCENES > 1,5 m						
		45		65	85		110	
		ARCENES < 1,5 m						
		35		50	56		90	
V_{99} (km/h)		46	60	66	86	113	120	146
LANZADO		11	26	30	45	65	70	89
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, CON ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	9	28	34	54	81	88	114
	4,0	12	31	37	57	84	91	117
	1,9	16	34	40	60	87	94	120
	1,0	18	36	42	62	89	96	122

TABLA #6.9

PARAMETROS RELACIONADOS CON EL MOVIMIENTO
DEL VEHICULO CONTRARIO

A) Adelantamiento completado

V_{ss} (km/h)			ARCENES > 1,5 m							
			45		65		85		110	
			ARCENES < 1,5 m							
			35	50		65	90			
ADELANTAMIENTO LANZADO, CON ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	$S \left \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right. (m)$	3	1	0					
		$D_c (m)$	42	51	54	66	84	88	107	
	4,0	$S \left \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right. (m)$	11	10	9	5	0			
		$D_c (m)$	49	60	64	76	94	98	118	
	1,9	$S \left \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right. (m)$	17	17	16	13	7	6	4	
		$D_c (m)$	55	67	71	84	101	106	125	
	1,0	$S \left \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right. (m)$	19	22	21	17	12	10	8	
		$D_c (m)$	58	72	76	89	106	110	129	
	A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, CON ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	$S \left \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right. (m)$	2	2	3	3	5	5	6
			$D_c (m)$	40	52	58	75	99	105	128
		4,0	$S \left \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right. (m)$	12	16	18	24	32	35	43
			$D_c (m)$	50	66	73	96	127	135	164
1,9		$S \left \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right. (m)$	20	31	35	50	70	75	94	
		$D_c (m)$	59	81	90	122	164	175	216	
1,0		$S \left \frac{V_{fc}}{V_{99}} \right. (m)$	30	38	43	69	103	112	146	
		$D_c (m)$	68	88	98	140	198	212	267	

(sigue TABLA #6.9)

PARAMETROS RELACIONADOS CON EL MOVIMIENTO
DEL VEHICULO CONTRARIO

B) Adelantamiento desistido

V_{SS} (km/h)			ARCENES > 1,5 m						
			45	65	85	110			
			ARCENES < 1,5 m						
			35	50	65	90			
ADELANTAMIENTO LANZADO									
$S \frac{V_{rc}}{V_{99}}$ (m)			20	29	34	53	85	94	133
D_c (m)			58	79	89	125	179	194	255
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, CON ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	$S \frac{V_{rc}}{V_{99}}$ (m)	20	28	32	45	62	67	83
		D_c (m)	59	78	87	116	156	167	205
	4,0	$S \frac{V_{rc}}{V_{99}}$ (m)	19	26	30	41	57	61	76
		D_c (m)	58	76	85	113	151	161	198
	1,9	$S \frac{V_{rc}}{V_{99}}$ (m)	18	24	27	38	52	55	69
		D_c (m)	57	74	82	109	146	155	191
	1,0	$S \frac{V_{rc}}{V_{99}}$ (m)	18	23	26	35	48	51	64
		D_c (m)	56	73	81	107	142	151	185

TABLA #6.10

VISIBILIDAD VN (m) MINIMA EN EL MOMENTO DE DECISION

A) Adelantamiento completado

V _o (km/h)		ARCENES > 1,5 m						
		45	65	85	110			
		ARCENES < 1,5 m						
		35	50	65	90			
LANZADO, CON ACELERACION [(km/h)/s]	7,8	85	98	105	125	154	162	195
	4,0	97	112	119	140	169	177	211
	1,9	108	125	131	152	181	189	222
	1,0	114	132	139	159	187	195	228
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, CON ACCELERACION [(km/h)/s]	7,8	84	101	109	135	170	179	212
	4,0	99	122	132	166	211	223	267
	1,9	116	148	162	209	272	288	349
	1,0	137	171	187	250	334	356	438

B) Adelantamiento desistido

V _o (km/h)		ARCENES > 1,5 m						
		45	65	85	110			
		ARCENES < 1,5 m						
		35	50	65	90			
LANZADO		73	102	118	176	263	287	386
A PARTIR DEL SEGUIMIENTO, CON ACCELERACION [(km/h)/s]	7,8	75	100	113	157	215	231	288
	4,0	71	95	108	150	206	221	275
	1,9	68	91	103	143	197	211	263
	1,0	66	88	100	139	191	204	255

Sin embargo, ya desde la Orden circular 8.2-IC "Marcas viales" (1962), y aún más por la Norma 8.2-IC "Marcas viales" (1987), se definen unas marcas viales⁽¹⁾ destinadas a anunciar la proximidad de una prohibición del adelantamiento: marcas longitudinales discontinuas de mayor longitud y menor vano y, sobre todo, flechas de retorno.

Se puede, así, matizar la prohibición sin contravenir el Reglamento general de circulación, definiendo una zona de pre-aviso, en la que el comportamiento de los conductores no está regulado explícitamente. Sin embargo, la experiencia demuestra que la lectura que los conductores hacen de este pre-aviso es del siguiente tenor:

"... se acerca una zona de visibilidad restringida, como consecuencia de la cual el adelantamiento va a estar prohibido, mis posibilidades relacionadas con él se van a ver coartadas, y alguna maniobra puede ser crítica..."

Las consecuencias son también dobles:

- Se completan los adelantamientos iniciados con anterioridad.
- No se inician adelantamientos nuevos⁽²⁾, sobre todo a partir del seguimiento del vehículo adelantado.

6.6.1.2 Prohibición del adelantamiento.

También es importante destacar la diferencia entre la situación al principio y al final de la zona de prohibición del adelantamiento:

- Si se relaciona el principio de una prohibición del adelantamiento con la sección en que se deja de disponer de una visibilidad⁽³⁾ suficiente para efectuar una cierta maniobra, es evidente que la prohibición no puede empezar en esa misma sección determinante; sino que, antes de llegar a la prohibición, debe haber espacio suficiente para efectuar esa maniobra sin transgredirla.

¹ Marcas longitudinales discontinuas M-1.9 y M-1.10, y flechas de retorno M-5.5.

² A no ser que las condiciones sean excepcionalmente favorables como, por ejemplo, adelantar a un vehículo muy lento.

