



ADELANTAMIENTOS EN CARRETERAS DE DOS CARRILES

Por Sandro Rocci Boccaleri (*)

Las carreteras de dos carriles y doble sentido de circulación, las más difundidas, presentan la particularidad de que el adelantamiento de un vehículo rápido por otro lento tiene que realizarse invadiendo temporalmente el carril contrario, con el riesgo de colisión con otro vehículo que circule por éste. Con independencia de que el Código de Circulación, y aun la más elemental prudencia, responsabilicen siempre al conductor del vehículo que adelanta de realizar su maniobra en condiciones de seguridad, desde hace muchísimo tiempo las Autoridades encargadas de la explotación de las carreteras de dos carriles han tratado de ayudar al conductor informándole de cuándo dichas condiciones de seguridad son precarias, cuando no imposibles. Se ha llegado así a prohibir el adelantamiento, mediante la oportuna señalización vertical y horizontal en determinados tramos.

La causa más frecuente de la prohibición de adelantamiento —no la única— es la falta de visibilidad. Se puede resumir en que, cuando la distancia de visibilidad disponible (DVD), es inferior a una determinada distancia de visibilidad necesaria (DVN), se deben adoptar ciertas medidas restrictivas del adelantamiento: normalmente, el prohibirlo, pero ya se verá más adelante que esto admite matizaciones.

La definición de la DVD es bastante fácil: se supone al conductor del vehículo que adelanta esté situado a una altura de 1,2 m. sobre el pavimento, y a 1 m. del borde izquierdo de su carril. El obstáculo que debe ser divisado —el vehículo contrario— tiene asimismo una altura de 1,2 m. sobre el pavimento, y está situado a 1 m. del borde izquierdo de su carril. Nada debe interponerse en la visual, ni edificios, ni árboles, ni taludes, ni señales, ni la propia carretera (en los acuerdos convexos), ni estructuras que pasen sobre ella... ni siquiera el vehículo al que se pretende adelantar, y que frecuentemente (curvas a derechas de gran radio) tapa una buena parte de la zona que interesa al conductor. En estas condiciones se puede medir en la realidad la DVD o, si se conoce suficientemente el trazado de la carretera, deducirla de los Planos o de soportes numéricos (Anexo 1). A cada punto del recorrido —y sentido— se asocia así una DVD unívoca.

Mucho menos clara resulta la definición de la DVN, la distancia de visibilidad necesaria para el adelantamiento "sensu lato". Ello es debido a que la carretera debe acomodar a vehículos rápidos y a vehículos lentos, a conductores diestros y a conductores torpes; tanto el vehículo al que se pretende adelantar como el vehículo contrario pueden ir a distintas velocidades, y el conjunto formado por el conductor y el vehículo que adelanta puede ser capaz de reacciones rápidas y aceleraciones elevadas, o no. La señalización que se implante deberá ser un compromiso entre solicitudes muy dispares, y proporcionar un nivel aceptable de seguridad.

Resulta bastante sorprendente que la vigente Normativa española —y, a decir verdad, la extranjera también, con más o menos variantes— sólo define la DVN en función de la velocidad previsible para el vehículo adelantado, y ello sin justificación teórica alguna. En la Tabla 1 se consignan las DVN de la normativa española y europea.

El protocolo europeo va del simple al doble, y la norma española se sitúa en la mitad inferior.

Aparece así el principal parámetro del que depende la DVN: la velocidad del vehículo adelantado. Teniendo en cuenta que exige menor DVN el adelantar a un vehículo lento que a uno rápido, de entre las distintas velocidades a las que puede estar circulando el vehículo al que se adelanta se suele elegir la gama superior para definir la DVN: por ejemplo, la que sólo es rebasada por el 15% de los vehículos (V85, o percentil 85). Esta velocidad puede medirse directamente en la carretera (Anexo 2), o bien puede relacionarse con la velocidad específica de cada elemento de la misma, deducible de Planos o estados numéricos.

1. Modelo del adelantamiento

1.1. Modelo general

La fijación de la DVN para el adelantamiento debe estar basada, evidentemente, en un análisis de cómo se lleva a cabo esta maniobra en la realidad; análisis que se facilita por la utilización de modelos matemáticos que esquematizan el movimiento de los vehículos.

En su esquema más sencillo, el vehículo adelantado, cuya longitud es LA1 (normalmente un camión, 10 m., aunque se pueden analizar caravanas de más de un vehículo) circula a velocidad V_0 constante. El vehículo adelantador, cuya longitud es LA2 (nor-

TABLA 1
Distancias de visibilidad (m) necesarias para adelantamiento

Velocidad (km/h.)	50	60	70	80	90	100
Protocolo europeo	60-120	80-160	100-200	130-260	145-290	160-320
Norma española	80	110	140	175	210	250



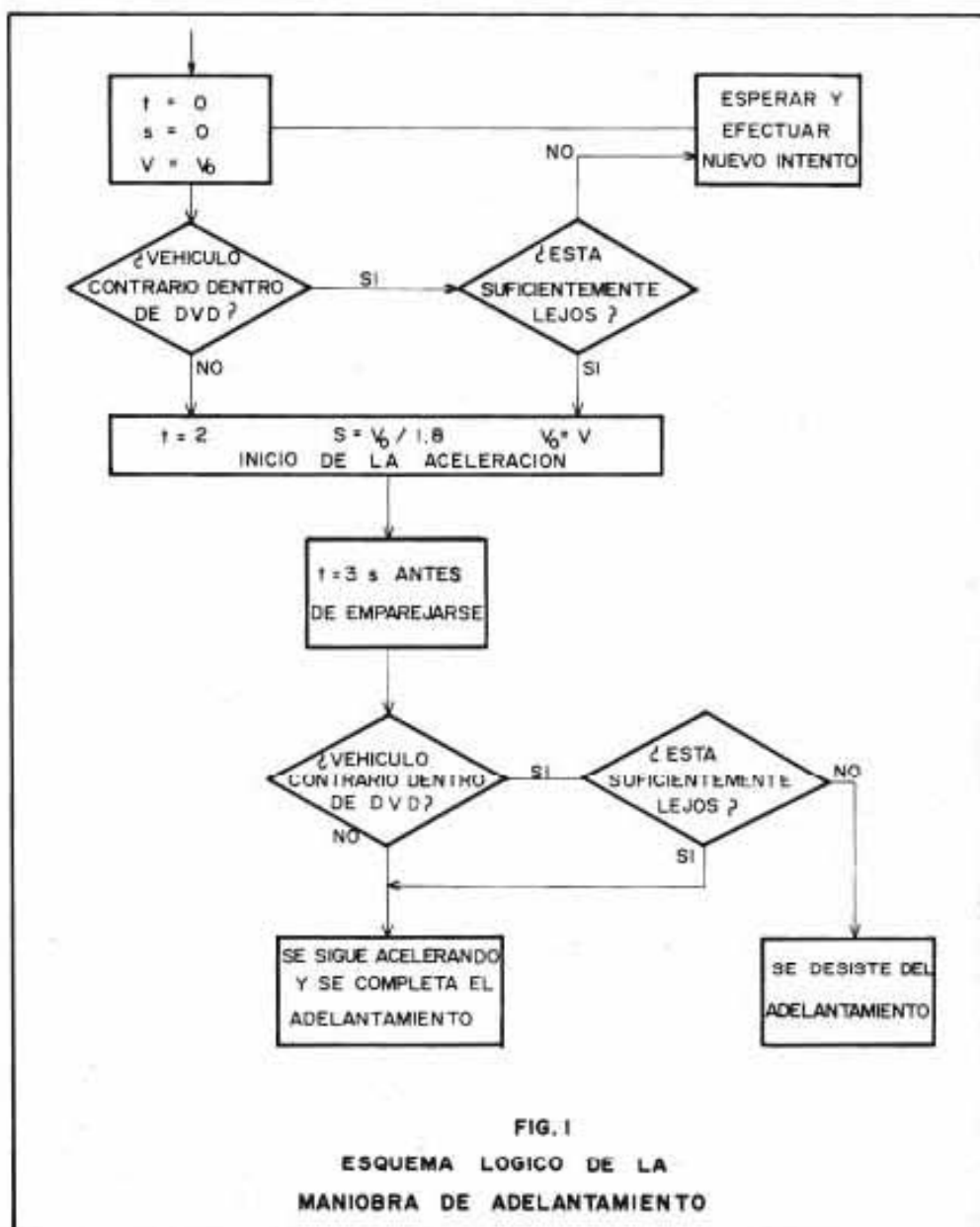
malmente un coche, 5 m.) se sitúa tras el primero, a la misma velocidad y a una cierta distancia S_0 . En un determinado instante —origen de tiempos y recorridos— decide iniciar la maniobra, en cuyo desarrollo pueden darse varias combinaciones de periodos de análisis y decisión, aceleraciones y aún deceleraciones que más adelante se examinan, pero cuyo resultado sólo puede revestir dos modalidades en condiciones de seguridad:

- o bien el adelantamiento se *completa*, y el vehículo adelantador se coloca delante del adelantado, a una separación S_1 y naturalmente a mayor velocidad, sin haber "pisado" marca vial continua;
- o bien el adelantamiento se *aborta*, y el vehículo adelantador vuelve a situarse detrás del adelantado, a una separación S_2 y a velocidad no superior a V_0 , también sin haber pisado marca vial continua.

La presencia, en cualquier momento, de un vehículo que circule en sentido contrario y al que no se debe hacer modificar su velocidad para evitar una colisión, puede influir en el desarrollo de la maniobra de adelantamiento, y ciertamente resulta decisiva en el caso de desistir de él.

