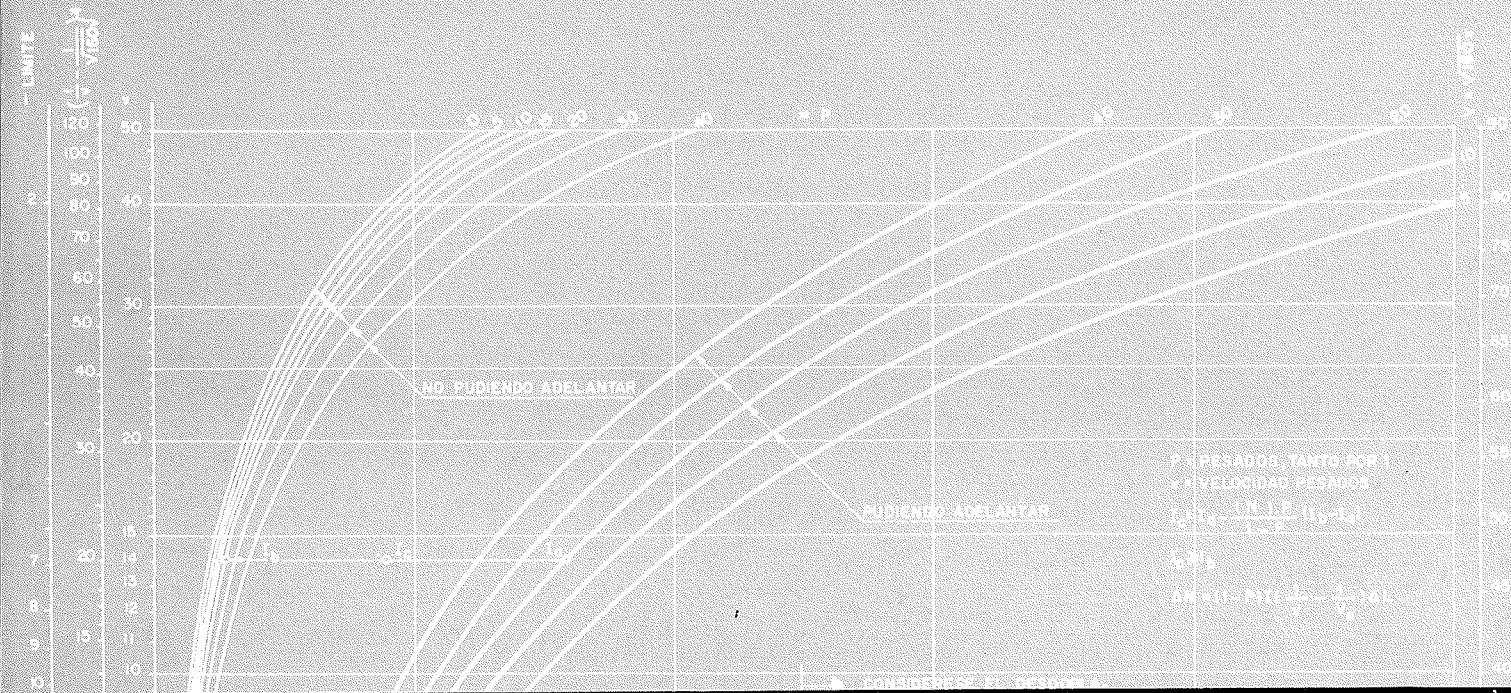
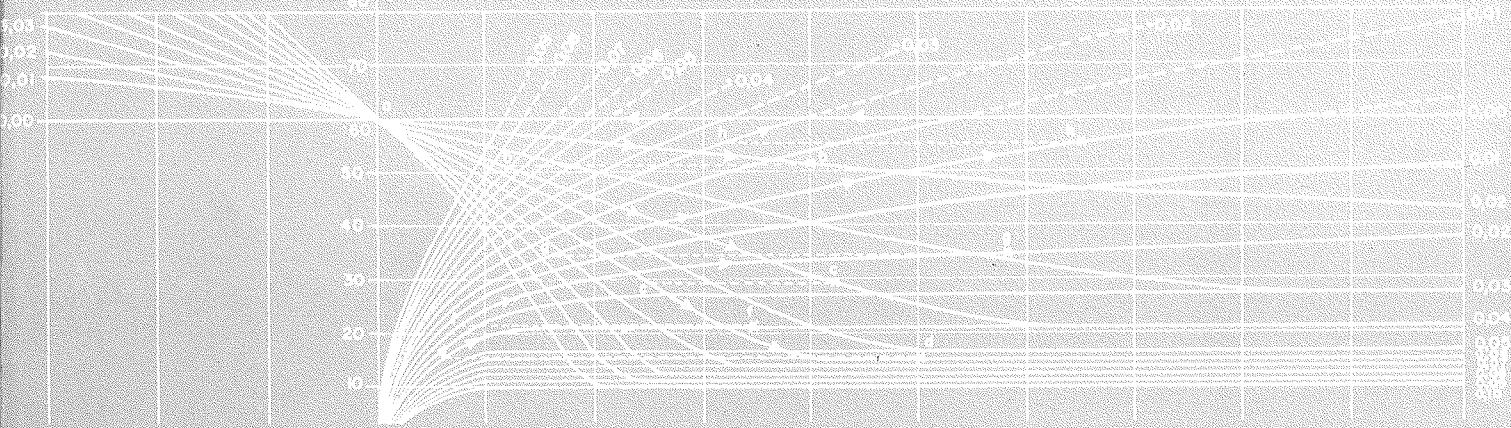


MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
 dirección general de carreteras y caminos vecinales



ESTUDIO SOBRE LA NECESIDAD DE CARRILES LENTOS EN CARRETERAS



MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
dirección general de carreteras y caminos vecinales

ESTUDIO
SOBRE LA NECESIDAD DE
CARRILES LENTOS EN CARRETERAS

JOSE MANUEL ANTON CORRALES
Catedrático de Matemáticas de la E.T.S. de Ingenieros Agrónomos
Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Sección de Proyectos - D. Gral. de Carreteras

1. INTRODUCCION

Al tener que considerar, en la Sección de Proyectos de la Dirección General de Carreteras, cuando debiera ser necesario establecer carriles para vehículos lentos, el autor de estas líneas intentó hallar especulativamente relaciones evidentes entre las magnitudes en cuestión, y cree que puede ser útil publicarlas.

Es de observar que, teniendo cierta prisa en tratar el tema, el autor no pudo ni estudiar exhaustivamente la Bibliografía existente, y aún menos rebuscar entre las Monografías o Tesis que se hacen en los Departamentos de Ingeniería de Tráfico, o buscar por la experiencia, con personal auxiliar dotado de cronómetros, qué leyes teóricas se ajustan a la realidad.

Parece lo más conveniente citar algunas normas y principios vigentes, comentarlas algo, hacer una exposición teórica de las magnitudes en juego y de su posible aplicación, y finalmente buscar una presentación esquemática que pueda reflejarse en una propuesta de norma práctica.

No trataremos del ancho o señalización de los carriles lentos, o de sus elementos, salvo en lo que afecta la disposición de sus puntos inicial y final.

Para unificar tomamos:

- Distancias en km (L, X).
- Velocidades en km/h ($V =$ Velocidad del ligero, $v =$ Velocidad del pesado).
- Intensidades en vehículos por hora, salvo que se emplee el símbolo I.M.D. en que serán por día. ($I =$ intensidad horaria de vehículos ascendentes).
- Tiempo en horas.
- $P =$ Tanto por uno de pesados $= P = p$

Todas las especulaciones que siguen hacen sin decirlo uso constante de aproximaciones estadísticas, tales como:

“La esperanza matemática de una función f es aproximadamente la función f de la esperanza matemática [$E(f(x)) = f(E(x))$], cuando ello parece justificado para llegar a un resultado suficientemente sencillo. (*)

(*) Es válido si el producto de la desviación típica al cuadrado por la derivada segunda de f es pequeño, a partir del desarrollo $E[f(\Delta x + E(x))] = E[f(E(x)) + \Delta x f'(E(x)) + \Delta x^2 \cdot f''/2.]$ porque $E(\Delta x) = 0$, $E(K) = K$.

En parte de los desarrollos que siguen se usa la simplificación de suponer vehículos ligeros y pesados espaciados uniformemente y de velocidades V y v función únicamente del punto de la carretera, es decir constantes para todo ligero y para todo pesado. El ligero se supone a velocidad V si no va en cola y a velocidad v si va en cola.

En algún caso distinguimos entre:

V_r = velocidad real, (definición en apartado 8)

V_a = velocidad media antes del punto considerado.

Se considera una única V , como si los ligeros fuesen a la misma velocidad, siendo necesario para aplicar las fórmulas de esta publicación reemplazar esta V por un valor medio adecuado (V media) de la distribución de velocidades de ligeros no circulando detrás de un pesado (V media es mayor pues que V_a), y como influye sobre todo en el término $(1/v - 1/V)$ habría que tomar medias de $1/V$ tanto en el espacio como en el número de vehículos.

Se observa que el capítulo 7, (Una presentación adaptada), puede leerse prácticamente sin conocer las especulaciones de los capítulos 4 y 5. También el 9. (Una posible propuesta para autopistas).

2. INDICACION SOBRE INSTRUCCIONES VIGENTES

2.1. Generalidades.

La Ingeniería de Tráfico tuvo desarrollo en España con mayor intensidad y unidad de doctrina a partir del esfuerzo de la Dirección General de Carreteras al empezar el Plan actual en 1961 (vease ref. 1), produciendo un cierto número de Tratados (ref. 1), Manuales (ref. 2 y 3 en cuya redacción participó E. Aldama y J. L. Escalera) y Cursos (ref. 5 y 6). Por tanto es necesario referir cualquier nuevo estudio o tentativa de aplicación a la estructura técnica ya en uso.

2.2. 3.1.I.C.

Para carriles para vehículos lentos es de aplicación (*) la Instrucción 3.1.I.C., que indica la necesidad de establecer carril lento cuando la velocidad real de vehículos ligeros es inferior a un valor en función de la velocidad específica dado por el cuadro siguiente:

| | | | | | |
|---------------------------|----|----|----|-----|-----|
| Veloc. específica en Km/h | 60 | 70 | 80 | 100 | 120 |
| Veloc. real en km/h | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |

Esta presentación, sencilla y lógica, tiene el inconveniente de que no indica cómo se calcula la velocidad real. Se podría hacer estimando el Nivel de Servicio (ver

(*) En diciembre 1975.

2.3) y hallando la velocidad correspondiente, en el supuesto de que hay suficientes oportunidades para adelantar.

2.3. Análisis de Capacidad.

De hecho para saber donde se debe construir un carril lento se suele en España (*) seguir la ref. 7 más o menos, inspirada en el H.C.M. (referencia 4, páginas 35, 256, 299), aplicado según la referencia 7 (que contiene también disposiciones constructivas y de señalización).

Se estudia en primer lugar la velocidad de los vehículos pesados en cada punto, de modo parecido al indicado en el apartado 3.

Se comprueba a continuación si se alcanza un nivel de servicio B, C, D o E. La definición de estos niveles puede tomarse de las referencias 1, 2 ó 5; un resumen esquemático de esta definición hace corresponder:

- El nivel B a circulación libre con algunas restricciones debidas a los otros vehículos.
- El nivel C a circulación estable y fluída, estando la velocidad y maniobras de cada conductor bastante obligadas por los demás vehículos.
- El nivel D a circulación cercana a la inestabilidad, con velocidad real tolerable.
- El nivel E a circulación inestable con breves paradas y máximo de capacidad.

Para tener un nivel de servicio hace falta que la Intensidad I_s dividida por la Capacidad C no pase de cierto valor, y que la velocidad real no baje de unos valores. Para carreteras de doble sentido de circulación en una calzada la referencia 2 indica:

| Nivel | A | B | C | D | E | F |
|------------------|----|----|----|----|----|-----|
| Velocidad mínima | 96 | 80 | 64 | 56 | 50 | <50 |

Para carreteras con calzadas separadas, autopistas, carreteras urbanas, etc... las cifras son distintas. (**)

Se admite que a una velocidad (media en el tramo o instantánea en un punto) del vehículo pesado corresponde un coeficiente de equivalencia E_t a efectos de capacidad.

Con el tanto por uno de pesados P se calcula un factor de corrección $1 + P(E_t - 1)$ por el que se multiplica el tráfico de vehículos ascendentes.

(*) También se fijan en una carretera dada rampas a priori, en la Orden de Estudio, a partir de las cuales hace falta carril lento.

(**) Para autopistas las velocidades son (96, 88, 80, 64, 50-55, < 50), para 4 carriles (96, 88, 72, 56, 50, < 50). Las capacidades correspondientes son (700, 1000, 1500, 1800, 2000) y (600, 1000, 1500, 1800, 2000) respectivamente.

Es preciso sumar a este tráfico el tráfico corregido de vehículos descendentes, siendo preciso estimar el coeficiente de equivalencia para vehículos descendentes (entre un valor 2 y el valor para ascendentes).

Esta suma se corrige para tener en cuenta las condiciones viales (ancho de carril y de arcén).

La referencia 2 indica para cada nivel una intensidad límite suma (carreteras de doble sentido, capacidad en ligeros para condiciones de tráfico ininterrumpido):

| Nivel | A | B | C | D | E |
|------------|-----|-----|------|------|------|
| Intensidad | 400 | 900 | 1400 | 1800 | 2000 |

También (pág. 17) indica correcciones según la velocidad específica del tramo. Las cifras del cuadro son para 120 km/h.

En la figura 2 hemos calculado (para coeficiente de equivalencia de pesados descendentes igual a $E_t / 3$) la intensidad de ligeros ascendentes para la que es preciso poner carril lento en función de v , velocidad de vehículo pesado y de P . (La velocidad específica se supone 120).

Este enfoque es muy satisfactorio para pendientes moderadas. Sin embargo lo es menos para fuertes pendientes. Para una pendiente del 10% con el 20% de pesados, caso bastante frecuente en España, $E_t = 105$ (nivel B) ó 150 (nivel C), y el factor de corrección está entre 20 y 30 en sentido ascendente, cifras que dividen más que por 10 la capacidad, cambiándola drásticamente.

Aunque el Highway Capacity Manual (referencia 4) sólo dé ligeras pistas (pág. 101) sobre el sentido de tan altos E_t , parece que lo que busca es asegurar una velocidad real de ligeros que sería de 80 km/h en nivel B y de 64 en nivel C. No parece fácil conseguir en rampas del 10% velocidades reales de ligeros, habiendo 20% de pesados, ni siquiera de 50 km/h sin carril lento a poco tráfico que haya.

Los autores de la referencia 7 han solucionado con fortuna el excesivo rigor del método para pendientes fuertes indicando que en nuestro país no está indicado económicamente el asegurar el nivel B cuesta arriba, debiéndonos contentar con el C o el D. (*).

En lo que precede se entiende que se calcula con intensidades horarias de proyecto (I.H.P., en general sobrepasadas algo así como en 30 horas al año) y con el correspondiente porcentaje de pesados, que es menor en las horas punta que en promedio.

La referencia 7 incluye corrección para autocares, más ágiles que los pesados.

Para carreteras con separación de sentidos sería de aplicación el mismo método para asegurar un nivel de servicio dado en rampa. El caso es interesante porque se están decidiendo actualmente características de Proyecto de autopistas en concesión.

(*) De todos modos, con las teorías americanas por Pajares no podrían pasar, en nivel E, más que la mitad de los vehículos que pasan ahora, lo que prueba su incorrección en pendientes fuertes y en condiciones españolas.

No existe la incertidumbre del coeficiente de equivalencia E_i de vehículos descendentes, pues éstos no interfieren con los ascendentes.

Los cuadros del H.C.M. ref. 4. pág. 258 (cuadro 9.4) permiten tener en cuenta el hecho de que la perturbación de los camiones aumenta con la longitud de la rampa, por deceleración y acumulación de vehículos en el carril derecho, aumentando el coeficiente de equivalencia (*) (ver apartado 2.5).

2.4. Defectos y otras normas.

Todo esto vale para carreteras de pendientes moderadas y con sobradas posibilidades de adelantamiento.

Sin embargo cálculos aproximados en el apartado 5 de este artículo muestran que con 20% de pesados, IHP = 400 vehículos y 10% de pendiente bastan en promedio 333 m de pendiente sin poder adelantar para que todos los ligeros vayan detrás de un pesado. Se explica esto porque esos 40 pesados/hora a 10 km/hora van a 250 m de otros.

En promedio el pesado recorre 250 m para que el siguiente llegue a la rampa y se requieran 250 x 10 m/30 más para que los vehículos entre los dos pesados queden pegados en cola detrás del primero. Los 4 ligeros entonces detrás de cada pesado van a 10 km/h hasta adelantarlo. No es lo mismo que haya 4 ligeros detrás que 0,5 que es lo que habría si se pudiese adelantar (fig. 4).

Por tanto hace falta tener en cuenta la formación de colas detrás de los pesados para disponer los carriles lentos donde faciliten adelantamientos. De paso se obtiene una teoría para carriles apartadero.

La Instrucción francesa de carreteras (ref 9) tiene un anejo en el que tiene en cuenta la pérdida económica de los ligeros detrás de un pesado, con separaciones exponenciales entre vehículos (**). Valora 12,5 F la hora y toma 10% de tasa de interés marginal. En su exposición se refiere a una doctrina francesa sobre el estudio del tráfico distinta a la nuestra. Por ello es un buen precedente pero no se puede copiar para nuestro país.

Otras normas de otros países dan a cada tipo de carretera una velocidad de pesados por debajo de la cual hace falta carril lento. En las Suizas, estimando velocidades para unos 8-9 CV/T en vehículo pesado, esa velocidad anda por el 40% de la específica (ref. 10) según casos. Cuando el pesado alcanza esta velocidad ya no hace falta carril lento.

Es un criterio sencillo de aplicar. No tiene en cuenta ni posibilidad de adelantamiento, ni el porcentaje de pesados.

2.5. Curvas de Nivel de Servicio en Autopista.

A partir del H.C.M. (ref. 4), fig. Pág. 96, y de los cuadros, pág. 258, se pueden estimar unos coeficientes de equivalencia medios, en cierto modo "derivados

(*) Parece ser que son para vehículos de unos 10 C.V./T. como las curvas p. 96, ref. 4.

(**) Vease apartado 8 para separaciones exponenciales.

del H.C.M. para Autopistas". Difieren algo de los de la fig. 1 (son más altos para 50 km/h, más bajos para 15 km/h).

Con ellos hemos trazado las curvas de la fig. 2 bis, teniendo en cuenta un Factor Hora Punta. (*)

3. VELOCIDAD DE VEHICULO LENTO EN RAMPA

Un móvil a potencia constante sigue la ley

$$L - L_o = \frac{-1}{gi} \left[\frac{V^2}{2} + \frac{WV}{igm} + \frac{W^2}{(igm)^2} \right] \text{Ln} \left(1 - \frac{Vigm}{W} \right) \Big|_{v=v_o}^v$$

donde (Sistema Internacional de unidades):

L, L_o abscisas en m que corresponden a velocidades V, V_o (en m/s).

i = pendiente

g = 9,81 m/s²

W = potencia (vatios) (1 C.V.=75.g vatios).

m = masa (kg).

Esta ley es cierta por debajo de 60 km/h. A 80 km/h la resistencia del aire absorbe gran parte de la potencia de 6 CV/T de un vehículo pesado, pero la potencia necesaria para penetrar en el aire decrece con el cubo de la velocidad y se hace pronto despreciable por debajo de 80 km/h.

Los camiones se mueven según leyes más complicadas por ir cambiando o variando gases el conductor, y según su estado de carga. Sin embargo para 6 CV/T, poniendo una potencia media efectiva un poco más de la mitad, salen las curvas de la figura 3 de la fórmula anterior, y estas curvas se parecen mucho a las de las referencias 1, 4, 11, que tienen en parte comprobación experimental.

Estas curvas suponen conocida la velocidad inicial (60-69 km/h si no hay razón evidente para poner otra) y pendiente constante. Jugando con la figura 3 es fácil integrar por tramos en curvas de acuerdo verticales, en los que i no es constante: parece útil tomar tramos en las que la pendiente varíe el 1% entre extremos, suponiendo en ellos una pendiente media y hallando sucesivamente la velocidad final en esos tramos. En la figura 3 se presenta un ejemplo.

Con ello se obtiene un diagrama de velocidades de vehículos pesados a lo largo de las rampas, v en función de L, necesarias para el estudio de la necesidad de carriles lentos.

Esta curva de la fig. 3 se parece a la de la figura superior de la fig. 5.1 de la ref. 4 que suponemos que tiene comprobación experimental; está propuesta para 6 C.V./T.

En un trabajo interno de la Dirección General de Carreteras, J. García de Castro, siguiendo una Tesis de C. Casaseca, supuso 8 C.V. eficaces por tonelada

(*) Es decir, para niveles (B,C,D) se tomaron intensidades de (1000, 1300, 1550) por carril, interpretando la tabla 3.1. de ref. 2.