³ Definida... ¡en el momento de decisión!

- Al final de una prohibición del adelantamiento, la situación más crítica corresponde al seguimiento del vehículo adelantado (es imposible, salvo una poca frecuente transgresión de la prohibición, la situación de adelantamiento lanzado).

6.6.1.3 Criterios para la definición de zonas de pre-aviso y de prohibición del adelantamiento.

Hay que recordar que cualquier criterio de definición de las zonas de preaviso o prohibición supone no sólo la aceptación de unas hipótesis⁽¹⁾, sino también un compromiso entre capacidad y seguridad.

En la modelización descrita en los apartados 6.3 á 6.5, se han considerado dos parejas de circunstancias posibles en relación con el conductor del vehículo adelantante:

- Su llegada a la posición de decisión a partir del seguimiento del vehículo adelantado, o bien lanzado desde más atrás, a una velocidad superior (modo de iniciación del adelantamiento).
- Su decisión de completar el adelantamiento, o de desistir de él (tipo de maniobra).

Una definición segura del principio de la zona de pre-aviso, o de la de prohibición del adelantamiento⁽²⁾, debe permitir que el conductor del vehículo adelantante pueda realizar cualquiera de los dos tipos maniobra (completar o desistir) a partir de cualquier modo de iniciación (seguimiento o lanzado), sin que precise conocer cuál de los cuatro casos (que resultan de combinar los dos modos de iniciación con los dos tipos de maniobra) es el crítico.

¹ Como, por ejemplo, la longitud de los vehículos, la distancia entre ellos al principio o final de la maniobra, las velocidades iniciales, el fractil de la distribución de aceleraciones y, en definitiva, la modelización descrita.

² La situación crítica correspondiente al final de la prohibición, como se ha visto, está más determinada: sólo se puede partir del seguimiento del vehículo adelantado.

6.6.2 Principio de zona de pre-aviso.

Teniendo en cuenta los principios establecidos en el apartado 6.6.1, el principio de una zona de pre-aviso se debe situar de manera que, si justamente en él se hubiera llegado al momento de decisión⁽¹⁾, a partir de cualquier modo de iniciación (lanzado o desde el seguimiento), se pueda ejecutar cualquier tipo de maniobra (completar el adelantamiento o desistir de él) sin infringir la prohibición inmediata. Esto equivale a tomar como longitud del pre-aviso a la mayor de las cuatro distancias siguientes:

- $s \left| \frac{V_f}{V_1} \right|$ en adelantamiento completado a partir del seguimiento del vehículo adelantado
- DAD en adelantamiento desistido a partir del seguimiento del vehículo adelantado
- $s \left| \frac{V_f}{V_{85}} \right|$ en adelantamiento lanzado completado
- DAD en adelantamiento lanzado desistido

Esto significa que el principio de la zona de pre-aviso se sitúa a una distancia D_1 (tabla #6.11) antes del principio de la prohibición. Más allá del principio de la zona de preaviso sólo se podrán realizar maniobras no críticas.

¹ Apartado 6.3.2.9.

TABLA #6.11

LONGITUD MINIMA D_i DE LA ZONA DE PREAVISO
(fractil 85 % de la distribución
de aceleraciones movilizadas)

V_{85} (km/h)	ARCENES > 1,5 m						
	45		65	85		110	
D_i (m)	ARCENES < 1,5 m						
	35		50	65		90	
	57	67	72	87	108	113	133

6.6.3 Final de la zona de preaviso y principio de una zona de prohibición.

La situación más crítica al principio de la zona de prohibición corresponde al cruce entre el vehículo adelantante y el vehículo contrario. Para que se dé esta circunstancia, en cualquiera de los cuatro casos considerados en el apartado 6.6.1.3 es preciso que, en el momento de la decisión, la visibilidad mutua VN_i sea igual a la suma de las distancias $EM_i^{(1)}$ y $D_{c_i}^{(2)}$ en el caso i considerado:

$$VN_i = EM_i + D_{c_i}$$

Si, en un diagrama que relaciones la posición longitudinal en la carretera con la visibilidad disponible VD , se determina la sección en que $VD = VN_i$ (sección determinante)

- Ésta sección será la última en que se podrá tomar una decisión para terminar la maniobra con seguridad.
- El cruce de los dos vehículos (adelantante y contrario) tendrá lugar en la sección que diste EM_i de la determinante.

¹ Distancia necesaria para que el vehículo adelantante termine su maniobra, sea cual fuere el tipo de ésta.

² Recorrido del vehículo contrario.

- El vehículo contrario estará situado, en el momento de decisión, en la sección que diste D_{c_i} de la anterior (la del cruce).

Una vez considerados los cuatro casos i , aquél que proporcione la posición más adelantada del principio de la prohibición, será el crítico que determinará dicha posición.

Se ha observado, no obstante, que en la práctica las cuatro secciones definidas para la situación del vehículo contrario en los cuatro casos posibles, se hallan próximas entre sí, para los gráficos de VD habituales. Esto lleva a predecir, sin tener que realizar la construcción antes descrita, cuál de los cuatro casos es el crítico: aquél al que corresponda una D_{c_i} mayor.

En la tabla #6.12 se comparan los valores de D_{c_i} correspondientes a los cuatro casos posibles.

TABLA #6.12

RECORRIDO D_{c_i} (m) DEL VEHICULO CONTRARIO
 (fractil 85 % de la distribución
 de aceleraciones movilizadas)

V_{85} (km/h)	ARCENES > 1,5 m						
	45		65		85		110
	ARCENES < 1,5 m						
	35	50	65	90			
Seguimiento, completado	59	81	90	121	164	175	191
Seguimiento, desistido	57	74	82	109	146	155	191
Lanzado, completado	55	67	71	84	102	106	125
Lanzado, desistido	58	79	89	125	179	194	255

A los valores máximos de D_{c_i} de la tabla #6.12 corresponden las visibilidades VN_i de la tabla #6.13 en la sección determinante, y las distancias EM_i de la tabla #6.14, entre dicha sección y el principio de la prohibición del adelantamiento.