1.2. Separación inicial

En la elección de la separación inicial S_0 pueden distinguirse varias técnicas de adelantamiento. Si S_0 es suficientemente grande, una buena parte de la aceleración necesaria para el adelantamiento se puede realizar dentro del propio carril, por lo que la velocidad a la que se invade el carril contrario será superior a V_0 y por lo tanto será menor el tiempo de invasión de dicho carril. Esta forma de adelantamiento, evidentemente más segura, ha sido estudiada con detalle por Manuel Cerdá en una tesis doctoral dirigida por el autor. No obstante, lo frecuente —lamentablemente— es que el vehículo adelantador circule muy próximo al adelantado: valores de S_0 del orden de los 6 m. aseguran que, si el vehículo adelantado frenase bruscamente con una deceleración media del orden de 10 km/h/s., y el conductor del vehículo adelantador tardase 2 segundos en reaccionar y luego frenase con igual deceleración, no se producirá alcance





entre ambos vehículos. En lo que sigue se ha retenido esta última opción para So, aunque en el Anexo 3 se describen las consecuencias favorables de adoptar un mayor valor para So: reducción del tiempo de invasión del carril contrario a la tercera parte.

1.3. Decisión inicial

Supóngase ahora que, en el instante inicial ($t = 0$) el conductor del vehículo adelantador "se asoma" y ve que ni hay prohibición de adelantar ni viene ningún vehículo en sentido contrario, dentro de su DVD, y analiza que ésta

es suficiente para sus propósitos, o bien —lo que es más frecuente con intensidades de tráfico altas— considera que la prohibición de adelantar o el vehículo contrario que divisa están suficientemente lejos para que no interfieran la maniobra que pretende. En estas evaluaciones se suele admitir que se consumen unos 2 segundos.

A partir de este instante ($t = 2$), la decisión de adelantar está tomada y se acelera, a partir de la velocidad V_0 y la posición correspondiente a haber recorrido

$$D1 = V_0 / 1,8 \quad [D1 \text{ en m., } V_0 \text{ en km/h.}]$$

a partir del punto inicial en que se utilizó la DVD correspondiente al mismo.

1.4. Posibilidad de desistir

Si durante todo el proceso de aceleración no aparece ningún vehículo contrario, la única preocupación del conductor que adelanta será la de terminar su maniobra antes de llegar a una prohibición de adelantamiento, si una vez iniciada la aceleración, dentro de la DVD correspondiente al punto alcanzado apareciese una prohibición de adelantamiento o un vehículo contrario no vistos con anterioridad, el conductor del vehículo adelantador tendrá que efectuar un nuevo análisis de su distancia y velocidad, y decidir si sigue acelerando para completar el adelantamiento, o desiste de él. El tiempo consumido en esta evaluación debe tomarse algo superior, del orden de 3 segundos, y el último momento para desistir corresponde al emparejamiento con el vehículo adelantado: rebasado éste, se tiende a completar el adelantamiento aún a costa de hacer frenar al vehículo contrario, al adelantado, a o ambos.

Significa lo anterior que el último instante en que puede aparecer un vehículo contrario y hacer desistir del adelantamiento corresponde a unos 3 segundos antes del emparejamiento; y que el último momento para desistir corresponde precisamente al emparejamiento. Las distancias recorridas, los tiempos empleados y las velocidades alcanzadas dependen de la modalidad de movimiento acelerado que se haya utilizado. Cuando se ha optado por desistir —y, para estar al lado de la seguridad, hay que efectuar el análisis para los instantes más tardíos posibles— el vehículo adelantador frustrado decelera hasta volver a situarse detrás del adelantado; también las distancias recorridas, los tiempos empleados y las velocidades alcanzadas dependen de la modalidad de movimiento decelerado que se haya utilizado. El remate de la maniobra de desistimiento debe tener lugar antes de llegar a una prohibición de adelantar.

En la figura 1 se representa el esquema descrito en los apartados anteriores, común a todos los adelantamientos dentro del campo especificado.

1.5. Modelos de aceleración

La capacidad de aceleración, a partir de una velocidad inicial V_0 varía mucho

de un conjunto vehículo-conductor a otro; cualquier análisis que desemboque en una normativa con influencia en la seguridad tendrá que ser forzosamente conservador, adoptando prestaciones que, en la realidad, serán superadas por la mayoría de los vehículos.

La Instrucción actual 3.1-IC propone unas aceleraciones medias, para un movimiento uniformemente acelerado, cuyo valor depende únicamente de la velocidad inicial V_0 , según el modelo aproximado

$$J = 0.7 + 80/V_0 \quad [J \text{ en km/h/s}, V_0 \text{ en km/h.}]$$

Este modelo es, evidentemente, pesimista: para rampas superiores al 5% por ejemplo, y velocidades iniciales superiores a 75 km/h, resulta que no se puede acelerar. Sin embargo, se ha empleado en todo lo que sigue, ya que los resultados de su aplicación no irán en detrimento de la seguridad de la circulación.

Si se considera al movimiento del vehículo durante el adelantamiento como uniformemente acelerado en una rasante de inclinación i (en tanto por ciento, positiva subiendo), las ecuaciones del mismo que proporcionan el espacio recorrido Da y el tiempo empleado Ta para pasar de la velocidad inicial V_0 a otra mayor V_1 son:

$$Ta = (V_1 - V_0)/(J - 0.35.i) \quad [Ta \text{ en segundos}]$$

$$Da = (V_1^2 - V_0^2)/7.2.(J - 0.35.i) \quad [Da \text{ en m.}]$$

Eliminando V_1 se obtiene una relación entre Ta y Da , en función de los parámetros V_0 , J e i :

$$3.6.Da = V_0.Ta + (J - 0.35.i).Ta^2/2$$

Otra relación entre Ta y Da se establece si se comparan el recorrido relativo R entre ambos vehículos (adelantador y adelantado) y el recorrido absoluto, dado que se supone que el vehículo adelantado permanece a velocidad constante V_0 :

$$Da = R + V_0.Ta/3.6$$

lo cual permite hallar Ta en función de los parámetros R , J e i (sorprendentemente, no depende directamente de V_0):

$$Ta^2 = 7.2.R/(J - 0.35.i)$$

Con este valor de Ta se puede calcular Da y comprobar V_1 a través de las ecuaciones reseñadas.

FIG. 2
TIEMPO PARA EMPAREJAMIENTO
 i , INCLINACIÓN DE LA RASANTE (%)

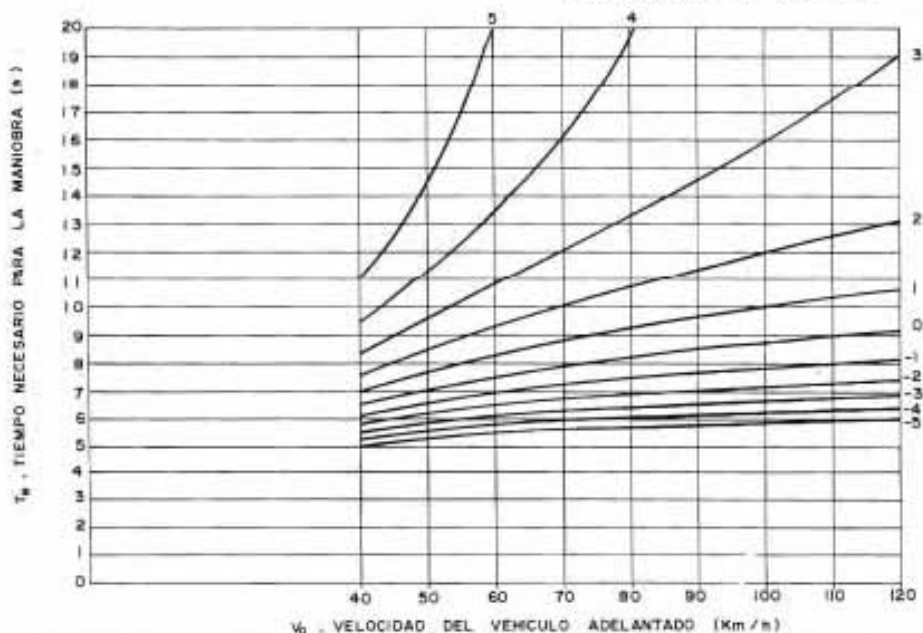
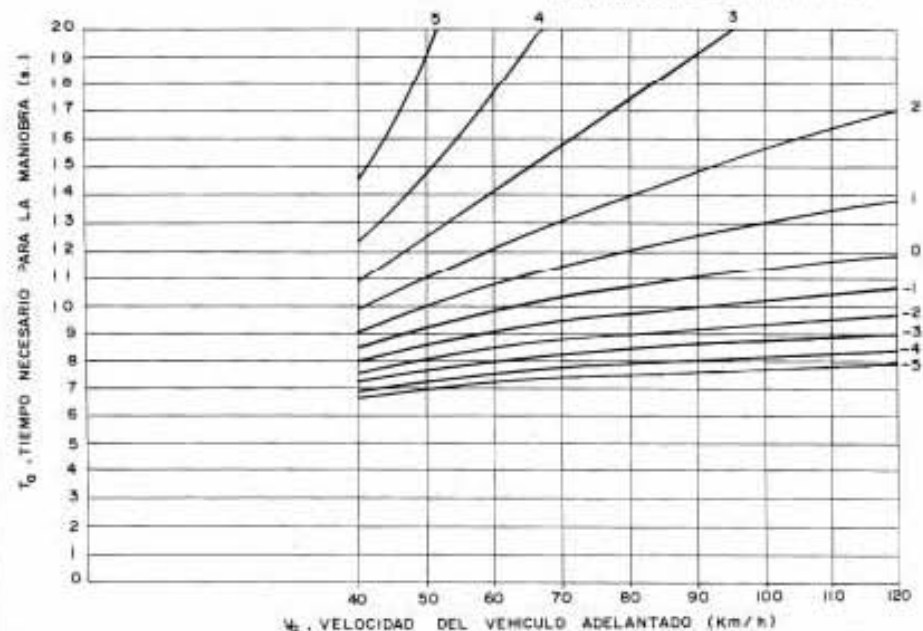


FIG. 3
TIEMPO PARA ADELANTAMIENTO
 i , INCLINACIÓN DE LA RASANTE (%)



El significado real de Ta es muy importante para la seguridad, pues representa tiempo en que el vehículo adelantador permanece en el carril contrario (V. Anexo 3).