($gm/W = 1/0,6$) y $i + 0,02$ en lugar de i para tener en cuenta rozamientos. Sale la curva 3 bis que se parece a la de la fig. 5.1 inferior que la ref. 4 propone para 10 C.V./T. Podría ser adecuada para autopistas en España en el futuro, tal vez con alguna reducción en los 8 C.V./T. Lo que sí parece admitido es que por autopista la relación potencia/ peso será mayor que en carretera.

La figura 3 bis indica la propuesta de la referencia (10) suiza, reproducida por la comisión internacional IV (mixta ATR francesa, FG alemana, VSS suiza) en un Informe comparando instrucciones; está publicado en particular en la referencia 14 ese informe.

Según medidas someras recientes (A. Puente por encargo de M. Gullón) de tarjetas de transportes, parece que la moda de la distribución de los vehículos de más de 10 T anda por los 7 C.V./T. por tanto entre las figuras 3 (para 6 C.V./T.) y 3 bis (para 8 C.V./T.). Por ello tal vez sea oportuno usar la 3 bis bis para España, para ajustarse a la situación futura.

4. PRINCIPIOS DE OPTIMIZACION ECONOMICA

Para tener un criterio objetivo es bueno disponer unos mínimos de calidad ("standarts") y plantear una optimización económica. Si los supuestos de ésta son muy nebulosos podemos quedarnos después sólo con niveles de calidad o de servicio, pero conviene estudiar la optimización para ver como influyen cuantitativamente los factores (*).

Es inmediato comparar:

(365. Tat. Ce) con (id. Cc)

Tat = tiempo total (en horas por día por kilómetro de carretera) que se ahorrarán los ligeros en el tramo al establecer carril lento.

Ce = Valor de la hora de ligeros (ptas/h).

Cc = Coste suplementario de establecer el carril lento; en ptas. por kilómetro.

id = Interés de la inversión.

Cuando el primer término sea mayor que el segundo, diremos que hay que establecer carril lento. Como indicación básica tomamos:

Ce = 100 ptas/h

Cc = 4 millones/km

id = 10 %

Lo que da un valor crítico de Tat de: 11 h. de ligero ahorradas al día en cada kilómetro de carril lento.

(*) El Estado intenta maximizar la utilidad o bienestar social, y las Obras Públicas contienen muchos efectos indirectos.

Para mejorar esta estimación se puede:

- a) Considerar C_c en cada caso con cuidado.
- b) Evaluar C_e por métodos marginales (estudio de preferencias autopista de peaje-carretera libre).
- c) Estudiar los casos de carril lentos existentes, y tratar de correlacionar $Tat = id C_c / 365 C_e$ con la bondad aparente de su funcionamiento.
- d) Usar las técnicas de teorías de inversiones.

4.1. Teorías de inversiones.

A tráfico estacionario, se pueden dar fórmulas sencillas:

- $id = 365 Tat C_e / C_c$ es la tasa de interés interna de la inversión con año horizonte infinito.
- En Q años de horizonte los beneficios son:

$$365 Tat C_e \left(\frac{-(1-id)^Q + 1}{id} \right) \text{ a comparar con } C_c.$$

Se reemplaza pues C_c por $id / (1 - (1-id)^Q)$.

- Si en Q años horizonte queremos una relación beneficios/coste $\geq r$ a un interés id (hacia 10%) de descuento, la comparación crítica es:

$$\frac{365 Tat C_e \left(\frac{-(1-id)^Q + 1}{id} \right)}{C_c} \text{ con } r, \text{ o sea reemplazando } id \text{ por } r \cdot id / (1 - (1-id)^Q).$$

A tráfico creciente hay que hacer cálculos especiales, pues Tat crece más que linealmente con el tráfico. Puede interesar conocer en qué año se justifica la inversión; a menudo bastará con decir "cuando $365 Tat C_e / C_c$ sea igual o mayor que $(r \cdot id)$ " que es lo que sale con tasa de actualización id , y relación beneficios/costes r crítica (y tráfico creciente).

En definitiva basta con considerar un Tat crítico obtenido para cada caso según $C_c \cdot id / C_e \cdot 365$ (estimando id según convenga), que es del orden de 11 horas/día/km.

4.2. Cálculo de Tat con una I.H.P.

El tráfico horario a lo largo del día no es constante (vease ref. 1, variación diaria, semanal, etc.). Se conoce aceptablemente o se estima la I.M.D. y el porcentaje 100 p de pesados medio al día; usaremos tantos por 1 por comodidad.

Sería preciso descomponer el día (semana, mes) en tramos de intensidad horaria I conocida, calcular el Tat (horas perdidas) en función de intensidades horarias $f(I_t)$ y sumar las Tat a lo largo del día, algo así como: $d(Tat) = f(I_t) \cdot dt$.

$$T_{at} = \int_{\text{en día}} f(I_t) dt$$

$$\text{Si hacemos } T_{at} = f\left(\frac{\text{I.M.D.}}{n'}\right) n'$$

como dT/dt crece más que linealmente con I_t en la práctica, T_{at} es función decreciente de n' . Se comprueba en nuestro caso que $n' = 1$ da valor excesivo, $n' = 24$ valor pequeño (todas las horas con el mismo tráfico). En cada caso existe un n' que es exacto según f y el reparto de tráfico; no habiendo hecho estudios estadísticos al respecto con bases experimentales nos quedamos con $n' = 10$ para poder seguir; en efecto el cociente I.M.D./I.H.P no parece mal, aunque debe de ser alto porque corresponde a un momento poco frecuente, y lo tomamos algo menor.

Así se dimensionaría la carretera como si fuese para una I.H.P., igual a I.M.D./10 a efectos de carril lentos sin que haya inconveniente grave en usar I.H.P. = I.M.D./15.

4.3. Crítica.

El valorar el carril lento por el tiempo de ligeros que ahorra no debe de ser satisfactorio más que para pérdidas de tiempo grandes, o sea pendiente e intensidades de tráfico fuertes. Para pendientes pequeñas (3%) nos van a salir unas velocidades reales tan favorables que entran dentro de los niveles de Servicio B o C (80 ó 64 km/h); evidentemente no tiene sentido el sobrepasar estos niveles en rampa poniendo carriles lentos, sólo por aumentar algo la velocidad. Es debido a que para I.M.D. fuertes (> 4000) el ahorro sumado de tiempo es tan grande que es preciso valorar también el mayor gasto de combustible, los límites técnicos de velocidad y el considerar que en otros sitios hay niveles de servicio inferiores. Intensidades fuertes requieren estudiar una buena carretera en todos sus aspectos, no sólo carriles lentos.

4.4. La optimización global.

Implícitamente supusimos que en una rampa dada se discutía el poner o no carril lento. Hay casos en que puede proceder el desviar o construir la carretera con menores rampas; también veremos que son en parte alternativos carriles lentos y posibilidades de adelantamiento.

En el supuesto de que el proyectista pone en una carretera una pendiente óptima (optimizando tal vez costes de construcción más explotación), puede haber casos en que se planteen dilemas tales como:

- poner pendientes del 3% sin carril lento
- poner pendientes del 6% con carril lento.

En general el terreno impondrá la solución más económica (mínima longitud de traza pasando por ciertos puntos obligados con ciertas limitaciones de pendientes) dentro de unos niveles, y el establecimiento de carriles lentos se podrá hacer para un eje prácticamente obligado.

La suboptimización de poner el carril lento donde T_{at} sea mayor que los valores críticos conduce entonces a una optimización global de la carretera; esta optimización global es muy complicada en general porque intervienen muchos factores. Un buen proyectista tiende a ella al proyectar espontáneamente dentro de unos mínimos técnicos.

5. TEORIA DE COLAS (DE VEHICULOS LIGEROS DETRAS DE VEHICULOS PESADOS).

5.1. Ecuación de la probabilidad que da T_{at} .

Las aproximaciones que siguen no valen si las velocidades v del pesado y V del ligero ascendentes no son claramente diferentes porque entonces son relativamente importantes los adelantamientos de ligeros entre sí y son mejores las teorías del Nivel de Servicio indicadas en las referencias (1) y (4). En el capítulo 4.2 de ref. (1) se indican referencias de teorías matemáticas de tráfico en que todo varía con interacción de colas de vehículos en ambos sentidos, etc...

Sea I la intensidad horaria de vehículos ascendentes, p el tanto por uno de pesados, I' la intensidad horaria de vehículos descendentes, V' la velocidad de ligeros descendentes, i la pendiente, L' la longitud de adelantamiento.

Para estimar $T_{at} = f(I_t)$ hacemos la primera división probabilista de acontecimientos respecto a los vehículos pesados, tomando dt de tiempo, y un tramo ΔL (ΔL y dt son independientes como incrementos).

Expresando que:

Tiempo perdido en ΔL en esa hora = [diferencia de tiempos de recorrido entre ligero libre y retrasado] . [Integral de tiempo de probabilidad de que pase en dt un pesado en el punto L , por el número de ligeros detrás de él]

$$= \Delta L \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right) \int I p \left(\sum_{n=0}^{\infty} N P_N \right) dt = \Delta L f(I) \text{ a lo largo del día.}$$

En esta fórmula $S_L = \sum_{n=0}^{\infty} N.P_{N,L}$ es la longitud media de las colas en L y $P_{N,L}$ la probabilidad de que haya N ligeros detrás de un pesado en L .

Por tanto, según 4.2.,

$$T_{at} = n' \int f \left(\frac{I.M.D.}{n'} \right) = \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right) . I p . S_L . n'$$

donde $(n'I)$ es la I.M.D. de vehículos ascendentes y S_L se calcula en función de

$$I = \frac{I.M.D.}{n'}$$

5.2. Cálculo de S_L

Si logramos estimar,

- Probabilidad de adelantar mientras el pesado va de L a $L + \Delta L = \mu$.
- Probabilidad de ser alcanzado el pesado por un ligero en ese intervalo $= \lambda$.
- Y tomamos ΔL de modo que pueda adelantar un único vehículo, haciendo unas hipótesis implícitas de independencia para que valga la teoría de colas con llegadas y servicios "poissonianos", (siguiendo procesos de Poisson) queda el resultado clásico de teorías de colas (valen aunque λ y μ sean función de N).

$$(1) \quad P_{N,L} = \lambda P_{N-1,L-\Delta L} + P_{N,L-\Delta L} (1 - \lambda - \mu) + \mu P_{N+1,L-\Delta L}$$

(pues se tienen n vehículos en cola en el pesado en L al recorrer ΔL desde $L - \Delta L$ si en $L - \Delta L$:

- había $N - 1$ y llega un nuevo vehículo
- había $N + 1$ y adelanta uno
- había N y no estamos en un caso anterior.)

Si $N = 0$, no pueden adelantar y queda:

$$(1') \quad P_{0,L} = P_{0,L-\Delta L} (1 - \lambda) + \mu P_{1,L-\Delta L}$$

Por sumas de 0 a ∞ en la primera ecuación se demuestra que (*):

$$(2) \quad S_L = \sum_0^{\infty} N \cdot P_{N,L} = S_{L-\Delta L} + (\lambda - \mu) + \mu \cdot P_{0,L-\Delta L}$$

Es decir, el número medio de vehículos se disminuye en los vehículos que adelantan $\mu (1 - P_{0,L})$ (si no hay cola no adelantan) menos los que llegan.

Cuando hay visibilidad de adelantamiento es de esperar que $\mu - \lambda > 0$; si no, no vale la teoría (ver 5.4.4.).

En caso contrario $\mu = 0$ y queda si no se puede adelantar,

$$(2') \quad S_L = S_{L-\Delta L} + \lambda$$

$$(*) \quad \sum_1^{\infty} N P_{N,L} = \sum_1^{\infty} \lambda (N - 1) P_{N-1,L-\Delta L} + \sum_1^{\infty} \lambda P_{N-1,L-\Delta L} + \sum_1^{\infty} N (P_{N,L-\Delta L}) \cdot (1 - \lambda - \mu) \\ + \sum_1^{\infty} (N + 1) \mu P_{N+1,L-\Delta L} - \mu \sum_1^{\infty} P_{N+1,L-\Delta L}$$

$$S_L = \lambda S_{L-\Delta L} + \lambda + S_{L-\Delta L} (1 - \lambda - \mu) + \mu S_{L-\Delta L} - \mu P_{0,L-\Delta L} - \mu$$

es decir, la longitud de la cola se incrementa en los vehículos que llegan.

Como afortunadamente el sumatorio $\sum_0^{\infty} N \cdot P_{N,L}$ quita causas de incertidumbre al hallar medias, ha salido un resultado sencillo e intuitivo, por tanto válido, por lo menos como indicación.

Si el proceso (referido a la longitud de cola en función de L) se hace estacionario siendo λ y μ constantes (es decir, como veremos, si v , V son constantes, o sea en largas pendientes uniformes):

$$S = \frac{\lambda}{\mu - 1} \quad \text{si se puede adelantar.}$$

Se deduce ésto de las ecuaciones anteriores (1) y (1') que, si $P_{N,L}$ no dependen de L, tienen por solución

$$P_N = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^N \cdot \left(\frac{\mu - \lambda}{\mu}\right)$$

$$P_0 = \frac{\mu - \lambda}{\mu}$$

$$S = \sum_0^{\infty} N \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^N \cdot \left(\frac{\mu - \lambda}{\mu}\right) = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

Si no se puede adelantar, S_L no puede crecer más de $(1 - P)/P$ que es lo que se obtiene si todo ligero va en cola detrás de un pesado; ésto conduce en 5.4.4. a correcciones en los resultados (poniendo λ función de S).

Conocidas λ , μ y tomando intervalos ΔL podemos con las ecuaciones de S_L y $P_{0,L}$, que se convierten en sistema en diferencias finitas, trazar el gráfico de S_L , longitud media de la cola, a lo largo de la carretera. Con el gráfico de v a lo largo de la carretera se podrá trazar el de

$T_{at} = n' I_p S_L \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)$ y compararlo con el 11h/día/año en cada punto (ver 4.3).

5.3. Estudio simplificado de S_L

Al trazar S_L se observa (y se puede demostrar según las ecuaciones anteriores) que si las pendientes no varían muy bruscamente

A) en pendientes uniformes largas, asintóticamente

- S_L vale $\lambda / (\mu - \lambda)$ si se puede adelantar.
- S_L vale $(1-p)/p$ si no se puede adelantar.

B) Al cambiar de condiciones (pendiente o posibilidad de adelantamiento).

- S_L decrece $(\mu - \lambda)$ en ΔL si se puede adelantar.
- S_L crece λ si no se puede adelantar.
- S_L se hace 0 mientras hay carril lento.

lo que permite trazar S_L aproximado, con errores tolerables debidos a:

Si S_L es pequeño, ello es porque es probable que N sea pequeño y $P_{o,L}$ es grande, pues de (2) resulta

$$\mu - \lambda - \mu P_{o,L} \simeq 0 \text{ o sea } P_{o,L} = (\mu - \lambda) / \mu$$

A medida que S_L decrece, $P_{o,L}$ va haciéndose más grande y S_L deja de decrecer $(\mu - \lambda)$ en ΔL hasta llegar al valor asintótico $(\mu - \lambda) / \mu$. Ello puede comprobarse integrando las ecuaciones (1) y (2) en función de L , para valores $L_0 + n, \Delta L$ con N entero: es un sistema infinito de ecuaciones en diferencias finitas cuya integral son exponenciales decrecientes en n más como términos constantes, la solución permanente anterior.

Si S_L no es pequeño, $P_{o,L}$ lo es, y entonces aproximadamente

$$S_L = S_L - \Delta L + (\lambda - \mu)$$

b) Por análoga razón se justifica por la fórmula 2' la segunda regla de B). Sin embargo no existen más de $(1 - p)/p$ ligeros por pesado, y cuando una parte importante de ellos está detrás de un pesado, no incrementan las colas. Es decir λ decrece cuando S_L aumenta, lo que se utilizará en 5.4.4. para mejorar los resultados.

Si no se puede adelantar se ha de llegar pues al límite asintótico

$$(1 - p)/p = S \text{ con } \lambda = 0$$

c) $\lambda, \mu, \Delta L$ son función de la pendiente (a través de v y de l y p)

Estas causas de error tienden a redondear la curva de S_L , que según lo que precede se aproxima por rectas (figuras 5, 6, 7).

5.4. Estimación de λ, μ y ΔL

5.4.1. Estimación teórica.

Es preciso introducir más hipótesis sobre el comportamiento del tráfico; y por tanto estas estimaciones, que son groseras, pueden ser objeto de mejora, especialmente por estudio experimental.

ΔL = espacio medio recorrido por un vehículo pesado mientras se le adelanta (desde que un ligero empieza a adelantar hasta que puede empezar el siguiente si no vienen vehículos de frente).

Δt = tiempo correspondiente (o sea $\Delta L/v$).

$L = L'v/(V - v)$. Siendo L' la distancia media que tiene que recorrer el ligero respecto al pesado para que empiece a adelantar otro ligero.

Se puede mejorar ésto con estimaciones de la capacidad de aceleración, etc... que figuran en la literatura sobre el tema.

Mientras el pesado recorre ΔL en Δt , llegan en promedio.

$$\lambda = \frac{l(1-p)(V-v)}{v} \Delta t \text{ ligeros.}$$

Combinando con lo anterior:

$$\lambda = \frac{I(1-P) L'}{V}$$

V = es la velocidad de los ligeros; en todo rigor sería una velocidad media antes del punto L^* .

Supongamos el tiempo dividido en intervalos Δt independientes, en cada uno de los cuales un vehículo puede intentar adelantar y lo hace si hay espacio libre suficiente. (De hecho los intervalos son dependientes, lo que haría más irregular la longitud de las colas). La probabilidad de encontrar una longitud L'' de adelantamiento libre entre vehículos descendentes, de tráfico I' y velocidad V' , suele representarse exponencialmente por

$$\mu = \exp\left(-\frac{L'' I'}{V'}\right).$$

Así se consigue que el valor medio del intervalo entre vehículos tenga el valor V'/I' = velocidad media/intensidad media.

5.4.2. Estimación numérica.

a) de $\mu \cdot V'$ anda por 100 km/h, L'' por 400 m = 0,4 km y queda:

$$\mu = e^{-\frac{I'}{250}}$$

Especulativamente pues, el denominador 250 puede ir entre 250 y 360, siendo posibles valores altos de 360, por ir también en colas los vehículos de frente.

b) de λ . Si suponemos (**):

a)

$$\Delta t = 6 \text{ segundos} = \frac{1 \text{ hora}}{600}$$

$$\lambda = \frac{1(1-P)(V-v)}{V 600}$$

b) También podemos suponer una hipótesis distinta:

$$\frac{V-v}{V} \cdot \Delta t \text{ vale } 6 \text{ segundos}$$

por crecer el tiempo de adelantamiento proporcional a $V/(V-v)$ y saldría:

(*) Como V influye en la tasa de llegadas (vehículos/hora) e independientemente en Δt , el hallar λ con V aleatorio no es sencillo.

(**) Por ser $\lambda = \frac{I(1-P)(V-v)\Delta t}{V}$

$$\lambda = \frac{l(1-p)}{600} \text{ (vehículos en } t \text{ ó } 600 \text{ en } L).$$

c) de ΔL . Le corresponde respectivamente ($\Delta L = v \cdot \Delta t$):

a)

$$\Delta L = \frac{v}{600}$$

b)

$$\Delta L = \frac{V}{600} \frac{v}{v-V} = \frac{1}{600} \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right)^{-1} =$$

$$\Delta L = \frac{1}{600} \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right)^{-1} \text{ (kilómetros).}$$

5.4.3. Algunas consecuencias cualitativas.

La precisión de las estimaciones de 5.4.2. a pesar de ser grosera, permite observar que:

a) μ decrece exponencialmente con l' :

$$\text{Para I.M.D.} = 5000, \mu \text{ anda por } 0,25 \text{ tomando } l' = \frac{5000}{2.10} \text{ sale } \exp.(-l'/250) = \exp.(-250/250).$$

Para valores superiores de I.M.D. es difícil encontrar huecos para adelantar (o sea se pasa a nivel C en llano).

b) ΔL es proporcional a v . En rampas el crecimiento ($\lambda / \Delta L$) por km del número de vehículos en las colas si no se puede adelantar, o su decrecimiento ($(\mu - \lambda) / \Delta L$) se hace muy rápido, siendo por ello muy molestas las rampas donde no se puede adelantar. En rampas con unos cientos de metros de longitud se acumulan todos los ligeros detrás de un pesado (*), (en $vV/(lP(V-v))$ kilómetros), en llano necesitan kilómetros (con $l = 200$, $p = 0,20$, $v = 10$ km/h en pendiente y 60 en llano así como $V = 60$ en pendiente y 80 km/h en llano, salen 300 m en pendiente y 6 km en llano). Por eso tiene importancia considerar las posibilidades de adelantamiento junto con las vías lentas.

c) λ y μ no dependen de v , pues son incrementos de colas en el intervalo en el que puede adelantar un ligero. ΔL es proporcional a v más o menos, en ΔL llegarían un número no variable con v de ligeros (o proporcional a $(V-v)/V$) y adelantarían un número constante (o proporcional a $(V-v)/V$) de vehículos. La longitud de la cola $S = \lambda / (\mu - \lambda)$ no dependería de v en una carretera en la que se pueda adelantar libremente (en la realidad debe crecer al decrecer v , pero en modo limitado, por ser más irregular el

(*) Esta longitud es aleatoria, con esa media aproximadamente.

número de ligeros detrás de un pesado en rampa). Las colas se hacen al no poder adelantar en rampa.