$V_{85} = 35 \text{ km/h}$

i	VN_i	d_i	d_{ci}
①	116	57	59
②	68	11	57
③	108	53	55
④	73	15	58

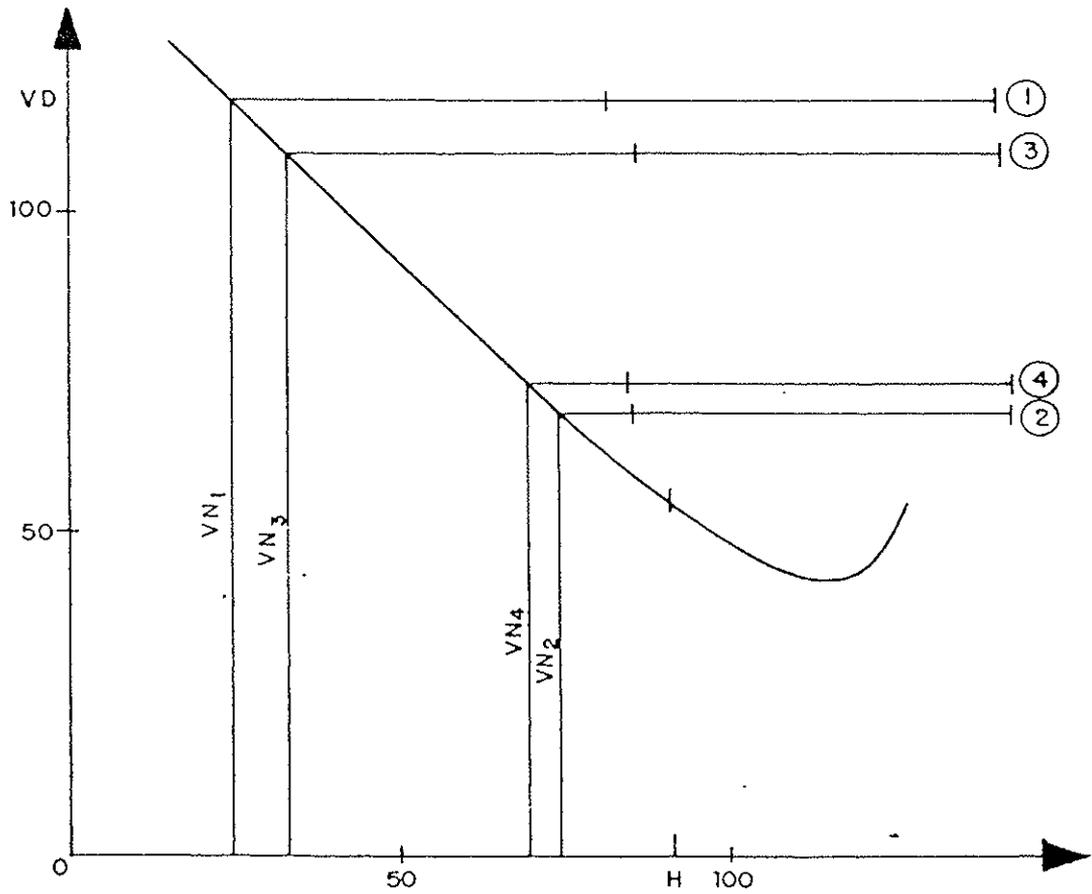
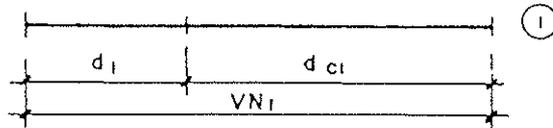
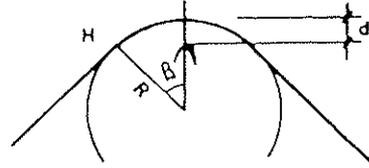


Fig. 26 Curva con obstáculo limitador de la visibilidad ($R = 45 \text{ m}$, $d = 5 \text{ m}$) [Fuente: Unidad de carreteras de Alicante]

$V_{85} = 65 \text{ km/h}$

i	VN_i	d_i	d_{cl}
①	209	87	122
②	143	34	109
③	151	67	84
④	176	51	125

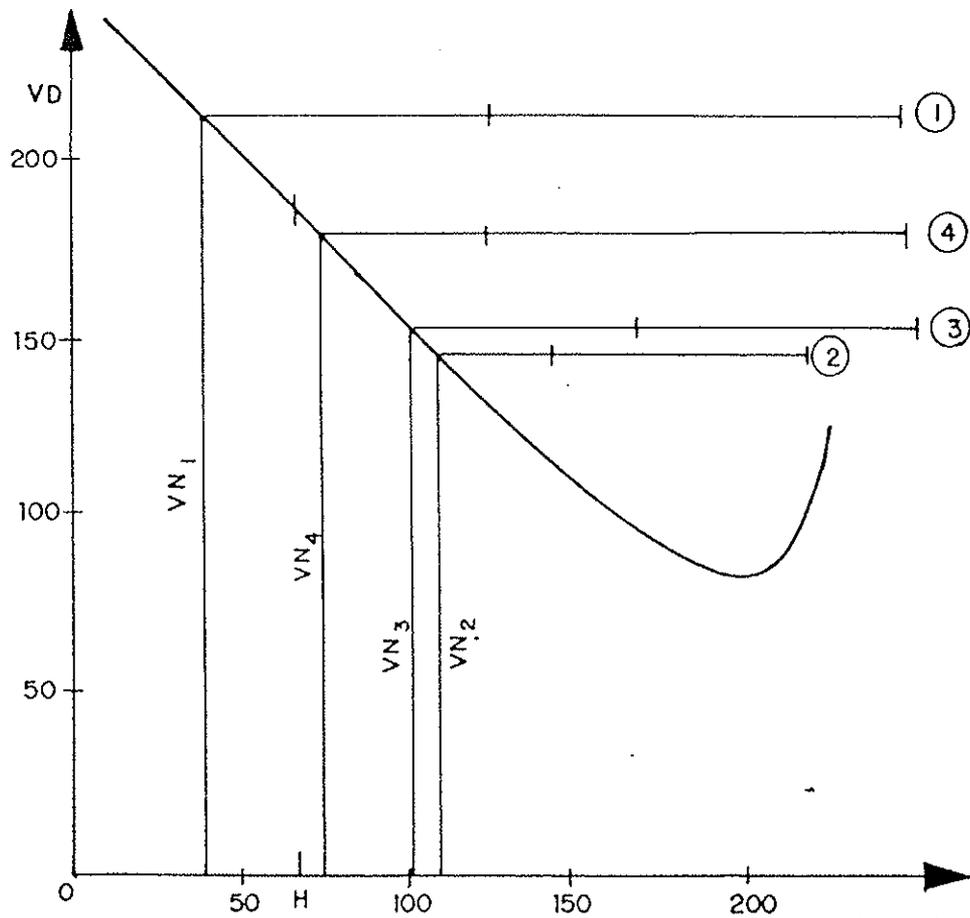
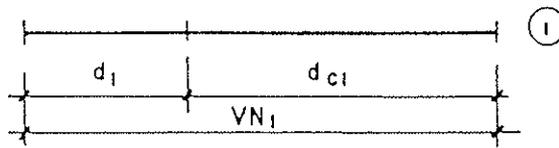
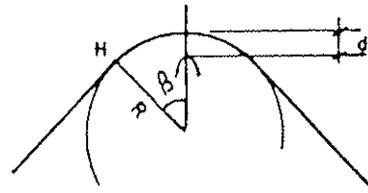