La aplicación de este análisis a las dos modalidades de adelantamiento estudiadas, completar o desistir, se hace a través del recorrido relativo R .

En el caso de que se complete el adelantamiento, será:

$$R = So + LA1 + S1 + LA2$$

mientras que si se llega sólo a emparejar a los dos vehículos, será:

$$R = So + LA1$$

FIG. 4

DISTANCIA PARA EMPAREJAMIENTO i , INCLINACION DE LA RASANTE (%)

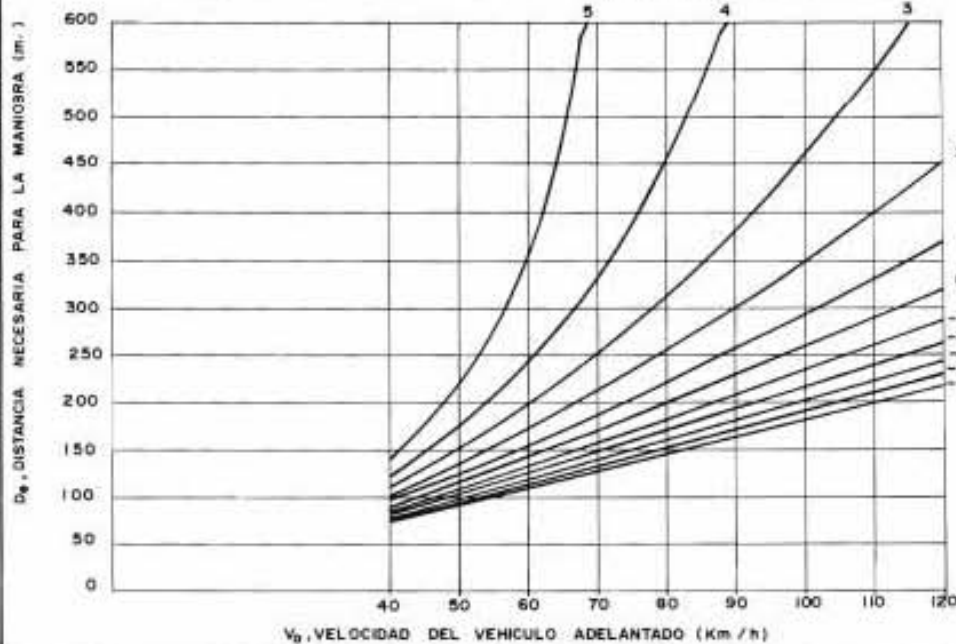
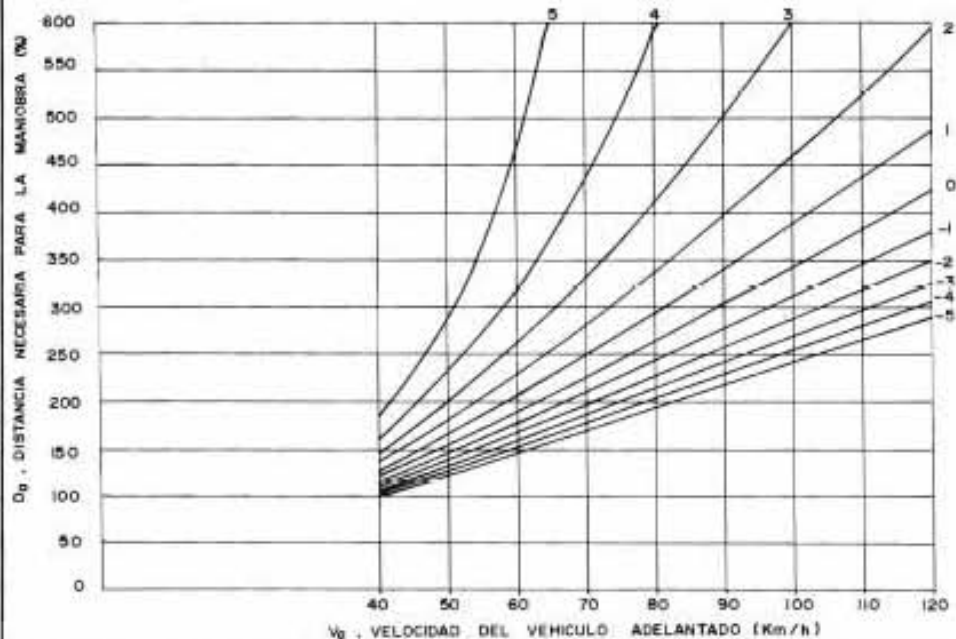


FIG. 5

DISTANCIA PARA ADELANTAMIENTO

i , INCLINACION DE LA RASANTE (%)



Con los valores reseñados en el apartado 1.1 y 1.2 para LA1, LA2 y So, y asignado a S1 un valor igual al de So, resultan respectivamente unos recorridos relativos de 27 y 16 m., con lo que, sustituyendo también la expresión de J en función de Vo dada anteriormente, se tiene:

$$Te^2 = 115 / [0,7 - 0,35.i + (80/Vo)]$$

para el emparejamiento.

$$Ta^2 = 194 / [0,7 - 0,35.i + (80/Vo)]$$

para completar el adelantamiento.

En las figuras 2 y 3 se representan Te y Ta, y en la figura 4 y 5 las distancias De y Da correspondientes. Se ve en ellas que, en rasantes no ascendentes, Te está comprendido entre 5 y 9 segundos y varía poco con Vo; Ta en-

tre 7 y 12 segundos; y la variación de De y Da es bastante lineal.

1.6. Caso del desistimiento

Si, a partir del emparejamiento de los vehículos, se desiste del adelantamiento, puede estudiarse el movimiento del vehículo adelantador como uniformemente decelerado en una rasante inclinada, con deceleración media J a partir de la velocidad V1 alcanzada en el momento del emparejamiento:

$$V1 = Vo + \sqrt{115 \cdot [0,7 - 0,35.i + (80/Vo)]}$$

con lo que la distancia Dd recorrida durante el desistimiento estará dada por:

$$3,6.Dd = V1.Td - (J + 0,35.i).Td^2/2$$

siendo Td el tiempo empleado en el desistimiento. La distancia Dd también puede deducirse del movimiento relativo entre ambos vehículos:

$$Dd = Vo.Td/3,6 - 16$$

[admitiendo que S2 = So = 6 m.]

Por lo tanto, el tiempo Td está dado por la ecuación:

$$(J + 0,35.i).Td^2 - 2.(V1 - Vo).Td - 115 = 0$$

que tiene la raíz:

$$(J + 0,35.i).Td = (V1 - Vo) + \sqrt{[(V1 - Vo)^2 + 115.(J + 0,35.i)]}$$

Para minimizar el tiempo Td y, consiguientemente, la distancia recorrida Dd interesa que J alcance el máximo valor posible, que es del orden de 10 km/h/s. Pero en algunas circunstancias incluso este valor es demasiado elevado, pues se produciría la detención del vehículo aún antes de haber vuelto a su carril detrás del otro:

$$V1 - (J + 0,35.i).Td \geq 0$$

con lo que, en el caso límite, sería:

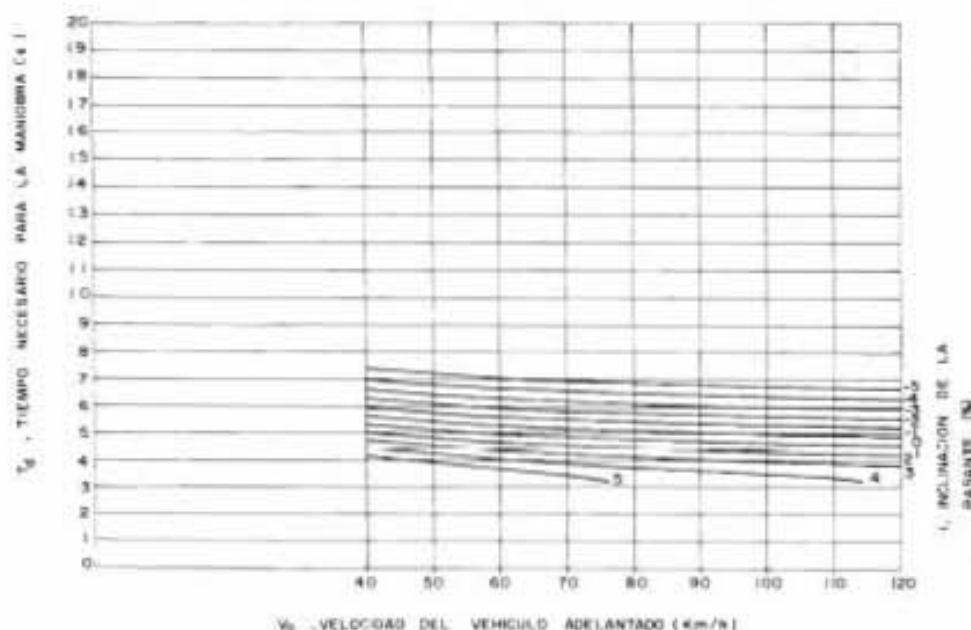
$$Td = 115 / (2.Vo - V1)$$

Se demuestra que esto ocurre cuando Vo es menor que el dado por la ecuación:

$$Vo^2/115 - (80/Vo) - 10,7 = 0$$

la cual tiene una raíz del orden de 38 km/h. Por lo tanto, siempre Vo ≥ 40 km/h., al vehículo que desiste le queda algo de velocidad una vez terminada su maniobra, J es igual a 10 km/h/s., y Td está dado por la

FIG. 6
TIEMPO PARA DESISTIMIENTO



ecuación de segundo grado arriba expuesta.