5.4.4. Estimación de S_L (colas en rampa indefinida si no se puede adelantar).

En la figura 4 se incluye una estimación de S_L . Los tanteos con

$$S_L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

mostraron que al crecer $I = I'$, λ llegaba a sobrepasar μ . Ocurre que si S_L es grande y es fracción importante de $(1-P)/P$, la velocidad media de los ligeros decrece porque, detrás del punto considerado, los ligeros van detrás de los pesados.

La fórmula ($I = I'$)

$$S_L = \frac{\frac{I(1-P)}{600}}{e^{-I'/250} - \frac{I(1-P)}{600}}$$

proviene que la cola se forma según como las llegadas

$$\frac{I(1-P)}{600}$$

sean menores que los adelantamientos

$$e^{-I'/250} \text{ en } \Delta t.$$

La transformamos en:

$$S = S_L = \frac{(I(1-P) - SPI)/750}{(1-I/2000) e^{-I'/360} - (I(1-P) - SPI)/750}$$

suponiendo que:

- De los ligeros $(I(1-P))$ disponibles, SPI circulan a velocidad v detrás de un pesado y los demás $(I(1-P) - SPI)$ a velocidad V libremente.
- El factor $(1-I/2000)$ tiene en cuenta que por encima de cierta intensidad a veces no se puede adelantar porque una cola alcanza a la siguiente. Con $I = 2000$ v/h se supone que la carretera quedaría ocupada por vehículos dando factor nulo.
- Los coeficientes 600 y 250 se reemplazan por 750 y 360 porque los resultados parecen mejores (menos pesimistas respecto a las teorías de Nivel de Servicio). - n' se ha tomado igual a 10 (I es I.M.D./20).

Es una fórmula que se comporta bien para I grande, dando (colas de $(1-P)/P$ menos los que adelantan); al ser función λ del número N de media S de vehículos, alguno de los razonamientos de la teoría de colas pierden exactitud, por lo que la fórmula queda como empírica a comparar con la experiencia. Cabe especialmente un ajuste de los tres coeficientes 750, 2000, 360.

Para trazar la figura 4 se ha despejado S , y se ha tomado la raíz positiva de la ecuación:

$$S^2 (PI) + S (750 A e^{-\frac{I}{360}}) - I + 2PI + I (P-1) = 0 \quad (*)$$

de segundo grado obtenida de la fórmula anterior.

El resultado representa dando (fig. 4).

- En abscisas $10I(1-P)$ ($20I(1-P)$ también). $10I$ para tener el tráfico diario ascendente, $20I$ el total en ambos sentidos (es la I.M.D. usual), y el factor $(1-P)$ para que las curvas no se crucen y tiendan a la bisectriz del primer cuadrante si I crece. Rectas $y = (1-P)x$ permiten tener en cuenta el factor $(1-P)$ en el mismo gráfico, en combinación con la $y = x$.
- En ordenadas $10IPS$. Es el número de vehículos ligeros totalmente retrasados al día si se puede adelantar; si no se puede tiende a la bisectriz $y = x$. Es el número que entra en la comparación de 5.1 ($n' = 10$):

$$T_{at} = 10IPS \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right)^{-1} \text{ con } \frac{id Cc}{365 Ce}$$

o con 11 h/km y año.

Aunque los resultados sean aproximados (S puede depender de v y de V) se ha obtenido una separación de variables, I y P por un lado, v y V por otro, las económicas por un tercero.

El crecimiento de las colas puede estimarse con los correspondientes (adaptados a la fórmula de S):

$$\Delta L = (v/750) \cdot \frac{V}{V-v}$$

$$\lambda = (I(1-P) - SP)/750$$

$$\mu = \left(e^{-\frac{I'}{360}} \right) (1-I/2000)$$

(*) $A = 1-I/2000$

5.4.5. Observaciones.

En todo lo que precede hay que suponer que el tiempo perdido acelerando está englobado en Tat .

Los resultados pueden subestimar los perjuicios que supone el tener que adelantar a un camión en rampa cuando se puede. Podría corregirse con S_L mayores y pidiendo mucha longitud de visibilidad para decir que existe posibilidad de adelantamiento en un punto.

Observese que 10IPS de la figura 4, para l pequeño se aproxima por (*):

$$\frac{10l^2 P (1-P)}{750 e^{-\frac{l}{360}}}, \text{ o sea por}$$

$$\frac{10l^2 P (1-P)}{750},$$

que es proporcional al producto del número de ligeros l $(1-P)$ y de pesados.

$$IP. [10IPS \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right)]$$

tiempo perdido. se aproxima por

$$\frac{10l^2 P (1-P)}{750} \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right) \text{ que es}$$

$$10l^2 P (1-P) \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right)$$

aproximación del número de adelantamiento por kilómetro y día, multiplicado por $1/750$, tiempo de adelantamiento en horas(**).

Por ello S_L puede tener en cuenta no sólo el tiempo perdido sino el perjuicio de tener que adelantar.

Si l es grande, S_L crece por el término $e^{-l/360}$ al no poderse efectuar adelantamientos a veces.

(*) Resolviendo la ecuación de segundo grado en 5 de 5.4.4. y tomando los términos más significativos.

(**) Para que sea número de adelantamientos, sería más preciso poner una V_a media si V es aleatoria.

5.5. Necesidad de carril lento.

No obstante las imprecisiones de la aproximación por rectas de S_L en 5-3, como se compensan diversas incertidumbres, se puede saber por análisis marginal donde y en qué límites está justificado disponer carril lento.

Para ello, a través de la estimación de v (según 3) y de V , se supone trazada en ordenadas la curva.

$$S_c = (S, \text{crítico}) = \text{id.} C_c / \left[365 C_e n' l p \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right) \right]$$

en función de la abscisa L , así como las $S = (1-p)/p$ y la $S = \lambda/(\mu - \lambda)$.

También se puede trazar S_L según 5.3, a partir de $\lambda, \mu, \Delta L$, estimadas según 5.4. Se observa que S_L depende de que antes haya carril lento y es 0 si lo hay en el punto. Por ello la curva de S_L será un resultado de la decisión de poner carriles lentos.

5.5.1. Se denomina **punto crítico** de abscisa L crítica aquél en el que S crítico

$$S_c = \text{id.} C_c / \left[365 C_e n' l p \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right) \right]$$

alcance:

- $(1-p)/p$ si no se puede iniciar adelantamiento en ese punto.
- $(\lambda/(\mu - \lambda))$ si se puede.
- un valor intermedio si es la frontera de zonas en las que se puede iniciar adelantamiento.

5.5.2. Por definición se dice que en un punto está “justificado poner carril lento” si $S_L > S$ crítico. Esta nomenclatura se adopta porque entonces el bajar S_L a 0 en un entorno ΔL del punto está justificado económicamente según el apartado 5.5.3. siguiente:

5.5.3. Según el apartado 5.1., es preciso estimar el tiempo ganado al establecer un carril lento de L_1 a L_2 que es T_{at}

$$T_{at} = \int_{L_1}^{L_2} n' l p \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right) S_L d L$$
$$+ \int_{L_2}^{L \text{ último}} n' l p \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right) (\Delta S_L) d L, \text{ donde}$$

- S_L es la longitud media de la cola si no hubiese ese carril lento teniendo en cuenta los carriles anteriores. (Por ello el estudio debe de hacerlo de atrás a adelante, pudiendo existir disposiciones de carriles alternativas).
- La primera integral es el tiempo que se ahorra de L_1 a L_2 al anular en él la cola.
- En la segunda se quiere saber lo que se ahorra después. Este término interesa en la práctica sólo si en L_2 o antes no se podía adelantar. ΔS_L es el incremento que se produce en S_L al quitar el carril lento, de L_2 a L último es el último punto en el que se nota la influencia del carril lento.

El tiempo ganado es a comparar con

$$\frac{(L_2 - L_1) C_c i_d}{365 C_e}$$

(del orden de 11 $(L_2 - L_1)$, según el capítulo 4).

Por ésto, vista la definición de S crítico se puede comparar:

$$\int_{L_1}^{L_2} \frac{S_L}{S_c} dL + \int_{L_2}^{L \text{ última}} \frac{\Delta S_L}{S_c} dL \text{ con } (L_2 - L_1)$$

si se prefiere.

Si el sumando se integrales es mayor que el otro, está justificado poner carril lento.

En particular estará pues justificado poner carril lento en un tramo si en él $S_L/S_c > 1$, o sea si está formado por puntos en los que está “justificado poner carril lento” según 5.5.2.

Como un carril lento ha de tener una longitud mínima (300 m por ejemplo) por razones de funcionamiento, puede darse el caso de que contenga puntos en los que “no está justificado poner carril lento”.

En los casos reales tendrá siempre parte importante de puntos en los “que está justificado poner carril lento”.

5.5.4. De la forma de la integral se despende una clasificación de los puntos.

a) Aquellos en los que:

$$S_{\text{crítico}} > (1-p)/p.$$

No está en ellos “justificado económicamente” poner carril lento, por el poco tráfico I_p y gran velocidad de pesados v combinados en S crítico, pues S no puede sobrepasar a $(1-p)/p$. y menos a $S_{\text{crítico}}$.

Sólo se dispondrá en él carril lento por prolongación necesaria o por cumplir niveles mínimos de posibilidad de adelantamiento, por poner longitudes mínimas de carril lento o por otro caso especial.

- b) Aquellos en que $\lambda / (\mu - \lambda) > \text{Crítico}$. Corresponde a mucho tráfico de pesados I_p a poca velocidad v ; si v no fuese pequeño debido a una fuerte pendiente, I_p sería tan grande que la carretera no funcionaría a nivel B en llano, y habría que estudiar el desdoblamiento.

Como, salvo en el carril lento, $S_L \geq \lambda / (\lambda - \mu)$ (se alcanza enseguida ese valor después de carril lento), resulta que en esos puntos "está justificado poner carril lento", y en general habrá que disponerlo pues es difícil que formen un conjunto aislado en zona en la que se puede adelantar, pues en ellos v será pequeño y los vehículos pesados tardan en acelerar.

- c) Aquellos en los que $\lambda / (\mu - \lambda) < \text{Crítico} < (1-P)/P$.

Estará indicado poner carril lento en ese punto (aparte de la salvedad del caso a), sólo si se han acumulado ligeros detrás de un pesado en zonas en las que no se puede adelantar. Es el caso también del estudio de "carriles apartadero".

Se observa que los llamados puntos críticos separan estos tipos A, B y C de puntos.

5.5.5. Puntos inicial y final del carril lento.

Salvo en ciertos casos en el que es de longitud mínima (esos 300 m), en general se prolongará su punto inicial y final mientras el incremento de coste de construcción sea rentable por ahorro de tiempo. Para ésto se prolongará el punto inicial y/o final mientras que la variación de

$$\int_{L_1}^{L_2} \frac{S_L}{S_c} dL + \int_{L_2}^{L \text{ último}} \frac{\Delta S_L}{S_c} dL$$

sea mayor que la de la longitud $(L_2 - L_1)$.

Para ello se considera en las figuras 5, 6, 7 como varía S_L con el punto inicial y final, siendo $\delta L_1, \delta L_2$ las variaciones de los puntos y $\delta S_L = \delta \Delta S_L$ las correspondientes de S_L .

5.5.5.1. Punto inicial

S_L baja en él a 0. De su posición no depende lo que está después (fig. 5).

Por tanto debe de estar donde "empieza a estar justificado poner carril lento". Esta posición puede depender en el caso de punto tipo A o B de la posición de carriles lentos anteriores.

5.5.5.2. Punto final

Su posición repercute en las colas situadas después.

Sea $L_{\text{final}} = L_2$, $dL_{\text{final}} = \delta L_2$, δS_L^* el incremento de S_L al variar L_{final} . Habida cuenta de los signos queda la ecuación

$$\int_{L_2}^{L_{\text{último}}} \frac{\delta(S_L^*)}{dL_{\text{final}}} \frac{dL}{S_c} = + 1$$

Para usar esta ecuación para determinar L_{final} nos fijamos en las curvas de S_L de la figura 6 lo que nos lleva a varios casos. La parte rayada de la figura corresponde a δS_L^*

Existen 3 casos principales, (a), (b), (c).

a) Si la curva de

$$\frac{C_c \cdot i_d}{365 C_e \cdot IP \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right)} = S_{\text{crítico}} = S_c$$

sube por encima de $\lambda/(\mu-\lambda)$ en punto donde se pueda adelantar, procede acabar el carril lento en ese punto. A partir de entonces subirá el número de ligeros detrás de cada pesado, hasta alcanzar $\lambda/(\mu-\lambda)$ en promedio en un intervalo difícil de calcular, pero pequeño y dependiente de las perturbaciones que se producen al desvanecerse el carril. Por ello no creemos deba de tenerse en cuenta ese intervalo, y sí situar el fin del carril lento en un punto cercano al crítico con visibilidad suficiente.

b) Si esa curva de S_c cruza $(1-P)/P$ en sitio donde no se puede adelantar. Si suponemos S_L^* lineal, δS_L^* es una función que vale $-\lambda(dL_{\text{final}})/\Delta L$, y la ecuación es

$$\int_E^F \frac{\lambda}{\Delta L} \frac{dL}{S_c} = 1$$

Como

$$\int_E^F \left(\frac{\lambda}{\Delta L} \right) dL = \frac{1-P}{P}$$

debe de estar entre E y F en lugar que depende de la forma de variar S_c . Si S_c es horizontal, C debería estar en F pero el resultado económico varía poco con la posición del punto final; si S_c varía bruscamente, C debe coincidir con E.

Por tanto parece que C debe de estar entre E y F, más cerca de E que de F; la regla CE/EF = 1/3 parece un buen compromiso práctico.

La distancia EF, que es lo que tarda en alcanzar todo ligero a un pesado suponiendo distribución uniforme en el espacio, era de 330 m en un ejemplo desfavorable, siendo en general mucho mayor. EF vale en promedio

$$\frac{Vv}{(V-v) P I} = \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)^{-1} / PI \quad (V, v \text{ en km/h, } I \text{ en v/hora. EF en km).$$

Obsérvese que en el punto C:

$$\frac{i_d C_c}{C_e 365} = 11, \quad S_c = \frac{11}{10IP\left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)} = (1-P)/P$$

por lo que EF vale $10(1-P)/11P$ en kilómetros, cifra que suele ir de 5 a 10 km, por tanto enorme.

Ocurre que este caso b se presenta si:

$$10 I \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right) (1-P) = 11$$

o sea con I/v próximo a 1 (pues en este caso V es mucho mayor que v y P es siempre mucho menor que 1).

Como

$$\frac{I}{v} = \frac{\text{I.H.P.ascendente}}{\text{velocidad pesados}} = \text{I.M.D}/(20 v)$$

se ve que corresponde a $\text{I.M.D.} < 1000$, y casi $\text{I.M.D.} < 600$.

Regla: Si en el punto crítico no se puede adelantar sitúese el fín del carril lento

$$\frac{1}{3PI \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)}$$

antes de ese punto, salvo que sea necesario prolongarlo para asegurar mínimos de longitud de carril lento o de distancias de adelantamiento.(*).

- c) Queda el caso en el que $\lambda / (\mu - \lambda) < S_c < (1-P)/P$ en el punto en el que se empieza a poder adelantar. El variar L último mejora tanto el final de la zona en que no se puede adelantar como el tramo después en el que se puede adelantar.

(*) Ver nota siguiente.

$$\begin{aligned} \text{Como } \int_M^G \frac{\delta S_L^*}{\delta L} \text{ final } dL &= MG \cdot \frac{HA}{MA} = HA \left(\frac{MA + AG}{MA} \right) = \\ &= HA \left(1 + \frac{\lambda}{\mu - \lambda} \right) = HA \left(\frac{\mu}{\mu - \lambda} \right) \end{aligned}$$

en la aproximación con rectas de S_L , si μ es muy grande la integral vale HA, y en general de 2 a 5 veces HA según λ se aproxime a μ .

$$\text{Por tanto } \int_E^F \frac{\delta S_L^*}{dL} \frac{dL}{S_c} = 1$$

para HA una fracción de S_c que puede aproximarse por

$$\frac{\mu - \lambda}{\mu}, \quad MA = \frac{S_c (\mu - \lambda) \Delta L}{\mu \lambda}$$

o sea:

$$MA = \frac{i_d C_c \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\mu} \right) \Delta L}{365 C_e n' IP \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right)}$$

y en general (*)

$$MA = \frac{11}{10IP \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right)^2 600} \left[\frac{600}{I(1-P)} - e^{+I/250} \right] (\text{en km})$$

expresión válida únicamente si I no es muy grande (< 100), pues si λ es grande puede hacerse mayor que μ justo después de un carril lento, porque los vehículos ligeros circulan en éste libremente.

Esto conduce a la regla aproximada:

El carril lento terminará si I.M.D. < 2000 a una distancia igual al MA de la fórmula anterior. ($I = \text{I.M.D.}/20$) del punto A. Para I.M.D. mayores acabará cerca del punto en el que se puede empezar a adelantar.

Todo ésto supone que a partir del punto A se puede adelantar durante un largo tramo. Si no es así y I.M.D. > 1000 es preciso prolongar el carril lento hasta A (o más).

d) Queda la duda en el caso b de si se debe de adelantar C aproximándolo a A si C no está muy lejano de A, es decir, si después del punto crítico pronto se puede adelantar (fig. 7).

(*) V es media de ligeros libres, pues antes del punto existe carril lento.

Existen dos óptimos locales de fín de carril lento E tal que $EK = EF/3$ y M tal que

$$AH = AA' \frac{\mu - \lambda}{\lambda} \quad (\text{aproximadamente})$$

Hay ventaja del punto K sobre el M si es menor que 1 la integral

$$\left(\int_E^P \frac{S_L^*}{S_c} dL \right) \frac{1}{EM}$$

en que S_L^* es la parte rayada en S_c (fig. 7).

Es difícil hacer cálculos aproximados, en particular porque habría en este caso que considerar que, si bien S_c es proporcional a

$$\left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V} \right)^{-1}$$

ΔL es proporcional a v . Por ello los cálculos con S_c constante no son tan absurdos, pues interviene en numerador (distancia AP) y denominador (S_c).

Un resultado con $S_c = (1-P)/P$ y AM despreciable conduce a comparar AP con EF, o sea

$$AP/EF = \frac{\mu - \lambda}{\lambda} = \frac{600e^{-1/250} - 1(1-P)}{1(1-P)} \quad \text{con } 1.$$

Resulta que si I.M.D. < 2000 no interesa prolongar el carril lento hasta el punto en el que se puede adelantar y sí en el caso de I.M.D. grandes. Ello es debido a que con I.M.D. grandes las colas que se forman al no poder tardan en disolverse.

- e) Se pueden presentar casos especiales (fig. 7 bis), no se puede adelantar justo después del punto crítico. En la práctica lo que va a ser determinante es la pendiente, pues v y ΔL son en tramos largos inversamente proporcionales a ella.

Regla general: El fín del carril lento estará en punto crítico. Si en este punto y después de él en largo tramo no se puede adelantar, el punto final del carril lento se colocará

$$\frac{Vv}{3(V-v)pl}$$

metros antes del punto crítico, si no es necesario prolongarlo para asegurar distancias mínimas de adelantamiento. (*).

(*) Ver nota anterior.

6. APLICACION PRACTICA.

En el apartado 5 anterior se indica donde está justificado poner un carril lento y donde deben de ponerse sus puntos inicial y final, si la pendiente es mayor del 2-3%.

Para ello se haría uso:

- Del gráfico 4 que da 10PIS a multiplicar por

$$\left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)$$

y comparar con 11 horas/km/día. Dice si en un punto en el que se puede adelantar está justificado el poner carril lento. Si en 300 m está justificado en promedio debe ponerse.

- La recta del gráfico 4 ($y=x$) corresponde a 10PIS = 10 I(I-P) , valor a multiplicar por

$$\left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)$$

y comparar con 11. Dice si en un punto medio en el que todo ligero estaría detrás de un pesado hace falta carril lento.