Fig. 27 Curva con obstáculo limitador de la visibilidad ($R = 175 \text{ m}$, $d = 5 \text{ m}$) [Fuente: Unidad de carreteras de Alicante]

$V_{85} = 65 \text{ km/h}$

i	VN_i	d_i	d_{cl}
①	209	87	122
②	143	34	109
③	151	67	84
④	176	51	125

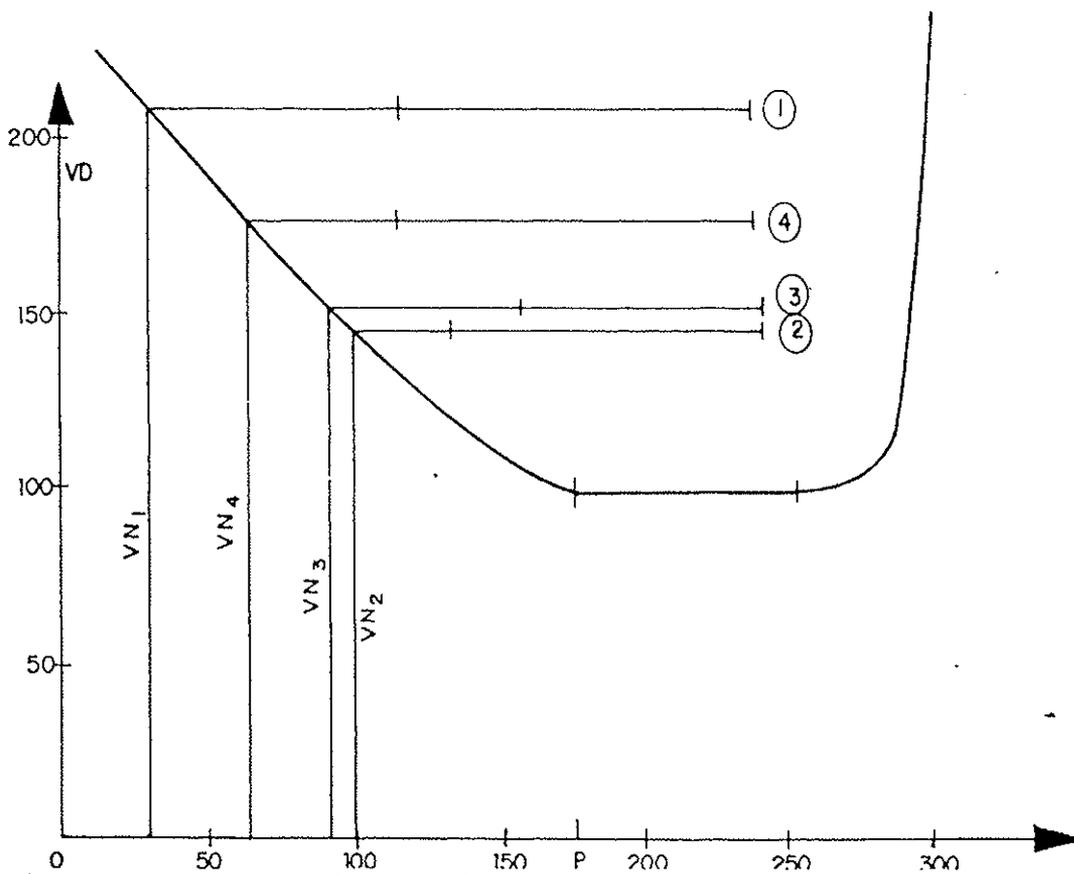
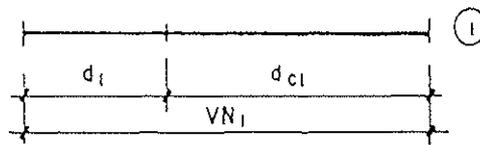
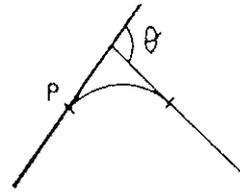


Fig. 28 Acuerdo vertical convexo ($K_v = 1\ 000 \text{ m}$) [Fuente: Unidad de carreteras de Alicante]