A partir de T_d se puede calcular la distancia D_d . En las figuras 6 y 7 se representan T_d y D_d . Se ve en ellas que T_d está comprendido entre 4 y 7 segundos, variando muy poco con V_o ; D_d es lineal.

1.7. El vehículo contrario

Respecto del vehículo contrario, en las dos modalidades que se han descrito en los apartados anteriores —adelantamiento o desistimiento— interesa conocer tanto el momento de su aparición en el modelo, como la distancia recorrida hasta cruzarse con el vehículo adelantador. Al ser su velocidad V_c constante, esta distancia depende sólo del tiempo invertido en las diversas maniobras que se han descrito.

Es habitual considerar que $V_c = V_o$; pero esto, que es correcto para el estudio del adelantamiento en carreteras en las que la velocidad de recorrido es baja, no lo es tanto cuando se analiza el adelantamiento de vehículos lentos en carreteras de elevada velocidad específica.

El primer momento en que puede aparecer un vehículo contrario es una vez terminado el período inicial de 2

segundos de análisis de la situación, es decir, recién iniciada la aceleración para adelantar. Si hubiera aparecido antes, se hubiera incluido en el citado período, el cual evidentemente se habría prolongado.

Una vez iniciado el adelantamiento, el último instante en que puede aparecer un vehículo contrario para ser considerado puede fijarse en unos 3 se-

gundos antes del emparejamiento. Si apareciese más tarde, se considera que el vehículo adelantador conseguirá rematar su maniobra de adelantamiento, y no desistirá de ella.

Entre estos dos límites temporales, el conductor del vehículo que ya ha iniciado la aceleración para adelantar tendrá que decidir sobre si desiste o no; y colocándose en el último instante disponible para ello, 3 segundos antes del emparejamiento, que se consumen en el análisis y decisión, sin dejar de acelerar, se apuran al máximo las posibilidades de adelantar.

1.8. La DVN y la situación de la prohibición de adelantamiento.

Una vez realizado el análisis de la maniobra de adelantamiento, completado o abortado, que se ha detallado en los apartados anteriores —o cualquier otro análisis parecido— ya se puede dictaminar cuál debe ser la DVN en sus momentos más destacados:

- Para poder iniciar un adelantamiento, y completarlo aunque una vez iniciado aparezca un vehículo contrario, la DVN deberá ser igual a la suma de la distancia recorrida durante los dos segundos de análisis, de la distancia de adelantamiento, y de la distancia recorrida por el vehículo contrario durante el tiempo de adelantamiento:

$$DVN1 = V_o/1,8 + D_a + V_c.T_a/3,6$$



FIG. 7
DISTANCIA PARA DESISTIMIENTO

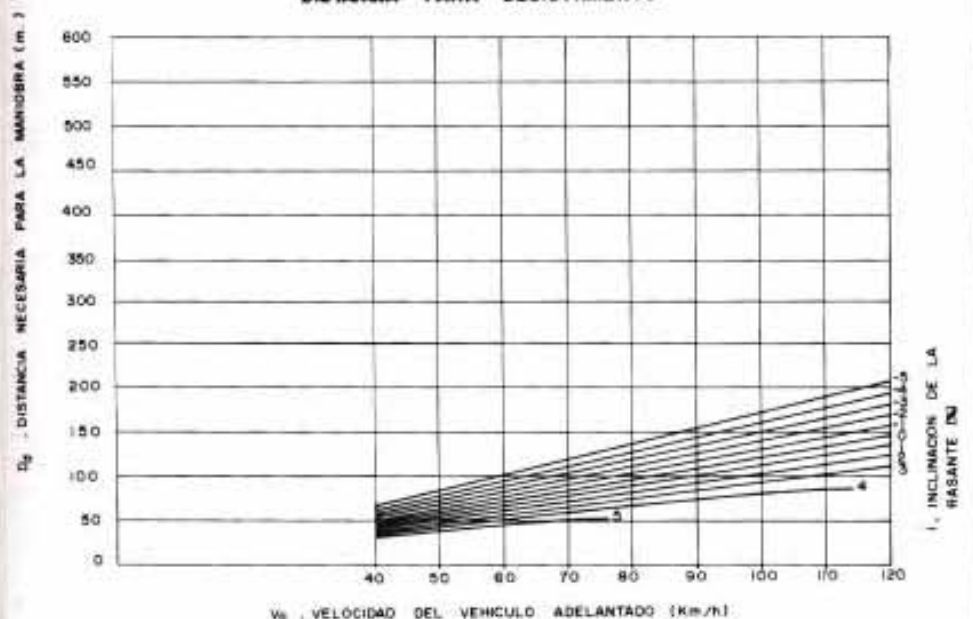
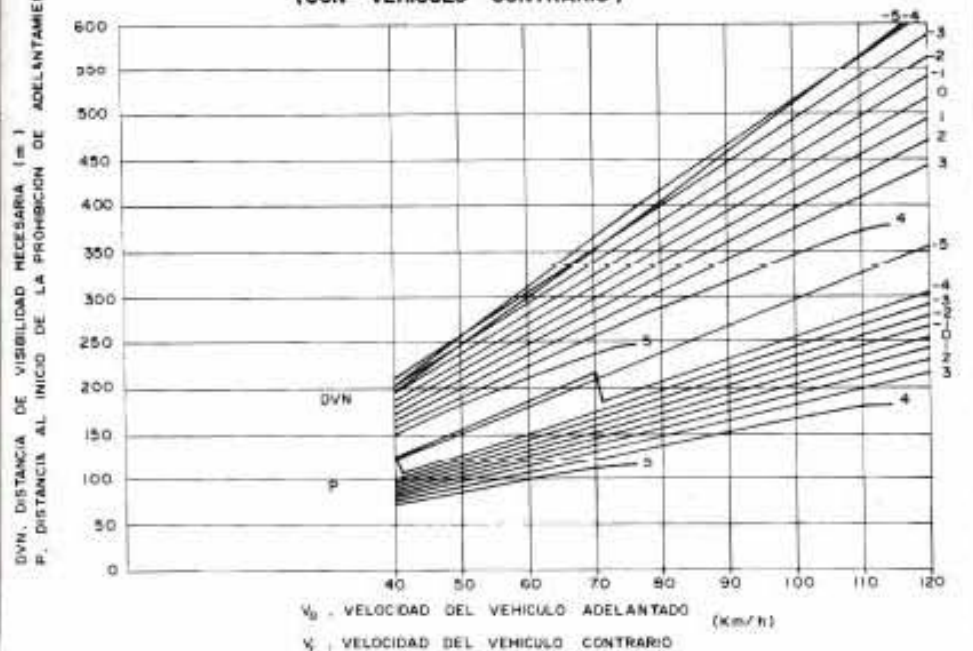


FIG. 8
PRINCIPIO DE UNA PROHIBICIÓN DE ADELANTAMIENTO
(CON VEHICULO CONTRARIO)



ese preciso instante deberá ser igual a la suma de la distancia recorrida durante esos 3 segundos de análisis —acelerando aún—, de la distancia recorrida durante el desistimiento, y de la distancia recorrida por el vehículo contrario durante los 3 segundos más el tiempo de desistimiento:

$$DVN2 = (De - (De(Te-3) + Dd + Vc.(Td + 3)/3,6$$

— Análogamente al caso del adelantamiento completado, para que el desistimiento pueda tener lugar sin interferir con una prohibición de adelantamiento, ésta deberá hallarse a menos de P2 del punto en que se ha estudiado la visibilidad DVN2:

$$P2 = DVN2 - Vc.(Td + 3)/3,6$$

Teniendo en cuenta el significado, tanto legal como práctico, de la prohibición de adelantamiento —no se debe "pisar" la marca vial continua, es decir, la maniobra de adelantamiento debe haberse completado o abortado antes de ella— está claro que, cuando después de un tramo suficiente con $DVD \geq DVN1$ como para que, en algún punto del mismo, se hayan iniciado adelantamientos con posibilidades de completarlos, se aproxima una prohibición de adelantamiento, ésta debe situarse a una distancia P2 más allá del último punto en que $DVD \geq DVN2$. Esta definición difiere de la usual en que la DVD en el principio mismo de la prohibición no resulta relevante: es la DVD de un punto situado anteriormente a distancia P2 la que define la prohibición.

Únicamente con pendientes descendientes importantes ($i < -4\%$) resulta $DVN1 < DVN2$: lo cual es comprensible, pues en esas circunstancias resulta más difícil desistir, frenando en contra de la pendiente, que completar el adelantamiento, acelerando a favor de ella.

En la figura 8 se representan la menor de las dos distancias DVN1 y DVN2, y la correspondiente P1 ó P2, para $Vc = Vo$; y en las figuras 9 a 11 lo mismo, pero con la velocidad Vc del vehículo contrario limitada inferiormente a 60, 80 o 100 km/h. No hay diferencias en P1 ó P2, pero se aumentan las DVN por debajo del límite considerado.

— Si en un punto cualquiera $DVD \geq DVN1$, para que la maniobra iniciada —aún a pesar de la presencia del vehículo contrario pueda completarse sin interferir con una prohibición de adelantamiento, ésta deberá hallarse a menos de P1 del punto en que se ha estudiado la visibilidad DVN1:

$$P1 = Vo/1,8 + Da;$$

$$\text{luego } DVN1 = P1 + Vc.Ta/3,6$$

— Para poder desistir de un adelantamiento, ya iniciado en condiciones propicias, por la aparición de un vehículo contrario 3 segundos antes de emparejarse con el vehículo adelantado, la DVN que se necesita en

1.9. La DVN y el final de la prohibición de adelantamiento

Análogamente a lo expuesto en el apartado anterior, cabe estudiar cuándo debe terminarse una prohibición de adelantamiento, en función de las DVN correspondientes.

El vehículo adelantador, mientras dura la prohibición de adelantar, circula tras el adelantado en las condiciones expuestas. Para que pueda iniciar una maniobra de adelantamiento con posibilidades de completarla, debe disponer al menos de una DVN correspondiente a terminar la maniobra en el supuesto de que no aparezca un vehículo contrario, o a desistir de ella si aparece; y todo ello sin interferir con la siguiente prohibición de adelantamiento.