- El valor $\lambda/\Delta L$ = número de ligeros que llegan detrás de un pesado por km.
- El valor de $\mu/\Delta L$ = número de ligeros que pasan a un pesado por km.

Con estos supuestos se pueden estimar la longitud S de las colas en cada punto,

$$\text{y entrar en } 10 \text{ SI } \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)P$$

Si es mayor, menor o igual a 11 h/km/día justificado poner carril lento, no lo está o el punto es crítico.

En la figura 8 se incluyen las curvas que resultan de aplicar este criterio, dando v en función de I(1-P) y de P límites para que en un punto esté justificado poner carril lento en el caso de 11 h/km/día.

En España existen muchos tramos con I.M.D. de 1000 a 5000 en terreno montañoso donde la necesidad de carril lento, a disponer en el próximo “ensanche y mejora”, depende de que se pueda o no adelantar. Se puede comprobar con la figura 8 o con la 9.

7. UNA PRESENTACION ADAPTADA

Incluimos un posible articulado en el que entren únicamente magnitudes reales muy aparentes, como son la acumulación de ligeros detrás de un pesado, y se disimulan las magnitudes económicas cuya realidad es menos palpable. También se relacionan los resultados con las teorías de tráfico. Así no es necesario definir conceptos y magnitudes que se prestan a críticas por corresponder a aproximaciones.

7.1. Principios

En las carreteras con rampas mayores o iguales del 4% y con I.M.D. > 1000 se debe estudiar la necesidad de disponer un carril adicional para vehículos lentos.

Salvo justificación en contrario, no se dispondrán carriles lentos en pendientes descendentes, ni en rampas de pendientes máxima menor del 4 % con la salvedad en 7.6. (*).

No se dispondrán carriles lentos de menos de 300 m (o de $L_{\min} = 5V$, siendo L en m y V la velocidad específica en km/h).

Para el estudio de los carriles lentos se tomará la I.H.P. que corresponde a una cierta hora punta, y el porcentaje P de pesados que correspondan a esa hora punta.

Si no existe mejor estimación se puede hallar P dividiendo por 1,5 el porcentaje medio de pesados.

En lo que sigue I es la Intensidad Horaria de Proyecto de vehículos ascendentes, e I' la de vehículos descendentes. Salvo que se pueda estimar la disimetría de tráfico se tomará $I = I' = I.H.P./2$.

Al proyectar el trazado se debe de calcular la velocidad instantánea v del vehículo pesado según 3 (fig. 3) en los tramos en los que pueda ser indicado un carril lento.

Según 7.2.1. ó 7.2.2. se hallará en qué puntos está indicado el poner carriles lentos. Si esos puntos forman un tramo continuo de más de L_{\min} es necesario establecer carril lento en ese tramo.

En caso contrario se tomarán tramos de L_{\min} incluyendo los puntos anteriores, y se estudiará la necesidad de establecer carriles lentos en promedio en el tramo:

- a) Si se puede adelantar, se tomará la velocidad media en el tramo de vehículos pesados y se establecerán carriles lentos si es menor que la velocidad crítica indicada en 7.2. ó 7.3. Se encajará el tramo de L_{\min} donde la velocidad media sea menor.
- b) Si no pueden adelantar, los vehículos ligeros en todo o parte del tramo, se hará un promedio I_{cm} en la longitud del tramo de las intensidades críticas I_c puntuales definidas en 7.3., y se dispondrá carril lento si $I > I_{cm}$. Se encajará el tramo de L_{\min} donde la intensidad I_{cm} crítica sea menor.

Se considera preferible poner un carril lento a no ponerlo en caso de duda.

7.1.1. Comentario

Es determinante la figura 9; la parte de arriba está construida de acuerdo con

(*) Parece que hay ejemplos reales en los que harían falta tales carriles. Ver 8.3.

el criterio del nivel de servicio C; la de abajo con el de 11/horas/kilómetro con el redondeo correspondiente, según la intuición personal del que escribe (*).

En vez de hacer medias económicas se hacen de velocidad o de intensidad, que son las más directas.

Es obvio que debe de haber una longitud mínima de carril lento a efectos de uniformidad de características de la carretera y de evitar peligros en demasiados puntos de incorporación.

7.2. Carreteras con calzadas desdobladas

En el caso de tener dos carriles por calzada está indicado establecer carriles lentos cuando la velocidad de los vehículos pesados en el tramo sea menor que la velocidad crítica indicada en la figura 10 para el tráfico I medido en vehículos por hora y por carril.

En el caso de tener tres carriles o más por calzada no se establecerán en general carriles lentos, salvo en casos excepcionales, y con un tráfico por carril igual o mayor de 1.2 veces el indicado en la figura 10.(**).

7.2.1. Comentario

Mismo criterio que el anterior. Por la menor pendiente de estas carreteras será dominante el criterio del Nivel de Servicio que es con el que están dibujadas las curvas (nivel B en la parte superior, C en medio, mejor que el D en la inferior, a partir de los coeficientes de equivalencia de la fig. 2 bis).

7.3. Carreteras de dos sentidos y una calzada

Si existe posibilidad de adelantamiento en todo el tramo, está indicado disponer un carril lento cuando la velocidad de los vehículos pesados sea inferior a la velocidad crítica indicada en el gráfico 9.

Este gráfico 9, indica pues una intensidad I_a para cada velocidad v y porcentaje P . Si se puede iniciar un adelantamiento en ese punto, se tomará como intensidad crítica I_c esa intensidad I_a .

El gráfico 9, da a cada v y P un tráfico I_b que se considerará como intensidad crítica si todos los ligeros están obligados a ir detrás de un pesado.

Está indicado disponer carril lento en un punto en el que la velocidad de pesados es v cuando I sea mayor que la intensidad crítica que será en ese punto:

$$I_c = I_a - \frac{NP}{1-P} (I_a - I_b)$$

donde N es el número medio de vehículos ligeros acumulados detrás de un vehículo pesado. Como N no puede ser mayor de $(1-P)/P$, I_c no puede ser menor de I_b .

(*) Así se usa el nivel de servicio en la zona en que está experimentado, y las consideraciones económicas en pendientes fuertes donde son válidas.

(**) También pueden considerarse las fig. 2 bis.

N se estimará por tramos ΔL_a en los que v no varíe más de 5 km/h, admitiendo las hipótesis simplificadas que siguen:

– Al final de un tramo en el que se puede adelantar,

$N=0$, si el tramo es suficientemente largo.

– En una longitud ΔL_a en m en la que no se puede adelantar y los vehículos ligeros llegan con velocidad media V_a , el incremento de N es

$$\Delta_1 N = (1-P) I \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V_a} \right) \frac{\Delta L_a}{1000} \quad (*)$$

– N no se incrementa por encima de $(1-P)/P$.

– En una longitud ΔL_a en m en la que se puede adelantar el incremento de N es:

$$\Delta_2 N = \frac{-0,6 \Delta L_a}{v} e^{-I'/250} + \Delta_1 N$$

– Se toma $V_a = \sqrt{160 v}$, expresando V_a y v en Km/h.

En consecuencia si se llega con facilidad de adelantamiento a una rampa con velocidad de pesados constante v, en una longitud L_a la intensidad crítica es el mayor de los valores

$$I_c = I_a - P \cdot I \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V_a} \right) \frac{L_a}{1000} (I_a - I_b); \quad I_b$$

Donde:

$I_a, I_b, I_c, I,$ = intensidades de vehículos en vehículos por hora.

v, V_a = velocidades en km/h.

$\Delta L_a, L_a$ = longitudes en metros.

El factor

$$\left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V_a} \right)$$

en km/h puede tomarse de la figura 9. donde se supone $V_a = \sqrt{160 v}$, en función de v.

7.3.1. Comentarios

Se hace una interpolación lineal, siendo los valores de I ciertos en el punto correspondiente a I_a y a I_b . Es exacta en los extremos, luego debe ser aproximada en medio.

Se llama N la aproximación de S.

(*) Más exacto sería reemplazar $(1-P)I$ por $I(1-P-NP)$, pero complica.

No es cierto que $N = 0$ donde se puede adelantar. El gráfico 4 da idea de los valores de 10PNI, ($N=S$); N no es despreciable si l es grande. Sin embargo parece un punto de partida adecuado, puesto que la longitud en la que todo ligero queda detrás de un pesado

$$\left(\frac{1}{PI \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V_a} \right)} \right)$$

es aproximado y el error afecta sólo a la longitud de acumulación de vehículos.

V_a es la velocidad de ligeros antes de llegar al pesado. Como decrece con la rampa, se ha estimado por $\sqrt{160 v}$.

7.4. Puntos inicial y final

Su situación se deduce de 7.2.1. Únicamente en el caso en el que el último punto en el que está justificado carril lento esté en un tramo en el que no se pueda adelantar, la regla de 7.2.1. conduce a prolongar el carril lento donde ya no está justificado, por lo que se retrasará el último punto en

$$\frac{10(1-P)}{33 P} = vV/(3 PI(V-v)) \text{ km,}$$

donde V , v vienen en km/h, e l en vehículos ascendentes por hora. (*), y $V = V_a$ (**).

En el caso de que I.M.D. < 2000 , si el último punto en el que está justificado poner carril lento está en el punto en el que se empieza a poder adelantar, y se puede adelantar en un tramo largo, se retrasará el punto final en (***):

$$\text{en } \frac{11}{10 IP(1/v - 1/V)^2} \cdot \frac{1000}{600} \cdot \left(\frac{600}{1(1-P)} - e^{l'/250} \right) \text{ metros, si esta cifra no}$$

es menor de 200 m.

Se retrasará el punto inicial hasta en 100 m si con ello se aumenta en carretera de dos carriles la distancia con visibilidad de adelantamiento.

El punto final se adelantará si ello es necesario para satisfacer las condiciones de seguridad de 7.5. (***)

7.4.1. Comentario.

La salvedad sólo es de aplicación en los casos de v grande e l moderado, en los que lo que facilita el carril lento es posibilidad de adelantamiento, siendo más

(*) Por ser $S_c = (1-P)/P$ en ese punto el resultado puede ponerse en forma independiente de V, v, l .

(**) O sea $V = \sqrt{160 v}$. En todo rigor este V debería ser algo mayor que V_a .

(***) "Adelantar" se entiende poner más delante, en PK mayor, o sea prolongar el carril lento. Retrasar en PK menor.

bien carril apartadero, pues entonces el carril lento deja de estar justificado donde se puede adelantar.

Para estudio de carriles apartaderos, esta salvedad es importante pues son necesarios en virtud de la desaparición de las colas de ligeros detrás de los pesados, efecto que dura una longitud $v/V/IP(V-v)$ después del desvanecimiento del carril lento.

7.5. Otros factores.

En general no se tendrán en cuenta más que si las dificultades de construir carril lento son muy grandes. En este caso se supondrá que la I_c Intensidad crítica se multiplica por $B^{1/2,5}$ donde B es la razón del coste del carril lento considerado dividido por el coste medio en terreno accidentado sin especiales dificultades. Para carreteras con calzadas separadas se tomará $B^{1/2}$ en vez de $B^{1/2,5}$. No se hará corrección si B no es superior a 2.

Debe de considerarse la alternativa de construir el carril lento separado de la calzada principal cuando sea imposible el hacerlo yuxtapuesto. El coste que entra en B será el del carril lento dividido por las distancias entre puntos de inserción, para calcular la velocidad o la intensidad crítica en promedio en el tramo antes de construir la desviación. Se limitará su longitud en 1,5 km. aproximadamente.

7.5.1. Comentario.

En el gráfico 8 y en el 9 se ha supuesto 11/horas/kilómetro/día. Si las magnitudes económicas cambian mucho, se permite así en 7.5. su consideración, al cambiar ese valor de 11 horas/kilómetro/día.

7.6. Carriles apartadero.

En una carretera de I.M.D. mayor de 1000 con dos carriles se deben de hacer los estudios indicados en 7.2.1. y 7.2.3. referentes a la necesidad de carriles lentos aún si la pendiente es menor del 4% si las posibilidades de adelantamiento son menores que las indicadas en la Instrucción 3.11.C.

Si, debido al estudio de formación de colas realizado según 7.2.3., se deduce según 7.2.1. la necesidad de carril lento en un tramo de 300 m. al menos, con pendiente inferior al 4% se debe de estudiar el mejorar las posibilidades de adelantamiento en alternativas con la construcción de un carril apartadero, según 5.

Si la pendiente no es inferior al 2% se podrá construir el carril apartadero como si fuese un carril lento.

7.6.1. Comentario.

Así se obtiene un criterio objetivo para el estudio de carriles apartadero. En este sentido intervienen mucho la tasa de acumulación de ligeros:

$$\Delta N = (1-P) I (1/v - 1/V_a) \Delta L_a$$

que es su flujo $(1-P)I$, dividido por V_a lo que da la inversa de su separación media $(V_a)/((1-P)I)$, multiplicando por $V_a - v$ obteniendo el tiempo medio que tarda en llegar un ligero más detrás de un pesado multiplicado por $\Delta L_a/v$ para pasar de tiempo a distancia recorrida por el pesado.

Podría ser útil considerar como se adelantan los ligeros entre sí para mejorar el criterio de establecimiento de carriles apartadero.

La limitación $I.M.D. > 1000$ para carriles apartadero supone:

- que con $I.M.D.$ menores μ es mucho mayor que λ , por lo que en cuanto haya más posibilidades mínimas de adelantamiento no haya colas y no hacen falta estos carriles.
- que si $I.M.D. > 1000$ la longitud con adelantamiento debe ser estudiada mejor, so pena que sea insuficiente.

7.7. Disposiciones del punto inicial y final.

Los puntos anteriores deben ser interpretados por el Proyectista en vistas a un buen funcionamiento y a la prevención de accidentes. Se podría añadir:

“Se evitará el peligro que representan los pesados incorporándose disponiendo una distancia de velocidad de parada L_v doble de la de parada a la velocidad específica V .

En las carreteras con una calzada y doble sentido de circulación se evitarán en el punto de desvanecimiento del carril lento maniobras erróneas de adelantamiento, especialmente de vehículos descendentes. Para ello, o bien no podrán adelantar en el desvanecimiento (*), o bien verán todo el desvanecimiento del carril lento con distancia de adelantamiento; en consecuencia se deben de evitar disposiciones en planta (curva ascendente a la derecha) y alzado (acuerdo convexo) en las que no se vea este desvanecimiento”.

Comentario:

La incorporación del pesado es difícil pues no puede acelerar y

- Si no respeta la prioridad del ligero hay peligro.
- Si realiza un Stop, luego tarda mucho más en alcanzar una velocidad razonable.

Conviene también que el ligero ascendente sepa bien donde acaba el carril lento y no aminore su velocidad antes de tiempo por miedo a que se acabe (caso del fin del carril lento en acuerdo convexo en desmónte con curva a la derecha) para que se aprovechen bien las posibilidades de adelantamiento.

Nota:

En algún caso se ha proyectado carril adicional a la izquierda en autopistas o autovía, lo que se justifica en los mismos puntos que en la derecha, pero requiere

(*) Los vehículos descendentes.

una señalización diferente. A juicio del autor de estas líneas no se debe de disponer este carril "rápido" más que cuando tenga longitud importante y se tomen precauciones para evitar peligros en su desvanecimiento, tales como:

- Señal vertical de fin de carril 500 m. antes.
- Señal vertical con la distancia que queda de carril adicional antes de cambio de rasante o curva sin visibilidad (sobre todo si la curva es a la izquierda y en desmonte).
- Desvanecimiento en zona muy visible, con visibilidad de $4V$ en metros, (V velocidad específica en km/h), pudiendo apreciarse bien que acaba el carril.

Evidentemente esta última condición limitaría fuertemente el uso de este carril adicional a la izquierda en favor del de la derecha o carril lento.

Muchos autores piensan que deben proscribirse desvanecimientos de carriles adicionales por la izquierda puesto que la incorporación se hace a gran velocidad; por ello si se construyen, deben de tomarse unas precauciones exhaustivas de señalización y de periodo de observación de funcionamiento, así como de experimentación del método. En caso de duda no deben construirse, máxime puesto que el primer accidente en la incorporación va a ser probablemente atribuido a un mal diseño(*).

El carril lento adicional a la derecha en rampa tienen la ventaja de que su naturaleza es reconocida y bienvenida por los conductores, por lo que éstos toman naturalmente precauciones en su desvanecimiento. El autor de estas líneas no está seguro de saber donde debe estar situado éste; una vez deshechas las colas de ligeros detrás de pesados, lo más importante es que esté donde se le espera. Por ello puede ser buena regla el ponerlo cerca del punto más alto del acuerdo convexo, si la visibilidad es suficiente, aunque es más eficiente prolongarlo hasta el punto en el que el camión alcanza cierta velocidad, según las fórmulas indicadas en los párrafos anteriores del capítulo 7 ("punto en el que deja de ser necesario").

7.8. Observación.

- 1) En lo que procede es criterio fundamental la I.M.D.

Es obvio que puede serlo la importancia del vínculo, es decir que una carretera Madrid-Lisboa puede necesitar carriles lentos más que una comarcal, a lo mejor incluso con más tráfico(**).

Se supone que las características geométricas han de ser adaptadas principalmente al tráfico, pero se puede afectar a este de un factor de "importancia del vínculo", o varias figuras 9 según el tipo (Red básica, complementaria,...).

- 2) El carril lento hace falta que entre en servicio cuando lo indica el capítulo 7, porque empieza a ser "rentable".

(*) En autopistas cerca de Barcelona y en autopistas en Austria existen carriles adicionales a la izquierda y parece que van bien.

(**) No conviene abusar de esta discriminación.

Como requieren proyecto, expropiación, obras y con perjuicio al tráfico durante éstas, es delicado indicar en normas cuando hacen falta, porque puede ser necesario disponerlas aprovechando un "Ensanche y mejora".

En 9.1.1. se ensaya una redacción al efecto para Autopistas.

7.9. Observación general.

Estudiando lo que precede se observa que en una carretera de dos carriles para ambos sentidos con tráfico importante es fundamental para obtener velocidades medias el que se pueda adelantar.

La idoneidad estética de las clotoides ha producido recientemente trazados en terreno ondulado de perfecta apariencia, pero en los que un ligero adelanta mal a un pesado que le tapa un ángulo de vista fuerte, y en consecuencia incómodos, peligrosos y de capacidad disminuida.

Con estas teorías se ve que, cuando se pueda, y aún en detrimento parcial de la estética y de la economía de construcción, se deben disponer rectas en las que sea fácil adelantar (siempre estarán las rectas contraindicadas en acuerdos convexos), especialmente si I.M.D. > 1000. La cuenta de vehículos retrasados ($N=S$) puede indicar donde hacen más falta.

Los eventuales carriles apartadero se deben disponer en armonía con estas rectas, lo que se logra aplicando este capítulo 7, al llevar cuenta de N.

8. ALGUNAS EXTENSIONES TEORICAS POSIBLES

8.1. Llegadas aleatorias.

Haciendo aleatorias ciertas variables, se pueden mejorar los resultados intermedios.

Así una vez redactado este escrito vimos en la referencia 12 un estudio del tema válido para una carretera en la que se puede adelantar con colas iniciales nulas, y separación inicial de pesados y de ligeros aleatorios, de leyes:

$$\exp. (-\lambda_1 x/V_1) \text{ y } \exp. (-\lambda_2 x/V) \text{ de Poisson.}$$

En nuestra notación sale:

$$\lambda_1 = IP \quad ; \quad \lambda_2 = I(P-1)$$

para obtener las intensidades reales.

Encuentra una longitud media de cola:

$$S = -\frac{P-1}{P} (1 - e^{-IPL} (\frac{1}{v} - \frac{1}{V}))$$

Se observa que nuestros resultados de 5.2. equivalen a tomar el primer término de la serie (y la asíntota $(1-P)/P$).

Una probabilidad de que un ligero no vaya en cola en L:

$$P_{2f} = \exp . (- \text{IPL} (1/v-1/V)).$$

Una velocidad media de ligero

$$E (V_2 (x)) = v + (V-v) \exp . (-\lambda_1 L(1/v-1/V))$$

y un tiempo perdido por ligero:

$$L(1/v-1/V) - (1-\exp . (-\lambda_1 L(1/v-1/V))) / \lambda_1$$

El hacer la separación de vehículos aleatoria y los razonamientos más precisos hace el resultado más real. Sin embargo, como son aleatorias V , v , no son independientes los vehículos entre sí, y los resultados los queremos para entrar en un estudio económico para estimar aproximadamente qué longitudes de cola hacen necesario carril lento, creemos que un análisis demostraría que con la aproximación lineal que tomamos la diferencia de conclusiones es pequeña, menor que la incertidumbre en los parámetros económicos.