$V_{85} = 110 \text{ km/h}$

i	VN_i	d_i	d_{ci}
①	349	133	216
②	264	73	191
③	222	97	125
④	386	131	255

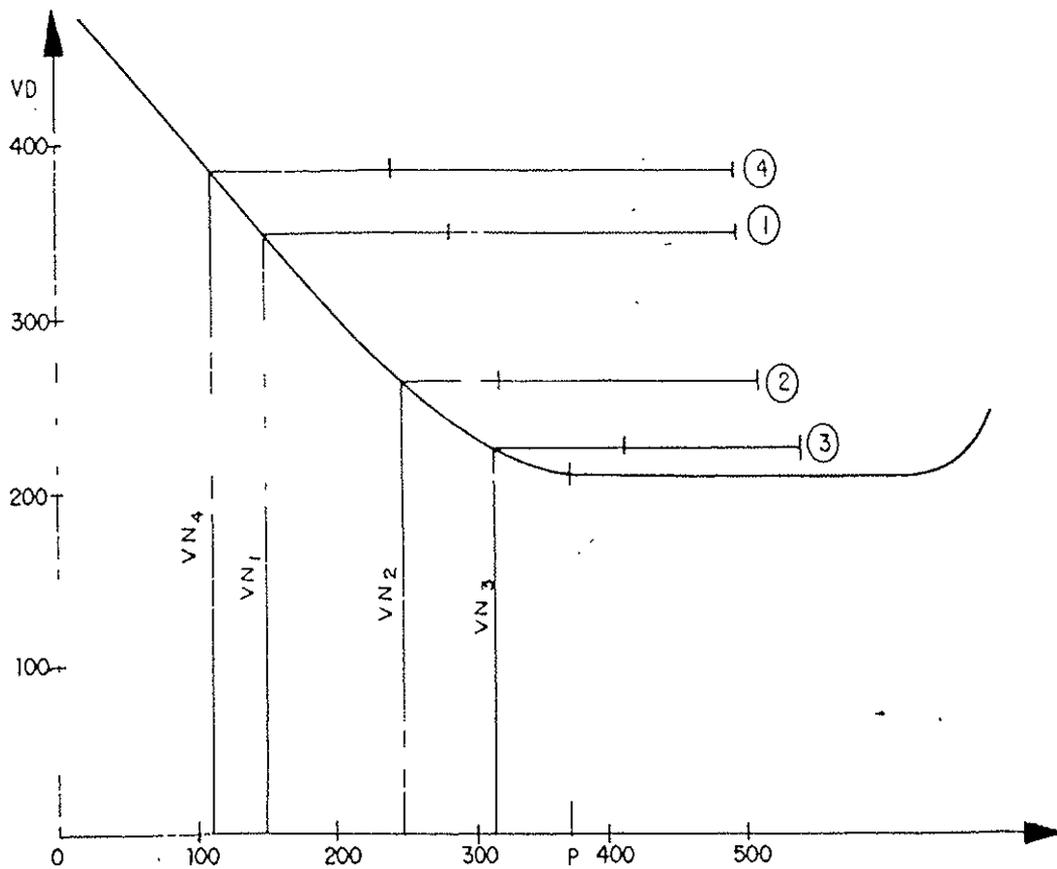
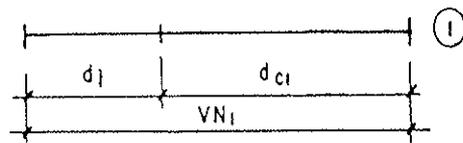
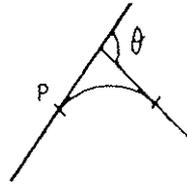


Fig. 29 Acuerdo vertical convexo ($K_v = 4\ 500 \text{ m}$) [Fuente: Unidad de carreteras de Alicante]

TABLA #6.13

VISIBILIDAD (m) DETERMINANTE VNC_1
 PARA EL PRINCIPIO DE LA PROHIBICION DEL ADELANTAMIENTO

V_{85} (km/h)	ARCENES > 1,5 m						
	45		65	85		110	
V_{85} (km/h)	ARCENES < 1,5 m						
	35		50	65		90	
VN_1 (m)	116	148	162	176	263	287	386

TABLA #6.14

DISTANCIA (m) $EM_1 = D_2$
 DEL PRINCIPIO DE LA PROHIBICION DEL ADELANTAMIENTO
 A LA SECCION DETERMINANTE DE LA MISMA

V_{85} (km/h)	ARCENES > 1,5 m						
	45		65	85		110	
V_{85} (km/h)	ARCENES < 1,5 m						
	35		50	65		90	
D_2 (m)	57	67	72	51	84	92	131

Si se admite⁽¹⁾ que la visibilidad disminuye linealmente a medida que se avanza, la visibilidad mínima en el principio de la prohibición del adelantamiento es aproximadamente igual a la D_{c_i} dada por la tabla #6.12.

¹ Lo que no siempre es correcto.

Además de la limitación de la visibilidad debida a las características del trazado, es preciso tener en cuenta otras causas de prohibición del adelantamiento:

- Las pérdidas de visibilidad en curvas a la derecha, causadas por la presencia del vehículo adelantado. Se puede considerar la visibilidad queda limitada a partir de la tangente de entrada de la curva, si ésta es de radio mediano⁽¹⁾ y, por lo tanto, la prohibición del adelantamiento empieza en dicha tangente.
- La presencia de isletas divisorias o de la entrada a una glorieta. La prohibición del adelantamiento se debe iniciar antes de la nariz de la isleta divisoria, o de la marca vial transversal de la entrada a la glorieta.

6.6.4 Final de la zona de prohibición.

Al finalizar una zona de prohibición del adelantamiento, dando paso a una zona de adelantamiento permitido, se puede suponer que el conductor del vehículo adelantante iniciará la maniobra en ese mismo final, forzosamente a partir de la posición de seguimiento del vehículo adelantado. Para que pueda empezar un adelantamiento, en ese momento inicial debe disponer de una visibilidad suficiente para las siguientes maniobras:

- Desistir del adelantamiento, en presencia de un vehículo contrario.
- Completar el adelantamiento, en presencia de un vehículo contrario.

En ambos casos, esa visibilidad es igual a la suma de la visibilidad necesaria en el momento de decisión⁽²⁾, y de la distancia recorrida desde la posición de seguimiento hasta dicho momento de decisión, dada por

$$D_3 = \frac{V_o}{1,2} + s \left| \frac{V_1}{V_o} \right| = DAC - s \left| \frac{V_f}{V_1} \right|$$

¹ Apartado 5.2.2.2.b).

² Apartado 6.3.2.9.

En la tabla #6.15 se indican las visibilidades V_{N_2} más desfavorables.

TABLA #6.15

VISIBILIDAD (m) MINIMA V_{N_2} DETERMINANTE DEL FINAL DE UNA PROHIBICION DEL ADELANTAMIENTO (fractil 85 % de la distribución de aceleraciones movilizadas)

V_{85} (km/h)	ARCENES > 1,5 m						
	45		65	85		110	
V_{N_2} (m)	ARCENES < 1,5 m						
	35		50	65		90	
	167	213	234	301	390	413	500

Aquí también se deben tener en cuenta las limitaciones de visibilidad en curvas a la derecha de radio intermedio:

- Teniendo en cuenta que la visibilidad termina en la tangente de entrada.
- No terminando una zona de prohibición antes de la tangente de salida.