Por lo tanto:

- En el final de la prohibición deberá ser $DVD \geq P1$.
- A una distancia P3 más allá del final de la prohibición, deberá ser $DVD \geq DVN2$ para que se pueda desistir si aparece un vehículo contrario. P3 es la distancia recorrida hasta 3 segundos antes del emparejamiento:

$$P3 = V_0/1,8 + De(Te-3)$$

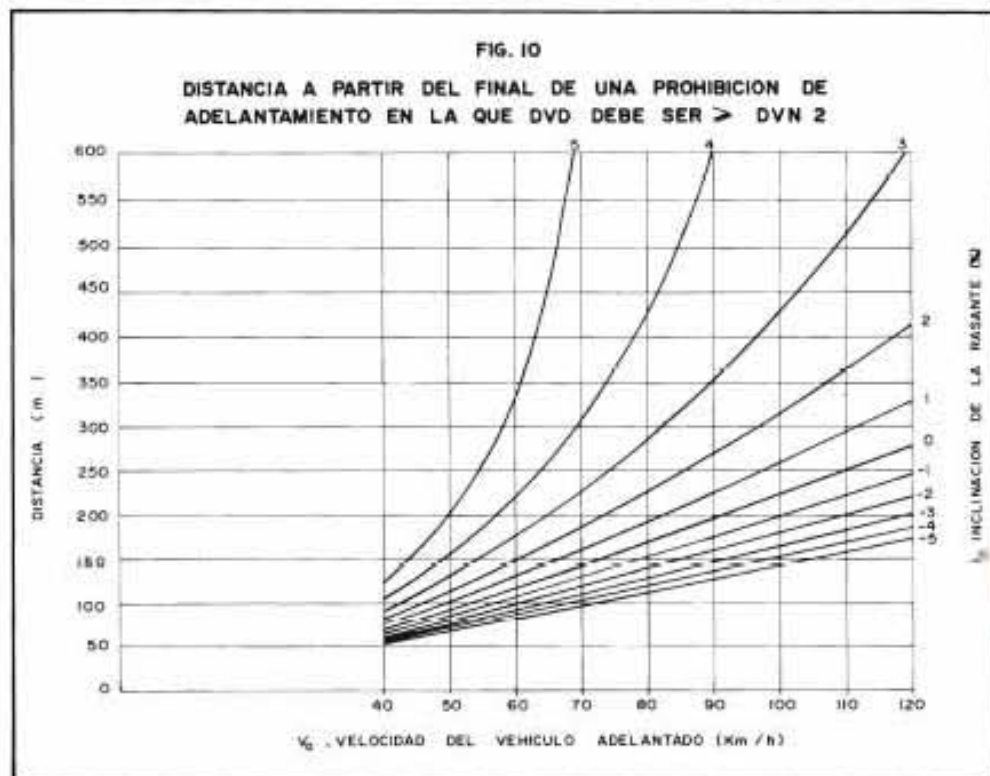
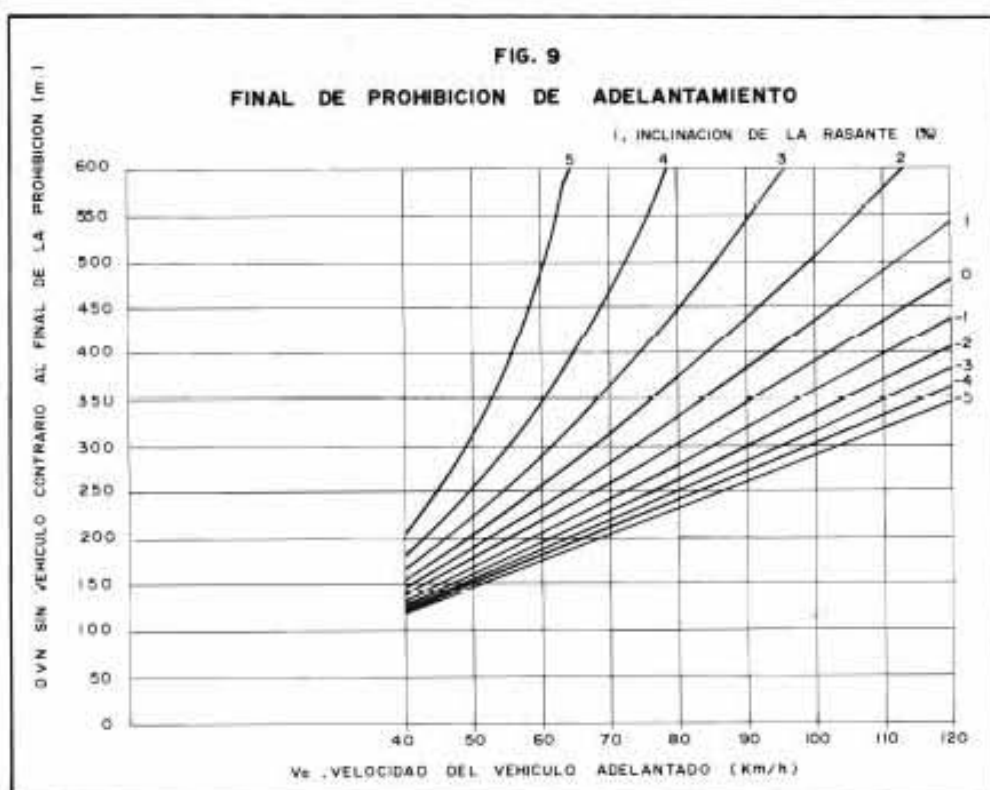
Si no se cumple esta condición, la prohibición de adelantamiento debe ser prolongada.

- La distancia mínima entre el final de una prohibición de adelantamiento y el principio de la siguiente deberá ser la mayor de las dos siguientes: P1 (para poder completar un adelantamiento iniciado en ausencia de vehículo contrario), o P2 + P3, (para poder desistir si aparece dicho vehículo una vez iniciado).

En las figuras 9, 10 y 11 se representan, respectivamente, P1, P3 y el mayor de los dos valores P1 y P2 + P3.

1.10. El preaviso

A la vista del esquema de prohibiciones de adelantamiento expuesto en los dos últimos apartados, resulta muy interesante el potenciar la noción de preaviso, que en varios países europeos —y más recientemente en España, por iniciativa del autor— se concreta en la pintura de las denominadas "flechas de retorno": las cuales sustituyen con



ventaja al cambio de ritmo de las marcas viales discontinuas, poco perceptible por el usuario y que se presta a confusiones al no estar claro a veces el sentido al que corresponde.

En efecto, el preaviso debe marcar claramente la zona en la que un adelantamiento iniciado debe ser comple-

tado o desistido, por la inminencia del comienzo de la prohibición de adelantamiento: así, dentro del esquema estudiado, la zona de preaviso abarcaría una longitud P2 antes del citado comienzo, resultando así variable con las circunstancias en vez de fija; su comienzo se situaría en el último punto en que $DVD \geq DVN2$.

2. Aplicación a casos particulares

Para poder comparar la normativa actual sobre principios de prohibición de adelantamiento, se establece cuando la DVD baja de un cierto umbral, función de la velocidad V_0 del vehículo adelantado, con la estudiada en el apartado 3 anterior, se establece a una distancia P_2 del último punto en que DVD DVN2, es preciso ver cuál es la DVD en el principio de la prohibición, cuando ésta se establece con el segundo criterio.

Los casos particulares de DVD estudiados en el Anexo 1, tanto para acuerdos verticales convexos como para curvas en planta con obstáculo concéntrico ponen de manifiesto que antes de la restricción de visibilidad, y con independencia de una cierta casuística, la DVD disminuye casi linealmente a medida que el observador se acerca a la restricción y, lo que es más interesante, con una variación prácticamente uniforme en función de la distancia, sea cual fuere el parámetro K_v del acuerdo o el radio R de la curva en planta, la diferencia θ de inclinaciones de rasante o el radio Q del obstáculo concéntrico.

Puede, por tanto, esquematizarse la DVD en una zona de restricción de la misma como una función lineal decreciente de la distancia, hasta alcanzar un mínimo (fig. 12), cuya altura y longitud dependen de la combinación de parámetros geométricos definitorios de la restricción, a partir del cual la DVD vuelve a aumentar. Es entonces relativamente sencillo acotar la posición correspondiente a DVN2 y ver qué pasa a una distancia P_2 más allá: puede haberse alcanzado la zona de mínimo, o no. En el primer caso, a velocidades V_0 y/o V_c inferiores— no va a resultar en una menor DVD en el principio de la prohibición, pues ésta no puede bajar del mínimo.