8.2. Definiciones de velocidades

Es de observar que con V variable aleatoria, el método del H.C.M. usa en su edición original la velocidad "operating speed or average overall speed", es decir, velocidad superior media en un tramo, que viene a corresponder a la "velocidad real" de la 3.1.I.C. que en "la mínima velocidad media que puede garantizarse en condiciones de seguridad a cualquier conductor, en las condiciones de tráfico existentes a la hora de hacer el Proyecto.

A efectos prácticos se considera como velocidad real aquella que es superada únicamente por el 20% de los vehículos".

Para otras deducciones, se usa la "space mean speed" que es una media en el espacio y entre los vehículos ligeros. Es menor que la velocidad real.

Creemos que esta salvedad, muy importante, no afecta a una presentación de recomendaciones del tipo de la del capítulo 7, aunque sí afecta a la deducción de las curvas como las de la figura 9.

Nótese que llamamos en 7.3. V_a a la velocidad media y V a la velocidad real de vehículo ligero libre, es decir no en cola detrás de un pesado.

8.3. Carriles adicionales en bajada

Aunque se admitió (ref. 7) que no estaban justificados por ser más necesarios en subida, hay quien sostiene que existen puntos en los que hacen falta (Puerto del Caloco en la C.N—VI en el que hay fuertes pendientes en rectas y curvas de pequeño radio).

Todo lo que precede vale para sentido descendente, salvo que hay que estimar la velocidad v del pesado. No es fácil, pues es la velocidad por encima de la cual el conductor cree que no debe de ir.

Por tanto v decrece al subir la pendiente descendente y al ser peor el trazado, no siendo en general v menor en bajada que en subida. En general v será inferior a la velocidad específica de las curvas.

8.4. Señalización

Otro problema de resolución nunca perfecta, que influye en los adelantamientos en bajada, es la de señalización y asignación de prioridades. Evidentemente, con visibilidad de adelantamiento en el carril de subida, que queda entre el carril lento y de bajada, tienen prioridad los que suben, a diferencia de lo que ocurre en carretera de tres carriles.

Por ello el autor de estas líneas cree que el que sube por el carril lento debe de poder adelantar pasando al carril de subida si:

- no viene un vehículo más rápido por ese carril (misma regla que en autopista).
- y no está adelantando ningún vehículo en sentido contrario, o ha empezado antes a hacerlo. En caso de duda no puede adelantar ninguno de los dos, aunque la prioridad sea para el que sube.
- y va o pueda ponerse rápidamente a velocidad superior a la de paso al carril lento.

Así se facilitaría el que los vehículos ligeros de menor potencia dejen adelantar a los que más potencia echándose a la derecha y volviendo inmediatamente a la izquierda, lo que es difícil si hay "raya continua" entre carril lento y carril de subida. Existe por supuesto peligro de que intenten adelantar a la vez por el carril de enmedio en ambos sentidos si se puede pasar del carril derecho al izquierdo, por lo que conviene que los ligeros suban normalmente por el carril de subida (no por el lento) para reducir el número de ocasiones de peligro.

8.5. Ensanchamiento de carreteras estrechas

Entendemos por tales las de 5 m de calzada o menos, 5 m es el mínimo para que se crucen dos camiones.

Aunque las de la Red Nacional debén de tener arcén mínimo de 0,25, y todas las que se proyecten 6 m de calzada y 0,5 m de arcén, quedan bastantes kilómetros en la Red Nacional.

En las otras redes (Diputaciones, Ayuntamientos, Confederaciones, Icona, Iryda, privadas, etc..) existen decenas de miles de kilómetros de carreteras de 5 m de calzada, a menudo sin arcén, llegando la vegetación al borde de la calzada con lo que oculta a menudo obstáculos, frecuentemente señales kilométricas. Por su extensión y poco tráfico no pueden ensancharse más que algunas.

Es peligroso adelantar a un camión en esas carreteras aún en recta. Por ello si el tráfico no es despreciable, y según intensidades I , porcentajes P y eventual estudio de accidentes, se puede:

- 1) Mejorar la carretera si I grande.

2) Arreglar el arcén quitando vegetación y obstáculos.

3) Ensanchar únicamente algunas rectas cada 2 ó 3 km a 6m en 500m de longitud para que los ligeros que hayan alcanzado a pesados puedan adelantarse.

La solución 3, combinada con la 2, puede ser interesante. Se puede estudiar la acumulación media de ligeros detrás de un pesado como si no se pudiese adelantar

$$(\Delta N = I(1-P) \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right) \Delta L)$$

para ver en qué intervalos se deben deshacer las colas (Ejemplo: $v = 50$, $V = 80$, I.M.D. = 500, $I = 25$, $P = 0,20$, sale $N = 0,15$ lig/km). Por supuesto otro parámetro importante es el número de adelantamientos necesarios por km para mantener V_a media, por sentido

$$I^2 (1-P) P \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V_a}\right)$$

por km y hora, 0,57 con $V_a = 70$ km/h. En rampas son más necesarias estas posibilidades de adelantamiento. (*).

También facilitan estos ensanches el adelantamiento entre ligeros, relativamente numerosos, sobre todo en llano.

Para una optimización económica habría que tener en cuenta el peligro de adelantamientos. Su número es:

– entre ligeros proporcional a $I^2 (1-P)^2$

– entre ligero y pesado a $I^2 (1-P) P \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)$

y el tiempo perdido en rampa, proporcional a

$$I^2 (1-P) P \left(\frac{1}{v} - \frac{1}{V}\right)^2 \quad \text{según 5.4.5.}$$

Por tanto, estimados I , P , v y V se podría dar un espaciamiento mínimo entre posibilidades de adelantamiento seguras, igual al mínimo de

$$\frac{K}{I^2} , \frac{K'}{I^2 P (1-P) (1/v-1/V)} , \frac{K''}{I^2 P (1-P) (1/v-1/V)^2}$$

donde las constantes K , K' , K'' serían a determinar.

8.6. Pasos a nivel

Se puede estudiar la importancia de reglas tales como:

“En un paso a nivel los vehículos pesados pararán a cierta distancia (dada) del paso para que les adelanten los ligeros antes de abrir el paso”.

(*) Por supuesto con I.M.D. = 500 hace falta una carretera más ancha de 5 m. Con I.M.D. menores decrecen los números anteriores.

Un estudio del desvanecimiento de las colas indicaría cuan importante es esta regla si I.M.D. > 500. También permitiría señalar cual sería esa distancia $(I(1-P)t.6m$, siendo t horas el tiempo en el que la barrera estaría cerrada).

En España por haber relativamente menos densidad de ferrocarriles y de carreteras con tráfico importante no es tan numeroso el número de pasos a nivel entre ellas, máxime visto que se están pasando a distinto nivel, lo que hace menos urgente el que se cumpla una tal regla. (*).

9. UNA POSIBLE PROPUESTA PARA AUTOPISTAS

Ya hemos expuesto en el capítulo 7, especialmente en 7.2. otra. Hace uso de la figura 10 y se propone al gráfico 3 para su uso.

Según se dice al final del capítulo 3, puede ser mejor usar el gráfico 3 bis bis que el 3.

Si se hiciesen uso de las figuras 2 bis y del gráfico 3 bis se obtendrían los cuadros que siguen, a los que se acompaña de un articulado coherente.

9.1. Posible propuesta

9.1.1. Carriles adicionales

- La necesidad de adoptar carriles adicionales se realizará teniendo en cuenta el nivel de servicio, la intensidad del tráfico y su composición y las rampas y su longitud e inclinación.
- Los niveles de servicio de proyecto serán como mínimo los siguientes: (**)

CUADRO C.9.1.1.A.

| Tipo de tramo de autopista | Nivel de servicio de proyecto mínimo |
|----------------------------|--------------------------------------|
| A-140 | C |
| A-120 | C |
| A-100 | D |
| A-80 | D |
| Urbana | D (**) |

- Para garantizar estos niveles de servicio se estimará la I.M.D. y el porcentaje de vehículos lentos, de acuerdo con lo siguiente:

(*) Parece que es obligatoria en Francia una regla análoga.

(**) Es decir, se garantiza una velocidad real mínima de 88, 80, 64 con Niveles B, C, D respectivamente, según ref. 2.

(**) Se incluye una corrección entre Urbana y no urbana en el paso de I.M.D. a l, poniendo 0,08 en vez de 0,12. Con lo que sigue queda exactamente definido cuando hace falta carril lento. Los resultados van bien con algunos ejemplos actuales (CN-6, cuesta de las Perdices, de las Matas, del túnel de Guadarrama).

CUADRO 9.1.1.B.

I.H.P. LIMITES POR CARRIL EN LAS LONGITUDES A PARTIR DE LAS CUALES ES NECESARIO CARRIL LENTO, NIVEL B.

| Inclinación % | Longitud km. | Porcentaje de lentos | | | | | |
|------------------|-----------------|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 3 | 0,25 | 945 | 900 | 855 | 815 | 780 | 760 |
| | 0,50 | 890 | 810 | 740 | 670 | 640 | 590 |
| | 0,75 | 775 | 635 | 535 | 465 | 400 | 360 |
| | 1,00 | 710 | 560 | 460 | 380 | 335 | 290 |
| | 1,50 | 645 | 475 | 375 | 320 | 265 | 235 |
| | 2,00 | 625 | 450 | 350 | 290 | 255 | 220 |
| | ≥3,00 | 620 | 445 | 350 | 290 | 250 | 220 |
| 4 | 0,25 | 935 | 870 | 820 | 770 | 740 | 705 |
| | 0,50 | 785 | 645 | 550 | 470 | 420 | 370 |
| | 0,75 | 675 | 520 | 420 | 350 | 300 | 260 |
| | 1,00 | 620 | 450 | 350 | 280 | 240 | 210 |
| | 1,25 | 580 | 480 | 330 | 260 | 230 | 190 |
| | 1,50 | 575 | 410 | 320 | 260 | 220 | 180 |
| | ≥2,00 | 570 | 405 | 315 | 255 | 215 | 180 |
| 5 | 0,20 | 930 | 875 | 820 | 775 | 730 | 705 |
| | 0,40 | 770 | 625 | 530 | 460 | 400 | 360 |
| | 0,60 | 650 | 480 | 380 | 325 | 270 | 240 |
| | 0,80 | 575 | 415 | 320 | 260 | 220 | 180 |
| | 1,00 | 550 | 380 | 290 | 240 | 200 | 170 |
| | 1,20 | 535 | 370 | 275 | 230 | 190 | 160 |
| | ≥1,40 | 535 | 370 | 275 | 230 | 190 | 160 |
| 6 | 0,10 | 945 | 900 | 855 | 820 | 780 | 760 |
| | 0,20 | 910 | 835 | 765 | 700 | 670 | 625 |
| | 0,30 | 785 | 650 | 560 | 490 | 425 | 375 |
| | 0,40 | 700 | 540 | 440 | 365 | 325 | 275 |
| | 0,60 | 580 | 480 | 325 | 260 | 225 | 190 |
| | 0,80 | 520 | 360 | 270 | 220 | 180 | 155 |
| | ≥1,00 | 515 | 350 | 260 | 210 | 175 | 150 |

CUADRO 9.1.1.B.

I.H.P. LIMITES POR CARRIL EN LAS LONGITUDES A PARTIR DE LAS
 CUALES ES NECESARIO CARRIL ADICIONAL NIVEL C.

| Inclinación % | Longitud km. | Porcentaje de lentos | | | | | |
|------------------|-----------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-----|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 3 | 0,25 | 1.230 | 1.170 | 1.125 | 1.060 | 1.030 | 990 |
| | 0,50 | 1.160 | 1.050 | 980 | 900 | 850 | 800 |
| | 0,75 | 1.000 | 830 | 700 | 620 | 550 | 480 |
| | 1,00 | 920 | 720 | 580 | 500 | 430 | 380 |
| | 1,50 | 840 | 630 | 490 | 410 | 350 | 300 |
| | 2,00 | 820 | 600 | 460 | 380 | 325 | 280 |
| | ≥3,00 | 800 | 580 | 450 | 360 | 310 | 270 |
| 4 | 0,25 | 1.210 | 1.150 | 1.100 | 1.050 | 1.010 | 960 |
| | 0,50 | 1.030 | 860 | 730 | 640 | 570 | 510 |
| | 0,75 | 880 | 670 | 540 | 460 | 390 | 340 |
| | 1,00 | 800 | 570 | 450 | 370 | 320 | 270 |
| | 1,25 | 760 | 540 | 420 | 340 | 290 | 250 |
| | 1,50 | 750 | 530 | 410 | 335 | 280 | 245 |
| | ≥3,00 | 740 | 520 | 400 | 325 | 270 | 235 |
| 5 | 0,20 | 1.210 | 1.170 | 1.130 | 1.070 | 1.030 | 990 |
| | 0,40 | 1.000 | 825 | 700 | 600 | 540 | 470 |
| | 0,60 | 850 | 630 | 500 | 420 | 365 | 310 |
| | 0,80 | 760 | 530 | 410 | 330 | 280 | 245 |
| | 1,00 | 720 | 500 | 380 | 310 | 265 | 230 |
| | 1,20 | 710 | 490 | 375 | 305 | 255 | 225 |
| | ≥1,40 | 705 | 480 | 370 | 300 | 250 | 220 |
| 6 | 0,10 | 1.235 | 1.180 | 1.130 | 1.070 | 1.040 | 995 |
| | 0,20 | 1.180 | 1.090 | 1.010 | 960 | 900 | 850 |
| | 0,30 | 1.020 | 855 | 730 | 630 | 570 | 510 |
| | 0,40 | 920 | 710 | 580 | 490 | 420 | 370 |
| | 0,50 | 700 | 530 | 415 | 340 | 280 | 250 |
| | 0,60 | 680 | 470 | 355 | 285 | 230 | 210 |
| | ≥1,00 | 670 | 450 | 345 | 280 | 225 | 200 |

CUADRO 9.1.1.B.

I.H.P. LIMITES POR CARRIL EN LAS LONGITUDES A PARTIR DE LAS
CUALES ES NECESARIO CARRIL ADICIONAL, NIVEL D.

| Inclinación % | Longitud km. | Porcentaje de lentos | | | | | |
|------------------|-----------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 |
| 3 | 0,25 | 1.470 | 1.400 | 1.340 | 1.280 | 1.230 | 1.180 |
| | 0,50 | 1.390 | 1.260 | 1.160 | 1.100 | 1.020 | 970 |
| | 0,75 | 1.200 | 980 | 870 | 720 | 650 | 580 |
| | 1,00 | 1.100 | 850 | 710 | 580 | 500 | 450 |
| | 1,50 | 990 | 730 | 570 | 470 | 400 | 355 |
| | 2,00 | 950 | 690 | 530 | 435 | 370 | 330 |
| | ≥3,00 | 945 | 665 | 520 | 430 | 365 | 325 |
| 4 | 0,25 | 1.460 | 1.370 | 1.300 | 1.245 | 1.190 | 1.050 |
| | 0,50 | 1.210 | 1.000 | 800 | 730 | 670 | 600 |
| | 0,75 | 1.060 | 800 | 650 | 535 | 465 | 410 |
| | 1,00 | 935 | 665 | 520 | 430 | 360 | 320 |
| | 1,25 | 870 | 600 | 460 | 385 | 320 | 275 |
| | 1,50 | 860 | 590 | 455 | 370 | 315 | 270 |
| | ≥2,00 | 855 | 580 | 450 | 365 | 310 | 265 |
| 5 | 0,20 | 1.440 | 1.330 | 1.270 | 1.200 | 1.160 | 1.120 |
| | 0,40 | 1.300 | 970 | 850 | 710 | 630 | 570 |
| | 0,60 | 1.000 | 745 | 590 | 480 | 420 | 365 |
| | 0,80 | 870 | 600 | 460 | 375 | 325 | 275 |
| | 1,00 | 810 | 540 | 420 | 340 | 280 | 240 |
| | 1,20 | 800 | 535 | 410 | 335 | 275 | 235 |
| | ≥1,40 | 795 | 530 | 405 | 335 | 275 | 235 |
| 6 | 0,10 | 1.475 | 1.400 | 1.340 | 1.280 | 1.235 | 1.185 |
| | 0,20 | 1.410 | 1.290 | 1.200 | 1.140 | 1.075 | 1.035 |
| | 0,30 | 1.225 | 1.010 | 900 | 765 | 660 | 580 |
| | 0,40 | 1.095 | 850 | 700 | 575 | 500 | 445 |
| | 0,60 | 875 | 610 | 470 | 380 | 325 | 280 |
| | 0,80 | 760 | 500 | 375 | 310 | 260 | 220 |
| | ≥1,00 | 750 | 490 | 370 | 300 | 250 | 210 |

- A los 10 años de la fecha prevista de puesta en servicio, para decidir la construcción inicial del carril adicional al construir la autopista.
- A los 30 años, para decidir proyectar las disposiciones necesarias para permitir una fácil construcción posterior del carril adicional, si no se ejecuta en primera fase. En este caso se construirá de modo que entre en servicio dos años antes de que sea necesario de acuerdo con la I.M.D. y el porcentaje de vehículos lentos previstos.

A continuación, se estimará una Intensidad I por carril y un porcentaje P de lentos en hora de proyecto, como sigue, salvo estudios más detallados:

- La I.M.D. se multiplicará por 0,08 en autopistas urbanas y por 0,12 en rurales para obtener Intensidad horaria; a continuación por 0,6 para obtener la Intensidad horaria por sentido. Esta se dividirá por 2 si éste es el número n de carriles y por 1,2 n en caso contrario, para obtener I. En nivel D se dividirá por 1,1 n en vez de 1,2 n.
- P se calculará multiplicando por 0,6 la media anual de vehículos lentos.

Para alcanzar un determinado nivel de servicio se supondrá que el vehículo lento varía su velocidad V según la figura 3 bis bis y que para I y P dados existe una velocidad V por debajo de la cual es preciso carril adicional.

El CUADRO C. 9.1.1.B. indica, para los niveles de servicios B., C. y D., a partir de qué distancias se alcanza esa velocidad entrando en una rampa uniforme de pendiente i a 90 Km/h, y por tanto a partir de qué punto es preciso carril adicional.

Este CUADRO será de aplicación directa después de llano o de pendiente descendente. Se entenderá que las longitudes se miden a partir del punto en el que se alcanza i/2.

Después de una rampa de inclinación menor i', se hallará en la figura 9.1.1. la V' a la que el vehículo termina la pendiente; a V' con pendiente i le corresponde según esa figura una distancia en la que se disminuirá el resultado del CUADRO 9.1.1.B. Se medirán las longitudes del carril adicional a partir del punto en el que se alcance

$$\frac{i + i'}{2} .$$

El carril adicional dejará de ser necesario cuando el vehículo lento alcance una velocidad V'', a la que corresponda según la figura 3 bis una pendiente límite i'' para la cual no hace falta carril adicional en ninguna longitud según el CUADRO 9.1.3.B. En todo caso se considerará innecesario cuando la velocidad del vehículo alcance 45 km/h. según la figura citada. (*)

La longitud mínima del carril adicional vendrá dada en el

(*) Pueden usarse también las figuras 2 bis. Indican directamente donde hace falta carril lento con la 3 bis. Los cuadros 9.1.1 están calculados a partir de ellos.

CUADRO C. 9.1.1.C.
LONGITUD MINIMA DEL CARRIL ADICIONAL

| Tipo de tramo de autopista | Longitud mínima |
|----------------------------|-----------------|
| A-140 | 500 m. |
| A-120 | 400 m. |
| A-100 | 350 m. |
| A-80 | 300 m. |

Si el carril lento no alcanza esa longitud, no se dispondrá.

Se dispondrá antes del carril adicional una transición de 50 m y se prolongará a partir del punto en que deja de ser necesaria una distancia en metros igual a:

- 1,2 veces la distancia de visibilidad de parada correspondiente a la velocidad de proyecto, y a la inclinación en ese tramo, si el carril adicional se dispone a la izquierda de la calzada.
- 0,8 veces esa distancia si se dispone a la derecha de la calzada.

9.2. Comentario.

a) Lo anterior tiene el inconveniente de exigir una elección de Nivel de Servicio.

b) Se incluye una limitación de 45 km/h. para eliminar carriles lentos por debajo del 3% y aumentar la complitud del articulado.

c) Al estar hecho con gráficos (3 bis) correspondientes a los de 8-10 C.V.T. de la referencia (4) (H.C.M.) parece que se obtendrían en los cuadros distancias excesivas.

Sin embargo los cuadros de la página 258 de la referencia (4) indican, a través de coeficientes de equivalencia, distancias en general mayores, del orden del doble en su parte baja que corresponde a pendientes del 5 y 6%.