6.6.5 Distancia mínima entre dos prohibiciones consecutivas.

Si la distancia D_3 (tabla #6.16) entre el final de una prohibición del adelantamiento y el inicio de la siguiente es inferior a la DAC necesaria para iniciar y completar el adelantamiento a partir del seguimiento (tabla #6.5), ambas prohibiciones deben unirse: pues un vehículo que iniciara un adelantamiento justamente al final de la primera prohibición no dispondría de distancia suficiente para completarlo antes de alcanzar el principio de la segunda.

TABLA #6.16

DISTANCIA MINIMA D_3 ENTRE DOS PROHIBICIONES CONSECUTIVAS
(fractil 85 % de la distribución
de aceleraciones movilizadas)

V_{85} (km/h)	ARCENES > 1,5 m						
	45	65	85	110			
D_3 (m)	ARCENES < 1,5 m						
	35	50	65	90			
	109	132	144	179	226	237	284

Aquí también se deben tener en cuenta las prohibiciones del adelantamiento causadas por la presencia de isletas divisorias o marcas viales transversales de acceso a glorietas.

6.6.6 Resumen.

En la Fig. 30 se contiene un resumen de las distancias y visibilidades mencionadas en este apartado 6.6.

6.6.7 Ejemplo.

A título de ejemplo de aplicación de la definición preconizada para las zonas de preaviso y de prohibición del adelantamiento mencionadas en este apartado 6.6, se presenta (Fig. 31) el siguiente caso:

En una carretera de calzada única de dos carriles y arcones de 2,50 m, explotada en doble sentido de circulación, y situada en una zona en que las circunstancias son favorables (alineación recta, terreno ligeramente ondulado), podemos suponer que $V_{85} = 110$ km/h.

Se aproxima ahora una zona de visibilidad restringida que, para no complicar el ejemplo, vamos a atribuir exclusivamente al alzado; y determinamos la sección A donde la visibilidad disponible es exactamente igual á $VN_1 = 386$ m⁽¹⁾.

¹ Tabla #6.13.

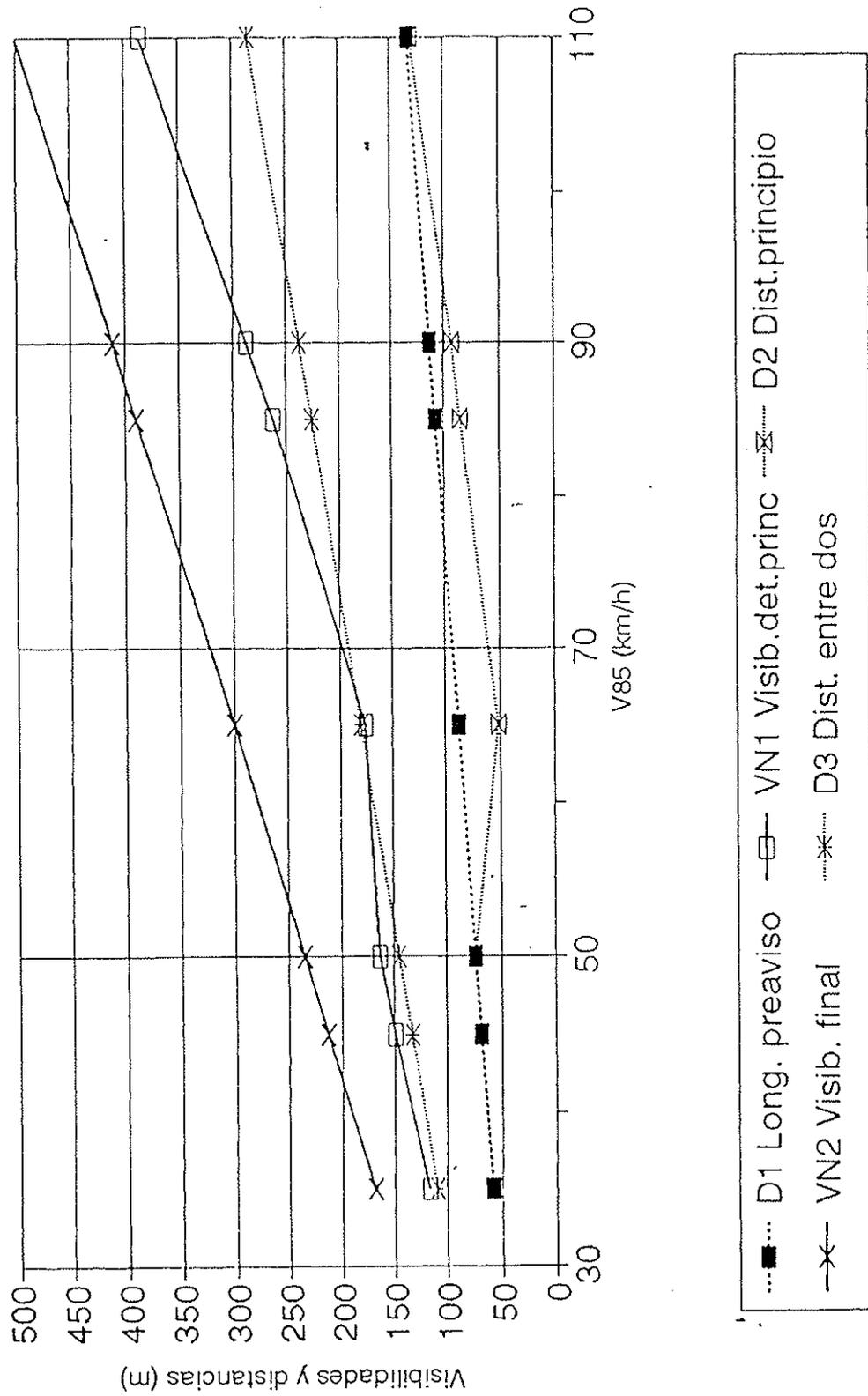


Fig. 30 Adelantamiento: visibilidades y distancias

La prohibición del adelantamiento debe empezar en la sección situada a $D_2 = 131 \text{ m}^{(1)}$ más allá de $A^{(2)}$; y la zona de pre-aviso debe empezar $D_1 = 133^{(3)}$ antes, o sea en la sección situada 2 m antes de A (es decir, aproximadamente en A).