La aplicación de este esquema a los acuerdos verticales cuyas DVD se han analizado en el Anexo 1, con V_0 limitada superiormente por, y V_c exactamente igual a, el valor máximo que para cada parámetro K_v se fija en la Norma española de trazado 3.1-IC, se representa en la figura 13 de cuyo examen se deduce:

— La escasa influencia de la velocidad V_0 en la DVD al principio de la prohibición si ésta se basa en que a una distancia P_2 antes, la DVD no

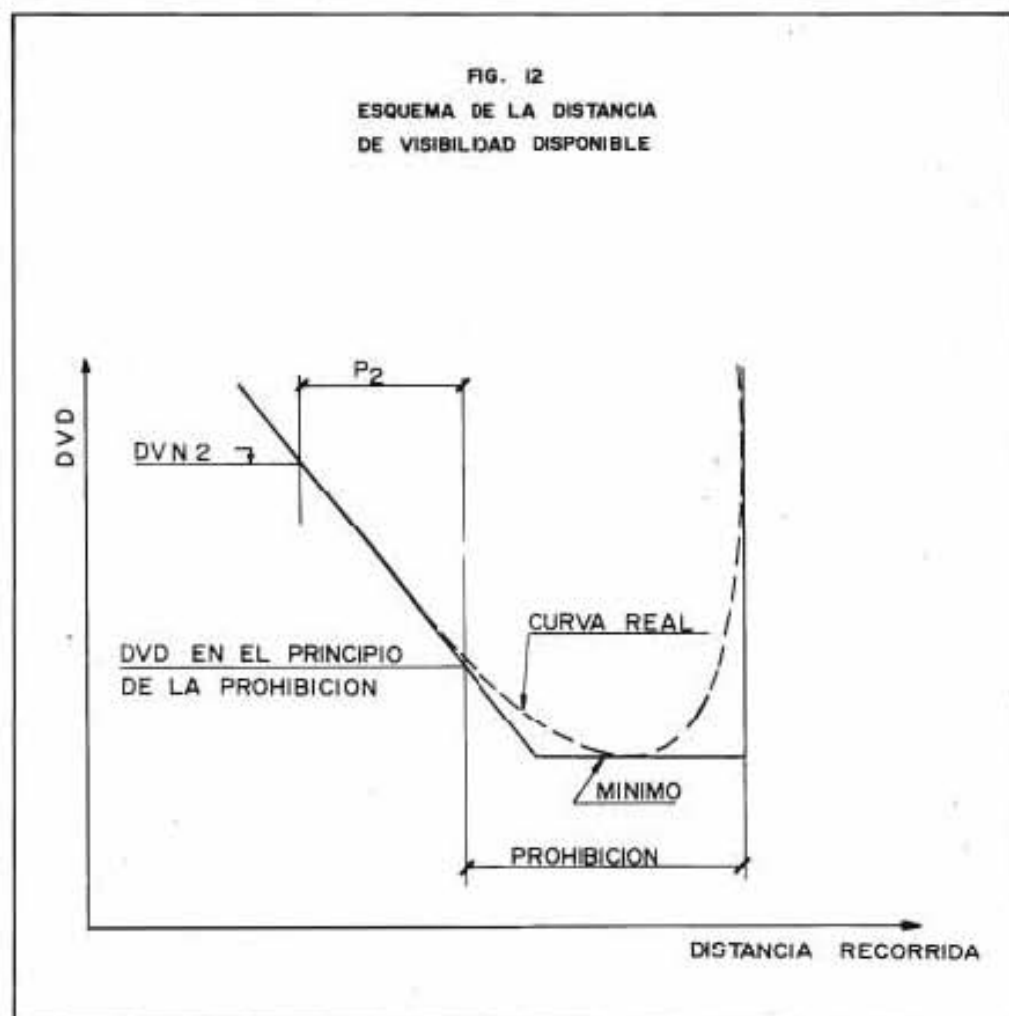
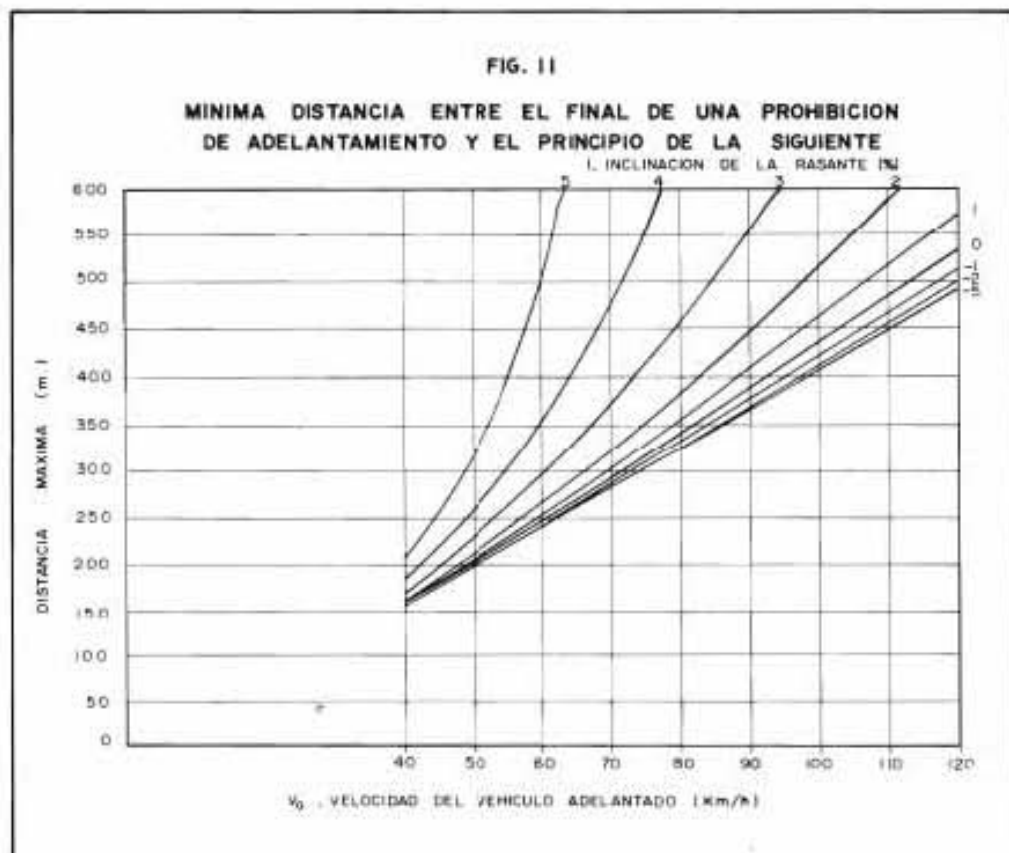
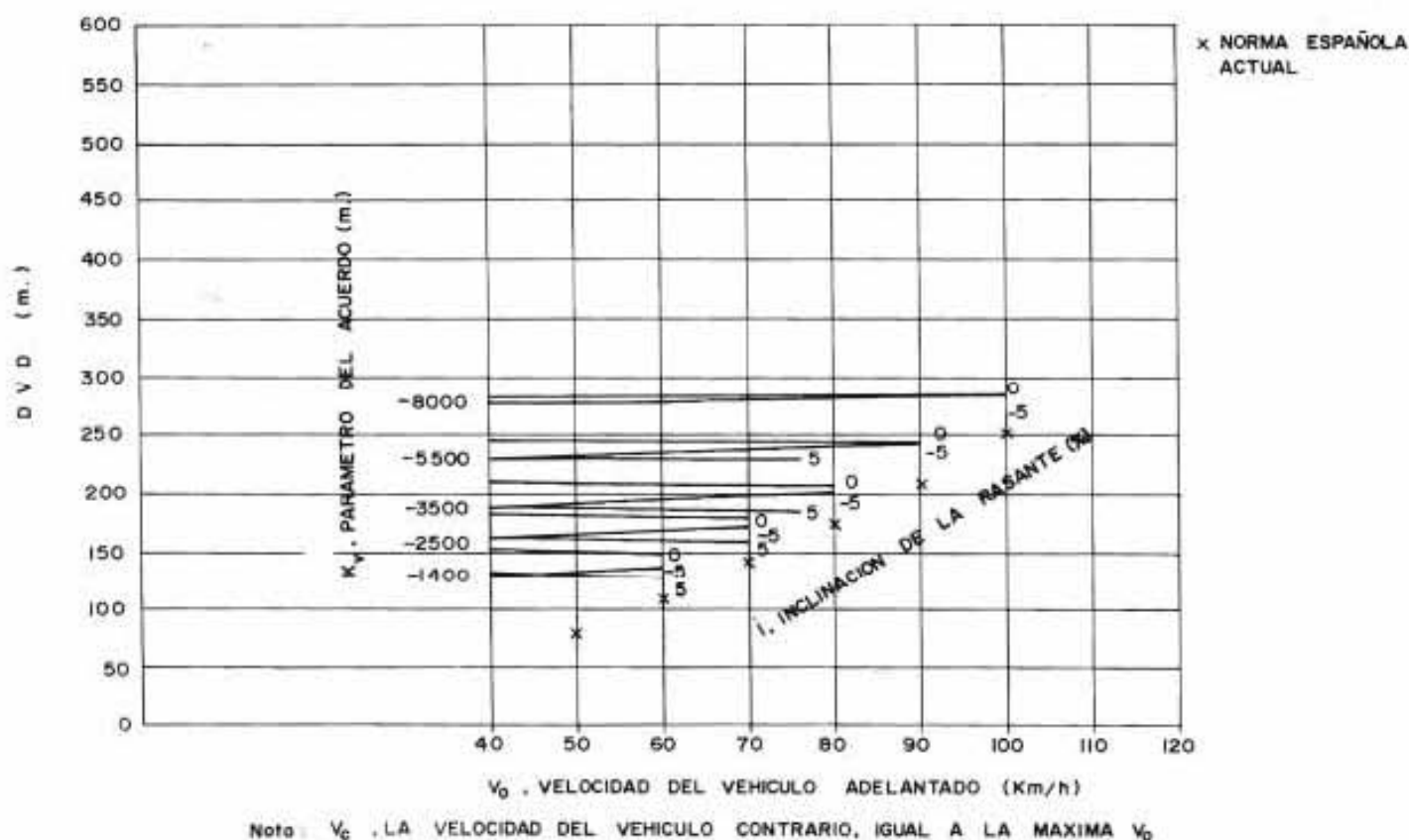


FIG. 13

DISTANCIA DE VISIBILIDAD DISPONIBLE AL PRINCIPIO DE LA PROHIBICIÓN DE ADELANTAMIENTO EN ACUERDOS VERTICALES LARGOS



sea inferior a DVN2. Es decir, que para adelantar a vehículos más lentos que V_c, siendo ésta igual a la máxima permitida, se requiere prácticamente la misma DVD al inicio de la prohibición;

- La también escasa influencia de la inclinación i de la rasante: mayores DVN2 se compensan por también mayores P2;
- Los valores de DVD así determinados son algo superiores a la actual normativa española, es decir, son algo conservadores.