Como los vehículos pesados americanos son más potentes, siendo las distancias de desaceleración de la figura 5.1. de la referencia 4 como del doble de las de la figura 3 de esta Nota, resulta que una cosa puede compensarse con la otra.

d) Salvo estudio experimental en condiciones españolas, extrapolado al futuro, toda indicación debe comportar una "decisión razonada" sobre hipótesis de tráfico aproximadas.

e) La decisión no puede ser únicamente económica en carreteras de sentidos separados, porque es muy imprecisa la valoración monetaria de los factores que intervienen. En las de "una calzada para dos sentidos" lo es menos.

f) Aunque procedan del H.C.M., los resultados numéricos pueden ser discutibles. Especialmente para $i=3\%$ las intensidades de los cuadros pueden parecer bajas.

g) Los cuadros proceden de la figura 2 bis que ha tenido en cuenta un factor de hora punta, reductor de intensidades.

h) Se ha comprobado con algún ejemplo que los resultados cuadran con la realidad.

i) Esta propuesta es aplicación a autopistas de la referencia (7), con un ligero cambio de relación peso/potencia y alguna elección numérica.

10. CONCLUSIONES.

Según lo que precede, en el establecimiento de carriles lentos es importante considerar la posibilidad de adelantamiento a través de la estimación de los vehículos ligeros acumulados detrás de un pesado.

Esto es debido a que en rampa los vehículos ligeros se acumulan en poco espacio detrás de los pesados.

En 5.4.3. se cita un ejemplo real en el que hacen falta 300 m. en rampa y 6 km. en llano de longitud media sin adelantamiento para que no haya ligeros que no estén detrás de un pesado. (*)

Se ha procurado asimismo relacionar las teorías del Nivel de Servicio con las basadas en la rentabilidad, por estimar que las primeras deben ser ajustadas para pendientes fuertes en las que es deseable una velocidad media menor que en llano.

SUMARIO

Se pasan en revista criterios usuales de establecimiento de carril lento.

Para enjuiciarlos se establecen criterios económicos de análisis para cuya aplicación se estudia la acumulación de ligeros detrás de los pesados, llegando a conclusiones de donde se debe de establecer un carril lento por análisis marginal de rentabilidad. A continuación se expone una posible presentación práctica que tiene en cuenta estos resultados y los de la Teoría de Tráfico actualmente en uso. Se concluye que en rampas es importante considerar la posibilidad de adelantamiento al situar los carriles lentos, a través del estudio del número de ligeros detrás de un pesado en un punto.

(*) Por supuesto el resultado es aproximado, pero es significativo.

EQUIVALENCIA DE UN VEHICULO PESADO EN LIGEROS
 (Deducida aproximadamente de la H.C.M., referencia 4 por
 cambio de unidades y escalas)

DE APLICACION PRINCIPALMENTE EN CARRETERAS DE DOS CARRILES

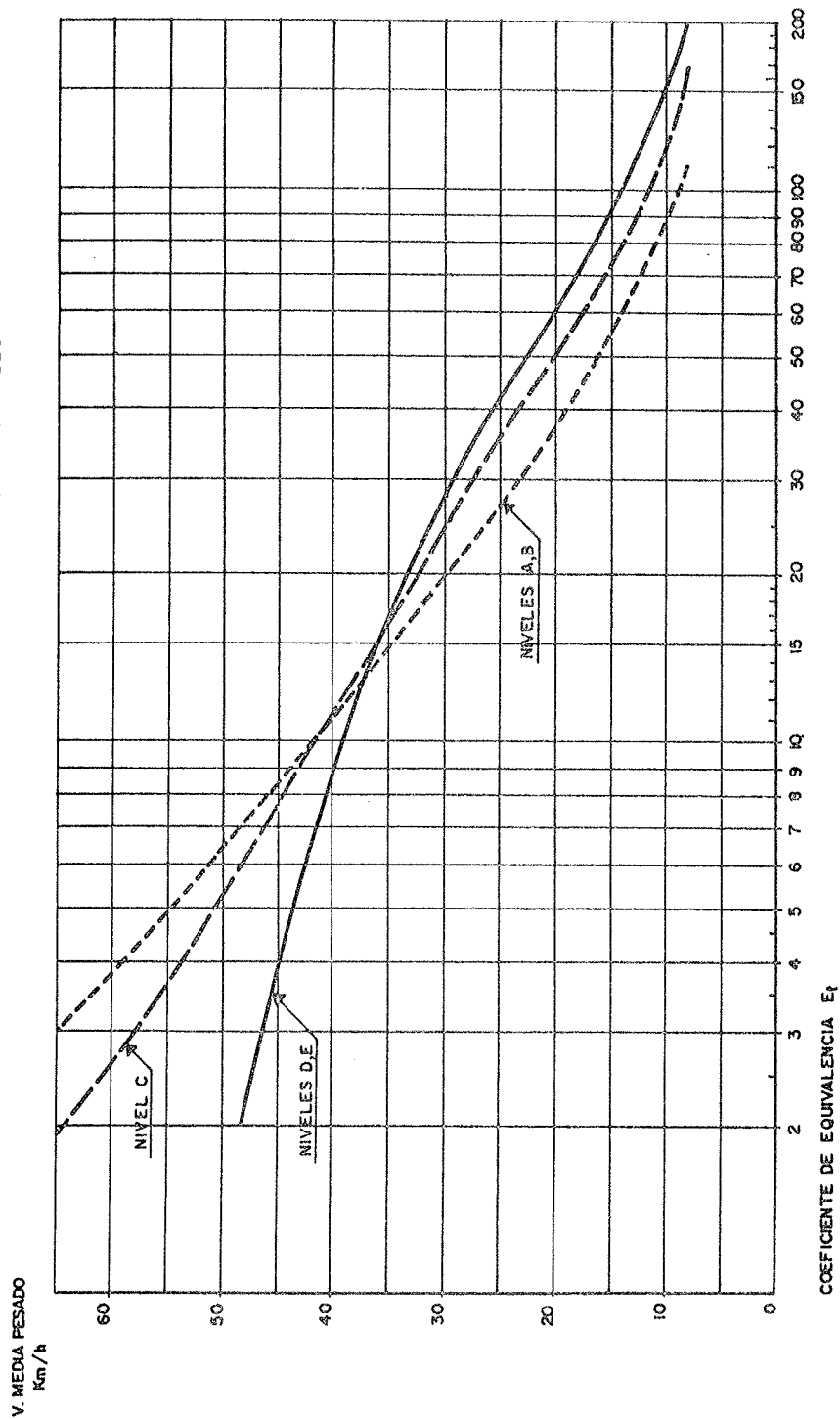


Fig. 1

**CAPACIDAD TOTAL VEHICULOS HORA DE UNA CARRETERA DE DOS CARRILES
PARA AMBOS SENTIDOS (SEGUN HIPOTESIS H.C.M. REFERENCIA 4)**

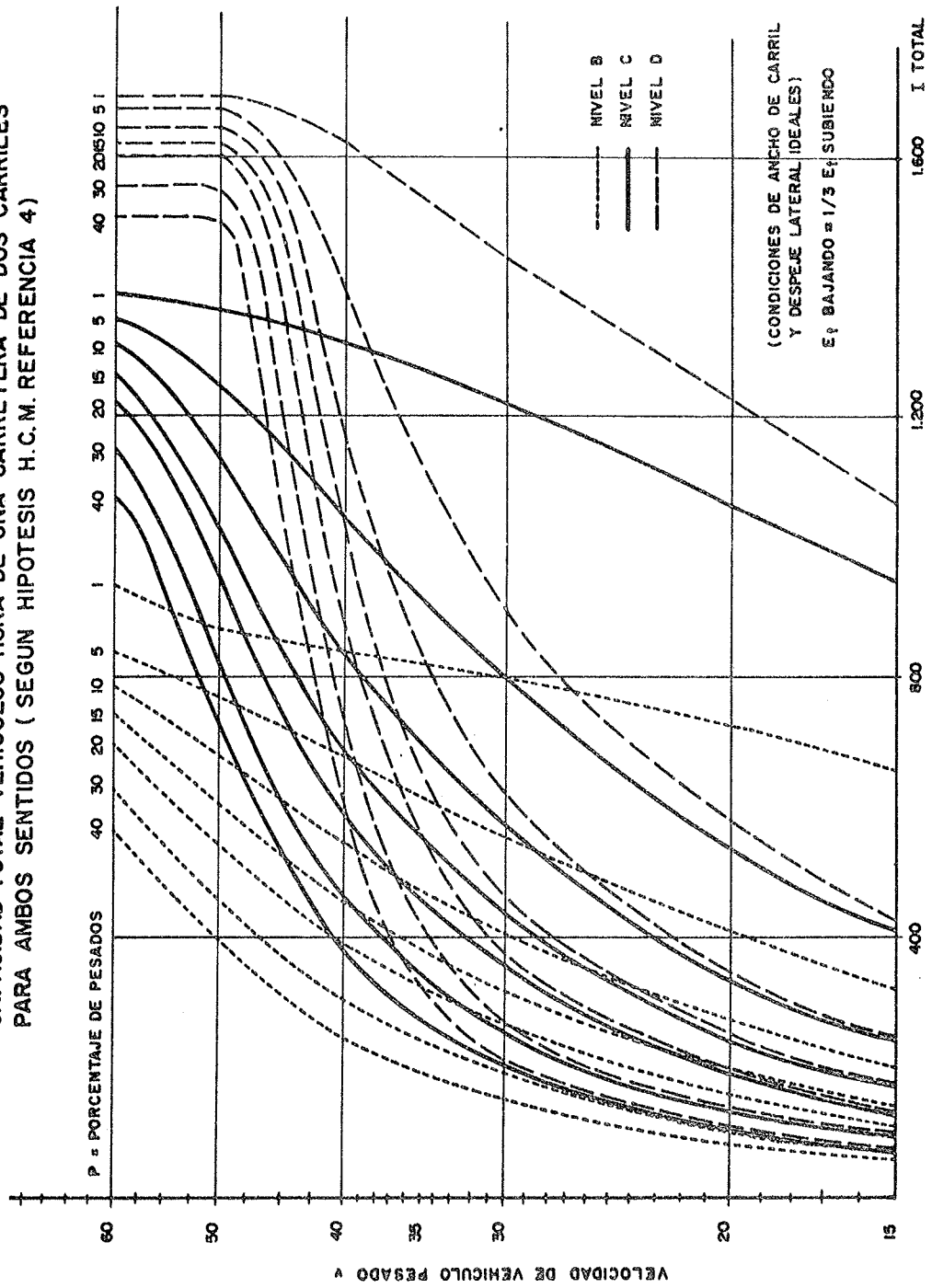
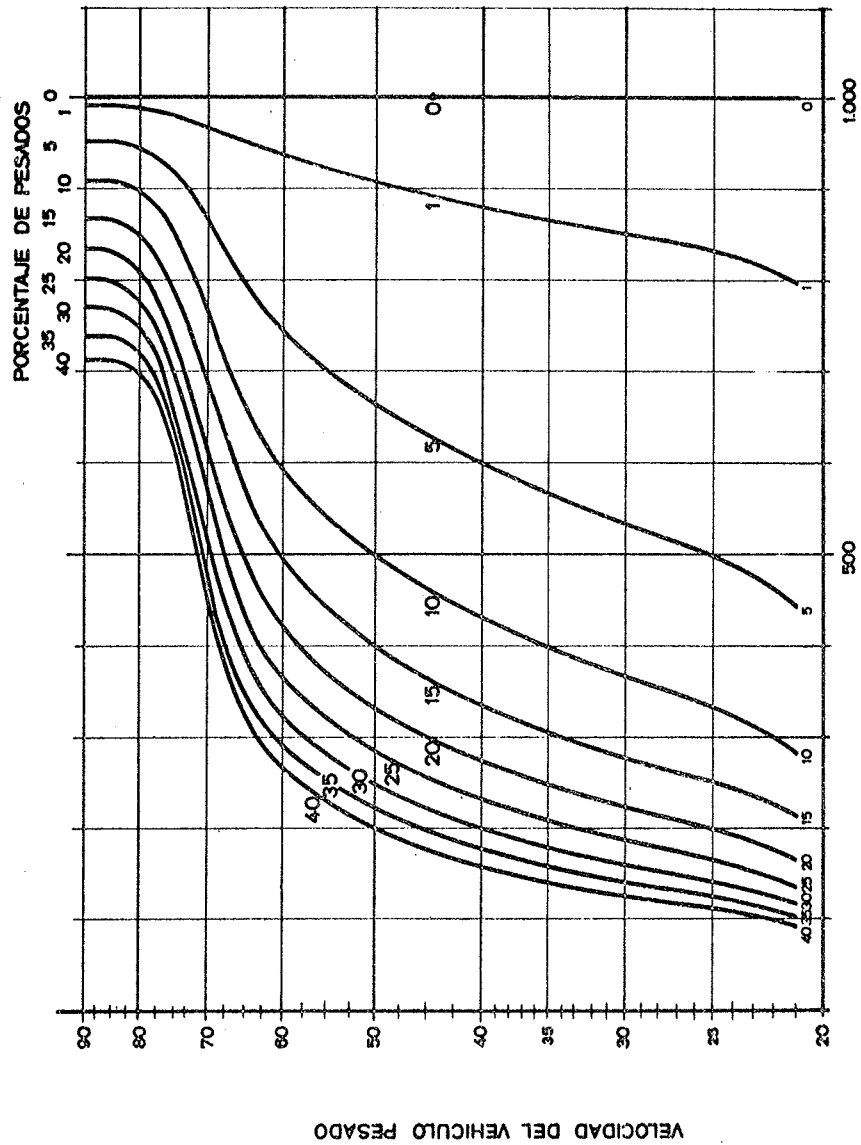


Fig. 2

CONDICION PARA MANTENER EL NIVEL DE SERVICIO B EN AUTOPISTA
 (A EFECTOS DE QUE SEA NECESARIO CARRIL ADICIONAL EN UNA SECCION)

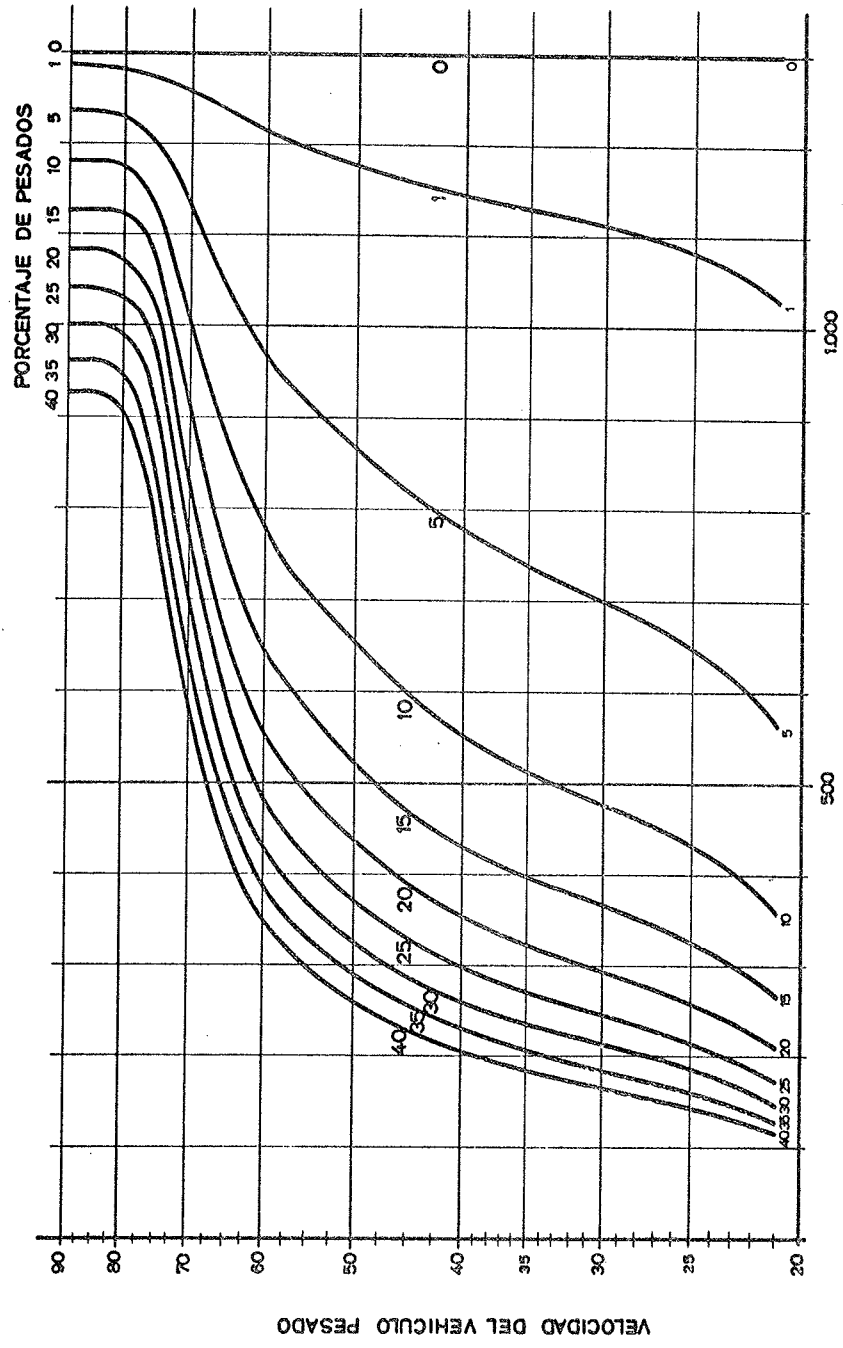


VEHICULOS TOTALES POR HORA Y POR CARRIL

NOTA - SI HAY MAS DE DOS CARRILES POR SENTIDO, DIVIDIR LA ABCISA POR 1.2 ANTES DE ENTRAR EN EL GRAFICO.

Fig. 2 bis 1

CONDICION PARA MANTENER EL NIVEL DE SERVICIO C EN AUTOPISTA
 (A EFECTOS DE QUE SEA NECESARIO CARRIL ADICIONAL EN UNA SECCION)

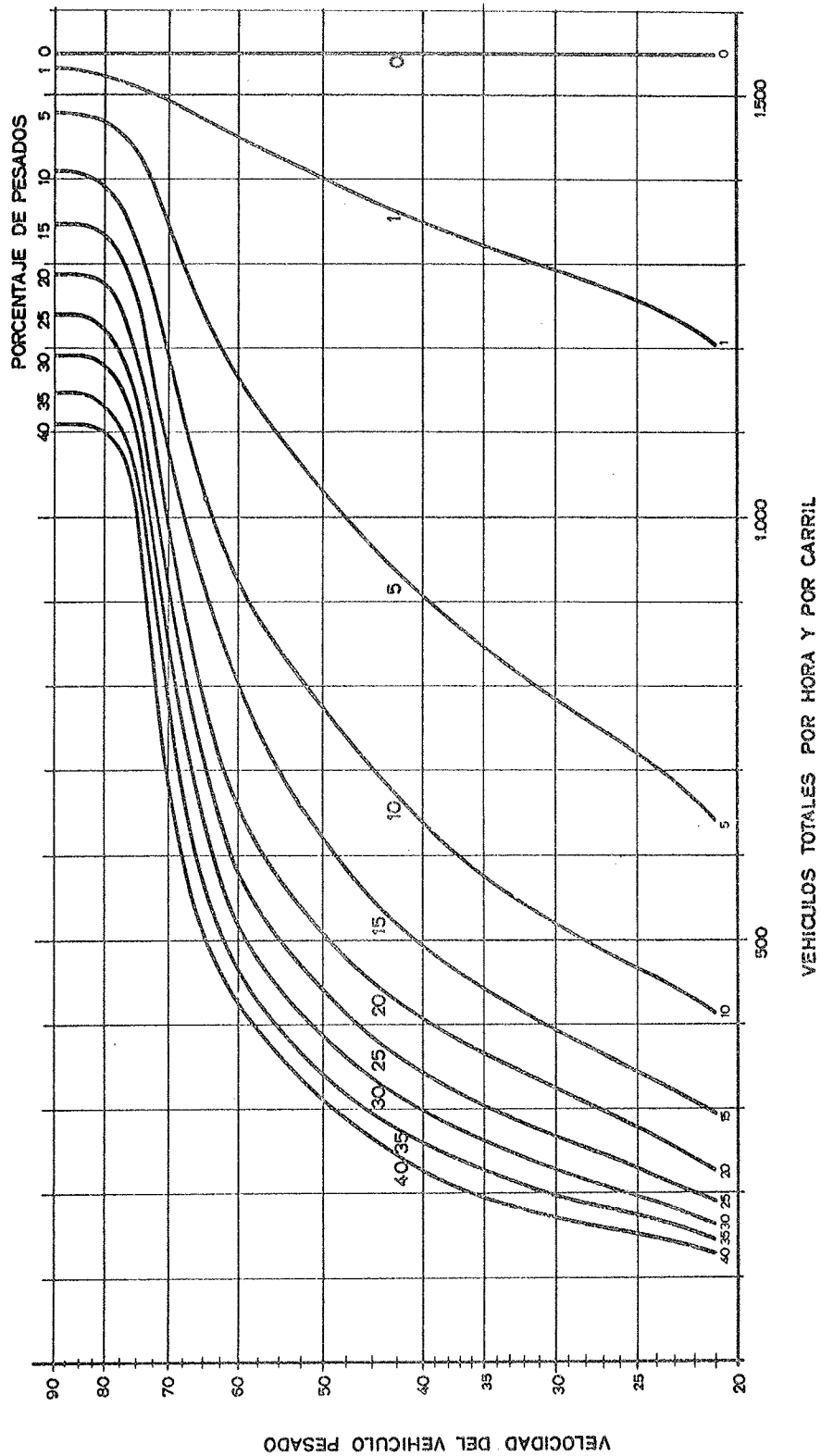


VEHICULOS TOTALES POR HORA Y POR CARRIL

NOTA. - SI HAY MAS DE DOS CARRILES POR SENTIDO, DIVDIR LA ABCISA POR 1.2 ANTES DE ENTRAR EN EL GRAFICO

Fig. 2 bis 2

CONDICION PARA MANTENER EL NIVEL DE SERVICIO D EN AUTOPISTA
 (A EFECTOS DE QUE SEA NECESARIO CARRIL ADICIONAL EN UNA SECCION)