Vamos a suponer ahora que, mientras se circula por el tramo en que el adelantamiento está prohibido, las circunstancias exteriores han dejado de ser tan favorables, por lo que se puede admitir que $V_{85} = 85 \text{ km/h}$, lo que representa un **escalón menos** en la serie estándar de velocidades de proyecto⁽⁴⁾. La prohibición se puede finalizar en la primera sección donde concurren simultáneamente estas dos circunstancias:

- La planta es recta, o curvada a la izquierda, o curvada a la derecha pero con radios por fuera de los límites de la tabla #5.1.
- La visibilidad no es inferior a $VN_2 = 390 \text{ m}^{(5)}$.

Si la siguiente prohibición del adelantamiento, independientemente considerada, quedara a menos de $D_3 = 226 \text{ m}^{(6)}$ del final de la primera, esta última no se levantaría, sino que se uniría a la segunda.

¹ Tabla #6.14.

² En la que la visibilidad puede ser, aproximadamente, igual a $\Delta_i = 255 \text{ m}$ (tabla #6.12 para la situación más desfavorable, en este caso desistir de adelantamiento lanzado); aunque esto representa una aproximación que debe ser comprobada.

³ Tabla #6.11.

⁴ Apartados 3.1.2.2. y 4.2.2.

⁵ Tabla #6.15.

⁶ Tabla #6.16, y siempre que la V_{85} se mantenga en 85 km/h.

ANEXO #1 - MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD

INDICE

1	<u>INTRODUCCIÓN</u>	161
2	<u>CAUSAS DE VARIABILIDAD DE LAS VELOCIDADES MEDIDAS</u>	162
3	<u>MONTAJE Y EMPLEO DE DISPOSITIVOS DE MEDIDA</u>	162
3.1	GENERALIDADES	162
3.2	APARATOS DE RADAR	163
3.2.1	<u>Emplazamiento.</u>	163
3.2.2	<u>Manejo.</u>	163
3.2.3	<u>Medidas.</u>	164
3.3	DETECTORES	165
4	<u>COMPROBACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS</u>	165
4.1	COMPROBACIÓN	165
4.2	ANÁLISIS	166

ANEXO #1

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD

1 INTRODUCCIÓN

Los aparatos de radar y los bucles de aforo miden la velocidad instantánea de los vehículos en un carril de una sección. Por el contrario, la velocidad media de los vehículos en un tramo de cierta longitud se puede medir por el método del "coche flotante"⁽¹⁾ o registrando los instantes de paso y las matrículas, tanto al principio como al final del tramo, y hallando los tiempos de recorrido correspondiente a cada una.

La definición de V_{85} se refiere casi siempre a condiciones de libre circulación⁽²⁾, en las que los conductores no se ven coartados, por la proximidad de otros vehículos, de adoptar la velocidad que estimen conveniente. Por tanto, se evitará medir velocidades en las siguientes circunstancias en las que resulta poco probable la libre circulación:

- Puntas bien definidas de tráfico direccional de mañana o tarde.
- Horas de circulación intensa de vehículos pesados.
- Puntas direccionales de fin de semana.
- Acontecimientos locales: días de mercado, espectáculos deportivos, etc.
- Obras en la plataforma.
- Circunstancias meteorológicas adversas.

¹ Midiendo el tiempo de recorrido en ese tramo, correspondiente a un vehículo que adelanta a tantos otros cuantos le adelantan a él.

² Niveles A, B ó C.

2 CAUSAS DE VARIABILIDAD DE LAS VELOCIDADES MEDIDAS

Tanto la elección de los períodos de medición como el tamaño de la muestra medida resultan de gran importancia, ya que las medidas obtenidas en períodos cortos⁽¹⁾ se considerarán luego como representativas de las que adoptan todos los usuarios en un período indeterminado⁽²⁾.

La velocidad varía de una hora a otra, de un día a otro, de un mes a otro, y de un año a otro, de forma bastante sistemática. El efecto total de estas variaciones, incluso si se evita medir en las circunstancias desfavorables mencionadas en el apartado #3 y se circunscribe el análisis sólo a un año, puede producir una diferencia de más de 5 km/h entre los niveles superiores e inferiores de V_{85} . Por tanto, es fundamental efectuar más de una medición: al menos dos, y preferiblemente más en un mismo sitio, en distintas horas del día y distinto día de la semana. Si no se pueden repetir las mediciones en distintos meses, se debe elegir un mes neutro en cuanto a variaciones estacionales de la circulación.

En cada período de medición, el tamaño de la muestra afecta a la precisión de la estimación del verdadero valor de V_{85} . Con aparatos de radar, para obtener una precisión de $\pm 3\%$ con un nivel de confianza del 95 %, hacen falta unas 200 medidas; sin embargo, una muestra pequeña, bien planeada y analizada, resulta mucho más útil que una mayor obtenida con poco cuidado. Con bucles de inducción no se presenta este problema, pero las medidas deben abarcar horas enteras.

3 MONTAJE Y EMPLEO DE DISPOSITIVOS DE MEDIDA

3.1 GENERALIDADES

Si se alberga alguna duda de que la circulación en un solo sentido pueda ser considerada representativa de la total, hay que cambiar de emplazamiento, o medir en ambos sentidos.

El número de mediciones en cada ocasión, emplazamiento y, en su caso, sentido debe ser aproximadamente igual.

¹ Quizás dos o tres horas.

² Tal vez un año.

3.2 APARATOS DE RADAR

3.2.1 Emplazamiento.

El emplazamiento elegido debe poder acomodar al aparato y a quienes lo manejan⁽¹⁾ sin perturbar al tráfico: el arcén, la berma, un acceso no utilizado, o el principio de un carril de deceleración. El montaje debe ser lo menos aparente posible.

No se debe medir donde los vehículos estén acelerando o decelerando, ni cerca de intersecciones⁽²⁾ o de paradas de autobuses, ni donde el haz del radar pueda ser interferido por vehículos estacionados. Excepto si la intensidad es muy baja, se desaconseja medir en carriles o calzadas no contiguos al aparato.