La aplicación al caso de curvas en planta conduce a parecidas consideraciones.

3. Conclusiones y propuesta

Al haberse demostrado así que el actual criterio para fijar el principio de las prohibiciones de adelantamiento resulta prácticamente equivalente a un análisis más detallado, basado en sí-

tuarlo a una distancia P2 del último punto en que se dispone de visibilidad DVN2, lo primero que se concluye es que no es preciso revisar las prohibiciones existentes, las cuales pueden quedarse en su emplazamiento actual, salvo algún caso excepcional. El nuevo criterio si debe emplearse, por el contrario, cuando se trate de nuevos trazados, pues aquí no existe ningún condicionante previo.

Por el contrario, si parece interesante el establecer claramente la zona de preaviso anterior a la prohibición de adelantamiento, cuyo mejor balizamiento insiste el autor en que lo constituyen las flechas de retorno. Esta zona debe iniciarse cuando la DVD baje de la DVN2 correspondiente a la V₀ máxima considerada, con V_c = V₀: para ello se han dado abundantes fórmulas y gráficos.

El final de la prohibición de adelantamiento también parece que debe ser estudiado, comprobando que en el

mismo es DVD > DVN2, tal y como se ha explicado en el apartado 3.9. En caso contrario, debe prolongarse la prohibición, pues no hay espacio para completar un adelantamiento aunque no haya vehículo contrario, ni para desistir si éste aparece.

Por último, la distancia mínima entre el final de una prohibición de adelantamiento y el principio de la siguiente no debe ser inferior al mayor de los dos valores P1 y P2 + P3 (apartado 3.9); de lo contrario, ambas prohibiciones deberán unirse entre sí, pues tampoco hay espacio para adelantar aunque no haya vehículo contrario, ni para desistir si éste aparece.

La revisión de la Norma 8.2-IC sobre Marcas Viales sigue esta orientación en principio, que el autor confía redunde en una mejor información al conductor sobre sus posibilidades reales de adelantar, base de un tráfico más fluido y sobre todo más seguro.

ANEXO 1

DISTANCIAS DE VISIBILIDAD DISPONIBLES

En el presente Anexo se analizan las distancias de visibilidad disponibles (DVD) en diversos casos simples de trazado.

1. Acuerdo vertical convexo

El acuerdo vertical está definido por su parámetro K_v (m, con signo negativo) y por la diferencia algebraica ϑ (adimensional, también con signo negativo) entre las inclinaciones de las rasantes de salida y de entrada.

Se toma como origen de distancias la tangente de entrada del acuerdo vertical. Para un punto situado a una distancia DE antes de dicha tangente, la visual será tangente al acuerdo a una distancia X más allá de la misma, y siempre que la longitud $L = K_v \vartheta$ del acuerdo no sea inferior a la necesaria para que el obstáculo visible esté dentro del mismo se cumplirá:

$$i = i_e + X/K_v$$

$$HE = -X^2/2.K_v$$

$$DE = (1,2 - HE)/(i_e - i)$$

y, siempre que sea:

$$K_v \vartheta \geq X + \sqrt{-2,4.K_v}$$

la curva de la DVD estará dada por las ecuaciones paramétricas en X

$$DE = -1,2 K_v/X - X/2$$

$$DVD = X/2 - 1,2 K_v/X + \sqrt{-2,4.K_v}$$

Cuando, bien porque el acuerdo no sea lo suficientemente largo, o porque el observador se acerque a la tangente de entrada del mismo, el obstáculo visible se sitúa en la rasante de salida (figura A1.2), se cumplirá:

$$HS = -(L - X)^2/2.K_v$$

$$DS = (1,2 - HS)/(i - i_s)$$

y la segunda de las ecuaciones paramétricas anteriores se verá modificada a:

$$DVD = -1,2 K_v.[1/X + 1/(L - X)] + L/2$$

con

$$K_v \vartheta < X + \sqrt{-2,4.K_v}$$

Una vez que el observador rebasa la tangente de entrada del acuerdo, es decir, que

$$X^2 > -2,4.K_v$$

la primera de las ecuaciones paramétricas anteriores se transforma en

$$DE = \sqrt{-2,4.K_v - X^2}$$

y la segunda de las ecuaciones paramétricas anteriores se transforma, respectivamente, en:

$$DVD = 2.\sqrt{-2,4.K_v} \text{ constante, para acuerdos largos;}$$

y

$$DVD = \sqrt{-2,4.K_v + (L - X)^2 - 1,2.K_v/(L - X)}, \text{ constante, para acuerdos cortos.}$$

Cuando el observador se halla sobre la prolongación de la rasante de salida, o sea cuando

$$(L - X)^2 = -2,4.K_v$$

y más allá, la DVD resulta infinita.

2. Curva circular con acuerdos y obstáculo concéntrico

En lo que sigue se considera una curva circular de radio R , definida por el eje de la calzada de dos carriles, y provista de acuerdos simétricos (clotoides) de longitud L no inferior a la mínima correspondiente a dicho radio. Concéntrico a la curva circular hay una pantalla, también circular y de radio $Q < R$, que impide la visibilidad en las condiciones antes aludidas (observador y obstáculo a 1 m. del borde izquierdo de su carril, y a 1,2 m. sobre la calzada). La pantalla suele ser, en general, un talud de desmonte. La curva gira un ángulo Ω (grados centesimales) y no hay falta de visibilidad por motivos de alzado.

2.1. Observador sobre alineación recta anterior.

Si el observador se sitúa a una distancia DE de la tangente de entrada de la clotoide, se cumple siempre que:

$$(DE + X_o).\text{sen } \beta + Q = [R + (R + 1)].\text{cos } \beta$$

Esta ecuación, que es de la forma $a.\text{sen } \beta + b.\text{cos } \beta + c = 0$, se puede resolver con facilidad, resultando:

$$\text{tg } \beta = [a.b + \sqrt{a^2.b^2 - (a^2 - c^2).(b^2 - c^2)}]/(c^2 - a^2)$$

y sustituyendo los valores de a , b y c dados más arriba, se halla el ángulo β en función de DE y de los datos Q , R y L .

En cada caso particular (L , R) el valor de la DVD depende del valor de Q : si está muy próximo a R , impedirá más la visión que si tiende a 0.

2.1.1. Q pequeño

En este caso se supone que el obstáculo dividido se halla en el tramo de curva circular, y su posición se halla definida por ϑ , el ángulo girado a partir del final de la clotoide. Si α es el ángulo de giro correspondiente a ésta, los límites de validez de este caso son:

$$\vartheta \geq 0 \text{ y } \vartheta \leq \Omega - 2.\alpha$$

Se puede plantear la relación de ϑ con β así (figura A1.20):

$$\text{tg } \beta = [1 + R + \Delta R - (R - 1).\text{cos } (\alpha + \vartheta)] / [DE + X_o + (R - 1).\text{sen } (\alpha + \vartheta)]$$

que también es de la forma $d.\text{sen } (\alpha + \vartheta) + e.\text{cos } (\alpha + \vartheta) + f = 0$, con

$$d = \text{tg } \beta; e = 1; f = (a.\text{tg } \beta + b)/(R - 1)$$

con la notación a , b , c definida en el apartado anterior. Por lo tanto, la solución estará dada por:

$$\text{tg } (\alpha + \vartheta) = [-d.e \pm \sqrt{d^2.e^2 - (d^2 - f^2)}]/(d^2 - f^2)$$

que permite hallar $\alpha + \vartheta$ y por ende ϑ . El paso a la DVD es inmediato:

$$DVD = DE + L + \vartheta.R \quad [\vartheta \text{ en radianes}]$$

2.1.2. Q grande

En este caso se supone que el obstáculo dividido se halla en el tramo de clotoide inicial, y su posición se halla definida por su distancia 1 a la tangente de entrada, a la que corresponden en la clotoide unas coordenadas x , y y un ángulo α_1 que son conocidos. Se puede plantear la relación de α_1 con β así (figura A1.21):

$$\text{tg } \beta = [1 + y + \text{cosa}_1]/[DE + x - \text{sen } \alpha_1]$$

con lo que la solución del problema es igual a la del caso anterior, sin más que hacer

$$f = 1 + y - (DE + x).\text{tg } \beta$$

La DVD en este caso está dada por:

$$DVD = DE + 1$$

ANEXO 2

MÉTODOS DE MEDICION DE LA VELOCIDAD EN LA CARRETERA

Siempre que sea posible, es mejor medir la velocidad que estimarla a partir de datos geométricos. La medida exige el conocimiento del tiempo empleado en recorrer el espacio comprendido entre dos puntos determinados; la precisión de esta medida depende de:

- La precisión con que se mida el tiempo,
- La precisión con que se determine la posición exacta de los vehículos,
- La precisión con que se mida la distancia recorrida.

En general, los métodos de medida de velocidades utilizan una base corta, midiendo las velocidades individuales de todos o de una muestra de los vehículos que atraviesan una cierta sección. Estas medidas individuales sirven para estimar la distribución de velocidades del tráfico en esa sección y bajo las condiciones en que se efectuó la medición.

1. Métodos que emplean bases largas

El procedimiento más elemental consiste en cronometrar el tiempo emplea-

do en recorrer una distancia que varía entre 30 a 40 m. para velocidades bajas (menos de 40 km/h.) y más de 100 m. para velocidades superiores a 60 km/h. El número máximo de observaciones está limitado a unas 150 por hora. Si la precisión del cronometraje es de 1/5 de segundo, a 80 km/h. supone un error máximo del orden de un 3% para una base de 150 m., esta precisión puede mejorarse empleando enoscopios —unos espejos a 45° con el eje de la vía, que mejoran la apreciación de la posición de los vehículos—, y mejor aún por el uso de detectores situados en la calzada, que se conectan a un cronómetro accionado eléctricamente. Con este último método se eliminan los errores humanos, pero hay que asegurarse de la correcta identificación de los vehículos, y que no se hayan adelantado dentro de la base.