NOTA.- SI HAY MAS DE DOS CARRILES POR SENTIDO, DIVIDIR LA ABCISA POR 1.1 ANTES DE ENTRAR EN EL GRAFICO

Fig. 2 bis 3

CURVAS DE ACELERACION Y DE DECELERACION DE UN VEHICULO PESADO
 (6 C.V nominales por T)

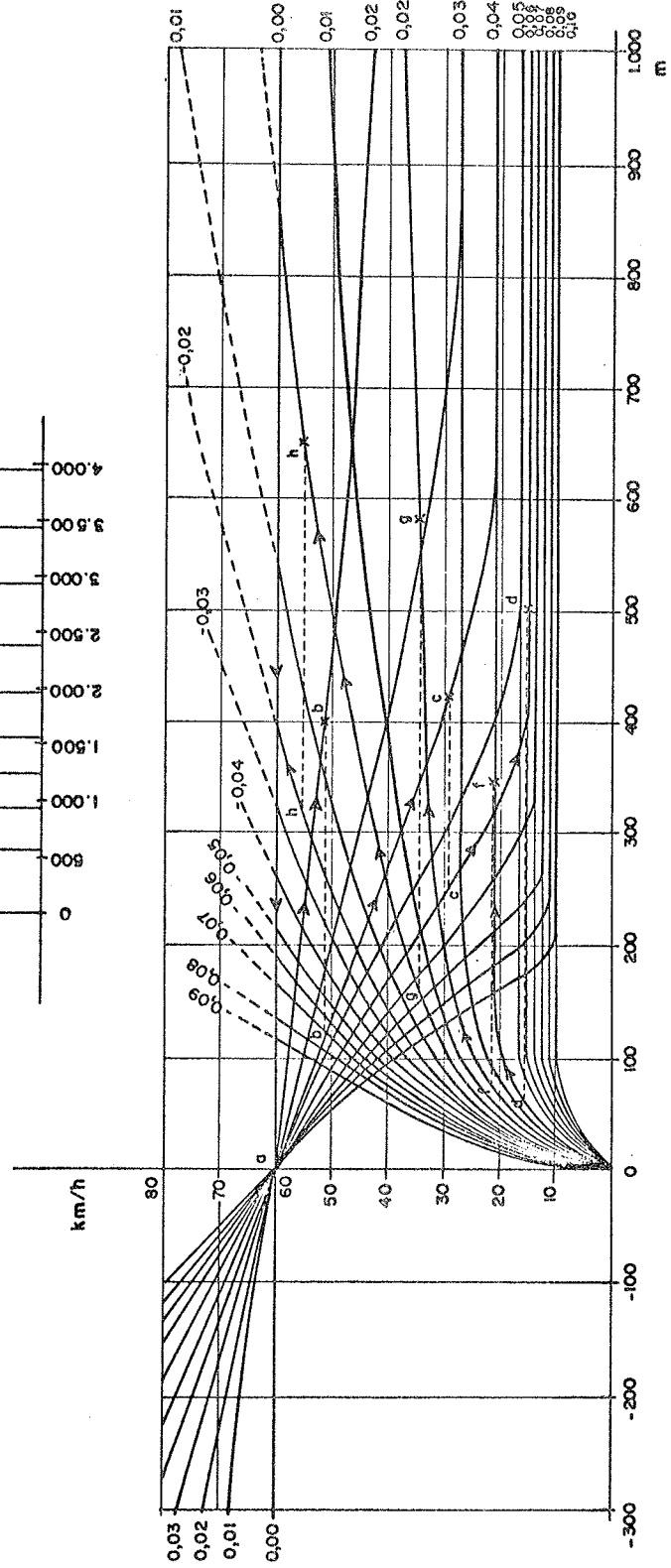
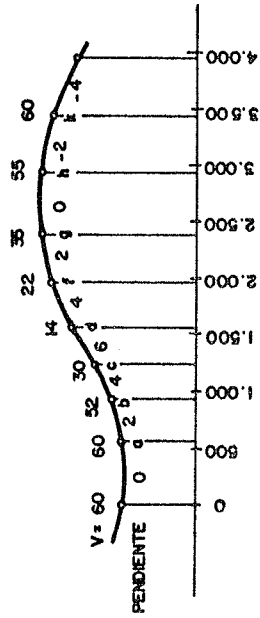
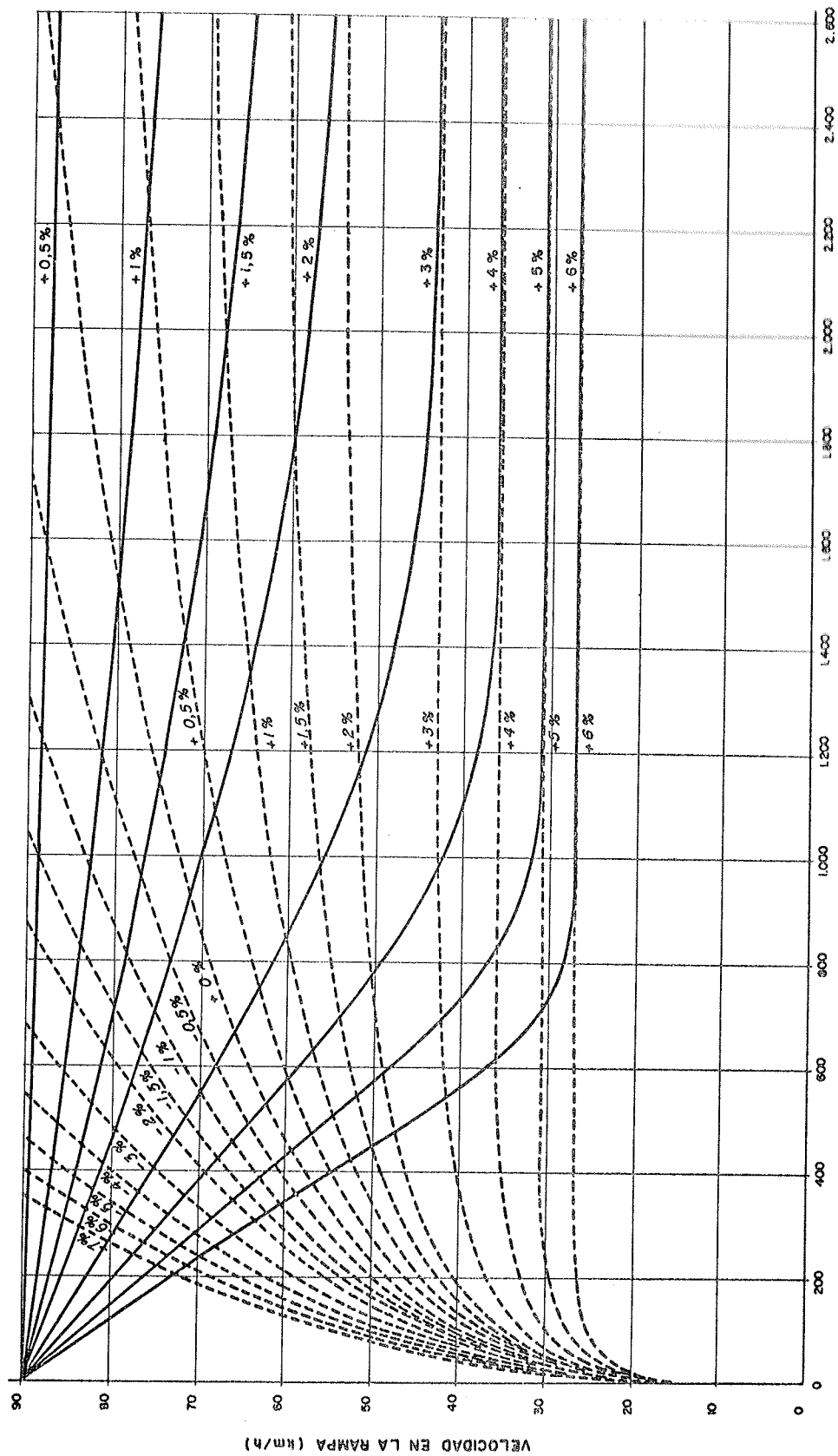


Fig. 3

INFLUENCIA DE LA LONGITUD Y DE LA PENDIENTE DE UNA RAMPA EN LA VELOCIDAD DE UN CAMION



DISTANCIA RECORRIDA (metros)

Fig. 3 bis

VEHICULO PESADO EN RAMPA SEGUN NORMA SUIZA (# 8 CV/T)

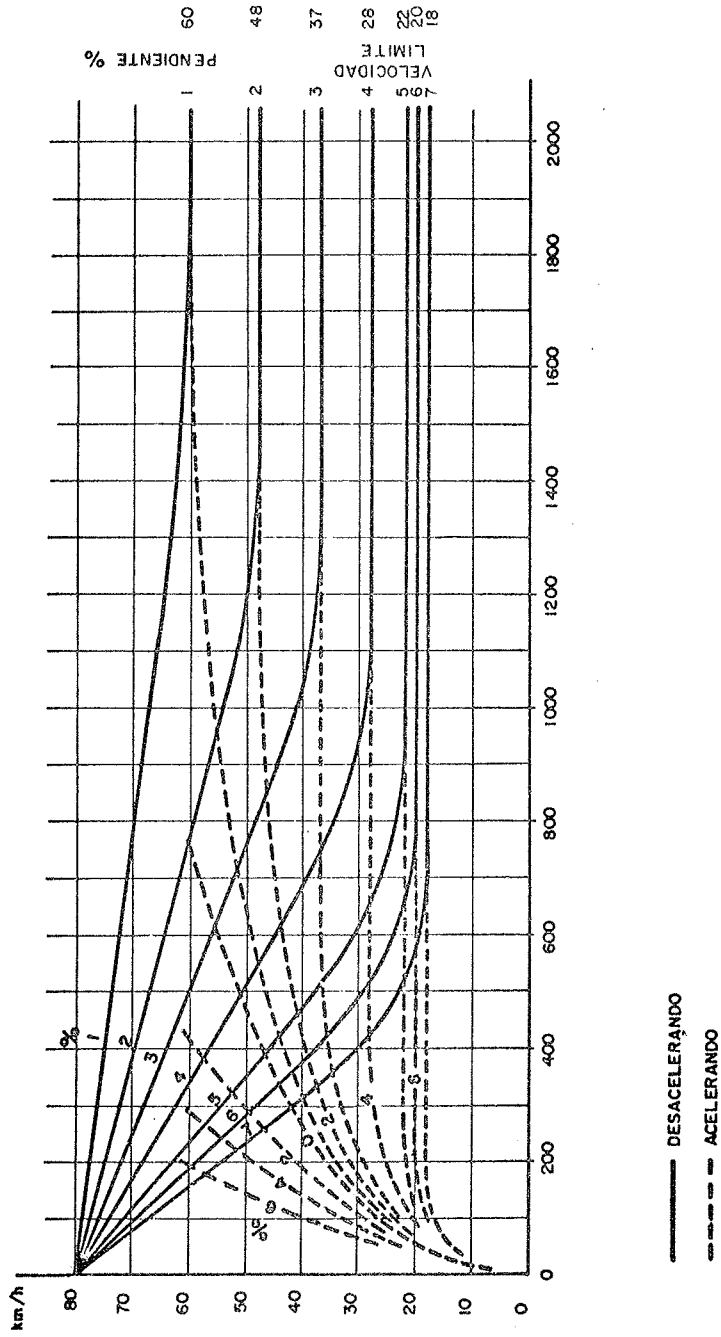


Fig. 3 bis bis

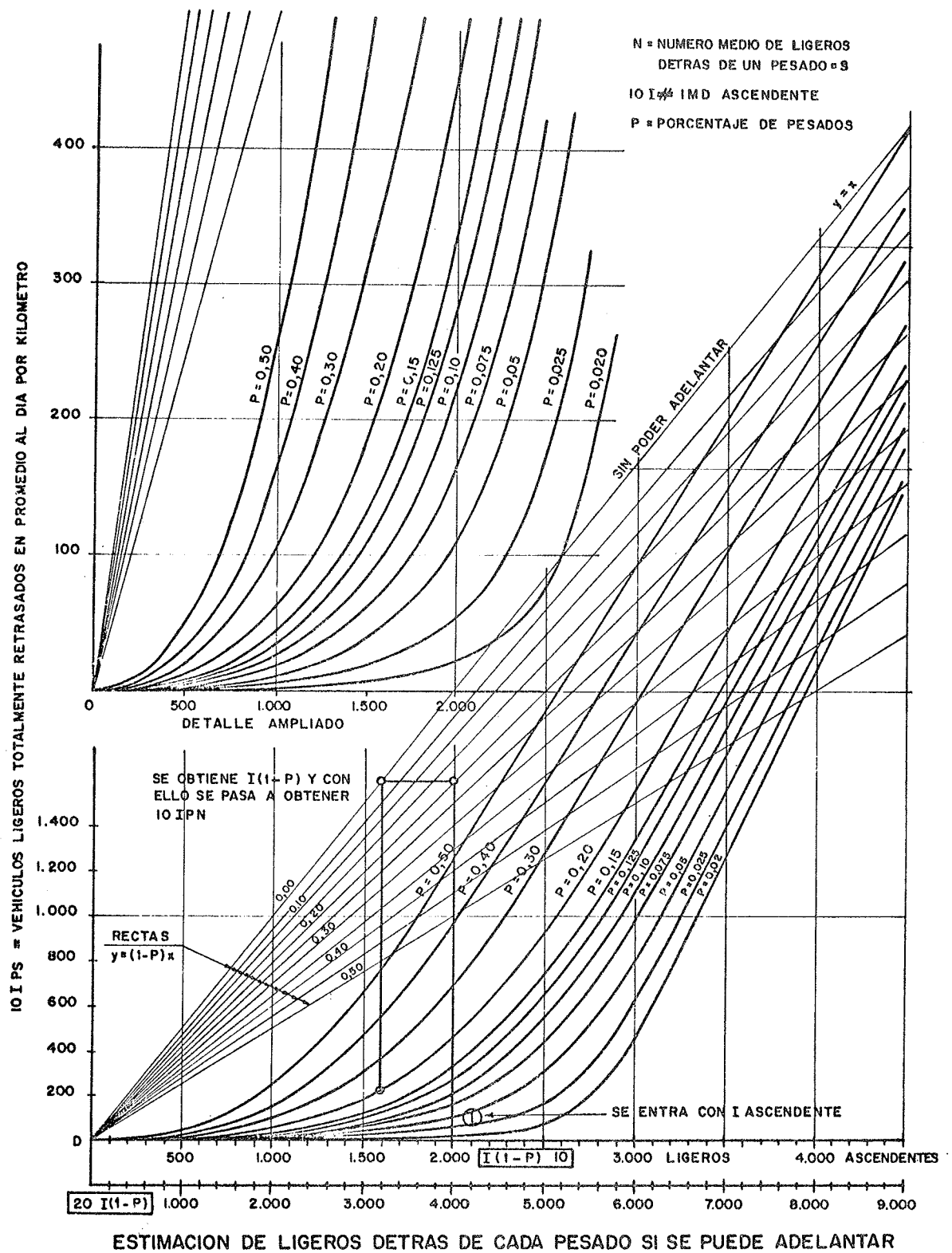
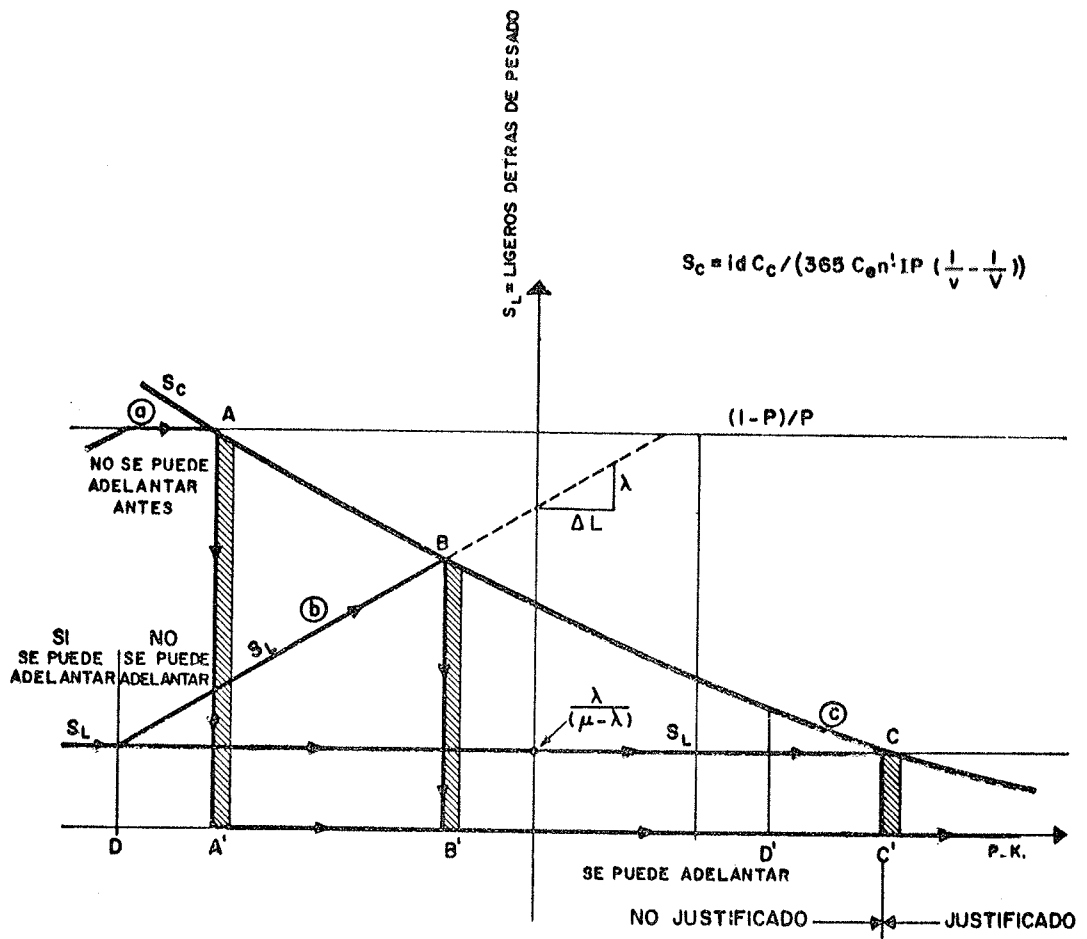