3.2.2 Manejo.

Se deben seguir cuidadosamente las instrucciones de manejo del aparato, especialmente en lo relativo a su calibración y a interferencias. Algunos modelos permiten no considerar a los vehículos que se desplazan en sentido contrario a la medida; pero con la mayoría de los aparatos, la influencia de estos vehículos se tiene que reducir a base de apuntar cuidadosamente la antena o de reducir el alcance. La puntería de la antena es importante, puesto que la velocidad se mide por el eje del haz del radar y luego se compensa el efecto del ángulo entre éste y la dirección de la carretera:

- En los aparatos diseñados para ser apuntados paralelamente a la carretera, una diferencia de ángulo de 10° ⁽³⁾ puede causar un error del 1,5 % por defecto.
- En los aparatos que tienen un compensador, y se colocan con el haz formando un cierto ángulo⁽⁴⁾ con el eje de la carretera, una diferencia de ángulo de

¹ Normalmente están dentro de un vehículo.

² A no ser que precisamente la medida esté relacionada con la mejora de éstas.

³ En cualquier sentido.

⁴ Por ejemplo, 20° .

10^o puede causar un error desde el 5% por exceso hasta el 8 % por defecto.

- En aparatos bien colocados, el error suele ser inferior á 2 km/h.

Se recomienda el empleo de dos observadores, uno que lea el medidor y otro que anote las medidas. Esto facilita limitar las medidas sólo a vehículos ligeros, si fuera preciso.

3.2.3 Medidas.

Si la intensidad de la circulación es baja, se debe intentar medir las velocidades de todos los vehículos que circulen en un sentido; si esto no es posible, hay que proceder a un muestreo que, para no resultar sesgado, se debe basar en un atributo no relacionado con la velocidad y fácil de decidir, como el color blanco⁽¹⁾, números pares o impares de matrícula⁽²⁾, o elección del último dígito de la matrícula⁽³⁾.

Para cada vehículo que satisfaga al criterio de muestreo hay que anotar un solo valor de la velocidad. Salvo con bajas intensidades de circulación, no suele ser posible una lectura estable del medidor para cada vehículo que pasa. En ciertas ocasiones, el medidor dará una breve indicación que pueda ser aceptada como medida; en otras no habrá medida como, por ejemplo, cuando un vehículo adelanta a otro o le sigue muy de cerca.

El ignorar las medidas fallidas equivale a admitir que las velocidades de esos vehículos tienen la misma distribución y valor medio que las de los vehículos medidos. Pero si los fallidos son significativos⁽⁴⁾, es preferible formular otras hipótesis, tales como:

- Que los vehículos que circulan en un pelotón compacto tienen todos la misma velocidad.

¹ Muestra representativa de aproximadamente un 20 %, pero sólo de coches.

² Muestra del 50 %.

³ Muestra del 10 %, 20 %, etc.

⁴ Por ejemplo, más del 10 %.

- Que los vehículos que adelantan circulan, por ejemplo, 15 km/h más aprisa que los adelantados⁽¹⁾.

Estas estimaciones se deben hacer inmediatamente, sin dejarlas para después, y distinguirse en las anotaciones mediante una marca.

En carreteras con calzadas más de un carril para el sentido de circulación medido, se debe analizar cada carril por separado, para luego combinar los resultados proporcionalmente al número de vehículos que pasa por cada carril.

En los accesos a intersecciones semaforizadas, sólo se deben medir las velocidades de los vehículos que pasen por una sección situada a unos 150 - 200 m antes del semáforo, cuando éste esté en verde y no haya retenciones.

3.3 DETECTORES

El paso de cada eje de un vehículo sobre cada detector genera un impulso, y la diferencia entre los dos detectores se traduce a una velocidad haciendo intervenir la separación entre ellos. El procedimiento es totalmente automático tanto en recogida de datos como en su explotación (histogramas, medias y percentiles) y puede abarcar períodos de tiempo variados⁽²⁾: pero no distingue entre coches y vehículos pesados, aunque algunos modelos sí pueden distinguir entre vehículos largos y cortos.

En carreteras con más de un carril para el sentido de circulación medido, hay que procurar separar los detectores de carriles adyacentes, para evitar medir dos veces los vehículos que circulen a caballo de la marca de separación de carriles.

4 COMPROBACIÓN Y ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS

4.1 COMPROBACIÓN

El valor de V_{85} deducido de las medidas sólo será válido si las mediciones han sido cuidadosamente planeadas y realizadas, y las medidas cuidadosamente comprobadas y analizadas.

¹ Que suelen ser mayores y estar más cercanos al medidor, por lo que es más fácil su detección y medición.

² Desde una hora a dos semanas.

Ante todo, si las circunstancias exteriores (emplazamiento, período, clima) pudieran haber impedido una explotación normal de la carretera, las medidas deben ser desechadas.

Si se emplean detectores manuales o equipos de radar, hay que considerar algunas otras cuestiones:

- Si el número de vehículos cuya velocidad no se ha registrado ni estimado es superior al 10 %, se recomienda desechar las medidas y repetir la medición.
- Si el número de vehículos cuya velocidad se ha estimado es superior al 20 %, puede que un equipo de radar no sea lo adecuado para medir velocidades en unas condiciones de circulación tan difíciles. En ese caso ¿puede la circulación ser calificada de libre?
- Si las velocidades medidas (no las estimadas) tienden evidentemente a valores "redondos", como 50, 65, 80, hay que comprobar que la proporción de éstos. Un 10 % de las medidas debería terminar en 0, y otros 10 % en 5, y hasta el doble de estos porcentajes sería aceptable en una muestra de efectivo 100; por encima, las medidas resultan sospechosas de sesgo.

Si se emplean detectores, no se plantean las cuestiones descritas para los equipos de radar, sino otras como las falsas medidas correspondientes a vehículos que circulan muy juntos, y que se traducen en un número anormalmente elevado de velocidades muy bajas.

4.2 ANÁLISIS

El percentil 85 de la distribución de velocidades se puede estimar simplemente ordenando las medidas por velocidad decreciente y cortando la lista por el 15 % del total. Esto puede resultar trabajoso con muestras grandes.

Si se dispone de la media m y de la desviación-tipo s muestrales, admitiendo una distribución normal se tiene, aproximadamente,

$$V_{85} = m + 1,04 * s$$

Dado que se suele cumplir que

$$s \approx \frac{m}{6}$$

la razón $\frac{V_{85}}{m}$ suele estar comprendida entre 1,1 y 1,25.

Esto puede servir de comprobación.

La estimación de V_{85} a partir de m y s no es válida en los accesos a intersecciones semaforizadas si se han incluido todos los vehículos, puesto que la estimación reflejará la menor velocidad de los vehículos que se aproximan al semáforo en rojo o a una retención.