2. Métodos que emplean bases cortas

Existen métodos bastante precisos que emplean bases de longitud inferior a 2 m., con lo que es casi seguro que el vehículo que primero acciona un de-

tektor sea también el que primero accione su parada. Cuando el número de vehículos rebasa los 400 por hora es aconsejable tomar sólo una muestra del total.

El fundamento de estos métodos es variado: desde un condensador eléctrico que se descarga durante el tiempo en que el vehículo pasa entre los detectores, hasta el conteo del número de ciclos de una señal eléctrica de frecuencia conocida durante el mismo tiempo.

3. Otros métodos

Mención aparte merecen los aparatos de radar, basados en el efecto Doppler de las ondas de radar reflejadas por el vehículo en movimiento, por lo que no emplean base de medida. Existen una reducción de la velocidad aparente del vehículo debida a la situación lateral del aparato, cuya precisión es del orden de 3 a 4 km/h. Cuando la intensidad de tráfico es elevada, es difícil distinguir un vehículo de otro, y el aparato siempre mide la velocidad del más rápido.

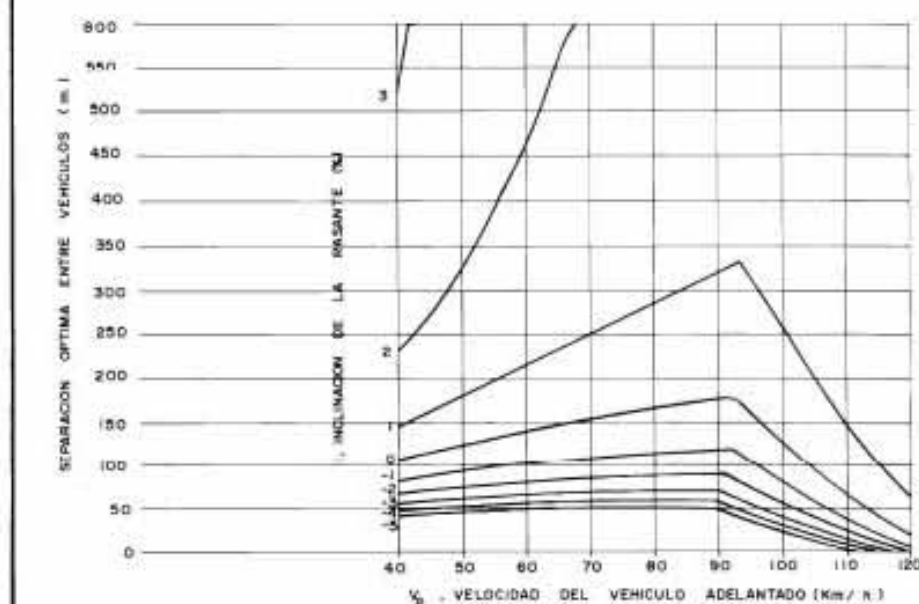
ANEXO 3

EFFECTO DE UNA MAYOR SEPARACION CON EL VEHICULO ADELANTADO

Si el vehículo adelantador mantiene una distancia S_0 entre él y el vehículo adelantado —a la misma velocidad V_0 — mayor que la mínima de 6 m. considerada en el apartado 3.2, puede concebirse el inicio de la maniobra de adelantamiento según un modelo algo distinto del representado en la figura 1 (apartado 3.1).

Según este nuevo modelo, la aceleración se inicia en el propio carril de circulación —y sin siquiera tomarse un período de análisis de la DVD y decisión consiguiente— hasta alcanzarse una velocidad V_1 y V_0 . En este momento, y suponiendo que durante los 3 segundos anteriores se ha procedido al análisis y decisión antes citados, o se sigue acelerando para completar el adelantamiento, esta vez ya en el carril contrario, o se desiste de él en el propio carril, decelerando hasta situarse tras el vehículo adelantado, a la misma velocidad V_0 que él y a una distancia de 6 m.

FIG. A 3.1.
SEPARACION OPTIMA ENTRE VEHICULO
ADELANTADO Y VEHICULO ADELANTADOR



Puede considerarse así a S_0 como la suma de dos distancias D_a y D_d , recorridas respectivamente durante las fases de aceleración hasta V_1 y desistimiento, con tiempos de recorrido T_a y T_d . Los movimientos se consideran uniformemente variados en una rasante de inclinación i (%), y aceleración J_a y deceleración J_d medias (km/h/s).

Se tiene, en este caso, que:

$$T_a = (V_1 - V_0)/(J_a - 0,35,i)$$

$$T_d = (V_1 - V_0)/(J_d + 0,35,i)$$

$$D_a = (V_1^2 - V_0^2)/7,2.(J_a - 0,35,i)$$

$$D_d = (V_1^2 - V_0^2)/7,2.(J_d + 0,35,i)$$

Por otro lado, se considera el movimiento relativo entre los dos vehículos:

$$D_a + D_d = S_0 - 6 + V_0.(T_a + T_d)/3,6$$

de donde se deduce la relación que se cumple siempre entre V_1 y S_0 :

$$(V_1 - V_0)^2 [1/(J_a - 0,35,i) + 1/(J_d + 0,35,i)] = 7,2.(S_0 - 6)$$

Si, en lugar de desistir, se hubiera seguido acelerando hasta completar el adelantamiento, según el apartado 3.5 el tiempo total T_A en ello invertido —desde el inicio de la aceleración— sería

$$T_A = \sqrt{[7,2.R/(J_a - 0,35,i)]}$$

siendo R el recorrido relativo, en este caso

$$R = S_0 + 21 \text{ m.}$$

Por lo tanto, el tiempo T_p en el que el vehículo adelantador invade el carril contrario estará dado por:

$$T_p = T_A - T_a = \sqrt{[7,2.(J_a - 0,35,i) [\sqrt{(S_0 + 21) - \sqrt{(S_0 - 6)/(1 + (J_a - 0,35,i)/(J_d + 0,35,i))}]]}$$

expresión que sólo depende de S_0 , además de los parámetros J_a , J_d e i .

El tiempo T_p mínimo corresponde a un $S_0 = S^*$, obtenido anulando la derivada de T_p respecto a S_0 :

$$S^* = 6 + 27.(J_d + 0,35,i)/(J_a - 0,35,i)$$

que, con los valores anteriormente utilizados

$$J_a = 0,7 + 80/v_0; J_d = 10$$

se representa en la figura A3.1 para diversos valores de la velocidad V_0 del vehículo adelantado, y de la inclinación i de la rasante. Esta S^* es muy importante, pues representa la distancia de seguimiento óptima para minimizar el tiempo de invasión del carril contrario, cuyo orden de magnitud debería ser conocido por los conducto-

res para una más eficaz forma de adelantar.

Las velocidades máximas alcanzadas durante la maniobra de adelantamiento, dadas por

$$V_{\text{máx.}} = V_0 + \sqrt{[7,2.(J_a - 0,35,i).(S^* + 21)]}$$

se limitan en la práctica a un valor del orden de 140 km/h. En estas condiciones, los tiempos T_p obtenidos se re-

FIG. A 3.2.

TIEMPOS DE INVASION DEL CARRIL CONTRARIO PARA LA SEPARACION OPTIMA ENTRE VEHICULOS

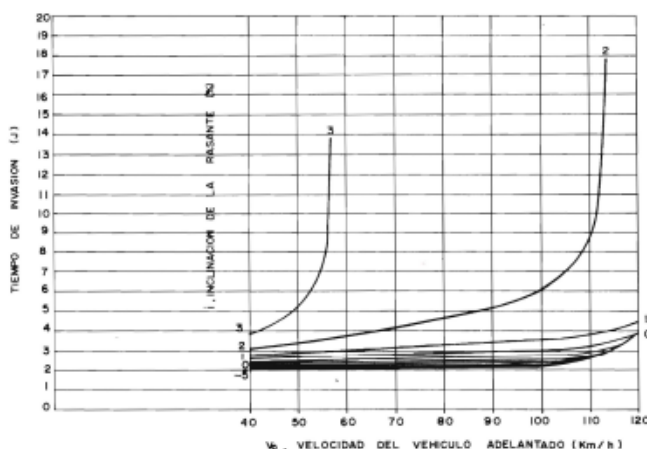
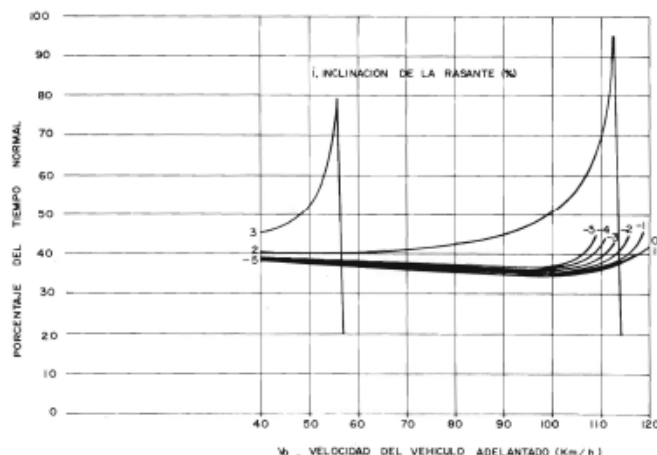


FIG. A 3.3.

RELACION ENTRE EL TIEMPO DE INVASION DEL CARRIL CONTRARIO CON LA SEPARACION OPTIMA Y EL TIEMPO DE ADELANTAMIENTO NORMAL



presentan en la figura A3.2, y la relación entre éstos y los tiempos T_a correspondientes a una maniobra ordinaria se representan en la figura A3.3, en ella se puede ver que la utilización de S^* en vez de 6 m. permite reducir el tiempo de invasión del carril contrario a la tercera parte.

(*) Sandro Rocci es Dr. Ingeniero de Caminos. Jefe del Área de Tecnología de la Dirección General de Carreteras.