Fig. 4

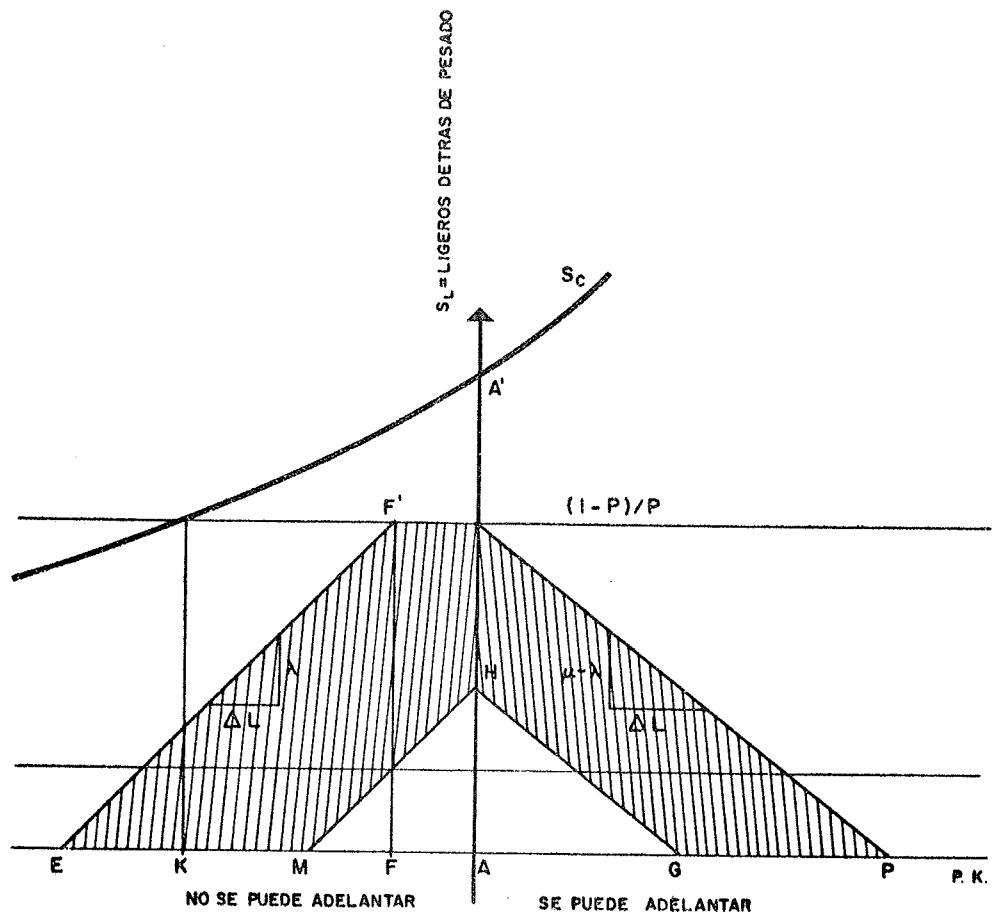


SITUACION DEL PUNTO INICIAL

PUNTOS OPTIMOS (A', B', C') EN TRES CASOS

- Ⓐ - A' NO SE PUEDE ADELANTAR $S_c > (1-P)/P$
- Ⓑ - B' NO SE PUEDE ADELANTAR Y $S_c < (1-P)/P$
- Ⓒ - C' SE PUEDE ADELANTAR

Fig. 5



CASO DE DUDA EN LA SITUACION DEL PUNTO FINAL

$$EK = EF/3 = \frac{1}{3\pi(\frac{1}{V_h} - \frac{1}{V})}$$

Fig. 7

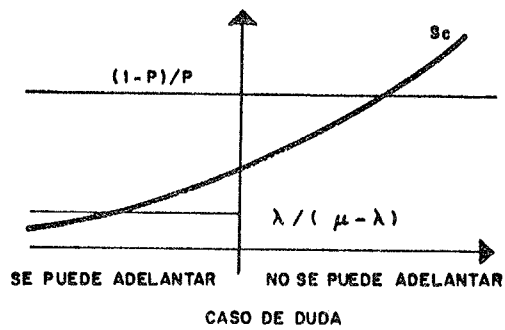
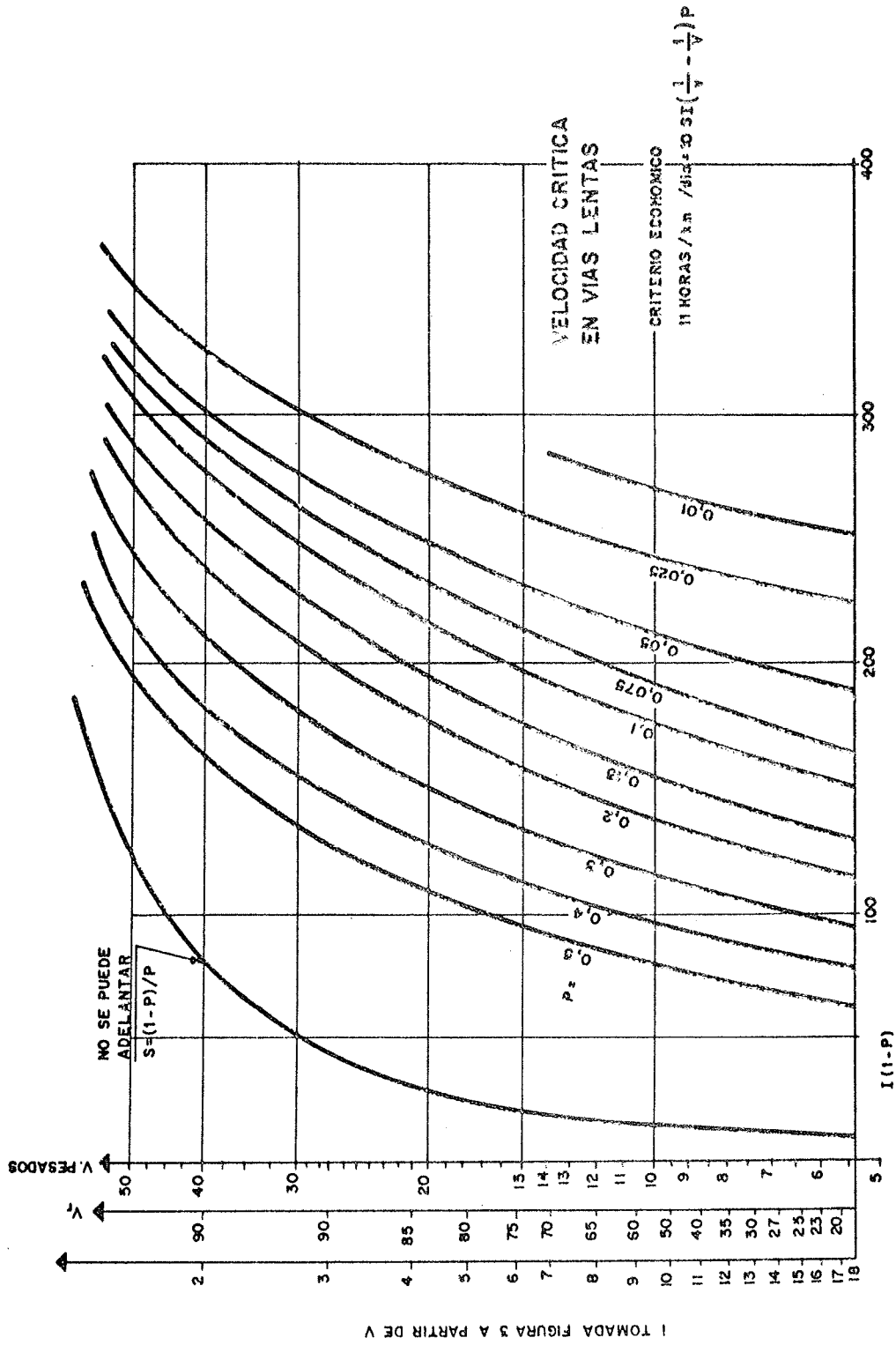


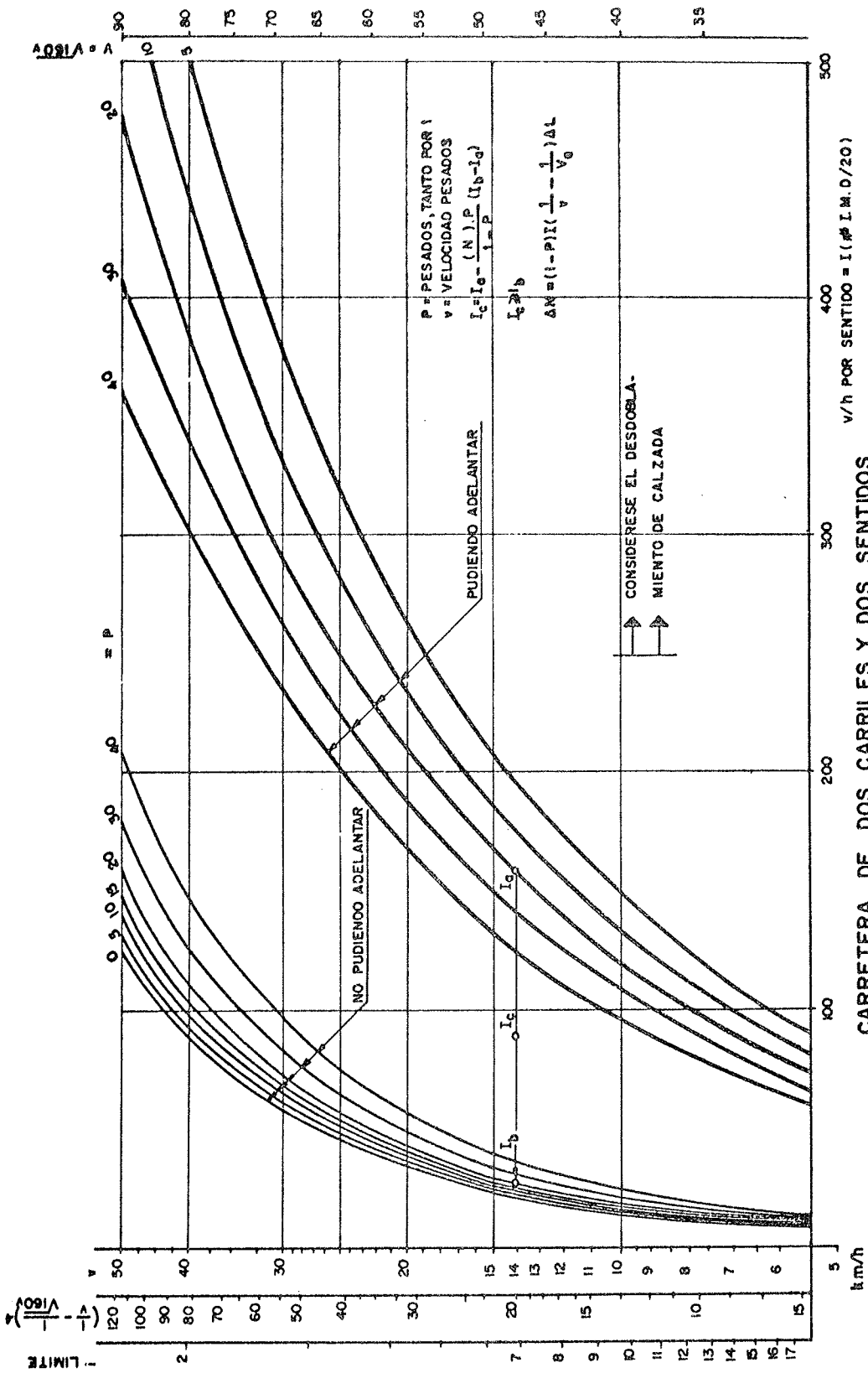
Fig. 7 bis



LIGEROS ASCENDENTES * $IND(1-P)/20$

V_r ES VALOR PLAUSIBLE A PARTIR DE v

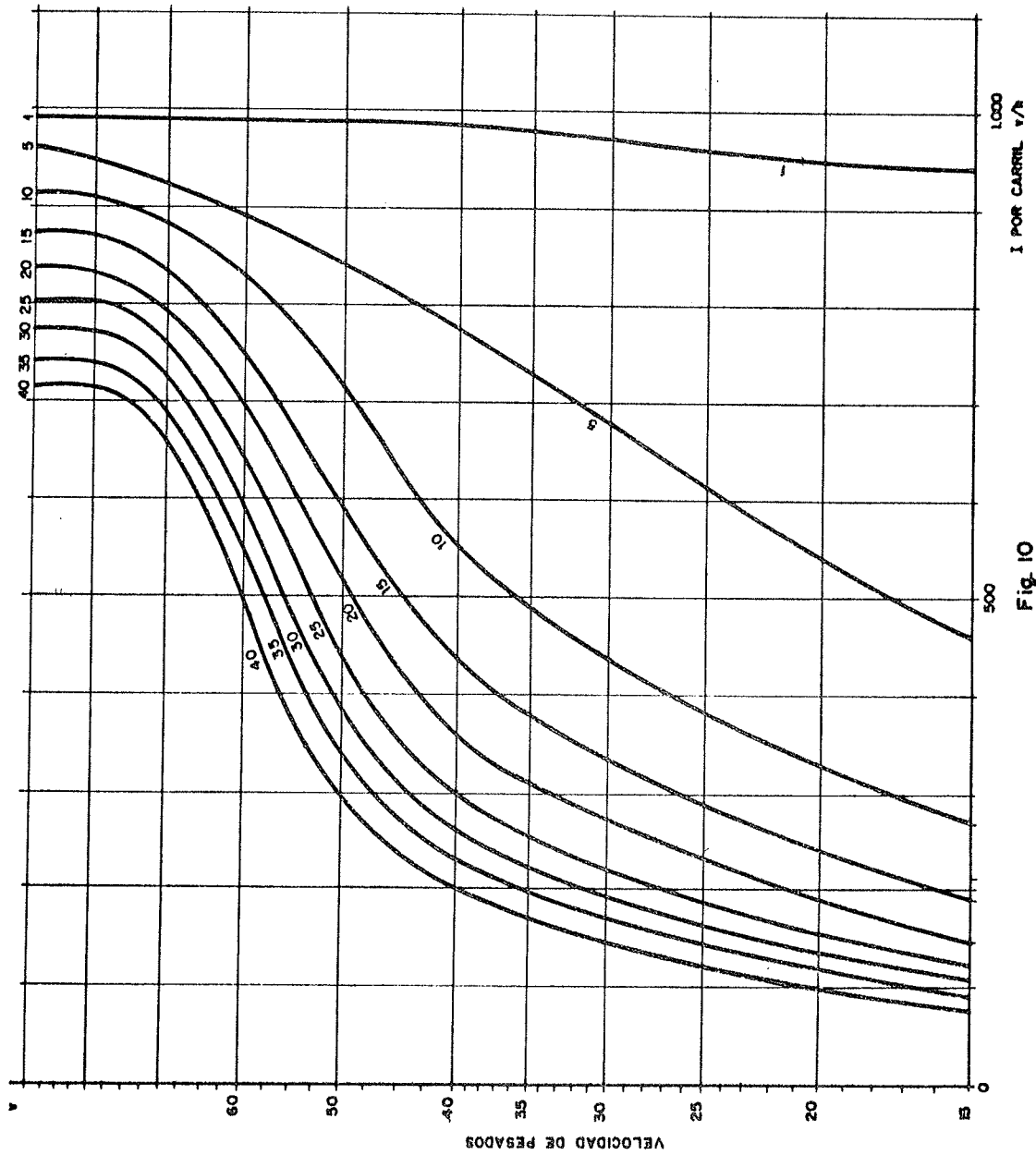
Fig. 8



CARRETERA DE DOS CARRILES Y DOS SENTIDOS
 NECESIDAD DE CARRIL LENTO

Fig. 9

NECESIDAD DE CARRIL LENTO EN AUTOVIAS Y AUTOPISTAS



SI ≥ 3 CARRILES
MULTIPLICAR I POR 1,2

Fig. 10

REFERENCIAS

- (1) — Valdés A. (de la Rica, S., Gullón M., Azcoiti M.), Ingeniería de Tráfico, Dossat, Madrid, 1971.
 - (2) — Recomendaciones para el Proyecto de Enlaces (M.O.P. Dirección Gral. de Carreteras y Caminos Vecinales.). 1968.
 - (3) — Recomendaciones para el Proyecto de intersecciones. (M.O.P. Dirección Gral. de Carreteras y Caminos Vecinales) 1967.
 - (4) — Highway Research Board, Highway Capacity Manual 1965, Washington, U.S.A.
 - (5) — Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (con la colaboración del C.E.E.O.P y de la D.G.C.). Curso de Ingeniería de Tráfico, Madrid, Abril 1967.
 - (6) — Cursos de tráfico (1968, 1969, 1971) del Instituto de Estudios de Administración Local.
 - (7) — Carriles adicionales para vehículos lentos (Nota interna Dirección Gral. de Carreteras o apuntes E.T.M. de Ingenieros de Obras Públicas, Sección 15). (*)
 - (8) — 3.1.I.C. Instrucción de Carreteras. Características Geométricas. M.O.P.
 - (9) — Instruction sur les conditions Techniques d'aménagement des routes nationales. Ministère de l'équipement et du logement. Francia.
 - (10) — Association Suisse de Normalisation. S.N.V. 40 138, Tracé, longueur des déclivites, Voies lentes.
 - (11) — Caminos (José Luis Escario, Ventura Escario), 2 tomos. Publicaciones E.T.S.I. Caminos C.P.
 - (12) — Transportation Research, Dec. 74, Behavior of vehicles along roads for which passing is not permitted, p.517 a 526, Pergamon Press, Oxford.
 - (13) — Carreteras de dos carriles. (Servicio de Investigación de Carreteras de la O.E.C.D.) Boletín del Laboratorio T. y M.S. VII-VIII, 1973.
 - (14) — Revue générale des routes et aerodromes, décembre 74, Projets routiers; normes et paramètres.
 - (15) — Disposición de carriles adicionales para vehículos lentos teniendo en cuenta las acumulaciones de ligeros detrás de un pesado cuando no se puede adelantar. J. M. Antón, IX Semana de la Carretera, Asociación Española de la Carretera, Mayo 74 (contiene parte de los capítulos 7-8 de este estudio).
- (*)Elaborada en la División de Conservación de la D.G. de Carreteras hacia 1969, por S. González Alvarez-Buhilla.

INDICE

| | Página |
|---|--------|
| 1. — INTRODUCCION | 2 |
| 2. — INDICACION SOBRE INSTRUCCIONES VIGENTES | 3 |
| 2.1. Generalidades | 3 |
| 2.2. 3.1.I.C. | 3 |
| 2.3. Análisis de Capacidad | 4 |
| 2.4. Defectos y otras normas | 6 |
| 2.5. Curvas de Nivel de Servicio en Autopista | 6 |
| 3. — VELOCIDAD DE VEHICULO LENTO EN RAMPA | 7 |
| 4. — PRINCIPIOS DE OPTIMIZACION ECONOMICA | 8 |
| 4.1. Teorías de inversiones | 9 |
| 4.2. Cálculo de Tat con una I.H.P. | 9 |
| 4.3. Crítica | 10 |
| 4.4. La optimización global | 10 |
| 5. — TEORIA DE COLAS (DE VEHICULOS LIGEROS DETRAS DE VEHICULOS PESADOS)..... | 11 |
| 5.1. Ecuación de la probabilidad que da Tat | 11 |
| 5.2. Cálculo de S_L | 12 |
| 5.3. Estudio simplificado de S_L | 13 |
| 5.4. Estimación de λ, μ y ΔL | 14 |
| 5.4.1. Estimación teórica | 14 |
| 5.4.2. Estimación numérica | 15 |
| 5.4.3. Algunas consecuencias cualitativas | 16 |
| 5.4.4. Estimación de S_L (colas en rampas indefinidas si se puede adelantar) | 17 |
| 5.4.5. Observaciones | 19 |
| 5.5. Necesidad de carril lento | 20 |
| 5.5.1. Se denomina punto crítico de abcisa L crítico | 20 |
| 5.5.2. Por definición se dice que en un punto está "justificado poner carril lento" | 20 |
| 5.5.3. Según el apartado 5.1., es preciso estimar el tiempo ganado al establecer un carril lento de L_1 a L_2 que es Tat. | 20 |
| 5.5.4. De la forma de la integral se desprende una clasificación de los puntos | 21 |
| 5.5.5. Puntos inicial y final del carril lento | 22 |
| 5.5.5.1. Punto inicial | 22 |
| 5.5.5.2. Punto final | 23 |
| 6. — APLICACION PRACTICA | 27 |

| | Página |
|---|--------|
| 7. — UNA PRESENTACION ADAPTADA | 27 |
| 7.1. Principios | 28 |
| 7.1.1. Comentario | 28 |
| 7.2. Carreteras con calzadas desdobladas | 29 |
| 7.2.1. Comentario | 29 |
| 7.3. Carreteras de dos sentidos y una calzada | 29 |
| 7.3.1. Comentarios | 30 |
| 7.4. Puntos inicial y final | 31 |
| 7.4.1. Comentario | 31 |
| 7.5. Otros factores | 32 |
| 7.5.1. Comentario | 32 |
| 7.6. Carriles apartadero | 32 |
| 7.6.1. Comentario | 32 |
| 7.7. Disposiciones del punto inicial y final | 33 |
| 7.8. Observación | 34 |
| 7.9. Observación general | 35 |
| 8. — ALGUNAS EXTENSIONES TEORICAS POSIBLES | 35 |
| 8.1. Llegadas aleatorias | 35 |
| 8.2. Definiciones de velocidades | 36 |
| 8.3. Carriles adicionales en bajada | 36 |
| 8.4. Señalización | 37 |
| 8.5. Ensanchamiento de carreteras estrechas | 37 |
| 8.6. Pasos a nivel | 38 |
| 9. — UNA POSIBLE PROPUESTA PARA AUTOPISTAS | 39 |
| 9.1. Posible propuesta | 39 |
| 9.1.1. Carriles adicionales | 39 |
| 9.2. Comentario | 44 |
| 10. — CONCLUSIONES | 45 |
| SUMARIO | 45 |
| REFERENCIAS | 61 |